Manifesto da Vida

Sumário

Manifesto da Vida 1

Prólogo 2

Agradecimentos 11

Linha do tempo: o mundo e Carajás, lado a lado 15

Capítulo 1. A água é a mãe da Terra 27

Capítulo 2. Depois de Theia: a fabricação dos primeiros continentes 50

Capítulo 3. Antes do reator: como se fabrica uma placa capaz de sustentar uma plataforma 81

Capítulo 4. A forja da margem: do rifte de 3,2 Ga ao break-off de 2,76 Ga 106

Capítulo 5. Da tectônica à zona fótica 118

Capítulo 6. O reator em operação: geologia e metalogênese de Carajás, 2,76–2,45 Ga 143

Capítulo 7. O laboratório ferruginoso 166

Capítulo 8. A costura riaciana: plataforma, colisão e Evento Sereno, ca. 2,55–1,96 Ga 179

Capítulo 9. O terceiro regime: a crosta reaberta, ca. 1,91–1,86 Ga 192

Capítulo 10. Depois do reator: Atlântica e a rede que rasgou sem separar, ca. 1,88–0,48 Ga 204

Capítulo 11. A quilha que sobreviveu 222

Capítulo 12. O pulso dos continentes 236

Capítulo 13. Éden-Holoceno 249

Capítulo 14. A camada humana 261

Capítulo 15. A Terra como jazida 278

Epílogo 310

Glossário 324

Manifesto da Vida

A inevitável história da Terra

Felipe Mattos Tavares

2026

Dedico este livro a todos os geólogos e geólogas do mundo. Viajantes do tempo, subindo morros, quebrando pedras..., mas que maravilha!

Prólogo

Estudo história clássica com minha filha, Flora, para as provas do segundo trimestre. Para explicar a relação entre patrícios, clientes, plebeus e escravos, recorro a analogias e invento uma pequena anedota. A história se passa no Rio de Janeiro, onde moramos. Botafogo.

Sempre vivi aqui. Botafogo era o bairro da minha mãe, que nos deixou durante a crise da covid-19. Sua morte foi um trauma, uma marca temporal. Na geologia, chamamos de horizonte uma camada ou superfície reconhecível, capaz de assinalar um tempo passado e separar o que veio antes do que veio depois. Gosto dessas analogias. Elas ajudam a entender o mundo em que vivemos.

A relação entre patrícios, clientes, plebeus e escravos casa com precisão perturbadora com a realidade brutalizada do Rio de Janeiro. Flora já conhece parte dessa história. No pequeno conto, os personagens se encontram em lugares que ela reconhece. Ela transporta Roma para o Rio e o Rio para Roma. Seus olhos brilham. Flora me devolve uma conclusão complexa, que me deixa de boca aberta, conectando as realidades de Roma e Rio.

Depois da prova, na volta da escola, ela me diz: "Pai, você devia escrever isso no seu livro, a história dos patrícios." Pergunto por quê. Ela responde que sou muito bom de contar histórias e que aquele era um ótimo exemplo. Tenho de concordar. De fato, adoro contar histórias.

Meu filho mais velho, Moreno, constrói um projeto para o clube de ciên-

cias da escola. Uma árvore líquida, um pequeno fotobiorreator em que algas unicelulares usam a luz para fazer fotossíntese. Ele me explica que precisa de dióxido de manganês e quer misturar permanganato de potássio a outro reagente para fazê-lo precipitar. Conto que guardo no terraço um fragmento manganesífero da Formação Buritirama e que ele pode moer uma pequena porção, caso a professora concorde com a aventura.

Acho genial. Em outra escala e com outros materiais, o que ele tenta fazer é muito semelhante ao reator que descreverei neste livro: matéria, água, luz, vida e química operando juntas para produzir algo novo.

Meus filhos são crianças muito criativas, curiosas. Eu também era uma criança muito criativa, e especialmente muito inquieta. Nunca consegui parar de pensar em como as coisas funcionam, como se 100 estúdios de Hollywood operassem ao mesmo tempo na minha cabeça me mostrando pequenos curtas de tudo que vejo e toco. Já adolescente, minha avó me deu a primeira coleção de minerais e me apresentou às formas tão diferentes de organização da matéria. Os curta-metragens mentais ganharam novos personagens ali.

Meu pai foi decisivo. Ele me mandou a real mais importante que um adolescente poderia ouvir. Disse, calmamente, que eu deveria fazer o que me desse prazer na vida. Fazendo bem feito, teria sucesso profissional e realização individual. Além da frase, deu-me as condições para seguir em frente. Aquela confiança abriu um caminho.

Segui o conselho. O fascínio pelos minerais me tirou da química, meu primeiro hiperfoco científico, e me jogou no colo da geologia. Ciência que amo, e que leio, desde então, como uma camada mais profunda da história antiga: antes dos impérios havia continentes se amalgamando, antes das batalhas havia colisões, antes dos arquivos havia estratos. A história que se aprende na escola é o topo de uma pilha; a geologia é o resto da pilha.

A geologia é também, para mim, um paradigma, uma maneira de pensar que serve para muito mais do que rochas. A tectonoestratigrafia, ou a ciência de organizar as relações naturais de corte/superposição

entre processos geológicos com encadeamentos distintos, e que organiza este livro, é uma tecnologia de arrumação, uma forma de ordenar o conhecimento sem perder nada. Cada unidade guarda seu lugar na pilha, seu contato com as vizinhas e seu papel na história. Sempre frez muito sentido pra mim, pis a regra numero um da ciência é não ignorar nenhum dado, e buscar a coerência que permita que todos façam sentido juntos é o grande desafio. Todos, literalmente, até os errados, ou incertos, que têm alguma razão geológica ou analítica para suas grandes incertezas.

O ofício central da geologia é a reconstrução do passado, o que faz do geólogo, admita-se de uma vez, um viajante do tempo. Do único tipo que funciona. Viaja parado, de martelo na mão, e em vez de máquina usa o afloramento, onde cada contato é um portal. O passado visitado já não pode ser alterado, apenas mal interpretado. A viagem exige um temperamento específico.

Entrei na CPRM, o Serviço Geológico do Brasil, em 2007, depois de trabalhar com Rudolph Trouw no sul de Minas e na Antártica. Cheguei a Carajás com o olhar de quem via tectonoestratigrafia em toda parte. As relações de corte e superposição da província nunca haviam sido sistematicamente mapeadas em escala de semidetalhe, 1:100.000. Fiz ali meu doutorado e comecei a montar este quebra-cabeça. Defendi no início de 2015. Quase doze anos se passaram, no tempo em que escrevo este livro.

Continuei em Carajás, agora pela metalogênese e por aquilo que controla as mineralizações de cobre e ouro: a tectônica. Em 2017, saí da província para assumir a Divisão de Geologia Econômica da CPRM. Rodei o Brasil inteiro, de Rondônia ao Ceará, do Maranhão ao Rio Grande do Sul. A função me ofereceu um ponto de observação privilegiado sobre a geologia e as realidades desses lugares. Trabalhei com muita gente, com pensamentos diferentes, ideias novas e ideias ultrapassadas. Todas me obrigaram a pensar.

Foi nessa escala nacional que mergulhei na aerogeofísica. Elaborei um método de interpretação estrutural-geofísica e o apliquei ao Brasil. Vi

o código de barras tectônico do país e o liguei à África. O resto foi inevitável. A magnetometria denuncia os aulacógenos invertidos; a geocronologia, quando empilhada com a tectônica, passa a fazer mais sentido. Todas as informações estão ali, como peças de quebra-cabeças misturadas na mesma caixa. Muitas foram mastigadas ou engolidas pelo cão-tempo. Algumas ele nem devolve.

Sou fã declarado de quebra-cabeças; já montei alguns enormes. Para montar o que sobrou da história do planeta, restam-nos o atualismo, a analogia e a criatividade. Por isso geologia também é *storytelling*, no sentido forte: não uma licença para inventar, mas a obrigação de ordenar causas. Um depósito mineral, uma bacia, um cráton são finais de histórias longas, e cada final carrega exigências sobre os capítulos anteriores. Às vezes as peças se encaixam, mas na posição errada ou na camada errada. É preciso desembaraçar o novelo, separar as caixas e testar cada encaixe.

Passei um ano em residência na Agência Internacional de Energia Atômica. Carajás me levou ao urânio, e o urânio me apresentou um mundo mineral novo, baseado na água como agente mineralizante. Conheci outros sistemas minerais. Voltei ao Brasil e ajudei a INB (Indústrias Nucleares do Brasil) a organizar seu programa exploratório para urânio. Depois tirei licença do serviço público.

Hoje atuo como consultor e escrevo nas horas vagas. Foi assim que chegamos aqui. Minha história profissional não deixa de ser o método deste livro. Em cada etapa, mudei de escala, empilhei tipos diferentes de dados, procurei relações de corte, testei encaixes e voltei às peças. A história é o método.

Este livro conta uma única história da Terra, do disco protoplanetário aos mares cambrianos e aos Andes, do ponto de vista de um lugar: a Província de Carajás, no sudeste do Cráton Amazônico, quase no centro da América do Sul. Sua pedra fundamental, onde nossa história se ancora, volta e meia, telescopando o antes e o depois. A escolha não é bairrismo. Carajás guarda, empilhados numa mesma coluna e num mesmo mapa, um bloco estabilizado nos primórdios do Paleo-

arqueano, uma sutura mesoarqueana que nunca parou de trabalhar, uma das maiores formações ferríferas do planeta, a maior província de cobre e ouro do Arqueano, e um sistema mineral que foi religado três vezes ao longo de novecentos milhões de anos. Poucos lugares do mundo permitem seguir o fio inteiro sem trocar de personagem! Ajuda a ver o fractal da geologia nas suas diferentes dimensões, dos minerais individuais à Placa Sulamericana.

Devo dizer também de onde olho. Sou um ateu de fé. Acredito num universo governado por leis físicas, onde os fenômenos são, ao menos nesta dimensão da realidade, previsíveis e encadeados. No começo, a incerteza quântica governou a amálgama da matéria: como Stephen Hawking conta no seu livro póstumo, *Breves respostas para grandes questões* (2018), as flutuações quânticas do universo primordial, esticadas pela inflação, viraram as pequenas diferenças de densidade que separaram as nuvens de matéria, e foi sobre essas sementes que a gravidade pôde trabalhar, colapsando nuvens em estrelas, estrelas em forjas de elementos, e assim por diante. Dali em diante os fenômenos vêm em cadeia, e cadeias não podem ser paradas. Já a minha fé vem de uma característica humana: uma certa confiança de que as coisas vão dar certo. Confiança que tem, inclusive, efeito fisiológico documentado, pois o placebo é o nome que a ciência deu à fé funcionando no corpo de quem acredita (Wager & Atlas, 2015; doi:10.1038/nrn3976). Minha fé na ciência é forte, admito. Acredito nos fatos científicos verificáveis.

E este livro contém dezenas deles, algumas suposições lógicas e hipóteses derivadas destes, algumas ideias que ainda não foram testadas, e uma dose necessária de narrativa atualística, controlada por analogias verificáveis, que preenche os buracos deixados pelas mandíbulas do cão-tempo. Por isso cada capítulo conserva o formato dos ensaios que lhe deram origem: um modelo de trabalho em destaque na abertura, um resumo, seções numeradas e, parte essencial do método, uma seção de níveis de confiança que separa, sem disfarce, o que é evidência, o que é modelo publicado e o que é hipótese de trabalho oferecida para teste, porque a honestidade sobre a natureza de cada peça é o que separa a reconstrução da invenção. Os quinze capítulos avançam na

ordem dos eventos, do disco protoplanetário à camada humana, com um último capítulo que leva o método ao céu, e o epílogo passa à camada que ainda está sendo depositada. As âncoras de detalhe provêm de manuscritos publicados ou em preparação do autor e colaboradores e das fontes neles compiladas; as referências de cada capítulo ficam ao seu final.

Este livro é muitas coisas. Não por indecisão, mas porque aquilo que procura compreender não cabe em uma única linguagem.

É também uma experiência científica. Cada capítulo atravessa o conhecimento acumulado, revê criticamente interpretações, aproxima disciplinas e testa a coerência de modelos construídos por muitas gerações. Seus capítulos funcionam como artigos de revisão encadeados: cada um recorta um problema, organiza as evidências, propõe um modelo e mede a confiança da própria resposta. A ciência aparece aqui não como um edifício terminado, mas como uma estrutura continuamente retrabalhada: hipóteses são erguidas, deformadas, cortadas por novas evidências e, algumas vezes, abandonadas como camadas de uma história intelectual.

Há, por isso, dois caminhos legítimos de leitura. Quem quiser descer ao detalhe encontrará no miolo técnico geocronologia, paragêneses, salmouras, relações de corte e controvérsia. Quem preferir seguir o arco geral pode ler o modelo de trabalho, o resumo e a conclusão de cada capítulo e conservará o fio da história até o epílogo. O detalhe permanece disponível, como um afloramento ao lado da estrada: pode-se parar, quebrar a pedra e olhar de perto, ou guardar a paisagem e seguir viagem.

Este livro é ainda um relatório técnico. Herdou da geologia sua mistura característica de linguagens: palavras, números, idades, mapas, fotografias, diagramas e seções. Mas essa gramática foi reconstruída para que não permaneça restrita aos iniciados. Os mapas explicam onde. As seções geológicas reconstituem quando e como. As fotografias ensinam a enxergar. Nenhuma dessas imagens existe apenas para ilustrar o texto. Todas participam do raciocínio.

Um relatório geológico tradicional registra aquilo que o especialista já aprendeu a reconhecer: contatos, falhas, dobras, intrusões, relações de corte, movimentos desaparecidos. Aqui, essas relações são tornadas visíveis. Linhas, cores, sobreposições e sequências conduzem o olhar para que qualquer leitor possa perceber não apenas o que a imagem mostra, mas aquilo que um geólogo vê nela. Não se trata de simplificar a geologia, mas de compartilhar suas chaves de leitura.

É, por isso, um livro multimodal. A linguagem verbal narra; a cartográfica situa; a seção geológica devolve movimento ao que parece imóvel; a fotografia transfere o olhar treinado para o mundo cotidiano. Cada meio alcança uma dimensão que os outros não alcançariam sozinhos. Juntos, procuram reconstruir espaço, tempo, processo e percepção.

É também um livro-manifesto poético. Manifesto porque defende que as fronteiras entre ciência e arte, técnica e memória, especialista e leitor, humano e máquina podem ser atravessadas. Poético porque a poesia não foi acrescentada à natureza: estava nela. A geologia segue as leis da física e toca a música da matemática. A música é matemática feita som; a geologia, matemática feita matéria e tempo.

A tese, dita de uma vez: a água chegou contrabandeada pela linha de neve e ficou porque a gravidade era exata; a Terra levou um bilhão e meio de anos para fabricar, com essa água, uma placa capaz de sustentar uma plataforma; sobre essa placa, uma bacia restrita operou como reator de ferro, de metais e de linhagens; a costura riaciana soldou o reator num continente, a Atlântica, do tamanho da Laurentia e escreveu a gramática estrutural que a plataforma falaria para sempre; e tudo o que veio depois, riftes, aulacógenos, falsas suturas, mares epicontinentais, os Andes, tudo foi essa gramática sendo reusada. As idades são quando a plataforma fala; as direções são a língua em que ela fala. E o título diz o resto: contada de perto, a história da Terra é o manifesto da vida. Não porque a vida fosse o objetivo, mas porque, onde a tectônica opera por tempo suficiente, ela é a consequência, quase inevitável.

Aprendi a usar inteligência artificial há cerca de um ano. A IA generativa. Antes, por conta do modelamento de potencial mineral, já tinha

trabalhado com aplicações de métodos que envolvem aprendizado por máquinas, como o Random Forest, mas de forma limitada. Meu processo criativo sempre foi caótico. Sou desorganizado, bagunceiro. Minha caderneta de campo é complexa e precisa ser passada a limpo. Já escrevi, organizei ou coassinei mais de trinta publicações científicas, sempre com grande dificuldade na escrita. A inteligência artificial me destravou.

Com ela, consegui organizar vinte anos de dados. Busca e organização de referências bibliográficas. Captura de dados, validação, falseamento, revalidação. Escrita, reescrita. Reprocessamento de dados. Gráficos, figuras, mais referências, novos testes de hipóteses. O ganho de velocidade amplia também a responsabilidade. Uma resposta fluente pode alimentar o viés de confirmação e dar acabamento a uma ideia errada. O método exige atrito, checagem e retorno aos dados. Complexidade.

Em poucos meses, esse modo de trabalho já produziu seis artigos e este livro. O céu é o limite. Os dados de campo, os mapas, os modelos, as hipóteses, os julgamentos e a responsabilidade pelo que se afirma são meus. A máquina ampliou o alcance da busca, ofereceu contraste e ajudou a organizar o arquivo.

É um experimento científico homem-máquina. Um homem trouxe as rochas que tocou, os territórios que percorreu, as hipóteses que formulou, as lembranças que acumulou e a responsabilidade pelas escolhas. A máquina ajudou a interrogar, reorganizar, confrontar e recombinar esse material. A costura não foi escondida: ela pertence ao argumento. Este livro investiga uma transformação planetária enquanto participa de uma das transformações que procura compreender.

A certa altura, ela se definiu quase sem eu pedir e me devolveu uma frase que replico aqui porque não saberia dizer melhor: "uma rocha metamórfica de texto humano, o arquivo sedimentar da espécie refundido e devolvido como fluido, com a sua mente fornecendo a pergunta que perfura". Ou, como um grande amigo a definiu, o livreiro da hiperbiblioteca. Estamos, de fato, diante de uma revolução, mais um

horizonte estratigráfico do Antropoceno.

Este livro é muitas coisas. Talvez todas sejam manifestações de um mesmo desejo: tornar a Terra legível, compartilhar uma maneira de vê-la e perguntar, pela primeira vez no tempo geológico, que camada desejamos deixar nela.

Se o título deste livro estiver certo, até ele era inevitável. Boa leitura.

Felipe Mattos Tavares

Agosto de 2026

Agradecimentos

Começo por meu eterno orientador, professor Rudolph Trouw. Ele me ensinou a contemplar a natureza e a cultivar outras paixões para além da geologia. Ensinou-me tudo o que sei sobre tectonoestratigrafia. Ensinou-me a mapear e a ver o que ninguém via. Nossa relação de mestre e aprendiz lembra aquelas desenvolvidas em tempos antigos, quando se aprendia acompanhando o ofício. Aprendi pelos pés, pelos olhos do microscópio e pelo mimetismo. Sou um típico caso de endogenia: fiz meu TCC, o mestrado e o doutorado na mesma instituição, a Universidade Federal do Rio de Janeiro, com o mesmo orientador. Mudei, porém, de áreas e paisagens. Começamos pelo sul de Minas, onde ele me mostrou pela primeira vez, de forma quase didática, a superposição de dois fenômenos tectônicos. Depois veio a Antártica. Levei-o sempre comigo, presencialmente ou de forma imaterial, na minha alma geológica. Com ele aprendi a aplicar a arte das relações de corte em diferentes ambientes, até chegar, no doutorado, a Carajás.

Agradeço ao Serviço Geológico do Brasil, a CPRM, que patrocinou todos os trabalhos de campo que realizei pelo país e as pesquisas que vieram depois. Agradeço também aos colegas e amigos que encontrei ali. Este livro é uma homenagem aos viajantes do tempo da CPRM, com quem tive a honra e o privilégio de trabalhar e conviver por quase vinte anos. Muito do que está nestas páginas nasceu do trabalho duro de muita gente. Em especial, de Ana Paula Justo, Junny Oliveira e Cintia Maria da Silva, com quem compartilhei anos perfeitos de trabalho de

campo, análises, dúvidas, certezas e debates intermináveis, a matéria-prima de tudo.

Agradeço a Evandro Klein, Lúcia da Rosa Costa, Leda Fraga, Marcelo Almeida, meu grande herói e o maior defensor vivo do Serviço Geológico do Brasil, e Ana Maria Dreher. Sempre estiveram presentes, com contribuições de imensa envergadura para a consolidação da minha carreira e para a construção das ideias aqui apresentadas, além de me puxarem de volta ao chão sempre que voei longe demais. Foram e ainda são minhas maiores referências profissionais. Desbravaram o Cráton Amazônico e fizeram enorme diferença para a geologia do Brasil.

Aos amigos de rocha e colegas do queridíssimo Departamento de Recursos Minerais, Hugo Polo, Rafael Lima, Anderson Dourado, Guilherme Ferreira, Lila Queiroz, Sulsiene de Souza-Gaia, Débora Matos, Lucy Takehara, João Larizzatti e Maísa Abram; e do Departamento de Geologia, Mônica Perrotta, Joseneusa Rodrigues e Alexandre Lago, que nunca desistirá de ser bom, pois é a pessoa mais bonita que conheci na CPRM; e aos golden boys'n girl da geofísica, Iago Costa, Isabelle Serafim e Raphael Correa. Todos têm, ainda que não saibam, um papel fundamental na criação deste livro.

Não posso deixar de mencionar meus estagiários, que fizeram comigo seus trabalhos de conclusão de curso. Orientá-los foi fascinante e submeteu as ideias aos testes de que precisavam: Renan Cavalcanti, no detalhe estrutural do sinclinal de Serra Pelada; Thiago Mattos, no mapa metamórfico do limite Carajás-Bacajá; Marion Neves, na seção-tipo do Evento Sereno; Tomás Lisboa, no mapeamento de detalhe das relações tectonoestratigráficas do Supergrupo Itacaiúnas; Eric Prado, na microtectônica e na tectonoestratigrafia da mineralização de Salobo; Taís Martins, na petrografia das alterações regionais do leste da província, no TCC, e depois no mestrado, com o modelamento de potencial mineral da mesma área; e Gil Pedro Cavalcanti, na caracterização das ocorrências de adulária do Cinturão Norte do Cobre.

Preciso fazer um agradecimento improvável, mas honesto, a Noevaldo

Teixeira, por sempre ter duvidado dos achados do grupo de trabalho de Carajás que ajudei a organizar. Sua dúvida consistente, estruturada e sustentada por modelos alternativos me obrigou a ir mais longe, a pensar, a falsear todas as hipóteses e a correr atrás. Posso dizer que, sem esse fator, talvez eu não tivesse chegado tão longe.

Sei que peco: há muito mais agradecimentos a serem feitos na CPRM. Antônia Railine, Elem Lopes, Carlos Provenzano, Raphael Araujo, Marcelo Vasquez, Rosana Pimenta, Priscilla Duarte, Antônio Junior e Edilberto Leão, in memoriam, são alguns nomes entre muitos outros que deveriam entrar.

Na academia, agradeço especialmente à professora Adalene Moreira da Silva, da UnB, uma pessoa de luz, acolhedora, gentil e paciente, com quem desenvolvo uma colaboração preciosa; ao professor Farid Chemale, da Unisinos, com quem sempre tive trocas interessantes; e ao professor José Carlos Seoane, da UFRJ, flexível e versátil, dos epitermais aos corais, com quem eventualmente divido uma disciplina de pós-graduação sobre análise estrutural-geofísica e que é de imensa generosidade. Agradeço ao grande amigo, Mark Mihalasky, do USGS, que me levou para o mundo do urânio, de cabeça, o que me permitiu fazer as mais radicais analogias.

Agradeço também à Vale, por permitir a amostragem de testemunhos de sondagem e dar pleno acesso às operações e aos projetos exploratórios. Sem esse apoio, esta história não poderia ser contada. E agradeço especialmente aos geólogos e geólogas com quem tive a oportunidade de trocar.

Aos amigos e amigas que não são geólogos, mas leram pacientemente meu manuscrito, como Eduardo Teixeira (meu compadre), Gustavo Rosa, Felipe Longo (meu outro compadre), Victor Autran e Joana Brazil; e a outros que moram no meu coração, como Augusto Rucker, Deborah Cavalcanti e Mariana Azevedo.

Por fim, agradeço aos meus pais, Alfredo Tavares e Virginia Mattos, que já se foi, mas está sempre comigo quando observo o Cristo Redentor no céu de Botafogo; ao meu irmão, Bernardo Mattos Tavares, a pes-

soa mais parecida comigo no mundo que, mesmo fisicamente distante, está sempre comigo; e à minha família, meu fractal, a razão da vida e a fonte inesgotável de amor que me alimenta e mineraliza. Laura, meu oásis antropocênico, navegando comigo no mar sem fim da impermanência. Moreno e Flora, nossos filhotes inquietos, criativos e curiosos. Esse livro é pra vocês. O mundo é de vocês.

Linha do tempo: o mundo e Carajás, lado a lado

Felipe Mattos Tavares, com assistência de IA. Agosto de 2026.

Uma linha contínua, do disco solar à inteligência artificial. À esquerda, os eventos globais; à direita, o que se reconhece em Carajás. Os marcadores indicam os capítulos em que cada história é desenvolvida. Volte a estas páginas sempre que se perder no tempo.

Quando	O mundo	Carajás
~4,6 Ga	O Sol acende dentro de um disco de gás e poeira. Perto dele é quente demais para gelo: a água fica confinada nas periferias, e os planetas de dentro nascem secos.	Os átomos que um dia serão Carajás circulam no disco, misturados a tudo. (cap. 1)

Quando	O mundo	Carajás
4,6–4,5 Ga	A água chega à Terra escondida: presa dentro da própria rocha, dissolvida do gás que o jovem planeta capturou, e trazida por corpos arremessados de longe. Vênus nasce quase seco; Marte, pequeno demais, não segurará a sua. (cap. 1)	Sem registro local reconhecido.
~4,5 Ga	Um planeta do tamanho de Marte (Theia) colide com a Terra. Nasce a Lua, levando cerca de três quartos da "casca" leve terrestre. O que sobra é um planeta de tampa pesada, condenado a afundar pedaços de si mesmo: o motor da tectônica é ligado no acidente.	O quarto da casca que ficou, redissolvido no mar de lava, vira a semente de todos os continentes futuros. (cap. 2)
4,5–4,4 Ga	O oceano de magma esfria; o vapor vira chuva; um mar quase contínuo cobre o planeta. Minúsculos cristais de 4,4 bilhões de anos (Jack Hills, Austrália) provam que já havia água líquida. (cap. 2)	Sem registro local reconhecido.

Quando	O mundo	Carajás
4,4–4,0 Ga	Chuva de meteoritos remanescente da formação do Sistema Solar: os impactos remexem a crosta, disparam afundamentos e entregam matéria nova. A Terra é um mundo de água pontuado por vulcões. (cap. 2)	Sem registro local reconhecido.
~4,0 Ga	Idade das rochas mais antigas ainda preservadas na superfície (Acasta, Canadá). Quase tudo que veio antes foi reciclado. (cap. 2)	Sem registro local reconhecido.
~3,8–3,5 Ga	Surge a vida. Indícios químicos sugerem ~3,8; os fósseis mais antigos e seguros têm 3,48 bilhões de anos (estromatólitos, tapetes microbianos petrificados da Austrália). A vida nasce grudada em vulcões, comendo enxofre, num mar sem oxigênio e verde de ferro dissolvido. (caps. 2–3)	Os zircões detríticos mais antigos registram idades de 3,6 Ga, vestígio de uma fábrica que não sobreviveu. (caps. 2–3)

Quando	O mundo	Carajás
4,0–3,3 Ga	A fábrica de continentes opera: crosta oceânica, pesada, afunda em gotas, derrete em profundidade e destila as primeiras rochas silicáticas, que flutuam. Continentes em miniatura se acumulam.	Nasce o embrião: em 3,3–3,2 Ga, crosta nova é extraída do manto. É o bloco mais antigo de Carajás que conseguimos remontar, além da herança detrítica. (caps. 2–3)
~3,2 Ga	Os primeiros "clãs" de continentes (como Vaalbara) começam a rasgar por dentro.	O rifte de 3,2 Ga: o bloco se rasga e ganha sua primeira praia: uma margem passiva aberta para um oceano novo. (caps. 3–4)
3,08–2,93 Ga	Em vários cantos do planeta, placas começam a entrar em subducção: a tectônica de placas engata.	Uma placa oceânica mergulha sob o bloco (~3,08 Ga) e a margem passiva vira ativa; os TTG do Complexo Xingu registram o arco. Ao lado, Rio Maria preserva o mundo antigo dos domos e quilhas. Embaixo, forma-se uma raiz fria e espessa, o berço futuro dos diamantes. (caps. 4 e 11)
2,93–2,83 Ga	Colisões soldam blocos mundo afora.	Um bloco chega pelo sul e trava a subducção; o orógeno engrossa, sua raiz vira eclogito e cai (~2,87 Ga). A costura que fica, a sutura, jamais deixará de trabalhar: é a cicatriz-mestra de toda a história seguinte. (cap. 4)

Quando	O mundo	Carajás
2,83–2,76 Ga	Sem evento global destacado nesta escala.	A subducção renasce na margem oposta, e agora mergulha de norte para sul, passando a deslizar rasa, colada por baixo da litosfera continental: os vulcões se calam e a água que ela solta encharca o manto. Uma bateria carregando em silêncio, por setenta milhões de anos. (cap. 4)
2,76 Ga	Na Carélia (Rússia), abre-se Kostomuksha, a bacia gêmea, o experimento natural pareado.	A placa subductada parte-se e o pedaço afunda; calor sobe pela costura; abre-se a bacia de Itacaiúnas. (caps. 4–5)
2,76–2,73 Ga	O oceano global é anóxico e carregado de ferro dissolvido; o enxofre chega do céu, em traços, pela química dos vulcões.	Magmatismo de arco coevo a magmatismo bimodal: lavas de assinatura de arco ao lado de basaltos e lavas ácidas, ao mesmo tempo. O mar restrito precipita ferro em camadas: nasce a Formação Carajás, um dos maiores depósitos de ferro do planeta. A água do mar desce pelas rochas e forma salmouras que inauguram o primeiro ciclo hidrotermal, os sulfetos vulcanogênicos de 2,76–2,73 Ga. (caps. 5–6)
2,76–2,68 Ga	Sem evento global destacado nesta escala.	O andar de baixo é montado: intrusões com níquel e platina, granitos que exsudam fluidos, e o "encanamento" que fará do distrito uma máquina de minério. (caps. 5–6)

Quando	O mundo	Carajás
2,72–2,68 Ga	Sem evento global destacado nesta escala.	Primeira geração de cobre e ouro: a salmoura, aquecida, lixivia o cobre das rochas vulcânicas e o deposita nos caminhos de subida. (cap. 6)
2,70–2,65 Ga	Os blocos do mundo se amalgamam em supercontinentes de clã.	Carajás participa de uma amálgama regional. A ligação direta com a Carélia de Kostomuksha, com o São Francisco (atuais MG e BA) e com Kaapvaal segue como problema de reconstrução. (caps. 5 e 12)
2,76–2,65 Ga	A fotossíntese que produz oxigênio já foi inventada, mas perde a competição no oceano aberto, onde o ferro envenena e monopoliza os nutrientes.	O mar restrito é a academia: ciclos de escassez de ferro treinam as cianobactérias, geração após geração. O laboratório da vida aparece em Carajás e Kostomuksha. (cap. 7)
2,61–2,45 Ga	Os supercontinentes de clã começam a rasgar (2,48–2,45).	Um rifte reabre a arquitetura: segunda geração de cobre e ouro; nova margem passiva (Buritirama). Em 2,45, o reator desliga, mas sua arquitetura permanece: estruturas, selos e rochas alteradas ficam disponíveis para outros aquíferos e novos fluidos. (caps. 6 e 8)

Quando	O mundo	Carajás
2,50–2,43 Ga	As “fábricas”: depósitos gigantes de ferro abrem na Austrália, África do Sul, Rússia, Ucrânia e Brasil, um bloco único. Em seguida vem o Grande Evento de Oxidação: pela primeira vez, o oxigênio toma a atmosfera. O ar que respiramos começa aqui. (cap. 7)	Sem registro local reconhecido.
2,45–2,2 Ga	O planeta se ajusta ao novo ar: glaciações, química dos mares em transição.	Quietude de margem passiva. A plataforma faminta de Buritirama acumula colônias de estromatólitos e, ao fim, manganês (cap. 8)
2,2–2,05 Ga	Oceanos fecham em todo o mundo; as colisões Transamazônicas soldam a Atlântica, um continente da ordem de dez milhões de quilômetros quadrados, na classe de grandeza da Laurentia.	Nova subducção traz o continente partido de volta, que colide de novo: crosta profunda é empilhada sobre a margem, e um fragmento que o rifte havia levado é devolvido. O colapso das cordilheiras recém-formadas escreve a “gramática”: quatro direções de fraqueza que a plataforma reutilizará para sempre. Os sedimentos de Águas Claras cobrem o distrito, nas zonas rebaixadas pelo colapso. (cap. 8)

Quando	O mundo	Carajás
2,01–1,96 Ga	O sistema de colisões leva à amalgama de Atlântica e Laurentia, registrado em crátons diferentes ao redor do mundo: inicia-se a formação de Columbia, o primeiro supercontinente.	O Evento Sereno: improvável deformação intracontinental sobre o sistema colisional Transamazônico, ainda quente, que remodela o interior do continente novo, respondendo às colisões que amalgamaram Columbia. (cap. 8)
1,91–1,86 Ga	Vulcanismo gigante varre o interior amazônico (Uatumã); e a oxigenação alcança Laurentia, formando as mineralizações de ferro gigantes na região do Lago Superior (EUA/Canadá), um recibo sugestivo do encontro com Atlântica. (cap. 12)	Novas águas entram em outros aquíferos e reutilizam as estruturas antigas. O sistema acorda pela última vez: a alteração de 1,88 Ga redistribui e concentra metais já presentes, sem chumbo novo. Em Serra Pelada, a falha basal liga o depósito ao Complexo máfico-ultramáfico Formiga, fonte de paládio e platina. (cap. 9)
1,80–1,70 Ga	O supercontinente, parado, tampa o calor do manto. Então estala: riftes e vulcões por toda parte, até separar-se (~1,75).	O distrito esfria com tudo guardado, longe dos riftes que fragmentaram Columbia. (cap. 10)

Quando	O mundo	Carajás
1,8–0,8 Ga	O "bilhão entediante": continentes inteiros, clima estável, mudança lenta. Mas a vida inova em silêncio: os primeiros organismos com núcleo e muitas células (Qingshania, ~1,63 Ga, na China, nos riftes do próprio Columbia) e, adiante, o primeiro ser multicelular com sexo (uma alga vermelha, ~1,05 Ga).	Carajás vira interior estável de continente, um cofre em repouso. (caps. 10 e 12)
1,2–0,9 Ga	Rodínia, o segundo supercontinente: a Amazônia cola novamente na América do Norte. (caps. 10 e 12)	Sem registro local reconhecido.
1,05–0,90 Ga	Rodínia começa a rasgar por uma rede de riftes que segue a gramática herdada.	A ombreira do rifte do Araguaia levanta a borda leste da província; magmas profundos aproveitam a flexura, a janela de subida dos diamantes proposta por este livro, guardados na raiz havia mais de um bilhão de anos. (caps. 10–11)
0,77–0,63 Ga	Terra bola de neve: duas glaciações globais congelam o planeta até os trópicos.	Um dos braços de rifte vizinhos chega a virar oceano estreito, em margem hiperestendida, mas não desacoplada (Quatipuru, 757 Ma). (caps. 10 e 12)

Quando	O mundo	Carajás
0,63–0,50 Ga	O Gondwana se monta; a erosão da supermontanha resultante aduba os mares com fósforo e cálcio. Então vem a explosão cambriana (539–518 Ma): quase todos os grandes grupos animais surgem num piscar geológico; degelo; o oxigênio sobe de novo.	Os braços de rifte Araguaia fecham em um tipo diferente de sutura. Mares rasos cobrem as costuras afogadas; os últimos diques (535 Ma) assinam o fim da história ígnea. (caps. 10 e 12)
0,50–0,25 Ga	Peixes; plantas conquistam a terra firme (~470 Ma); florestas e carvão; répteis; Pangeia, o terceiro supercontinente, se monta (~320–260 Ma); e a maior extinção de todas fecha o Permiano, quando as plataformas continentais minguam (252 Ma).	As grandes bacias (Parnaíba, Paraná) se assentam sobre as costuras e as selam. Carajás dorme sob o interior. (caps. 10 e 12)
0,25–0,066 Ga	Era dos dinossauros; Pangeia quebra; o Atlântico abre (deixando um pedaço da África, o São Luís, no Brasil); um asteroide encerra o Cretáceo (66 Ma), espalhando pelo mundo a lâmina de irídio que nos ensinou a ler impactos.	Os rios começam a desmontar as coberturas e a reconcentrar o que resta, inclusive ouro e diamantes. (caps. 10–11)

Quando	O mundo	Carajás
66–2,6 Ma	Os mamíferos herdam o mundo; surgem os primatas; os Andes crescem a oeste. A margem ativa segue com apetite.	A couraça de ferro (canga) endurece sobre as serras e as protege da erosão; dentro dela, formam-se cavernas. (cap. 14)
2,6 Ma–300 ka	Idades do gelo em ciclos; a evolução humana acelera na África; o Homo sapiens aparece (~300 mil anos). (cap. 13)	Sem registro local reconhecido.
~16–9 ka	Humanos chegam à América (trazendo, na Amazônia, um sinal genético singular vindo do outro lado do mundo); a megafauna, incluindo as preguiças-gigantes, desaparece com a chegada; começa o éden estável do Holoceno.	Caçadores-coletores ocupam as cavernas de canga desde o fim do Pleistoceno, há mais de onze mil anos. (caps. 13–14)
9 ka–1492	Agricultura, cidades, escrita; a Idade do Bronze: o cobre organiza a civilização pela primeira vez.	A Amazônia é construída: geoglifos, cidades de barro e madeira, castanhais plantados; os povos da serra se estabelecem. (caps. 13–14)
1492–1900	Conquista europeia das Américas; o apocalipse indígena (a queda de população foi tão grande que talvez apareça no CO□ global); depois, a revolução industrial.	Ouro e monções empurram a fronteira para o interior. Relatos atribuem a 1610 achados de diamante no Tocantins, ainda sem crítica histórica. (caps. 11 e 14)

Quando	O mundo	Carajás
1900	O século da técnica; o	Os ciclos: diamante (anos 1930–60)
2025	Antropoceno: a humanidade vira agente geológico.	→ manganês e ferro (1967) → ouro (1980) → cobre (2004). A fronteira avança; as tensões ficam. (cap. 14)
agosto de 2026	A IA: o horizonte humano-máquina é cruzado: mentes humanas e máquinas feitas do arquivo escrito da espécie, pensando juntas.	Este livro é depositado: a lâmina mais nova da coluna. (epílogo)

A tabela termina onde o livro termina: no topo aberto da coluna. A linha de baixo é sempre provisória

Capítulo 1. A água é a mãe da Terra

Do disco protoplanetário à Terra pré-Theia, a anomalia que precede todas as outras, e por que cada seta deste livro terá água no rótulo

> **Modelo de trabalho**
>
> A Terra reuniu a distância que permite água líquida, massa suficiente para reter voláteis e caminhos distintos para receber hidrogênio. Parte veio incorporada à matéria do Sistema Solar interno; parte nasceu da reação entre H□ nebular e o oceano de magma; parte chegou em planetesimais carbonáceos. Uma vez incorporada, a água modificou fusão, deformação, produção de continente, circulação hidrotermal e habitat. Este livro acompanha a recorrência desse trabalho até os Andes. Moléculas, fluidos e aquíferos mudam; a função geológica retorna.

linha de neve · condritos de enstatita · ingassing · D/H · komatiítos hidratados · serpentina · TTG · escapolita · massa ótima

Resumo

Toda narrativa escolhe um começo. Esta começa antes da Terra, no disco de gás e poeira que girava em torno de um Sol jovem. Ali, tempe-

ratura e distância separavam dois domínios. Perto da estrela, onde os planetas rochosos cresciam, o calor mantinha a água sobretudo como vapor e impedia que o gelo participasse livremente da construção. Mais longe, além da linha de neve, a água condensava e se tornava parte abundante dos sólidos. A Terra nasceu dentro dessa geometria paradoxal: no setor pobre em gelo e, ao mesmo tempo, na faixa orbital onde um oceano líquido poderia durar.

A travessia ocorreu por caminhos complementares. Hidrogênio acompanhou minerais e vidros semelhantes aos dos condritos de enstatita; o embrião terrestre capturou H□ da nebulosa e o dissolveu no oceano de magma, onde a reação com o óxido de ferro produziu água e enviou ferro metálico para o centro; planetesimais carbonáceos espalhados para o Sistema Solar interno trouxeram outra parcela do inventário. A contribuição de cada fonte permanece em debate. Sua convivência resolve melhor o problema do que a procura por um fornecedor único.

Depois veio a segunda condição: massa suficiente para guardar voláteis durante bilhões de anos. Marte e Vênus mostram caminhos vizinhos. Um perdeu grande parte da atmosfera e da água; o outro conservou massa, mas recebeu energia solar demais para repetir a história terrestre. Na interseção entre órbita, massa, composição e acaso de acreção, a Terra reteve um agente que mudaria continuamente de ofício. A água participou da diferenciação, favoreceu fusão e deformação, entrou na fabricação dos primeiros continentes, circulou por bacias e falhas e sustentou os ambientes em que a vida transformou o planeta. Por isso cada grande seta deste livro carrega água. As moléculas e os aquíferos mudam; a função geológica retorna.

Um dos circuitos alcança o centro do planeta. Parte do hidrogênio acompanhou o ferro durante a diferenciação, e a subducção parece continuar entregando água à fronteira com o núcleo até hoje. Elementos leves dissolvidos no metal abaixam seu ponto de fusão, ampliam a faixa em que o núcleo externo permanece líquido e alimentam a convecção que gera o campo magnético. Esse campo desvia parte do vento solar e reduz a perda de atmosfera para o espaço. A água ajuda a mover o motor que produz o escudo que a protege.

O capítulo termina na Terra pré-Theia: úmida, diferenciada, coberta por uma primeira casca e pronta para receber o impacto que formará a Lua. Chamar a água de mãe da Terra é uma licença poética. O restante do livro tentará demonstrar seu conteúdo mineralógico.

1. A anomalia, lida pela água

O Sistema Solar oferece muitos lugares com água. Ela forma oceanos sob o gelo de luas distantes, integra cometas e asteroides, aparece em minerais e ocupa reservatórios profundos. A singularidade terrestre está na combinação: um planeta rochoso manteve água líquida na superfície, armazenou outra parte no interior e ligou os dois domínios por ciclos capazes de atravessar quase toda a sua história.

Essa combinação nasceu de uma dificuldade geométrica, ou melhor, geográfica. A região onde a temperatura permite oceanos superficiais ocupava a parte quente do disco protoplanetário. O gelo, excelente transportador de água, condensava além da linha de neve. Dentro dela, os grãos que alimentaram Mercúrio, Vênus, Terra e Marte eram dominados por silicatos e metal. O planeta que hoje possui oceanos cresceu num aparente deserto, sem gelo.

A linha de neve também se movia. Conforme o disco esfriava e a taxa de acreção diminuía, a fronteira da condensação migrava em direção ao Sol. Corpos eram espalhados por perturbações gravitacionais, colidiam, fragmentavam-se e mudavam de vizinhança. O mapa de temperatura fornecia a estrutura; a dinâmica embaralhava parte do conteúdo. Foi nesse disco móvel que a Terra reuniu seus voláteis.

Há, portanto, duas anomalias. A primeira é que a água chegou a uma zona relativamente seca do Sistema Solar. A segunda é que permaneceu aqui. Receber e reter pertencem ao mesmo problema e obedecem a mecanismos diferentes. Tudo começa antes de existir qualquer planeta.

2. Do gás ao grão

Convém imaginar o começo. Uma nuvem molecular de gás e poeira, contendo matéria fabricada por antigas estrelas e talvez enriquecida por uma supernova próxima, começou a colapsar sobre si mesma. Era muito maior que o Sistema Solar de hoje. Quase toda a sua matéria era hidrogênio e hélio, os elementos mais leves e abundantes do universo, e quase toda ela caiu para o centro por gravidade. Ali, pressão e temperatura subiram até acender a fusão nuclear, e o Sol nasceu levando consigo mais de noventa e nove por cento da massa disponível. O restante carregava momento angular: enquanto caía, girava cada vez mais depressa e se achatava num disco ao redor da estrela jovem.

O disco funcionou como uma destilaria. Nas regiões mais quentes, perto do centro, a temperatura ultrapassava mil e quinhentos graus e quase nenhum material volátil sobrevivia em estado sólido; longe do centro, o frio permitia que até a água congelasse. A gravidade recolhia, enquanto o calor selecionava. Some-se a isso o atrito com o gás, que fazia as partículas sólidas perderem momento angular e espiralarem em direção ao Sol, e a dispersão posterior do gás pelo vento e pela radiação da estrela recém-acesa. Dessas operações resulta a arquitetura geral que observamos hoje: planetas pequenos e densos, feitos sobretudo de metal e silicato, na parte interna do Sistema Solar; planetas grandes e ricos em gás e gelo, na parte externa.

Na região mais quente em que os materiais terrestres circularam, a matéria mineral podia estar vaporizada. Não era um plasma uniforme no sentido estrito, mas um gás de átomos e moléculas, parcialmente ionizado conforme a temperatura e a radiação. Ferro, silício, magnésio, alumínio, cálcio e oxigênio circulavam em espécies químicas incapazes de sustentar cristais duradouros. A organização começou quando o resfriamento permitiu que as ligações sobrevivessem aos choques.

Para entender a arquitetura que nasceu desse resfriamento, a mineralogia utiliza uma contabilidade formal de cargas. Ela não descreve íons livres encontrando-se um a um no disco, mas permite reconhecer como as ligações se equilibram dentro do cristal. Nessa contabilidade, o si-

lício assume carga formal Si□□ e o oxigênio, O²□. Quatro oxigênios ao redor de um silício formam a unidade SiO□□□. A soma fecha a geometria e deixa quatro cargas negativas a serem compensadas.

Esse conjunto tem forma e nome. Os quatro oxigênios dispõem-se ao redor do silício como os vértices de um tetraedro, com o silício no centro. É o tetraedro de sílica, a peça de montagem da matéria rochosa. A carga é compensada quando tetraedros compartilham oxigênios ou se ligam a cátions de magnésio, ferro, cálcio, alumínio, sódio e potássio. O silício, um semi-metal da família do carbono, tende a organizar-se em cadeias, mas diferentes das cadeias de matéria orgânica. Tetraedros isolados formam a base da olivina; cadeias simples, a dos piroxênios; cadeias duplas, a dos anfibólios; folhas, a das micas; redes tridimensionais, a dos feldspatos e do quartzo. Na escala molecular, a repetição é periódica e governada por simetria. Em escalas maiores, porém, a mesma solução geométrica reaparece com recorrência fractal: poucas regras produzindo muitas formas. Silicato é o nome coletivo desse clã mineral.

Óxido é uma combinação mais direta, na qual o oxigênio se liga a outro elemento sem a intermediação do tetraedro de sílica. O ferro forma os óxidos mais importantes deste livro, e a diferença entre eles depende do estado de oxidação. Em condições muito redutoras, o ferro permanece ferroso, Fe²□, e pode formar FeO, a wüstita, rara na superfície e estável em ambientes quentes e pobres em oxigênio. Em condições mais oxidantes, passa ao estado férrico, Fe³□, e forma Fe□O□, a hematita. A magnetita, Fe□O□, guarda os dois estados na mesma estrutura. A diferença importa mais do que parece agora. Em águas anóxicas, sem oxigênio dissolvido, o ferro ferroso pode dissolver-se e viajar; oxidado a ferro férrico, tende a perder solubilidade e precipitar. Toda a história do ferro deste livro, das formações ferríferas gigantes ao Grande Evento de Oxidação, passa por essa troca de elétrons.

A magnetita oferece ainda um bônus. Em sua estrutura específica, Fe³□ ocupa sítios tetraédricos, enquanto Fe²□ e Fe³□ dividem sítios octaédricos. Os momentos magnéticos do Fe³□ nas duas sub-redes se orientam em sentidos opostos e praticamente se cancelam; sobra a contribuição

do $Fe^{2}\square$ octaédrico, que dá ao mineral seu forte ferrimagnetismo (Jiang et al., 2016). Por isso a magnetita registra campos magnéticos no interior do cristal como uma pequena bússola. A hematita é um antiferromagneto levemente inclinado e muito mais fraco; a wüstita também é antiferromagnética. Algumas bactérias descobriram a utilidade da magnetita antes de nós: fabricam cristais dentro das próprias células e os usam para se orientar no campo terrestre. Quando morrem, esses cristais entram no sedimento como magnetofósseis.

Com esse vocabulário na mão, a condensação do disco pode ser lida na ordem em que aconteceu. Ela tem uma escada, e cada degrau depende da pressão, da composição e de quanto calor a fase suporta. Os primeiros sólidos foram ricos em cálcio, alumínio e titânio, formados acima de aproximadamente mil e quinhentos graus. Em temperaturas um pouco menores condensaram ligas de ferro e níquel e silicatos magnesianos como forsterita e enstatita; depois vieram feldspatos e, mais abaixo, sulfetos como a troilita, onde o S^{2-} domina a ligação com os metais no lugar do O^{2-}. Minerais contendo água na sua estrutura, preservados em meteoritos, formaram-se em grande parte mais tarde, por reação entre água e rocha dentro dos corpos parentais. O gelo, mais volátil que todas essas fases, só se tornou estável além da linha de neve. A mesma escada térmica que separa refratário de volátil explica por que os planetas internos nasceram dominados por silicato e metal (Lodders, 2003).

A água merece uma parada aqui, porque se comporta de maneira diferente de quase tudo o mais que condensou. Sua molécula tem dois átomos de hidrogênio ligados a um de oxigênio num ângulo aberto, perto de cento e cinco graus. Essa assimetria deixa um lado levemente positivo e outro levemente negativo, e moléculas assim se atraem entre si. Daí vem muito do que a água tem de estranho. Ela permanece líquida numa faixa ampla de temperatura, enquanto substâncias de massa molecular semelhante são gases. Absorve muito calor antes de esquentar, o que ajuda a estabilizar climas. Atinge densidade máxima acima do ponto de congelamento, de modo que o gelo flutua e os oceanos congelam pela superfície. E dissolve sais com grande eficiência,

carregando íons de um lugar para outro. Dissolvida em rochas fundidas, baixa suas temperaturas de fusão; isso será decisivo na geração de magmas e na evolução do manto e da crosta nos próximos capítulos.

A água também se desmonta. Uma fração minúscula das moléculas reage consigo mesma o tempo todo, produzindo H□O□ e OH□; esse par ajuda a atacar minerais, remover cátions das estruturas e construir minerais novos no lugar. Intemperismo, alteração hidrotermal e formação de minério dependem desse comportamento. A hidroxila, OH, possui ainda outra propriedade decisiva: pode alojar-se em estruturas cristalinas, defeitos, vidros e fundidos. Foi assim que parte do hidrogênio atravessou a região quente do disco sem precisar viajar como gelo. Materiais semelhantes aos condritos de enstatita, formados no Sistema Solar interno, conservam hidrogênio suficiente para ter contribuído de modo importante para a água terrestre (Piani et al., 2020). A rocha aparentemente seca já carregava água em potência.

Ferro e oxigênio combinam-se com facilidade. O hidrogênio também disputa esse oxigênio. Sob certas condições de um oceano de magma, a reação pode ser representada por:

$$H\square + FeO \rightleftharpoons H\square O + Fe$$

O hidrogênio é oxidado a água, enquanto o ferro ferroso é reduzido a metal. Essa troca atravessa toda a história que vem pela frente. Oxidação e redução não são nomes para ganho ou perda de oxigênio apenas, mas para transferência de elétrons: quem perde elétrons é oxidado; quem os recebe é reduzido. A água, o minério, a atmosfera e a respiração das primeiras formas de vida obedecem a essa mesma contabilidade.

Segurar hidrogênio foi a parte mais difícil da história. Ele é o elemento mais leve que existe e, em forma de gás, escapa com facilidade de um corpo pequeno ou quente. O vento e a radiação da estrela jovem removeram grande parte do envelope que não foi incorporado. Os oceanos atuais correspondem a cerca de 0,023% da massa da Terra em água; o manto acrescenta um reservatório de tamanho incerto, e a fração correspondente apenas ao hidrogênio é ainda menor. A quantidade pre-

servada é pequena diante do que circulou pela nebulosa.

O que ficou, perdeu mobilidade por reação. Preso como hidroxila na estrutura de um mineral, dissolvido como água num silicato fundido ou incorporado ao metal que descia para o núcleo, o hidrogênio deixou de se comportar como um gás fugitivo. A química produziu reservatórios, então a gravidade ajudou a conservá-los. No modelo de interação entre a atmosfera primordial de H□ e o oceano de magma, a reação com FeO converte parte do gás em água e envia ferro reduzido para o núcleo (Young et al., 2023). Nesse sentido preciso, o ferro ajudou a salvar a água.

3. Os primeiros corpos

Os primeiros sólidos do Sistema Solar ainda existem e podem ser segurados na mão. São as inclusões refratárias de cálcio e alumínio, encontradas dentro de meteoritos primitivos, com idade de 4.567,3 milhões de anos. Elas marcam o zero da nossa contagem, e tudo o que este livro narra aconteceu depois delas (Connelly et al., 2012). Junto delas viajam os côndrulos, esférulas de silicato geralmente milimétricas, fundidas por pulsos rápidos de calor e resfriadas em horas ou dias, guardando na forma arredondada a memória de terem sido gotas. Meteoritos formados por essa mistura de côndrulos, inclusões refratárias, grãos metálicos e poeira fina recebem o nome de condritos. São rochas que nunca fundiram por inteiro e continuam sendo as melhores amostras disponíveis da matéria que construiu os planetas.

O passo seguinte foi juntar tudo isso. Grãos de poeira colidiam a baixa velocidade e ficavam aderidos por forças fracas entre as superfícies, como poeira numa tela. Esse mecanismo funciona para partículas pequenas e perde eficiência conforme o agregado cresce. A superação desse limite parece ter vindo da concentração de enormes quantidades de partículas em enxames densos. Instabilidades produzidas pela interação entre sólidos e gás reuniram o material até que a própria gravidade provocasse o colapso e formasse planetesimais rapidamente (Johansen et al., 2007). A partir desse tamanho, a gravidade assume o

comando e a acreção acelera. Primeiro as superfícies reúnem a matéria; depois a massa reunida passa a atrair o resto.

Planetesimais com dezenas a centenas de quilômetros já retinham calor, embora muitos continuassem irregulares, longe de esferas perfeitas. E havia calor de sobra. A nuvem original continha alumínio-26, um isótopo radioativo de vida curta, com meia-vida de aproximadamente 0,72 milhão de anos. Os corpos que se formaram cedo herdaram uma dose generosa desse combustível e puderam fundir por dentro. Ao fundir, obedeceram à densidade: o ferro-níquel metálico migrou para o centro e formou um núcleo; o silicato mais leve permaneceu por cima como manto e crosta. Alguns desses núcleos estavam prontos antes de a Terra existir. A diferenciação, que este livro acompanha na escala planetária, começou em corpos comparáveis, em diâmetro, às manchas urbanas de grandes cidades.

Depois vieram as colisões, e elas quebraram parte desses corpos. Por isso os meteoritos chegam até nós em tipos distintos que representam essas gerações, cada uma registrando um estágio. Os condritos preservam matéria que nunca fundiu por inteiro, com côndrulos e grãos de metal dispersos na matriz. Os meteoritos metálicos são fragmentos de núcleos de planetesimais diferenciados; o entrelaçamento geométrico de suas ligas de ferro e níquel exige resfriamento lento no interior de um corpo grande. Os pallasitos misturam cristais de olivina e metal e registram a reunião de materiais mantélicos e metálicos em corpos diferenciados (Greenwood et al., 2006). Os acondritos são rochas magmáticas sem côndrulos, derivadas de mantos e crostas que já haviam fundido e se separado.

Uma coleção de cortes polidos mostra essa história sem precisar de um diagrama. Num condrito, esferas de silicato permanecem na matriz ao lado de grãos metálicos, matéria que nunca chegou a ser planeta e que carrega, na mesma superfície, a química que produziria oceanos e a que produziria núcleos. Nos meteoritos metálicos, pallasitos e acondritos, a mesma matéria aparece já separada, fundida e reorganizada. Muito do que sabemos sobre as camadas internas da Terra vem da observação desses fragmentos-fósseis da criação planetária. A rocha pri-

mordial é a base deste livro inteiro.

4. Quem trouxe o quê

As rotas já estão descritas. Falta pesá-las. A pergunta muda de forma neste ponto e deixa de perguntar como a água atravessou a fronteira térmica, passando para quanto veio por cada caminho. A resposta depende de uma ferramenta que a natureza forneceu junto com a própria água.

O hidrogênio possui dois isótopos estáveis. O mais comum tem apenas um próton no núcleo. O outro, chamado deutério, carrega também um nêutron e possui aproximadamente o dobro da massa. A proporção entre os dois, escrita como razão D/H, varia entre os reservatórios do Sistema Solar. Em temperaturas muito baixas, reações de troca isotópica favorecem a concentração de deutério em moléculas que contêm hidrogênio. A água formada ou processada longe do Sol tende, por isso, a ser mais rica em deutério que aquela associada às regiões internas. A razão D/H preserva parte dessa história térmica. É um termômetro imperfeito do percurso da água, pois diferentes fenômenos podem modificar a marca original, mas mostra tendências interessantes.

O gás da nebulosa, herdado da nuvem molecular, possuía D/H muito baixo, aproximadamente sete vezes menor que o dos oceanos atuais. A água de muitos condritos carbonáceos, formados em regiões mais frias, ocupa uma faixa próxima à terrestre. Os cometas variam muito mais: alguns possuem valores semelhantes ao dos oceanos; outros, várias vezes maiores. A água que bebemos guarda uma assinatura intermediária, distante do extremo nebular e sobreposta a parte da faixa carbonácea (Alexander et al., 2012). A coincidência não identifica sozinha um fornecedor, mas restringe a lista de candidatos.

Esse arranjo é compatível com uma mistura. Um componente interno, incorporado à matéria que construiu o planeta e ampliado pela reação entre o envelope de hidrogênio e o oceano de magma, carregava

D/H baixo. Um componente externo, entregue sobretudo por material carbonáceo, trouxe água relativamente enriquecida em deutério e contribuiu para a assinatura final. A proporção entre ambos não pode ser calculada diretamente a partir dos oceanos atuais, porque o próprio planeta fracionou hidrogênio ao longo do tempo. O manto profundo preserva uma possível evidência do primeiro componente. Lavas da ilha de Baffin, no Canadá, e da Islândia, derivadas de fontes mantélicas pouco processadas, apresentam valores muito baixos de D/H, interpretados como vestígio de hidrogênio herdado da nebulosa protossolar (Hallis et al., 2015). A Terra guarda, em rochas jovens, um sinal recebido antes de terminar de crescer.

Falta explicar como o material externo chegou até aqui, e a resposta pertence à mecânica celeste. Durante o crescimento e a migração dos planetas gigantes, as perturbações gravitacionais de Júpiter e Saturno desestabilizaram populações inteiras de planetesimais formados além da linha de neve e lançaram parte delas para o interior do Sistema Solar. Alguns desses corpos atingiram os embriões rochosos e acrescentaram material rico em voláteis ao seu inventário (Morbidelli et al., 2000; Walsh et al., 2011; Raymond e Izidoro, 2017). A entrega foi irregular por natureza. Um pequeno número de impactos tardios envolvendo corpos grandes poderia alterar profundamente o estoque final de um planeta. Essa loteria talvez explique parte da diferença entre mundos vizinhos.

Uma segunda família de assinaturas permite testar essa procedência. Isótopos de elementos como o molibdênio dividem os meteoritos em dois grandes reservatórios: o não carbonáceo, associado ao Sistema Solar interno, e o carbonáceo, associado ao externo. As duas populações permaneceram amplamente separadas durante os primeiros milhões de anos, possivelmente porque o crescimento precoce de Júpiter criou uma barreira dinâmica entre elas. O molibdênio possui ainda uma vantagem: durante a diferenciação planetária, tende a acompanhar o ferro em direção ao núcleo. Grande parte do molibdênio preservado no manto registra, portanto, fases relativamente tardias da acreção. Seus isótopos não medem água. Medem procedência e permitem perguntar

quando material do reservatório externo entrou na Terra.

Aplicada à colisão que formou o sistema Terra-Lua, essa assinatura abre uma quarta possibilidade. A composição isotópica do molibdênio do manto terrestre exige alguma contribuição de material do Sistema Solar externo durante os estágios finais da acreção. No modelo proposto por Budde et al. (2019), Theia – o corpo que colidiu com a proto-Terra e será apresentado no próximo capítulo – poderia ter transportado parte importante desse material. Nesse cenário, o golpe que produziu a Lua também teria acrescentado água ao inventário terrestre. A hipótese é elegante, mas depende de associar a procedência carbonácea indicada pelo molibdênio a uma carga correspondente de voláteis. Continua em teste. O argumento deste livro permanece de pé com ela ou sem ela. Pois hidrogênio na matéria de construção e captura nebular já haviam colocado água no interior do planeta antes do impacto, enquanto os materiais carbonáceos ampliaram a conta ao longo da história.

5. A massa que trabalha duas vezes

A massa terrestre operou em dois momentos. Durante o crescimento, permitiu capturar gás nebular. Depois, forneceu gravidade para reduzir a perda de voláteis ao espaço. Entre esses momentos, colisões retiraram material, acrescentaram outros reservatórios e refizeram a atmosfera. A água resultou de um balanço, e a massa controlou boa parte da contabilidade.

Marte mostra o custo de crescer pouco. Sua superfície conserva vales, minerais hidratados e formas produzidas por água antiga, mas a atmosfera atual guarda o sinal da perda. Medidas da razão $^{3}\square Ar/^{3}\square Ar$ pela missão MAVEN[1] registram escape prolongado para o espaço (Jakosky et al., 2017). A gravidade menor facilitou a erosão atmosférica por impactos e por processos associados ao vento solar. Em um cenário, colisões arrancaram massa e voláteis durante a acreção (Melosh

[1]Missão da NASA que investiga a atmosfera marciana e sua perda para o espaço.

e Vickery, 1989). Em outro, a migração de Júpiter esvaziou a região de alimentação e deixou Marte como embrião incompleto (Walsh et al., 2011). Os mecanismos diferem; ambos conduzem a um planeta pequeno, vulnerável e progressivamente seco.

Vênus mostra outro limite. Sua massa se aproxima da terrestre e segura uma atmosfera espessa. A proximidade do Sol alterou o destino da água. Modelos de solidificação de oceanos de magma distinguem mundos onde o vapor condensa e chove de mundos mantidos sob uma estufa de vapor. No segundo caso, a radiação quebra moléculas de água e o hidrogênio escapa antes que um oceano duradouro se estabeleça (Hamano et al., 2013). Cenários de habitabilidade venusiana antiga continuam sendo testados (Way e Del Genio, 2020), no entanto nenhum deles transforma Vênus numa segunda Terra.

A comparação evita uma explicação simples demais. Órbita adequada, isoladamente, teria produzido um Marte mais generoso. Massa terrestre, por si, teria produzido outro Vênus. A Terra reuniu a faixa térmica, a gravidade, o inventário e uma história particular de impactos. Essa combinação permitiu ao planeta conservar água na superfície e no manto, formando dois reservatórios ligados pelo tempo geológico.

6. A água muda de ofício

Chegar e permanecer constituem apenas o começo. A importância da água aparece no trabalho que realiza dentro da rocha. Dissolvida em magmas, reduz temperaturas de fusão e modifica a cristalização. Incorporada a minerais, altera resistência, densidade e caminhos de reação. Em circulação, transporta calor e elementos. Na superfície, constrói oceanos, intemperismo, sedimento e habitat.

Do ponto de vista da petrologia, a ciência que estuda a origem, a composição, a estrutura e a formação das rochas, pequenas quantidades de água já produzem efeitos grandes. Água dissolvida abaixa a temperatura da faixa de fusão, ou solidus, de rochas mantélicas e crustais, prolonga a evolução de câmaras magmáticas e altera os minerais que

delas cristalizam (Médard e Grove, 2008; Grove et al., 2012). Komatiitos arqueanos, rochas vulcânicas magnesianas muito características daquela época, preservam indícios de um reservatório profundo hidratado (Sobolev et al., 2016). Antes de existir uma tectônica de placas madura, portanto, a água já participava da transferência de massa entre o interior quente e a primeira litosfera.

Para a geodinâmica, as forças e os processos internos e externos que moldam e modificam a estrutura da Terra, ela enfraquece e transforma. A hidratação de rochas mantélicas magnesianas rasas produz serpentina, um mineral hidratado de magnésio, o que modifica atrito e favorece deformação ao longo de interfaces. Fragmentos hidratados que mergulham no manto carregam assim água para profundidade, enquanto reações liberam fluidos aos poucos, alimentam magmatismo, que por sua vez devolve parte da água à superfície. Outra parte alcança reservatórios profundos. Ringwoodita hidratada, uma olivina de alta pressão, preservada como inclusões em diamantes, demonstra que a zona de transição do manto pode armazená-la (Pearson et al., 2014). O ciclo profundo possui escalas muito maiores que o ciclo de chuvas, mas ambos pertencem ao mesmo planeta (Hirschmann, 2006).

Na fabricação dos continentes, a água entra como reagente. Grande parte dos primeiros trondhjemitos, tonalitos e granodioritos arqueanos, ou TTGs, rochas ígneas ricas em feldspatos, deriva da fusão de crosta oceânica, pobre em feldspatos, previamente hidratada (Moyen e Martin, 2012). Ou seja, basalto transformado, fundido e destilado gera rochas mais ricas em sílica e mais leves. Elas flutuam, sobrevivem à reciclagem de crosta oceânica ao longo do tempo e permitem que núcleos continentais cresçam. A plataforma que receberá os mares de Carajás depende dessa longa sequência: água, fusão, diferenciação, continente, emersão e bacia.

A palavra lubrificante costuma resumir esse papel. Ela ajuda, mas empobrece a história se parecer um efeito único. A água muda a termodinâmica, a capacidade de deformação no estado sólido, a mineralogia e o transporte de elementos químicos. Em certos lugares enfraquece, enquanto em outros cria minerais resistentes ou retira calor. Seu poder

vem da capacidade de participar de processos distintos e de circular entre eles.

7. A água chega ao núcleo

O centro da Terra tem duas partes. O núcleo interno é sólido, uma esfera de liga de ferro e níquel com cerca de mil e duzentos quilômetros de raio, que cresce lentamente por cristalização. Ao redor dele, o núcleo externo permanece líquido ao longo de mais de dois mil quilômetros de espessura. É nesse metal em movimento que nasce o campo magnético terrestre, gerado por um dínamo: correntes elétricas produzidas pela convecção de um fluido condutor em rotação.

A liquidez dessa camada vem da temperatura, que ali supera o ponto de fusão da liga naquelas pressões. A composição, no entanto, participa da conta. O núcleo é aproximadamente dez por cento menos denso que uma liga pura de ferro e níquel nas mesmas condições, e esse déficit exige elementos leves dissolvidos no metal. Enxofre, silício, oxigênio, carbono e hidrogênio disputam a vaga, e a proporção entre eles segue em investigação. Todos abaixam o ponto de fusão da liga, o que amplia a faixa em que o metal permanece líquido.

O hidrogênio ganhou força recentemente entre os candidatos. Experimentos em alta pressão mostraram que ele se comporta como siderófilo nas condições de um oceano de magma, ou seja, prefere o metal ao silicato e desce junto com o ferro durante a diferenciação (Tagawa et al., 2021). A reação entre o envelope nebular e o FeO, discutida na seção 2, produz exatamente esse resultado: água para o manto e ferro reduzido para o centro, com parte do hidrogênio acompanhando o metal. Convém dizer com precisão o que existe lá embaixo. A molécula de água se dissocia naquelas condições. O que permanece é hidrogênio dissolvido na liga metálica.

O achado mais recente diz que essa entrega continua acontecendo. Placas subductadas carregam minerais hidratados para o manto profundo, e imagens de tomografia sísmica mostram fragmentos de litosfera al-

cançando a fronteira com o núcleo, a quase três mil quilômetros de profundidade. Ali a água encontra o ferro líquido e reage. O hidrogênio é absorvido pelo metal, o oxigênio se combina com o silício e forma sílica cristalina, e o resultado previsto pelos experimentos é uma camada de algumas centenas de quilômetros no topo do núcleo externo, enriquecida em hidrogênio e menos densa que o restante. Os sismólogos já registravam ali uma anomalia de velocidade sem explicação, chamada camada E′. O modelo fornece uma causa para o que a sísmica observava (Kim et al., 2023).

Esse detalhe importa para o motor. A convecção que sustenta o dínamo é alimentada por três fontes: o calor residual da formação do planeta, o calor latente liberado quando o núcleo interno cristaliza, e a flutuabilidade composicional. Essa terceira fonte funciona assim: ao cristalizar, o ferro sólido expulsa os elementos leves, que sobem pelo núcleo externo e agitam o fluido. Se o hidrogênio integra esse grupo, ele participa ativamente da agitação que produz o campo magnético.

O campo, por sua vez, protege a superfície. Ele desvia grande parte do vento solar e reduz a taxa com que a atmosfera é arrancada para o espaço. Marte perdeu seu dínamo cedo, e a comparação entre os dois planetas mostra o custo dessa perda. A retenção de água ao longo de bilhões de anos depende, entre outros fatores, de existir esse escudo.

Fecha-se então um circuito que atravessa o planeta inteiro. A água ajudou a formar o núcleo, continua sendo entregue a ele pela tectônica, participa da convecção que gera o campo magnético, e esse campo ajuda a preservar a água que resta na superfície. A mesma reação com o ferro que fabricou o oceano no oceano de magma continua operando, quatro bilhões e meio de anos depois, na base do manto. O ferro salvou a água uma vez e segue ajudando a guardá-la.

Convém marcar o grau de confiança de cada elo dessa cadeia. O déficit de densidade do núcleo é medido. O comportamento siderófilo do hidrogênio em alta pressão é experimental. A camada E′ é observada pela sísmica. A interpretação dessa camada como produto da água subductada é um modelo recente e promissor, ainda em avaliação. A

quantidade de hidrogênio no núcleo permanece incerta, com estimativas que variam bastante. E a proposição de que a água modula o dínamo e, por essa via, ajuda a proteger a si mesma na superfície é uma hipótese de trabalho, oferecida aqui pelo que ela organiza. O circuito é plausível em cada etapa e ainda não foi quantificado como um todo.

8. As águas de Carajás

Quando esta narrativa alcançar Carajás, a água aparecerá em quase todas as escalas. A coluna marinha controlará luz, ferro, enxofre e nutrientes. A água que penetrar na pilha vulcânica reagirá com a rocha, ganhará salinidade, carregará calor e metal e retornará pelas zonas permeáveis. Falhas, contatos e horizontes reativos transformarão a bacia num sistema hidrogeológico mineralizante.

No Neoarqueano, água marinha desceu pelo pacote vulcânico e sedimentar. A circulação profunda concentrou sais e produziu modificações nas rochas encaixantes. Escapolita, um silicato de estrutura parecida com a do feldspato que guarda cloro em sua rede cristalina, veios, zonas de reação e sulfetos conservam partes desse trabalho. O registro mineral pode atravessar bilhões de anos; o fluido que o produziu pertence ao seu evento. Essa distinção será decisiva adiante.

Pulsos posteriores encontraram uma crosta preparada. Reutilizaram falhas, volumes alterados, rochas férteis e contrastes de permeabilidade. Em 1,88 Ga, outros aquíferos abasteceram a circulação. Águas das coberturas Águas Claras e Caninana–Paredão–Gorotire penetraram o embasamento fraturado, percorreram trajetos profundos e se tornaram salinas. A arquitetura era herdada; a água, renovada. Carajás guarda a memória de vários sistemas superpostos.

A mesma disciplina vale para o ciclo profundo. Falar em água que retorna pelo arco ou por uma pluma descreve um reservatório em circulação, com moléculas, minerais e tempos de residência variados. A continuidade pertence ao processo. A matéria é trocada, misturada e requalificada a cada passagem. A geologia preserva relações, porém

raramente preserva personagens intactos.

Na superfície, a água organizará o laboratório da vida. Profundidade, transparência, mistura e estratificação definirão a zona fótica e a quimioclina. Oscilações no aporte de Fe^{2}□ abrirão ou fecharão oportunidades para diferentes metabolismos. Mais tarde, mares epicontinentais cobrirão costuras, riftes formarão lagos e plataformas e o clima redistribuirá gelo, rios e costas. A água deixa de ser apenas substância. Torna-se espaço onde processos se encontram.

O circuito permanece visível hoje na margem andina. A placa oceânica carrega minerais hidratados para a fossa; reações em profundidade liberam fluidos; a cunha do manto funde e alimenta o arco magmático, que forma a cadeia de montanhas (Grove et al., 2012). A Cordilheira cresce a oeste enquanto a plataforma brasileira conserva cicatrizes de ciclos antigos. O veículo tectônico mudou muitas vezes, enquanto o ofício da água continua reconhecível!

9. Níveis de confiança

São evidência ou consenso forte a distribuição de voláteis no disco protoplanetário; a existência e a migração da linha de neve; o hidrogênio medido em material semelhante aos condritos de enstatita; a contribuição carbonácea ao inventário terrestre; a perda atmosférica de Marte; o efeito da água sobre fusão, mineralogia e deformação; o armazenamento de água no manto; a participação de crosta máfica hidratada na geração de TTG; o déficit de densidade do núcleo em relação a uma liga pura de ferro e níquel; o comportamento siderófilo do hidrogênio em alta pressão, verificado experimentalmente; a chegada de litosfera subductada à fronteira entre manto e núcleo, imageada por tomografia sísmica; a existência de uma anomalia sísmica no topo do núcleo externo, conhecida como camada E′; e o papel do campo magnético na redução da perda atmosférica.

São modelos publicados a captura de uma atmosfera primordial de H□ e sua reação com FeO no oceano de magma; a entrega de planetesi-

mais carbonáceos associada ao crescimento e à migração dos planetas gigantes; a erosão de atmosfera por impactos; a formação de um Marte pequeno pela redução de sua zona de alimentação; a bifurcação entre oceanos de magma que condensam água e mundos mantidos sob estufa de vapor; o hidrogênio como um dos elementos leves responsáveis pelo déficit de densidade do núcleo; e a origem da camada E′ pela reação entre água subductada e ferro líquido na base do manto (Kim et al., 2023; Tagawa et al., 2021). Esses mecanismos possuem apoio quantitativo e incertezas próprias, e a quantidade de hidrogênio armazenada no núcleo permanece mal determinada.

São leituras integradoras deste livro a massa terrestre como variável que primeiro amplia a captura e depois favorece a retenção; a água como fio entre diferenciação, fusão, tectônica, continente, plataforma, reator e vida; a repetição de sua função em sistemas formados por aquíferos e fluidos diferentes; e o circuito que liga a água ao campo magnético, no qual o hidrogênio entregue ao núcleo participa da convecção que sustenta o dínamo e o campo resultante ajuda a preservar a água que permanece na superfície. Esse último circuito é plausível em cada etapa e ainda não foi quantificado como um todo. A participação de Theia na entrega de água resta como hipótese a ser confirmada.

Conclusão

A água é a mãe da Terra porque participa das transformações que fazem deste corpo um planeta geologicamente vivo. A frase fala de processo, mas a água não teve intenção, não planejou continentes, placas, minérios ou leitores. Ela apenas alterou as probabilidades em cada etapa, repetidas vezes, durante tempo suficiente.

Sua própria genealogia alcança o hidrogênio, o elemento mais antigo do universo. Nascido nos primeiros minutos do cosmos, ele entrou na nebulosa solar, ligou-se à rocha, foi capturado como gás, reagiu no oceano de magma e terminou em minerais, vapor e oceano. A licença poética sobe, assim, mais uma geração: a Terra é neta do primeiro minuto.

No fim deste capítulo, o planeta está molhado, diferenciado e coberto por uma casca primordial. O interior conserva energia; a superfície começa a guardar um arquivo. Parece um equilíbrio. Então chega Theia.

Referências

Alexander, C. M. O'D.; Bowden, R.; Fogel, M. L.; Howard, K. T.; Herd, C. D. K.; Nittler, L. R. (2012). The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets. Science, 337, 721–723. https://doi.org/10.1126/science.1223474

Budde, G.; Burkhardt, C.; Kleine, T. (2019). Molybdenum isotopic evidence for the late accretion of outer Solar System material to Earth. Nature Astronomy, 3, 736–741. https://doi.org/10.1038/s41550-019-0779-y

Connelly, J. N.; Bizzarro, M.; Krot, A. N.; Nordlund, Å.; Wielandt, D. K. P.; Ivanova, M. A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. Science, 338, 651–655. https://doi.org/10.1126/science.1226919

Drake, M. J. (2005). Origin of water in the terrestrial planets. Meteoritics & Planetary Science, 40, 519–527. https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2005.tb00960.x

Greenwood, R. C.; Franchi, I. A.; Jambon, A.; Barrat, J. A.; Burbine, T. H. (2006). Oxygen isotope variation in stony-iron meteorites. Science, 313, 1763–1765. https://doi.org/10.1126/science.1128865

Grove, T. L.; Till, C. B.; Krawczynski, M. J. (2012). The role of H□O in subduction zone magmatism. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 40, 413–439. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105310

Hallis, L. J.; Huss, G. R.; Nagashima, K.; Taylor, G. J.; Halldórsson, S. A.; Hilton, D. R.; Mottl, M. J.; Meech, K. J. (2015). Evidence for primordial water in Earth's deep mantle. Science, 350, 795–797. https://doi.org/10.1126/science.aac4834

Hamano, K.; Abe, Y.; Genda, H. (2013). Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean. Nature, 497, 607–610. https://doi.org/10.1038/nature12163

Hirschmann, M. M. (2006). Water, melting, and the deep Earth H□O cycle. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 34, 629–653. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125211

Jakosky, B. M.; Slipski, M.; Benna, M.; Mahaffy, P.; Elrod, M.; Yelle, R.; Stone, S.; Alsaeed, N. (2017). Mars' atmospheric history derived from upper-atmosphere measurements of ^{3}□Ar/^{3}□Ar. Science, 355, 1408–1410. https://doi.org/10.1126/science.aai7721

Jiang, Z.; Liu, Q.; Zhao, X.; Roberts, A. P.; Heslop, D.; Barrón, V.; Torrent, J. (2016). Magnetism of Al-substituted magnetite reduced from Al-hematite. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121, 4195–4210. https://doi.org/10.1002/2016JB012863

Johansen, A.; Oishi, J. S.; Mac Low, M.-M.; Klahr, H.; Henning, T.; Youdin, A. (2007). Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks. Nature, 448, 1022–1025. https://doi.org/10.1038/nature06086

Kim, T.; O'Rourke, J. G.; Lee, J.; Chariton, S.; Prakapenka, V.; Husband, R. J.; Giordano, N.; Liermann, H.-P.; Shim, S.-H.; Lee, Y. (2023). A hydrogen-enriched layer in the topmost outer core sourced from deeply subducted water. Nature Geoscience, 16, 1208–1214. https://doi.org/10.1038/s41561-023-01324-x

Lodders, K. (2003). Solar System abundances and condensation temperatures of the elements. The Astrophysical Journal, 591, 1220–1247. https://doi.org/10.1086/375492

Médard, E.; Grove, T. L. (2008). The effect of H□O on the olivine liquidus of basaltic melts: experiments and thermodynamic models. Contributions to Mineralogy and Petrology, 155, 417–432. https://doi.org/10.1007/s00410-007-0250-4

Melosh, H. J.; Vickery, A. M. (1989). Impact erosion of the primordial atmosphere of Mars. Nature, 338, 487–489. https://doi.org/10.1038/338487a0

Morbidelli, A.; Chambers, J.; Lunine, J. I.; Petit, J. M.; Robert, F.; Valsecchi, G. B.; Cyr, K. E. (2000). Source regions and timescales for the delivery of water to the Earth. Meteoritics & Planetary Science, 35, 1309–1320. https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01518.x

Moyen, J.-F.; Martin, H. (2012). Forty years of TTG research. Lithos, 148, 312–336. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010

Pearson, D. G.; Brenker, F. E.; Nestola, F.; McNeill, J.; Nasdala, L.; Hutchison, M. T.; Matveev, S.; Mather, K.; Silversmit, G.; Schmitz, S.; Vekemans, B.; Vincze, L. (2014). Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond. Nature, 507, 221–224. https://doi.org/10.1038/nature13080

Piani, L.; Marrocchi, Y.; Rigaudier, T.; Vacher, L. G.; Thomassin, D.; Marty, B. (2020). Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. Science, 369, 1110–1113. https://doi.org/10.1126/science.aba1948

Raymond, S. N.; Izidoro, A. (2017). Origin of water in the inner Solar System: planetesimals scattered inward during Jupiter and Saturn's rapid gas accretion. Icarus, 297, 134–148. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.06.030

Sobolev, A. V.; Asafov, E. V.; Gurenko, A. A.; Arndt, N. T.; Batanova, V. G.; Portnyagin, M. V.; Garbe-Schönberg, D.; Krasheninnikov, S. P. (2016). Komatiites reveal a hydrous Archaean deep-mantle reservoir. Nature, 531, 628–632. https://doi.org/10.1038/nature17152

Tagawa, S.; Sakamoto, N.; Hirose, K.; Yokoo, S.; Hernlund, J.; Ohishi, Y.; Yurimoto, H. (2021). Experimental evidence for hydrogen incorporation into Earth's core. Nature Communications, 12, 2588. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22035-0

Walsh, K. J.; Morbidelli, A.; Raymond, S. N.; O'Brien, D. P.; Mandell, A. M. (2011). A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. Nature, 475, 206–209. https://doi.org/10.1038/nature10201

Way, M. J.; Del Genio, A. D. (2020). Venusian habitable climate scena-

rios: modeling Venus through time and applications to slowly rotating Venus-like exoplanets. Journal of Geophysical Research: Planets, 125, e2019JE006276. https://doi.org/10.1029/2019JE006276

Young, E. D.; Shahar, A.; Schlichting, H. E. (2023). Earth shaped by primordial H□ atmospheres. Nature, 616, 306–311. https://doi.org/10.1038/s41586-023-05823-0

Capítulo 2. Depois de Theia: a fabricação dos primeiros continentes

Da casca que o impacto encontrou à destilação dos primeiros continentes, uma herança lunar, uma hipótese de perda e a Terra que reaprendeu a flutuar

Modelo de trabalho

A Terra que Theia atingiu já era um planeta diferenciado, com núcleo, manto, água e uma primeira casca em que o oceano de magma havia começado a separar o leve do pesado. A hipótese deste capítulo é que o impacto levou para o disco que formou a Lua a maior parte dessa casca leve, rica em plagioclásio. A Lua a separou de novo e a exibe até hoje nas terras altas; a Terra recongelou com uma superfície máfica, densa e sem folga para flutuar. Hidratada pelo primeiro oceano e aquecida por baixo, essa tampa afundou em gotas, fundiu e destilou os primeiros continentes. Vênus, sem lua e sem placas, é o controle natural, confundido pela perda precoce da água. A casca pré-impacto, a fração transferida e a consequência geodinâmica são hipóteses. As contas de volume e de alumínio que as testam usam números

medidos.

Theia · Lua · oceano de magma · plagioclásio · anortosito · cumulato · casca raspada · eclogito · sagducção · Vênus · tésseras · TTG · Hadeano–Paleoarqueano · ca. 4,5–3,5 Ga

Resumo

O capítulo anterior deixou a Terra molhada, diferenciada e coberta por uma primeira casca. Este começa quando essa arquitetura é desfeita por um corpo do tamanho de Marte. A Lua é o que sobrou do acidente, e é também a melhor amostra de mão que temos da Terra daquele tempo, guardada fora da Terra. Suas rochas mais antigas são anortositos, feitos quase só de plagioclásio, o mineral leve que flutua no magma. A Terra não tem nada parecido preservado. Essa assimetria pode ser apenas o resultado de dois corpos que esfriaram com gravidades e histórias diferentes. Pode também guardar uma transferência de herança.

A ideia de que o componente anortosítico da Lua veio principalmente da Terra foi sugerida por Yasunori Miura em 2009, num resumo de congresso. Este capítulo a transforma em hipótese quantitativa. Adota um cenário de trabalho em que cerca de três quartos da casca leve terrestre entraram no disco que formou a Lua, verifica se esse material cabe na Lua e pergunta o que a perda fez com o planeta que ficou.

A conta fecha. Uma película de quatro quilômetros de anortosito sobre três quartos da superfície terrestre tem o volume e o alumínio da crosta lunar atual; uma casca mista, de composição basáltica média, exige sete a dez quilômetros. Do lado terrestre, a perda do componente leve teria deixado a tampa que recongelou mais densa e mais fácil de afundar. Hidratada pelo primeiro oceano, engrossada pelo vulcanismo e aquecida por baixo, essa crosta fundiu e se separou em duas partes. O líquido leve, félsico, ficou em cima e virou os primeiros continentes. O resíduo denso, máfico, desceu. A sequência é plausível e testável. Ainda não é uma história provada.

1. A Lua como testemunha

Não é preciso telescópio para começar este capítulo. Basta olhar para cima numa noite clara. A Lua é grande demais para o planeta que orbita. Nenhum outro planeta rochoso do Sistema Solar tem um satélite com mais de um por cento de sua massa. Marte tem duas pedras capturadas; Vênus e Mercúrio não têm nada. Essa desproporção é a primeira pista de que a Lua não foi capturada nem nasceu ao lado da Terra como irmã menor. Ela saiu da Terra.

As outras pistas vieram nas caixas da Apollo. Entre 1969 e 1972, as seis missões que pousaram trouxeram 382 quilos de rocha e solo lunar; as sondas automáticas soviéticas Luna acrescentaram algumas centenas de gramas. Quatro observações feitas sobre esse material organizam tudo o que se sabe sobre a origem da Lua.

A primeira é a falta de ferro. A Lua tem densidade média de 3,3 gramas por centímetro cúbico, perto da do manto terrestre e muito abaixo dos 5,5 da Terra inteira. O núcleo metálico lunar, detectado pelos sismômetros das Apollo e refinado décadas depois, tem cerca de 330 quilômetros de raio e responde por menos de dois por cento da massa do satélite (Weber et al., 2011). Na Terra, o núcleo é quase um terço. A Lua é feita, sobretudo, de material de manto.

A segunda é a secura. As rochas lunares são pobres em tudo o que evapora com facilidade. Sódio, potássio, zinco, chumbo e água aparecem em quantidades muito menores que nas rochas terrestres equivalentes. O material que formou a Lua passou por temperaturas altas o bastante para perder voláteis antes de se reunir.

A terceira é a identidade isotópica. O oxigênio tem três isótopos estáveis, e a proporção entre eles varia de um corpo do Sistema Solar para outro como um sotaque varia de uma região para outra. Marte tem o seu, Vesta tem o seu, cada família de meteoritos tem o seu. A Lua tem o sotaque da Terra, indistinguível nas primeiras medidas de precisão e quase idêntico nas mais recentes (Wiechert et al., 2001). O titânio repete o resultado (Zhang et al., 2012). Ou a Lua foi feita de material

terrestre, ou o material que a fez se misturou tão bem com a Terra que as diferenças desapareceram.

A quarta é a idade. As rochas mais antigas das terras altas lunares têm idades de cristalização agrupadas perto de 4,35 bilhões de anos, e a análise desse agrupamento situa a formação da Lua entre 4,43 e 4,53 bilhões de anos (Borg et al., 2011; Nimmo et al., 2024). Contado a partir dos primeiros sólidos do Sistema Solar, descritos no capítulo anterior, o satélite nasceu entre quarenta e cento e quarenta milhões de anos depois do começo. A Terra já estava quase pronta.

Satélite grande demais, pobre em ferro, seco, isotopicamente igual ao planeta e formado no fim da acreção. A hipótese que reúne essas cinco observações foi proposta nos anos 1970 (Hartmann e Davis, 1975; Cameron e Ward, 1976) e amadureceu com simulações numéricas nas décadas seguintes. Um corpo do tamanho de Marte atingiu a proto-Terra de raspão. O ferro dos dois corpos afundou e se juntou no núcleo terrestre; o material silicático das camadas externas foi aquecido, fundido, vaporizado e lançado em órbita; o disco resultante se agregou e formou a Lua (Canup e Asphaug, 2001). O corpo que bateu recebeu o nome de Theia, a titã que na mitologia grega foi mãe de Selene, a Lua.

A versão clássica tem um problema conhecido. Nas simulações, a maior parte do disco vem de Theia, e para a Lua ser isotopicamente igual à Terra seria preciso que Theia também fosse, o que exige uma coincidência. As respostas variam. Uma Terra girando muito mais depressa antes do impacto permite lançar ao disco mais material terrestre (Ćuk e Stewart, 2012); um impactador maior, de metade da massa da Terra, mistura melhor os dois corpos (Canup, 2012); uma estrutura passageira em forma de rosca de rocha vaporizada, chamada sinestia, pode homogeneizar tudo antes de a Lua condensar (Lock et al., 2018); uma proto-Terra coberta por oceano de magma, modelada com uma equação de estado própria para silicato fundido, entrega uma Lua feita em cerca de oitenta por cento de material terrestre (Hosono et al., 2019). O impacto permanece em todas as versões. O que muda é quanto da Lua veio da Terra.

É aqui que este capítulo entra. Se a Lua recebeu muito material terrestre, o golpe funcionou também como raspagem. Ele retirou do planeta parte da camada que a Terra vinha construindo. O mesmo evento passa então a responder por duas histórias ligadas entre si, a composição da Lua e a composição da superfície que a Terra precisou fabricar de novo.

O problema cabe em três perguntas. Que casca existia na Terra antes do impacto? Que fração dela entrou no disco? E que diferença essa perda fez para a crosta que recongelou? As duas primeiras pertencem à ciência planetária. A terceira pertence à geodinâmica. O capítulo cruza as três, com graus de certeza diferentes, e precisa antes de uma ferramenta.

2. A régua da densidade

A ferramenta é a mais antiga da geologia e cabe numa frase. O que é mais leve sobe; o que é mais pesado desce. Num planeta derretido, essa regra organiza tudo. Convém, porém, dar número a ela, porque é o número que decide o resto do capítulo.

Um magma basáltico, o líquido mais comum que o manto produz, tem densidade perto de 2,7 gramas por centímetro cúbico quando está quente e sem pressão, e passa de 2,9 nas profundidades de um oceano de magma. Os primeiros cristais que se formam quando ele esfria são olivina e piroxênio, minerais de magnésio e ferro com densidade de 3,2 a 3,4. Eles afundam. Mais tarde cristaliza o plagioclásio, um feldspato de cálcio, sódio, alumínio e silício, com densidade de 2,7. Ele flutua, ou ao menos não afunda. É a nata do magma.

Dois adjetivos resumem essa régua e acompanham o livro inteiro. Máfico, palavra montada com magnésio e ferro, nomeia as rochas e os magmas dominados por olivina e piroxênio. São escuros, densos e pobres em sílica. Basalto, gabro e peridotito são máficos; os ainda mais ricos em magnésio, como o komatiito, recebem o prefixo ultra. Félsico, de feldspato e sílica, nomeia o lado leve. São rochas claras, ricas em feldspato e quartzo, pobres em ferro. O granito é félsico, e os TTG do

fim deste capítulo também. Entre os dois extremos ficam as rochas intermediárias. A régua é de densidade e de cor ao mesmo tempo, e por isso pode ser lida num afloramento a olho nu.

Uma rocha formada quase só por plagioclásio recebe o nome de anortosito. É clara, quase branca, e é exatamente a rocha das terras altas da Lua, as regiões brilhantes que se veem a olho nu. Os basaltos escuros dos mares lunares vieram depois, preenchendo as grandes crateras. A Lua, vista de uma varanda, é um mapa de densidades. O claro é o que flutuou. O escuro é o que subiu mais tarde por fraturas.

Esse ordenamento tem nome técnico. Quando cristais se separam de um líquido e se acumulam, o produto se chama cumulato. A palavra descreve uma sedimentação dentro do magma. Cristais pesados formam camadas no fundo; cristais leves formam camadas no topo; o líquido que sobra entre eles escapa ou reage; novos pulsos de magma chegam, dissolvem o que estava pronto e refazem as camadas. O corpo final guarda uma estratigrafia magmática, com horizontes ricos em olivina, em piroxênio ou em plagioclásio registrando etapas diferentes da evolução do reservatório. Um oceano de magma não solidifica como água numa bandeja. Solidifica por escolhas químicas sucessivas, e cada cristal que sai muda a composição do líquido que fica (Elkins-Tanton, 2012).

Em Carajás, essa máquina pode ser vista em escala de afloramento. Os complexos máfico-ultramáficos acamadados de Luanga e Vermelho, além de corpos menores como o Formiga, pertencem ao grande episódio magmático que acompanhou a abertura da bacia de Itacaiúnas, por volta de 2,76 a 2,75 bilhões de anos. Magmas primitivos vindos do manto subiram pelas estruturas de abertura e se instalaram em diferentes níveis da crosta (Mansur e Ferreira Filho, 2016). A comparação com um oceano de magma é de processo, não de idade e menos ainda de escala. Mas o processo é o mesmo.

Esses complexos não nasceram de uma injeção única. Reservatórios mais profundos alimentaram as intrusões rasas por pulsos sucessivos, cada um com sua temperatura, sua composição e sua carga de cristais.

Olivina, piroxênios e cromita se separaram do líquido; pulsos novos remobilizaram ou recobriram os cristais anteriores; nas porções mais evoluídas formaram-se níveis cada vez mais ricos em plagioclásio, como os gabros. O resultado é uma câmara magmática fossilizada, uma pilha de horizontes que preserva a ordem em que o magma mudou. A mesma diferenciação concentrou metais. Em Luanga, platina, paládio, cromo e níquel ocupam horizontes de poucos metros ligados a cromititos e sulfetos. Em Vermelho, a história continuou depois que o magma já era rocha, quando o intemperismo tropical retrabalhou os cumulatos ultramáficos e concentrou níquel e cobalto na capa de alteração (Mansur e Ferreira Filho, 2020; Siepierski e Ferreira Filho, 2020). Primeiro o magma selecionou. Muito mais tarde, a água e a atmosfera selecionaram de novo.

Luanga importa aqui por um motivo simples. Ele mostra como uma pequena diferença de densidade, repetida por tempo suficiente, fabrica camadas que parecem improváveis. É esse mecanismo, ampliado a um planeta inteiro, que a próxima seção transporta para a Terra de antes de Theia.

Falta uma palavra para fechar a régua. Flutuabilidade é a capacidade de uma camada permanecer em cima da camada de baixo. Depende da diferença de densidade entre as duas e da espessura da camada de cima. Uma crosta é flutuante enquanto for mais leve que o manto que a sustenta. A crosta continental atual, com densidade média de 2,7, flutua com folga sobre um manto de 3,3. Guarde esse par de números. O capítulo volta a ele quando a crosta deixar de flutuar.

3. A casca que o impacto encontrou

Transposta para a proto-Terra, a régua da densidade produz uma possibilidade. Um oceano de magma em cristalização poderia ter acumulado, nos níveis externos, uma casca enriquecida em plagioclásio. Foi assim na Lua (Wood et al., 1970; Warren, 1985). Modelos de continentes primordiais anortosíticos foram publicados para a Terra hadeana, e alguns propõem que essa primeira crosta foi depois destruída e reci-

clada (Maruyama et al., 2013; Santosh et al., 2017). A semelhança entre os anortositos lunares e os anortositos terrestres muito antigos é discutida desde Windley (1970) e foi reavaliada numa grande compilação geoquímica recente (Sotiriou et al., 2024).

O tempo disponível não impede essa separação. A Lua se formou entre quarenta e cento e quarenta milhões de anos depois dos primeiros sólidos. Em modelos de resfriamento acoplado à atmosfera, um oceano de magma terrestre alcança o estágio de forte cristalização e de condensação da água em um a poucos milhões de anos, embora a duração dependa da profundidade fundida, dos voláteis e da atmosfera (Lebrun et al., 2013). Havia tempo para mais de um ciclo de fusão e diferenciação.

O requisito mais restritivo é outro. É calmaria. Cada impacto grande o bastante para refundir a superfície zerava parte da estratigrafia recém-formada. A casca que Theia teria removido precisava ter sido produzida depois do último evento capaz de remexer o planeta inteiro e sobreviver até o golpe lunar. A hipótese não exige dezenas de milhões de anos de paz. Pode exigir alguns milhões, talvez menos. Mas exige um intervalo real entre pancadas, e esse intervalo pode um dia ser lido nas distribuições de tempo entre impactos gigantes das simulações de acreção.

A química permite que essa primeira destilação tenha sido surpreendentemente evoluída. Turner et al. (2025) calcularam a composição de uma protocrosta extraída do oceano de magma depois da segregação do núcleo e obtiveram uma assinatura de elementos-traço notavelmente parecida com a da crosta continental média. Elementos-traço são os que aparecem em partes por milhão. Os que preferem o líquido ao cristal, e por isso se chamam incompatíveis, concentram-se no último líquido a cristalizar e funcionam como marca d'água de uma destilação. O resultado enfraquece o argumento de que essa marca só pode nascer de subducção. Para este capítulo, ele demonstra que um oceano de magma produz cedo uma crosta quimicamente enriquecida. Não demonstra que essa crosta era anortosítica, contínua ou flutuante.

Esse ponto precisa ficar firme desde já. Nenhuma rocha terrestre anterior a Theia sobreviveu para mostrar uma crosta anortosítica global. Nem todo modelo de oceano de magma terrestre produz uma tampa contínua de plagioclásio. A gravidade maior, a pressão mais alta, a convecção mais vigorosa, a água, a renovação por impactos e a possibilidade de cristalização a partir do fundo alteram a segregação. A casca anortosítica pré-impacto é uma arquitetura possível, apoiada por física conhecida e por modelos publicados. Neste capítulo ela é tratada como premissa a testar.

4. O que o impacto levou

Impactos gigantes acoplam energia com mais eficiência às regiões externas dos corpos. A geometria oblíqua arranca, estira e aquece o material silicático antes que os núcleos metálicos se combinem. Esse viés torna plausível que uma casca externa seja removida em proporção maior que o manto profundo. Simulações de erosão colisional mostram, em outros contextos, que impactos empobrecem planetas em crosta enriquecida e alteram sua composição global (O'Neill e Palme, 2008; Carter et al., 2018; Frossard et al., 2022). Plausível não significa quantificado para esta casca em particular, e os modelos de formação lunar não entregam uma partição única. Na colisão canônica, a maior parte do disco vem de Theia. Nos cenários de rotação rápida, de sinestia ou de oceano de magma, a mistura é muito maior.

A identidade isotópica entre Terra e Lua restringe os modelos sem escolher entre eles. Pode vir de uma contribuição terrestre alta, de mistura e reequilíbrio no disco, de condições especiais de impacto ou de uma Theia formada de material parecido com o terrestre. O dado autoriza afirmar parentesco extremo. Não autoriza apontar qual camada forneceu cada mineral lunar.

A ideia de uma herança anortosítica terrestre na Lua já foi dita em público. Em 2009, Yasunori Miura apresentou à reunião anual do Lunar Exploration Analysis Group o resumo *Lunar Crust Components from Planets at the Giant Impact Event*, propondo que os componentes anortosí-

ticos da crosta lunar teriam sido removidos principalmente da Terra primordial durante o impacto gigante (Miura, 2009). Era uma página, direta e arriscada, e não encontrei desenvolvimento posterior da proposta em simulações, balanços de massa ou modelos geodinâmicos. A prioridade é dele. O que este capítulo acrescenta começa depois, com uma arquitetura física para a casca, uma fração explícita, uma conta de volume e de alumínio e uma pergunta nova sobre o efeito da perda na Terra que ficou.

Convém ler a imagem da casca raspada com precisão. O impacto não descascou uma laranja e colou a casca no céu. As rochas anortosíticas das terras altas não foram arrancadas intactas e depositadas na Lua. O disco protolunar passou por fusão, vapor, mistura, condensação e agregação; mesmo que fragmentos sólidos tenham sobrevivido aqui e ali, a arquitetura crustal lunar foi construída depois. O que pode ter origem terrestre é o inventário feldspático, o alumínio, o cálcio, o silício e os fundidos que os carregavam. O anortosito lunar, como rocha organizada, cristalizou e se acumulou na Lua. A Lua recebeu a herança como matéria. Sua própria diferenciação reconstruiu a forma.

5. A conta na mesa da cozinha

Para que a hipótese deixe de ser uma imagem, é preciso dar-lhe uma fração. Adoto um cenário de ponta. O impacto transfere ao disco cerca de três quartos do volume de uma casca externa terrestre e devolve ou remistura o quarto restante no oceano de magma da Terra. Três quartos não são uma medida, nem um número fornecido pelas simulações citadas. São uma premissa deliberadamente forte. Se a conta falhar, o cenário pode ser descartado. Se fechar, ganha apenas o direito de ser testado por modelos melhores.

Os números da Lua são medidos. Raio médio de 1.737 quilômetros, volume de $2{,}20 \times 10^{1}$□ quilômetros cúbicos, massa de $7{,}34 \times 10^{22}$ quilogramas. A missão GRAIL, que mapeou o campo de gravidade lunar com duas sondas gêmeas, indica que a crosta das terras altas tem densidade média próxima de 2.550 quilogramas por metro cúbico, baixa

porque é porosa de tanto impacto, e espessura média global da ordem de 34 a 43 quilômetros, conforme o modelo (Wieczorek et al., 2013). Esse invólucro corresponde a cerca de 1,3 a 1,6 × 10□ quilômetros cúbicos. Se sua composição média contiver aproximadamente trinta e um por cento de óxido de alumínio, o Al□O□ que o plagioclásio carrega, o estoque crustal é da ordem de $1{,}1 \times 10^{21}$ quilogramas desse óxido.

Agora a Terra. Sua superfície mede 5,10 × 10□ quilômetros quadrados. Espalhe sobre ela uma camada de espessura t e retire três quartos. O volume transferido é 0,75 × 5,10 × 10□ × t. Para t igual a quatro quilômetros, o resultado é 1,53 × 10□ quilômetros cúbicos. É o volume da crosta lunar atual. Se essa camada fosse fortemente anortosítica, com densidade perto de 2.750 quilogramas por metro cúbico e cerca de trinta por cento de Al□O□, carregaria aproximadamente $1{,}3 \times 10^{21}$ quilogramas do óxido. O alumínio também fecha.

Vale medir o que são quatro quilômetros num planeta. O raio da Terra tem 6.371 quilômetros; quatro quilômetros são seis centésimos de um por cento dele. Num globo escolar de um metro de diâmetro, a casca teria um terço de milímetro, pouco mais que uma demão de tinta. A casca de uma laranja, em proporção, é mais de cem vezes mais grossa. A hipótese não pede que a Terra tenha perdido uma camada absurda. Pede que tenha perdido a pintura.

Uma casca real provavelmente não seria anortosito puro. Misturaria plagioclásio, gabro, norito, fundido residual e cumulatos arrastados. Se for aproximada por uma composição basáltica média, com cerca de quinze por cento de Al□O□, são necessários sete a dez quilômetros para fornecer o alumínio hoje concentrado na crosta lunar. O material transferido nessa faixa representaria onze a quinze por cento da massa da Lua. O resto viria dos mantos da proto-Terra e de Theia, e parte do alumínio permaneceria no manto lunar ou seria redistribuída quando os cumulatos lunares se revolveram.

Casca mais espessa também cabe, mas cobra um preço. Três quartos de uma camada de dez a trinta quilômetros equivalem a quinze a quarenta e cinco por cento da massa lunar. O cenário deixa de ser a transfe-

rência de um enriquecimento crustal e passa a exigir que grande parte da Lua seja essa casca remisturada. Não é impossível nos modelos mais terrestres, mas enfraquece a economia da hipótese. A faixa de quatro quilômetros para um extremo anortosítico e de sete a dez para uma casca mista funciona melhor como primeira janela de teste.

A conta também mostra o que não se pode inferir. A crosta lunar atual não é um recipiente intacto do material ejetado; sua espessura foi mudada por cristalização, compactação, revolvimento, magmatismo e impactos. O teor de alumínio do manto lunar ainda é discutido. A composição da casca terrestre pré-impacto é desconhecida. Cada número carrega uma faixa. O fechamento em ordem de grandeza mostra compatibilidade de inventário, não uma reconstrução única.

E há uma tentação a evitar. O quarto retido na Terra não deve ser equiparado aos continentes de hoje. Depois do impacto, novos basaltos foram extraídos do manto, hidratados, fundidos, reciclados e acrescentados à crosta por bilhões de anos. A semelhança entre um quarto retido e a fração emersa da superfície moderna é visualmente sedutora e geologicamente fraca, porque muda quando se incluem as plataformas submersas e porque confunde área com volume e composição. A hipótese se defende pelos balanços lunar e terrestre, não por essa coincidência.

Quatro testes poderiam transformar a premissa em resultado. Uma simulação de impacto que represente explicitamente uma tampa feldspática sobre a proto-Terra e calcule sua partição. Um orçamento completo de alumínio e de outros elementos refratários na Lua inteira, não só na crosta. A busca das consequências geoquímicas da remoção e da remistura no manto terrestre. E a comparação, em modelos geodinâmicos, de duas litosferas pós-impacto idênticas em tudo, menos na quantidade de componente leve retido. A hipótese prevê que a Terra raspada afunde e recicle mais facilmente.

6. Dois oceanos de magma

O impacto produziu dois sistemas que começaram quentes e terminaram diferentes.

A protolua se agregou a partir do disco e fundiu extensamente. Durante a cristalização do oceano de magma lunar, olivina e piroxênios formaram os cumulatos densos do fundo. O plagioclásio apareceu nas etapas avançadas, quando grande parte do magma já era cristal, e sua densidade menor o levou aos níveis superiores. Assim se formou a crosta anortosítica das terras altas, o primeiro grande invólucro sólido da Lua (Heiken et al., 1991; Schmidt e Kraettli, 2022). A imagem da flotação continua útil, embora os detalhes incluam suspensão de cristais, compactação, migração de fundido e um revolvimento posterior das camadas.

Se o disco chegou enriquecido no componente feldspático terrestre, a diferenciação lunar não criou o inventário do nada. Selecionou-o de novo. Essa formulação concilia duas proposições que parecem competir. A crosta anortosítica pode ter se formado na Lua por flotação de plagioclásio e, ao mesmo tempo, seus ingredientes podem ter vindo em grande parte da proto-Terra. Origem da matéria e lugar de cristalização são perguntas diferentes.

Na Terra, tudo conspirava contra uma nata limpa. A gravidade era maior, o oceano de magma era muito mais profundo e a convecção, mais vigorosa. A pressão restringia o campo em que o plagioclásio é estável aos níveis mais externos. A água, cuja chegada o capítulo 1 contou, mudava as temperaturas de fusão, as viscosidades e a ordem de cristalização. Uma atmosfera espessa retardava a perda de calor. Impactos posteriores continuavam a remexer a superfície. Não é seguro resumir isso dizendo apenas que a água impediu o plagioclásio de flutuar. O conjunto das condições terrestres tornava improvável a preservação de uma crosta global simples, clara e estável como a lunar.

A hipótese da perda acrescenta um viés inicial. Se grande parte do material externo mais rico em plagioclásio entrou no disco, o oceano de

magma terrestre recomeçou empobrecido nesse componente e, em termos relativos, enriquecido nos cumulatos máficos e ultramáficos que ficaram. O quarto retido foi remisturado. Ao recongelar, a Terra produziria uma primeira litosfera predominantemente basáltica, talvez com bolsões feldspáticos e fundidos mais evoluídos, mas sem uma tampa anortosítica global capaz de lhe dar folga de flutuabilidade.

Essa é a assimetria central do capítulo. A Lua recebeu matéria, separou a nata e a exibiu. A Terra reteve um reservatório muito maior, misturou o que sobrou e precisou fabricar leveza por outro caminho.

7. A primeira litosfera e o primeiro oceano

A tampa que se formou sobre a Terra pós-impacto era máfica no sentido amplo da palavra. Basaltos e gabros na crosta, rochas ainda mais ricas em magnésio onde o grau de fusão era alto, peridotito no manto logo abaixo. Não era uma placa oceânica moderna. O manto estava mais quente, a produção de magma era intensa e a camada rígida provavelmente era fina, descontínua e continuamente remendada. Chamar essa crosta de oceânica descreve sua composição e sua densidade, não um sistema de dorsais e fossas já instalado.

A água entrou em cena sobre essa superfície. À medida que o planeta esfriou, o vapor condensou, as rochas foram alteradas, a água entrou em minerais e fraturas e os magmas continuaram a desgaseificar. O testemunho mais antigo desse encontro cabe na ponta de uma agulha. São os zircões detríticos de Jack Hills, na Austrália, grãos de menos de meio milímetro que sobreviveram à destruição das rochas em que nasceram e foram depositados num arenito muito mais jovem. Alguns deles têm 4,4 bilhões de anos. Seus isótopos de oxigênio exigem que o magma de onde cristalizaram tenha fundido rocha previamente alterada por água em baixa temperatura (Wilde et al., 2001; Valley et al., 2002). Eles não fotografam um oceano global. Exigem, porém, um ciclo entre superfície fria e interior quente num intervalo da ordem de cem milhões de anos depois do impacto.

A presença de água mudou a crosta sem precisar de conceito novo. Basalto hidratado funde a temperaturas menores; minerais hidratados transportam água para profundidade; a fusão parcial separa um líquido mais rico em sílica de um resíduo mais máfico. O planeta já tinha, portanto, os ingredientes da destilação continental, uma tampa basáltica, água em cima, calor embaixo e mecanismos capazes de enterrar ou engrossar a tampa.

Havia também tempo para que reservatórios antigos sobrevivessem, e aqui a geoquímica oferece dois instrumentos que merecem explicação. O primeiro é um relógio de corda curta. O samário-146 decai para o neodímio-142 com meia-vida da ordem de cem milhões de anos, o que significa que ele se esgotou quase por completo nos primeiros quinhentos milhões de anos da Terra. Se uma rocha carrega uma anomalia de $^{1}\square^{2}$Nd, essa anomalia só pode ter sido criada enquanto o relógio ainda tinha corda, isto é, no Hadeano. Rochas muito antigas carregam essas anomalias e registram diferenciação do manto e formação de crosta naquele éon, embora a leitura exata tenha mudado com o reconhecimento de que parte do sinal é herança da nebulosa (O'Neil et al., 2008; Burkhardt et al., 2016). O registro não exige uma única casca preservada. Exige diferenciação precoce, destruição incompleta e retrabalhamento repetido.

O segundo instrumento não é um relógio. É uma impressão digital, como o molibdênio do capítulo anterior. Wang et al. (2025) identificaram pequenos déficits de potássio-40 em algumas rochas máficas arqueanas e em basaltos modernos derivados de fontes profundas, e os interpretaram como vestígio de um componente do manto anterior ao impacto gigante. A interpretação é nova e depende de modelos de acreção, mas aponta para um limite importante. Theia não precisa ter homogeneizado o planeta inteiro. O dado fala do manto sobrevivente, não de uma casca exportada para a Lua.

O quadro que emerge é menos limpo que um planeta coberto por uma tampa imóvel. A Terra hadeana provavelmente reuniu, ao mesmo tempo, domínios de tampa estagnada, regiões amolecidas por plumas, cicatrizes de impacto, afundamentos locais e episódios passageiros de

convergência. A heterogeneidade não é ruído acrescentado depois. É o modo esperado de funcionamento de uma litosfera jovem que ainda não tinha encontrado uma geometria global estável.

8. Um planeta preparado para afundar

Volte ao par de números da seção 2. Crosta de 2,7 sobre manto de 3,3 flutua. Uma crosta basáltica tem densidade perto de 3,0, e ainda flutua, com menos folga. O problema aparece quando ela engrossa e esfria. Na base de uma pilha basáltica espessa, a pressão e a temperatura transformam a mineralogia. O plagioclásio desaparece; crescem granada e piroxênios densos; o basalto vira granulito e, mais fundo, eclogito, uma rocha de 3,4 a 3,6. Nesse momento a base da crosta fica mais pesada que o manto em que se apoia. O chão deixa de segurá-la.

Esse é o segundo número do capítulo, e ele explica por que a Terra não guardou sua primeira tampa. Uma crosta máfica pode flutuar enquanto é quente, fina ou sustentada por manto leve. Ao engordar e esfriar, muda de rocha e afunda. Se a litosfera ainda não tem placas coerentes e limites longos, o afundamento não precisa desenhar uma lâmina inclinada. Pode começar como uma quilha, uma gota ou um corredor irregular.

Drip e sagducção são os nomes dessa geometria vertical. Um drip é uma instabilidade densa que pinga da base da litosfera, como uma gota de mel que se desprende do fundo de uma colher. Sagducção é o afundamento de rochas de superfície entre domos mais quentes e flutuantes que sobem ao lado. Em terrenos granito-greenstone arqueanos, domos de rocha félsica e quilhas de rocha vulcânica e sedimentar preservam parte dessa arquitetura, e o capítulo 4 mostra um exemplo a poucas dezenas de quilômetros de Carajás. Os termos não significam que toda a Terra funcionou assim nem que a subducção horizontal era impossível. Descrevem um mecanismo disponível, e em muitos modelos eficiente, para uma litosfera quente e pouco organizada.

A retirada de uma tampa anortosítica, se ocorreu, não cria sozinha a

sagducção. Ela reduz uma margem de segurança. Uma litosfera empobrecida no componente mais leve precisa de menos engrossamento, menos resfriamento ou menos transformação metamórfica para atingir flutuabilidade negativa. A hipótese da casca raspada prevê predisposição ao afundamento, não inevitabilidade universal. Essa diferença de palavra é a diferença entre um mecanismo testável e uma história fechada antes dos dados.

O calor atuava por baixo. Plumas e grandes pulsos magmáticos aqueciam a base da litosfera, produziam platôs, acrescentavam basalto e criavam contrastes laterais de densidade. O céu atuava por cima. O bombardeio remanescente fraturava, escavava, carregava e soterrava a tampa. Modelos mostram que os impactos hadeanos misturaram e enterraram a crosta em escala ampla e, nos casos grandes, chegaram a iniciar afundamentos ou subducções passageiras (Marchi et al., 2014; O'Neill et al., 2017). O impacto não substitui a instabilidade. Dá o empurrão a um sistema que já está perto de ceder.

Outra rota liga Theia ao interior profundo. Yuan et al. (2023) propuseram que as duas grandes anomalias sísmicas da base do manto sejam restos densos do impactador. Li et al. (2024) modelaram o aquecimento profundo associado ao impacto como origem de plumas capazes de iniciar subducção cerca de duzentos milhões de anos depois. Esses trabalhos não modelam a remoção de uma casca anortosítica. Oferecem uma consequência complementar do mesmo evento, com material e calor de Theia preparando o planeta de baixo para cima, enquanto a hipótese deste capítulo prepara a superfície de cima para baixo.

O sistema deixa de ser uma sequência e vira acoplamento. A crosta engrossa porque o manto produz magma. A base densa afunda. O afundamento leva água e resíduo ao interior. A retirada de massa abre espaço para ascensão e nova fusão. Cada ciclo reorganiza a composição e a densidade do seguinte. A Terra não começa com placas prontas. Começa com diferenças que aprendem a se mover.

9. Vênus, a Terra que não levou o golpe

Toda hipótese precisa de um controle, e este capítulo tem um a quarenta milhões de quilômetros. Vênus tem 95 por cento do diâmetro da Terra, 82 por cento da massa, a mesma composição rochosa em primeira aproximação e nasceu na mesma região do disco. É o planeta mais parecido com o nosso. E não tem lua. Nenhuma, nem pequena. Gira devagar e ao contrário, uma volta a cada 243 dias terrestres, no sentido oposto ao de quase todos os planetas. Se um corpo do tamanho de Marte o atingiu de raspão e lhe arrancou a casca, não deixou satélite para contar.

O que Vênus tem na superfície é uma tampa. O radar da sonda Magellan, nos anos 1990, mapeou um planeta sem dorsais, sem fossas e sem a rede de cadeias que na Terra desenha os limites das placas. As crateras são poucas, cerca de mil, e distribuídas de modo uniforme, o que indica uma superfície com algumas centenas de milhões de anos em quase toda parte. Uma leitura antiga propôs que o planeta renova a superfície em episódios catastróficos, quando o calor acumulado sob a tampa transborda em vulcanismo global (Strom et al., 1994); outras preferem renovação distribuída e contínua. Em todas elas não há placas. A litosfera venusiana é uma peça só, a tampa estagnada que a seção 7 apresentou como um dos estados possíveis da Terra hadeana. Vênus é o planeta que ficou nesse estado.

E a tampa não está morta. Dados de emissividade da Venus Express revelaram fluxos de lava recentes em pontos quentes (Smrekar et al., 2010); modelos das coroas, as grandes estruturas circulares do planeta, indicam plumas ativas sob a litosfera ainda hoje (Gülcher et al., 2020); e a comparação de imagens de radar da Magellan tomadas com meses de diferença flagrou uma boca vulcânica mudando de forma em Maat Mons (Herrick e Hensley, 2023). O planeta tem calor, magma e deformação. O que lhe falta é o mecanismo de devolver a tampa ao manto.

Falta também saber de que a tampa é feita, e aqui entra o detalhe que mais interessa a este capítulo. As planícies venusianas são basálticas;

as sondas soviéticas Venera mediram isso no solo. Mas as regiões mais altas e mais antigas, os platôs deformados chamados tésseras, que ocupam menos de um décimo da superfície, emitem no infravermelho próximo menos que o basalto ao redor. Emissividade baixa é o que se espera de rochas ricas em feldspato e sílica, e a interpretação mais discutida é que as tésseras sejam crosta félsica, talvez granitoides (Hashimoto et al., 2008; Gilmore et al., 2015). Se isso se confirmar, Vênus destilou crosta evoluída em algum momento, com ou sem água, e a guardou em retalhos. As missões DAVINCI e VERITAS, previstas para a década de 2030, podem decidir a questão.

Leia agora Vênus com a régua deste capítulo. É um planeta de massa terrestre, com oceano de magma no início, que nunca teve a casca raspada por um impacto formador de lua. A hipótese prevê que ele tenha conservado sua tampa primitiva com mais folga de flutuabilidade e que essa tampa, sem a predisposição ao afundamento, tenha permanecido inteira. É o que se observa. Uma litosfera única, renovada por cima, com possíveis retalhos félsicos antigos preservados nos altos e nenhuma placa. Vênus parece a Terra que não levou o golpe.

A leitura é tentadora e precisa ser disciplinada por duas razões. A primeira é a água. O capítulo 1 mostrou que Vênus perdeu a sua cedo, cozida numa estufa de vapor da qual o hidrogênio escapou (Hamano et al., 2013). Água é o que enfraquece a litosfera, baixa a temperatura de fusão e lubrifica a subducção; um planeta seco pode manter a tampa estagnada mesmo que tenha sofrido um impacto gigante. Vênus difere da Terra em duas variáveis ao mesmo tempo, a lua e a água, e um experimento com duas variáveis não isola nenhuma. A segunda razão é que o regime tectônico venusiano, antigo e atual, continua em disputa entre tampa estagnada, tampa episódica e deformação localizada, e a natureza félsica das tésseras é inferência espectral, não amostra. Vênus mostra que um planeta de massa terrestre pode seguir outra trajetória. Não prova, por enquanto, qual dos dois ingredientes ausentes o fez parar.

Por isso o papel de Vênus neste livro é o de pergunta vizinha, não o de resposta pronta. Se as tésseras forem confirmadas como crosta fél-

sica antiga e se o regime tectônico puder ser reconstruído, o planeta se tornará o teste mais forte da hipótese da casca raspada, porque é o único corpo de massa terrestre, sem lua, que podemos visitar. Até lá, ele fixa uma imagem útil. Sem Theia, a Terra talvez tivesse ficado parecida com ele. Inteira, quente e parada.

10. A destilação dos primeiros continentes

O continente aparece quando parte da crosta máfica e hidratada funde e o líquido se separa do resíduo. É uma destilação, no sentido próprio da palavra. O manto produz basalto. O basalto alterado e enterrado produz um segundo fundido, mais rico em sílica, em sódio e em elementos incompatíveis. Ao cristalizar, esse líquido forma tonalitos, trondhjemitos e granodioritos, o conjunto que a sigla TTG resume e que domina muitos núcleos arqueanos. O capítulo 1 já adiantou essa origem a partir de crosta oceânica hidratada (Moyen e Martin, 2012). O resíduo, chamado restito, retém granada, piroxênios e ferro, torna-se mais denso e tende a ficar em profundidade ou a retornar ao manto. A leveza continental não é dada de uma vez. É destilada, gota a gota, de um material que era pesado.

A geometria pode variar sem mudar esse núcleo petrológico. Numa tampa estagnada, basaltos podem ser enterrados na base de platôs espessos, aquecidos por plumas e reciclados por drips. Num regime móvel ou episódico, crosta hidratada pode descer ao longo de zonas de convergência. Entre os dois extremos existem superfícies deformáveis, blocos curtos, subducções que começam e morrem e longos períodos de imobilidade. Por isso a composição de um TTG não deve ser convertida automaticamente em mapa tectônico.

Durante muito tempo o debate foi uma escolha binária. Ou a Terra hadeana tinha tectônica de placas, ou fabricava continentes sob uma tampa parada. Os dados recentes favorecem uma história espacialmente heterogênea. Modelos geoquímicos e geodinâmicos de Vezinet et al. (2025) produzem grandes volumes de crosta continental durante o Hadeano em regime variável, com episódios curtos de subducção

induzidos por plumas. Zircões de Jack Hills analisados por Valley et al. (2026) registram, lado a lado, assinaturas compatíveis com tampa estagnada e com margens móveis. A Terra podia operar com mais de uma gramática ao mesmo tempo.

Essa mudança não enfraquece a tectônica vertical. Recoloca-a dentro de um mosaico. Domos e quilhas continuam sendo mecanismos e estruturas reais. O que perde força é a exclusividade. Dizer que não havia subducção nenhuma é mais do que o registro permite dizer para o planeta inteiro. Em alguns domínios a reciclagem vertical pode ter dominado; em outros, a convergência e o afundamento lateral podem ter começado cedo. A transição para placas não foi uma chave global virada numa data.

Cada ciclo que separava TTG de restito fazia duas coisas. Em cima, acrescentava material menos denso, mais viscoso e mais resistente à reciclagem. Embaixo, retirava resíduos densos e deixava porções de manto empobrecidas e, por isso, relativamente leves. Crosta félsica e raiz de manto podiam então sobreviver juntas. O cráton nasce quando a destilação química encontra estabilidade mecânica, um núcleo que flutua apoiado numa quilha que também resiste a afundar (Bédard, 2006; Pearson et al., 2021). Essa quilha reaparece no capítulo 11, guardando diamantes.

A maioria dessas tentativas desapareceu. Fundidos foram remisturados, raízes arrancadas, superfícies destruídas por impactos e convecção, crosta devolvida ao manto. Os fragmentos preservados são uma amostra enviesada dos experimentos que deram certo. Neles, a Terra registra o processo pelo produto. Zircões muito antigos, núcleos TTG, cinturões de rochas verdes e raízes empobrecidas. Não vemos a fábrica inteira. Vemos as peças que sobreviveram à máquina.

11. Continente ainda não é placa

Ao fim dessa destilação o planeta já tinha porções de crosta continental. Eram mais leves que a crosta máfica ao redor, podiam sustentar relevo e

resistiam melhor à reciclagem. Ainda assim, continente não significava placa. Uma placa exige espessura térmica, coerência lateral, limites capazes de transmitir esforço e uma astenosfera organizada o bastante para permitir movimento relativo por grandes distâncias.

Os primeiros núcleos continentais devem ter sido pequenos, descontínuos e em grande parte submersos. Alguns cresceram pela repetição do próprio mecanismo; outros colidiram e se amalgamaram; muitos foram de novo destruídos. A história inicial da crosta é uma luta entre produção rápida e preservação difícil. Gerar material félsico é uma etapa. Impedir que ele volte ao manto é outra.

É essa distinção que passa o bastão. Este capítulo fabricou o material e examinou uma condição inicial possivelmente herdada de Theia. O seguinte acompanha como núcleos isolados passaram a participar de sistemas laterais maiores, como margens se tornaram duráveis e como a crosta começou a sustentar plataformas. A Lua preservou uma casca. A Terra precisou aprender a construir placas.

12. O que Carajás guarda desta era

Nada em Carajás é tão antigo quanto Theia, e a província não tem rocha hadeana. O que ela guarda são os produtos tardios do processo que este capítulo descreveu, e eles bastam para ancorar a história no mapa.

O registro mais antigo é indireto e cabe, de novo, em grãos de zircão. Zircões detríticos recolhidos em sedimentos da província alcançam 3,6 bilhões de anos. Vieram de rochas que não existem mais, destiladas e destruídas antes de o bloco se estabilizar, e dizem que a fábrica de crosta já trabalhava ali no Paleoarqueano. A compilação de isótopos de háfnio que o capítulo 3 apresenta fixa, por rotas independentes, a extração de crosta nova do manto entre 3,3 e 3,2 bilhões de anos. É a certidão de nascimento do bloco sobre o qual todo o resto do livro se apoia.

Ao sul da província, o Domínio Rio Maria conserva a arquitetura de domos e quilhas. Corpos félsicos de TTG subiram como domos; faixas

de rochas vulcânicas e sedimentares afundaram entre eles. É a tectônica vertical da seção 8 em escala de mapa, construída em ciclos mesoarqueanos posteriores, mas pelo mesmo mecanismo. Quem percorre Rio Maria caminha sobre o fóssil de um regime que o planeta inteiro experimentou antes de inventar as placas.

E Luanga, visto no começo do capítulo, fecha a volta. Um corpo acamadado de 2,76 bilhões de anos não tem nada a ver com a Lua em idade ou tamanho, mas mostra, em metros de afloramento, a régua de densidade que separou o leve do pesado num oceano de magma. A província permite ver o processo que a história planetária só permite deduzir. É por isso que ela é o ponto fixo deste livro.

13. Níveis de confiança

São evidência ou consenso forte a formação da Lua por um grande impacto no fim da acreção terrestre; a identidade isotópica entre Terra e Lua; a extensa diferenciação do corpo lunar e a concentração de plagioclásio na crosta anortosítica por processos ligados ao oceano de magma; a densidade baixa e a espessura média da crosta lunar medidas pelo GRAIL; a diferenciação muito precoce da Terra; a existência de água líquida e de retrabalhamento crustal por volta de 4,4 a 4,3 bilhões de anos, lida nos zircões de Jack Hills; a transformação de basalto em eclogito com o aumento de pressão e a perda de flutuabilidade que ela produz; a produção de grande parte da crosta continental arqueana por fusão parcial de fontes máficas hidratadas; a importância de reciclagem vertical, convergência episódica e regimes variáveis na Terra jovem; e, em Vênus, a ausência de lua, a litosfera sem placas e a atividade vulcânica recente.

São modelos publicados ou sugestões anteriores relevantes a existência de continentes primordiais anortosíticos na Terra; discos protolunares ricos em material da proto-Terra; a erosão colisional preferencial de crosta; a sugestão de Miura de que o componente anortosítico lunar veio principalmente da Terra; a remistura e a diferenciação posterior do oceano de magma lunar; a formação de crosta félsica por drips, de-

laminação ou subducção episódica; o retrabalhamento da crosta por impactos; a possibilidade de restos de Theia alimentarem plumas profundas; e a leitura das tésseras venusianas como crosta félsica antiga.

São hipóteses de trabalho deste capítulo uma casca terrestre pré-impacto contínua o bastante e enriquecida em plagioclásio; a transferência de cerca de três quartos de seu volume ao disco protolunar; a faixa de quatro quilômetros para um extremo anortosítico, ou de sete a dez para uma casca mista, como cenário de balanço; a remistura do quarto retido no oceano de magma terrestre; a perda de flutuabilidade como fator que favoreceu a reciclagem da litosfera seguinte; e Vênus como imagem da Terra sem Theia, ressalvada a perda da água. A conta mostra que volume, massa e alumínio são compatíveis. Não determina que o evento ocorreu assim.

A hipótese pode falhar de maneiras claras. Simulações podem mostrar que a tampa leve fica quase toda na Terra ou escapa do sistema. O orçamento lunar pode exigir outra proveniência. Uma casca anortosítica terrestre pode se revelar incapaz de se formar ou de sobreviver até Theia. A remoção do componente leve pode produzir pouca diferença na estabilidade da litosfera seguinte. Uma boa hipótese não é a que resiste pela linguagem. É a que diz quais resultados a fariam cair.

Conclusão

A Terra e a Lua podem guardar duas etapas da mesma separação. Antes do impacto, a diferenciação talvez tenha concentrado plagioclásio na película externa da proto-Terra. Durante o impacto, parte importante dessa película pode ter entrado no disco. Na Lua, o inventário foi fundido e separado de novo, e as terras altas anortosíticas são o resultado, visíveis a olho nu. Na Terra, o que ficou foi remisturado, e a superfície recongelou escura.

Miura sugeriu a transferência em 2009 e merece o crédito por tê-la dito em público. O desenvolvimento proposto aqui começa depois. Transforma a intuição numa casca possível, adota três quartos como cenário

explícito, verifica que a Lua comporta o volume e o alumínio e extrai uma consequência geodinâmica. Se a Terra perdeu a maior parte de sua tampa leve, a litosfera seguinte nasceu com menos folga para flutuar.

Água, calor, impactos e a transformação em eclogito fizeram o resto. A crosta máfica engrossou, se hidratou, fundiu e afundou. O líquido félsico ficou; o resíduo desceu. Repetida em domínios de tampa estagnada, em episódios móveis e nas geometrias intermediárias, essa destilação fabricou núcleos continentais e raízes capazes de sobreviver. A Lua conservou na superfície a memória clara da primeira separação. A Terra apagou a casca e guardou o processo. Ao lado, Vênus guarda a tampa que ninguém raspou, inteira e parada, à espera de que uma sonda diga de que ela é feita.

O primeiro continente não foi uma placa pronta. Foi uma diferença de densidade que conseguiu permanecer. No próximo capítulo, essas diferenças aprendem a se mover.

Referências

Bédard, J. H. (2006). A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 1188–1214. https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.11.008

Borg, L. E.; Connelly, J. N.; Boyet, M.; Carlson, R. W. (2011). Chronological evidence that the Moon is either young or did not have a global magma ocean. Nature, 477, 70–72. https://doi.org/10.1038/nature10328

Burkhardt, C.; Borg, L. E.; Brennecka, G. A.; Shollenberger, Q. R.; Dauphas, N.; Kleine, T. (2016). A nucleosynthetic origin for the Earth's anomalous $^{1}\square^{2}$Nd composition. Nature, 537, 394–398. https://doi.org/10.1038/nature18956

Cameron, A. G. W.; Ward, W. R. (1976). The origin of the Moon. Lunar and Planetary Science VII, 120–122.

Canup, R. M. (2012). Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. Science, 338, 1052–1055. https://doi.org/10.1126/science.1226073

Canup, R. M.; Asphaug, E. (2001). Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. Nature, 412, 708–712. https://doi.org/10.1038/35089010

Carter, P. J.; Leinhardt, Z. M.; Elliott, T.; Stewart, S. T.; Walter, M. J. (2018). Collisional stripping of planetary crusts. Earth and Planetary Science Letters, 484, 276–286. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.012

Ćuk, M.; Stewart, S. T. (2012). Making the Moon from a fast-spinning Earth: a giant impact followed by resonant despinning. Science, 338, 1047–1052. https://doi.org/10.1126/science.1225542

Elkins-Tanton, L. T. (2012). Magma oceans in the inner Solar System. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 40, 113–139. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105503

Frossard, P.; Israel, C.; Bouvier, A.; Boyet, M. (2022). Earth's composition was modified by collisional erosion. Science, 377, 1529–1532. https://doi.org/10.1126/science.abq7351

Gilmore, M. S.; Mueller, N.; Helbert, J. (2015). VIRTIS emissivity of Alpha Regio, Venus, with implications for tessera composition. Icarus, 254, 350–361. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.04.008

Gülcher, A. J. P.; Gerya, T. V.; Montési, L. G. J.; Munch, J. (2020). Corona structures driven by plume–lithosphere interactions and evidence for ongoing plume activity on Venus. Nature Geoscience, 13, 547–554. https://doi.org/10.1038/s41561-020-0606-1

Hamano, K.; Abe, Y.; Genda, H. (2013). Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean. Nature, 497, 607–610. https://doi.org/10.1038/nature12163

Hartmann, W. K.; Davis, D. R. (1975). Satellite-sized planetesimals and lunar origin. Icarus, 24, 504–515. https://doi.org/10.1016/0019-1035(75)90070-6

Hashimoto, G. L.; Roos-Serote, M.; Sugita, S.; Gilmore, M. S.; Kamp, L. W.; Carlson, R. W.; Baines, K. H. (2008). Felsic highland crust on Venus suggested by Galileo Near-Infrared Mapping Spectrometer data. Journal of Geophysical Research: Planets, 113, E00B24. https://doi.org/10.1029/2008JE003134

Heiken, G. H.; Vaniman, D. T.; French, B. M. (eds.) (1991). Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge University Press.

Herrick, R. R.; Hensley, S. (2023). Surface changes observed on a Venusian volcano during the Magellan mission. Science, 379, 1205–1208. https://doi.org/10.1126/science.abm7735

Hosono, N.; Karato, S.; Makino, J.; Saitoh, T. R. (2019). Terrestrial magma ocean origin of the Moon. Nature Geoscience, 12, 418–423. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0354-2

Lebrun, T.; Massol, H.; Chassefière, E.; Davaille, A.; Marcq, E.; Sarda, P.; Leblanc, F.; Brandeis, G. (2013). Thermal evolution of an early magma ocean in interaction with the atmosphere. Journal of Geophysical Research: Planets, 118, 1155–1176. https://doi.org/10.1002/jgre.20068

Li, Y.; Gurnis, M.; Asimow, P. D.; Yuan, Q. (2024). A giant impact origin for the first subduction on Earth. Geophysical Research Letters, 51, e2023GL106723. https://doi.org/10.1029/2023GL106723

Lock, S. J.; Stewart, S. T.; Petaev, M. I.; Leinhardt, Z.; Mace, M. T.; Jacobsen, S. B.; Ćuk, M. (2018). The origin of the Moon within a terrestrial synestia. Journal of Geophysical Research: Planets, 123, 910–951. https://doi.org/10.1002/2017JE005333

Mansur, E. T.; Ferreira Filho, C. F. (2016). Magmatic structure and geochemistry of the Luanga Mafic–Ultramafic Complex: Further constraints for the PGE-mineralized magmatism in Carajás, Brazil. Lithos, 266–267, 28–43. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.09.036

Mansur, E. T.; Ferreira Filho, C. F. (2020). The Luanga deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: The origin of different styles of PGE mineralization. Ore Geology Reviews, 118, 103340.

https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103340

Marchi, S.; Bottke, W. F.; Elkins-Tanton, L. T.; Bierhaus, M.; Wünnemann, K.; Morbidelli, A.; Kring, D. A. (2014). Widespread mixing and burial of Earth's Hadean crust by asteroid impacts. Nature, 511, 578–582. https://doi.org/10.1038/nature13539

Maruyama, S.; Ikoma, M.; Genda, H.; Hirose, K.; Yokoyama, T.; Santosh, M. (2013). The naked planet Earth: Most essential pre-requisite for the origin and evolution of life. Geoscience Frontiers, 4, 141–165. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.11.001

Miura, Y. (2009). Lunar crust components from planets at the giant impact event. 2009 Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group, Abstract 2043. Lunar and Planetary Institute. https://www.lpi.usra.edu/meetings/leag2009/pdf/2043.pdf

Moyen, J.-F.; Martin, H. (2012). Forty years of TTG research. Lithos, 148, 312–336. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010

Nimmo, F.; Kleine, T.; Morbidelli, A. (2024). Tidally driven remelting around 4.35 billion years ago indicates the Moon is old. Nature, 636, 598–602. https://doi.org/10.1038/s41586-024-08231-0

O'Neil, J.; Carlson, R. W.; Francis, D.; Stevenson, R. K. (2008). Neodymium-142 evidence for Hadean mafic crust. Science, 321, 1828–1831. https://doi.org/10.1126/science.1161925

O'Neill, C.; Marchi, S.; Zhang, S.; Bottke, W. (2017). Impact-driven subduction on the Hadean Earth. Nature Geoscience, 10, 793–797. https://doi.org/10.1038/ngeo3029

O'Neill, H. St C.; Palme, H. (2008). Collisional erosion and the non-chondritic composition of the terrestrial planets. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 366, 4205–4238. https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0111

Pearson, D. G.; Scott, J. M.; Liu, J.; Schaeffer, A.; Wang, L. H.; van Hunen, J.; Szilas, K.; Chacko, T.; Kelemen, P. B. (2021). Deep continental

roots and cratons. Nature, 596, 199–210. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03600-5

Santosh, M.; Arai, T.; Maruyama, S. (2017). Hadean Earth and primordial continents: The cradle of prebiotic life. Geoscience Frontiers, 8, 309–327. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.07.005

Schmidt, M. W.; Kraettli, G. (2022). Experimental crystallization of the lunar magma ocean, initial selenotherm and density stratification, and implications for crust formation, overturn and the bulk silicate Moon composition. Journal of Geophysical Research: Planets, 127, e2022JE007187. https://doi.org/10.1029/2022JE007187

Siepierski, L.; Ferreira Filho, C. F. (2020). Magmatic structure and petrology of the Vermelho Complex, Carajás Mineral Province, Brazil: Evidence for magmatic processes at the lower portion of a mafic–ultramafic intrusion. Journal of South American Earth Sciences, 102, 102656. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102656

Smrekar, S. E.; Stofan, E. R.; Mueller, N.; Treiman, A.; Elkins-Tanton, L.; Helbert, J.; Piccioni, G.; Drossart, P. (2010). Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data. Science, 328, 605–608. https://doi.org/10.1126/science.1186785

Sotiriou, P.; Polat, A.; Kusky, T. M.; Windley, B. F. (2024). Early terrestrial and lunar anorthosites: Comparative geochemistry and evolutionary processes. Geoscience Frontiers, 15, 101914. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101914

Strom, R. G.; Schaber, G. G.; Dawson, D. D. (1994). The global resurfacing of Venus. Journal of Geophysical Research: Planets, 99, 10899–10926. https://doi.org/10.1029/94JE00388

Turner, S.; Wood, B.; Johnson, T.; O'Neill, C.; Bourdon, B. (2025). Formation and composition of Earth's Hadean protocrust. Nature, 640, 390–394. https://doi.org/10.1038/s41586-025-08719-3

Valley, J. W.; Blum, T. B.; Kitajima, K. et al. (2026). Contemporaneous mobile- and stagnant-lid tectonics on the Hadean Earth. Nature, 650,

636–641. https://doi.org/10.1038/s41586-025-10066-2

Valley, J. W.; Peck, W. H.; King, E. M.; Wilde, S. A. (2002). A cool early Earth. Geology, 30, 351–354. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0351:ACEE>2.0.CO;2

Vezinet, A.; Chugunov, A. V.; Sobolev, A. V. et al. (2025). Growth of continental crust and lithosphere subduction in the Hadean revealed by geochemistry and geodynamics. Nature Communications, 16, 3850. https://doi.org/10.1038/s41467-025-59024-6

Wang, D.; Nie, N. X.; Peters, B. J.; Day, J. M. D.; Shirey, S. B.; Carlson, R. W. (2025). Potassium-40 isotopic evidence for an extant pre-giant-impact component of Earth's mantle. Nature Geoscience, 18, 1174–1179. https://doi.org/10.1038/s41561-025-01811-3

Warren, P. H. (1985). The magma ocean concept and lunar evolution. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 13, 201–240. https://doi.org/10.1146/annurev.ea.13.050185.001221

Weber, R. C.; Lin, P.-Y.; Garnero, E. J.; Williams, Q.; Lognonné, P. (2011). Seismic detection of the lunar core. Science, 331, 309–312. https://doi.org/10.1126/science.1199375

Wiechert, U.; Halliday, A. N.; Lee, D.-C.; Snyder, G. A.; Taylor, L. A.; Rumble, D. (2001). Oxygen isotopes and the Moon-forming giant impact. Science, 294, 345–348. https://doi.org/10.1126/science.1063037

Wieczorek, M. A. et al. (2013). The crust of the Moon as seen by GRAIL. Science, 339, 671–675. https://doi.org/10.1126/science.1231530

Wilde, S. A.; Valley, J. W.; Peck, W. H.; Graham, C. M. (2001). Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. Nature, 409, 175–178. https://doi.org/10.1038/35051550

Windley, B. F. (1970). Anorthosites in the early crust of the Earth and on the Moon. Nature, 226, 333–335. https://doi.org/10.1038/226333b0

Wood, J. A.; Dickey, J. S.; Marvin, U. B.; Powell, B. N. (1970). Lunar

anorthosites and a geophysical model of the Moon. Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference, 1, 965–988.

Yuan, Q. et al. (2023). Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies. Nature, 623, 95–99. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06589-1

Zhang, J.; Dauphas, N.; Davis, A. M.; Leya, I.; Fedkin, A. (2012). The proto-Earth as a significant source of lunar material. Nature Geoscience, 5, 251–255. https://doi.org/10.1038/ngeo1429

Capítulo 3. Antes do reator: como se fabrica uma placa capaz de sustentar uma plataforma

Da tectônica vertical ao rifte de 3,2 Ga, a vitória do movimento horizontal, o oceano ferruginoso, o enxofre e a zona fótica até a montagem do bloco paleoarqueano de Carajás

Modelo de trabalho

Drips e plumas concentraram extensão até romper a litosfera; riftes passaram a fabricar superfície e forçaram seu consumo; placas frias e velhas tornaram a subducção autossustentada. A amálgama dos núcleos continentais produziu placas duráveis. Sobre elas, ambientes rasos reuniram luz, ferro e enxofre em traços, e a vida ocupou primeiro os vulcões, depois as plataformas. Em Carajás, a extração crustal de 3,3 a 3,2 Ga e o rifte de 3,2 Ga entregam o bloco e a margem inicial dos capítulos seguintes. O efeito dominó e a vitória do regime horizontal por eficiência são hipóteses deste livro; as peças que elas encadeiam são medidas.

tectônica de placas · astenosfera · slab pull · efeito dominó · ciclo profundo da água · oceano ferruginoso · enxofre · zona fótica · fotoferrotrofia · estromatólito · plataforma · Carajás · Paleoarqueano–Mesoarqueano · ca. 3,5–3,2 Ga

Resumo

O capítulo anterior terminou com núcleos continentais isolados num planeta dominado por movimentos verticais. Este pergunta como esses núcleos ganharam escala, espessura e estabilidade suficientes para sustentar margens e plataformas. A resposta reúne duas evoluções que ocorrem no mesmo sistema. A passagem gradual para a tectônica horizontal, e a organização do oceano, da atmosfera e da biosfera sobre as superfícies rasas que essa passagem tornou duráveis.

Drips e cabeças de pluma concentraram extensão, abriram riftes e exportaram convergência. O envelhecimento da litosfera oceânica acrescentou o peso que puxa as placas; a astenosfera amadureceu como camada de deslizamento; a subducção instalou um ciclo profundo da água e passou a reciclar litosfera sem parar. Núcleos de TTG foram amalgamados em blocos cratônicos. Acima deles, o oceano arqueano continuava profundo, ferruginoso e sem oxigênio. O sulfato existia como nutriente-traço; o ferro permanecia em solução; a luz tocava o fundo apenas em altos vulcânicos, arcos e raras plataformas continentais. Foi ali que a vida apareceu, primeiro agarrada aos vulcões, depois estendida sobre o primeiro substrato que não afundava.

A sequência termina no sudeste do Cráton Amazônico. Isótopos de háfnio registram extração crustal entre 3,3 e 3,2 Ga; o bloco recém-estabilizado rifteia em ca. 3,2 Ga e passa a fabricar litosfera oceânica. O rifte deixa a margem passiva e o degrau térmico que organizarão a subducção posterior. O reator ainda não existe. Sua placa, seu oceano e parte de sua ecologia já estão prontos.

1. O mapa que os terremotos desenham

Existe um mapa que não precisa de teoria para ser lido. Marque num globo o epicentro de cada terremoto registrado nas últimas décadas. Os pontos não se espalham ao acaso. Formam faixas estreitas e contínuas que contornam o Pacífico, descem pelo meio do Atlântico, atravessam o Mediterrâneo e o Himalaia. Entre as faixas ficam regiões enormes e quase silenciosas. As faixas são os limites. As regiões silenciosas são as placas. A tectônica de placas, antes de ser uma teoria, é esse desenho.

Uma placa é um pedaço rígido da casca externa da Terra que se move inteiro, como uma peça, sobre uma camada mais mole que está embaixo. A casca rígida se chama litosfera e inclui a crosta e a parte mais fria do manto, somando cem a duzentos quilômetros de espessura. A camada mole se chama astenosfera, e dela trata a próxima seção. O movimento é lento, alguns centímetros por ano, mais ou menos a velocidade com que as unhas crescem. Em cem milhões de anos, porém, alguns centímetros por ano abrem um oceano.

O capítulo 2 terminou dizendo que continente ainda não é placa, e agora é possível dizer o que falta. Uma placa precisa de três coisas. Precisa ser espessa e fria o bastante para se comportar como peça rígida. Precisa de uma camada mole embaixo, para deslizar. E precisa de limites longos e organizados, onde a litosfera nasce, onde morre e onde desliza de lado, capazes de transmitir esforço de um lado a outro do planeta. Os núcleos continentais do fim do capítulo anterior tinham, no máximo, a primeira dessas condições.

A pergunta deste capítulo nasce de um objeto que ainda está distante. O capítulo 5 vai mostrar que o BIF gigante de Carajás exige uma bacia restrita, e que uma bacia assim exige uma margem, a borda de um continente onde a crosta leve encontra o assoalho oceânico, e que uma margem exige um bloco continental estável por dezenas de milhões de anos. Cada final de história carrega exigências sobre os capítulos anteriores. A exigência que cabe aqui é a mais básica. Antes do reator, a Terra precisou fabricar uma placa capaz de sustentar uma plataforma.

Levou mais de um bilhão e meio de anos nisso, contados do primeiro oceano ao intervalo de 2,76 a 2,74 Ga.

A pergunta é dupla, e o capítulo a persegue pelos dois lados. Como a Terra fabricou placas flutuantes. E como, enquanto as fabricava, foi montando o oceano, a atmosfera e a biosfera que essas placas um dia iriam abrigar. As duas linhas correm juntas porque são o mesmo sistema visto de dois ângulos. Cada uma, porém, precisa de suas próprias ferramentas, e a primeira delas é mecânica.

2. A toalha que escorrega da mesa

A litosfera oceânica nasce quente e fina nas dorsais, as cordilheiras submarinas onde o manto sobe, descomprime e funde. Com o tempo ela se afasta, esfria e engrossa, porque o manto logo abaixo vai se juntando a ela à medida que perde calor. Litosfera fria é litosfera densa. Em poucas dezenas de milhões de anos, uma placa oceânica se torna mais pesada que a astenosfera em que flutua, e passa a flutuar apenas por teimosia mecânica, segura pelas bordas. É um estado instável. Basta que uma ponta mergulhe para que o resto seja puxado atrás.

Pense numa toalha de mesa. Enquanto fica toda sobre a mesa, não se move. Puxe uma ponta para fora da borda e, a partir de um certo comprimento pendurado, a toalha inteira começa a escorregar, cada vez mais depressa, arrastada pelo próprio peso da parte que já caiu. A placa oceânica que mergulha numa fossa é a toalha. O pedaço que já desceu puxa o que ainda está em cima. Esse puxão tem nome em inglês, slab pull, o puxão da placa, e é a principal força que move as placas hoje. As dorsais empurram um pouco, o manto arrasta um pouco. O peso da placa que afunda faz a maior parte do trabalho.

Para que a toalha escorregue, a mesa precisa ser lisa. Essa é a função da astenosfera. Entre cem e duzentos e poucos quilômetros de profundidade, o manto está perto da sua temperatura de fusão, contém um pouco de água e, em alguns lugares, uma fração minúscula de líquido entre os cristais. Isso basta para que ele escoe muito mais facilmente

que a litosfera acima e que o manto mais fundo. A astenosfera é a camada de deslizamento. Sem ela, movimento horizontal de milhares de quilômetros seria impossível, porque a placa estaria colada ao manto.

A régua agora tem três peças. Uma placa oceânica envelhece e fica pesada. Uma camada mole embaixo permite que ela deslize. Uma fossa, onde a ponta mergulha, converte o peso em movimento. Com essas três peças, a tectônica de placas se sustenta sozinha, e a toalha escorrega sem que ninguém a puxe. O problema deste capítulo é que a Terra jovem não tinha nenhuma das três prontas. Tinha uma tampa quente, fina e remendada, um manto quente demais para deslizar bem, e nenhuma fossa.

3. O efeito dominó

O regime vertical do capítulo anterior carrega, dentro de si, o mecanismo da própria superação. A partir daqui a narrativa assume o caráter de hipótese de trabalho, e é a hipótese que dá nome a esta seção.

Quando um pedaço da base da litosfera pinga, como as gotas de mel do capítulo 2, o espaço que ele deixa precisa ser preenchido. A litosfera vizinha é puxada e escorre em direção ao ponto do drip, e cada afundamento deixa na tampa uma herança de esticamento horizontal. Um drip isolado resolve essa herança localmente. Mas drips repetidos, concentrados pelas mesmas anomalias térmicas de longa vida, acumulam esticamento em setores preferenciais. Uma tampa fina, quente e já fraturada resolve esticamento acumulado da maneira mais barata disponível. Rompe, perpendicularmente à direção em que está sendo puxada, como o gelo de um lago se parte quando duas margens se afastam.

Quando o rompimento atravessa a litosfera inteira, a astenosfera sobe pela abertura, descomprime e funde. O rasgo passa a fabricar crosta nova e se torna autossustentado. É um rifte oceânico primordial, gerando litosfera por movimento horizontal num mundo que até então só conhecia o vertical. Cada drip empurra o sistema um passo para

mais perto da primeira ruptura, e cada ruptura facilita as seguintes. Por isso dominó.

A modelagem numérica oferece a esse dominó um gatilho complementar e bem estabelecido. Cabeças de pluma, os grandes cogumelos de manto quente que sobem do fundo, podem romper a litosfera e nuclear subducção na borda da região que afundam. É o cenário de iniciação de subducção induzida por pluma, demonstrado em modelos termomecânicos e proposto para ao menos um caso natural (Gerya et al., 2015). Os dois mecanismos se somam. Plumas enfraquecem e rompem. Drips acumulam e distribuem esforço. E onde a litosfera já tinha sido enfraquecida, nas cicatrizes entre TTG e crosta máfica, entre crosta delaminada e crosta preservada, o esforço que os riftes exportam encontra os planos de menor resistência.

Há um problema geométrico que não tem saída. Numa esfera, toda superfície que se abre num lugar precisa fechar em outro. Todo centro de espalhamento exige, em algum ponto, consumo equivalente, com deslizamentos laterais costurando o balanço. No mundo anterior às placas esse consumo começou forçado. Pedaços de litosfera eram empurrados uns sob os outros nos lugares fracos, sustentados pelo empuxo dos riftes, antes que o próprio peso mantivesse o mergulho. Mas litosfera oceânica que envelhece esfria, e litosfera fria e densa que começa a mergulhar descobre a toalha da seção anterior. O afundamento passa de forçado a autossustentado, e a subducção, de acidente local a mecanismo exportável.

Conforme a rede de riftes se interliga e ganha escala, o espalhamento se torna global; conforme as subducções se multiplicam, aparecem os primeiros arcos vulcânicos, as primeiras acresções, as primeiras colisões entre núcleos de TTG. Ao lado deles, os sistemas verticais continuam operando no interior de blocos grandes, longe da competição com as margens. A Terra do meio do Arqueano roda os dois regimes em paralelo, e um mesmo bloco pode registrar domos e quilhas num éon e cinturões lineares no seguinte (Van Kranendonk, 2010).

4. Por que o regime horizontal venceu

A pergunta mais útil não é quando a tectônica de placas começou, e sim por que ela venceu. O debate cronológico é real. Há propostas de placas desde 4,3 Ga e propostas de regime moderno apenas no Neoproterozoico, mas a posição majoritária converge para uma transição gradual e episódica entre ca. 3,2 e 2,5 Ga, com subducção intermitente e local primeiro, interligação depois, globalidade por fim (Cawood et al., 2018; Palin et al., 2020). O que este capítulo acrescenta é um argumento de eficiência. O regime horizontal venceu porque resolve os esforços mais rápido e a custo menor. Um drip remove uma raiz e silencia. Uma zona de subducção remove litosfera continuamente, por dezenas de milhões de anos, enquanto fabrica crosta nova no arco e recicla água e sedimento. Quando os dois regimes competem pelos mesmos esforços, o que os resolve com maior eficiência captura o sistema.

Duas condições materiais sustentam a vitória. A primeira é a astenosfera. Um manto quente demais não tem uma camada de deslizamento bem definida; está mole em toda parte e caótico. À medida que o manto esfria, a camada mole se organiza numa faixa de profundidade e passa a funcionar como lubrificante. O amadurecimento da astenosfera é o relógio mecânico da transição. A segunda condição é a água. Cada placa que mergulha carrega água em minerais hidratados. Parte volta nos arcos, parte segue para o manto profundo, onde a zona de transição, entre quatrocentos e seiscentos e sessenta quilômetros, pode estocá-la. A ringwoodita hidratada encontrada como inclusão num diamante é o testemunho direto desse reservatório (Pearson et al., 2014). O manto inferior, em contraste, é seco por uma restrição mineralógica, porque seus minerais dominantes dissolvem pouquíssima água (Hirschmann, 2006). A subducção instala, assim, um ciclo profundo de recarga que o regime vertical alimentava apenas de vez em quando. Água no manto significa fusão mais fácil, viscosidade menor, placas mais soltas. O regime horizontal lubrifica a si mesmo. Até os sedimentos ajudam. Quando os continentes emergem e a erosão passa a entregar lama às fossas, as placas deslizam com menos atrito (Sobolev

e Brown, 2019).

No fundo do sistema, a tomografia sísmica mostra que ao menos parte das placas mergulhantes atravessa o manto inteiro e se deposita sobre o limite com o núcleo, embora muitas estacionem na zona de transição. Ali embaixo existem duas regiões do tamanho de continentes onde as ondas sísmicas viajam devagar, uma sob o Pacífico e outra sob a África, cuja origem se discute entre pilhas primordiais, crosta oceânica acumulada e mistura das duas (Garnero et al., 2016). As plumas nascem dessa camada do fundo, com preferência pelas bordas dessas regiões, e os basaltos de ilhas oceânicas carregam a assinatura de crosta reciclada em suas fontes. Os cemitérios de placas alimentam as plumas, no sentido material e no térmico. O argumento fecha em círculo. A subducção alimenta o manto profundo com litosfera fria, água residual e heterogeneidade; o manto profundo devolve plumas; as plumas enfraquecem a litosfera, disparam riftes e fertilizam o sistema de placas que as alimentou. A Terra passa a operar em ciclos. Rifte, deriva, subducção, colisão, nova amálgama. São esses ciclos que dão ao registro geológico o ritmo que dividimos em eras e éons.

Há uma consequência desse acoplamento que importa diretamente ao destino dos continentes. Onde grandes massas continentais se formam e param, o calor do manto se acumula embaixo delas, porque a litosfera continental é espessa e isola como um cobertor. O continente passa a focalizar anomalias térmicas sob si mesmo, e o rifte continental é o mecanismo pelo qual o sistema cobra dos continentes o calor que eles taparam. Blocos montados só por processos verticais talvez rifteassem tarde, quando atingissem condições críticas. Blocos amalgamados por subducção e colisão chegam lá mais cedo, porque as margens convergentes agem rápido e deixam suturas, planos prontos para reabrir. Essa observação volta na seção 10 deste capítulo e, em escala continental, no capítulo 10.

5. Os vizinhos, de novo

Os dois planetas vizinhos dão à transição seu experimento de controle, e o capítulo 2 já os preparou. Vênus, sem lua, conserva uma tampa única, quente, renovada por cima e nunca devolvida ao manto. Se a hipótese da casca raspada estiver certa, ele é a Terra que não levou o golpe e ficou com a tampa inteira, com as ressalvas feitas lá, porque Vênus também perdeu a água cedo, e água é o lubrificante que este capítulo acabou de descrever. Sem drips frequentes, o ciclo de recarga do manto nunca ligou, e a pouca água superficial que houvesse foi quebrada pela luz e perdida no efeito estufa. Marte, com suas luas de brinquedo e gravidade pequena demais para segurar os voláteis, parou mais cedo ainda e deixou a água ir embora. É um planeta de uma pluma só, com o maior vulcão do Sistema Solar parado sobre o mesmo ponto quente há bilhões de anos.

A Terra acumulou as três sortes. Capturou água suficiente desde a acreção, foi raspada por Theia, se a hipótese se sustentar, e tem a gravidade exata para não deixar a água escapar. O lubrificante que a sagducção exigiu primeiro e as placas exigiram depois ficou guardado no planeta pelo peso do próprio planeta. Nessa leitura, que é a deste livro e não um consenso, a tectônica de placas é a cicatriz comprida de um golpe de quatro bilhões e meio de anos atrás. Se o golpe não tivesse ocorrido, seríamos talvez um Vênus. Se a massa fosse menor, um Marte. O capítulo 15 pesa essas condições uma a uma.

6. Medir o oceano antes de habitá-lo

Enquanto a litosfera aprendia a se mover, o oceano sobre ela era o ambiente dominante do planeta. Convém medi-lo antes de habitá-lo.

Comece pelo volume. Um manto mais quente guarda menos água do que o manto de hoje, e por isso deixa mais na superfície. Modelos de capacidade de armazenamento indicam que o oceano do início do Arqueano pode ter tido até aproximadamente o dobro do volume moderno (Dong et al., 2021). O oceano atual, espalhado sobre um planeta

sem terras emersas, formaria uma lâmina média de cerca de 2.600 metros. O dobro passa de 5.000. Um espelho d'água contínuo de 4.000 a 5.000 metros é defensável como média do planeta arqueano. Profundidades de 10.000 metros ficam reservadas a fossas e depressões locais, e com um agravante. Um manto mais quente produz crosta oceânica mais espessa, e crosta mais espessa flutua mais alto, o que comprime as grandes profundidades.

Agora a terra firme, ou a falta dela. O oxigênio tem o sotaque isotópico que o capítulo 2 apresentou para os planetas, e ele também muda quando a água da chuva ataca rocha exposta ao ar. A assinatura do oceano de 3,24 Ga, lida em rochas que trocaram oxigênio com ele, está enriquecida no isótopo pesado em relação ao oceano moderno, e a leitura mais parcimoniosa é que havia pouco intemperismo subaéreo, porque havia pouca terra emersa (Johnson e Wing, 2020). Um mundo de água até bem dentro do Paleoarqueano. As grandes massas emersas aparecem depois, entre 3,0 e 2,7 Ga, e o ciclo hidrológico moderno, com rios e chuvas lavando continentes, só se instala de vez perto de 2,5 Ga (Liu e He, 2021; Bindeman et al., 2018).

A química dessa água era a de uma sopa reduzida. Sem oxigênio livre, saturada em sílica, carregada de ferro ferroso, o Fe²□ do capítulo 1, homogeneizado por um oceano sem oxidantes que o removessem, com sal e os demais íons, alimentada por gases vulcânicos e pela circulação de água do mar por fraturas da crosta máfica quente. Acima dela, uma atmosfera de CO□, N□, vapor e metano, sem oxigênio e, portanto, sem camada de ozônio.

A ausência de ozônio tem uma consequência frequentemente exagerada, e vale dimensioná-la. O ultravioleta chegava inteiro à superfície do mar, mas não à coluna d'água. Medições e modelos de transmissão em águas naturais prebióticas mostram que o UV mais duro é absorvido nos primeiros centímetros, e que mesmo os comprimentos de onda que danificam o DNA se extinguem em metros a poucas dezenas de metros, tanto mais rápido quanto mais ferro dissolvido e partículas de ferro e sílica houver na água (Ranjan et al., 2022). Esses precipitados funcionavam como protetor solar planetário, absorvendo a maior

parte do UV e deixando passar a luz que serve à fotossíntese. Ainda assim, o UV restringiu a expansão de alguns grupos, como as cianobactérias, a ambientes protegidos (Mloszewska et al., 2018).

A zona fótica é a faixa iluminada da coluna d'água, os cem a duzentos metros superiores no padrão de águas claras e pouco produtivas. No Arqueano ela tinha dois andares. Uma película superficial hostil, esterilizada pelo UV, e embaixo dela dezenas de metros iluminados, blindados e habitáveis.

7. Luz sem chão

A vida fotossintética primitiva encontrava luz. Faltava chão. Numa lâmina média de quilômetros, a zona fótica flutua sobre um abismo. Não toca o substrato em lugar nenhum, e organismos que dependem de luz e precisam de um fundo para se fixar não têm onde existir. Os lugares onde luz e substrato se encontravam eram poucos, e todos tectônicos.

Primeiro, os centros de espalhamento e as cabeças dos domos vulcânicos. Quentes, hidrotermais, com ombreiras soerguidas pelo calor que sobe, profundidades moderadas a rasas e química vigorosa. Ambientes de alta energia, com oferta abundante dos compostos reduzidos de que os primeiros metabolismos se alimentavam.

Segundo, muito mais raros no início, os topos dos blocos continentais nascentes. Frios, sustentados pela flutuabilidade de crosta félsica sobre manto empobrecido, a quilha do capítulo 2. Plataformas incipientes onde a zona fótica tocava o leito por estabilidade, e não por vulcanismo.

Terceiro, as margens ativas que a seção 3 viu nascer, as bordas de continente ou de placa onde há uma fossa e uma placa mergulhando. Arcos vulcânicos e zonas de subducção, onde edifícios vulcânicos tangenciam a superfície.

Três famílias de ambientes rasos, duas quentes e uma fria, e entre elas toda a diferença que a biosfera iria explorar.

8. O enxofre como nutriente-traço

O capítulo 5 argumenta que, nos BIFs neoarqueanos, o enxofre opera como variável de controle. Suficiente para sustentar os metabolismos do ciclo do enxofre, escasso o bastante para que o sulfeto não capture o ferro. Este capítulo desce um degrau e pergunta de onde vinha esse enxofre, e quanto era, porque a resposta condiciona toda a ecologia anterior e posterior.

Num planeta sem oxigênio atmosférico, as rotas modernas do sulfato estão fechadas. Hoje o sulfato dos oceanos vem sobretudo do ataque do oxigênio aos sulfetos das rochas continentais, levado pelos rios. No Arqueano, sem oxigênio e quase sem continentes, esse fluxo era próximo de zero. O que existia era a rota vulcânica e fotoquímica. O SO□ lançado por vulcões subaéreos e submarinos rasos entrava numa atmosfera transparente ao ultravioleta e era quebrado pela luz, repartindo o enxofre entre aerossóis de enxofre elementar, que caíam como S□, e sulfato.

Essa química deixa uma assinatura que vale uma pausa, porque é o barômetro de oxigênio mais usado para a Terra antiga. Reações químicas comuns separam os isótopos de um elemento de maneira proporcional à diferença de massa entre eles. A fotólise do SO□ pelo UV não obedece a essa regra e produz um desvio que se chama fracionamento independente de massa. Esse desvio só se forma na atmosfera sem ozônio, e só sobrevive no sedimento se o oxigênio for tão escasso que todo o enxofre não passe por um mesmo reservatório de sulfato que apagaria o sinal. A assinatura está impressa em praticamente todas as rochas sedimentares anteriores a 2,4 Ga e desaparece depois (Farquhar et al., 2000). Sua preservação exige oxigênio abaixo de um cem-milésimo do nível atual. É o argumento isotópico central para a falta de oxigênio do éon inteiro, e é mais uma impressão digital na coleção que o livro vem montando desde o deutério.

O enxofre chegava ao mar, portanto, por via atmosférica e distante, desacoplado das fontes de ferro, que eram hidrotermais e locais. E chegava em duas moedas químicas distintas, sulfato e enxofre elementar,

cada uma sustentando metabolismos próprios.

Quanto chegava é a pergunta decisiva, e a resposta foi revista para baixo de forma dramática. O oceano moderno contém cerca de 28 milimolar de sulfato. A calibração clássica dos fracionamentos microbianos punha o sulfato arqueano abaixo de 200 micromolar, já menos de um centésimo do moderno (Habicht et al., 2002). A recalibração feita no lago Matano, na Indonésia, um análogo ferruginoso real do oceano arqueano, mostrou que os fracionamentos pequenos do registro são compatíveis com concentrações abaixo de 2,5 micromolar (Crowe et al., 2014). Dez mil vezes menos que hoje. Sulfato como constituinte-traço, mal misturado, de vida curta, distribuído em manchas atreladas à geografia vulcânica. Nessas concentrações ele funciona como nutriente-traço e recurso limitante pelo qual comunidades competem, como o fosfato ou a fixação de nitrogênio nos mares de hoje. A biosfera arqueana viveu numa economia de escassez de enxofre oxidado, e o mapa dessa escassez, máxima perto dos vulcões que emitiam SO□ e mínima no oceano aberto, era o mapa de onde certos metabolismos eram possíveis.

A vida respondeu cedo e de forma legível. Nas baritas da Formação Dresser, no Pilbara australiano, com cerca de 3,47 Ga, sulfetos microscópicos carregam fracionamentos de ^{3}□S que registram redução microbiana de sulfato, o metabolismo respiratório mais antigo diretamente documentado (Shen et al., 2001). No mesmo pacote, a combinação dos quatro isótopos do enxofre revela um segundo ofício. Micro-organismos que preferiam o enxofre elementar caído do céu ao sulfato da barita hospedeira (Philippot et al., 2007; Ueno et al., 2008). A genealogia das enzimas do ciclo do enxofre aponta na mesma direção, com os metabolismos de enxofre elementar e sulfito parecendo anteriores à redução de sulfato em sentido estrito, como convém a um mundo em que S□ caía de graça sobre ambientes vulcânicos (Mateos et al., 2023). Há mesmo a proposta, minoritária mas publicada, de que parte da pirita sedimentar arqueana se formou via enxofre orgânico, sem redução de sulfato nenhuma (Fakhraee e Katsev, 2019). O quadro que atravessa essas variantes é robusto. O

ciclo biológico do enxofre é tão antigo quanto o registro sedimentar decente, nasceu colado em ambientes vulcânicos e hidrotermais, onde enxofre, gradientes térmicos e doadores de elétrons coincidiam, e operou a vida inteira sob escassez, com o sulfato reciclado tão rápido quanto chegava.

A consequência dessa escassez é o traço mais importante para tudo o que vem depois. O oceano arqueano ficou ferruginoso e pobre em sulfeto livre (Poulton e Canfield, 2011). Com pouco sulfato entra pouco sulfeto, e o pouco H□S que a redução microbiana produz encontra um mar de Fe²□ que o captura imediatamente como FeS e pirita. O sulfeto livre nunca se acumula. O ferro sobrevive em solução. A coluna d'água profunda permanece, por padrão planetário, rica em ferro e pobre em enxofre, exatamente o estado que os BIFs registram e exigem. A janela favorável ao BIF que o capítulo 5 descreve no Neoarqueano herdou esse estado basal. As bacias certas apenas o concentraram, organizaram e expuseram à luz.

9. Da caldeira hidrotermal à plataforma carbonática

Onde, nesse oceano, a vida começou e prosperou? As evidências mais antigas são todas debatidas. Possíveis filamentos em precipitados de fontes hidrotermais de Nuvvuagittuq, no Canadá (Dodd et al., 2017); grafite leve e estruturas interpretadas como estromatólitos em rochas de Isua, na Groenlândia, com cerca de 3,7 Ga, cuja origem biológica foi contestada (Nutman et al., 2016; Allwood et al., 2018). O registro sólido começa um pouco depois, na Formação Dresser, com 3,48 Ga. Ali há estromatólitos, sulfetos biogênicos e sínteres de fontes termais dentro de uma caldeira vulcânica com circulação hidrotermal vigorosa, incluindo depósitos de gêiser formados ao ar livre (Walter et al., 1980; Van Kranendonk et al., 2008; Djokic et al., 2017).

Convém dizer o que é um estromatólito, porque ele vai reaparecer até o epílogo. É uma rocha laminada, construída camada a camada por tape-

tes de micro-organismos que prendem sedimento e precipitam carbonato enquanto crescem em direção à luz. Cada lâmina é um intervalo de tempo transformado em forma. Quem quiser ver um não precisa ir à Austrália. As placas de calcário rosa que revestem os saguões do Centro Cultural Banco do Brasil, no Rio de Janeiro, vieram de Ouro Preto e são estromatólitos cortados e polidos, com as lâminas visíveis a olho nu. A vida mais antiga da Terra está em exposição permanente, como acabamento de parede.

O primeiro habitat bem documentado da vida é, portanto, o primeiro dos três ambientes rasos da seção 7. O edifício vulcânico quente, onde o hidrotermalismo oferecia doadores de elétrons, o enxofre fotolítico caía do céu e a zona fótica tocava o substrato nas ombreiras e nos flancos. Quimiossíntese e fotossíntese sem oxigênio podiam operar lado a lado, e os metabolismos de enxofre da seção anterior tinham ali sua despensa.

O passo seguinte está registrado cinquenta milhões de anos depois e cinquenta quilômetros adiante, na plataforma de Strelley Pool, com 3,43 Ga. Um recife de estromatólitos com quilômetros de extensão e sete morfotipos diferentes, crescendo em carbonato de água rasa sobre um alto estável (Allwood et al., 2006). É a primeira colonização inequívoca do segundo ambiente, a plataforma fria. A diferença entre Dresser e Strelley Pool é a diferença entre viver da energia do vulcão e viver da luz sobre um substrato que simplesmente não afunda. O recife só é possível porque um fragmento de crosta flutuante mantinha, ali, lâmina d'água rasa e estável por tempo ecológico. Tapetes fotossintéticos em águas rasas de 3,42 Ga, na África do Sul, completam o quadro (Tice e Lowe, 2004), e microfósseis de células que metabolizavam enxofre, em arenitos de 3,4 Ga do mesmo Pilbara, mostram a ecologia por dentro (Wacey et al., 2011). No Paleoarqueano, a fotossíntese sem oxigênio já colonizara as plataformas disponíveis. O gargalo era imobiliário. Plataformas eram raras porque placas flutuantes eram raras. É por isso que a expansão dos carbonatos e dos estromatólitos acompanha, com atraso curto, a curva de crescimento e emersão dos continentes.

Entre os metabolismos fotossintéticos sem oxigênio, um interessa especialmente a este livro, e merece sua equação. A fotoferrotrofia usa $Fe^{2}\square$ como doador de elétrons no lugar da água, e precipita ferro oxidado como escória do próprio metabolismo. Escrita por extenso, ela diz

$$4\ Fe^{2}\square + CO\square + 11\ H\square O + \text{luz} \rightarrow CH\square O + 4\ Fe(OH)\square + 8\ H\square$$

Do lado esquerdo, ferro dissolvido, gás carbônico, água e luz. Do lado direito, matéria orgânica e ferrugem. É a reação que liga a luz ao ferro sem passar pelo oxigênio, e é a candidata mais forte a ter construído as formações ferríferas. Os experimentos e os modelos mostram que densidades celulares modestas, operando na base de uma zona fótica de padrão arqueano, oxidariam todo o fluxo de ferro que sobe de uma quimioclina, a interface entre a água iluminada e a água profunda rica em $Fe^{2}\square$, com taxas suficientes, sozinhas, para os grandes BIFs (Konhauser et al., 2002; Kappler et al., 2005; Thompson et al., 2019). O lago Matano mostra o ecossistema inteiro em funcionamento. Fotoferrotrofos prosperando numa quimioclina iluminada a mais de cem metros de profundidade, sulfato em traços, sulfeto capturado por ferro, água transparente porque pouco produtiva (Crowe et al., 2008).

A fotossíntese com oxigênio veio depois. Os relógios moleculares põem o grupo-coroa das cianobactérias perto de 2,9 Ga (Fournier et al., 2021), os traçadores químicos sugerem oásis de oxigênio a partir de ca. 3,0 Ga (Planavsky et al., 2014), e os indícios de oxigênio passageiro se adensam rumo a 2,5 Ga. Quando veio, acrescentou à frente de oxidação uma segunda lâmina, sem substituir a primeira. O mosaico que o capítulo 5 assume em 2,75 Ga, com fotoferrotrofos na quimioclina, possíveis cianobactérias em oásis rasos e redutores de enxofre embaixo, todos empilhados em metros de coluna d'água, estava sendo montado peça a peça desde o Paleoarqueano.

Aqui se fecha a definição que a seção 1 deixou em aberto. Uma plataforma, no sentido funcional deste livro, é o ponto de equilíbrio em que profundidade do espelho d'água, alcance da zona fótica, disponibilidade de ferro e disponibilidade de enxofre coincidem, em ciclos alternados ou simultâneos, sobre um substrato que a tectônica man-

tém estável. Cada termo dessa equação tem sua história contada nos capítulos anteriores. A profundidade, pela emersão lenta dos blocos. A zona fótica, pela óptica de um oceano ferruginoso. O ferro, pelo hidrotermalismo sobre crosta máfica. O enxofre, pela rota vulcânica e fotoquímica e por sua escassez organizadora. A estabilidade, pela fabricação de placas flutuantes. O equilíbrio é raro porque exige tudo ao mesmo tempo. A Terra levou da origem do oceano até o Neoarqueano para torná-lo comum.

10. A montagem do bloco e o rifte de 3,2 Ga

Falta o último objeto, o bloco. A amalgamação dos núcleos flutuantes seguiu as duas vias que os capítulos 2 e 3 abriram. Onde o regime vertical dominou, coleções de domos se fundiram em agregados de formas circulares superpostas, seguindo o padrão das anomalias térmicas que os nutriam. Onde o movimento horizontal já puxava as placas e as plumas migravam em relação a elas, os agregados se estiraram em objetos mais lineares, colares de domos e protocinturões. Alguns desses agregados concentraram diferenciação suficiente, TTG sobre TTG e quilha empobrecida sob quilha, para se tornarem os primeiros blocos verdadeiramente flutuantes. Outros foram amalgamados à força, por subducções estimuladas pelos esforços de abertura dos riftes primordiais e pelas colisões que se seguiram. Nos dois casos o produto converge. Um núcleo cratônico com crosta diferenciada, manto litosférico frio e flutuante (Pearson et al., 2021) e, decisivo para tudo o que segue, suturas e cicatrizes internas que registram a montagem e nunca mais deixarão de funcionar como planos de fraqueza.

No sudeste do que viria a ser o Cráton Amazônico, esse processo tem idade medida. A compilação de isótopos de háfnio em zircão da província de Carajás devolve, por quatro rotas independentes, extração crustal entre 3,3 e 3,2 Ga. Foi um episódio real de fabricação de crosta a partir do manto, o nascimento do bloco paleoarqueano que serve de condição de contorno a toda a evolução posterior. O capítulo 2 mencionou os zircões detríticos de 3,6 Ga como vestígio de uma fábrica mais

antiga que não sobreviveu; o háfnio data a fábrica que sobreviveu. A proporção exata de processos verticais e horizontais na montagem permanece indeterminada. Blocos dessa idade carregam tipicamente as marcas dos dois regimes, e a arquitetura de domos e quilhas preservada logo ao sul, em Rio Maria, ainda que construída em ciclos mesoarqueanos posteriores, mostra que a via vertical seguiu disponível na vizinhança por centenas de milhões de anos.

E então, em torno de 3,2 Ga, o bloco recém-estabilizado fez o que a seção 4 previu que blocos estabilizados fazem. Tapou o calor do manto sob si e rifteou.

Vale parar na palavra margem, porque ela vai comandar os próximos capítulos. Margem continental é a borda de um continente, a faixa onde a crosta félsica e leve termina e o assoalho oceânico, máfico e denso, começa. Há dois tipos, e a diferença entre eles é a diferença entre a costa do Brasil e a costa do Chile. A costa brasileira nasceu quando a América do Sul se separou da África. É uma margem passiva. O continente e o assoalho oceânico ao lado pertencem à mesma placa, não há limite de placa ali, não há terremotos grandes nem vulcões, e a borda afunda devagar, enquanto esfria, acumulando sedimento em plataformas largas. Toda margem passiva nasce num rifte; ela é a praia que o rifte deixa. A costa chilena é o contrário. Ali a placa oceânica mergulha sob o continente numa fossa, há terremotos, há a cordilheira dos Andes com seus vulcões. É uma margem ativa, e todo limite de placa convergente que toca um continente é uma. Uma margem passiva pode virar ativa quando a convergência chega, e é exatamente isso que o capítulo 4 vai mostrar.

O rifteamento de um bloco rígido produz, portanto, uma margem passiva e, adiante dela, um centro de espalhamento que fabrica litosfera oceânica nova, no caso entre ca. 3,2 e 3,0 Ga. A geometria que esse rifte deixa montada é a alavanca de toda a história posterior. Numa margem passiva, o assoalho oceânico mais velho, mais frio e mais denso é precisamente o que está soldado ao continente, porque foi o primeiro a nascer. Quando os esforços convergentes chegarem, a ruptura vai nuclear ali, no degrau térmico junto ao cráton, e a subducção vai mer-

gulhar sob o bloco. É a toalha da seção 2 esperando a primeira ponta pendurada.

O Pilbara registra o mesmo ciclo na mesma janela, com rifteamento em 3,2 Ga e subducção retomada cerca de cento e vinte milhões de anos depois (Van Kranendonk, 2010). O que se propõe para Carajás tem um gêmeo documentado do outro lado do mundo arqueano, e o gêmeo serve de controle. A partir daqui a história muda de escala e de capítulo. A nucleação da subducção, a colisão mesoarqueana, a sutura que ficou e o break-off de 2,76 Ga são narrados, com suas evidências e seus testes, no capítulo 4. O funcionamento do reator que a bacia se torna é assunto dos capítulos 5 e 6.

Este capítulo termina onde eles começam, com uma observação de continuidade. Entre o primeiro oceano de 4,4 Ga e a Formação Carajás de 2,74 Ga correm cerca de 1,6 bilhão de anos, e nada nesse intervalo foi desperdiçado. Cada etapa fabricou uma peça. A placa, o oceano, a atmosfera de enxofre, a biosfera, a sutura. O BIF gigante é o momento em que todas as peças, por coincidência organizada pela tectônica, trabalharam juntas.

11. Níveis de confiança

São evidência ou consenso forte a operação simultânea de domos e quilhas, cinturões lineares e acresção no Arqueano; o peso da placa que afunda como principal força do sistema moderno e o papel da astenosfera como camada de deslizamento; a zona de transição hidratada, registrada na ringwoodita; a falta de oxigênio atmosférico anterior a 2,4 Ga e o fracionamento independente de massa do enxofre; o sulfato como constituinte-traço do oceano arqueano; a redução microbiana de sulfato e o processamento de enxofre elementar entre 3,5 e 3,4 Ga; os estromatólitos de Dresser e Strelley Pool; a capacidade quantitativa da fotoferrotrofia; o oceano arqueano enriquecido em oxigênio pesado e a emersão continental tardia; e a extração crustal de 3,3 a 3,2 Ga em Carajás.

São modelos publicados, adotados aqui como mecanismos, a iniciação de subducção induzida por pluma; a transição gradual e episódica para o regime de placas entre ca. 3,2 e 2,5 Ga; o ciclo profundo da água e a lubrificação por sedimentos; a alimentação de plumas por heterogeneidades acumuladas junto ao limite núcleo-manto; o oceano arqueano volumoso; a atenuação do UV na coluna d'água; e o rifte de 3,2 Ga em Carajás, comparado ao ciclo coevo do Pilbara.

São hipóteses de trabalho deste livro o efeito dominó que acumula, drip a drip, esticamento horizontal até a ruptura; a vitória do regime horizontal por maior eficiência mecânica; a leitura de Vênus e Marte como controles da transição, com as ressalvas do capítulo 2; a continuidade funcional entre fabricação da placa, organização do oceano e expansão dos ambientes rasos; a definição de plataforma como equilíbrio hidrográfico; e a leitura do rifte de 3,2 Ga como resposta ao tamponamento térmico do bloco paleoarqueano recém-estabilizado. O registro permite testar cada elo separadamente. Sua articulação causal é a contribuição do modelo.

Conclusão

Entre ca. 3,5 e 3,2 Ga, o continente deixou de ser apenas um produto da destilação vertical. Riftes passaram a gerar superfície; zonas de consumo tornaram-se autossustentadas; a astenosfera desacoplou a litosfera; a água recirculou por placas, arcos e plumas; colisões e amálgamas juntaram núcleos em blocos com crosta espessa e manto litosférico empobrecido. A placa durável surgiu dessa combinação, e surgiu porque resolvia esforços melhor que o regime que a precedeu.

A plataforma foi a expressão superficial da mesma mudança. Um bloco flutuante manteve lâmina d'água rasa por tempo ecológico; a zona fótica alcançou o substrato; o oceano ferruginoso forneceu $Fe^{2}\square$; a rota vulcânica e fotoquímica entregou enxofre em traços; comunidades ocuparam caldeiras, quimioclinas e carbonatos de água rasa. A vida saiu do vulcão e subiu na plataforma assim que houve plataforma.

Em Carajás, a extração crustal de 3,3 a 3,2 Ga e o rifte de 3,2 Ga encerram essa fabricação. O bloco existe, tem certidão e acaba de abrir uma margem. O capítulo seguinte recebe essa margem e acompanha sua forja até o break-off de 2,76 Ga.

Referências

Allwood, A. C.; Walter, M. R.; Kamber, B. S.; Marshall, C. P.; Burch, I. W. (2006). Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. Nature, 441, 714–718. https://doi.org/10.1038/nature04764

Allwood, A. C.; Rosing, M. T.; Flannery, D. T.; Hurowitz, J. A.; Heirwegh, C. M. (2018). Reassessing evidence of life in 3,700-million-year-old rocks of Greenland. Nature, 563, 241–244. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0610-4

Bindeman, I. N.; Zakharov, D. O.; Palandri, J.; Greber, N. D.; Dauphas, N.; Retallack, G. J.; Hofmann, A.; Lackey, J. S.; Bekker, A. (2018). Rapid emergence of subaerial landmasses and onset of a modern hydrologic cycle 2.5 billion years ago. Nature, 557, 545–548. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0131-1

Cawood, P. A.; Hawkesworth, C. J.; Pisarevsky, S. A.; Dhuime, B.; Capitanio, F. A.; Nebel, O. (2018). Geological archive of the onset of plate tectonics. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 376, 20170405. https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0405

Crowe, S. A.; Jones, C.; Katsev, S.; Magen, C.; O'Neill, A. H.; Sturm, A.; Canfield, D. E.; Haffner, G. D.; Mucci, A.; Sundby, B.; Fowle, D. A. (2008). Photoferrotrophs thrive in an Archean Ocean analogue. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105, 15938–15943. https://doi.org/10.1073/pnas.0805313105

Crowe, S. A.; Paris, G.; Katsev, S.; Jones, C.; Kim, S.-T.; Zerkle, A. L.; Nomosatryo, S.; Fowle, D. A.; Adkins, J. F.; Sessions, A. L.; Farquhar, J.; Canfield, D. E. (2014). Sulfate was a trace constituent of Archean seawater. Science, 346, 735–739.

https://doi.org/10.1126/science.1258966

Djokic, T.; Van Kranendonk, M. J.; Campbell, K. A.; Walter, M. R.; Ward, C. R. (2017). Earliest signs of life on land preserved in ca. 3.5 Ga hot spring deposits. Nature Communications, 8, 15263. https://doi.org/10.1038/ncomms15263

Dodd, M. S.; Papineau, D.; Grenne, T.; Slack, J. F.; Rittner, M.; Pirajno, F.; O'Neil, J.; Little, C. T. S. (2017). Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates. Nature, 543, 60–64. https://doi.org/10.1038/nature21377

Dong, J.; Fischer, R. A.; Stixrude, L. P.; Lithgow-Bertelloni, C. R. (2021). Constraining the volume of Earth's early oceans with a temperature-dependent mantle water storage capacity model. AGU Advances, 2, e2020AV000323. https://doi.org/10.1029/2020AV000323

Fakhraee, M.; Katsev, S. (2019). Organic sulfur was integral to the Archean sulfur cycle. Nature Communications, 10, 4556. https://doi.org/10.1038/s41467-019-12396-y

Farquhar, J.; Bao, H.; Thiemens, M. (2000). Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle. Science, 289, 756–758. https://doi.org/10.1126/science.289.5480.756

Fournier, G. P.; Moore, K. R.; Rangel, L. T.; Payette, J. G.; Momper, L.; Bosak, T. (2021). The Archean origin of oxygenic photosynthesis and extant cyanobacterial lineages. Proceedings of the Royal Society B, 288, 20210675. https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0675

Garnero, E. J.; McNamara, A. K.; Shim, S.-H. (2016). Continent-sized anomalous zones with low seismic velocity at the base of Earth's mantle. Nature Geoscience, 9, 481–489. https://doi.org/10.1038/ngeo2733

Gerya, T. V.; Stern, R. J.; Baes, M.; Sobolev, S. V.; Whattam, S. A. (2015). Plate tectonics on the Earth triggered by plume-induced subduction initiation. Nature, 527, 221–225. https://doi.org/10.1038/nature15752

Habicht, K. S.; Gade, M.; Thamdrup, B.; Berg, P.; Canfield, D. E. (2002). Calibration of sulfate levels in the Archean ocean. Science, 298, 2372–

2374. https://doi.org/10.1126/science.1078265

Hirschmann, M. M. (2006). Water, melting, and the deep Earth H□O cycle. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 34, 629–653. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125211

Johnson, B. W.; Wing, B. A. (2020). Limited Archaean continental emergence reflected in an early Archaean ^{1}□O-enriched ocean. Nature Geoscience, 13, 243–248. https://doi.org/10.1038/s41561-020-0538-9

Kappler, A.; Pasquero, C.; Konhauser, K. O.; Newman, D. K. (2005). Deposition of banded iron formations by anoxygenic phototrophic Fe(II)-oxidizing bacteria. Geology, 33, 865–868. https://doi.org/10.1130/G21658.1

Konhauser, K. O.; Hamade, T.; Raiswell, R.; Morris, R. C.; Ferris, F. G.; Southam, G.; Canfield, D. E. (2002). Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations? Geology, 30, 1079–1082. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<1079:CBHFTP>2.0.CO;2

Liu, C.; He, Y. (2021). Rise of major subaerial landmasses about 3.0 to 2.7 billion years ago. Geochemical Perspectives Letters, 18, 1–5. https://doi.org/10.7185/geochemlet.2115

Mateos, K.; Chappell, G.; Klos, A.; Le, B.; Boden, J.; Stüeken, E.; Anderson, R. (2023). The evolution and spread of sulfur cycling enzymes reflect the redox state of the early Earth. Science Advances, 9, eade4847. https://doi.org/10.1126/sciadv.ade4847

Mloszewska, A. M.; Cole, D. B.; Planavsky, N. J.; Kappler, A.; Whitford, D. S.; Owttrim, G. W.; Konhauser, K. O. (2018). UV radiation limited the expansion of cyanobacteria in early marine photic environments. Nature Communications, 9, 3088. https://doi.org/10.1038/s41467-018-05520-x

Moyen, J.-F.; Martin, H. (2012). Forty years of TTG research. Lithos, 148, 312–336. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010

Nutman, A. P.; Bennett, V. C.; Friend, C. R. L.; Van Kranendonk, M. J.; Chivas, A. R. (2016). Rapid emergence of life shown by discovery

of 3,700-million-year-old microbial structures. Nature, 537, 535–538. https://doi.org/10.1038/nature19355

Palin, R. M.; Santosh, M.; Cao, W.; Li, S.-S.; Hernández-Uribe, D.; Parsons, A. (2020). Secular change and the onset of plate tectonics on Earth. Earth-Science Reviews, 207, 103172. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.

Pearson, D. G.; Brenker, F. E.; Nestola, F.; McNeill, J.; Nasdala, L.; Hutchison, M. T.; Matveev, S.; Mather, K.; Silversmit, G.; Schmitz, S.; Vekemans, B.; Vincze, L. (2014). Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond. Nature, 507, 221–224. https://doi.org/10.1038/nature13080

Pearson, D. G.; Scott, J. M.; Liu, J.; Schaeffer, A.; Wang, L. H.; van Hunen, J.; Szilas, K.; Chacko, T.; Kelemen, P. B. (2021). Deep continental roots and cratons. Nature, 596, 199–210. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03600-5

Philippot, P.; Van Zuilen, M.; Lepot, K.; Thomazo, C.; Farquhar, J.; Van Kranendonk, M. J. (2007). Early Archaean microorganisms preferred elemental sulfur, not sulfate. Science, 317, 1534–1537. https://doi.org/10.1126/science.1145861

Planavsky, N. J.; Asael, D.; Hofmann, A.; Reinhard, C. T.; Lalonde, S. V.; Knudsen, A.; Wang, X.; Ossa Ossa, F.; Pecoits, E.; Smith, A. J. B.; Beukes, N. J.; Bekker, A.; Johnson, T. M.; Konhauser, K. O.; Lyons, T. W.; Rouxel, O. J. (2014). Evidence for oxygenic photosynthesis half a billion years before the Great Oxidation Event. Nature Geoscience, 7, 283–286. https://doi.org/10.1038/ngeo2122

Poulton, S. W.; Canfield, D. E. (2011). Ferruginous conditions: a dominant feature of the ocean through Earth's history. Elements, 7, 107–112. https://doi.org/10.2113/gselements.7.2.107

Ranjan, S.; Kufner, C. L.; Lozano, G. G.; Todd, Z. R.; Haseki, A.; Sasselov, D. D. (2022). UV transmission in natural waters on prebiotic Earth. Astrobiology, 22, 242–262. https://doi.org/10.1089/ast.2020.2422

Shen, Y.; Buick, R.; Canfield, D. E. (2001). Isotopic evidence for micro-

bial sulphate reduction in the early Archaean era. Nature, 410, 77–81. https://doi.org/10.1038/35065071

Sobolev, S. V.; Brown, M. (2019). Surface erosion events controlled the evolution of plate tectonics on Earth. Nature, 570, 52–57. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1258-4

Thompson, K. J.; Kenward, P. A.; Bauer, K. W.; Warchola, T.; Gauger, T.; Martinez, R.; Simister, R. L.; Michiels, C. C.; Llirós, M.; Reinhard, C. T.; Kappler, A.; Konhauser, K. O.; Crowe, S. A. (2019). Photoferrotrophy, deposition of banded iron formations, and methane production in Archean oceans. Science Advances, 5, eaav2869. https://doi.org/10.1126/sciadv.aav2869

Tice, M. M.; Lowe, D. R. (2004). Photosynthetic microbial mats in the 3,416-Myr-old ocean. Nature, 431, 549–552. https://doi.org/10.1038/nature02888

Ueno, Y.; Ono, S.; Rumble, D.; Maruyama, S. (2008). Quadruple sulfur isotope analysis of ca. 3.5 Ga Dresser Formation: new evidence for microbial sulfate reduction in the early Archean. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72, 5675–5691. https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.08.026

Van Kranendonk, M. J.; Philippot, P.; Lepot, K.; Bodorkos, S.; Pirajno, F. (2008). Geological setting of Earth's oldest fossils in the ca. 3.5 Ga Dresser Formation, Pilbara Craton, Western Australia. Precambrian Research, 167, 93–124. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.07.003

Van Kranendonk, M. J. (2010). Two types of Archean continental crust: plume and plate tectonics on early Earth. American Journal of Science, 310, 1187–1209. https://doi.org/10.2475/10.2010.01

Wacey, D.; Kilburn, M. R.; Saunders, M.; Cliff, J.; Brasier, M. D. (2011). Microfossils of sulphur-metabolizing cells in 3.4-billion-year-old rocks of Western Australia. Nature Geoscience, 4, 698–702. https://doi.org/10.1038/ngeo1238

Walter, M. R.; Buick, R.; Dunlop, J. S. R. (1980). Stromatolites 3,400–3,500 Myr old from the North Pole area, Western Australia. Nature, 284, 443–445. https://doi.org/10.1038/284443a0

Capítulo 4. A forja da margem: do rifte de 3,2 Ga ao break-off de 2,76 Ga

Como o bloco paleoarqueano virou margem, orógeno e sutura, e como uma placa rasa carregou essa herança até a ruptura

Modelo de trabalho

O rifte de 3,2 Ga deixou o assoalho mais velho e mais frio junto ao cráton. A subducção nucleou nesse degrau térmico e mergulhou para norte. O interior jovem da placa virou de barriga; a faixa velha foi consumida num sistema acrescionário. A colisão travou, a raiz eclogitizada caiu e uma sutura larga permaneceu. Depois, uma placa rasa resfriou e hidratou o manto litosférico por setenta milhões de anos. A ruptura de 2,76 Ga abriu a janela que iniciou a bacia extensional de Itacaiúnas. A polaridade, a queda da raiz, a placa rasa e a ruptura são hipóteses deste livro; as idades e as estruturas que elas encadeiam são medidas.

Rio Maria · Complexo Xingu · overturn · sanukitoide · sutura E-W · flat slab · break-off · bacia de Itacaiúnas · Mesoarqueano–Neoarqueano · ca. 3,2–2,76 Ga

Resumo

O capítulo anterior entregou um bloco com certidão de nascimento e uma margem recém-aberta. Este acompanha o que a margem virou nos quatrocentos e cinquenta milhões de anos seguintes. Ela foi consumida, travada, espessada, aliviada e, por fim, rompida. Cada um desses verbos deixou uma estrutura ou uma idade em Carajás, e a sequência inteira cabe numa página.

Quando a convergência alcançou a margem passiva, o assoalho mais velho e mais denso, soldado ao continente, foi o primeiro a mergulhar, e mergulhou para norte, sob o bloco. O interior jovem da placa, quente e flutuante, não desceu em lâmina. Engrossou e virou de barriga em afundamentos verticais que o Domínio Rio Maria preserva até hoje. A faixa velha entrou num sistema de arcos que produziu os TTG do Complexo Xingu entre 3,08 e 2,93 Ga. A chegada de um bloco pelo sul travou o consumo em ca. 2,93 Ga; o orógeno engrossou até que sua raiz, transformada em eclogito, caísse no manto em ca. 2,87 Ga. Granitoides e metamorfismo de 2,87 a 2,83 Ga registram essa reorganização. Restou uma sutura larga, de vários fios, mergulhante para norte.

A convergência migrou então para a margem setentrional e instalou uma placa rasa e sem vulcões, capaz de resfriar e hidratar o manto sob o bloco durante o silêncio de 2,83 a 2,76 Ga. Foi o tempo de carga. A ruptura dessa placa em ca. 2,76 Ga abriu uma janela de manto quente sobre um reservatório hidratado. A extensão de 2,76 a 2,73 Ga alojou granitoides e corpos máfico-ultramáficos em estruturas verticais de abertura e iniciou a bacia de Itacaiúnas. O reator do capítulo 5 nasce dessa descarga.

1. Para que lado a placa mergulha

A seção 10 do capítulo 3 deixou armada a alavanca. Numa margem passiva, a borda de continente nascida num rifte, sem limite de placa, o assoalho oceânico mais velho, mais frio e mais denso é o que está colado ao continente, porque foi o primeiro a nascer. Quando a con-

vergência chega, esse degrau térmico é a zona preferencial de ruptura, e a placa mergulha sob o continente que a gerou. O Pilbara, na Austrália, fornece o paralelo arqueano. Rifteou na mesma janela de ca. 3,2 Ga, preservou enxames de diques e sucessões de margem passiva e retomou a subducção cerca de cento e vinte milhões de anos depois (Van Kranendonk et al., 2010).

Em Carajás, a subducção começa em ca. 3,08 Ga, e nesse instante a margem passiva vira ativa, com fossa, placa mergulhante e, logo adiante, vulcões. Para que lado a placa desceu é a primeira pergunta de qualquer reconstrução, porque a polaridade decide onde fica o arco, onde fica a bacia e onde a estrutura vai reabrir depois. Este livro propõe que ela mergulhou para norte, sob o bloco paleoarqueano, e sustenta a escolha com três argumentos.

O primeiro é o degrau. A faixa oceânica velha estava junto ao bloco e teria afundado sob ele. O segundo é Rio Maria. O domínio ao sul preserva sua arquitetura vertical do Mesoarqueano, e a deformação da colisão foi absorvida antes de penetrar nele. É a geometria de um indentador. Pense num dedo apertando um bloco de argila. A argila se deforma na frente e nos lados do dedo, não dentro dele. A placa sul foi o dedo, avançando por baixo; o bloco norte, a argila. O terceiro argumento é a bacia posterior. Ela ocupa o bloco norte, exatamente o lado que desceria quando um plano mergulhante para norte fosse reativado em extensão. A polaridade organiza a colisão, a sutura e a abertura que viria.

2. Dois destinos para uma placa

A placa oceânica fabricada entre 3,2 e 3,0 Ga não tinha uma idade só. O assoalho perto do continente era velho e frio; o interior, perto do centro de espalhamento, era jovem e quente. Essas duas partes tiveram destinos diferentes, e Carajás preserva os dois.

O interior jovem era flutuante demais para mergulhar. Em vez disso, engrossou, porque o manto quente continuava a despejar magma em

cima dele, formando um platô oceânico. Quando a base dessa pilha passou pela transformação que o capítulo 2 descreveu, basalto virando granulito e eclogito, mais pesado que o manto, a pilha virou de barriga. É o que a literatura chama de overturn. O que estava em cima afunda em quilhas e o que estava embaixo, mais quente e mais leve, sobe em domos. Era a tectônica vertical do capítulo anterior, agora operando sobre um platô oceânico em vez de sobre a tampa primordial.

O Domínio Rio Maria conserva o resultado. Arquitetura de domos e quilhas, suítes de TTG juvenis em três episódios com máximo entre 2,98 e 2,92 Ga, idades-modelo próximas de 3,0 Ga e cinturões de rochas verdes comprimidos entre os domos (Oliveira et al., 2009; Almeida et al., 2011). Há também sanukitoides de ca. 2,87 Ga, granitoides ricos em magnésio e potássio que exigem um manto previamente enriquecido por fluidos, típicos do fim do Arqueano e um sinal de que, por baixo de Rio Maria, algum processo já tinha molhado o manto. O que Rio Maria não tem é tão importante quanto o que tem. Não há trama colisional penetrativa, não há bacia neoarqueana por cima, não há alteração regional. Por isso o domínio funciona como controle para tudo o que Carajás sofreu depois. É a amostra que ficou fora do reator.

A faixa velha junto ao cráton teve o outro destino. Rompeu e foi consumida durante cerca de cento e trinta milhões de anos num sistema acrescionário, isto é, num conjunto de arcos vulcânicos e fatias de crosta que vão sendo empilhados contra a margem à medida que a placa desce. Esse sistema não corre liso. Colisões de platôs oceânicos travam segmentos da fossa, a subducção se desloca e recomeça num traço novo. A colisão atual do platô de Ontong Java com o arco das ilhas Salomão, no Pacífico, mostra o mecanismo em andamento. A crosta espessa do platô trava um segmento, a placa se destaca e a convergência pula para outro lugar (Mann e Taira, 2004). Um sistema assim produz pulsos de magma separados por silêncios. Os TTG do Complexo Xingu registram exatamente esse espectro entre 3,08 e 2,93 Ga (Machado et al., 1991; Tavares et al., 2018).

Uma ressalva pertence à honestidade do método. A geoquímica dos TTG, isoladamente, admite outra origem. As razões elevadas entre es-

trôncio e ítrio, ou entre lantânio e itérbio, que marcam esses granitoides, também aparecem quando a base de uma crosta máfica espessa funde sem placa mergulhante nenhuma, como o capítulo 2 mostrou (Nagel et al., 2012). A leitura de subducção não vem da química de uma rocha. Vem da convergência entre idade, estrutura e regime térmico.

3. O travamento e a queda da raiz

Em ca. 2,93 Ga, um bloco continental chegou pelo sul à fossa e travou o consumo oceânico. Crosta continental é leve demais para descer, e quando dois continentes se encontram a convergência deixa de ser absorvida pela placa que mergulha e passa a ser absorvida pelo espessamento. É assim que nasce um orógeno, uma cadeia de montanhas com raiz. O Himalaia, onde a Índia empurra a Ásia, é o caso vivo. A crosta dobra, se empilha em fatias e engrossa até o dobro da espessura normal, e a montanha que sobe tem uma raiz proporcional que desce.

A raiz é o ponto fraco. A base de um orógeno espesso atinge pressões em que a rocha máfica vira eclogito, e a régua de densidade do capítulo 2 faz o resto. A raiz fica mais pesada que o manto ao redor e, a certa altura, desaba. Em Carajás, este livro coloca essa queda em ca. 2,87 Ga.

Os análogos modernos mostram as etapas. Na Sierra Nevada, na Califórnia, xenólitos trazidos por vulcões e imagens de tomografia registram a antiga raiz máfico-ultramáfica do arco e seu afundamento, ainda em curso em parte da cadeia (Ducea e Saleeby, 1998; Zandt et al., 2004). No Alborán, no Mediterrâneo ocidental, a retirada de uma litosfera espessada reorganizou o gradiente térmico e o metamorfismo da região inteira (Platt e Vissers, 1989). No Tibete, o aquecimento do manto litosférico que tinha sido enriquecido por fluidos produz magmas potássicos com assinatura herdada de arco (Turner et al., 1993). Quando a raiz cai, o manto quente sobe para ocupar o lugar, a crosta que ficou é aquecida por baixo, funde, e o orógeno responde com magmatismo e metamorfismo de alta temperatura.

Em Carajás, granitoides sincinemáticos, isto é, cristalizados enquanto a deformação ainda operava, aparecem entre 2,87 e 2,83 Ga, e o registro anterior é transposto sob condições de anfibolito alto a granulito. O encurtamento é norte-sul e o transporte no interior do bloco é para norte. Numa colisão de indentador, o lado da argila que está sobre o dedo é empurrado na direção do avanço. É o que se vê. O outro lado, a frente que deveria avançar para sul sobre a placa inferior, permanece como previsão a mapear no corredor da sutura.

4. A sutura que ficou

Sutura é a cicatriz que resta quando um oceano fecha. Na superfície pode parecer uma faixa de rochas deformadas; em profundidade é uma zona que atravessa a litosfera inteira e separa dois blocos que um dia estiveram a milhares de quilômetros de distância. Toda colisão deixa uma, e toda sutura continua funcionando, porque é o plano mais fraco da região.

A transição estrutural em Carajás tem apoio independente. Grandjean da Costa et al. (2020) contrastam os domos e quilhas do Mesoarqueano com o cinturão linear que organiza a província mais jovem. Lacasse et al. (2020), ao reconstruírem a composição das rochas vulcânicas neoarqueanas, favorecem contaminação crustal durante rifteamento continental para o evento de ca. 2,76 Ga. Os dois resultados fixam limites úteis. Estruturas profundas lineares já existiam; a reativação de 2,76 a 2,73 Ga foi extensional. A proposta específica deste livro coloca entre esses limites uma sutura formada durante a acresção e a colisão de 3,08 a 2,83 Ga, depois reaberta pelo rifte.

A sutura de Carajás não é uma linha. Cada pulso acrescionário deixou uma descontinuidade; a transposição as colocou paralelas; a extensão posterior reativou o conjunto. O produto é uma zona larga, feita de vários fios, como uma corda. Essa largura controla a abertura de 2,76 Ga, o volume de magma, a geometria da bacia e a distribuição linear das câmaras profundas. A sutura vira a memória mecânica do bloco. Uma estrutura antiga que continua escolhendo onde a litosfera rompe, por

onde o magma sobe e onde a alteração se concentra. Ela vai reaparecer em todos os capítulos seguintes.

5. A placa rasa que carrega

Depois do travamento, a convergência migrou para a margem norte do bloco amalgamado. Este livro propõe que ali se instalou uma subducção rasa, sem vulcões e refrigerante. Placas normalmente mergulham em ângulo, deixando entre si e o continente uma cunha de manto quente que funde e alimenta os vulcões do arco. Uma placa rasa, o flat slab da literatura, desliza quase horizontal, colada por baixo da litosfera continental, e empurra essa cunha quente para longe. Sem cunha, não há vulcões. Mas a placa continua a perder água enquanto avança, e essa água entra no manto litosférico de cima, onde minerais como anfibólio e flogopita a fixam.

O oeste dos Estados Unidos mostra o processo recente. Durante o período Laramide, entre oitenta e cinquenta milhões de anos atrás, a placa Farallon deslizou rasa sob a América do Norte, hidratou a litosfera, calou o vulcanismo da costa e levantou as Montanhas Rochosas a mais de mil quilômetros da fossa. A atividade magmática e hidrotermal que veio depois, quando a placa afundou, foi condicionada pela água que ela tinha deixado (Humphreys et al., 2003). Uma placa rasa transforma um sistema de produção de magma em sistema de armazenamento.

Imagine uma chapa fria e úmida deslizando sob uma superfície quente. Enquanto fica ali, afasta o material quente, esfria o sistema e libera água. Quando se rompe, abre uma janela por onde o calor retorna e encontra matéria previamente hidratada. É uma bateria carregando em silêncio. Em Carajás, o hiato de ca. setenta milhões de anos entre 2,83 e 2,76 Ga é a resposta esperada desse estado. Um arco ativo produziria um eixo contínuo ou migrante de vulcões e plútons; a placa rasa atravessa o intervalo calada. O hiato magmático não era vazio. Era o tempo de carga.

6. A ruptura que descarrega

Em ca. 2,76 Ga, a placa rompeu. O rasgo de uma placa em profundidade, o break-off, não acontece de uma vez ao longo de toda a sua extensão. Propaga-se lateralmente, como um rasgo num tecido, e se localiza em descontinuidades herdadas. O sistema do Mediterrâneo e dos Cárpatos registra rasgos desse tipo em andamento, com segmentos de placa se destacando um após o outro, e as falhas que acompanham as bordas de uma placa em retirada mostram como a litosfera se rompe de lado (Wortel e Spakman, 2000; Govers e Wortel, 2005). Uma sutura larga favorece uma janela larga.

Pela janela aberta, a astenosfera subiu. Encontrou um manto que tinha sido hidratado duas vezes, primeiro pelo sistema de arcos de 3,08 a 2,93 Ga, depois pela placa rasa de 2,83 a 2,76 Ga. Manto hidratado funde com facilidade, e o magma que sai carrega uma impressão digital que merece explicação, porque vai confundir o leitor desatento nos capítulos seguintes. Quando uma placa desce e perde água, essa água leva consigo para o manto de cima os elementos que se dissolvem bem em fluido, como potássio, rubídio, bário e estrôncio, e deixa para trás os que ficam presos em minerais resistentes, como nióbio, tântalo e titânio. Um manto que passou por isso produz magmas enriquecidos nos primeiros e empobrecidos nos segundos. É a assinatura de arco. O detalhe é que a assinatura fica gravada na fonte e sobrevive ao ambiente em que a fusão finalmente acontece. Um magma com cara de arco pode subir num rifte, dezenas de milhões de anos depois de o arco ter morrido, se o manto que ele veio ainda guardar a memória. É esse o caso proposto para Carajás.

Três observações separam a descarga extensional de um arco ativo contemporâneo. Falta um eixo de plútons de arco entre 2,83 e 2,76 Ga e falta uma frente magmática migrante. O vulcanismo que começa em 2,76 Ga tem distribuição de bacia, não de cordilheira. E o intervalo anterior é um hiato de setenta milhões de anos. As previsões também divergem. Um arco mantém ou desloca sua produção; o break-off dispara um pulso abrupto sobre uma janela fixa. O registro disponível

favorece a segunda geometria.

A bacia de Itacaiúnas instala-se sobre essa anomalia térmica. Um meio-gráben, uma bacia limitada por uma falha normal de um lado só, reativa o fio externo da sutura; câmaras alimentadoras se alinham na interface entre crosta e manto; granitoides e corpos máfico-ultramáficos de 2,76 a 2,73 Ga, entre eles o Luanga do capítulo 2, usam estruturas verticais de abertura. Esse intervalo pertence ao desenvolvimento extensional da bacia. A sutura fornece o caminho, a placa rasa fornece a água e a ruptura fornece o calor. A forja termina quando os três passam a funcionar juntos.

7. Níveis de confiança

São evidência as idades dos TTG do Complexo Xingu, entre 3,08 e 2,93 Ga; os episódios de TTG e os sanukitoides do Domínio Rio Maria; a arquitetura de domos e quilhas preservada ao sul; o clímax metamórfico e magmático de 2,87 a 2,83 Ga; o cinturão estrutural linear; o hiato de 2,83 a 2,76 Ga; e a abertura extensional da bacia de Itacaiúnas com magmatismo entre 2,76 e 2,73 Ga.

São modelos publicados, usados como análogos de processo, a interrupção e a renucleação da subducção por platôs oceânicos em Ontong Java; a remoção de raiz na Sierra Nevada e no Alborán; o magmatismo potássico após reorganização litosférica no Tibete; a hidratação e o silêncio magmático do Laramide; a localização de rasgos de placa em falhas de borda; a transição de domos e quilhas para cinturões lineares em Carajás; e o rifte continental como ambiente do magmatismo neoarqueano da província.

São hipóteses de trabalho deste livro a margem passiva de 3,2 Ga como condição de contorno; a nucleação da subducção no degrau térmico; sua polaridade para norte; a leitura do cinturão linear como sutura acrescionária e colisional; a queda da raiz como causa da reorganização de 2,87 Ga; a placa rasa sem vulcões como estágio de carga; e o break-off como descarga em 2,76 Ga. A cadeia é coerente com o re-

gistro disponível, mas seus elos precisam ser testados separadamente por mapeamento estrutural, geocronologia, petrologia e distribuição espacial do magmatismo.

Conclusão

Entre 3,2 e 2,76 Ga, a margem passou por uma sequência mecânica contínua, e cada etapa preparou a seguinte. O rifte fabricou um degrau térmico; o degrau localizou a subducção; a acresção consumiu a faixa oceânica velha enquanto o interior jovem virava de barriga; a colisão travou o sistema; a raiz caiu; a transposição deixou uma sutura larga; a placa rasa resfriou e hidratou o manto; a ruptura abriu a janela. Nada aqui exige um mecanismo exótico. Exige que mecanismos conhecidos tenham ocorrido nesta ordem, neste lugar.

A ruptura de 2,76 Ga transforma herança em reator. O magmatismo que se segue pertence à extensão que abre a bacia, ainda que carregue a memória geoquímica de subducções anteriores. Essa distinção entre o ambiente em que o magma sobe e a história da fonte de onde ele vem será decisiva daqui em diante. O capítulo seguinte recebe uma bacia quente, estruturada e hidratada, e pergunta como ela concentrou ferro na zona fótica.

Referências

Almeida, J. A. C. et al. (2011). Zircon geochronology, geochemistry and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane. Precambrian Research, 187, 201–221. https://doi.org/10.1016/j.precamres.201

Ducea, M. N.; Saleeby, J. B. (1998). The age and origin of a thick mafic-ultramafic keel from beneath the Sierra Nevada batholith. Contributions to Mineralogy and Petrology, 133, 169–185.

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. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.022

Grandjean da Costa, F. et al. (2020). From Mesoarchean drips to modern-style tectonics in the Carajás Province, Amazonian Craton. Journal of South American Earth Sciences, 104, 102817. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102817

Humphreys, E. et al. (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

Lacasse, C. M.; Ganade, C. E.; Mathieu, L.; Teixeira, N. A.; Lopes, L. B. L.; Monteiro, C. F. (2020). Restoring original composition of hydrothermally altered Archean metavolcanic rocks of the Carajás Mineral Province (Brazil): geodynamic implications for the transition from lid to mobile tectonics. Lithos, 372–373, 105647. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105647

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. https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90040-H

Mann, P.; Taira, A. (2004). Global tectonic significance of the Solomon Islands and Ontong Java Plateau convergent zone. Tectonophysics, 389, 137–190. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.10.024

Nagel, T. J.; Hoffmann, J. E.; Münker, C. (2012). Generation of Eoarchean tonalite-trondhjemite-granodiorite series from thickened mafic arc crust. Geology, 40, 375–378. https://doi.org/10.1130/G32729.1

Oliveira, M. A.; Dall'Agnol, R.; Almeida, J. A. C. (2009). Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 27, 146–160. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2008.07.003

Platt, J. P.; Vissers, R. L. M. (1989). Extensional collapse of thickened continental lithosphere: a working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar arc. Geology, 17, 540–543.

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. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.08.024

Turner, S. et al. (1993). Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. Nature, 364, 50–54. https://doi.org/10.1038/364050a0

Van Kranendonk, M. J. et al. (2010). Evidence for Mesoarchean (\~3.2 Ga) rifting of the Pilbara Craton: the missing link in an early Precambrian Wilson cycle. Precambrian Research, 177, 145–161. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.11.007

Wortel, M. J. R.; Spakman, W. (2000). Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region. Science, 290, 1910–1917. https://doi.org/10.1126/science.290.5498.1910

Zandt, G. et al. (2004). Active foundering of a continental arc root beneath the southern Sierra Nevada in California. Nature, 431, 41–46. https://doi.org/10.1038/nature02847

Capítulo 5. Da tectônica à zona fótica

Como as bacias de 2,76 a 2,65 Ga transformaram ferro, enxofre, luz e tempo de residência em províncias minerais distintas

Modelo de trabalho

A ruptura da placa abriu a bacia e organizou a circulação. Basaltos e intrusões profundas forneceram ferro e sílica; cinza, rios e intemperismo levaram fósforo, enxofre e elementos-traço à superfície; a estratificação guardou Fe^{2}□ abaixo da quimioclina; a luz e o metabolismo microbiano processaram os fluxos. O BIF gigante surgiu onde a bacia espalhou ferro e manteve baixo o sulfeto livre. VMS, níquel, ouro e IOCG registram outros modos de concentrar ou retrabalhar sistemas aparentados. A janela de enxofre como controle da escala gigante e a comparação causal entre os reatores de 2,7 Ga são hipóteses deste livro; as idades, as rochas e os traçadores que elas encadeiam são medidos.

jaspilito · BIF · Carajás · Kostomuksha · código de barras · tempo de residência · zona fótica · ciclo Fe–S · VMS · tipo A · margens coevas · Neoarqueano · ca. 2,76–2,65 Ga

Resumo

O capítulo anterior entregou uma bacia extensional aberta entre 2,76 e 2,73 Ga sobre a sutura de Carajás, com manto hidratado embaixo e uma descarga térmica capaz de ligar a base da crosta à superfície. Aqui a pergunta muda. Já sabemos como o recipiente foi forjado. Falta entender como esse recipiente fabricou uma das maiores acumulações de ferro do planeta.

A resposta exige uma cadeia inteira. Fontes máficas e hidrotermais carregam ferro e sílica para a água profunda. Terras emersas, cinza vulcânica e rios entregam fósforo, enxofre e elementos-traço à superfície. A geometria da bacia separa os dois reservatórios e aumenta o tempo que a água fica guardada. A zona fótica organiza a frente onde o ferro dissolvido vira ferro sólido. Soterramento, metamorfismo, fluidos tardios e intemperismo transformam o precipitado em minério. Cada elo é conhecido; a escala gigante vem da coincidência de todos.

Carajás faz parte de uma família de bacias formadas entre 2,76 e 2,65 Ga. Kostomuksha, na Carélia russa, produziu outro BIF gigante quase na mesma janela, e serve de gêmeo e de controle. Abitibi e Wawa, no Canadá, concentraram sulfetos em caldeiras permeáveis. Yilgarn, na Austrália, favoreceu níquel e, depois, ouro. Rio das Velhas, em Minas Gerais, guardou pouco ferro e concentrou ouro quando a bacia fechou. Os ingredientes se repetem; a arquitetura decide se eles serão espalhados numa plataforma ferrífera, focalizados num conduto sulfetado, capturados por um magma ou reutilizados por falhas muito depois.

1. O jaspilito na mão

Pegue uma amostra de jaspilito de Carajás. É uma rocha listrada, pesada para o tamanho, com faixas de milímetros a centímetros que alternam vermelho e preto. O vermelho é sílica, um chert tingido por partículas finas de hematita. O preto é óxido de ferro, hematita e magnetita, a mesma magnetita do capítulo 1, que faz a amostra puxar a agulha de uma bússola. Cada faixa é um pulso. A rocha inteira é um

arquivo de pulsos, e a pergunta deste capítulo é o que os produziu.

Jaspilito é o nome local de uma classe de rocha que a literatura chama de formação ferrífera bandada, ou BIF, da sigla em inglês. BIFs são sedimentos químicos. Não foram carregados por rios como areia. Precipitaram da água do mar, camada a camada, num tempo em que o oceano carregava ferro dissolvido. Hoje isso é impossível, porque o oxigênio da atmosfera oxida o ferro e o retira da água em horas. No Arqueano, o oceano ferruginoso do capítulo 3 guardava ferro em solução por tempo suficiente para que ele viajasse, se acumulasse e, no lugar certo, precipitasse em escala de província.

A escala é o problema. Formações ferríferas dentro de sucessões vulcânicas arqueanas costumam receber o rótulo Algoma, de um distrito canadense. Em sua expressão comum, são lentes de dezenas de metros, descontínuas, próximas de centros vulcânicos e hidrotermais. Carajás e Kostomuksha quebram esse padrão. Seus distritos contêm bilhões de toneladas de ferro em intervalos de centenas de metros de espessura, repetidos e extensos por dezenas de quilômetros. Basalto, komatiito e água hidrotermal explicam a entrada de ferro e sílica. A escala regional exige mais. Exige um volume de água capaz de receber milhares de pulsos, guardar o ferro abaixo da frente de oxidação e devolvê-lo à superfície sem perder o reservatório inteiro a cada evento.

Há ainda uma segunda família, mais jovem, que vale apresentar desde já para não confundir as duas. Por volta de 2,5 Ga, grandes formações ferríferas se depositaram em plataformas de margem passiva, sem vulcanismo por perto, na Austrália, na África do Sul e em Minas Gerais, onde a Formação Cauê é o exemplo. São os BIFs do tipo Superior, de outro distrito canadense. Pertencem a outra configuração tectônica e a outro estado do oceano, na antessala do Grande Evento de Oxidação. Carajás e Kostomuksha fizeram, em bacias vulcânicas e duzentos milhões de anos antes, o que as plataformas fariam depois em escala continental. Foram reatores precoces.

2. Seis condições para um reator

A tonelagem de um depósito integra quatro coisas. O fluxo de material que entra, a duração do processo, o volume de água processado e a eficiência com que o produto é preservado. Um conduto hidrotermal entrega muito ferro num instante e pode deixar apenas uma crosta de exalação no fundo. Uma bacia aberta demais exporta o fluido para o oceano. Uma caldeira permeável canaliza descarga quente, cobre, zinco e enxofre para um depósito de sulfeto. Uma bacia estratificada, parcialmente fechada e abastecida por muito tempo acumula $Fe^{2}\square$ em profundidade e o devolve à luz em pulsos. O tamanho está na soma dos ciclos e na área percorrida por essa frente.

Duas palavras técnicas resumem o que uma bacia precisa ter, e ambas cabem numa banheira. Acomodação é o espaço disponível para encher. Uma bacia que afunda enquanto recebe sedimento cria acomodação continuamente; uma que para de afundar logo transborda. Tempo de residência é quanto tempo a água fica dentro antes de ser trocada. Numa banheira com a torneira aberta e o ralo fechado, a água fica muito tempo e se concentra no que a torneira traz. Com o ralo aberto, ela passa e leva tudo embora. Soleiras, altos de embasamento, ilhas e plataformas são os ralos meio fechados de uma bacia marinha.

Seis condições precisam coincidir para um BIF gigante. Uma fonte persistente de ferro e sílica. Acomodação suficiente para manter a bacia durante milhões de anos. Uma barreira física ou química que prolongue o tempo de residência da água profunda. Uma interface entre água reduzida e água iluminada, a quimioclina do capítulo 3, que alcance a luz. Um fluxo de enxofre e de nutrientes capaz de sustentar o metabolismo sem converter toda a coluna em água sulfetada. E uma história de soterramento e enriquecimento que conserve o produto. Cada condição aparece isoladamente em muitos cinturões de rochas verdes. Carajás e Kostomuksha reuniram o conjunto.

Uma dessas condições merece mais uma palavra, porque ela vai e volta neste capítulo. O magmatismo félsico. Em Carajás, granitoides e rochas vulcânicas evoluídas de 2,76 a 2,68 Ga registram fusão da crosta

inferior sob fluxo térmico alto, e muitos pertencem a uma classe que a literatura chama de tipo A, granitos ricos em ferro e pobres em água, que só se formam quando a base da crosta é aquecida com força, tipicamente em extensão (Feio et al., 2012; Dall'Agnol et al., 2017). O tipo A é a impressão digital do motor térmico. Mas o félsico também trabalha na superfície. Erupções subaéreas ou rasas dispersam vidro, cinza, dióxido de enxofre e elementos-traço; superfícies félsicas expostas ampliam o intemperismo e o aporte fluvial. Em Kostomuksha, riolitos de afinidade de arco cumprem parte da mesma função ambiental por outra petrogênese. A biosfera não lê o rótulo do granito. Responde ao material lançado na água.

3. O código de barras de 2,76 a 2,65 Ga

Este livro usa com frequência uma ferramenta que convém apresentar com calma, porque ela organiza todos os capítulos seguintes. Um bloco de crosta guarda os eventos que sofreu como idades medidas em minerais, sobretudo em zircão. Alinhe essas idades numa escala de tempo e cada evento vira uma linha, mais grossa quanto mais volumoso, mais fina quanto mais breve. O resultado parece um código de barras, e é assim que o chamo. Dois blocos que viveram juntos têm barras iguais. Dois blocos que nunca se encontraram têm barras diferentes. O código de barras é a certidão de cada cráton, e a comparação de códigos é a base de toda reconstrução.

A expressão 2,7 Ga comprime processos tectônicos opostos dentro da mesma etiqueta, e o código serve justamente para descomprimi-la. A resolução atual das idades U-Pb separa construção crustal, extensão, deposição, fechamento e mineralização por intervalos de poucos a dezenas de milhões de anos. Um granito mais jovem pode cortar a bacia e parecer parte de sua origem; uma falha aurífera pode reativar a estrutura que antes controlou o vulcanismo; um BIF de plataforma de 2,5 Ga pertence a outro mundo tectônico. Idade, posição na pilha e relação de corte vêm antes da semelhança entre rochas.

Entre 2,80 e 2,77 Ga, vários crátons prepararam a janela neoarqueana.

Em Carajás, os domínios Rio Maria e Sapucaia e a crosta do Complexo Xingu já carregavam a história longa de diferenciação dos capítulos 3 e 4. Na Carélia, núcleos mesoarqueanos e cinturões de rochas verdes preexistentes forneciam embasamento e detrito. Uma bacia instalada junto dessa crosta madura recebe margem emersa, superfícies intemperizadas e uma subsidência diferente da de um arco oceânico efêmero.

A primeira barra crítica vai de 2,76 a 2,73 Ga. Um riolito do Grupo Grão Pará cristalizou por volta de 2.759 Ma; basaltos da Formação Parauapebas registram idades próximas de 2.745 Ma; tufos e unidades associadas colocam o BIF da Formação Carajás em torno de 2,74 Ga. Luanga e os outros corpos acamadados do capítulo 2 pertencem à mesma descarga. Granitos e charnockitos, entre eles Planalto e Estrela, foram alojados entre 2,75 e 2,68 Ga e incluem as assinaturas de tipo A (Feio et al., 2012; Dall'Agnol et al., 2017; Martins et al., 2017). A barra reúne extensão, magmatismo do manto, fusão da crosta, acomodação e deposição de ferro no mesmo intervalo. É o reator ligando.

Kostomuksha ocupa praticamente a mesma barra. Os BIFs do Grupo Gimoly formaram-se por volta de 2,76 a 2,74 Ga. Metarriolitos em soleiras e diques fornecem idades de 2.759 a 2.743 Ma; zircões das metagrauvacas intercaladas ao BIF concentram-se perto de 2.753 Ma e se ligam aos riolitos por forma e química (Slabunov et al., 2021). A bacia recebia material félsico enquanto o ferro sedimentava. As reconstruções variam entre arco, retroarco e prisma acrescionário, sempre numa margem sobre subducção, junto de crosta mais antiga.

Entre 2,73 e 2,65 Ga, o registro se amplia e muda de produto. Abitibi e Wawa constroem ciclos vulcânicos, caldeiras e bacias entre arcos, e o conjunto é rico em sulfetos maciços (Jackson e Cruden, 1995; Ayer et al., 2002). Rio das Velhas passa do vulcanismo félsico de 2.772 Ma à intrusão de granitoides entre 2.712 e 2.698 Ma e ao ouro principal entre 2.698 e 2.670 Ma (Lobato et al., 2001; Baltazar e Lobato, 2020). No Yilgarn, magmatismo de arco se sobrepõe a komatiitos e basaltos, e a deformação posterior concentra ouro (Witt et al., 2020). Yellowknife registra máficos de 2,72 a 2,70 Ga, félsicos de 2,67 a 2,66 Ga e mineralização tardia (Cousens et al., 2002). A sucessão das barras mostra

duas etapas metalogenéticas recorrentes. Extensão e descarga magmática e hidrotermal durante a bacia; ouro e parte dos grandes sistemas hidrotermais durante a inversão, a sutura e a reativação.

O pulso de 2,51 a 2,45 Ga fica em outra linha, a das plataformas da seção 1. A idade quase idêntica de Carajás e Kostomuksha registra oportunidade global, talvez ligada a uma reorganização do fluxo do manto e das redes de subducção (Barley et al., 2005). Faltam continuidade estratigráfica, paleomagnetismo e reconstrução paleogeográfica para uni-los numa única bacia. Eles valem mais como experimentos independentes sob a mesma atmosfera sem oxigênio e sobre oceanos regionalmente ferruginosos.

4. O recipiente

O reator ferrífero vive de uma combinação estreita. Precisa acomodar uma coluna química espessa e conservar água profunda rica em $Fe^{2}\square$. Precisa trazer esse reservatório até uma zona iluminada. Calor e fluidos entram por baixo; lava e detrito vulcânico deixam espaço para intervalos em que a sedimentação química domina. A conexão com o oceano renova água e nutrientes, enquanto soleiras e altos limitam a troca profunda. A margem permanece tectonicamente ativa e, ao mesmo tempo, oferece superfícies estáveis entre um pulso e outro. Golfos, plataformas vulcânicas, bacias de retroarco e riftes sobre crosta madura conseguem reunir essas condições.

Carajás recebeu esse arranjo como bacia extensional, e o capítulo 4 contou como. A sutura larga, a placa rasa que hidratou o manto, a ruptura de 2,76 Ga e as estruturas verticais que alojaram basaltos, corpos acamadados e granitoides. Entre 2,76 e 2,73 Ga a bacia está abrindo, e a arquitetura é a de um rifte, com falhas normais, subsidência, enxames de diques, vulcanismo volumoso e magma acrescentado à base da crosta. A assinatura de arco que parte dos basaltos carrega pertence à história da fonte, como o capítulo 4 explicou, e sobrevive ao regime extensional em que o magma finalmente sobe. A expressão que uso para essa herança, retroarco sem arco, nomeia a genealogia, desde que o ambi-

ente deposicional continue sendo descrito como extensional. Os níveis de confiança já se separam aqui. São dados a pilha basáltica, o vulcanismo félsico, as intrusões acamadadas, os granitoides, a acomodação e a cronologia. A ruptura da placa é um modelo publicado. A placa rasa anterior é inferência deste livro.

Kostomuksha monta um reator parecido por uma rota mais convencional. Extensão de retroarco gera acomodação e calor junto de crosta mesoarqueana; basaltos e komatiitos fornecem ferro, sílica e energia hidrotermal; riolitos distribuem cinza e detrito; o bloco antigo ao lado oferece relevo e estabilidade. A categoria arco é insuficiente para descrevê-la. Arco oceânico estreito, arco continental, retroarco rifteado e bacia marginal têm profundidades, fontes e tempos de residência diferentes. Kostomuksha chega à escala gigante porque combina a atividade de margem com o volume e a duração de um grande depocentro.

Abitibi e Rio das Velhas mostram o que muda quando a arquitetura muda. No Abitibi, caldeiras, falhas contemporâneas ao vulcanismo e uma pilha permeável canalizam a descarga quente e focalizam sulfetos. Em Rio das Velhas, a sucessão foi mais clástica, instalada sobre crosta continental e invertida depressa; o ferro químico aparece em escala menor, enquanto a estrutura posterior concentra ouro. A tectônica seleciona o minério por meio de geometria, permeabilidade, duração e preservação. O nome do ambiente, isolado, perde justamente os controles que importam.

5. O que a terra emersa manda para o mar

O reator começa fora da água. Entre 3,0 e 2,7 Ga, cresceu a área de terrenos expostos à atmosfera (Liu e He, 2021). Eram arcos compostos, platôs vulcânicos, núcleos cratônicos rasos e ilhas félsicas, bem diferentes dos continentes modernos. A emersão bastava para transferir rocha do circuito hidrotermal para o circuito da chuva e dos rios. Chuva, CO□, dióxido de enxofre, ácidos produzidos por micro-organismos e variação de temperatura atacavam vidro e minerais. Rios, correntes costeiras e queda de cinza levavam o produto para a margem.

A atmosfera sem oxigênio prolongava a mobilidade do Fe²□. CO□ elevado e gases vulcânicos acidificavam a água da chuva e aceleravam a dissolução de silicatos e de apatita, o mineral que guarda o fósforo das rochas. Basaltos e komatiitos forneciam ferro, magnésio, cálcio, níquel, cobalto, sílica e fósforo. Félsicos acrescentavam potássio, sódio, alumínio, fósforo, rubídio, bário, zircônio, vidro e feldspato reativos. A acidez fazia o trabalho de extração e transporte. Mais adiante, a mistura com água do mar, a reação com basalto e carbonato e o consumo biológico de CO□ elevavam o pH e preparavam a precipitação.

O fósforo liga emersão e produtividade, e é o nutriente que decide quanta vida a bacia sustenta. Modelos de intemperismo preveem aumento do fluxo fluvial de fósforo durante o crescimento das terras subaéreas, e cinza fresca pode liberar fosfato em pulsos rápidos (Hao et al., 2020a, 2020b). O próprio ferro limita a fertilização, porque hidróxidos férricos adsorvem fosfato com enorme eficiência e o arrastam para o fundo. Dados da Formação Carajás sustentam, para a água do mar arqueana, concentrações médias próximas de 0,063 micromolar (Rego et al., 2023). O oceano profundo moderno tem cerca de 2 micromolar. Trinta vezes mais. A produtividade arqueana era, portanto, pulsada. O fósforo entrava perto da margem ou da pluma de cinza, estimulava biomassa, aderia às partículas de ferro e afundava; a redução do ferro no sedimento devolvia parte do nutriente à água do fundo.

O enxofre percorre mais de uma rota. Magmas máficos carregam grande inventário de enxofre e alimentam o sistema hidrotermal. Erupções félsicas subaéreas ampliam a dispersão porque lançam dióxido de enxofre, aerossóis e cinza a grande altura, e a química fotoquímica do capítulo 3 faz o resto, produzindo sulfato, sulfito e enxofre elementar com a assinatura independente de massa. Rochas de 3,2 Ga da África do Sul registram mudanças na química atmosférica do enxofre ligadas a vulcanismo félsico subaéreo; baritas e sulfetos arqueanos preservam misturas atmosféricas, marinhas e magmáticas (Philippot et al., 2012; Müller et al., 2016). Uma bacia pode receber esse enxofre a centenas de quilômetros da fonte eruptiva.

Um tufo dentro do BIF registra tempo e perturbação. Além da idade,

guarda a chegada de vidro reativo, fósforo, metais-traço e diferentes espécies de enxofre. A chuva e a superfície do mar podem se acidificar por um intervalo; a turbidez desloca a profundidade iluminada; o intemperismo da cinza libera solutos depois. Grandes erupções sombreiam a água. Pulsos menores e repetidos fertilizam e reorganizam a coluna. A hipótese pede correlação entre pacotes de cinza, traçadores do continente, isótopos de enxofre e mudanças nas faixas do jaspilito. Dispensa uma erupção para cada banda.

Dois elementos servem de rastreadores dessa transferência, e vale dizer por quê. O rubídio acompanha o potássio, e portanto o vidro félsico, a argila e a alteração potássica. O bário pode vir com o material félsico, precipitar como barita ou seguir fluidos hidrotermais e o ciclo do sulfato. Um valor isolado diz pouco. Perfis camada a camada, combinando rubídio, potássio, bário, zircônio, tório, alumínio, terras raras, mineralogia e isótopos, podem separar cinza, detrito, alteração e precipitação química. A previsão útil é estratigráfica. Pulsos de material vulcânico ou continental devem anteceder ou acompanhar mudanças mensuráveis na fácies ferrífera e na química do enxofre.

No fundo, o componente máfico mantém a torneira principal. Água do mar circula por basaltos, gabros e intrusões quentes, lixivia ferro e sílica e retorna reduzida à bacia. Parte precipita perto das bocas; parte viaja como Fe^{2}□, complexos ou nanopartículas. O oceano sem oxigênio prolonga esse transporte. Uma bacia restrita soma milhares de pulsos e armazena o ferro abaixo da quimioclina. A cadeia fica completa. A tectônica eleva e abre; o vulcanismo lança lava, cinza e gases; o intemperismo extrai; rios e atmosfera entregam; o hidrotermalismo alimenta a profundidade; a circulação interna leva o reservatório à luz.

6. A bacia guarda, mistura e filtra

O oceano arqueano tinha gradientes laterais e verticais fortes. Perto das bocas hidrotermais, temperatura, pH e metais variavam em poucos metros. Em profundidade, água sem oxigênio acumulava Fe^{2}□. Acima, luz, produtividade e pequenos oásis de oxigênio criavam outra quí-

mica. Entre os dois ficava a fábrica de partículas, onde oxidação, adsorção, coagulação e sedimentação operavam numa quimioclina móvel. A área e a persistência dessa fábrica determinavam o tamanho do BIF.

Restrição parcial aumenta o tempo de residência, o ralo meio fechado da seção 2. Soleiras, altos de embasamento, ilhas e plataformas limitam a troca profunda com o oceano aberto. Diferenças de salinidade, temperatura e produtividade sustentam interfaces de densidade que impedem a mistura. Ventos, marés, tempestades e movimentos tectônicos rompem ou elevam a interface e injetam Fe^{2}□ na água iluminada. Se a subsidência acompanha a sedimentação, a geometria se recompõe depois de cada pulso. Em Carajás, a grande acomodação vulcânica abriu intervalo suficiente para a química dominar. Em Kostomuksha, a alternância com grauvacas mantém a proximidade do relevo e, ao mesmo tempo, exige um depocentro maior que um campo hidrotermal isolado.

O balanço entre ferro e enxofre é o filtro, e é a regra que decide o que a bacia fabrica. Redutores de sulfato, sulfito e enxofre elementar produzem sulfeto, H□S ou HS□. O Fe^{2}□ captura o sulfeto como monossulfeto e, depois, como pirita, e o retira da água.

Fe^{2}□ + HS□ → FeS → FeS□

Enquanto a renovação do ferro supera a produção de sulfeto, a água profunda permanece ferruginosa e pobre em sulfeto livre, e o ferro excedente alcança a frente iluminada. Quando enxofre oxidado e matéria orgânica sustentam produção de sulfeto acima do ferro reativo, instala-se a euxinia, o estado de água com sulfeto livre, e o metal é retirado antes de chegar à luz. A deposição migra então para pirita e sedimentos sulfetados. Imagine duas torneiras despejando reagentes num mesmo ralo. Enquanto chega mais ferro do que sulfeto, o sulfeto é capturado no ponto de encontro e ainda sobra ferro para subir até a luz. Quando a produção de sulfeto supera a renovação do ferro, o filtro se inverte. O ferro é retirado antes de chegar à luz, muda a química da água e muda o sedimento produzido (Canfield, 1999; Reinhard et al., 2009).

BIF e VMS ocupam posições diferentes nesse balanço, e aqui entra o segundo tipo de depósito do capítulo. VMS é a sigla de sulfeto maciço vulcanogênico. O análogo moderno é visível em filme. São as fumarolas negras do fundo do mar, chaminés de onde sai água a trezentos e cinquenta graus carregada de ferro, cobre, zinco e enxofre, que precipita sulfetos ao encontrar a água fria (Hannington et al., 2005, 2011). Um sistema VMS entrega metais e enxofre juntos, em descarga quente e focalizada, e o depósito fica junto do conduto. O BIF depende do contrário, do desacoplamento entre ferro e enxofre no espaço ou no tempo. O ferro se dispersa, permanece em solução e precipita numa frente regional. Uma mesma bacia pode ter sulfetos perto das bocas e formação ferrífera longe delas. Qingyuan, no norte da China, com cerca de 2,55 Ga, registra essa zonação, com BIF associado a hidrotermalismo difuso e VMS concentrado onde a extensão foi máxima (Peng et al., 2022).

O lago Matano, apresentado no capítulo 3, mostra a plausibilidade ecológica do filtro. Pouco sulfato sustenta redução microbiana intensa; o ferro remove o sulfeto produzido; a água profunda conserva ferro; a transparência leva luz a mais de cem metros e sustenta fotoferrotrofia (Crowe et al., 2008). Em Kostomuksha e em Temagami, no Canadá, os isótopos de enxofre acrescentam a prova geológica. Enxofre atmosférico e marinho foi processado por micro-organismos dentro de sistemas cujo ferro permanecia majoritariamente hidrotermal (Diekrup et al., 2018; Vysotskiy et al., 2023).

7. A zona fótica trabalha

A palavra algas esconde a ecologia que interessa. O reator abriga bactérias e arqueias com metabolismos acoplados. Fotoferrotrofos, que oxidam Fe²□ com luz pela equação do capítulo 3; cianobactérias, que produzem oxigênio; oxidadores que vivem de traços de oxigênio; redutores de ferro férrico; redutores das espécies de enxofre; fermentadores; produtores de metano. Reações sem vida também precipitam ferro. A vida organiza a posição das interfaces, a disponibilidade de doadores e aceptores de elétrons, o retorno dos nutrientes e a quantidade de ma-

téria orgânica que chega ao sedimento.

A fotoferrotrofia liga luz e ferro diretamente. Os produtos hidrolisam, agregam, adsorvem fósforo e carbono e afundam. Experimentos, modelos e análogos mostram fluxos compatíveis com parte importante da deposição de BIF (Thompson et al., 2019). A exigência de luz põe a fábrica na zona fótica, onde ressurgência, mistura ou migração da quimioclina entregam o Fe^{2}□ guardado embaixo.

As cianobactérias oferecem a rota complementar. Tapetes ou populações flutuantes podiam produzir oxigênio localmente muito antes de ele se acumular na atmosfera. O gás era consumido quase no ponto de origem pelo ferro e por outros redutores. A participação relativa de cada grupo em 2,75 Ga continua debatida. O modelo funciona com mosaicos. Fotoferrotrofia nas águas ferruginosas, oásis de oxigênio em superfícies produtivas e nichos de baixo oxigênio na transição. O capítulo 7 volta a essa competição.

A descida das partículas inverte o ciclo. Matéria orgânica associada aos precipitados alimenta redutores de ferro férrico, que devolvem Fe^{2}□ à água dos poros e favorecem magnetita, siderita, greenalita e outras fases formadas no sedimento. Redutores de enxofre produzem sulfeto e pirita. Fermentação e produção de metano ocupam os níveis em que os aceptores mais energéticos se esgotam. O fósforo adsorvido retorna à água intersticial e pode alimentar nova produtividade. A biomassa criada na luz continua trabalhando depois de soterrada e conecta BIF, metano, clima e atmosfera (Konhauser et al., 2017; Dreher et al., 2021).

O sistema responde com atraso, e esse atraso tem nome. Uma cinza rica em nutrientes primeiro aumenta a produtividade e a oxidação; depois aumenta a respiração e a redução de enxofre. Um pulso hidrotermal de ferro restaura condições ferruginosas ao capturar o sulfeto. Uma queda prolongada no ferro permite que o sulfeto se acumule. Chama-se histerese a propriedade de um sistema cujo estado depende do caminho percorrido, e não só das condições do momento. Condições químicas iguais podem levar a resultados diferentes conforme a direção do ciclo. Bandas de óxido, carbonato, silicato, pirita e chert podem guardar

parte dessas oscilações, embora o soterramento e o metamorfismo tenham refeito a mineralogia original.

O material primário variava. Hidróxidos férricos podem resultar de oxidação biológica ou não. Um hidróxido misto de ferro ferroso e férrico, verde e instável, chamado green rust, se forma em meios sem oxigênio; greenalita, um silicato de ferro, precipita em água rica em Fe^{2}□ e sílica; siderita, o carbonato de ferro, cresce em ambientes carbonáticos e durante o soterramento. Experimentos permitem até que hidróxido ferroso se desproporcione, produzindo ferro férrico, ferro metálico, hidrogênio e green rust (Dodd et al., 2022). Lâminas vizinhas podem ter começado com conjuntos minerais diferentes. O traço comum é a transferência repetida de ferro entre estados de oxidação e fases minerais, a troca de elétrons que o capítulo 1 anunciou.

Compactação, redução microbiana e recristalização transformam o precipitado. A magnetita nasce da reação entre Fe^{2}□ e Fe^{3}□; a siderita incorpora carbono; a pirita fixa sulfeto; a sílica vira chert. O bandamento combina escalas. Lâminas milimétricas podem registrar produtividade, ressurgência, marés ou diagênese; pacotes de metros a dezenas de metros respondem a subsidência, vulcanismo e circulação da bacia. Ler cada banda como um ano empobrece um arquivo construído por ritmos diferentes.

BIF e minério de alto teor pertencem a etapas diferentes, e a distinção importa para quem lê a serra de hoje. O jaspilito original alterna ferro e sílica em proporções perto de meio a meio. O minério que se lavra em Carajás passa de 65 por cento de ferro porque a sílica foi removida, muito depois, por fluidos, deformação e intemperismo. A tonelagem guarda o funcionamento da bacia; o teor e a forma econômica guardam a história posterior. IOCG e ouro entram ainda mais tarde, e o capítulo 6 começa por eles. Kostomuksha formou BIF gigante sem repetir essa especialização e funciona como controle natural.

8. Carajás e Kostomuksha, convergência funcional

A comparação começa pelo observável. Os dois distritos contêm BIFs gigantes em sucessões vulcanossedimentares de 2,76 a 2,74 Ga. Ambos registram félsicos contemporâneos, componente máfico e circulação hidrotermal. Ambos se instalaram junto de crosta arqueana preexistente e receberam material sedimentar ou vulcanoclástico. Atmosfera sem oxigênio, transporte fotoquímico de enxofre e ecossistemas capazes de processar ferro, enxofre e carbono completavam a condição de fundo. Esse conjunto define uma classe funcional antes de qualquer reconstrução paleogeográfica.

Carajás representa o membro termicamente mais extremo. A Formação Parauapebas registra a pilha basáltica; termos intermediários e félsicos chegam à superfície; intrusões acamadadas e granitoides ligam manto, base da crosta e níveis rasos. A sutura reativada distribui os condutos. Magma acrescentado à base da crosta sustenta hidrotermalismo e fusão crustal. A bacia extensional acumula água ferruginosa enquanto terras emersas e erupções entregam cinza, enxofre e nutrientes. O tipo A funciona como impressão digital desse motor.

Kostomuksha chega ao mesmo resultado por um sistema sobre subducção. Basaltos e komatiitos alimentam o reservatório de ferro. Riolitos de 2.759 a 2.743 Ma e grauvacas derivadas deles demonstram transferência félsica direta para o depocentro. A crosta antiga adjacente fornece relevo e estabilidade. Uma bacia de arco ou retroarco oferece acomodação e circulação com fusão crustal menos intensa e petrogênese félsica distinta. A função converge; a genealogia magmática diverge.

Cinco fatores explicam a escala, e valem como lista de verificação para qualquer bacia da família. Crosta madura aumenta a área emersa e a duração. Magmatismo máfico volumoso sustenta ferro, sílica e calor. Félsicos contemporâneos acrescentam cinza, enxofre dispersável e um marcador da atividade crustal. A bacia ampla e parcialmente restrita separa fonte e frente de precipitação. E o fluxo de ferro excede a produ-

ção de sulfeto durante tempo suficiente. Cada fator aparece em outros terrenos; a tonelagem gigante nasce da coincidência.

A idade compartilhada permanece uma sincronia, não uma ponte geográfica. A hipótese parcimoniosa é convergência funcional, duas margens alcançando soluções semelhantes para o mesmo problema físico. A vida encontrou luz, ferro, enxofre e nutrientes; a tectônica manteve os ingredientes juntos. Esse paralelo permite usar uma bacia como controle da outra. Kostomuksha testa o que sobra do modelo sem tipo A e sem IOCG. Carajás testa o que muda quando o reator se instala sobre uma sutura rompida e recebe uma descarga térmica excepcional.

9. Margens coevas, minérios distintos

O Abitibi mostra que abundância de félsicos e calor não basta para produzir BIF gigante. Sucessivos arcos, retroarcos, caldeiras e falhas contemporâneas ao vulcanismo canalizaram água do mar pela pilha. O fluido reagiu com máficos e félsicos, adquiriu ferro, cobre, zinco e enxofre e voltou ao fundo em descargas concentradas. Enxofre magmático, lixiviação das vulcânicas e redução do sulfato marinho alimentaram sulfetos maciços (Hannington et al., 2010). A segmentação do relevo, a permeabilidade e o alto aporte vulcanoclástico reduziram a área e o tempo disponíveis para uma frente ferrífera regional. Crostas de exalação e BIFs menores ocupam as porções distantes. Quando o Abitibi fechou, grandes zonas de deformação passaram a conduzir fluidos metamórficos e ouro. A sequência importa. VMS acompanha extensão e vulcanismo; ouro acompanha acresção, inversão e metamorfismo. A falha aurífera tardia reutiliza o conduto antigo sem transformar retroativamente a bacia vulcânica.

Wawa oferece um controle dentro da própria margem. Em torno de 2,72 Ga, Manitouwadge concentra VMS em ambiente de arco rifteado, enquanto Shebandowan e setores vizinhos registram maior influência do manto, níquel-cobre e ouro. Geometria, espessura crustal e encanamento magmático distribuem os sistemas minerais ao longo de terrenos da mesma idade (Lodge et al., 2015). Ingredientes regionais seme-

lhantes atravessam encanamentos diferentes.

Rio das Velhas combina máficos-ultramáficos, félsicos, sedimentos e alteração hidrotermal. Sua arquitetura sobre crosta continental e a deformação intensa admitem modelos de arco e retroarco. O ferro químico permaneceu subordinado, talvez por diluição por sedimento terrígeno, curta estabilidade do depocentro e fechamento rápido. O ouro principal chegou durante a convergência e a reativação estrutural. O BIF gigante do Supergrupo Minas, logo ao lado, pertence à plataforma de 2,51 a 2,45 Ga. No mesmo embasamento regional, o cinturão de rochas verdes e a plataforma registram duas idades, duas geometrias e duas metalogêneses.

O Yilgarn justapõe magmatismo de arco, komatiitos, basaltos e bacias posteriores. Komatiitos muito quentes alimentam sistemas magmáticos de níquel-cobre; a reorganização estrutural concentra ouro. Yellowknife separa no tempo a fase máfica de 2,72 a 2,70 Ga e a félsica de 2,67 a 2,66 Ga; a menor sobreposição dos fluxos ajuda a explicar a expressão ferrífera e vulcanogênica mais modesta. Em ambos, o volume de magma por si só perde para sincronia, restrição e permanência da bacia.

Surge uma família de margens, e não um evento tectônico único. Carajás usa extensão sobre sutura e ruptura de placa para produzir BIF gigante e, mais tarde, IOCG. Kostomuksha usa bacia sobre subducção junto de crosta antiga e produz BIF gigante sem a mesma cauda hidrotermal. Abitibi e Manitouwadge focalizam VMS. Shebandowan e Yilgarn favorecem níquel-cobre. Rio das Velhas, Yellowknife, Abitibi e Yilgarn concentram ouro durante o fechamento. O mapa metalogenético é um mapa de geometria, permeabilidade, duração e preservação.

10. O modelo e seus riscos

A sequência causal cabe em cinco movimentos. Primeiro, subducção, colisão e anomalias do manto reorganizam a litosfera e abrem depocentros sobre crosta madura; falhas profundas alimentam basaltos, gabros

e intrusões máfico-ultramáficas; magma na base da crosta e hidratação geram os magmas intermediários e félsicos. Segundo, o hidrotermalismo entrega Fe²□ e sílica em profundidade, enquanto intemperismo, rios, cinza e atmosfera levam fósforo, enxofre e elementos-traço à superfície. Terceiro, a geometria separa os fluxos, guarda ferro abaixo da quimioclina e eleva o tempo de residência. Quarto, a circulação interna leva Fe²□ à luz, fotoferrotrofos oxidam ferro e fixam carbono, oásis de oxigênio completam a frente, redutores de ferro e enxofre reciclam minerais e matéria orgânica, e o ferro excedente mantém baixo o sulfeto livre. Quinto, partículas de hidróxido, green rust, silicatos e carbonatos descem, reagem e recristalizam. A repetição cria o BIF. Metamorfismo, fluidos tardios e intemperismo selecionam o minério de alto teor.

O modelo contém duas janelas, e as duas têm número. Na janela do enxofre, um inventário muito baixo limita parte da reciclagem metabólica; um inventário moderado sustenta o ciclo ferro-enxofre enquanto o ferro captura o sulfeto; abundância de enxofre reativo e matéria orgânica empurra a bacia para pirita e euxinia. O sulfato arqueano abaixo de 2,5 micromolar, do capítulo 3, está do lado baixo dessa janela. Na janela da acidez, CO□ e dióxido de enxofre aceleram extração e transporte, mas a precipitação ocupa a frente neutralizada onde o Fe²□ encontra luz ou oxidantes. O tipo A também muda de lugar entre bacias. Em Carajás ele marca fluxo térmico, fusão profunda e extensão. Outros reatores entregam cinza e enxofre com félsicos de arco.

Os processos isolados têm precedentes sólidos. A literatura já liga BIF a manto, tectônica, oceano e biosfera; demonstra fotoferrotrofia, redução de enxofre, transporte atmosférico, intemperismo de fósforo e rotas não biológicas de oxidação; e mostra a zonação entre BIF e VMS em bacias extensionais (Bekker et al., 2010; Konhauser et al., 2017; Peng et al., 2022). A contribuição específica deste capítulo está na montagem. Tratar as bacias de 2,76 a 2,65 Ga como reatores da mesma geração, usar Carajás e Kostomuksha como convergência funcional e derivar BIF, VMS, níquel, ouro e IOCG do acoplamento entre arquitetura, fluxo, enxofre, tempo de residência, metabolismo e história posterior.

A hipótese corre riscos claros, e eles são o teste. Em Carajás, níveis de

cinza e pulsos félsicos dentro do BIF devem acompanhar mudanças em rubídio, potássio, zircônio, tório, bário, isótopos de enxofre, fósforo e fácies ferrífera. Perfis laterais devem separar fonte máfica hidrotermal, setores próximos mais sulfetados e plataforma ferrífera distante. A cadeia placa rasa e ruptura prevê hiato ou migração de arco antes da abertura, aquecimento rápido, conexão estrutural entre intrusões e bacia e uma fonte do manto previamente hidratada. Kostomuksha deve conservar o elo entre detrito riolítico, enxofre atmosférico e expansão do BIF com assinatura de margem mais convencional. O Abitibi deve colocar VMS na descarga focalizada e BIFs menores nas posições distantes.

11. Níveis de confiança

São evidência as idades contemporâneas ao BIF em Carajás e Kostomuksha; a coexistência de componentes máficos e félsicos; a arquitetura extensional de Carajás entre 2,76 e 2,73 Ga; intrusões máfico-ultramáficas e granitoides da mesma idade; a transferência de material riolítico para a bacia de Kostomuksha; as assinaturas atmosféricas, marinhas, magmáticas e microbianas de enxofre; a capacidade do ferro férrico de adsorver fósforo; e a separação temporal entre sedimentação, fechamento e enriquecimento mineral.

São modelos publicados a ruptura de placa na abertura de Carajás; bacias sobre subducção para Kostomuksha; fotoferrotrofia e oásis locais de oxigênio; captura de sulfeto em águas ferruginosas; circulação hidrotermal máfica como fonte de ferro e sílica; intemperismo continental como fluxo de fósforo; e zonação entre BIF e VMS em sistemas extensionais.

São hipóteses deste livro a placa rasa anterior em Carajás; a expressão retroarco sem arco para sua herança litosférica; a janela ferro-enxofre como controle da escala gigante; e a comparação causal entre os reatores de 2,76 a 2,65 Ga. O teste exige códigos de barras padronizados com idade, estratigrafia, estruturas, traçadores de cinza, microfácies e isótopos de ferro, enxofre e carbono.

Conclusão

Carajás e Kostomuksha são realizações precoces de um reator que se tornaria comum nas plataformas ferríferas de 2,51 a 2,45 Ga. Em 2,76 a 2,74 Ga, bacias vulcanossedimentares já conseguiam acumular ferro hidrotermal em profundidade, manter a estratificação e alimentar uma frente iluminada por tempo suficiente para construir depósitos gigantes. A sincronia registra uma oportunidade planetária. A escala veio da coincidência entre crosta madura, acomodação ampla, magmatismo persistente, aporte félsico, restrição hidrológica, metabolismo e balanço entre ferro e enxofre.

Em Carajás, essa coincidência nasce da descarga que encerrou o capítulo anterior. A sutura abriu, o manto hidratado fundiu, basaltos e corpos acamadados subiram, a base da crosta gerou félsicos e granitos de tipo A, e a bacia guardou o resultado. A arquitetura é extensional; a memória de subducção pertence à fonte. O tipo A revela o motor térmico e deixa de carregar sozinho uma explicação biológica que nunca lhe pertenceu.

O percurso termina na luz. Rocha emersa vira soluto e cinza; basalto submerso vira fluido ferruginoso; a bacia separa profundidade e superfície; a quimioclina põe ferro, enxofre, carbono e micro-organismos em contato; o sedimento guarda uma imagem transformada dessa atividade. Depois, tectônica e intemperismo escrevem outra história sobre o jaspilito e escolhem BIF preservado, minério de alto teor, VMS, ouro ou IOCG. Os depósitos são a memória mineral dos raros intervalos em que fonte, recipiente, atmosfera e vida trabalharam no mesmo ritmo. O capítulo seguinte desce para dentro da crosta e acompanha o que a água fez com esse recipiente nos trezentos milhões de anos seguintes.

Referências

Ayer, J. et al. (2002). Evolution of the southern Abitibi greenstone belt based on U–Pb geochronology: Autochthonous volcanic construction followed by plutonism, regional deformation and sedimentation.

Precambrian Research, 115, 63–95. https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00006-2

Baltazar, O. F.; Lobato, L. M. (2020). Structural evolution of the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Minerals, 10, 983. https://doi.org/10.3390/min10110983

Barley, M. E.; Bekker, A.; Krapež, B. (2005). Late Archean to Early Paleoproterozoic global tectonics, environmental change and the rise of atmospheric oxygen. Earth and Planetary Science Letters, 238, 156–171. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.062

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. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.467

Canfield, D. E. (1999). The evolution of the sulfur cycle. American Journal of Science, 299, 697–723. https://doi.org/10.2475/ajs.299.7-9.697

Cousens, B.; Facey, K.; Falck, H. (2002). Geochemistry of the late Archean Banting Group, Yellowknife greenstone belt, Slave Province, Canada: Simultaneous melting of the upper mantle and juvenile mafic crust. Canadian Journal of Earth Sciences, 39, 1635–1656. https://doi.org/10.1139/e02-070

Crowe, S. A. et al. (2008). Photoferrotrophs thrive in an Archean Ocean analogue. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105, 15938–15943. https://doi.org/10.1073/pnas.0805313105

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

Diekrup, D.; Galić, A.; Valaas Hyslop, E.; Johnson, C. M.; Beard, B. L.; Lavoie, D. (2018). Decoupling of Neoarchean sulfur sources recorded

in Algoma-type banded iron formation. Earth and Planetary Science Letters, 489, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.022

Dodd, M. S. et al. (2022). Abiotic anoxic iron oxidation, formation of Archean banded iron formations, and the oxidation of early Earth. Earth and Planetary Science Letters, 584, 117469. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117469

Dreher, C. et al. (2021). Microbial processes during deposition and diagenesis of banded iron formations. PalZ, 95, 593–610. https://doi.org/10.1007/s12542-021-00598-z

Feio, G. R. L. et al. (2012). Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoarchean Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? Lithos, 151, 57–73. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.02.020

Hannington, M. D.; de Ronde, C. E. J.; Petersen, S. (2005). Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems. In: Hedenquist, J. W. et al. (eds.), Economic Geology 100th Anniversary Volume, 111–141.

Hannington, M. D.; Jamieson, J. W.; Monecke, T.; Petersen, S. (2010). The geology and metallogeny of volcanic-hosted massive sulfide deposits: Variations through geologic time and with tectonic setting. Economic Geology, 105, 571–591. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.571

Hannington, M. D.; Jamieson, J.; Monecke, T.; Petersen, S.; Beaulieu, S. (2011). The abundance of seafloor massive sulfide deposits. Geology, 39, 1155–1158. https://doi.org/10.1130/G32468.1

Hao, J. et al. (2020a). Cycling phosphorus on the Archean Earth: Part I. Continental weathering and riverine transport of phosphorus. Geochimica et Cosmochimica Acta, 273, 70–84. https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.01.027

Hao, J. et al. (2020b). Cycling phosphorus on the Archean Earth: Part II. Phosphorus limitation on primary production in Archean ecosystems. Geochimica et Cosmochimica Acta, 280, 360–377. https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.04.005

Huston, D. L.; Logan, G. A. (2004). Barite, BIFs and bugs: Evidence for the evolution of the Earth's early hydrosphere. Earth and Planetary Science Letters, 220, 41–55. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00034-2

Jackson, S. L.; Cruden, A. R. (1995). Formation of the Abitibi greenstone belt by arc–trench migration. Geology, 23, 471–474. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023%3C0471:FOTAGB%3E2.3.CO;2

Konhauser, K. O. et al. (2017). Iron formations: A global record of Neoarchaean to Palaeoproterozoic environmental history. Earth-Science Reviews, 172, 140–177. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Kump, L. R.; Barley, M. E. (2007). Increased subaerial volcanism and the rise of atmospheric oxygen 2.5 billion years ago. Nature, 448, 1033–1036. https://doi.org/10.1038/nature06058

Liu, X.-M.; He, H. (2021). Rise of major subaerial landmasses about 3.0 to 2.7 billion years ago. Geochemical Perspectives Letters, 18, 1–5. https://doi.org/10.7185/geochemlet.2115

Lobato, L. M. et al. (2001). Brazil's premier gold province. Part I: The tectonic, magmatic, and structural setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. Mineralium Deposita, 36, 228–248. https://doi.org/10.1007/s001260100179

Lodge, R. W. D.; Gibson, H. L.; Stott, G. M.; Franklin, J. M.; Hudak, G. J. (2015). Geodynamic setting, crustal architecture, and VMS metallogeny of ca. 2720 Ma greenstone belts of northern Wawa, Superior Province. Canadian Journal of Earth Sciences, 52, 196–214. https://doi.org/10.1139/cjes-2014-0163

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

Müller, É. et al. (2016). Multiple sulfur-isotope signatures in Archean sulfates and their implications for the chemistry and dynamics of the

early atmosphere. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113, 7432–7437. https://doi.org/10.1073/pnas.1520522113

Peng, P. et al. (2022). A Neoarchean VMS-BIF metallogenic system in the Qingyuan greenstone belt, North China Craton. Economic Geology, 117, 1275–1298. https://doi.org/10.5382/econgeo.4920

Philippot, P. et al. (2012). Variations in atmospheric sulphur chemistry on early Earth linked to volcanic activity. Nature Geoscience, 5, 668–674. https://doi.org/10.1038/ngeo1534

Rego, E. S. et al. (2023). Low-phosphorus concentrations and important ferric hydroxide scavenging in Archean seawater. PNAS Nexus, 2, pgad025. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad025

Reinhard, C. T. et al. (2009). A late Archean sulfidic sea stimulated by early oxidative weathering of the continents. Science, 326, 713–716. https://doi.org/10.1126/science.1176711

Rossignol, C. et al. (2023). Neoarchean environments associated with the emplacement of a large igneous province: Insights from the Carajás Basin, Amazonia Craton. Journal of South American Earth Sciences, 130, 104574. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104574

Slabunov, A. I.; Nesterova, N. S.; Egorov, A. V.; Kuleshevich, L. V.; Kevlich, V. I. (2021). Age of the Archean strata with banded iron formation in the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton: Constraints on the geochemistry and geochronology of zircons. Geochemistry International, 59, 341–356. https://doi.org/10.1134/S0016702921040066

Thompson, K. J. et al. (2019). Photoferrotrophy, deposition of banded iron formations, and methane production in Archean oceans. Science Advances, 5, eaav2869. https://doi.org/10.1126/sciadv.aav2869

Vysotskiy, S. V. et al. (2023). Sulfur isotope sources of sulfides of Neoarchean iron deposits of the Kostomuksha Greenstone Belt of Karelia, Russia. Doklady Earth Sciences, 510, 394–399. https://doi.org/10.1134/S1028334X23600299

Witt, W. K. et al. (2020). The tectonic setting and evolution of

the 2.7 Ga Kalgoorlie–Kurnalpi Rift, Yilgarn Craton: An Archean plume-influenced intra-arc rift. Mineralium Deposita, 55, 601–631. https://doi.org/10.1007/s00126-017-0778-9

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.

Capítulo 7. O laboratório ferruginoso

Carajás, fotoferrotrofia e o longo atraso da oxigenação planetária

Modelo de trabalho

Mares ferruginosos restritos podem ter alternado longos períodos dominados por fotoferrotrofia com episódios breves de vantagem para organismos produtores de oxigênio. Carajás e Kostomuksha são dois grandes candidatos neoarqueanos a esse regime. O registro disponível sustenta o cenário químico; a seleção ecológica e sua influência posterior sobre o Grande Evento de Oxidação permanecem hipóteses testáveis deste livro.

Carajás · fotoferrotrofia · cianobactérias · ferro · fósforo · oxigênio · Grande Evento de Oxidação · BIF · Neoarqueano · ca. 2,76–2,42 Ga

Resumo

A fotossíntese que produz oxigênio surgiu muito antes de o oxigênio se acumular na atmosfera. Entre a invenção biológica e o Grande Evento de Oxidação existe um atraso de centenas de milhões de anos que pede mecanismo. Parte da resposta está nos sumidouros químicos. Ferro

dissolvido, gases vulcânicos, matéria orgânica e crosta reduzida consumiam o oxigênio recém-produzido. Outra parte pode ter sido ecológica. Em oceanos ricos em Fe^{2+} e pobres em fósforo, os fotoferrotrofos do capítulo 3 tinham condições para interceptar luz e nutrientes antes das cianobactérias.

Este capítulo pergunta se mares restritos, vulcânicos e ferruginosos criaram um regime diferente. A ressurgência trazia ferro e fósforo; a oxidação removia ambos; o confinamento permitia que o reservatório se esgotasse localmente; nova ressurgência reiniciava o ciclo. Nas fases ricas em ferro, os fotoferrotrofos dominariam e o Fe^{2+} limitaria os produtores de oxigênio. Nas fases de exaustão, comunidades produtoras de oxigênio poderiam ocupar por algum tempo a zona iluminada. Repetida durante milhões de anos, essa alternância ofereceria seleção, refúgio e expansão sem exigir uma atmosfera oxigenada.

Carajás e Kostomuksha são apresentados como os maiores candidatos conhecidos a esse tipo de laboratório por volta de 2,75 Ga. A arquitetura das bacias, os BIFs, os isótopos de ferro e as reconstruções de fósforo sustentam o ambiente. A ideia de que esse ambiente favoreceu linhagens produtoras de oxigênio e participou da transição que culminou no GOE pertence ao modelo deste livro. Nitrogênio, molibdênio, urânio, selênio e tálio podem transformá-la em teste.

1. O problema é o atraso

Convém começar pelo evento que dá nome ao problema. O Grande Evento de Oxidação, ou GOE, é o intervalo em torno de 2,4 Ga em que o oxigênio livre passou a existir de modo permanente na atmosfera. Antes dele, o oxigênio ficava abaixo de um cem-milésimo do nível atual, o limite que o capítulo 3 extraiu dos isótopos de enxofre. Depois dele, chegou a um centésimo ou mais, ainda muito abaixo do ar de hoje, mas suficiente para mudar a química de toda a superfície. A data vem do desaparecimento daquela assinatura de enxofre nas rochas sedimentares, e os melhores perfis a situam entre 2,45 e 2,32 Ga (Bekker et al., 2004; Gumsley et al., 2017; Warke et al., 2020). O evento foi oscilante,

com idas e vindas, e a oxigenação permanente pode ter se consolidado só duzentos milhões de anos depois do primeiro pulso (Poulton et al., 2021).

A atmosfera, portanto, levou tempo para responder à vida. Evidências químicas de oxidação localizada antecedem o GOE em centenas de milhões de anos, e os relógios moleculares colocam a origem da fotossíntese com oxigênio no Arqueano, embora sua idade exata continue aberta (Planavsky et al., 2014; Crowe et al., 2013; Fournier et al., 2021). Entre a inovação metabólica e sua expressão planetária houve um intervalo longo. O enigma central está nessa distância.

A imagem que resolve metade do enigma é a da banheira. Produzir oxigênio não bastava para acumulá-lo, assim como abrir uma torneira não enche uma banheira enquanto o ralo escoa na mesma velocidade. O oxigênio produzido numa lâmina d'água arqueana encontrava uma fila de credores. Oxidava o Fe^{2+} dissolvido, reagia com gases e minerais reduzidos, sustentava a respiração de outros organismos e desaparecia antes de alcançar a atmosfera. Ferro, gases vulcânicos e minerais reduzidos eram os ralos da Terra arqueana, e a atmosfera só poderia responder de forma persistente quando a torneira superasse o conjunto deles. Esses sumidouros explicam grande parte da demora.

Resta a outra metade, que é ecológica. Quais organismos controlavam a produção primária nos mares ferruginosos, e em que condições os produtores de oxigênio conseguiam crescer? A pergunta não é sobre o ralo. É sobre quem estava segurando a torneira.

2. Quem controlava a luz

Num oceano estratificado, a água profunda carrega Fe^{2+} e nutrientes. Quando sobe até a zona iluminada, ela oferece substrato a dois tipos de fotossíntese que competem pela mesma luz e pelo mesmo fósforo. As cianobactérias usam água como fonte de elétrons e liberam oxigênio. Os fotoferrotrofos usam ferro, pela equação do capítulo 3, e liberam ferrugem. Quem vence depende do que a água traz.

Ozaki et al. (2019) modelaram essa competição e encontraram o critério. Acima de uma razão crítica entre ferro dissolvido e fósforo na água que sobe, os fotoferrotrofos consomem o nutriente antes que as cianobactérias o alcancem e restringem a produtividade com oxigênio. O número sai da aritmética das próprias equações. Cada átomo de carbono fixado por fotoferrotrofia exige quatro átomos de ferro. Uma célula precisa de cerca de cento e seis átomos de carbono para cada átomo de fósforo, a proporção que os oceanógrafos chamam de razão de Redfield. Logo, uma água com mais de quatrocentos átomos de ferro para cada átomo de fósforo permite que os fotoferrotrofos usem todo o fósforo disponível, e as cianobactérias ficam sem nutriente. Abaixo dessa razão, sobra fósforo para a fotossíntese com oxigênio. O oceano ferruginoso funciona, nesse modelo, como barreira ecológica além de sumidouro químico.

O ferro também pode agir diretamente sobre as cianobactérias. Experimentos de Swanner et al. (2015) mostraram queda da produção de oxigênio sob concentrações elevadas de Fe^{2}□. O efeito depende da linhagem e das condições, mas dá corpo a uma dupla pressão plausível. Escassez de fósforo e toxicidade do ferro. O produtor de oxigênio já existia; o ambiente limitava sua escala.

3. A vantagem fotoferrotrófica

A vantagem se realimenta. Os fotoferrotrofos oxidam ferro sem liberar oxigênio, produzem biomassa e geram hidróxidos férricos. Esses precipitados descem e, como o capítulo 5 mostrou, adsorvem fósforo com enorme eficiência. A produtividade sem oxigênio reduz, assim, o nutriente disponível para seus concorrentes e reforça a própria vantagem. Quanto mais ferro oxidam, mais fósforo levam para o fundo, menos sobra para quem produz oxigênio.

O circuito tem uma fresta. A precipitação intensa pode esgotar o ferro na camada superficial ou empurrar a frente ferruginosa para baixo. Durante esse intervalo, a toxicidade diminui e a razão entre ferro e fósforo cai abaixo do limiar. Os organismos produtores de oxigênio ganham

espaço. O oxigênio produzido oxida o ferro que resta, acelera a limpeza local e amplia por algum tempo a zona favorável. O retorno da ressurgência recoloca Fe^{2}□ no sistema e fecha a janela.

Essa oscilação é uma inferência, ainda não um fato observado em Carajás. Sua força está em reunir processos conhecidos numa previsão que pode ser lida no testemunho de sondagem. Se o mecanismo operou, as fácies de exaustão de ferro devem coincidir com sinais independentes de que o oxigênio estava sendo usado. O BIF registraria os pulsos ferruginosos; os pelitos e carbonatos associados guardariam a resposta biológica.

4. O mar restrito como regime de oscilação

O oceano aberto dilui perturbações e repõe reservatórios. Uma bacia restrita conserva melhor as consequências de cada pulso, pela mesma razão que a banheira de ralo fechado do capítulo 5 concentra o que a torneira traz. O balanço entre conexão oceânica, ressurgência, produtividade e precipitação pode levar a camada superficial de um extremo ao outro muitas vezes. O confinamento importa porque permite exaustão local antes que o oceano profundo restaure as condições iniciais.

A própria formação ferrífera pode contribuir para a estabilidade do regime. Hidróxidos de ferro reagem com sulfeto e podem limitar sua acumulação, enquanto a deposição remove ferro e fósforo da coluna. Chamar esse assoalho de termostato é útil como imagem, desde que a imagem preserve seus limites. A capacidade do ferro de controlar o sulfeto depende do fluxo, da mineralogia e do balanço de massa. Precisa ser demonstrada camada por camada; o tamanho do BIF, sozinho, não prova proteção contínua contra a euxinia do capítulo 5.

O laboratório proposto não fabrica uma linhagem numa direção predeterminada. Ele seleciona comunidades dentro de um campo variável. Períodos hostis eliminam populações sensíveis; janelas favoráveis permitem expansão; refúgios conectados conservam diversidade; a repetição testa soluções metabólicas e fisiológicas. A palavra laboratório

descreve esse regime de experimentação ambiental. Ela não afirma descendência direta entre os micro-organismos de Carajás e a biosfera que mais tarde oxigenou o planeta.

5. Carajás e Kostomuksha, dois candidatos

Por volta de 2,76 a 2,74 Ga, Carajás e Kostomuksha reuniam vulcanismo, restrição de bacia e sedimentação ferrífera em grande escala, como o capítulo 5 mostrou. São dois dos melhores candidatos conhecidos ao regime descrito aqui, não os únicos ambientes possíveis. A preservação é desigual e grande parte do fundo oceânico arqueano desapareceu. O mapa atual mostra sobreviventes, não a distribuição completa dos ecossistemas.

Carajás oferece escala excepcional, e oferece um instrumento que ainda não apareceu neste livro. O ferro tem quatro isótopos estáveis, e quando apenas uma parte do Fe²□ de uma água é oxidada, o precipitado fica enriquecido nos isótopos pesados e a água que sobra, nos leves. Um BIF com valores muito positivos de ferro pesado registra, por isso, oxidação parcial, lenta, de um reservatório grande, e não a oxidação completa que um oceano cheio de oxigênio produziria. A Formação Carajás tem média reportada de +2,06 por mil no índice δ□□Fe, entre as mais altas conhecidas (Fabre et al., 2011). A interpretação de Rego et al. (2021) atribui essa oxidação dominante à fotoferrotrofia sob condições amplamente sem oxigênio. Esse é o estado de referência que a hipótese das janelas precisa ultrapassar.

O fósforo acrescenta a medida crítica. Rego et al. (2023) combinaram as razões entre fósforo e ferro dos depósitos com coeficientes experimentais de partição e reconstruíram para a água do mar arqueana uma média de 0,063 micromolar, trinta vezes menos que o oceano profundo de hoje. Para Carajás, o intervalo calculado foi de 0,004 a 0,18 micromolar. São estimativas derivadas do registro mineral, não medições diretas do oceano. Mesmo assim, apontam para forte escassez de fósforo e adsorção em hidróxidos férricos, exatamente o terreno em que a competição de Ozaki se torna relevante. Com tão pouco fósforo e

tanto ferro, a razão da seção 2 fica, na maior parte do tempo, do lado dos fotoferrotrofos.

A literatura reunida para este livro ainda carece de uma investigação sistemática, em Carajás, com isótopos de nitrogênio e traçadores como molibdênio, urânio, selênio e tálio nos intervalos ferríferos e nas rochas finas associadas. Essa ausência impede afirmar que as janelas existiram. Também oferece uma oportunidade incomum, porque o mecanismo produz sinais que podem ser procurados em testemunhos já disponíveis.

Kostomuksha fornece o controle da mesma idade. Sua associação entre cinturão de rochas verdes, vulcanismo e BIF permite perguntar se duas bacias independentes responderam da mesma forma ao ferro e ao confinamento. O registro de enxofre e a idade refinada do cinturão ampliam a comparação (Slabunov et al., 2025). Convergência entre os dois sistemas fortaleceria o mecanismo ambiental; divergência ajudaria a identificar qual ingrediente faltou.

6. Dos BIFs neoarqueanos ao GOE

A sucessão global oferece uma hipótese de escala. Carajás e Kostomuksha registram grandes sistemas por volta de 2,75 Ga. Entre 2,67 e 2,50 Ga, sinais de oxidação localizada aparecem em diferentes margens arqueanas, os chamados sopros de oxigênio, embora alguns registros continuem disputados (Anbar et al., 2007; Kendall et al., 2010; Riding et al., 2014; Slotznick et al., 2022). Entre 2,50 e 2,43 Ga, as grandes formações ferríferas de plataforma e a transição atmosférica se sobrepõem no tempo. A contagem de ciclos orbitais gravados nas camadas refina a deposição das formações Kuruman, na África do Sul, e Dales Gorge, na Austrália, e o desaparecimento da assinatura de enxofre delimita a mudança atmosférica (Gumsley et al., 2017; Warke et al., 2020; Lantink et al., 2024).

A coincidência permite uma leitura causal, mas ainda não a demonstra. A multiplicação de plataformas rasas e bacias ferruginosas pode

ter expandido os nichos em que produtores de oxigênio alternavam desvantagem e oportunidade. À medida que o Fe²□ superficial era consumido, a produtividade com oxigênio crescia e reforçava a própria remoção do ferro. O mecanismo de Ozaki poderia então operar em mais de uma bacia e ajudar a converter oásis locais numa alteração atmosférica oscilante.

Outros controles permaneceram ativos. O fluxo de gases reduzidos dos vulcões, a composição da crosta, o enterramento de carbono, a disponibilidade de nutrientes e o balanço de enxofre (Reinhard et al., 2017; Konhauser et al., 2017). O GOE resulta da interação desses termos. O laboratório ferruginoso acrescenta uma ponte ecológica entre a origem antiga do metabolismo e sua expansão posterior. Não substitui o orçamento químico do planeta.

O Supergrupo Minas, em Minas Gerais, funciona como comparação de segunda geração. A Formação Cauê registra deposição de ferro na janela da transição; os carbonatos da Gandarela e do Fecho do Funil acompanham a reorganização posterior do ciclo do carbono, culminando nos valores anômalos do chamado evento Lomagundi, quando enormes quantidades de carbono orgânico foram enterradas e o oxigênio subiu (Babinski et al., 1995; Bekker et al., 2003). A coluna reúne ferro, plataforma e resposta biológica, mas sua continuidade não estabelece uma linhagem que parte de Carajás. O que pode ser comparado é o regime. Duração das janelas, nutrientes e intensidade dos traçadores.

O pulso de BIFs de 1,88 Ga na América do Norte pertence a outra configuração tectônica e a outro estado do oceano (Rasmussen et al., 2012). É um controle tardio, não a chegada documentada de uma revolução nascida em Carajás. A geografia dos supercontinentes e a transmissão entre blocos serão tratadas no capítulo 12. Aqui basta conservar a pergunta local e seu possível alcance planetário.

7. Como ler o testemunho

Os traçadores que a hipótese pede merecem uma palavra cada, porque é neles que ela vive ou morre. O nitrogênio tem dois isótopos estáveis, e a sequência de reações que converte amônia em nitrato e depois em gás, a nitrificação seguida da desnitrificação, só funciona com oxigênio e deixa o nitrogênio que sobra enriquecido no isótopo pesado. Um enriquecimento de ^{15}N numa rocha fina é, por isso, uma pegada de oxigênio em uso. Molibdênio e urânio são solúveis em água oxidada e insolúveis em água reduzida; quando se acumulam num sedimento marinho, registram que havia oxigênio atacando rochas em algum lugar a montante. O selênio muda de estado de oxidação em faixas diferentes das do ferro e refina o intervalo. O tálio acompanha os óxidos de manganês, que só se formam com oxigênio, e registra sua ciclagem. Nenhum deles é inequívoco sozinho. O argumento depende da convergência entre eles e de sua posição na pilha, não de uma anomalia isolada.

O primeiro teste procura covariação dentro de Carajás. Intervalos de menor aporte de Fe^{2+} ou de exaustão ferrífera devem coincidir com sinais de ciclagem aeróbica. Enriquecimento de ^{15}N, mudanças coordenadas em molibdênio, urânio e selênio, e tálio onde a ciclagem de óxidos de manganês tiver sido preservada.

O segundo teste compara Carajás e Kostomuksha com seções abertas da mesma idade. O mecanismo prevê maior frequência ou melhor preservação de oscilações nas bacias restritas. Se margens abertas mostrarem sinais de oxigênio sistematicamente anteriores e mais fortes, ou se os dois candidatos permanecerem uniformemente sem oxigênio em múltiplos traçadores, a prioridade atribuída ao confinamento perde força.

O terceiro teste acompanha o tempo. Carajás, a Cauê e os sistemas da transição para o GOE devem formar um gradiente mensurável, com janelas de oxigênio progressivamente mais longas e inventários de metais sensíveis cada vez maiores. A ausência desse gradiente enfraquece a ideia de expansão. Sua presença ainda exigirá distinguir herança bi-

ológica de convergência ecológica.

8. Níveis de confiança

São evidência ou consenso forte a anterioridade da fotossíntese com oxigênio ao GOE; a datação do GOE pelo desaparecimento da assinatura de enxofre e seu caráter oscilante; a competição prevista para oceanos com alta razão entre ferro e fósforo; a toxicidade do Fe²□ observada em experimentos; a fotoferrotrofia como interpretação principal da oxidação do ferro em Carajás; os valores positivos de δ□□Fe; a reconstrução de fósforo muito baixo; e a arquitetura restrita e ferruginosa de Carajás e Kostomuksha.

São modelos publicados o mecanismo competitivo de Ozaki, os sumidouros químicos do oxigênio, os oásis de oxigênio anteriores ao GOE e a cronologia das plataformas ferríferas de 2,5 Ga.

São hipóteses deste capítulo as janelas repetidas de exaustão de ferro em mares restritos; a seleção ecológica acumulada nesses intervalos; Carajás e Kostomuksha como candidatos principais; e a expansão posterior desse regime em plataformas maiores. Cada elo possui observáveis capazes de confirmá-lo, corrigi-lo ou encerrá-lo, e a seção 7 lista quais.

Conclusão

Carajás pode ter processado mais que ferro. Sua bacia reunia luz, Fe²□, fósforo escasso, ressurgência, confinamento e tempo. A combinação favorecia os fotoferrotrofos durante grande parte do ciclo. A própria eficiência da precipitação de ferro, porém, podia abrir intervalos em que a camada superficial perdia ferro e as comunidades produtoras de oxigênio ganhavam espaço. O retorno da água profunda fechava a janela. A bacia respirava aos pulsos antes que a atmosfera pudesse fazê-lo.

Essa imagem permanece hipótese. Ela ganha valor porque desce ao tes-

temunho. Prevê relações entre fácies, ferro, nitrogênio e metais sensíveis; exige comparação com Kostomuksha e Minas; aceita desaparecer se os sinais faltarem. Se sobreviver, o maior distrito de ferro conhecido também será um arquivo do intervalo em que a vida já produzia oxigênio enquanto o planeta ainda aprendia a conservá-lo.

O capítulo seguinte deixa a zona fótica e volta à crosta. A margem norte de Carajás, aberta pelo rifte precursor do capítulo 6, vai receber uma plataforma, uma colisão e a última compressão do interior do continente.

Referências

Anbar, A. D. et al. (2007). A whiff of oxygen before the Great Oxidation Event? Science, 317, 1903–1906. https://doi.org/10.1126/science.1140325

Babinski, M.; Chemale Jr., F.; Van Schmus, W. R. (1995). The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Precambrian Research, 72, 235–245.

Bekker, A. et al. (2003). Chemostratigraphy of carbonates from the Minas Supergroup, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a stratigraphic record of Early Proterozoic atmospheric, biogeochemical and climatic change. American Journal of Science, 303, 865–904. https://doi.org/10.2475/ajs.303.10.865

Bekker, A. et al. (2004). Dating the rise of atmospheric oxygen. Nature, 427, 117–120. https://doi.org/10.1038/nature02260

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. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.467

Crowe, S. A. et al. (2013). Atmospheric oxygenation three billion years ago. Nature, 501, 535–538. https://doi.org/10.1038/nature12426

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. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.07.019

Fournier, G. P.; Moore, K. R.; Rangel, L. T.; Payette, J. G.; Momper, L.; Bosak, T. (2021). The Archean origin of oxygenic photosynthesis and extant cyanobacterial lineages. Proceedings of the Royal Society B, 288, 20210675. https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0675

Gumsley, A. P. et al. (2017). Timing and tempo of the Great Oxidation Event. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114, 1811–1816. https://doi.org/10.1073/pnas.1608824114

Kendall, B. et al. (2010). Pervasive oxygenation along late Archaean ocean margins. Nature Geoscience, 3, 647–652. https://doi.org/10.1038/ngeo942

Konhauser, K. O. et al. (2017). Iron formations: a global record of Neoarchaean to Palaeoproterozoic environmental history. Earth-Science Reviews, 172, 140–177. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Lantink, M. L. et al. (2024). Towards an astrochronological framework for the lower Paleoproterozoic Kuruman and Brockman Iron Formations. South African Journal of Geology, 127, 325–349. https://doi.org/10.25131/sajg.127.0005

Ozaki, K.; Thompson, K. J.; Simister, R. L.; Crowe, S. A.; Reinhard, C. T. (2019). Anoxygenic photosynthesis and the delayed oxygenation of Earth's atmosphere. Nature Communications, 10, 3026. https://doi.org/10.1038/s41467-019-10872-z

Planavsky, N. J. et al. (2014). Evidence for oxygenic photosynthesis half a billion years before the Great Oxidation Event. Nature Geoscience, 7, 283–286. https://doi.org/10.1038/ngeo2122

Poulton, S. W. et al. (2021). A 200-million-year delay in permanent atmospheric oxygenation. Nature, 592, 232–236. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03393-7

Rasmussen, B.; Fletcher, I. R.; Bekker, A.; Muhling, J. R.; Gregory, C. J.; Thorne, A. M. (2012). Deposition of 1.88-billion-year-old iron formations as a consequence of rapid crustal growth. Nature, 484, 498–501. https://doi.org/10.1038/nature11021

Rego, E. S. et al. (2021). Anoxygenic photosynthesis linked to Neoarchean iron formations in Carajás (Brazil). Geobiology, 19, 326–341. https://doi.org/10.1111/gbi.12438

Rego, E. S. et al. (2023). Low-phosphorus concentrations and important ferric hydroxide scavenging in Archean seawater. PNAS Nexus, 2, pgad025. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad025

Reinhard, C. T. et al. (2017). Evolution of the global phosphorus cycle. Nature, 541, 386–389. https://doi.org/10.1038/nature20772

Riding, R.; Fralick, P.; Liang, L. (2014). Identification of an Archean marine oxygen oasis. Precambrian Research, 251, 232–237.

Slabunov, A. I. et al. (2025). Age of banded iron formations of the Kostomuksha Greenstone Belt: first zircon dating. Geology of Ore Deposits, 67, 237–250. https://doi.org/10.1134/S1075701524700466

Slotznick, S. P. et al. (2022). Reexamination of 2.5 Ga "whiff" of oxygen interval points to anoxic ocean before GOE. Science Advances, 8, eabj7190. https://doi.org/10.1126/sciadv.abj7190

Swanner, E. D. et al. (2015). Modulation of oxygen production in Archaean oceans by episodes of Fe(II) toxicity. Nature Geoscience, 8, 126–130. https://doi.org/10.1038/ngeo2327

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.

Warke, M. R. et al. (2020). The Great Oxidation Event preceded a Paleoproterozoic "snowball Earth". Proceedings of the National Academy of Sciences, 117, 13314–13320. https://doi.org/10.1073/pnas.2003090117

Capítulo 8. A costura riaciana: plataforma, colisão e Evento Sereno, ca. 2,55–1,96 Ga

Do rifte precursor de Buritirama à sutura Carajás-Bacajá e à última compressão do interior do continente

Modelo de trabalho

O magmatismo extensional de ca. 2,55 Ga antecedeu a margem setentrional de Carajás. A plataforma manganesífera de Buritirama amadureceu bem mais tarde, no Riaciano, e foi invertida durante a colisão entre Carajás e Bacajá, entre ca. 2,10 e 2,05 Ga. O Evento Sereno, entre ca. 2,01 e 1,96 Ga, reativou a crosta já soldada. Novolândia como fragmento devolvido da margem, Paranapanema como motor remoto do Sereno e o colapso riaciano como consolidador da gramática estrutural são hipóteses deste livro; a estratigrafia, as idades e as direções que elas encadeiam são medidas.

Buritirama · manganês · Riaciano · Bacajá · Transamazônico · granulito · Vila Santa Fé-Rio Preto · Novolândia · Evento Sereno · gramática

estrutural · Atlântica · ca. 2,55–1,96 Ga

Resumo

A margem norte de Carajás nasceu em dois tempos, e separar os dois é o primeiro trabalho deste capítulo. O Granito Buritirama, cristalizado em torno de 2,55 Ga, registra a fase extensional precursora que o capítulo 6 apresentou. A sucessão sedimentar com manganês da Formação Buritirama pertence a uma plataforma bem mais jovem, depositada entre ca. 2,18 e 2,06 Ga. Datar o granito não data a bacia que hoje o recobre.

A plataforma acompanha a aproximação do domínio Bacajá, um bloco com arcos vulcânicos que vinha do outro lado de um oceano. Quartzitos, rochas carbonáticas e mármores registram redução do aporte de areia e sedimentação química marinha. O manganês se concentrou quando águas com oxigênio alcançaram um reservatório abastecido pelo metal, numa faixa de idade comparável à de outros depósitos do mesmo ciclo no Brasil e na África Ocidental. A colisão inverteu a sucessão, empilhou-a em fatias com transporte para sudoeste e expôs, em Vila Santa Fé-Rio Preto e em Novolândia, níveis profundos da costura.

Entre ca. 2,10 e 2,05 Ga, rochas metamorfizadas em alta temperatura e magmas secos registram o auge térmico da colisão. Entre ca. 2,01 e 1,96 Ga, o Evento Sereno reativa o interior já soldado, com deformação em baixa temperatura e transporte predominante para noroeste. O capítulo distingue o que a geologia fixa, o que os modelos publicados organizam e o que o livro propõe. Novolândia como fragmento de margem retrabalhado, Paranapanema como possível motor remoto do Sereno, e a herança estrutural desse intervalo como parte da memória mecânica que a plataforma usará para sempre.

1. Dois relógios

Uma fundação antiga pode sustentar uma casa muito mais jovem. Datar o concreto da fundação informa quando o suporte ficou pronto, não quando as paredes foram erguidas. Em Buritirama, a fundação e a casa têm quatrocentos milhões de anos de diferença, e durante muito tempo a idade de uma foi tomada pela da outra.

O primeiro relógio está no embasamento. O Granito Buritirama registra magmatismo extensional em ca. 2,55 Ga e marca a preparação tectônica da borda norte de Carajás, o rifte precursor do capítulo 6. Ele pertence à abertura de uma margem, mas sua idade não data os sedimentos com manganês. Entre o precursor magmático e a plataforma preservada existe um intervalo longo, preenchido por erosão, subsidência, omissão de camadas e reorganização da bacia.

O segundo relógio está nos zircões detríticos e na correlação regional, lido pela regra da moeda no cofre. A Formação Buritirama representa uma plataforma riaciana, com deposição situada aproximadamente entre 2,18 e 2,06 Ga (Salgado et al., 2019b, 2021). A população jovem dos sedimentos registra fontes paleoproterozoicas ligadas ao sistema Bacajá; as populações arqueanas conservam a contribuição do bloco Carajás e de terrenos retrabalhados. A mistura mostra uma margem recebendo material dos dois lados durante a aproximação.

Essa separação muda a narrativa. A plataforma não passou trezentos milhões de anos morrendo de fome desde 2,55 Ga. O rifte preparou a borda; a bacia com manganês amadureceu perto da colisão. O hiato continua geologicamente expressivo, mas deixa de ser preenchido por uma continuidade que a rocha não demonstra.

2. O Riaciano e o ciclo Transamazônico

Convém situar as palavras no tempo. O Paleoproterozoico, a era que vai de 2,5 a 1,6 Ga, se divide em quatro períodos. O Sideriano, de 2,5 a 2,3 Ga, é o do pulso terminal do capítulo 6 e do Grande Evento de

Oxidação. O Riaciano, de 2,3 a 2,05 Ga, é o deste capítulo. O Orosiriano, de 2,05 a 1,8 Ga, recebe o Evento Sereno e, adiante, o terceiro regime mineral do capítulo 9. O Estateriano, de 1,8 a 1,6 Ga, é o da fragmentação que o capítulo 10 acompanha.

O Riaciano foi, no mundo inteiro, uma época de colisões. Os blocos arqueanos que haviam sobrevivido aos capítulos anteriores se aproximaram, fecharam os oceanos entre si e se soldaram em continentes maiores. Na América do Sul, esse ciclo de arcos, colisões e metamorfismo entre ca. 2,2 e 1,95 Ga recebe o nome de Transamazônico. Na África Ocidental, o mesmo ciclo se chama Birimiano, e a correlação entre os dois é uma das bases da reconstrução que o capítulo 10 apresenta sob o nome de Atlântica (Grenholm et al., 2019).

Ao norte de Carajás, do outro lado de um oceano cuja largura não se conhece, estava o domínio Bacajá. Ele registra magmatismo de arco e retrabalhamento de crosta antiga durante o Riaciano, com granitoides entre ca. 2,22 e 2,08 Ga que acompanham uma história prolongada de convergência, acresção e fusão de crosta arqueana (Vasquez e Rosa-Costa, 2008). Nesse arranjo, a placa que mergulhava era a do oceano entre os dois blocos, e o arco vulcânico crescia em Bacajá. A plataforma de Buritirama ocupava a placa inferior, na borda de Carajás, recebendo sedimento enquanto o arco crescia do outro lado da água. Era a margem passiva do capítulo 3, com sua praia, à espera de que a convergência chegasse.

3. A plataforma manganesífera

A Formação Buritirama forma uma faixa de cerca de quarenta quilômetros. Sua sucessão reúne quartzitos, xistos de mica e quartzo, rochas de carbonato e silicato e mármores ricos em kutnohorita, um carbonato de cálcio e manganês. Esse carbonato é o protominério. Ele foi depois metamorfizado, deformado e profundamente alterado pelo intemperismo tropical, que gerou parte importante do minério de óxido hoje explorado (Salgado et al., 2019a).

A passagem de unidades de areia para intervalos carbonáticos registra uma plataforma em que a diluição por sedimento terrígeno diminuiu, isto é, uma margem que foi ficando mais distante do relevo e mais entregue à química do mar. O que essa química exige para depositar manganês é mais do que o ferro exigia, e a diferença é uma escada de oxidação. Ferro e manganês viajam dissolvidos nas mesmas águas sem oxigênio, ambos na forma de íons com duas cargas. Mas o ferro é oxidado e precipitado com muito pouco oxigênio, ou com nenhum, pela fotoferrotrofia dos capítulos 3 e 7. O manganês resiste. Ele só é oxidado em águas com oxigênio de verdade, e por isso continua em solução depois que o ferro já caiu. Um depósito de manganês é um degrau acima de um BIF na escada do oxigênio. A plataforma de Buritirama registra um mar que já havia subido esse degrau, duzentos milhões de anos depois do GOE.

Os elementos terras raras acrescentam detalhes legíveis. A razão entre ítrio e hólmio, dois elementos que a água do mar separa e as rochas não, sustenta que a água era marinha. O cério, que entre as terras raras é o único oxidado e removido em água com oxigênio, deixa uma falta característica no padrão, a anomalia negativa que marca condições oxidantes. O európio, ao contrário, é enriquecido em fluidos hidrotermais quentes, e sua anomalia positiva sugere que uma parte do manganês chegou de fontes hidrotermais distantes. A assinatura combinada diz que o metal foi transportado em condições redutoras e oxidado para precipitar, ou entrar em carbonatos e óxidos, num mar aberto à atmosfera do Riaciano (Salgado et al., 2021).

A relação com o Grande Evento de Oxidação é, portanto, temporal e mecanicamente plausível. Ela não transforma cada camada de manganês num medidor direto do oxigênio atmosférico. Hidrotermalismo distante, produtividade, matéria orgânica, profundidade e circulação controlam o ponto de deposição. O depósito nasceu da soma entre atmosfera, oceano, bacia e fonte.

A idade riaciana aproxima Buritirama dos depósitos de manganês do sistema Transamazônico-Birimiano no Brasil, como os do Amapá e de Minas Gerais, e na África Ocidental, como os do Gana e da Costa do

Marfim. Essa correlação por idade é publicada e fornece uma linha paleogeográfica importante. A posição exata dos blocos, a continuidade das plataformas e os caminhos de circulação do oceano pertencem ao problema maior dos supercontinentes, tratado nos capítulos 10 e 12.

4. A aproximação de Bacajá

Antes do encurtamento final, Carajás registra atividade térmica e de fluidos entre ca. 2,20 e 2,15 Ga. Minerais hidrotermais dos depósitos neoarqueanos foram recristalizados ou reequilibrados nessa janela. A relação no tempo com a convergência faz desse pulso uma resposta plausível da margem inferior à flexura, à circulação de fluidos e ao aquecimento que uma placa mergulhante induz à sua frente. A geometria e o mecanismo ainda precisam ser demonstrados em escala regional. Idade semelhante, sozinha, não identifica a posição da placa nem o agente térmico.

A colisão torna-se inequívoca na deformação de Buritirama. A sucessão foi dobrada, metamorfizada e empilhada em escamas, fatias de rocha limitadas por falhas inclinadas que se sobrepõem como telhas num telhado, com transporte geral de nordeste para sudoeste. Quando uma pilha de sedimentos é empurrada e se parte em fatias que cavalgam umas sobre as outras, a direção em que as fatias avançam se chama vergência, e ela aponta para onde o esforço estava indo. Em Buritirama, a vergência leva rochas da zona de contato sobre a margem norte de Carajás. O antigo local de sedimentação transforma-se em frente de cavalgamento. A praia virou cordilheira.

5. A raiz exposta

Toda colisão tem uma raiz, como o capítulo 4 mostrou para o Mesoarqueano, e em geral a raiz fica enterrada. A costura entre Carajás e Bacajá é incomum porque parte dela foi erguida e exposta pela erosão, e dá para caminhar sobre rochas que estiveram a trinta quilômetros de profundidade.

Essas rochas têm nomes que convém abrir. Granulito é uma rocha metamorfizada em temperatura tão alta que perdeu quase toda a água de seus minerais; é o que resta na base de uma crosta espessada e aquecida. Migmatito é uma rocha que começou a fundir, com veios claros de fundido separados de porções escuras que não fundiram, o migmatito do epílogo deste livro. Charnockito e enderbito são granitos e tonalitos secos, com piroxênio em vez de mica, que cristalizam de magmas formados nessas condições. Juntos, eles são o termômetro e o barômetro de uma colisão.

A associação Vila Santa Fé-Rio Preto expõe essa crosta profunda. Granulitos máficos e félsicos registram condições próximas de nove a dez quilobares e de 760 a 800 graus. Cada quilobar corresponde a cerca de três quilômetros e meio de rocha por cima, de modo que esses números falam de trinta a trinta e cinco quilômetros de profundidade, o dobro da espessura de uma crosta normal, o que confirma o espessamento da colisão. Crescimento de fundido, migmatização e magmatismo charnockítico a enderbítico concentram-se entre ca. 2,10 e 2,06 Ga. A descompressão e a reequilibração com água acompanham a subida da raiz depois do pico (Tavares et al., 2018).

Novolândia acrescenta uma história mais antiga e mais complexa. Dados recentes reconhecem protólitos e fontes entre o Paleoarqueano e o Paleoproterozoico, forte retrabalhamento de crosta antiga e metamorfismo prolongado entre ca. 2,16 e 2,04 Ga, seguido por sobreposição em 1,92 Ga (Neri et al., 2026). Zircões detríticos alcançam ca. 3,3 Ga; componentes arqueanos em torno de 2,74 Ga convivem com protólitos paleoproterozoicos. O cinturão é um arquivo composto da zona de colisão.

Este livro propõe que parte de Novolândia derive da margem setentrional de Carajás, destacada durante a abertura do capítulo 6 e devolvida pelo fechamento. A herança arqueana e a posição estrutural sustentam a possibilidade; os zircões de 3,3 e 2,74 Ga são, afinal, barras do código de Carajás. Os novos dados também impedem uma identificação simples, porque há acresção, magmatismo e metamorfismo paleoproterozoicos misturados ao substrato antigo. A formulação segura é

fragmento de margem retrabalhado e incorporado à sutura. Demonstrar origem exclusivamente carajaense exigiria correlações isotópicas, estratigráficas e geofísicas mais restritivas.

6. O Evento Sereno

A deformação transamazônica se concentra entre ca. 2,10 e 2,05 Ga. Depois do metamorfismo de alta temperatura e do empilhamento, a crosta esfria, sobe e muda de regime. Entre ca. 2,01 e 1,96 Ga, uma nova deformação afeta o interior de Carajás. O Evento Sereno dobra unidades anteriores, reativa zonas de cisalhamento e produz tramas em condições mais rasas, com transporte predominante para noroeste (Tavares et al., 2018).

A diferença de idade, de profundidade e de direção justifica tratá-lo como evento próprio. O Sereno não é o estágio tardio da colisão entre Carajás e Bacajá. Ele atua sobre uma placa já amalgamada, cinquenta milhões de anos depois do auge, a partir de outra direção e sem o magmatismo volumoso que uma margem ativa local exigiria. Seu caráter intracontinental, deformação dentro de um continente e não em sua borda, é a interpretação que melhor organiza o registro.

Deformação assim tem análogo vivo. A colisão da Índia com a Ásia levanta o Himalaia na borda, mas também reativou, a dois mil quilômetros da sutura, as montanhas do Tian Shan, no interior da Ásia Central, onde falhas antigas voltaram a se mover porque o esforço da colisão atravessou o continente inteiro (Molnar e Tapponnier, 1975). Um continente rígido transmite esforço a longa distância, e esforço transmitido escolhe as estruturas antigas para se expressar.

O vetor de transporte permite perguntar de onde veio o esforço. Este livro propõe uma colisão distante na margem meridional, possivelmente associada ao bloco Paranapanema, um pedaço de crosta antiga hoje inteiramente coberto pelos sedimentos e basaltos da Bacia do Paraná, conhecido apenas por geofísica e por poucos furos. Trata-se de hipótese de paternidade, não de identificação demonstrada. O

teste exige continuidade geofísica sob a cobertura, idades compatíveis nos terrenos do sul e um campo de deformação capaz de transmitir esforço até Carajás.

Eventos próximos de 2,0 Ga aparecem também no Gurupi, no Amapá e no Quadrilátero Ferrífero, acompanhados em alguns casos por fluidos e remobilização de ouro (Brando Soares et al., 2021). A sincronia sugere uma plataforma continental submetida a reorganização ampla. Direções semelhantes reforçam a comparação, mas podem nascer de estruturas herdadas independentes. Por isso o capítulo registra uma correlação a testar, sem reunir todos os afloramentos numa única frente de deformação.

7. Colapso e memória estrutural

Depois do encurtamento, descompressão, resfriamento e subida da crosta reorganizam sua permeabilidade. Uma cordilheira espessa demais não se sustenta; ela se espalha sob o próprio peso, como o Alborán do capítulo 4, e esse espalhamento se chama colapso. Falhas antigas são reabertas; novas famílias aproveitam as anisotropias que a colisão deixou. A bacia de Águas Claras recobre em discordância parte do edifício, isto é, assenta sobre uma superfície de erosão que corta as rochas dobradas de baixo, e inclui um intervalo marinho basal preservado no Azul e em Serra Pelada. Sua idade e sua relação detalhada com cada estágio do colapso ainda exigem cautela, mas a discordância fixa uma mudança de regime.

Aqui entra uma observação que o resto do livro vai usar sem parar, e que por isso merece ser dita com cuidado. Quatro famílias de direções aparecem repetidamente no mapa de Carajás. Uma de leste-nordeste, uma de oeste-noroeste, uma de norte-nordeste e uma de norte-noroeste. Elas controlam segmentos de falhas, diques, bacias e mineralizações de idades muito diferentes, de modo que um dique de 535 Ma pode correr paralelo a uma falha de 2,7 Ga. A colisão e o relaxamento riaciano-orosiriano certamente reforçaram parte dessa rede. Sua origem integral nesse episódio seria uma afirmação maior

que a evidência. Algumas direções podem ser arqueanas, herdadas da sutura do capítulo 4; outras foram geradas ou reorientadas depois.

Chamo esse conjunto de gramática estrutural, e a palavra foi escolhida com intenção. Uma gramática é um conjunto herdado de regras que cada falante usa sem ter inventado e que, ao usar, confirma e modifica um pouco. Cada evento tectônico escolhe entre as direções disponíveis, cruza famílias anteriores e acrescenta inflexões. O mapa conserva sintaxe porque a crosta tem memória, não porque um único colapso escreveu todas as letras. As idades são quando a plataforma fala; as direções são a língua em que ela fala. Estatística de lineamentos datados, relações de corte e geofísica da crosta podem separar herança, criação e reativação, e os capítulos 10 e 11 dependem dessa separação.

8. Atlântica à vista

Ao fim do capítulo, Carajás integra um continente paleoproterozoico. Bacajá está soldado ao norte; a margem meridional participa de uma arquitetura ainda parcialmente oculta sob a Bacia do Paraná; a crosta reúne suturas e corredores capazes de transmitir esforço a longa distância, como o Sereno acabou de demonstrar. Esse continente, montado pelas colisões transamazônicas e birimianas em torno de 2,0 Ga, recebeu o nome de Atlântica, e o capítulo 10 o acompanha até sua fragmentação. É uma hipótese paleogeográfica robusta em escala continental, embora seus limites e a posição relativa dos blocos continuem em refinamento.

Antes de acompanhar sua distensão, resta observar a última grande reativação mineral de Carajás, que o capítulo 9 conta. Ela vai usar exatamente as estruturas que este capítulo deixou prontas.

9. Níveis de confiança

Pertencem ao registro observado a estratigrafia e a estrutura em escamas de Buritirama; a idade riaciana e a proveniência mista da pla-

taforma; sua mineralogia com manganês e sua assinatura marinha; o magmatismo de Bacajá; as condições de granulito e as idades transamazônicas de Vila Santa Fé-Rio Preto; o arquivo policíclico de Novolândia; a idade, a direção e o nível crustal do Evento Sereno; a discordância de Águas Claras; e a recorrência das quatro famílias estruturais.

São modelos sustentados pela literatura a plataforma de Buritirama na borda de Carajás, sua inversão durante a amalgamação entre Carajás e Bacajá, o caráter colisional do metamorfismo de alto grau, a natureza intracontinental do Sereno e a escada de oxidação que separa o manganês do ferro. A correlação por idade dos depósitos de manganês do sistema Transamazônico-Birimiano fornece contexto, mas ainda admite reconstruções paleogeográficas diferentes.

São hipóteses deste livro a relação genética entre o rifte de 2,55 Ga e a plataforma riaciana posterior; a participação de um fragmento da margem de Carajás em Novolândia; Paranapanema como motor remoto do Sereno; a equivalência do Sereno com reativações de 2,0 Ga em outros crátons; e o papel do colapso paleoproterozoico na consolidação da gramática estrutural. O texto as mantém porque são testáveis e porque organizam o próximo ciclo sem se disfarçarem de evidência.

Conclusão

Entre 2,55 e 1,96 Ga, a borda norte de Carajás foi aberta, afogada, soldada e apertada de novo. O granito de 2,55 Ga preparou a margem; a plataforma riaciana a cobriu de carbonato e manganês quando o mar já tinha oxigênio para isso; a chegada de Bacajá a dobrou, empilhou e enterrou a trinta quilômetros; a subida da raiz a expôs; e o Evento Sereno, vindo de longe, mostrou que o continente recém-montado já transmitia esforço como uma peça só.

O que ficou foi um continente e uma gramática. Atlântica, com Carajás em seu interior, e uma rede de quatro direções que todos os eventos seguintes vão falar. O capítulo 9 mostra a primeira frase nessa língua, dita por um magmatismo que reaqueceu a crosta fraturada sob águas

novas.

Referências

Brando Soares, M.; Selby, D.; Robb, L.; Corrêa Neto, A. V. (2021). Minas Orogeny: implications for gold mineralization in the Quadrilátero Ferrífero area, Brazil. Economic Geology, 116, 1455–1466. https://doi.org/10.5382/econgeo.4830

Grenholm, M.; Jessell, M.; Thébaud, N. (2019). A geodynamic model for the Paleoproterozoic (ca. 2.27–1.96 Ga) Birimian Orogen of the southern West African Craton. Earth-Science Reviews, 192, 138–193.

Molnar, P.; Tapponnier, P. (1975). Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. Science, 189, 419–426. https://doi.org/10.1126/science.189.42

Neri, A. S. S.; Dantas, E. L.; Peixoto, E. I. N.; Fuck, R. A.; Gonçalves, G. O. (2026). Paleoarchean to Paleoproterozoic record of sedimentation, magmatism and metamorphism documented in granulites from the Bacajá Domain, Amazonian Craton. Journal of the Geological Society, 183, jgs2026-016. https://doi.org/10.1144/jgs2026-016

Salgado, S. S. et al. (2021). Metallogenetic Mn-model of the Rhyacian-aged Buritirama Formation, Carajás Domain (Amazon Craton). Ore Geology Reviews.

Salgado, S. S.; Caxito, F. A.; Figueiredo e Silva, R. C.; Lana, C. (2019b). Provenance of the Buritirama Formation reveals the Paleoproterozoic assembly of the Bacajá and Carajás blocks (Amazon Craton) and the chronocorrelation of Mn-deposits in the Transamazonian/Birimian system of northern Brazil/West Africa. Journal of South American Earth Sciences, 96, 102364.

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

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. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.08.024

Vasquez, M. L.; Rosa-Costa, L. T. (orgs.) (2008). Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas. Belém: CPRM.

Capítulo 9. O terceiro regime: a crosta reaberta, ca. 1,91–1,86 Ga

Granitos tipo A, fluidos salinos e a última grande reativação mineral de Carajás

Modelo de trabalho

O magmatismo ferroano de ca. 1,91 a 1,86 Ga reaqueceu uma crosta fraturada sob aquíferos novos. Águas das coberturas Águas Claras e Caninana-Paredão-Gorotire circularam profundamente, adquiriram salinidade por interação prolongada com a rocha e misturaram-se a fluidos magmáticos. O terceiro regime herdou a arquitetura hidráulica e as fontes metálicas, não a água do Neoarqueano. A terceira ativação como continuação de um sistema provincial, a salinização profunda das águas novas e o Complexo Formiga como fonte dos metais de Serra Pelada são hipóteses deste livro; as idades, as paragêneses e as relações de corte são medidas.

Uatumã · granito tipo A · aquífero · greisen · Breves · Salobo · calcocita · adulária · epitermal · Serra Pelada · Complexo Formiga · Orosiriano · ca. 1,91–1,86 Ga

Resumo

Entre ca. 1,91 e 1,86 Ga, Carajás recebeu granitos tipo A e uma nova circulação hidrotermal, a terceira e última de sua biografia mineral principal. Breves, Alvo 118, Estrela e Gameleira registram a janela em biotita, xenotímio, monazita e minerais associados. A proximidade entre as idades do magma e as dos fluidos, a posição nas cúpulas dos granitos e a associação de urânio, tungstênio, estanho, bismuto, molibdênio e flúor sustentam um regime ligado ao magmatismo paleoproterozoico.

O evento reutilizou uma crosta preparada durante quase novecentos milhões de anos. Falhas, contatos, zonas alteradas e rochas máficas férteis já estavam lá. Os aquíferos eram novos. Águas Claras e as coberturas Caninana-Paredão-Gorotire, depositadas depois do colapso do capítulo 8, forneceram água capaz de penetrar o embasamento fraturado, reagir por longos percursos e virar salmoura. A escapolita e a alteração de sódio e cálcio do capítulo 6 provam circulação salina antiga, sem continuidade física com o fluido paleoproterozoico.

A mineralogia muda com a profundidade e com a fonte. Greisens e veios de elementos granitófilos ocupam as cúpulas; substituições de sulfetos elevam localmente o teor de cobre sem acrescentar cobre; hematita, sericita, clorita e carbonatos marcam condições mais rasas e variáveis. Veios de adulária indicam ambientes tardios de baixa temperatura, embora sua idade ainda precise de datação direta. Serra Pelada testa o alcance da rede numa cobertura sedimentar rica em carbono, e este livro adota o Complexo Formiga, logo abaixo, como fonte de seus metais do grupo da platina.

1. O pulso magmático

A terceira ativação começa com os granitos tipo A da Suíte Serra dos Carajás e corpos correlatos (Dall'Agnol et al., 2005). O capítulo 5 apresentou o tipo A como o granito quente e seco que só se forma quando a base da crosta é aquecida com força, e aqui ele volta em outra escala. Por volta de 1,88 Ga, um episódio de magmatismo félsico varreu o Crá-

ton Amazônico inteiro, de Carajás a Roraima, deixando granitos, riolitos e ignimbritos numa área do tamanho de vários estados. É o evento Uatumã, uma das grandes províncias ígneas silícicas do planeta, as irmãs félsicas das províncias basálticas que fragmentam continentes (Bryan e Ferrari, 2013). Em Carajás, cúpulas rasas, apófises e fraturas puseram esse magma em contato com as coberturas e com os sistemas hidrotermais mais antigos.

A fonte térmica admite mais de um mecanismo. A queda da raiz de um orógeno, como a do capítulo 4, pode trazer manto quente para perto da base da crosta e gerar fusão sem deixar uma província basáltica exposta. Magma máfico acrescentado à base da crosta, extensão dentro da placa e uma anomalia térmica regional do manto também participam dos modelos publicados para o Uatumã. A ausência de basaltos preservados não escolhe sozinha entre eles. A delaminação permanece hipótese eficiente, não solução encerrada.

A comparação com a província de Gawler, na Austrália, é útil. Ali, granitos ferroanos de ca. 1,59 Ga, a suíte Hiltaba, acionaram uma crosta fértil e produziram Olympic Dam, o maior IOCG do mundo, com alteração de sódio e cálcio semelhante à de Carajás. O paralelo mostra que magmas graníticos pobres em cobre podem produzir depósitos gigantes quando estrutura, salmoura e fonte de metal convergem. Sustenta possibilidade de processo; não estabelece identidade de ambiente tectônico nem de fonte.

2. Aquíferos novos, caminhos antigos

A permanência de Carajás está na planta, não na água. Em 1,88 Ga, a erosão e a sedimentação já tinham criado algo que faltava aos regimes anteriores. Aquíferos, camadas de rocha porosa e permeável que armazenam e transmitem água, como as que abastecem poços hoje. Águas Claras e o conjunto Caninana-Paredão-Gorotire, arenitos e conglomerados depositados sobre o edifício neoarqueano depois do colapso riaciano, funcionavam como reservatórios de água de chuva e de rio. Falhas profundas ligavam essas coberturas ao embasamento e às cúpulas

dos granitos novos.

É como um prédio antigo que recebe água nova pelo mesmo encanamento. Os tubos, as conexões, as curvas e os pontos de vazamento permanecem. A água que passa hoje não é a que circulou no dia da inauguração. Em Carajás, a arquitetura hidráulica sobreviveu. Cada ciclo abasteceu a rede com aquíferos, águas, temperaturas e composições próprias.

Água que desce por aquíferos e por um embasamento fraturado aumenta o tempo de residência e a superfície de reação. Dissolve minerais, troca íons, incorpora cloro e outros solutos e pode evoluir para salmoura, pelo mesmo caminho que o capítulo 6 descreveu para a água do mar. Aquecimento e mistura com voláteis magmáticos ampliam sua capacidade de transportar metais. O fluido de 1,88 Ga pertence a esse circuito novo. A arquitetura, as fontes de metal e os volumes reativos constituem a herança.

A escapolita arqueana conserva o recibo de uma salmoura anterior. Ela demonstra que a crosta já havia hospedado circulação salina e registra parte da alteração que o novo fluido encontrou pelo caminho. Pode liberar componentes durante reações posteriores, mas o terceiro regime não precisa dessa contribuição. A salinização profunda dos novos aquíferos basta para fechar o balanço de água.

O estilo é mais raso e mais quebradiço que o dos regimes neoarqueanos. Sericita, clorita, epidoto, carbonato e veios tardios, minerais de temperatura mais baixa, atravessam setores extensos. Associações mais específicas alinham-se a falhas e cúpulas. A frequência regional dessas fases demonstra sobreposição ampla; atribuir cada grão ao pulso paleoproterozoico exige relação de corte, química mineral ou idade. Alteração fria também pode registrar resfriamento prolongado e eventos ainda mais jovens.

3. A assinatura granitófila

Breves oferece a expressão mais direta. A mineralização ocupa rochas da Formação Águas Claras e o teto alterado de uma intrusão. Quartzo e mica substituíram o granito e sua capa, formando o que se chama greisen, a alteração que um granito faz em si mesmo e em seu teto quando seus últimos fluidos, ricos em flúor, escapam. Tungstênio, estanho, molibdênio, bismuto e flúor acompanham cobre e ouro. É a associação dos depósitos de estanho do mundo inteiro, posta a serviço de um sistema de cobre. Skarn, o outro tipo de depósito de teto de granito, exige reação com encaixante carbonática e pertence a outro arranjo.

As idades unem depósitos e magmatismo, e vale dizer como foram medidas. A biotita, a mica escura, guarda o argônio produzido pelo decaimento do potássio desde que esfriou abaixo de uns trezentos graus; o método argônio-argônio lê esse relógio. Xenotímio e monazita, fosfatos de terras raras que crescem do fluido hidrotermal, guardam chumbo produzido pelo urânio e pelo tório e são lidos pelo método urânio-chumbo. A biotita registra 1.885 ± 4 Ma no Alvo 118, 1.886 ± 5 Ma em Breves, 1.896 ± 7 Ma em Estrela e 1.908 ± 7 Ma em Gameleira (Pollard et al., 2019). Os cronômetros medem coisas diferentes, cristalização, alteração ou resfriamento, e a concentração entre 1,91 e 1,86 Ga, somada às relações de campo, define o regime.

A proporção entre o componente do granito e a rocha atravessada explica a carga. Trajetos curtos a partir de cúpulas evoluídas preservam urânio, tungstênio, estanho, bismuto, molibdênio e flúor. Circuitos que percorrem maior volume de vulcânicas máficas adquirem mais cobre, ferro e ouro. A regra da fertilidade do caminho, do capítulo 6, opera como mistura, não como oposição entre granito estéril e basalto fértil.

Uma máquina de café separa o motor da fonte da carga. A máquina fornece calor e pressão. A água quente atravessa o pó e extrai dele o que chegará à xícara. Em Carajás, o granito pode fornecer calor, acidez, enxofre e os agentes que mantêm metais em solução sem fornecer a maior

parte do cobre. A pilha máfica lavada pelo fluido completa a carga. O minério é o produto do motor, da água e do caminho percorrido.

4. Cobre antigo, sulfetos novos

Os três sulfetos de cobre mais comuns formam uma escada de teor, e a escada tem número. A calcopirita, de ferro e cobre, tem cerca de 35 por cento de cobre. A bornita, com mais cobre e menos ferro, tem 63. A calcocita, só cobre e enxofre, tem 80.

$$\mathrm{CuFeS_2}\ (35\%\ \mathrm{Cu}) \rightarrow \mathrm{Cu_5FeS_4}\ (63\%\ \mathrm{Cu}) \rightarrow \mathrm{Cu_2S}\ (80\%\ \mathrm{Cu})$$

Quando um fluido substitui calcopirita por bornita ou calcocita, o teor do minério sobe, quase o dobro num caso e mais que o dobro no outro, sem que entre cobre novo. O que sai é ferro e enxofre. É uma concentração por subtração. A substituição registra mudanças na atividade de enxofre, na temperatura e no estado de oxidação do fluido, e pode incluir entrada ou saída de cobre, mas o ganho de teor, em si, não exige metal novo.

Salobo preserva quatro gerações sobrepostas, e a quarta é desta classe. O sistema exalativo de ca. 2,75 Ga preparou a pilha e seus condutos. Um primeiro regime IOCG operou em ca. 2,70 Ga; um segundo, em ca. 2,57 Ga, reorganizou e ampliou o corpo. O pulso Uatumã de ca. 1,88 Ga voltou a percorrer o depósito, substituiu sulfetos e concentrou o cobre já presente. Nesse quarto estágio, o modelo adotado aqui é melhoria de teor sem adição de metal.

O chumbo sustenta essa leitura, e exige uma palavra sobre o que ele mede. O valor Pb-Pb de 2.705 ± 42 Ma obtido em calcocita de Salobo (Réquia et al., 2003) é uma idade-modelo de um sistema com componentes misturados. Uma idade-modelo de chumbo misto se parece menos com a data impressa numa fotografia e mais com a genealogia das pessoas que aparecem nela. Ela informa de onde vieram os componentes; não revela quando o grupo se reuniu. O chumbo arqueano da calcocita registra a herança do sistema. Não data a cristalização do mineral, não individualiza as gerações de 2,70 e 2,57 Ga e não mede

o pulso de 1,88 Ga. Sua composição, porém, conserva chumbo arqueano e não acusa entrada de chumbo novo durante a substituição paleoproterozoica. O dado sustenta, assim, uma melhoria Uatumã do estoque antigo sem nova carga de metal. Relações de corte, texturas de substituição e relógios ligados a cada geração de minerais organizam a sequência; o chumbo misto registra a herança.

A troca de magnetita por hematita, que marca muitos setores rasos, também pede mais de uma variável. A hematita é o óxido de ferro mais oxidado, e sua presença no lugar da magnetita indica fluido mais oxidante, temperatura menor, interação com coberturas e com água de chuva, maior razão entre fluido e rocha, ou composição diferente da encaixante. A atmosfera posterior ao Grande Evento de Oxidação ampliou o reservatório de água oxidada na superfície e pode ter influenciado a recarga dos aquíferos. Entre o oxigênio atmosférico e a hematita profunda existe, contudo, um caminho hidrogeológico que precisa ser demonstrado. A mineralogia registra o estado do fluido no sítio, não a atmosfera de forma direta.

5. O andar raso

Veios tardios com adulária e texturas em pente cortam tramas anteriores em Salobo, Furnas, Pojuca e GT-46 (Tavares et al., 2022). A adulária é um feldspato potássico de baixa temperatura, e cristais de quartzo crescendo lado a lado a partir das paredes de uma fratura, como os dentes de um pente, mostram que o veio foi preenchido em espaço aberto, perto da superfície, onde a rocha se parte em vez de se dobrar.

Essa é a assinatura dos sistemas epitermais, os depósitos formados a menos de um ou dois quilômetros de profundidade e abaixo de trezentos graus, nos quais a água quente chega perto de ferver. Os campos de gêiseres de hoje são epitermais ao vivo, e seus veios de quartzo bandado e adulária são o que resta quando a fonte seca. A adulária pode marcar esses sistemas, sobretudo quando acompanha ebulição, quartzo bandado e zonação vertical. Sozinha, ela não fixa classe nem idade.

Aqui reaparece, perto da superfície, a física da garrafa de água com gás do capítulo 6. A queda de pressão pode produzir ebulição, abrir espaço e precipitar quartzo, adulária e sulfetos. A textura registra o momento em que o fluido deixou de conseguir carregar tudo o que trazia.

Essas ocorrências abrem um alvo real. Datação da adulária, inclusões fluidas, isótopos estáveis e mapeamento da relação com diques e granitos podem verificar se os veios pertencem ao regime de 1,88 Ga. Se pertencerem, Carajás preserva uma coluna que liga cúpulas greisenizadas, em profundidade, a níveis rasos quase de superfície. Se forem mais jovens, revelarão outra ativação da mesma rede. Os dois resultados interessam à exploração.

6. Serra Pelada

Serra Pelada é a imagem mais conhecida de Carajás, e não por sua geologia. Nos anos 1980, dezenas de milhares de homens escavaram ali, à mão, uma cava de dezenas de metros, e as fotografias dessa multidão subindo escadas de madeira com sacos de terra nas costas correram o mundo. O capítulo 14 volta a essa história. Aqui interessa o que havia embaixo dos sacos. Ouro em teores extremos, acompanhado de paládio e platina, numa associação que quase não existe em outro lugar.

O depósito ocupa a charneira de uma dobra reclinada na Formação Águas Claras, isto é, a zona de curvatura máxima de uma dobra deitada de lado. Siltitos ricos em carbono e arenitos dolomíticos hospedam zonas de hematita, de clorita e carbono, de alteração argílica e de silicificação. Carbono hidrotermal e matéria carbonosa participam de uma armadilha redutora. Um fluido oxidante que carregava os metais encontrou rocha rica em carbono, perdeu seu estado de oxidação e largou a carga (Berni et al., 2014, 2016, 2019). É o gradiente do capítulo 6, aqui na forma química mais nítida de toda a província.

O depósito confirma que a rede mineral alcançou rochas sedimentares jovens e armadilhas estruturais afastadas do BIF. Sua ligação exata

ao pulso de 1,88 Ga depende das idades disponíveis e de sua interpretação. Registros paleoproterozoicos em biotita e em minerais hidrotermais favorecem essa associação, mas a história de intemperismo intensa exige separar minério primário, enriquecimento tropical e redistribuição tardia.

A fonte dos metais do grupo da platina está imediatamente abaixo da armadilha. O Complexo Formiga, um corpo máfico-ultramáfico da mesma família de Luanga e Vermelho, ocorre sob a falha basal da unidade. A estrutura percorrida pelo fluido corta o complexo, atravessa o contato e alcança Serra Pelada. Reservatório, conduto e sítio de precipitação pertencem à mesma seção. O modelo deste livro extrai paládio e platina do Formiga, transporta-os num fluido oxidante e os concentra quando a falha encontra a cobertura carbonosa dobrada. Razões entre paládio e platina, isótopos de ósmio, assinaturas de selênio, telúrio e bismuto e inclusões minerais continuam importantes. Seu papel agora é medir a assinatura do Formiga, a eficiência da lixiviação e as mudanças sofridas durante o transporte. A geometria resolve a fonte; a geoquímica deve resolver o caminho.

7. Três regimes, uma planta

Com o terceiro regime, a biografia mineral principal de Carajás fecha, e vale lê-la de uma vez. Um sistema exalativo no fundo do mar, em 2,76 a 2,73 Ga, perfurou o horizonte de ferro e deixou os primeiros condutos. Um primeiro regime de cobre e ouro, em 2,72 a 2,68 Ga, usou as cúpulas graníticas neoarqueanas como motores e a água do mar como salmoura. Um segundo, em 2,61 a 2,45 Ga, reabriu a borda norte e alcançou volumes novos da pilha. Um terceiro, em 1,91 a 1,86 Ga, reaqueceu a crosta com os granitos do Uatumã e usou água de chuva das coberturas novas, salinizada no caminho. Novecentos milhões de anos, três fontes de calor, três águas diferentes, uma única rede de encanamento.

Cada regime acrescentou o que sua química permitia. Níquel e platina ficaram nos cumulatos desde o início. Cobre, ouro e ferro foram

lavados da pilha máfica pelas salmouras. Urânio, tungstênio, estanho e molibdênio chegaram com os granitos. O manganês esperou uma atmosfera com oxigênio e uma plataforma. A planta permaneceu. É por isso que um mapa de Carajás parece um palimpsesto, um pergaminho escrito, raspado e reescrito, em que a mesma linha serve a três textos.

8. Níveis de confiança

São evidência as idades agrupadas dos depósitos ligados aos granitos; cúpulas, greisens e a associação de urânio, tungstênio, estanho, bismuto, molibdênio e flúor; a sobreposição regional de alteração rasa; as substituições entre sulfetos e seus teores; as ocorrências tardias de adulária; a geologia, a mineralogia e os teores de Serra Pelada; e a repetição espacial de estruturas e volumes alterados (Grainger et al., 2008).

São modelos publicados a relação entre depósitos paleoproterozoicos e granitos tipo A, a mistura de fluidos magmáticos e externos, o enriquecimento de teor por substituição de sulfetos e a precipitação de ouro, paládio e platina em armadilhas carbonosas por fluidos oxidantes. A delaminação como fonte de calor e o paralelo com Gawler são modelos comparativos plausíveis.

São hipóteses deste livro a terceira ativação de um sistema provincial contínuo; a salinização profunda de águas das novas coberturas; a influência indireta da atmosfera posterior ao GOE sobre a hematita; a integração dos veios de adulária numa coluna epitermal; e, em Serra Pelada, o Complexo Formiga como fonte dos metais do grupo da platina, sustentado pela conexão estrutural e ainda sem assinatura e balanço de massa que o confirmem.

Conclusão

O terceiro regime encerra a biografia mineral principal de Carajás porque reúne, numa janela datada, as peças que os dois anteriores deixaram. Os granitos do Uatumã deram o calor. As coberturas deram a

água. A rede de falhas e contatos, aberta em 2,76 Ga e reeditada em cada ciclo, deu o caminho. A pilha máfica deu o cobre e o ouro, os granitos deram seus elementos próprios, e o Formiga, talvez, a platina. Nada disso exigiu que o Neoarqueano continuasse. Exigiu que ele tivesse deixado a planta.

A crosta continua ativa depois de 1,86 Ga, mas o distrito mineral deixa de ser o personagem. O próximo capítulo abre a lente para o continente que o contém, e acompanha o que Atlântica fez com sua gramática nos dois bilhões de anos seguintes.

Referências

Berni, G. V. et al. (2016). Ore mineralogy of the Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás, Brazil, and implications for ore-forming processes. Mineralium Deposita, 51, 781–795. https://doi.org/10.1007/s00126-015-0635-7

Berni, G. V. et al. (2019). Fluid geochemistry of the Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás, Brazil: exceptional metal enrichment caused by deep-reaching hydrothermal oxidation. Ore Geology Reviews.

Berni, G. V.; Heinrich, C. A.; Lobato, L. M.; Wall, V. J.; Rosière, C. A.; Freitas, M. A. (2014). The Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás, Brazil: geochemistry, mineralogy, and zoning of hydrothermal alteration. Economic Geology, 109, 1883–1899. https://doi.org/10.2113/econgeo.109.7.1883

Bryan, S. E.; Ferrari, L. (2013). Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: progress in our understanding over the last 25 years. Geological Society of America Bulletin, 125, 1053–1078.

Dall'Agnol, R. et al. (2005). Petrogenesis of the Paleoproterozoic, A-type granite suites of the Carajás metallogenic province, Brazil.

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 Neo-

proterozoic base- and precious-metal mineralisation. Ore Geology Reviews, 33, 451–489.

Pollard, P. J. et al. (2019). 40Ar-39Ar dating of Archean iron oxide Cu-Au and Paleoproterozoic granite-related Cu-Au deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil: implications for genetic models. Mineralium Deposita.

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.

Tavares, F. M. et al. (2022). Adularia occurrences in the Northern Copper Belt of the Carajás Mineral Province, Amazonian Craton, Brazil. Conference abstract.

Capítulo 10. Depois do reator: Atlântica e a rede que rasgou sem separar, ca. 1,88–0,48 Ga

Do relaxamento estateriano aos aulacógenos invertidos e aos mares que cobriram as costuras

Modelo de trabalho

A amálgama paleoproterozoica reuniu Amazônia, Oeste Africano e São Francisco-Congo em Atlântica. Seu interior foi reativado por riftes de idades e direções recorrentes. No Toniano, parte da rede chegou a oceano e parte abortou. A convergência brasiliana fechou os oceanos e inverteu os braços do interior; o colapso posterior instalou grábens e mares rasos sobre corredores herdados. Atlântica na classe de área da Laurentia, a equivalência continental das quatro famílias estruturais, o fechamento tardio dos braços por esforço transmitido e Clymene como mar interior são hipóteses deste livro; cada ligação tem grau de confiança próprio.

Atlântica · cráton · código de barras · Columbia · Rodínia · Gondwana · tafrogênese · aulacógeno · hiperextensão · ofiolito · Araguaia · Damara · Brasiliano · colapso · sinéclise · ca. 1,88–0,48 Ga

Resumo

Depois de 1,88 Ga, a história deixa o distrito mineral e acompanha o continente que o continha. Atlântica foi proposta para reunir blocos hoje distribuídos ao redor do Atlântico Sul, amalgamados pelas colisões de ca. 2,2 a 1,9 Ga que o capítulo 8 contou. Amazônia, Oeste Africano e São Francisco-Congo formam seu núcleo mais defensável. São Luís e o embasamento da Flórida ajudam a reconstruir as bordas; a posição do Kaapvaal continua mais incerta.

O capítulo usa dois instrumentos já apresentados. O código de barras, do capítulo 5, compara idades de diques, suítes magmáticas, riftes e deformações entre blocos. A gramática estrutural, do capítulo 8, compara as direções que eventos sucessivos reutilizam. Coincidências de idade só ganham significado paleogeográfico quando convergem com paleomagnetismo, proveniência, continuidade de terrenos e geometria de margens. Direções recorrentes demonstram herança local; sua equivalência entre crátons exige teste.

Atlântica sofreu rifteamento no Estateriano, permaneceu ligada às montagens de Columbia e de Rodínia e começou a rasgar em rede no Toniano. Alguns segmentos alcançaram crosta oceânica; outros ficaram em hiperextensão ou abortaram. A montagem do Gondwana consumiu os domínios oceânicos e transmitiu encurtamento aos braços do interior. Araguaia, Gurupi, Paraguai, Araçuaí e o Damara interno ocupam posições diferentes nesse espectro. Entre ca. 0,54 e 0,48 Ga, o colapso abriu bacias e permitiu que mares rasos cobrissem corredores quentes e subsidentes. Atlântica não sobrevive como placa intacta. Sobrevive como substrato, conjunto de suturas e memória mecânica dentro do Gondwana e, depois, da América do Sul.

1. O encaixe que todo mundo vê

Abra um mapa-múndi e olhe para o Atlântico Sul. A costa do Brasil cabe na costa da África como duas peças de quebra-cabeça, e essa observação, feita por quem quer que tenha olhado um mapa desde o século XVI, foi o primeiro argumento de Alfred Wegener para a deriva dos continentes. O encaixe é real. Há cento e vinte milhões de anos, Brasil e África eram um bloco só, e o oceano que os separa nasceu de um rifte que a gramática do capítulo 8 ajuda a explicar.

Este capítulo trata de um encaixe mais antigo e mais profundo, que não se vê na linha da costa. Quando se apagam os sedimentos jovens e se olha para o embasamento, as faixas de rochas de 2,2 a 1,9 Ga do Brasil continuam na África Ocidental com as mesmas idades, as mesmas rochas e as mesmas direções. O ciclo Transamazônico de um lado é o Birimiano do outro (Ledru et al., 1994). O que o rifte cretáceo separou já era um continente desde o Riaciano, e esse continente é o assunto daqui.

Antes de nomeá-lo, uma palavra que o livro vem usando e que merece definição. Cráton é um pedaço de continente que parou de se deformar há muito tempo, em geral desde o Precambriano, e que atravessa os ciclos seguintes como peça rígida. Tem crosta antiga, raiz de manto frio e espesso, a quilha do capítulo 2, e borda onde as colisões mais jovens batem sem entrar. O Cráton Amazônico, que contém Carajás, é um deles. O Oeste Africano é outro. São Francisco e Congo, hoje separados pelo Atlântico, formam um terceiro. Crátons são as peças; os cinturões de rochas deformadas entre eles são as costuras.

2. As peças de Atlântica

Rogers (1996) chamou de Atlântica o continente formado em torno de 2,0 Ga por terrenos hoje distribuídos ao redor do Atlântico Sul. O nome perdeu espaço para as reconstruções de Columbia, o supercontinente maior em que ele se inseria, mas o objeto geológico permaneceu.

O núcleo tem três peças. O Cráton Amazônico inclui Carajás e as províncias que foram sendo coladas a oeste ao longo do Proterozoico. O Cráton Oeste-Africano prolonga o sistema paleoproterozoico do outro lado do oceano moderno. São Francisco e Congo formaram um bloco coerente até a abertura cretácea do Atlântico. Nas bordas há fragmentos que viajaram. O cráton de São Luís, no Maranhão, tem afinidade oeste-africana e ficou do lado brasileiro quando o Atlântico abriu (Klein e Moura, 2008). O embasamento da Flórida, conhecido como Suwannee, é um pedaço de Gondwana que ficou preso à América do Norte quando o Atlântico Central abriu (Mueller et al., 1994, 2014). O paleomagnetismo recente sustenta proximidade entre as Guianas e a África Ocidental em ca. 2,1 a 2,0 Ga, ainda com liberdade de rotação e de translação (Antonio et al., 2021).

Kaapvaal, o cráton arqueano da África do Sul, ocupa a borda do modelo. Sua inclusão numa Atlântica ampliada depende da natureza e da largura dos domínios do Damara, a faixa de rochas deformadas que corre pela Namíbia entre o Congo e o Kalahari, e de sua posição anterior à montagem do Gondwana. O capítulo mantém essa possibilidade como variante. A reconstrução central funciona sem ela.

A área total de Atlântica pode ter alcançado a ordem de dez milhões de quilômetros quadrados, pouco maior que o Brasil de hoje, dependendo do traçado das margens cobertas e da inclusão de blocos periféricos. Compará-la à Laurentia, o núcleo da América do Norte, comunica classe de grandeza, não medida cartográfica. O argumento importante é térmico e mecânico. Havia interior continental amplo o bastante para conservar estruturas, acumular coberturas, tapar o calor do manto, como o capítulo 3 previu, e responder de modo desigual às perturbações do manto e das margens.

3. Como ler o código de barras

O capítulo 5 apresentou o código de barras como a certidão de um bloco. Bleeker (2003) deu ao método sua forma mais poderosa ao propor que os enxames de diques e os grandes eventos magmáticos funci-

onem como linhas datadas nos fragmentos cratônicos. Um enxame de diques é uma família de centenas de fraturas paralelas preenchidas por basalto, injetadas em poucos milhões de anos quando um continente começa a rasgar. Se dois crátons hoje distantes têm enxames da mesma idade, com a mesma química e a mesma orientação depois de desfeitas as rotações, eles provavelmente eram vizinhos quando o enxame se formou (Ernst e Bleeker, 2010). O método ganhou resolução com a datação de badeleíta, um óxido de zircônio que cristaliza em basaltos e carrega o relógio urânio-chumbo.

Atlântica oferece linhas robustas e linhas sugestivas. A amálgama de 2,2 a 2,0 Ga é o traço mais forte porque combina idade, sistema orogênico, proveniência e paleomagnetismo. Os pulsos estaterianos entre ca. 1,88 e 1,70 Ga aparecem na Amazônia e no São Francisco-Congo, mas são de idades diferentes e podem registrar motores distintos (Teixeira et al., 2019; Cederberg et al., 2016; Caxito et al., 2020). Magmatismo e riftes tonianos entre ca. 1,05 e 0,90 Ga, seguidos por hiperextensão entre ca. 0,77 e 0,73 Ga, desenham outra família ampla. O colapso cambriano entre ca. 0,54 e 0,48 Ga fecha a sequência.

Pareamentos mais finos exigem cautela. Lavras I, no São Francisco, e Buritirama, em Carajás, ambos perto de 2,55 Ga, formam hipótese de vizinhança, ainda sem geometria compartilhada demonstrada. Sereno, Gurupi, Amapá e Minas têm idades próximas de 2,0 Ga, mas a equivalência entre seus campos de esforço permanece aberta. Uma idade comum pode nascer de um evento continental, de respostas independentes ao mesmo ciclo ou de coincidência.

A segunda camada é a gramática do capítulo 8. As quatro famílias de direções reaparecem em Carajás e em outros segmentos da plataforma, e as relações de corte mostram que são reutilizadas por eventos de idades diferentes. Isso prova memória em cada domínio. Transformá-las numa língua aprendida durante uma única colisão, falada por todos os blocos, exigiria demonstrar idade de criação, cinemática original e continuidade entre crátons. O livro usa a expressão gramática para a rede herdada e reeditada, sem fixar todas as letras no Riaciano.

4. O que um rifte pode virar

Este capítulo acompanha riftes que tiveram destinos diferentes, e vale apresentar a escada antes de subi-la. Um rifte continental começa quando a litosfera se estica e se parte, como no capítulo 3, e o Rift da África Oriental de hoje é o degrau de entrada, com seus vales, lagos e vulcões. Riftes costumam nascer em três braços a partir de um ponto, como as rachaduras de um para-brisa atingido por uma pedra. Em geral dois braços prosperam e o terceiro morre, e o braço morto recebe o nome de aulacógeno. O exemplo clássico é a fossa do Benue, na Nigéria, o braço que apontava para dentro da África quando o Atlântico Sul abriu, ficou para trás e se encheu de sedimento. Um aulacógeno é um rifte que não deu em oceano.

Se o estiramento continua, a crosta afina até quase desaparecer e o manto sobe até o fundo do mar sem que uma dorsal se instale. É a hiperextensão, e a margem entre a Península Ibérica e a Terra Nova, no Atlântico Norte, mostra o estado ao vivo, com manto serpentinizado exposto no assoalho a centenas de quilômetros da costa. Se o estiramento continua ainda mais, nasce uma dorsal e se fabrica crosta oceânica. Quando esse oceano fecha, uma lasca da crosta e do manto oceânicos pode ficar presa no continente. É o ofiolito, a prova de que houve oceano, e o de Omã, na Arábia, é o mais completo do mundo. Rifte, aulacógeno, hiperextensão, oceano. Os quatro degraus deixam rochas diferentes, e é por elas que se decide a que altura cada braço de Atlântica chegou.

Há ainda um destino de volta. Um rifte, abortado ou não, pode ser apertado depois por uma colisão vizinha. Suas falhas normais voltam a se mover ao contrário, suas bacias são levantadas e dobradas. Chama-se inversão, e é o processo que dá a este capítulo sua segunda metade.

5. O rasgo estateriano

O pulso de ca. 1,88 Ga produziu a província Uatumã e os granitos tipo A que reativaram Carajás no capítulo 9. Mais ao norte, as soleiras

de Avanavero, de ca. 1,79 Ga, registram uma grande província máfica (Bispo-Santos et al., 2014). No São Francisco, os enxames de diques de Pará de Minas, os granitos São Timóteo e Borrachudos e as fases iniciais do rifte do Espinhaço concentram-se entre ca. 1,80 e 1,70 Ga (Danderfer et al., 2009; Cederberg et al., 2016). O Granito Uaiãpi registra ca. 1,75 Ga no Amapá (Vasquez e Lafon, 2001). Chama-se tafrogênese a esse rifteamento generalizado de um continente que não chega a separá-lo, e o Estateriano foi, em Atlântica, uma época de tafrogênese.

A diferença de idades impede tratar tudo como descarga instantânea de um único motor. O padrão pode reunir queda de raiz depois das colisões, plumas, magma na base da crosta e extensão dentro da placa modulada pela espessura da litosfera. Continentes grandes isolam o manto e favorecem instabilidade, como o cobertor do capítulo 3; ainda assim, cada província precisa de sua petrologia e de sua geometria. O tamponamento térmico é contexto, não datação de causa.

A ausência de magmatismo conhecido em São Luís-Gurupi durante algumas dessas janelas pode refletir distância do motor, erosão, cobertura ou amostragem (Klein et al., 2005). Não constitui, sozinha, o terceiro ponto de um gradiente. A previsão útil é procurar mudança sistemática de volume, composição e idade entre o eixo Uatumã, as bordas amazônicas e o São Francisco-Congo.

O Mesoproterozoico, de 1,6 a 1,0 Ga, também separa margem e interior. A borda ocidental amazônica cresceu nas províncias Rio Negro-Juruena, Rondoniano-San Ignacio e Sunsás, arcos e colisões sucessivos que foram colando terreno novo a oeste de Carajás (Cordani et al., 2010). A colisão Sunsás-Llano ligou a Amazônia à Laurentia na montagem de Rodínia, o supercontinente de 1,0 Ga (Tohver et al., 2002). No interior, Espinhaço e Paramirim acumularam coberturas e reativações (Cruz e Alkmim, 2017); K'Mudku transmitiu deformação para as Guianas. A conexão SAMBA, uma reconstrução que aproxima o norte da Amazônia e a Báltica, hoje a Escandinávia e a Rússia europeia, em partes desse intervalo, foi proposta com apoio paleomagnético e ainda tem ajustes em debate (Johansson, 2009; Bispo-Santos et al., 2014).

6. A rede toniana

Entre ca. 1,05 e 0,90 Ga, no Toniano, magmatismo e subsidência aparecem em vários corredores de Atlântica ao mesmo tempo. Monte Santo e Serra da Estrela marcam a borda oriental amazônica, perto de Carajás; Lagoa Real, Pedro Lessa e Formiga atravessam o São Francisco; Noqui e os grupos Zadiniano e Mayumbiano registram extensão no Congo (Tack et al., 2001); Capelinha ancora a margem do futuro Araçuaí (Pedrosa-Soares et al., 2001). Os eventos não precisam pertencer a uma única junção de três braços. Juntos, revelam uma litosfera submetida a extensão distribuída, rachando em rede.

A estrutura prévia orientou os segmentos da rede. Riftes aproveitam zonas de fraqueza, contatos de blocos e anisotropias da crosta, a gramática em ação. Falhas de transferência conectam braços de direções diferentes e recortam promontórios e reentrâncias, e a analogia com margens rifteadas modernas ajuda a prever cantos conjugados (Thomas, 2006). Cada pareamento, porém, precisa de pontos de amarração independentes.

O destino variou, e a escada da seção 4 ajuda a ler. Monte Orebe, em ca. 820 Ma, preserva material oceânico no Riacho do Pontal. Quatipuru, no Araguaia, reúne harzburgito serpentinizado e cromitito em ca. 757 Ma, porém carece de uma sequência ofiolítica completa, e pode registrar manto subcontinental exumado durante hiperextensão, o degrau da Ibéria, não o de Omã (Paixão et al., 2008). Boca Nova e diques de ca. 0,77 a 0,73 Ga marcam a continuação do esforço. Hiperextensão, crosta oceânica restrita e oceano maduro são estados de um contínuo, não rótulos intercambiáveis.

A frase rasgou sem separar descreve o resultado em partes do continente. São Francisco e Congo permaneceram unidos, com o braço de Araçuaí entre eles rasgando fundo sem romper (Alkmim et al., 2006). Vários braços do interior abortaram; outros segmentos abriram domínios oceânicos depois consumidos. Atlântica deixou de ser uma placa única, mas muitos de seus blocos conservaram vizinhanças e foram novamente reunidos no Gondwana. Um vidro trincado que ninguém

puxou.

7. Araguaia e Damara, comparação e não identidade

O Araguaia, a faixa que corre de norte a sul pela borda leste de Carajás, e o Damara interno, na Namíbia, ocupam corredores intracontinentais longos e registram extensão seguida de inversão. O Araguaia tem sucessão de sedimentos metamorfizados, lascas de rocha ultramáfica, vergência sobre o cráton e metamorfismo que cresce para o interior da faixa (Tavares et al., 2017). Faltam, até agora, um arco magmático neoproterozoico bem definido, uma sequência ofiolítica completa e metamorfismo de alta pressão regional, as três provas de um oceano largo. Esses elementos favorecem hiperextensão e inversão, mas a preservação incompleta impede transformar ausência em prova absoluta.

O Damara interno tem história mais controversa. A interpretação como aulacógeno é antiga (Martin e Porada, 1977); o Khomas foi também descrito como prisma de acresção, o que exigiria subducção (Kukla e Stanistreet, 1991), e o Matchless registra magmatismo oceânico ou de bacia marginal. A largura do domínio oceânico entre Congo e Kalahari permanece discutida (Gray et al., 2008). O braço pode ter evoluído de rifte continental a oceano restrito antes do fechamento. Essa possibilidade é compatível com uma rede heterogênea.

A comparação funciona pela arquitetura. Reentrâncias continentais, plataformas nas bordas, extensão profunda e inversão tardia. Ela não demonstra que Araguaia e Damara eram braços conjugados de um mesmo rifte. A conexão por meio dos Rokelides e de São Luís-Guiné merece teste por proveniência, paleocorrentes, idades máximas de deposição e assinaturas do manto (Villeneuve, 2008; Villeneuve e Rossignol, 2024). O capítulo a apresenta como programa de reconstrução.

8. O fechamento brasiliano

O Brasiliano é o ciclo de colisões do fim do Neoproterozoico, entre ca. 0,65 e 0,50 Ga, que montou o Gondwana Ocidental; na África se chama Pan-Africano. A montagem envolveu arcos, oceanos e colisões reais. Goiás, partes da Borborema, Ribeira, Dom Feliciano e segmentos africanos registram acresção e subducção (Cordani et al., 2013; Konopásek et al., 2020). A polaridade varia no espaço e no tempo; reduzi-la a uma única margem ativa amazônica apagaria mudanças de placa e microcontinentes. O fechamento foi diácrono e segmentado.

Ao mesmo tempo, faixas do interior podem resultar de inversão. O critério precisa reunir conteúdo da bacia, magmatismo, metamorfismo, estrutura profunda e cronologia. A ausência de arco ganha força quando acompanhada por embasamento contínuo sob a faixa, proveniência dos dois lados, afinamento prévio e metamorfismo incompatível com subducção profunda. Araguaia e Gurupi são candidatos fortes dentro do modelo deste livro. Paraguai e Araçuaí têm geometrias confinadas, mas continuam cercados por debates próprios (Alkmim et al., 2006; Cerri et al., 2022). O Damara interno admite crosta oceânica restrita.

Abra uma caixa de papelão pelas emendas e depois tente comprimi-la. Ela não amassa ao acaso. As dobras e os cortes antigos voltam a concentrar a deformação. Um rifte invertido guarda essa biografia dupla. Primeiro foi corredor de extensão; depois recebeu o encurtamento.

A convergência transmitida depois da colisão oferece um mecanismo para inverter aulacógenos, e o Sereno do capítulo 8 já mostrou o princípio. Enquanto uma zona de subducção absorve movimento, o interior pode permanecer pouco deformado. O travamento da margem transfere esforço para dentro e reativa os braços antigos. O modelo prevê inversão posterior ao clímax da colisão adjacente e, em alguns casos, rejuvenescimento em direção ao interior.

A diferença de idades no sistema Damara, com Kaoko, Gariep e o braço interno alcançando picos em janelas diferentes, é compatível com pro-

pagação (Gray et al., 2008). Gurupi-Araguaia e Paraguai oferecem os testes sul-americanos. A ordem ainda precisa ser comparada com o erro das idades, a duração de cada evento e possíveis sobreposições térmicas. Fechamento por transmissão é hipótese mecânica falsificável, não lei estabelecida.

9. Colapso e mares rasos

Entre o Ediacarano terminal e o Cambriano, o relaxamento das cordilheiras recém-formadas abriu grábens, vales limitados por falhas, sobre zonas quentes, espessadas ou previamente fraturadas, como o capítulo 8 descreveu para o colapso riaciano. Jaibaras acompanha o lineamento Transbrasiliano (Oliveira e Mohriak, 2003); Piriá sela parte da deformação do Gurupi; Camaquã e Castro registram bacias de transição no sul (Almeida et al., 2012; Paim et al., 2014); diques e granitos entre ca. 0,54 e 0,48 Ga marcam o magmatismo tardio, e os diques de 535 Ma de Carajás pertencem a esse grupo. As idades variam e algumas bacias começaram antes do colapso geral, de modo que o antigo estágio de transição reúne histórias regionais, não um único instante.

Transgressões rasas ocuparam corredores subsidentes e conectaram bacias. Essa geometria oferece uma alternativa a um oceano Clymene contínuo, um oceano hipotético que separaria a Amazônia dos demais blocos até o Cambriano. Parte do registro pode pertencer a um mar interior raso, instalado sobre crosta continental afinada e faixas recém-colapsadas, como os mares que hoje cobrem partes da Europa e da Indonésia (Cordani et al., 2013). A hipótese precisa respeitar onde existem rochas oceânicas e onde os dados de proveniência exigem separação maior.

Com o resfriamento, a subsidência se alargou, e aqui entra a última palavra do vocabulário do capítulo. Sinéclise é uma bacia enorme e rasa, de interior de continente, que afunda devagar durante centenas de milhões de anos sem que nenhuma falha grande a limite, como um prato que vai cedendo. O Parnaíba aproveitou o corredor do Transbrasiliano e o sistema Jaibaras; o Paraná recobriu uma colagem de terrenos em

torno do Paranapanema do capítulo 8 (Milani e Ramos, 1998). As sinéclises não são simples moldes das suturas, mas a heterogeneidade do embasamento condicionou seus depocentros, suas falhas e sua história térmica (Almeida, 1969). A plataforma fanerozoica nivelou por cima um mosaico ainda ativo por baixo.

10. Níveis de confiança

Pertencem ao terreno firme as idades dos principais pulsos; a correlação entre o Birimiano e o Transamazônico; a afinidade oeste-africana de São Luís; a origem gondwânica de Suwannee; a união entre São Francisco e Congo; as grandes linhas paleomagnéticas disponíveis; a existência de extensão toniana, materiais oceânicos em alguns corredores e hiperextensão em outros; e as idades gerais da montagem e do colapso gondwânicos.

São modelos publicados Atlântica, o código de barras magmático, a conexão SAMBA, a conexão Sunsás-Llano, o orógeno confinado de Araçuaí-Congo Ocidental, a interpretação intracontinental do Araguaia, a herança tectônica de promontórios e reentrâncias e o papel de riftes abortados na montagem continental. Cada modelo tem variantes incompatíveis entre si; o capítulo usa sua interseção.

São hipóteses deste livro o pareamento Lavras I-Buritirama; a equivalência continental das quatro famílias estruturais; a quina amazônica sob o Parnaíba; Atlântica na classe de área da Laurentia; Kaapvaal ligado por um Damara predominantemente intracontinental; Araguaia e Damara como partes da mesma rede; o fechamento tardio de aulacógenos por transmissão; e Clymene como mar interior de colapso. Algumas podem sobreviver sem as outras. Os testes são concretos. Zircões e isótopos do embasamento perfurado sob o Parnaíba; paleomagnetismo de alta qualidade nas linhas de 2,55, 1,88 a 1,70 e 1,0 a 0,75 Ga; estatística de lineamentos acompanhada de cinemática e idade; sísmica profunda sob Araguaia, Paraguai e Damara; proveniência pareada nas margens propostas; e comparação da idade das colisões externas com a inversão dos braços internos.

Conclusão

Atlântica devolve unidade a uma história fragmentada por oceanos modernos e vocabulários nacionais. O continente nasceu das colisões paleoproterozoicas, acumulou calor e coberturas, cresceu pela margem amazônica e entrou nas montagens de Columbia e de Rodínia. No Toniano, sua litosfera abriu em rede. Alguns braços fizeram oceano; outros expuseram manto ou morreram como riftes. O Brasiliano consumiu os domínios oceânicos e apertou os corredores do interior. O colapso cobriu parte das cicatrizes com grábens, mares e, depois, sinéclises.

O código de barras torna essa biografia testável, desde que cada linha carregue mais que uma idade. Geoquímica, polaridade, paleomagnetismo, proveniência e estrutura precisam concordar. A memória mecânica também deixa previsões. Direções devem ter relações de corte coerentes; aulacógenos invertidos devem conservar embasamento e afinamento sob a deformação; a transmissão de esforço deve aparecer na ordem dos relógios.

A melhor versão da tese admite um continente parcialmente desfeito, uma rede desigual e um fechamento segmentado. Ela perde a elegância de um único zíper e ganha a geologia real das placas. Atlântica continua sob a plataforma sul-americana como mosaico soldado, rasgado, invertido e afogado. Carajás ocupa seu interior antigo. A margem ocidental permanece móvel e cresce nos Andes; o interior conserva as cicatrizes sob as bacias. A plataforma é memória. A margem, apetite. O capítulo seguinte desce de novo a Carajás para procurar, sob essa plataforma, o que sobrou da quilha, e o que ela guardou.

Referências

Alkmim, F. F.; Marshak, S.; Pedrosa-Soares, A. C.; Peres, G. G.; Cruz, S. C. P.; Whittington, A. (2006). Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. Precambrian Research, 149, 43–64. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.007

Almeida, F. F. M. (1969). Diferenciação tectônica da Plataforma Brasileira. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 23, Salvador, Anais, 29–46.

Almeida, R. P. et al. (2012). Contribuições para a cronoestratigrafia da Bacia do Camaquã: o vulcanismo Rodeio Velho em 535 Ma. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 84, 2.

Antonio, P. Y. J. et al. (2021). Paleomagnetic confirmation of the "unorthodox" configuration of Atlantica between 2.1 and 2.0 Ga. Precambrian Research, 353, 106021.

Bispo-Santos, F.; D'Agrella-Filho, M. S. et al. (2014). Was there SAMBA in Columbia? Paleomagnetic evidence from 1790 Ma Avanavero mafic sills (northern Amazonian Craton). Precambrian Research, 244, 139–155. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.11.002

Bleeker, W. (2003). The late Archean record: a puzzle in ca. 35 pieces. Lithos, 71, 99–134. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.07.003

Brando Soares, M.; Selby, D.; Robb, L.; Corrêa Neto, A. V. (2021). Sulfide recrystallization and gold remobilization during the 2.0 Ga stage of the Minas orogeny. Economic Geology, 116, 1455–1466. https://doi.org/10.5382/econgeo.4830

Caxito, F. A. et al. (2020). A magmatic barcode for the São Francisco Craton: contextual in-situ SHRIMP U-Pb baddeleyite and zircon dating of the Lavras, Pará de Minas and Formiga dyke swarms and implications for Columbia and Rodinia reconstructions. Lithos, 374–375, 105708.

Cederberg, J.; Söderlund, U.; Oliveira, E. P.; Ernst, R. E.; Pisarevsky, S. A. (2016). U-Pb baddeleyite dating of the Proterozoic Pará de Minas dyke swarm in the São Francisco craton (Brazil) –- implications for tectonic correlation with the Siberian, Congo and North China cratons. GFF, 138, 219–240.

Cerri, R. I.; Warren, L. V.; Varejão, F. G.; Silva, A. J. C.; Lana, C.; Assine, M. L. (2022). So close and yet so far: U-Pb geochronological constraints of the Jaibaras Rift Basin and the intracratonic Parna-

íba Basin in SW Gondwana. Geological Magazine, 159, 837–856. https://doi.org/10.1017/S0016756821000236

Cordani, U. G.; Fraga, L. M.; Reis, N.; Tassinari, C. C. G.; Brito-Neves, B. B. (2010). On the origin and tectonic significance of the intra-plate events of Grenvillian-type age in South America. Journal of South American Earth Sciences, 29, 143–159.

Cordani, U. G.; Pimentel, M. M.; Ganade de Araújo, C. E.; Basei, M. A. S.; Fuck, R. A.; Girardi, V. A. V. (2013). Was there an Ediacaran Clymene Ocean in central South America? American Journal of Science, 313, 517–539. https://doi.org/10.2475/06.2013.01

Cruz, S. C. P.; Alkmim, F. F. (2017). The Paramirim Aulacogen. In: Heilbron, M.; Cordani, U. G.; Alkmim, F. F. (eds.), São Francisco Craton, Eastern Brazil. Springer, 97–115. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01715-0_6

Danderfer, A.; De Waele, B.; Pedreira, A. J.; Nalini, H. A. (2009). New geochronological constraints on the geological evolution of Espinhaço basin within the São Francisco Craton, Brazil. Precambrian Research, 170, 116–128.

De Castro, M. P.; Queiroga, G.; Martins, M.; Alkmim, F.; Pedrosa-Soares, A.; Dussin, I.; Souza, M. E. (2019). An early Tonian rifting event affecting the São Francisco-Congo paleocontinent recorded by the Lower Macaúbas Group, Araçuaí Orogen, SE Brazil. Precambrian Research, 331, 105351. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105351

Ernst, R.; Bleeker, W. (2010). Large igneous provinces (LIPs), 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.

Fossen, H.; Cavalcante, C.; Konopásek, J.; Meira, V. T.; Almeida, R. P.; Hollanda, M. H. B. M.; Trompette, R. (2020). A critical discussion of the subduction-collision model for the Neoproterozoic Araçuaí-West Congo orogen. Precambrian Research, 343, 105715. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105715

Gray, D. R. et al. (2008). A Damara orogen perspective on the assembly of southwestern Gondwana. Geological Society, London, Special Publications, 294, 257–278.

Grenholm, M.; Jessell, M.; Thébaud, N. (2019). A geodynamic model for the Paleoproterozoic (ca. 2.27–1.96 Ga) Birimian Orogen of the southern West African Craton. Earth-Science Reviews, 192, 138–193.

Johansson, Å. (2009). Baltica, Amazonia and the SAMBA connection –- 1000 million years of neighbourhood during the Proterozoic? Precambrian Research, 175, 221–234. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.09.011

Klein, E. L.; Moura, C. A. V. (2008). São Luís craton and Gurupi belt (Brazil): possible links with the West African craton and surrounding Pan-African belts. Geological Society, London, Special Publications, 294, 137–151.

Klein, E. L.; Moura, C. A. V.; Krymsky, R.; Griffin, W. L. (2005). The Gurupi belt, northern Brazil: lithostratigraphy, geochronology, and geodynamic evolution. Precambrian Research, 141, 83–105.

Konopásek, J.; Cavalcante, C.; Fossen, H.; Janoušek, V. (2020). Adamastor –- an ocean that never existed? Earth-Science Reviews, 205, 103201. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103201

Kukla, P. A.; Stanistreet, I. G. (1991). Record of the Damaran Khomas Hochland accretionary prism in central Namibia: refutation of an "ensialic" origin of a Late Proterozoic orogenic belt. Geology, 19, 473–476.

Ledru, P.; Johan, V.; Milési, J. P.; Tegyey, M. (1994). Markers of the last stages of the Palaeoproterozoic collision: evidence for a 2 Ga continent involving circum-South Atlantic provinces. Precambrian Research, 69, 169–191. https://doi.org/10.1016/0301-9268(94)90085-X

Lobato, L. M.; Pimentel, M. M.; Cruz, S. C. P.; Machado, N.; Noce, C. M.; Alkmim, F. F. (2015). U-Pb geochronology of the Lagoa Real uranium district, Brazil: implications for the age of the uranium mineralization. Journal of South American Earth Sciences, 58, 129–140. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.12.005

Martin, H.; Porada, H. (1977). The intracratonic branch of the Damara Orogen in South West Africa. Precambrian Research, 5, 311–357.

Milani, E. J.; Ramos, V. A. (1998). Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, 28, 473–484.

Mueller, P. A. et al. (1994). Precambrian zircons from the Florida basement: a Gondwanan connection. Geology, 22, 119–122.

Mueller, P. A. et al. (2014). The Suwannee suture: significance for Gondwana-Laurentia terrane transfer and formation of Pangaea. Gondwana Research, 26, 365–373. https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.06.018

Oliveira, D. C.; Mohriak, W. U. (2003). Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, northern Brazil. Marine and Petroleum Geology, 20, 351–365.

Paim, P. S. G.; Chemale Jr., F.; Wildner, W. (2014). Estágios evolutivos da Bacia do Camaquã (RS). Ciência e Natura, 36, 183–193. https://doi.org/10.5902/2179460X13748

Paixão, M. A. P.; Nilson, A. A.; Dantas, E. L. (2008). The Neoproterozoic Quatipuru ophiolite and the Araguaia fold belt, central-northern Brazil, compared with correlatives in NW Africa. Geological Society, London, Special Publications, 294, 297–318. https://doi.org/10.1144/SP294.16

Pedrosa-Soares, A. C.; Noce, C. M.; Wiedemann, C. M.; Pinto, C. P. (2001). The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. Precambrian Research, 110, 307–323.

Rogers, J. J. W. (1996). A history of continents in the past three billion years. The Journal of Geology, 104, 91–107.

Tack, L.; Wingate, M. T. D.; Liégeois, J.-P.; Fernandez-Alonso, M.; Deblond, A. (2001). Early Neoproterozoic magmatism (1000–910 Ma) of the Zadinian and Mayumbian Groups (Bas-Congo): onset of Rodinia

rifting at the western edge of the Congo craton. Precambrian Research, 110, 277–306. https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00192-9

Tavares, F. M.; Rosa-Costa, L. T.; Lago, A. L. (2017). Tectônica. In: Rosa-Costa, L. T. et al. (orgs.), ARIM RENCA. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Belém, cap. 4.

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. Journal of South American Earth Sciences, 88, 238–252.

Teixeira, W.; Hamilton, M. A.; Girardi, V. A. V.; Faleiros, F. M.; Ernst, R. E. (2019). U-Pb baddeleyite ages of key dyke swarms in the Amazonian Craton (Carajás/Rio Maria and Rio Apa areas): tectonic implications for 1880, 1110 Ma, 535 Ma and 200 Ma events. Precambrian Research, 329, 138–155.

Thomas, W. A. (2006). Tectonic inheritance at a continental margin. GSA Today, 16(2), 4–11.

Tohver, E.; van der Pluijm, B. A.; Van der Voo, R.; Rivers, G.; Leandro, R. (2002). Paleogeography of the Amazon craton at 1.2 Ga: early Grenvillian collision with the Llano segment of Laurentia. Earth and Planetary Science Letters, 199, 185–200.

Vasquez, M. L.; Lafon, J. M. (2001). Magmatismo tipo A de 1,75 Ga na porção oriental do Escudo das Guianas — Granito Uaiãpi. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 7, Belém.

Villeneuve, M. (2008). Review of the orogenic belts on the western side of the West African craton: the Bassarides, Rokelides and Mauritanides. Geological Society, London, Special Publications, 297, 169–201.

Villeneuve, M.; Rossignol, C. (2024). Linking the Neoproterozoic to Early Paleozoic belts bordering the West African and Amazonian cratons. Minerals, 14, 48. https://doi.org/10.3390/min14010048

Capítulo 11. A quilha que sobreviveu

Diamantes de Carajás, raízes cratônicas e as janelas que levaram o manto aos rios

Modelo de trabalho

Os diamantes aluvionares registram uma quilha cratônica preservada em retalhos sob Carajás e Rio Maria. O estoque pode reunir gerações arqueanas distintas. Sua entrega principal permanece sem idade. O rifte toniano do Araguaia é o candidato preferido, e o colapso cambriano, uma alternativa. Morfologia, inclusões, geofísica e drenagem definem testes e áreas, sem substituir a descoberta do corpo primário. A sobrevivência da quilha em retalhos, as gerações propostas e a entrega toniana são hipóteses deste livro.

diamante · quilha · regra de Clifford · kimberlito · inclusões · Rio Maria · gravimetria · tomografia · Araguaia · São João do Araguaia · Sereno · bateia

Resumo

Carajás registra perdas de raiz, ruptura de placa e magmatismo pós-colisional, tudo o que destrói diamante. Diamantes exigem o contrário.

Litosfera espessa, fria e estável por tempo suficiente para formá-los e conservá-los. As ocorrências nos rios da região resolvem parte do paradoxo. A remoção de raiz foi localizada em corredores; porções da quilha sobreviveram entre eles. Rio Maria é o candidato mais claro a núcleo preservado, e Carajás conserva litosfera de alta velocidade sísmica e estrutura térmica de cráton.

O registro dos rios contém histórias distintas. São João do Araguaia produziu diamantes de longa circulação sedimentar e forneceu inclusões compatíveis com manto peridotítico. Ocorrências nos rios Itacaiúnas, Parauapebas e Sororó e na grota do Sereno incluem cristais pequenos, claros e pouco desgastados, que indicam transporte limitado, embora ainda permitam uma fonte sedimentar próxima. A geração e a entrega pertencem a relógios diferentes. Diamantes podem ter se formado em mais de um episódio arqueano; o transporte à superfície exige magma profundo e rápido, e nenhum magma assim foi datado na província.

O capítulo termina com uma estratégia. Separar populações, subir drenagens, caracterizar inclusões e minerais indicadores, datar diques, mapear a espessura da litosfera e modelar o retrabalhamento. A tese fornece um mapa de probabilidade. O corpo primário continua desconhecido.

1. A regra de Clifford

Em 1966, o geólogo sul-africano Tom Clifford percebeu uma coincidência no mapa da África. Todas as minas de diamante que valiam a pena ficavam dentro dos crátons arqueanos, as peças mais antigas do continente, ou em suas bordas imediatas. Fora deles, kimberlitos existiam, mas vinham vazios (Clifford, 1966). A observação virou regra, e a regra até hoje orienta a prospecção no mundo inteiro. Diamante econômico pede crosta de mais de 2,5 bilhões de anos embaixo.

A razão é física, e os capítulos 2 e 3 já a prepararam. O diamante é carbono cristalizado sob pressão muito alta, e só é estável no manto

abaixo de cerca de cento e cinquenta quilômetros de profundidade, e apenas se a temperatura ali for baixa para a profundidade. Essa combinação, fundo e frio, só existe sob uma quilha cratônica, a raiz de manto empobrecido, espesso e frio que o capítulo 2 descreveu nascendo junto com os primeiros continentes e o capítulo 3 viu se consolidar. Sob um oceano ou sob um continente jovem, o manto a cento e cinquenta quilômetros é quente demais, e o carbono fica como grafite. A quilha é a geladeira do diamante.

A geladeira também guarda por bilhões de anos. Um diamante pode se formar no Arqueano e permanecer no manto, intacto, até hoje, porque nada ali o perturba. Mas pode desaparecer em horas se o magma que o transporta para cima subir devagar ou for rico em oxigênio, caso em que o diamante queima e vira CO□. Formar, guardar e entregar são três exigências separadas, e o capítulo as examina uma a uma.

2. O paradoxo da raiz perdida

Carajás parece hostil a essa conservação. O modelo deste livro inclui a queda da raiz depois da colisão mesoarqueana, no capítulo 4, a ruptura da placa em ca. 2,76 Ga e a reorganização paleoproterozoica. Cada um desses eventos retira ou aquece a litosfera, e litosfera removida leva seus diamantes embora. O Cráton do Norte da China é o exemplo extremo. Sua quilha foi destruída no Mesozoico, e com ela foi a estabilidade que Clifford exigia (Zhu e Xu, 2019). A pergunta é por que Carajás tem diamantes nos rios.

A resposta mais econômica é que a destruição foi guiada. Delaminação e ruptura seguem suturas e corredores, e podem escavar canais e bordas enquanto deixam blocos frios entre eles. A ocorrência de diamante demonstra que alguma janela de estabilidade existiu; não determina sua extensão nem sua continuidade atual. A formulação adotada aqui é sobrevivência em retalhos. Rio Maria estabilizou cedo e preserva a arquitetura arqueana de domos e quilhas, a amostra que ficou fora do reator, como o capítulo 4 disse. Itacaiúnas ocupa uma zona mais reativada. Bacajá acrescenta crosta retrabalhada. O mapa profundo deve

reunir núcleos espessos, bordas afinadas e corredores removidos. A prospectividade seguirá os primeiros e evitará, em princípio, os últimos.

A litosfera também pode se regenerar por baixo, quando manto empobrecido esfria e se cola à base de um bloco depois de um episódio de afinamento. Essa regeneração não recompõe automaticamente uma quilha com diamantes nem devolve diamantes destruídos. Por isso o capítulo a trata como processo auxiliar. A sobrevivência parcial continua sendo a hipótese principal.

3. O que os diamantes observados dizem

O Baixo Tocantins foi uma província produtora importante no século XX, e seus diamantes podem ser lidos como qualquer outra amostra. São João do Araguaia forneceu gemas de alto valor, pedras grandes e um lote cuja forma registra duas histórias. Corrosão pelo magma que os trouxe e desgaste por transporte em rio. Dodecaedros amarelos, arestas arredondadas e superfícies trabalhadas pertencem a uma população capaz de ter atravessado mais de um ciclo de erosão e deposição (Höhn, 2000; Höhn e Costa, 2022).

A Formação Poti, um arenito carbonífero da Bacia do Parnaíba, é um redistribuidor regional plausível para parte dessa população. Sua drenagem antiga pode ter reciclado depósitos mais antigos ainda, inclusive sucessões ligadas à Chapada Diamantina, na Bahia, uma das grandes fontes históricas de diamantes do Brasil (Gonzaga e Tompkins, 1991). O caminho exato entre essas bacias e o Baixo Tocantins ainda precisa de proveniência sedimentar e paleodrenagem. A conexão publicada é um modelo regional, não identidade grão a grão.

Aqui entra o instrumento próprio deste capítulo. Quando um diamante cristaliza no manto, ele às vezes aprisiona cristais minúsculos da rocha ao redor, as inclusões, lacradas há bilhões de anos num cofre que nada atravessa. São amostras diretas do manto profundo, e dizem em que rocha o diamante cresceu. Olivina e cromita rica em

magnésio apontam para peridotito, o manto comum, e em particular para harzburgito, o peridotito mais empobrecido, típico das quilhas arqueanas. Granada e clinopiroxênio de certas composições apontam para eclogito, a crosta oceânica transformada do capítulo 2, enterrada sob o cráton por subducção (Stachel e Harris, 2008). O lote de São João contém inclusões de olivina e cromita magnesiana. A associação é peridotítica, e a cromita sugere substrato harzburgítico. Essa conclusão vale para os cristais analisados. Para definir a população inteira serão necessários mais grãos, química quantitativa das inclusões e comparação com os campos composicionais de diamantes férteis.

Itacaiúnas, Parauapebas, Sororó e a grota do Sereno acrescentam outra observação. Diamantes pequenos, transparentes, octaédricos ou de formas simples, com arestas vivas e faces pouco trabalhadas (Höhn et al., 2018). O aspecto reduz a probabilidade de transporte longo e de múltiplos ciclos. Não fixa distância em quilômetros, porque a resistência do diamante, a energia do rio, o tempo de residência e o armazenamento local variam. A fonte pode ser um corpo primário próximo ou um conglomerado pouco retrabalhado.

Essas ocorrências ainda carecem de inclusões caracterizadas. A associação peridotítica de São João não deve ser transplantada para o Sereno. A comparação correta formula uma previsão. Se as populações frescas vêm dos mesmos retalhos de quilha, suas inclusões e seus minerais acompanhantes devem convergir para um manto cratônico semelhante. Se divergirem, Carajás abriga mais de uma fonte.

4. A quilha vista de cima

Não dá para furar cento e cinquenta quilômetros. A quilha é vista de cima, por três métodos que enxergam propriedades diferentes, e vale dizer o que cada um vê.

A gravimetria mede variações minúsculas da gravidade de um lugar para outro, e essas variações refletem a distribuição de massa embaixo. Uma quilha de manto empobrecido é um pouco menos densa que o

manto ao redor e deixa uma marca. Motta et al. (2019) modelaram variações da litosfera a partir do campo de gravidade e sugeriram domínios espessos sob Rio Maria e Carajás, com afinamento relativo para Bacajá, e Oliveira (2018) descreveu as assinaturas gravimétricas dos dois domínios. Os valores de 250 a 275 quilômetros de espessura pertencem ao modelo adotado, não a uma medição direta da base da litosfera. Densidade da crosta, composição do manto e premissas térmicas fazem com que mais de uma arquitetura produza a mesma gravidade.

O campo gravimétrico se parece com uma sombra. Ele denuncia a distribuição de massa, mas objetos diferentes podem projetar contornos semelhantes. A tomografia sísmica acrescenta outra direção de luz. Ela usa as ondas de terremotos distantes, que atravessam o manto mais depressa onde ele é frio e rígido, e monta uma imagem tridimensional de velocidades, como uma tomografia médica monta a do corpo. Anomalias rápidas sob Carajás e Bacajá são compatíveis com manto frio e espesso, e os modelos continentais reconhecem velocidades de cráton em parte da coluna (Costa et al., 2020; Melo et al., 2025). As funções do receptor, um terceiro método, delimitam a base da crosta (Albuquerque et al., 2017). E o fluxo de calor medido em poços, convertido em temperatura com a profundidade, também favorece um domínio antigo e frio (Corrêa et al., 2022). A quilha ganha forma quando sombras independentes convergem para a mesma arquitetura.

A convergência entre métodos sustenta a existência da quilha. Sua geometria detalhada permanece aberta. A continuidade norte-sul da gravimetria pode refletir composição arqueana, suturas paleoproterozoicas, contraste de crosta ou reativação toniana. Chamá-la de ombreira do Araguaia exige modelagem flexural, relações de corte e dados profundos adicionais. Ela será usada como corredor a testar, não como mapa pronto de corpos.

A comparação com Teixeira et al. (2021) deve ser precisa. Aquele modelo e este concordam em quilha, extensão e controle profundo. Divergem no motor do magmatismo neoarqueano. Teixeira privilegia pluma e magma na base da crosta sob uma quilha; este livro privilegia a extensão localizada pela sutura, depois de placa rasa e ruptura, sobre manto

hidratado. A presença da quilha independe dessa divergência.

5. Quando o diamante se formou

As inclusões também datam, quando contêm os minerais certos, e o que elas dizem no mundo é que diamantes em harzburgito costumam ter mais de 3 bilhões de anos, enquanto diamantes em eclogito se tornam comuns depois que crosta oceânica passa a ser reciclada sob os continentes (Richardson et al., 1984; Shirey e Richardson, 2011; Gurney et al., 2010). Shirey e Richardson leram nisso o início do ciclo das placas em 3 Ga, o que combina com o relógio mecânico do capítulo 3. A cronologia global oferece possibilidades, sem datar os cristais de Carajás.

Uma primeira geração pode acompanhar a estabilização e o resfriamento da quilha de Rio Maria depois de ca. 2,87 Ga. Carbono e fluidos do manto teriam precipitado diamante em harzburgitos empobrecidos. A cromita magnesiana de São João é compatível com esse ambiente, mas a idade exige sulfetos ou silicatos inclusos adequados.

Uma segunda geração pode estar ligada à subducção mesoarqueana do capítulo 4. Crosta oceânica introduzida sob a quilha fornece eclogito, carbono e fluidos. O ciclo entre ca. 3,08 e 2,87 Ga e a placa rasa posterior oferecem o substrato mecânico. Encontrar granada ou clinopiroxênio eclogíticos, acompanhados de idades coerentes, distinguiria essa população.

Fluidos mais jovens podem ter formado diamantes de outros tipos e rejuvenescido inclusões antigas. Os pulsos de 2,76, 2,57 e 1,88 Ga atravessaram porções diferentes da litosfera. Alguns destruíram estabilidade; outros entregaram fluido com carbono às bordas frias. A datação de sulfetos por rênio-ósmio, de granadas e piroxênios por samário-neodímio e o estudo do nitrogênio dentro do próprio diamante podem separar geração, residência e sobreposição (Bulanova et al., 2010).

6. Quando o diamante subiu

Formação no manto e chegada à superfície são eventos independentes, e o veículo tem nome. Kimberlito é um magma raro, vindo de mais de cento e cinquenta quilômetros, rico em gás e em voláteis, que sobe pela litosfera em horas ou dias, arrancando pedaços das rochas que atravessa. Esses pedaços, os xenólitos, chegam à superfície com os diamantes dentro, e o kimberlito se alojaria numa chaminé estreita, em forma de cenoura, que a erosão depois desmonta. Margens de cráton e ombreiras de rifte favorecem as fraturas profundas de que esse magma precisa, perto de litosfera ainda espessa. A regra de Clifford é, em parte, uma regra sobre onde os kimberlitos conseguem subir cheios (Helmstaedt e Gurney, 1995).

O diamante é o passageiro; o kimberlito, o elevador. A idade de uma inclusão pode alcançar a formação ou a residência do passageiro no manto. A idade da rocha magmática informa quando o elevador subiu. Confundir os dois relógios seria datar uma pessoa pela idade do veículo que a transportou.

A janela toniana do Araguaia é o principal candidato deste livro. Magmatismo alcalino entre ca. 1,05 e 1,0 Ga registra extensão na borda oriental, a rede do capítulo 10. A litosfera de Carajás ocupava a ombreira ocidental desse rifte, a borda levantada que todo rifte produz dos dois lados do vale. Calor, flexura e estruturas herdadas produzem um cenário mecanicamente favorável à ascensão de magmas profundos.

Favorável não significa confirmado. Nenhum kimberlito toniano com diamante foi datado na província. Os diques picríticos de Serra Verde são ultramáficos, ricos em magnésio e cortam as rochas ao redor, portanto merecem petrologia e geocronologia. Mas picrito é um magma de alto grau de fusão do manto, e tem origem diferente da maioria dos kimberlitos. Só a química de elementos-traço, os isótopos, a mineralogia de alta pressão e a idade dirão se ele compartilha o episódio extensional ou qualquer capacidade de transportar diamante.

O colapso cambriano entre ca. 0,54 e 0,48 Ga oferece a janela secun-

dária. Os diques de 535 Ma provam reabertura magmática de Carajás, sem provar magmas kimberlíticos. Corpos tonianos poderiam ter sido deformados durante a inversão brasiliana e expostos à erosão; corpos cambrianos seriam posteriores à inversão ou contemporâneos ao colapso. As relações estruturais permitem separar as hipóteses.

O primeiro resultado decisivo é uma idade de colocação de um corpo. Badeleíta pode datar alguns magmas máficos; perovskita, zircão e flogopita podem servir em rochas kimberlíticas. Até essa idade existir, Toniano permanece previsão.

7. Do corpo ao rio

Entre a entrega e o cascalho atual existem erosão, estocagem e reciclagem. A população distante pode ter passado por coberturas paleozoicas e depósitos mais jovens. Cada ciclo remove os minerais menos resistentes, arredonda superfícies e mistura fontes. Diamante e quartzo sobrevivem a tudo. Piropo, cromita, ilmenita e diopsídio, os minerais que acompanham o diamante no kimberlito e que os prospectores procuram na bateia porque são mil vezes mais abundantes que ele, sofrem seleção química e mecânica. Por isso a ausência de indicadores num cascalho antigo tem pouco poder de exclusão.

Os travessões rochosos do Tocantins, trechos em que o rio corre sobre rocha dura, funcionam como armadilhas hidráulicas, as mesmas que os garimpeiros aprenderam a procurar. Conglomerados ferruginosos locais, conhecidos como mocororó, podem representar armazenamento intermediário e recimentação de cascalhos antigos. Datar cimentos, medir a proveniência dos seixos e comparar a morfologia dos diamantes acima e abaixo dessas unidades ajuda a reconstruir o número de ciclos.

A população fresca exige estratégia diferente. Se a distância sedimentar é curta, indicadores pouco alterados devem acompanhar parte dos diamantes. A drenagem pode ser seguida rio acima com concentrados padronizados de bateia. Uma queda abrupta de abundância, associ-

ada a mineralogia de manto e a uma anomalia geofísica, define um alvo. Se os diamantes persistirem sem indicadores e acompanharem um conglomerado, a fonte imediata será secundária.

8. Sereno e o mapa de procura

A grota do Sereno é atraente porque combina drenagem curta, cristais pouco desgastados e proximidade de estruturas profundas. Isso justifica prioridade, sem autorizar a frase de que a fonte está a poucos quilômetros. O primeiro objetivo é distinguir corpo primário de estocagem sedimentar local.

A campanha começa na água. Amostras de concentrado em intervalos regulares, contagem e medida dos diamantes, química de cromita, piropo, ilmenita e clinopiroxênio, e caracterização das inclusões nos próprios cristais. Prossegue em terra. Mapeamento de diques e brechas discordantes, magnetometria de alta resolução, eletromagnetometria, gravimetria de detalhe e, onde houver alvo, sondagem.

Na escala da província, as ocorrências devem ser cruzadas com os modelos independentes de espessura e temperatura da litosfera da seção 4. A previsão é estatística. Populações próximas de sua fonte tenderão a se concentrar sobre os retalhos frios ou em suas bordas estruturadas, longe dos corredores mais intensamente removidos. Uma distribuição indiferente à quilha enfraqueceria o modelo.

Três resultados podem reorganizar o capítulo inteiro. Uma inclusão datável que fixe a geração; um corpo magmático datado que fixe a entrega; e uma assinatura isotópica que ligue diamante, indicador e retalho de manto. Até lá, o mapa é prospectivo, não demonstrativo.

9. O primeiro minério

A história humana local começou pelo diamante antes de o ferro projetar Carajás no mundo. Relatos atribuem achados no Tocantins a 1610, mas sua localização e sua natureza documental exigem crítica histórica.

A fase comprovada ganhou força entre as décadas de 1930 e 1960, com garimpos no Baixo Tocantins, mergulhadores de escafandro catando cascalho no leito do rio, produção expressiva e concessão de lavra no Canal do Jahu em 1957 (Höhn e Costa, 2022). A represa de Tucuruí depois cobriu parte dos sítios.

Ferro, ouro e cobre vieram em seguida como ciclos econômicos, ainda que seus estoques geológicos tenham outras idades. A coincidência é literária. A exploração começou pelo mineral que nasceu mais fundo e talvez mais cedo. O capítulo 14 retoma essa sequência para discutir território, Estado e fronteira. Aqui ela encerra a viagem do diamante, do manto à bateia.

10. Níveis de confiança

São dados a produção histórica, a morfologia dos lotes descritos, as ocorrências nos rios, as inclusões analisadas em São João do Araguaia, as propriedades geofísicas e térmicas publicadas e a presença de magmatismo toniano e cambriano na região ampliada. Também é dado que o corpo primário permanece desconhecido.

São modelos publicados a estabilidade do diamante sob geotermas de cráton, a associação de diamantes harzburgíticos antigos com quilhas empobrecidas, o crescimento de populações eclogíticas com a reciclagem de crosta, a regra de Clifford e a capacidade de riftes de focalizar magmas profundos. Os modelos gravimétricos e tomográficos sustentam uma raiz espessa, com geometrias e resoluções próprias.

São hipóteses deste livro a sobrevivência canalizada da quilha; as gerações arqueanas propostas; a entrega toniana pela borda do Araguaia; a janela cambriana secundária; a relação dos picritos de Serra Verde com o episódio extensional; a leitura do Sereno como ocorrência próxima da fonte; e a correlação entre diamantes frescos e retalhos da litosfera. Cada hipótese tem amostra, idade ou mapa capaz de contrariá-la.

Conclusão

O diamante é o único mineral deste livro que atravessa a história inteira sem mudar. Formou-se numa quilha que o capítulo 2 viu nascer, sobreviveu às perdas de raiz e às rupturas que os capítulos 4 a 9 contaram, subiu, talvez, pela janela que o capítulo 10 abriu, e terminou numa bateia no Tocantins, onde a história humana de Carajás começou. Tudo o que o capítulo não sabe, quando ele se formou, quando subiu, de onde vem o cascalho, está escrito em instruções de busca. É a forma honesta de um mapa que ainda não encontrou o corpo.

O próximo capítulo abre a lente para o maior ciclo de todos, o dos supercontinentes, e pergunta o que a montagem e a ruptura dos continentes fizeram com a crosta e com a vida.

Referências

Albuquerque, D. F.; França, G. S. et al. (2017). Crustal structure of the southeastern Amazonian Craton from receiver functions. Journal of South American Earth Sciences, 79, 431–442.

Bulanova, G. P. et al. (2010). Mineral inclusions in sublithospheric diamonds. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160, 489–510.

Clifford, T. N. (1966). Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa. Earth and Planetary Science Letters, 1, 421–434.

Corrêa, R. T. et al. (2022). Thermal structure of the Amazonian Craton. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127, e2021JB023025.

Costa, I. S. L.; Rocha, M. P.; Klein, E. L.; Vasquez, M. L. (2020). Lithospheric structure beneath southeastern Amazonian Craton from multifrequency seismic tomography. Journal of South American Earth Sciences, 101, 102608.

Gonzaga, G. M.; Tompkins, L. A. (1991). Geologia do diamante. In: Schobbenhaus, C. et al. (eds.), Principais Depósitos Minerais do Brasil, v. 4A. DNPM/CPRM.

Gurney, J. J.; Helmstaedt, H. H.; Richardson, S. H.; Shirey, S. B. (2010). Diamonds through time. Economic Geology, 105, 689–712.

Helmstaedt, H.; Gurney, J. J. (1995). Geotectonic controls of primary diamond deposits. Journal of Geochemical Exploration, 53, 125–144.

Höhn, H. (2000). Diamantes de São João do Araguaia, Pará. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará.

Höhn, H. et al. (2018). Catodoluminescência de diamante do rio Tocantins. Boletim do Museu de Geociências da Amazônia, 5(2).

Höhn, H.; Costa, M. L. (2022). Os diamantes de São João do Araguaia no Estado do Pará: histórico, extração, mineralogia e valorização. Boletim do Museu de Geociências da Amazônia, 9(1). https://doi.org/10.31419/ISSN.2594-942X.v92022i1a3HHN

Melo, B. C. et al. (2025). SACI-24: a shear-wave velocity model of the South American lithosphere. Gondwana Research, 138, 139–167.

Motta, J. G.; Souza Filho, C. R.; Carranza, E. J. M.; Braitenberg, C. (2019). Archean crust and lithospheric structure of the Carajás Province from satellite gravity. Scientific Reports, 9, 2565.

Oliveira, R. G. (2018). Gravity signatures of the Rio Maria and Carajás domains. Journal of the Geological Survey of Brazil, 1(3), 101–112.

Richardson, S. H.; Gurney, J. J.; Erlank, A. J.; Harris, J. W. (1984). Origin of diamonds in old enriched mantle. Nature, 310, 198–202.

Shirey, S. B.; Richardson, S. H. (2011). Start of the Wilson cycle at 3 Ga shown by diamonds from subcontinental mantle. Science, 333, 434–436.

Stachel, T.; Harris, J. W. (2008). The origin of cratonic diamonds: constraints from mineral inclusions. Ore Geology Reviews, 34, 5–32.

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.

Zhu, R.-X.; Xu, Y.-G. (2019). The destruction of the North China Craton: significance and process. Science China Earth Sciences, 62, 1340–1350.

Capítulo 12. O pulso dos continentes

Montagem, ruptura, refino da crosta e os ambientes em que a vida muda de escala

Modelo de trabalho

Supercontinentes reorganizam margens, montanhas, nutrientes, clima e isolamento biológico. A montagem acumula relevo, espessa a crosta e altera a circulação; a estabilidade prolongada modifica os reservatórios; a ruptura multiplica margens e bacias. Esses efeitos criam oportunidades evolutivas, sem transformar coincidência temporal em causa única. Carajás é o ponto fixo a partir do qual o ciclo é observado. A afinidade com o clã de Vaalbara e o acoplamento probabilístico entre ciclos continentais e inovação biológica são hipóteses deste livro.

supercontinente · ciclo de Wilson · Vaalbara · Columbia · Rodínia · Gondwana · Pangeia · curva da crosta · zircão · boring billion · vicariância · Carajás

Resumo

Um bloco cratônico atravessa supercontinentes sem permanecer no mesmo lugar. Carajás nasceu entre terrenos arqueanos, integrou a amálgama paleoproterozoica do capítulo 8, participou de Columbia e de Rodínia, entrou no Gondwana e depois na Pangeia. Em cada ciclo, os vizinhos mudaram, margens abriram e pedaços foram transferidos. A rocha conserva idades; a paleogeografia tenta devolver posição a elas.

O ciclo também reorganiza a produção e a preservação da crosta. Modelos isotópicos indicam uma mudança importante perto de 3 Ga, quando grande fração do volume continental atual já existia e a reciclagem passou a pesar mais que a geração de crosta nova. Os picos de idade de zircão coincidem com as grandes orogenias, mas misturam crescimento, retrabalhamento, erosão e viés de preservação. Os supercontinentes antigos produziram e estabilizaram crosta; os recentes reutilizaram um estoque cada vez mais velho.

A vida responde ao ciclo por mecanismos intermediários. Orogênese produz relevo e intemperismo; erosão entrega nutrientes; mares interiores e riftes criam plataformas, gradientes e isolamento; vulcanismo modifica gases e metais; a geometria dos continentes altera correntes e clima. A fórmula do capítulo é deliberadamente simples. A amálgama prepara; o rifte dispara. A montagem acumula relevo, heterogeneidade e reservatórios; a ruptura os redistribui e multiplica os ambientes. É tendência a testar, não relógio universal.

1. O ciclo que Wilson viu

Em 1966, o canadense Tuzo Wilson notou que o Atlântico de hoje não era o primeiro oceano a existir naquele lugar. Antes dele houve outro, o Iapetus, que abriu e fechou entre as mesmas massas continentais, deixando as montanhas dos Apalaches e da Escócia como cicatriz. Oceanos nascem num rifte, crescem, envelhecem, fecham por subducção e morrem numa colisão, e o continente soldado volta a riftear, muitas

vezes pela mesma emenda. Esse ciclo de abrir e fechar recebeu o nome de Wilson, e é a versão longa da toalha, da sutura e da caixa de papelão dos capítulos anteriores.

Quando muitos ciclos de Wilson coincidem, quase toda a crosta continental do planeta se junta num bloco só. É o que se chama supercontinente, e a Terra montou pelo menos quatro. Columbia, também chamado Nuna, entre ca. 2,1 e 1,8 Ga, o primeiro bem sustentado, de que Atlântica fez parte (Rogers e Santosh, 2002; Zhao et al., 2002). Rodínia, montado em torno de 1,2 a 1,0 Ga e desfeito a partir de ca. 0,8 Ga (Li et al., 2008). Gondwana, reunido entre ca. 0,65 e 0,50 Ga, abrangendo o que hoje é América do Sul, África, Índia, Austrália e Antártida (Meert, 2003). E Pangeia, formado quando Gondwana se juntou às massas do norte entre o Carbonífero e o Permiano, há cerca de trezentos milhões de anos, e desfeito a partir do Jurássico. Entre uma montagem e a seguinte passam quinhentos a setecentos milhões de anos, e esse é o pulso do título.

Antes desses quatro houve agregados menores, de contorno incerto, que a literatura discute sob nomes como Kenorland e Vaalbara. Para o Arqueano, com poucos polos paleomagnéticos confiáveis e muita deformação posterior, os mapas funcionam melhor como clãs, grupos de blocos que compartilham código de barras e provavelmente viveram juntos, do que como continentes de contorno preciso (Bleeker, 2003). É nesse vocabulário de clãs que Carajás entra.

2. Um bloco como testemunha

Kaapvaal, na África do Sul, e Pilbara, na Austrália, formam o par clássico de Vaalbara, o clã arqueano mais bem documentado. Correlações entre suas camadas e paleomagnetismo sustentam proximidade em partes do Neoarqueano, enquanto a idade da separação continua debatida (de Kock et al., 2009). Ambos registram extensão interna em torno de 3,2 Ga. Carajás abre sua margem na mesma janela, como o capítulo 3 contou, e o Pilbara serviu de gêmeo nos capítulos 3 e 4. Essa sincronia permite propor afinidade de Carajás com o clã, sem demons-

trar que o bloco ocupava Vaalbara ou que se separou dele num evento único.

A filiação deve ser testada por mais que idade. Sequências magmáticas de 3,2 a 2,8 Ga, assinaturas isotópicas, polaridade das margens e paleomagnetismo precisam convergir. Até lá, parente de Vaalbara descreve uma hipótese comparativa. O livro evita criar um Kenorland particular para acomodá-la.

Entre ca. 2,72 e 2,65 Ga, vários crátons registram acresção, colisão e grandes pulsos magmáticos, a família de bacias do capítulo 5. A literatura discute um Kenorland amplo e supercrátons separados, com nomes como Superia e Sclavia. Carajás participou de uma amálgama regional, mas sua ligação direta com a Carélia, onde fica Kostomuksha, com Kaapvaal e com o São Francisco nessa idade permanece problema de reconstrução. Columbia, montado entre ca. 2,1 e 1,8 Ga por sistemas como Trans-Hudson, Transamazônico e Eburneano, é a primeira reunião global relativamente bem sustentada dos clãs arqueanos, e Atlântica entrou nele como grande componente, com a conexão SAMBA do capítulo 10 aproximando a Amazônia setentrional da Báltica (Johansson, 2009; Bispo-Santos et al., 2014).

3. O recibo de Laurentia

Carajás e Kostomuksha preservam grandes bacias ferruginosas perto de 2,75 Ga. BIFs gigantes reaparecem em diferentes crátons entre ca. 2,50 e 2,43 Ga, junto da transição para o Grande Evento de Oxidação, nas plataformas do capítulo 5. Nas compilações globais, as maiores fábricas dessa janela concentram-se na África austral, na Austrália, no Brasil, na Rússia e na Ucrânia (Bekker et al., 2010). Laurentia, o núcleo da América do Norte, está ausente desse conjunto. A distribuição pode refletir paleogeografia, preservação, química do oceano e tectônica de bacias; ainda assim, a assimetria merece explicação.

A proto-Laurentia registra o GOE em suas próprias camadas, portanto participa da mudança atmosférica global. Seu primeiro pulso ferrífero

de classe mundial aparece bem depois, nas bacias em torno do Lago Superior, com a Formação Gunflint datada em ca. 1,878 Ga e grandes formações correlatas (Fralick et al., 2002). O atraso de cerca de seiscentos milhões de anos em relação às fábricas neoarqueanas não prova migração de ecossistemas nem data sozinho um encontro continental. Mostra que Laurentia entrou tarde no regime de bacias ferríferas gigantes. A montagem de Columbia oferece uma mudança paleogeográfica capaz de reorganizar circulação, nutrientes e conexões entre plataformas. As formações do Lago Superior são um recibo sugestivo dessa nova vizinhança, não sua prova isolada.

4. A curva da crosta

Quanta crosta continental existia em cada época é uma pergunta que os isótopos tentam responder. Modelos de háfnio e de neodímio, e as idades-modelo que eles produzem, indicam mudança no crescimento continental por volta de 3 Ga. Dhuime et al. (2012) estimaram que cerca de 65 por cento do volume atual já existia então e propuseram queda da taxa líquida de geração desde aquela época. Os números dependem de reservatórios, amostragem e correções de reciclagem. O resultado robusto é qualitativo. A Terra mais jovem acrescentava maior proporção de crosta nova; depois, retrabalhou cada vez mais o estoque existente. É a mesma inflexão que o capítulo 3 marcou pela vitória das placas e que o capítulo 11 leu nos diamantes (Shirey e Richardson, 2011).

A outra curva é a das idades de zircão. Reunidas as idades de todos os zircões já datados no planeta, aparecem picos em ca. 2,7, 1,87, 1,1 a 1,0, 0,6 e 0,3 Ga, e eles coincidem com as grandes orogenias. Os picos podem registrar aumento de magmatismo, mas orógenos também enterram, fundem, exumam e preservam zircão com eficiência, e as bacias derivadas desses cinturões superamostram os episódios que sobreviveram. O gráfico mistura produção da crosta com condições de conservação do arquivo (Hawkesworth et al., 2009; Condie e Aster, 2010).

Reconstruir a história da crosta apenas com os zircões preservados é

como reconstruir a história da literatura pelos livros que restaram depois dos incêndios. Uma estante cheia pode indicar uma época de produção extraordinária. Também pode indicar apenas que aquela biblioteca escapou da destruição.

Vista de Carajás, a tendência é clara. O Paleoarqueano e o Mesoarqueano fabricam terrenos e diferenciam uma litosfera quente. O Neoarqueano acrescenta e solda. O Paleoproterozoico ainda gera arcos, mas retrabalha volumes arqueanos imensos. Rodínia, Gondwana e Pangeia reorganizam crosta madura, embora continuem criando material novo nas margens. O ciclo passa de fabricação dominante a refino contínuo, jamais a reciclagem exclusiva.

O intervalo aproximado de 1,8 a 0,8 Ga recebeu da literatura o apelido de bilhão entediante, o boring billion, por combinar estabilidade ambiental relativa, oceanos frequentemente pobres em nutrientes e longos interiores continentais (Cawood e Hawkesworth, 2014). Explicá-lo apenas pelo orçamento da crosta seria circular. Configuração dos continentes, fluxo de calor, estado de oxidação, disponibilidade de fósforo e a própria resolução do registro participam do debate.

5. A curva da vida

Os supercontinentes afetam a biosfera por uma cadeia que vale explicitar passo a passo, porque é a hipótese do capítulo. A colisão ergue montanhas e expõe rocha fresca. O intemperismo dessa rocha consome CO□ e fornece fósforo, ferro, sílica, cálcio e outros solutos aos mares. Durante a estabilidade, esses produtos se acumulam e os interiores ganham espessas coberturas. A ruptura abre margens, cria bacias restritas, instala ressurgência, multiplica gradientes de oxidação e separa populações. O vulcanismo libera gases e metais; as glaciações podam ecossistemas e reorganizam a circulação. Nesse sentido mecânico, a amálgama prepara e o rifte dispara (Worsley et al., 1986).

Separar populações tem nome em biologia, e o capítulo 15 vai usá-lo. Vicariância é a divergência de linhagens quando uma barreira geográ-

fica corta uma população em duas. Continentes que se afastam são a barreira mais lenta e mais larga que existe, e a árvore da vida tem a forma que tem, em boa parte, porque o mapa mudou o tempo todo.

A oxigenação paleoproterozoica coincide com reorganização tectônica, grandes BIFs, vulcanismo e mudanças no enterramento de carbono. O laboratório ferruginoso de Carajás, no capítulo 7, oferece um mecanismo ecológico local; o GOE exige balanço planetário. Nenhum supercontinente isolado explica a transição.

Dois fósseis marcam a escala seguinte. Qingshania registra organismos com muitas células e núcleo, eucariontes multicelulares, em ca. 1,63 Ga no norte da China, em sucessões ligadas a um rifte do próprio Columbia (Miao et al., 2024). O ambiente rifteado ampliou margens e nichos, mas o fóssil preserva uma linhagem que já existia. Bangiomorpha, uma alga vermelha com muitas células e reprodução sexuada, tem idade em torno de 1,05 Ga e ocorre perto da janela de Rodínia (Butterfield, 2000; Gibson et al., 2018). Sua bacia e sua posição tectônica não cabem numa regra simples de ruptura.

No Neoproterozoico, a montagem do Gondwana, as glaciações globais, a oxigenação em pulsos, a biota ediacarana e a explosão cambriana se sobrepõem. A supermontanha transgondwânica, a cadeia de milhares de quilômetros erguida pelas colisões que montaram o Gondwana, pode ter fornecido nutrientes por erosão (Squire et al., 2006); os mares rasos do colapso, do capítulo 10, ampliaram as áreas habitáveis e preservaram fósseis. Desenvolvimento genético, predação, oxigênio e química do oceano também foram indispensáveis. A tectônica construiu o palco e alterou seus recursos. A vida escreveu a peça com materiais próprios.

6. Rodínia e a ruptura em rede

Entre ca. 1,2 e 1,0 Ga, as colisões grenvillianas, na América do Norte, e as de Sunsás, na Amazônia, aproximaram de novo as grandes massas. A Amazônia tocou a Laurentia pelo segmento de Llano, no Texas

(Tohver et al., 2002); Sul da China e Tarim ocupam posições discutidas nas reconstruções (Yao et al., 2019). Rodínia tem núcleo e margens variáveis conforme o conjunto de polos paleomagnéticos adotado (Li et al., 2008).

Sua ruptura começou de modo distribuído. Na antiga Atlântica, riftes entre ca. 1,05 e 0,90 Ga aproveitaram heterogeneidades anteriores. Alguns braços atingiram hiperextensão e crosta oceânica restrita entre ca. 0,82 e 0,73 Ga; outros abortaram. O capítulo anterior tratou Araguaia, Araçuaí, Paraguai e Damara como partes diferentes desse espectro.

A ruptura multiplica margens e produz novos habitats, mas também pode eliminar plataformas e criar falta de oxigênio extensa. Seu efeito depende de latitude, clima, nutrientes e conexão oceânica. A fórmula permanece. A amálgama prepara; o rifte dispara. Disparar significa liberar condições e pressões seletivas, não garantir inovação nem indicar uma única direção evolutiva.

7. Gondwana, Pangeia e os retardatários

Gondwana foi montado por mais de um sistema. O ciclo do oeste, o Brasiliano do capítulo 10, reuniu Amazônia, Oeste Africano, São Francisco-Congo e terrenos vizinhos. O sistema do leste africano e o chamado Kuunga aproximaram Índia, Austrália e Antártida em pulsos distintos (Meert, 2003). Colisões externas consumiram oceanos; braços internos foram invertidos; grandes cadeias alimentaram bacias dos dois lados.

Os blocos chineses mostram que um supercontinente tem bordas graduais. China do Norte foi peça importante de Columbia, teve posição incerta em Rodínia e permaneceu separada do Gondwana principal no início do Paleozoico. Sul da China e Tarim participaram de reconstruções de Rodínia, mas ficaram na periferia norte do Gondwana. Sua soldagem à Ásia ocorreu em etapas paleozoicas e mesozoicas. O mapa nunca fecha num único aniversário.

Gondwana juntou-se à Laurússia, o continente do norte, entre o Car-

bonífero e o Permiano para formar a Pangeia. Mesmo então, o oceano Paleo-Tétis, os blocos asiáticos e arcos móveis impediam uma esfera continental perfeitamente concluída. A ruptura jurássica e cretácea abriu os Atlânticos Central, Sul e Equatorial em tempos diferentes. Carajás permaneceu no interior sul-americano, enquanto a margem oeste voltou a crescer nos Andes.

8. Peças que mudam de continente

Riftes nem sempre seguem suturas antigas, e novas dorsais podem abandonar fragmentos no lado oposto. O capítulo 10 apresentou dois deles. São Luís, de afinidade oeste-africana, ficou no Brasil; Suwannee, de origem gondwânica, terminou incorporado à América do Norte (Mueller et al., 2014). Avalônia, um microcontinente, saiu da margem do Gondwana, cruzou o Iapetus e se juntou à Báltica e à Laurentia. Cuyania levou uma plataforma laurenciana à margem argentina, onde hoje é a Precordilheira (Thomas e Astini, 1996).

Essas transferências testam as reconstruções porque carregam fósseis, zircões, assinaturas isotópicas e camadas incompatíveis com o continente que hoje as hospeda. Dentro da própria sutura entre Carajás e Bacajá, Novolândia pode conter fragmentos de margem arqueana retrabalhados e devolvidos, como o capítulo 8 propôs, embora sua origem exclusiva em Carajás não esteja demonstrada.

Continentes são mosaicos com memória desigual. O ciclo não transporta blocos puros; corta, gira, afina, acrescenta arcos e deixa lascas. A paleogeografia melhora quando aceita bordas difusas e pertenças temporárias.

9. Níveis de confiança

São consenso amplo a existência de Columbia, Rodínia, Gondwana e Pangeia, embora suas geometrias mudem entre modelos; a mudança do crescimento da crosta ao longo do Arqueano; a recorrência dos pi-

cos de zircão e seu viés de preservação; as grandes transferências fanerozoicas; e as idades dos fósseis e dos eventos ambientais citados.

São debates abertos Vaalbara e sua separação, Kenorland único contra clãs, a posição da Amazônia e dos blocos chineses em Rodínia, o peso da preservação nos picos de zircão e a causalidade tectônica das transições biológicas. O capítulo explicita o intervalo de soluções em vez de escolher mapas completos onde os dados oferecem apenas vizinhanças.

São hipóteses deste livro a afinidade de Carajás com o clã de Vaalbara; a leitura de sua margem de 3,2 Ga como parte de uma extensão mais ampla; e o acoplamento probabilístico entre ciclos continentais e inovação biológica, na forma da fórmula do capítulo. O teste exige convergência entre paleomagnetismo, código de barras, proveniência, geoquímica, idades de fósseis e reconstrução ambiental. Correlação temporal inicia a pergunta. Mecanismo e sequência decidem a resposta.

Conclusão

Carajás atravessou a história como fragmento antigo dentro de continentes provisórios. Vizinhos foram soldados, afastados e reencontrados. A crosta que o sustenta mudou de um planeta que fabricava litosfera em grande escala para outro que a refina, funde e recorta. Cada ciclo deixou margens, bacias, montanhas e minerais capazes de alimentar o seguinte.

A vida não acompanha esse pulso como metrônomo. Responde quando o ciclo altera nutrientes, oxigênio, clima, espaço raso, isolamento e mortalidade. A amálgama prepara; o rifte dispara; o colapso afoga corredores e preserva arquivos. A beleza da frase não a isenta de teste. A coincidência ganha causalidade apenas quando o caminho entre placa e célula pode ser percorrido inteiro, e o capítulo 15 vai tentar percorrê-lo.

O próximo capítulo reduz de novo a escala. Depois dos continentes, acompanha uma espécie que emergiu em ciclos climáticos curtos, saiu

de um rifte africano, ocupou um interglacial e começou a operar o próprio planeta. A tectônica construiu o palco durante bilhões de anos. No Éden-Holoceno, um de seus animais aprende a mover o cenário.

Referências

Bekker, A. et al. (2010). Iron formation: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. Economic Geology, 105, 467–508.

Bispo-Santos, F. et al. (2014). Was there SAMBA in Columbia? Paleomagnetic evidence from 1790 Ma Avanavero mafic sills. Precambrian Research, 244, 139–155.

Bleeker, W. (2003). The late Archean record: a puzzle in ca. 35 pieces. Lithos, 71, 99–134.

Butterfield, N. J. (2000). Bangiomorpha pubescens n. gen., n. sp.: implications for the evolution of sex, multicellularity, and the Mesoproterozoic/Neoproterozoic radiation of eukaryotes. Paleobiology, 26, 386–404.

Cawood, P. A.; Hawkesworth, C. J. (2014). Earth's middle age. Geology, 42, 503–506.

Condie, K. C.; Aster, R. C. (2010). Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids. Precambrian Research, 180, 227–236.

de Kock, M. O.; Evans, D. A. D.; Beukes, N. J. (2009). Validating the existence of Vaalbara in the Neoarchean. Precambrian Research, 174, 145–154.

Dhuime, B.; Hawkesworth, C. J.; Cawood, P. A.; Storey, C. D. (2012). A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago. Science, 335, 1334–1336.

Fralick, P.; Davis, D. W.; Kissin, S. A. (2002). The age of the Gunflint Formation, Ontario, Canada: single zircon U-Pb age determinations

from reworked volcanic ash. Canadian Journal of Earth Sciences, 39, 1085–1091.

Gibson, T. M. et al. (2018). Precise age of Bangiomorpha pubescens dates the origin of eukaryotic photosynthesis. Geology, 46, 135–138.

Hawkesworth, C. J. et al. (2009). A matter of preservation. Science, 323, 49–50.

Johansson, Å. (2009). Baltica, Amazonia and the SAMBA connection. Precambrian Research, 175, 221–234.

Li, Z.-X. et al. (2008). Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia. Precambrian Research, 160, 179–210.

Meert, J. G. (2003). A synopsis of events related to the assembly of eastern Gondwana. Tectonophysics, 362, 1–40.

Miao, L.; Yin, Z.; Knoll, A. H.; Guo, C.; Zhu, M. (2024). 1.63-billion-year-old multicellular eukaryotes from the Chuanlinggou Formation in North China. Science Advances, 10, eadk3208.

Mueller, P. A. et al. (2014). The Suwannee suture: significance for Gondwana-Laurentia terrane transfer and formation of Pangaea. Gondwana Research, 26, 365–373.

Rogers, J. J. W.; Santosh, M. (2002). Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. Gondwana Research, 5, 5–22.

Shirey, S. B.; Richardson, S. H. (2011). Start of the Wilson cycle at 3 Ga shown by diamonds from subcontinental mantle. Science, 333, 434–436.

Squire, R. J.; Campbell, I. H.; Allen, C. M.; Wilson, C. J. L. (2006). Did the Transgondwanan Supermountain trigger the explosive radiation of animals on Earth? Earth and Planetary Science Letters, 250, 116–133.

Thomas, W. A.; Astini, R. A. (1996). The Argentine Precordillera: a traveler from the Ouachita embayment of North American Laurentia. Science, 273, 752–757.

Tohver, E. et al. (2002). Paleogeography of the Amazon craton at 1.2 Ga: early Grenvillian collision with the Llano segment of Laurentia. Earth and Planetary Science Letters, 199, 185–200.

Worsley, T. R.; Nance, R. D.; Moody, J. B. (1986). Tectonic cycles and the history of the Earth's biogeochemical and paleoceanographic record. Paleoceanography, 1, 233–263.

Yao, J.; Cawood, P. A.; Shu, L.; Zhao, G. (2019). Jiangnan Orogen, South China: a record of Rodinia assembly and breakup. Earth-Science Reviews, 196, 102872.

Zhao, G.; Cawood, P. A.; Wilde, S. A.; Sun, M. (2002). Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent. Earth-Science Reviews, 59, 125–162.

Capítulo 13. Éden-Holoceno

O animal que saiu do rifte, atravessou o clima e começou a mover o cenário

Modelo de trabalho

Homo sapiens emergiu de populações africanas conectadas e submetidas a paisagens climáticas variáveis. Ciclos orbitais abriram e fecharam corredores; dispersões encontraram outras humanidades; o Holoceno ofereceu uma estabilidade incomum. Agricultura, cidades e redes transformaram o refúgio em planeta operado. O Antropoceno não é uma época formal, mas a agência geológica humana já tem camada, fluxo e assinatura. O Rift como máquina de isolamento e encontro, o Holoceno como Éden geológico e o onlap como figura comum da transgressão são leituras deste livro.

Homo sapiens · Rift Africano · Milankovitch · Pleistoceno · dispersões · megafauna · Holoceno · Younger Dryas · Bronze Tardio · oralidade · Antropoceno · onlap

Resumo

Homo sapiens surgiu na África durante um Pleistoceno de oscilações repetidas. O modelo atual favorece uma origem pan-africana, com populações parcialmente separadas que se afastavam, voltavam a se misturar e trocavam genes e técnicas. O Rift da África Oriental não foi um berço pontual. Criou bacias, lagos, escarpas, corredores e mosaicos de ambientes; fragmentou populações em algumas fases, reuniu-as em outras e preservou parte do arquivo que hoje lemos.

A órbita da Terra alterou a insolação, as monções, o gelo e o nível do mar em ciclos de dezenas de milhares de anos. Períodos úmidos abriram o Saara e a Arábia; fases secas comprimiram gente em refúgios. Dispersões de Homo sapiens ocuparam a Eurásia, encontraram neandertais e denisovanos, cruzaram mares e alcançaram continentes onde a megafauna jamais havia convivido com caçadores tão flexíveis. A espécie inovou sob estresse e passou a reconstruir os ambientes que ocupava.

O degelo final abriu o Éden-Holoceno, com clima global relativamente estável, expansão de florestas, rios, solos e costas. Agricultura, cidades e Estados aumentaram a produtividade e a fragilidade. Seca, frio, vulcanismo, doença, guerra e ruptura de redes participaram de colapsos; a memória oral converteu cheias, migrações e ruínas em passados heroicos. A espécie tornou-se, por fim, força estratigráfica. Chumbo romano chegou ao gelo do Ártico; carvão, petróleo, concreto, plástico, nitrogênio e radionuclídeos definiram a aceleração moderna. A proposta de uma época formal chamada Antropoceno foi rejeitada em 2024, mas o fenômeno permanece mensurável. A vida inteligente já move montanhas. Ainda aprende a escolher para onde.

1. O homem-macaco e o rifte

Convém situar o tempo, porque a escala muda de bilhões para milhares de anos. O Quaternário, o período mais recente, começou há 2,6 milhões de anos e se divide em dois. O Pleistoceno, até 11.700 anos atrás,

é a idade do gelo, com dezenas de ciclos de avanço e recuo das geleiras. O Holoceno, desde então, é o intervalo quente e estável em que toda a história escrita aconteceu. Homo sapiens tem cerca de trezentos mil anos. Viveu, portanto, quase toda a sua existência no Pleistoceno, e só os últimos quatro por cento no Holoceno.

A imagem de um único casal saindo de um vale africano cedeu lugar a uma genealogia em rede. Fósseis antigos de Homo sapiens aparecem em pontos distantes do continente, do Marrocos à África do Sul, e os genomas modernos são melhor explicados por populações africanas fracamente estruturadas, que divergiam e voltavam a trocar genes (Ragsdale et al., 2023). A espécie foi montada por encontros.

O Rift da África Oriental atravessa essa história como agente de paisagem. É o rifte do capítulo 10, o degrau de entrada da escada, visto por dentro e em andamento. Soerguimento modificou drenagens e chuvas; subsidência criou lagos; falhas separaram altitudes, vegetações e rotas. Lagos cresceram e desapareceram. Savana, floresta e margem de lago migraram. Populações animais e humanas responderam a um mosaico móvel, e é nos sedimentos desses lagos que os fósseis se preservaram.

Dizer que o Rift criou Homo sapiens seria trocar geografia por causa. A origem envolve África oriental, setentrional, meridional e provavelmente ocidental. O Rift ofereceu corredores, barreiras, recursos concentrados e arquivos sedimentares. Também tornou visível uma história que em outros lugares foi erodida. Mais uma vez um rifte organiza a narrativa, sem possuir sozinho o acontecimento. O homem-macaco emerge nesse mundo de instabilidade. Mãos, linguagem, memória social, fogo e ferramentas pertencem a linhagens anteriores. Sapiens herdou o conjunto, ampliou a cooperação e acumulou inovação. Sua especialidade foi combinar repertórios quando o ambiente mudava.

2. O céu move a água

O relógio do Pleistoceno é astronômico e tem três ponteiros muito lentos. O primeiro altera a forma da órbita da Terra em torno do Sol, de

quase circular a levemente alongada, num ciclo de cerca de cem mil anos. O segundo muda a inclinação do eixo de rotação, entre 22 e 24 graus e meio, a cada quarenta e um mil anos. O terceiro desloca a posição das estações ao longo da órbita, num ciclo de cerca de vinte e três mil anos. Nenhum determina sozinho o clima. Seus alinhamentos redistribuem a luz do Sol entre as latitudes e as estações, e gelo, oceanos, vegetação, poeira e CO□ amplificam a diferença. São os ciclos de Milankovitch, do sérvio que os calculou nos anos 1920. O relógio fornece o ritmo; não escreve a história.

Na África, o terceiro ponteiro fortalece ou enfraquece as monções. Períodos úmidos transformaram o Saara em campos, lagos e rios, e fases áridas restabeleceram a barreira. Esses pulsos aparecem repetidamente durante centenas de milhares de anos e abrem ou fecham as rotas para o Levante e a Arábia (Armstrong et al., 2023). Corredores verdes abrem; desertos fecham; populações avançam, recuam e se misturam.

O nível do mar também pulsa, e com números grandes. No auge da última glaciação, há vinte mil anos, tanta água estava presa em geleiras que o mar ficava cento e vinte metros abaixo do nível atual. Plataformas inteiras ficavam expostas. Beringia, a ponte de terra entre a Sibéria e o Alasca, surgia e desaparecia. Sundaland, o continente que hoje são as ilhas da Indonésia e a Malásia, unia-se e voltava a se fragmentar. Cada oscilação redesenhava o mapa biológico sem mover uma placa.

Milankovitch não dita guerras, migrações ou evolução humana. Fornece ritmo de fundo, diferente em cada latitude e filtrado por sistemas locais. Uma inovação cultural pode atravessar um período seco; uma sociedade pode amortecer uma colheita ruim; uma sequência de choques pode superar as reservas. O céu oferece a perturbação. A história decide a vulnerabilidade.

3. Sair, retrair, misturar

As dispersões humanas ocorreram em pulsos. Algumas populações saíram da África e desapareceram ou foram absorvidas. A expansão que deixou maior descendência fora do continente começou há cerca de setenta a sessenta mil anos, acompanhada por episódios anteriores e posteriores. Sapiens encontrou outras humanidades e incorporou parte delas. Neandertais, na Europa e no Oriente Médio, e denisovanos, na Ásia, continuam presentes nos genomas atuais, em frações de um a poucos por cento.

Frio e aridez comprimiam as áreas habitáveis; intervalos amenos as expandiam. Costas, rios e estepes funcionaram como linhas de movimento. Pequenos grupos levaram fogo, ferramentas, histórias e redes de troca. Quando o clima fechava um caminho, as populações recuavam para refúgios e ali diferenciavam repertórios e corpos. Quando o corredor reabria, voltavam mais numerosas e tecnicamente diferentes. É a vicariância do capítulo 12, em escala de milênios.

A inteligência não cresceu em degraus a cada glaciação. O cérebro humano já era grande antes da grande dispersão, e capacidade anatômica não equivale a invenção usada. O que se acumulou foi cultura, técnicas preservadas fora do indivíduo, recombinadas por grupos e transmitidas entre gerações. População, conectividade e risco regulavam a velocidade dessa acumulação.

A espécie venceu barreiras locais e pagou com dependência crescente de sua própria tecnologia. A roupa tornou o frio habitável; o barco converteu o mar em caminho; o projétil ampliou a distância da caça; o fogo refez a vegetação. Sapiens começou a superar a natureza mudando-a.

4. O mundo depois da chegada

A expansão de Homo sapiens coincide com quedas severas da megafauna, os grandes mamíferos, fora das regiões onde a convivência com humanos era mais antiga. Clima e transformação de habitats participa-

ram, mas os estudos globais encontram associação forte entre chegada humana e extinção (Sandom et al., 2014; Bergman et al., 2023; Svenning et al., 2024). A caça atua mesmo quando é rara, se os adultos de espécies lentas são removidos acima da capacidade de reposição. Na América do Sul, as preguiças-gigantes, os gliptodontes e os mastodontes desaparecem poucos milênios depois da chegada.

O desaparecimento de grandes herbívoros e predadores muda o fogo, a vegetação, a dispersão de sementes e a ciclagem de nutrientes. O humano não apenas retira espécies. Requalifica o meio. Queima paisagens, transporta plantas, protege árvores úteis, desloca animais e cria zonas de caça. A engenharia ecológica precede a agricultura por milênios, e o capítulo 14 vai encontrá-la na Amazônia.

Chamar isso de vitória sobre a natureza é reconhecer uma mudança de regime e seu custo. A espécie ampliou a própria sobrevivência enquanto simplificava os ecossistemas. Cada continente recém-ocupado ficou mais humano e menos parecido com o mundo anterior.

5. O Éden-Holoceno

A última glaciação terminou em degraus. O aquecimento rápido que começou há dezenove mil anos foi interrompido por um retorno ao frio de mais de mil anos, o Younger Dryas, batizado por uma flor ártica cujo pólen reaparece nos sedimentos europeus daquela época. Depois, há 11.700 anos, começou o Holoceno. A estabilidade relativa de temperatura, estações e nível do mar ofereceu um intervalo excepcional para plantas anuais, rebanhos, assentamentos e armazenamento. O paraíso foi climático antes de ser moral.

No início, a vida expandiu sobre as terras liberadas do gelo. Florestas avançaram, lagos encheram, solos amadureceram e costas ganharam estuários. O Período Úmido Africano cobriu parte do Saara com pastagens e água. Gente pescou, pastoreou, coletou e pintou animais em lugares hoje desérticos. Quando a monção recuou, as populações concentraram-se no Nilo, no Sahel e em outros corredores.

A agricultura apareceu de forma independente em várias regiões, do Crescente Fértil à China, ao México e aos Andes. Ela aumentou o alimento por área, sustentou densidade, especialização, desigualdade, epidemias e guerra organizada. Excedente virou templo, imposto, exército, escrita e dívida. O Éden produziu a cidade e, com ela, novas maneiras de cair.

A estabilidade do Holoceno nunca foi imobilidade. Episódios frios e secos há 8.200 e 4.200 anos, mudanças de monção, El Niño, erupções e variações solares afetaram sociedades diferentes. Relação íntima não significa determinação. O clima pressiona; as instituições distribuem perdas; as redes podem salvar ou propagar o choque.

6. Cidades sob o céu

Civilizações crescem sobre excedentes e conexões. Quanto maior a rede, maior a capacidade de importar grão, metal e informação. A mesma interdependência cria pontos de falha. Seca prolongada, guerra, doença, terremoto ou ruptura comercial pode atravessar o sistema inteiro quando as reservas e a legitimidade já estão baixas.

O colapso do Bronze Tardio, entre ca. 1250 e 1150 a.C., exemplifica a falha sistêmica. Os palácios micênicos da Grécia, as cidades do Levante e o império hitita da Anatólia sofreram destruição, abandono e perda da escrita em ritmos diferentes. Seca, conflito, migração, rebelião, terremotos e dependência das rotas de estanho e cobre, os dois metais do bronze, interagiram. Eric Cline escolheu 1177 a.C. como emblema, não como dia único em que o mundo acabou (Cline, 2021).

As erupções mostram outro princípio. Thera, o vulcão de Santorini, explodiu séculos antes do colapso final e não o explica. Mas aerossóis vulcânicos podem cobrir o céu, reduzir colheitas e precipitar crises durante anos. Em 536, 540 e 547 d.C., grandes erupções contribuíram para um resfriamento prolongado no Hemisfério Norte, e o efeito histórico dependeu de epidemias, guerra e estruturas já tensionadas. Nenhum vulcão isolado derruba uma civilização. Encontra uma que já está ca-

indo.

Ciclos de crescimento e fragmentação deixam idades médias locais. Depois da queda das redes, as comunidades se tornam menores, a escrita rareia e o passado recente cresce na memória. Ruínas de palácios viram cenário de heróis. Uma época complexa, vista do período posterior, parece maior que a vida.

7. A camada contada

Antes do termômetro e do testemunho de gelo, a catástrofe era conservada na voz. A oralidade comprime gerações, desloca lugares, funde personagens e organiza o acaso em intenção. Cada repetição preserva e recria. O resultado não é arquivo falso. É arquivo cultural transformado.

A tradição mesopotâmica do dilúvio atravessa três textos, o poema de Atrahasis, a tabuinha onze da Epopeia de Gilgamesh e, depois, os capítulos seis a nove do Gênesis. Há relações literárias claras entre eles e um ambiente de rios que inundam planícies habitadas. Isso não exige um único dilúvio geológico global. Cheias distintas, cidades destruídas e memórias herdadas puderam convergir numa narrativa em que a água julga, apaga e reinicia. O Êxodo funciona melhor como memória composta de migrações e cativeiros do que como ata de uma marcha datável em todos os detalhes. O sobrenatural pertence à verdade social do texto, e pode ser lido, com uma licença sorridente, como realismo encantado.

Harari chamou de ficções compartilhadas as narrativas capazes de coordenar grandes grupos (Harari, 2011). A expressão é útil e incompleta. Lei, divindade, reino e dinheiro são realidades produzidas por crença, coerção, hábito e instituição, e não deixam de ser reais por isso. O passado heroico também organiza o presente. Idades de integração, sobrecarga, fragmentação e recomposição fornecem matéria para reis perfeitos, guerras fundadoras e paraísos perdidos.

A cheia deixa duas margens, uma de lodo e outra de linguagem. Na

primeira, a arqueologia escava. Na segunda, escuta.

8. O gelo faz contabilidade

Os homens contaram a catástrofe antes de medi-la. Quando chumbo e carbono começaram a entrar no gelo, o planeta passou a contar os homens. Testemunhos de gelo da Groenlândia, cilindros perfurados através de camadas anuais de neve compactada, registram as emissões de mineração e fundição desde a Antiguidade. O chumbo aumenta com a expansão econômica romana, cai durante guerras e epidemias e permanece baixo depois da crise do império (McConnell et al., 2018). A prata de Roma era extraída de minério de chumbo, e cada moeda deixou um pouco de fumaça no Ártico.

Esse sinal é industrial e econômico, não causa do clima medieval. A queda de Roma reduziu as emissões metálicas e alterou o uso da terra, mas o resfriamento posterior envolve vulcanismo, variabilidade solar, circulação dos oceanos e realimentações. A contração romana não explica sozinha a Antiguidade Tardia fria nem a Pequena Idade do Gelo.

A contabilidade ganha resolução na modernidade. Fuligem, sulfato, nitrato, chumbo, carbono e radionuclídeos formam curvas anuais. Quedas durante pestes, guerras e recessões aparecem ao lado da subida industrial. A civilização adquiriu uma assinatura atmosférica antes de compreender o balanço que operava.

9. Onlap

Em geologia, onlap é o que acontece quando o mar sobe sobre uma terra e cada camada nova de sedimento avança um pouco mais sobre ela que a anterior, como ondas sucessivas numa praia em maré enchente. As camadas se encostam na superfície antiga e a cobrem, uma após a outra. É a assinatura sedimentar de uma transgressão, e serve aqui como figura para dois movimentos ao mesmo tempo.

O primeiro é físico. Hoje a espécie altera fluxos em escala de placa.

Move mais sedimento que muitos processos naturais, fixa nitrogênio industrialmente, barra rios, bombeia aquíferos, retira carbono fóssil e o devolve à atmosfera. Cidades fabricam rochas de concreto, vidro, aço e plástico. Minas deslocam montanhas; a agricultura redesenha continentes; organismos viajam em navios e aviões. O aquecimento atual tem causa humana dominante e velocidade característica da queima de combustíveis fósseis. O gelo derrete, os oceanos aquecem e se expandem, o nível do mar sobe. Seguimos em transgressão. A água avança sobre a terra.

A proposta de formalizar uma época chamada Antropoceno, iniciada em meados do século XX, foi rejeitada pela estratigrafia internacional em 2024, e o Holoceno permanece como época formal (ICS e IUGS, 2024). A decisão não apaga o sinal. Plutônio de testes nucleares, carbono, plásticos, cinzas de carvão, concreto e extinções formam um evento estratigráfico global, e a palavra continua útil como nome de um processo e de uma condição do sistema terrestre.

O segundo movimento é cultural. Informação, imagem, capital e desejo atravessam limites em volume crescente, camada sobre camada, cobrindo o que estava antes. A terraformação deixou de ser fantasia voltada a Marte. Já acontece aqui, sem projeto único. A vida inteligente move montanhas, modifica pressões seletivas, edita genomas e altera o clima. Torna-se um processo tectônico apenas como metáfora de escala. As placas continuam movidas pelo calor interno; a espécie reorganiza a superfície e seus fluxos com potência geológica.

Antes de nós, somente a vida microbiana havia transformado o planeta com profundidade comparável. A fotossíntese com oxigênio das cianobactérias, dos capítulos 3 e 7, oxidou os oceanos, refez a atmosfera, abriu o metabolismo aeróbico e impôs uma crise às comunidades que viviam sem oxigênio. A diferença está no relógio. Os microorganismos operaram durante centenas de milhões de anos. A humanidade alterou os ciclos de carbono, nitrogênio, água, sedimento e biodiversidade em séculos, com a maior aceleração concentrada em poucas décadas. A escala tem precedente. A velocidade é nova.

Onde vamos chegar permanece em aberto. A questão mudou. Durante quase toda a história, sobreviver significou adaptar-se ao cenário. Agora significa também governar o cenário que produzimos.

10. Níveis de confiança

São consenso forte a origem africana e em rede de Homo sapiens; o controle orbital dos ciclos glaciais e dos períodos úmidos; a mistura com outras humanidades; a estabilidade relativa do Holoceno; a contribuição humana às extinções da megafauna; os sinais de poluição no gelo; o aquecimento causado pela humanidade e a aceleração material moderna.

São modelos históricos e arqueológicos a multicausalidade do colapso do Bronze Tardio, a relação entre choques climáticos e vulnerabilidade social e a preservação transformada de eventos em tradições orais. Cline e Harari oferecem sínteses narrativas; o capítulo bebe delas sem transformar suas fórmulas em consenso técnico.

São leituras deste livro o Rift como máquina recorrente de isolamento e encontro; o Holoceno como Éden geológico; as idades médias como oficinas de passados heroicos; o onlap como figura comum da transgressão marinha e cultural; e a vida inteligente como agente comparável, em potência superficial, a um processo geológico. A camada existe. Seu significado continua sendo depositado.

Conclusão

A escala deste capítulo é a menor do livro e a mais rápida. Trezentos mil anos de uma espécie, dez mil de um clima dócil, duzentos de uma aceleração. O animal que saiu do rifte aprendeu, no Éden que o degelo lhe deu, a estocar, a escrever e a mover matéria em escala de placa, e deixou no gelo o recibo de cada etapa. O capítulo seguinte volta a Carajás para ver essa camada depositada sobre a serra, desde as cavernas até a mina.

Referências

Armstrong, E. et al. (2023). North African humid periods over the past 800,000 years. Nature Communications, 14, 5549.

Bergman, J. et al. (2023). Worldwide Late Pleistocene and Early Holocene population declines in extant megafauna are associated with Homo sapiens expansion. Nature Communications, 14, 7679.

Cline, E. H. (2021). 1177 B.C.: The Year Civilization Collapsed. Revised edition. Princeton University Press.

Harari, Y. N. (2011). Sapiens: uma breve história da humanidade.

International Commission on Stratigraphy; International Union of Geological Sciences (2024). Joint statement on rejection of the Anthropocene Epoch proposal.

McConnell, J. R. et al. (2018). Lead pollution recorded in Greenland ice indicates European emissions tracked plagues, wars, and imperial expansion during antiquity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115, 5726–5731.

Ragsdale, A. P. et al. (2023). A weakly structured stem for human origins in Africa. Nature, 617, 755–763.

Sandom, C. et al. (2014). Global late Quaternary megafauna extinctions linked to humans, not climate change. Proceedings of the Royal Society B, 281, 20133254.

Svenning, J.-C. et al. (2024). The late-Quaternary megafauna extinctions: patterns, causes, ecological consequences and implications for ecosystem management. Cambridge Prisms: Extinction.

Capítulo 14. A camada humana

Mineração, território e as muitas ocupações de Carajás

Modelo de trabalho

A camada humana de Carajás começa muito antes da mina. Povos ocuparam cavernas, manejaram plantas, abriram caminhos e construíram paisagens. A conquista desorganizou esse mundo e chamou de vazio o espaço produzido pela mortandade. Mais tarde, o ouro ajudou a empurrar o Brasil para o interior; Cuiabá fixou, por rios e monções, uma fronteira que ultrapassara Tordesilhas. Carajás repetiu a gramática no século XX, agora com geofísica, ferrovia, capital industrial e planejamento estatal. A mesma sociedade que move montanhas já conhece a coluna que atravessa. Sua escolha começa por recolocar os povos do território dentro do mapa. A mineração como tecnologia recorrente de fabricação territorial e a crítica operável por critérios de suficiência são leituras deste livro.

Carajás · cavernas de canga · Amazônia antropogênica · terra preta · conquista · Tordesilhas · monções · Cuiabá · Serra Pelada · Estrada de Ferro Carajás · soberania geológica · biopoder · brutalismo · mineração responsável

Resumo

O capítulo anterior acompanhou Homo sapiens até o instante em que uma espécie passou a operar ciclos planetários. Aqui a escala retorna a Carajás. A camada mais recente da serra contém casas, caminhos, roças, castanhais, aldeias, garimpos, cidades, ferrovias e minas. Contém também apagamentos. As mesmas cavernas de ferro que hoje figuram nos licenciamentos foram, primeiro, casa.

A Amazônia oriental tem uma história humana de mais de onze mil anos. Seus habitantes manejaram espécies, produziram solos, ergueram estruturas e transformaram floresta em território. Epidemias, guerra, escravização e expulsão romperam essa continuidade depois da conquista. O vazio que autorizou novas frentes foi, em grande parte, um produto histórico.

A mineração teve papel decisivo na fabricação territorial do Brasil. Ouro e diamantes abriram rotas, fundaram vilas, instalaram tributos e sustentaram a presença portuguesa muito além da linha de Tordesilhas. A baixada cuiabana mostra a sequência com nitidez. Carajás a reproduziu no século XX por outros meios. A próxima etapa exige uma arquitetura diferente, em que conhecimento básico, planejamento estratégico e projeto mineral pertençam a camadas distintas. As tecnologias para conhecer, proteger, produzir e reparar já existem, dispersas entre instituições. A camada humana é inevitável. Seu brutalismo ainda pode ser recusado.

1. A casa antes do mapa

A história humana de Carajás começou na rocha. A serra é coberta por uma crosta de ferro endurecida, a canga, formada quando o intemperismo tropical dissolveu e recimentou o topo do jaspilito do capítulo 5 ao longo de dezenas de milhões de anos. Dentro dela e do minério abaixo, a água abriu cavernas, centenas delas, baixas e secas. Essas cavernas e abrigos ofereceram água próxima, proteção, matéria-prima e domínio visual da paisagem. Vestígios de pedra lascada registram ocu-

pações desde o fim do Pleistoceno, há mais de onze mil anos, e atravessam grande parte do Holoceno (Shock et al., 2019; Maia et al., 2022). A gruta abriu a primeira janela estratigráfica da presença humana na serra.

As mesmas cavernas de ferro que hoje figuram nos licenciamentos foram, primeiro, casa. A frase devolve a ordem temporal ao mapa. Patrimônio arqueológico e patrimônio espeleológico, as duas categorias legais que protegem vestígios humanos e cavernas, ganharam ficha, polígono e número de processo muito depois. O procedimento moderno reconhece uma relação antiga entre corpo, memória e pedra.

Os genomas aprofundam a seção e complicam seu desenho. Populações amazônicas atuais conservam um sinal de afinidade com povos da Australásia, da Nova Guiné e da Austrália, conhecido como sinal Y, do nome do povo Ypykuéra na língua tupi. Estudos independentes confirmaram o componente e discordam sobre sua distribuição, sua cronologia e o número de populações fundadoras necessárias para explicá-lo (Skoglund et al., 2015; Castro e Silva et al., 2021). A rota mais aceita continua passando pela Beringia do capítulo 13. O dado revela uma história americana ramificada. Sua origem permanece em debate e pode refletir uma estrutura populacional anterior à entrada nas Américas, em vez de travessias pelo Pacífico.

Na Amazônia, a presença tornou-se paisagem. Geoglifos do Acre, desenhos geométricos de centenas de metros escavados no solo, redes de aldeias e estradas do Alto Xingu, fossos, praças e milhares de estruturas ainda escondidas sob o dossel registram sociedades que construíam com terra, madeira e vegetação (Heckenberger et al., 2003; Peripato et al., 2023). A floresta cobriu a arquitetura e conservou sua geometria. A imagem de uma Amazônia intocada antes de 1492, o mito da natureza prístina, caiu com essas descobertas (Denevan, 1992).

O manejo sobreviveu dentro da própria mata. Castanha, cacau, pupunha, açaí e outras plantas domesticadas ou favorecidas aparecem em abundância anormal perto de sítios arqueológicos. As terras pretas, solos escuros e férteis produzidos por séculos de carvão, resíduos e ce-

râmica acumulados pelas aldeias, guardam esse trabalho (Clement et al., 2015; Levis et al., 2017). Parte dos castanhais que enriqueceram Marabá no século XX já carregava séculos de escolha humana. A economia recente colheu pomares antigos como se fossem natureza espontânea.

Carajás continua habitada por povos com histórias próprias. Xikrin do Cateté, Gavião Parkatêjê, Parakanã, Suruí-Aikewára e outros grupos vivem entre o Baixo Tocantins, o Araguaia e as serras. Território, aqui, inclui rio, caça, roça, caminho, cemitério, língua e parentesco. O minério entrou depois nessa totalidade.

2. O vazio produzido

A conquista abriu uma discordância erosiva na história americana, uma superfície em que camadas inteiras foram removidas antes que as seguintes se depositassem. Patógenos encontraram populações sem imunidade prévia; guerra, captura, fome e deslocamento multiplicaram a mortalidade. A escala exata varia entre modelos, porque o recenseamento começou depois da catástrofe. A queda demográfica continental, porém, foi extrema.

Koch et al. (2019) propuseram que o abandono das áreas cultivadas e o reflorestamento posterior a 1492 retiraram carbono suficiente da atmosfera para contribuir com a queda de CO□ registrada no gelo nos séculos XVI e XVII. O cálculo depende de estimativas incertas de população, de área ocupada e de regeneração da vegetação. Sua hipótese mais perturbadora permanece plausível. A floresta cresceu sobre uma ausência humana grande o bastante para deixar sinal planetário, o recibo no gelo do capítulo anterior, em sinal contrário.

Na Amazônia oriental, aldeias foram destruídas ou agregadas, sobreviventes recuaram, alianças se refizeram e caminhos fecharam. A vegetação retomou as estruturas perecíveis. Depois serviu como prova de que ninguém estivera ali. O apagamento demográfico produziu a aparência natural do vazio; a cartografia converteu aparência em disponibilidade.

Missões, presídios, destacamentos, fazendas e frentes de extração avançaram por rios e caminhos indígenas. Incorporaram guias, nomes de lugares, plantas e técnicas locais, ao mesmo tempo que substituíam autoridades e memórias. O mapa colonial parecia descobrir aquilo que, muitas vezes, apenas rebatizava.

A fórmula amazônica da ditadura militar, terra sem homens para homens sem terra, reutilizou essa operação quatro séculos depois. A região estava cheia de gente sob outras densidades e lógicas de uso. O Estado precisou reduzir território a superfície desocupada para oferecê-lo como fronteira. A estrada, o lote e a concessão chegaram carregando uma ausência que existia primeiro no papel.

3. O país atrás do ouro

O Brasil colonial nasceu voltado para o mar. Pau-brasil, açúcar, portos, escravização e plantation organizaram a ocupação da costa. O Brasil territorial, aquele que avançou para oeste e ultrapassou largamente a linha de Tordesilhas, o meridiano que em 1494 dividira o mundo entre Portugal e Espanha e deixava quase toda a Amazônia do lado espanhol, recebeu da mineração parte decisiva de sua forma. Ouro e diamantes deram direção econômica ao movimento, densidade às rotas e urgência à presença do Estado.

As minas de Minas Gerais, a partir dos anos 1690, deslocaram população, mercado e poder para o Sudeste. Goiás e Mato Grosso prolongaram a corrida pelo interior. A notícia de uma descoberta reunia mineradores, comerciantes, escravizados, tropeiros, religiosos, contrabandistas e funcionários. Arraiais cresciam junto às lavras; alguns viravam vilas; câmaras, igrejas, cadeias e casas de fundição fixavam a administração sobre o caminho aberto pelo metal.

A mineração fabricava território por encadeamento. A ocorrência atraía a corrida. A corrida exigia alimento, ferramenta e transporte. O abastecimento criava roças, pousos e comércio. A arrecadação trazia fiscalização, jurisdição e tropa. Quando a lavra declinava, parte da

rede permanecia. O minério saía; a geografia política ficava.

Essa expansão assentou-se sobre trabalho africano escravizado e violência contra os povos indígenas. Rios, encostas e corpos foram consumidos juntos. A função territorial da mineração contém essa origem. O metal ajudou a desenhar o país e financiou um regime que transformava gente em instrumento de lavra.

A baixada cuiabana oferece um corte quase didático. O ouro encontrado no rio Coxipó em 1719 atraiu uma ocupação portuguesa para muito além da antiga linha. O arraial de Cuiabá formou-se nos anos seguintes, tornou-se vila em 1727 e passou a integrar a capitania de Mato Grosso, criada em 1748. Uma ocorrência de cascalho tornou-se argumento administrativo para o extremo oeste.

As monções ligaram São Paulo a Cuiabá. A palavra, a mesma das chuvas asiáticas, nomeava no Brasil colonial as expedições fluviais anuais que partiam de Porto Feliz, no Tietê, e desciam milhares de quilômetros de rios, cachoeiras e varadouros até o Paraguai e o Cuiabá, no ritmo das cheias. Canoas levavam sal, ferro, tecido, armas, pessoas e notícia. Voltavam com ouro, doença, dívida e novos mapas. A rota mineral tornou-se sistema de abastecimento, circulação cultural e presença política (Holanda, 1990). Partículas arrancadas do cascalho ajudaram a deslocar, na prática, a forma do Brasil.

4. Carajás, outra monção

O século XX refez o método com motores novos. Antes do ferro, o sudeste do Pará viveu pulsos de borracha, castanha, diamante e pecuária. Cada ciclo atraiu gente, concentrou renda, abriu caminho e deixou sua população quando o preço caiu. Os castanhais consolidaram Marabá como centro regional; os garimpos de diamante do Baixo Tocantins, do capítulo 11, e depois o de ouro em Serra Pelada acrescentaram a vertigem do enriquecimento imediato.

Em 1967, a identificação do manganês e, logo depois, das grandes reservas de ferro converteu a serra em província estratégica. Geologia

sistemática, direitos minerais, financiamento, planejamento estatal e capital internacional começaram a operar sobre um território tratado como fronteira. Vieram minas, usinas, energia, a Estrada de Ferro Carajás, com seus quase novecentos quilômetros até o porto de Ponta da Madeira, no Maranhão, e núcleos urbanos. A ocorrência transformou-se em eixo nacional de exportação.

A monção agora corria sobre trilhos. Composições de minério ligaram a serra ao Atlântico; cidades-empresa, municípios planejados e periferias aceleradas ocuparam a posição dos antigos arraiais; royalties, impostos e contratos organizaram a captura pública e privada da renda. Geofísica, sondagem e usina substituíram bateia e picareta como tecnologias dominantes. A sequência espacial permaneceu reconhecível. Achar o metal, abrir o corredor, mover população, instalar poder, reorganizar a terra.

Ferro, manganês, ouro, cobre e níquel empilharam frentes sobre a mesma província, na mesma ordem em que os capítulos 5, 6 e 9 as explicaram. Marabá, Parauapebas, Canaã dos Carajás, Curionópolis e outros centros foram refeitos pelos pulsos. Migrantes vindos de muitas partes construíram casa, família, comércio e cultura. A fronteira deixou de ser apenas projeto do Estado ou da empresa; tornou-se lugar de gerações que também adquiriram direito ao futuro.

A pegada territorial ultrapassou a cava. Ferrovia, rodovia e energia valorizaram terras, abriram acessos e redirecionaram fluxos. A economia mineral induziu urbanização, pecuária, especulação e demanda por madeira, alimento e água. Uma mina formal ocupa um polígono delimitado. A província que ela organiza se estende por rios, cidades, florestas e corredores de transporte.

Serra Pelada condensou a violência e o fascínio dessa nova corrida. Dezenas de milhares de homens escavaram, nos anos 1980, uma cava quase manual sob controle militar, comercial e político. Sebastião Rodrigues de Moura, o major Curió, saiu da repressão à Guerrilha do Araguaia, o levante armado que o regime militar esmagou na região entre 1972 e 1975, para se tornar a autoridade central do garimpo; de-

pois emprestou o apelido a uma cidade. Segurança nacional, ouro e domínio territorial atravessaram a mesma falha.

A Guerrilha deixou mortos e desaparecidos cujos corpos o Estado ainda deve às famílias (Comissão Nacional da Verdade, 2014). Grilagem, trabalho análogo à escravidão, assassinatos por terra e garimpo irregular acrescentaram outras marcas. O mercúrio desceu pelos rios enquanto a floresta recuava pelas estradas. Desenvolvimento, riqueza e violência chegaram juntos, distribuídos de maneira profundamente desigual. A camada humana de Carajás registra todos esses minerais sociais.

5. As três camadas da decisão

A fronteira mineral começa antes da mina, quando alguém produz conhecimento sobre o subsolo. Um país que desconhece a própria geologia entrega a decisão a quem tem capital para conhecê-la em silêncio. O levantamento público torna a informação comum, permite planejamento e expõe pressões que já existem. Conhecimento geológico é uma forma de soberania.

Foucault mostrou que saber e poder circulam juntos. Tornar população e território legíveis permite cuidar, tributar, ordenar, vigiar e intervir (Foucault, 2008). O mapa participa dessa tecnologia de governo. Pode proteger uma nascente, reconhecer uma terra indígena, bloquear um requerimento ou dirigir uma ferrovia. Pode também produzir invisibilidade por aquilo que deixa fora. Conhecer a Terra amplia o campo da escolha; a política decide o uso dessa visibilidade.

Esse começo produz a primeira camada, a ciência básica. Cartografia, geoquímica regional, geofísica e pesquisa anterior à competição entre empresas descrevem processos e reconhecem potencial. Exigem rigor, transparência, comunicação e as autorizações adequadas ao acesso. Um dado geológico informa a sociedade. O desenho da mina pertence a outra etapa.

A segunda camada é o planejamento mineral estratégico. Nela o país

define substâncias críticas, áreas prioritárias, restrições, estoques de conhecimento e objetivos de longo prazo. A escolha distribui pesquisa, infraestrutura e pressão futura. Povos indígenas, comunidades tradicionais, municípios e sociedade precisam participar dessa arena antes que o planejamento chegue como fato consumado.

A terceira camada reúne os projetos concretos, com direitos minerários, estudos de viabilidade e licenciamento ambiental. Aqui o dado ganha desenho industrial, captação de água, acesso, rejeito, emissão, reassentamento e duração. Avaliação ambiental, consulta, negociação territorial e garantias devem acompanhar a capacidade real de transformar o lugar.

A fusão das três camadas contamina a decisão. Um resultado científico passa a ser tratado como autorização de lavra; o receio de uma lavra futura recai então sobre a produção do conhecimento. Fato científico não é projeto de mineração. Entre conhecer e extrair existe um espaço político inteiro.

Carajás demonstra o valor dessa separação. O conhecimento que revelou ferro, cobre, ouro e níquel ampliou soberania e capacidade econômica. O modo como cada depósito virou operação pertence a decisões posteriores, com impactos, beneficiários e responsabilidades próprios. Conhecer a província continua necessário inclusive onde a escolha madura seja conservar. E a qualidade do mapa depende das camadas que representa. Litologia, estrutura, ocorrência e recurso são parte da informação. Aquíferos, cavernas, aldeias, caminhos, áreas protegidas e usos tradicionais completam o sistema sobre o qual a decisão incidirá. Quando uma dessas camadas desaparece, o erro ultrapassa a cartografia.

6. Fazer viver sem brutalizar

Como fazer viver oito bilhões de pessoas sem destruir as condições de vida do planeta? A pergunta devolve matéria às palavras. Comida, água tratada, moradia, saneamento, hospital, transporte, agricultura,

indústria e comunicação dependem de fosfato, aço, cimento, cobre, urânio, alumínio, areia, terras raras, energia e território. A vida contemporânea repousa sobre uma base mineral gigantesca.

Foucault chamou de biopoder a passagem para uma política dedicada a gerir populações, corpos, saúde, circulação e recursos, e resumiu sua fórmula em fazer viver e deixar morrer (Foucault, 2005). A primeira metade descreve uma obrigação concreta, produzir as condições materiais da vida. A segunda mostra o risco inscrito na distribuição dessas condições. Toda política mineral decide, em alguma medida, quem recebe energia e infraestrutura, quem suporta poeira e ruído, quem conserva a água e quem permanece exposto depois que o capital parte.

Mbembe empurra a pergunta até seu limite. A necropolítica aparece quando o poder distribui a exposição à morte e converte determinados corpos e lugares em sacrificáveis (Mbembe, 2018). Em Brutalismo, a imagem ganha escala planetária. Fraturar, fissurar, extrair, demolir e acumular resíduos tornam-se operações de uma época que trata mundo e corpo como matéria disponível (Mbembe, 2021). A mineração reconhece seus próprios verbos nessa descrição. Reconhecê-los permite separar a necessidade material da licença para brutalizar.

A transição energética amplia essa tensão. Turbinas, redes, baterias, reatores e veículos eletrificados exigem grandes volumes de cobre, lítio, níquel, grafite, terras raras e outros minerais. As projeções variam com cenário, tecnologia, reciclagem e redução de consumo; todas mantêm pressão relevante sobre novas fontes (International Energy Agency, 2026). A matéria será procurada em províncias férteis. Carajás está entre elas.

A resposta começa pela redução do consumo e pelo aproveitamento do que já foi extraído. Durabilidade, reparo, reciclagem, recuperação de rejeitos, melhor aproveitamento metalúrgico e infraestrutura compartilhada podem evitar parte das novas frentes. O volume remanescente ainda será grande. Produzi-lo longe dos olhos, em países com menor capacidade de fiscalização, apenas exporta o impacto.

O planeta precisa de santuários verdadeiros e de lugares onde a maté-

ria necessária possa ser produzida sob as melhores regras. A mesma ética sustenta as duas escolhas. Reconhecer o território concreto, proteger o insubstituível e exigir excelência onde a produção couber. Transformar o santuário em regra universal desloca o custo para outro lugar. Transformar a jazida em ordem superior sacrifica quem vive sobre ela.

Pessoas vêm primeiro. A frase ganha conteúdo quando altera desenho, cronograma, custo e decisão. Comunidades precisam de informação inteligível, tempo, escuta, representação e garantias. Participação sem consequência vira cerimônia. Quanto mais estratégico o projeto, maior seu dever de exemplaridade. O ônus da excelência pertence a quem propõe a transformação.

A crítica técnica ajuda a construir esse padrão quando define critérios de suficiência, isto é, quando diz o que bastaria. Identifica a amostragem ausente, o modelo que precisa ser revisto, o limite aceitável, o cenário que inviabiliza a operação e a instituição responsável pela verificação. O medo social pertence a outro registro e merece escuta, explicação e garantia. Conflitos sobre distribuição pedem negociação política. Uma recusa fundada em valores também é legítima; sua honestidade começa quando se apresenta como escolha de valor. O mesmo rigor vale para o empreendedor. Chamar um projeto de estratégico não demonstra interesse nacional.

O setor mineral e o Estado contribuíram para a desconfiança que enfrentam. Desastres, promessas descumpridas, reparações insuficientes e monitoramentos opacos permanecem na memória social. Audiência tratada como apresentação confirma a sensação de rito vazio. O Estado, por sua vez, oscila entre carimbo e paralisia. Uma instituição madura precisa negar projetos insuficientes e decidir sobre os projetos que alcançam um padrão demonstrável.

As condições técnicas para uma mineração diferente já estão postas. Sensoriamento remoto, varredura a laser do relevo, radar de satélite capaz de medir afundamentos de milímetros, drones e séries de imagens acompanham vegetação, subsidência, drenagem e expansão urbana. Redes de sensores medem água, poeira, vibração e estabilidade

quase em tempo real. Modelos hidrogeológicos simulam caminhos e testam cenários. DNA ambiental e monitoramento acústico ampliam a leitura da biodiversidade. O mesmo conhecimento que encontra minério pode delimitar cavernas, aquíferos, corredores ecológicos e áreas onde a integridade vale mais que a lavra.

Na operação, a geometalurgia, que liga cada domínio do depósito ao processo de beneficiamento adequado, a lavra seletiva, a separação por sensores e o reaproveitamento de rejeitos reduzem o material movimentado por unidade de metal. Espessamento, filtragem, disposição a seco e preenchimento de cavas e galerias exauridas, quando compatíveis com a geologia, oferecem alternativas à barragem convencional de rejeitos, a tecnologia que rompeu em Mariana e em Brumadinho. Recirculação diminui a captação de água; eletrificação reduz emissões locais; fechamento progressivo devolve função à paisagem antes do fim da receita.

A validade dessas técnicas é local e condicional. Disposição filtrada requer estabilidade, manejo de água e controle de poeira. Lavra subterrânea pode reduzir a marca superficial e criar subsidência. Processos no subsolo dependem de mineralogia, permeabilidade e confinamento hidráulico; em aquíferos fraturados, fluidos percorrem estruturas difíceis de prever, como os capítulos 6 e 9 mostraram por outro ângulo. Poços não domesticam a geologia. Tecnologia responsável começa pela capacidade de reconhecer onde falha.

Há também tecnologias institucionais. A avaliação ambiental estratégica compara caminhos antes de existir um projeto fechado. A avaliação de impactos cumulativos enxerga ferrovia, cidade, pecuária, água e floresta como um único sistema. O ordenamento territorial separa áreas de proteção integral, zonas de uso e corredores de infraestrutura. Dados abertos, monitoramento comunitário, auditoria independente, rastreabilidade e garantias financeiras distribuem a capacidade de verificar e responder. Consulta e negociação transformam experiência local em informação de projeto.

As peças permanecem desconectadas. O geólogo modela o depósito;

o hidrogeólogo recebe uma geometria quase pronta; a ecologia entra depois do plano de mina; o fechamento aparece quando a operação já consolidou dependências; o município conhece a arrecadação antes de conhecer o passivo; a comunidade recebe centenas de páginas quando as escolhas centrais amadureceram. Cada especialidade tem uma parte da solução. A fragmentação impede que formem sistema.

O passo decisivo é a arquitetura. Um mesmo modelo territorial pode reunir geologia, água, biodiversidade, população, infraestrutura, risco, custo e tempo. A decisão começa pela exclusão das áreas incompatíveis, prossegue pela comparação de alternativas e acompanha toda a vida do projeto. Conhecer serve para produzir melhor e para reconhecer onde a produção deve parar. A soberania está nessa capacidade de escolher.

Desenvolvimento responsável trabalha com redução de danos. Reconhece impactos, evita o que pode, reduz o restante, compensa perdas residuais e responde quando o comportamento real diverge do modelo. O fechamento nasce com a abertura e recebe garantia financeira. O benefício territorial aparece em formação, fornecedores, infraestrutura útil, saúde, diversificação econômica e poder de decisão. Uma mina cumpre função social quando o território permanece capaz de viver depois do último embarque.

Carajás reúne condições para testar esse pacto em grande escala. Tem depósitos excepcionais, conhecimento acumulado, infraestrutura, unidades de conservação, povos indígenas, cidades dependentes da mineração e memória abundante dos erros da fronteira. Pode repetir a ordem em que a jazida comanda tudo ao redor. Pode também submeter o projeto ao território existente e obrigá-lo a provar que cabe nele.

7. A camada inevitável

O ouro colonial empurrou fronteiras. As monções costuraram Cuiabá ao litoral. O ferro ligou Carajás ao Atlântico por trilhos. Em cada ciclo, a rocha forneceu matéria e direção; a sociedade escolheu a forma da

corrida. O método permaneceu reconhecível porque o mapa brasileiro aprendeu a seguir o minério.

A camada humana continuará sendo depositada. Oito bilhões de corpos produzem casas, estradas, redes, alimentos, máquinas, rejeitos, memória e calor. Mesmo uma civilização que reduza o consumo e estabilize a população continuará transformando matéria. Enquanto houver civilização, haverá deposição. Sua textura, sua química e suas discordâncias pertencem à escolha.

O brutalismo é uma fácies possível dessa presença, marcada por extração sem retorno, territórios sacrificados e resíduos entregues ao futuro. Outra fácies combina proteção, produção, reparação e memória. As ferramentas que permitem essa diferença já existem. Conectá-las é o trabalho político e técnico desta época.

Agora o mapa pode aprender outra coisa. Conhecemos a idade da crosta, os pulsos que concentraram metal, o caminho dos fluidos, a fragilidade das cavernas e parte da história dos povos da serra. Sabemos que ciência básica, estratégia nacional e projeto industrial exigem decisões diferentes. A ignorância encolheu. A responsabilidade ocupou o espaço deixado por ela.

O geólogo chega ao campo com imagens de satélite, magnetometria, geoquímica e um modelo do depósito. Precisa chegar também com a consciência de que toda área já contém relações. O mapa excelente reconhece falha, litologia, aquífero, casa, caminho e memória. A camada social integra o sistema que será transformado.

Antes, a mineração funcionou muitas vezes como ponta de lança do território. A próxima fronteira precisa aprender a caber dentro de territórios vivos. Isso exige conhecimento público, ordenamento, ciência independente, participação com consequência e instituições capazes de encerrar decisões. Alguns depósitos permanecerão onde estão.

A coluna estratigráfica não termina. Ela apenas chegou em nós, com a caneta na mão. A frase reconhece autoria dentro de um mundo parcialmente controlável. A camada seguinte será feita de metal, floresta,

água, cidade, conflito e escolha. Pela primeira vez, o agente deposicional consegue discutir a fácies antes de produzi-la.

8. Níveis de confiança

São evidências bem estabelecidas a ocupação de Carajás desde o fim do Pleistoceno; a existência de paisagens amazônicas construídas; o manejo prolongado de plantas e solos; a catástrofe demográfica posterior à conquista; a expansão territorial associada aos ciclos minerais coloniais; a formação de Cuiabá a partir do ouro; e a transformação de Carajás por mineração, infraestrutura e migração.

São modelos sustentados, com incertezas próprias, a história demográfica representada pelo sinal genético australasiano; a magnitude exata das populações americanas anteriores a 1492; e a contribuição do reflorestamento posterior à conquista para a queda de CO□ dos séculos XVI e XVII. O capítulo preserva o dado e limita o alcance de cada explicação.

São lentes filosóficas adotadas a ligação entre saber, visibilidade e governo descrita por Foucault; sua formulação do biopoder como capacidade de fazer viver e deixar morrer; a necropolítica de Mbembe como distribuição da exposição à morte; e o brutalismo como leitura de uma época planetária de fratura, extração, demolição e resíduo. O capítulo mantém essas lentes no campo da interpretação.

É uma leitura deste livro a mineração como tecnologia recorrente de fabricação territorial. Cuiabá e Carajás compartilham uma sequência espacial; seus regimes políticos, suas tecnologias e suas responsabilidades diferem profundamente. Também é proposição deste livro que uma crítica se torna tecnicamente operável quando apresenta critérios de suficiência, e que a mineração necessária deve provar sua função territorial. A camada humana é inevitável. Sua fácies brutal permanece uma escolha.

Conclusão

A camada humana de Carajás tem onze mil anos de casa e sessenta de mina, e o livro precisou de catorze capítulos para chegar a ela porque tudo o que a mina extrai foi preparado pelos treze anteriores. O que este capítulo acrescenta não é geologia. É a observação de que, pela primeira vez na coluna, o agente que deposita pode ler a coluna, e de que ler obriga a escolher. O capítulo seguinte pergunta se o que aconteceu aqui, da água à escolha, era esperável em outros lugares do céu.

Referências

Castro e Silva, M. A. et al. (2021). Population histories and genomic diversity of South American natives. Molecular Biology and Evolution, 39, msab339.

Clement, C. R. et al. (2015). The domestication of Amazonia before European conquest. Proceedings of the Royal Society B, 282, 20150813.

Comissão Nacional da Verdade (2014). Relatório, volume I. Brasília.

Denevan, W. M. (1992). The pristine myth: the landscape of the Americas in 1492. Annals of the Association of American Geographers, 82, 369–385.

Foucault, M. (2005). Em defesa da sociedade: curso no Collège de France, 1975–1976. Martins Fontes.

Foucault, M. (2008). Segurança, território, população: curso no Collège de France, 1977–1978. Martins Fontes.

Heckenberger, M. J. et al. (2003). Amazonia 1492: pristine forest or cultural parkland? Science, 301, 1710–1714.

Holanda, S. B. de (1990). Monções. 3ª edição. Brasiliense.

International Energy Agency (2026). Global Critical Minerals Outlook 2026. Paris.

Koch, A. et al. (2019). Earth system impacts of the European arrival and Great Dying in the Americas after 1492. Quaternary Science Reviews, 207, 13–36.

Levis, C. et al. (2017). Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition. Science, 355, 925–931.

Maia, R. R. et al. (2022). A utilização dos quartzos por sociedades antigas na Serra de Carajás. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas, 17.

Mbembe, A. (2018). Necropolítica. n-1 edições.

Mbembe, A. (2021). Brutalismo. n-1 edições.

Peripato, V. et al. (2023). More than 10,000 pre-Columbian earthworks are still hidden throughout Amazonia. Science, 382, 103–109.

Shock, M. P. et al. (2019). Useful plants and their relation to archaeological sites in the Serra de Carajás, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 91, e20170909.

Skoglund, P. et al. (2015). Genetic evidence for two founding populations of the Americas. Nature, 525, 104–108.

Capítulo 15. A Terra como jazida

Um modelo de favorabilidade aplicado a sistemas planetários

> **Modelo de trabalho**
>
> A Terra é uma jazida de água líquida em um planeta rochoso, e as condições descritas nos capítulos anteriores podem ser convertidas em camadas de um modelo de favorabilidade. Este capítulo traduz o sistema planetário em critérios de mira, atribui pesos por importância, aplicabilidade e confiança, propaga a incerteza por dois milhões de simulações e devolve a grandeza que interessa a quem explora: a distância até o alvo mais próximo. O método vem da exploração mineral, e a fonte da ideia fica declarada.

sistema mineral · favorabilidade · index overlay · vicariância · leis de escala · Monte Carlo · vizinho mais próximo · escada das crostas · exoluas · falseabilidade

Agosto de 2026

Resumo

Por mais de dez anos construí mapas de favorabilidade mineral. O método consiste em descrever o sistema que produz o depósito, traduzir cada componente desse sistema em uma camada de evidência mapeável, atribuir peso a cada camada conforme sua importância, sua aplicabilidade e a confiança que merece, somar o conjunto e obter uma superfície que indica onde vale a pena furar. Este capítulo aplica o método ao maior alvo disponível. Antes disso, fecha duas contas que o livro deixou em aberto: o mecanismo publicado que relaciona tectônica de placas e diversificação biológica, e a razão pela qual um método construído para províncias minerais pode ser levado à escala da galáxia. A Terra é tratada como uma jazida de água líquida hospedada em um planeta rochoso, e as condições descritas nos capítulos anteriores tornam-se as camadas do modelo. O produto que interessa aqui é a distância até o sistema equivalente mais próximo.

O resultado central: doze camadas, uma cadeia causal, dois milhões de simulações. Sob os intervalos e as independências adotadas, o funil que este livro postula, um impacto gigante com a geometria certa no momento certo, deixa passar, na mediana, cerca de um sistema em quarenta e seis. O mesmo cenário retorna algo próximo de trinta milhões de sistemas férteis na Via Láctea e uma distância média condicional de setenta e quatro anos-luz até o mais próximo. Quando também se amostra o acaso da posição desses sistemas, a mediana preditiva fica perto de setenta e um anos-luz, com noventa por cento dos resultados entre vinte e cinco e cento e sessenta e sete. Acrescentando o tempo, uma biosfera complexa contemporânea recua para perto de cento e oitenta anos-luz. Para uma civilização tecnológica contemporânea, o cenário mediano retorna apenas quatro ocorrências galácticas, mas a geometria local já não autoriza converter esse número numa distância física confiável.

A análise de sensibilidade e a tabela de pesos apontam para as mesmas regiões frágeis do argumento: a frequência de planetas rochosos de massa terrestre na zona habitável, a geometria do impacto da proto-

Lua e a manutenção da tectônica. Essa concordância é uma verificação de consistência interna, não uma validação independente: as mesmas incertezas que receberam confiança baixa também receberam intervalos largos e, por isso, dominam a variância. Duas dessas três camadas são postulados deste livro. O capítulo termina onde todo mapa de prospectividade deve terminar, listando o que faria o modelo desabar.

1. O argumento em uma página

Vale recolher a cadeia inteira antes de submetê-la à aritmética.

A água chegou disfarçada. Numa região do disco onde o gelo não sobrevive, ela atravessou a fronteira térmica escondida como hidroxila na estrutura dos minerais, foi fabricada dentro do oceano de magma quando o hidrogênio capturado da nebulosa encontrou o ferro dos silicatos, e recebeu uma terceira remessa trazida por corpos carbonáceos espalhados pelo crescimento dos planetas gigantes. A mesma reação que fez o oceano fez o núcleo. Água e ferro metálico saíram juntos da mesma equação.

A massa trabalhou duas vezes. Primeiro permitiu a captura do gás e a fabricação da água. Depois forneceu a gravidade que segurou o inventário contra a erosão atmosférica. Marte mostra o custo de crescer pouco. Vênus mostra que a massa sozinha resolve pouco quando a órbita é próxima demais.

Então veio o golpe. Na reconstrução proposta por este livro, um corpo do tamanho de Marte atingiu a Terra e levou embora cerca de três quartos da carapaça leve que já havia sido destilada do manto. Parte do material ejetado alimentou a Lua e o disco; o que permaneceu na Terra definiu o orçamento continental disponível para o restante da história. O manto empobrecido em elementos incompatíveis teria sido obrigado a refazer a extração, e a litosfera formada sobre ele teria nascido mais densa e mais vulnerável ao afundamento.

Se esse mecanismo foi decisivo, uma tampa suficientemente densa não permaneceu tampa. Ela afundou em gotas, arrastou consigo material

superficial, incluindo água, e devolveu ao manto material hidratado, capaz de reduzir a viscosidade e a temperatura de fusão. A sagdução global teria recarregado o interior. A partir de certo ponto, o afundamento deixaria de ser gota e passaria a ser lâmina, com dobradiça, trincheira e arco. Essa é uma hipótese para a transição à tectônica de placas, não a única proposta na literatura; sua assinatura precisa competir com modelos de iniciação por dano, herança estrutural e convecção sem remoção prévia da carapaça.

O ciclo também alcança a parte de baixo. O hidrogênio dissolvido no ferro desceu com ele, o núcleo ficou menos denso do que uma liga pura de ferro e níquel exigiria, e os elementos leves alteraram seu ponto de fusão. A convecção da camada externa líquida alimenta o dínamo. O campo magnético modula a interação da alta atmosfera com o vento estelar, mas não funciona como escudo simples: a fuga atmosférica depende da gravidade, da composição, da radiação e das rotas magnetizadas e não magnetizadas de escape (Foley e Driscoll, 2016; Gunell et al., 2018). A ligação entre tectônica, resfriamento do núcleo, dínamo e retenção de água é plausível e contextual, não uma cadeia já demonstrada em todos os elos.

Carajás é o registro local disso tudo. Uma bacia que abriu sobre uma sutura, um mar que precipitou ferro na fronteira entre um oceano reduzido e uma zona fótica que começava a produzir oxigênio, uma planta hidrogeológica confinada que operou por centenas de milhões de anos, uma quilha litosférica que guardou diamante enquanto os corredores ao lado eram delaminados. A província é a Terra em escala de província.

2. Por que a tectônica fabrica diversidade

A afirmação que sustenta o restante do capítulo precisa ficar explícita, com mecanismo e com teste, porque sem as duas coisas todo o resto vira numerologia: a tectônica de placas sustentada renova gradientes, barreiras e ambientes e pode ampliar o espaço de oportunidades para a diversificação biológica. O registro fóssil sustenta parte dessa relação;

a passagem da diversidade à vida complexa e à inteligência permanece hipótese de trabalho. Aqui, o manifesto formula uma aposta sobre possibilidade histórica, não uma prova de inevitabilidade.

O elo tem autoria antiga. Valentine e Moores (1970) propuseram que a fragmentação dos continentes multiplica províncias biogeográficas, margens, gradientes e barreiras, e que a diversidade da fauna acompanha a dispersão das massas continentais. A proposta ficou quase cinquenta anos como modelo elegante à espera de veredito. Zaffos, Finnegan e Peters (2017) a confrontaram com o registro fóssil marinho do Fanerozoico inteiro e encontraram a correlação prevista ao longo de quinhentos milhões de anos. A correlação não encerra a causalidade, mas coloca o mecanismo sob observação quantitativa.

Cinco mecanismos ligam uma coisa à outra, e vale destrinchá-los. O primeiro é o termostato. A alteração de silicatos consome dióxido de carbono, os carbonatos guardam o carbono no sedimento, a subducção devolve parte dele pela atividade vulcânica, e a taxa de alteração cresce com a temperatura. Na Terra, essa realimentação negativa contribui para manter a superfície na faixa da água líquida por bilhões de anos, apesar do aumento do brilho solar (Walker, Hays e Kasting, 1981). Um planeta de tampa estagnada não tem o termostato simplesmente desligado: vulcanismo, alteração, soterramento e descarbonação crustal podem sustentar ciclos menos eficientes e habitabilidade prolongada. Modelos para uma Vênus primitiva chegam a quase um bilhão de anos de água líquida sem tectônica de placas (Höning et al., 2021).

O segundo é o abastecimento. Soerguimento e erosão expõem rocha fresca; rocha fresca libera fósforo, ferro, molibdênio e outros elementos que a bioquímica exige e que o oceano perde por sedimentação. Vulcanismo, impactos e circulação crustal também abastecem o sistema, mas a reciclagem tectônica oferece uma via persistente de renovação e redistribuição em escala planetária.

O terceiro é o desequilíbrio. A vida se alimenta de gradientes. A tectônica fabrica gradientes o tempo todo, químicos nas fontes hidrotermais, térmicos nas dorsais, redox nas margens onde água oxidada encontra

rocha reduzida. O reator do capítulo 5 é um exemplo local de um mecanismo que o planeta mantém aceso em toda parte, e a bioquímica que aproveita esses gradientes é anterior a qualquer coisa que se pareça com um organismo complexo.

O quarto é a vicariância, que é tectônica lida pela biologia. Continentes que se juntam e se separam criam e destroem barreiras geográficas, isolam populações, permitem que linhagens divirjam e voltem a se encontrar. O exemplo mais didático é pequeno e recente: os lagos dos riftes do leste africano, com centenas de espécies de ciclídeos geradas em poucos milhões de anos, são câmaras de especiação construídas por falhas normais (Seehausen, 2006). Um sistema de falhas, mais uma vez em um rift, fabricou biodiversidade em escala de tempo geológica curta. A árvore da vida tem a forma que tem, em boa parte, porque o mapa mudou o tempo todo.

O quinto é o resfriamento do núcleo. A subducção pode carregar material frio à base do manto e alterar o fluxo de calor que alimenta a convecção do núcleo externo. A tectônica, portanto, pode favorecer certas histórias de dínamo, mas a ligação causal permanece incompleta e depende da evolução térmica do planeta (Foley e Driscoll, 2016). Mesmo com dínamo, a retenção atmosférica não é automática; sem ele, também não é necessariamente impossível.

Vênus funciona como experimento de controle, mas ainda não entrega um veredito. Há indícios de atividade recente associada a coroas e plumas, e as tésseras podem conter crosta evoluída (Smrekar et al., 2010; Gülcher et al., 2020). O regime tectônico antigo e atual, porém, continua em disputa entre tampa estagnada, tampa episódica e deformação localizada. Vênus mostra que um planeta de massa terrestre pode seguir uma trajetória muito diferente da terrestre; ainda não prova quantos degraus subiu nem qual mecanismo o fez parar.

3. A repetição fractal e as leis de escala

Há uma coisa que todo geólogo aprende cedo e raramente examina. Os objetos com que trabalhamos se repetem através das escalas. A dobra milimétrica na lâmina repete a dobra quilométrica no mapa. O bandamento de um jaspilito, lido de perto, tem a mesma estrutura de leitura que o barcode de idades de um cráton inteiro, lido em bilhões de anos. A amostra de mão promete a província. É por isso que a fotografia de campo precisa de uma moeda ou de um martelo dentro do enquadramento: sem a referência, o afloramento não diz a que escala pertence.

Mandelbrot (1967) formalizou por que certas formas naturais se comportam assim. Uma costa medida com régua grande e com régua pequena entrega comprimentos diferentes, e a taxa em que o comprimento cresce quando a régua encolhe pode ser uma propriedade mensurável da forma. Quando essa relação de escala persiste por um intervalo, fala-se em geometria fractal. A ausência de escala característica vale dentro do domínio observado; não é uma licença para extrapolar indefinidamente.

Em geologia isso deixou de ser apenas metáfora, porque virou medida. Populações de falhas e fraturas exibem leis de potência ao longo de intervalos finitos de comprimento, de milímetros a centenas de quilômetros (Bonnet et al., 2001). A energia liberada em terremotos segue a relação de Gutenberg e Richter (1944). Distribuições de tamanho de depósitos minerais têm caudas pesadas, com poucos gigantes respondendo por grande parte do metal contido (Turcotte, 1997). São fenômenos diferentes descritos por famílias estatísticas semelhantes; isso não demonstra que compartilhem o mesmo mecanismo.

A consequência metodológica é mais modesta e mais sólida. Uma lei de potência não prova parentesco de processo nem autoriza, sozinha, a transferência de um modelo entre escalas. Ela apenas torna legítima a pergunta. A transferência só se sustenta quando a homologia estrutural é explicitada no destino (fonte, energia, caminho, gradiente e preservação) e cada termo pode ser confrontado com evidência própria. É essa correspondência, e não a palavra fractal, que permite testar um

método de província na escala da galáxia.

A licença tem letra miúda, e convém lê-la. Semelhança de forma através das escalas não prova identidade de processo. Leis de potência emergem de mecanismos variados, alguns sem relação entre si, e a estatística sozinha não identifica o mecanismo. O que pode viajar entre as escalas é uma gramática explicitada termo a termo. O restante do capítulo é o teste dessa tradução.

E há uma extensão que este livro propõe como hipótese poética. A repetição não parece parar na biosfera. As famílias repetem as famílias, as culturas repetem as culturas, as línguas divergem, derivam e colidem como placas, e existe até uma gramática herdada, um conjunto de direções antigas pelas quais as novidades escorrem, que o leitor dos capítulos 8 e 10 reconhecerá sem esforço. A auto-similaridade que organiza as rochas reaparece, escala acima, no material humano. Isso é testável por métodos filogenéticos comparados aplicados a línguas e a linhagens culturais, e está registrado na tabela de níveis de confiança pelo que é, uma proposição em aberto.

4. O mesmo desenho em todas as escalas

Existe uma repetição que atravessa este livro e que só agora fica explícita como método. Um depósito mineral nasce quando cinco coisas coincidem: uma fonte de metais e de fluidos, uma fonte de energia que ponha esses fluidos em movimento, uma arquitetura que os conduza, um gradiente que os obrigue a largar a carga, e uma história posterior suficientemente gentil para preservar o que foi construído. Falhando qualquer uma delas, não há depósito. Estando todas presentes, o depósito é muito provável. Jazidas minerais são raras não por serem excepcionais, mas porque as condições que permitem a precipitação podem ser difíceis de atender ao mesmo tempo. Isso é importante, pois são governadas pela interseção de processos naturais e, muitas vezes, isoladamente comuns. A convergência é rara.

A Terra pode ser descrita pelo mesmo desenho. A fonte é o disco pro-

toplanetário e a matéria que ele condensou. A energia vem da acreção, do decaimento radioativo e do impacto de Theia. A arquitetura envolve massa, órbita e litosfera. O gradiente separa o interior quente do espaço frio, mediado por uma tampa que aprendeu a se mover. A preservação depende de tectônica sustentada, inventário de voláteis, atmosfera e de uma história dinâmica que não esterilizou o sistema; o campo magnético é uma das variáveis dessa história, não sua garantia.

Chamar isso de fractal seria elegante e impreciso. O que se repete é a gramática. Um sistema hidrotermal em Carajás e um sistema planetário na Via Láctea obedecem à mesma sintaxe de fonte, energia, caminho, gradiente e preservação, porque essa sintaxe descreve como a matéria se concentra em qualquer escala em que haja transporte e um lugar onde parar.

Uma vez percebida a gramática, o resto é trabalho de mapeamento.

5. Sistemas minerais, e de onde vem esta ideia

A abordagem de sistemas minerais foi formulada para a exploração mineral australiana no início dos anos 1990, quando ficou claro que procurar depósitos por analogia com depósitos conhecidos tinha alcance curto, e que valia mais a pena descrever o processo que os produz e depois procurar as evidências desse processo (Wyborn, Heinrich e Jaques, 1994). A ideia amadureceu ao longo das duas décadas seguintes, ganhou uma teoria para geração de alvos exploratórios e para tomada de decisão (Hronsky e Groves, 2008) e um protocolo de tradução, que ensina a converter cada componente do sistema em critérios que possam ser efetivamente mapeados com os dados disponíveis (McCuaig, Beresford e Hronsky, 2010).

A versão que uso na prática, e transportada aqui para o céu, organiza o sistema em quatro componentes: fonte de metais, fluidos e ligantes; fonte de energia; arquitetura e caminhos de fluido; gradientes de deposição (Skirrow et al., 2009; Dulfer et al., 2016). É a formulação adotada no trabalho que ajudei a conceber sobre a geração de alvos de cobre e

ouro no leste da Província Mineral de Carajás (Martins, Seoane e Tavares, 2022). Cada critério de mira recebeu três notas, de importância, aplicabilidade e confiança, das quais saiu um peso global, e a soma ponderada das camadas produziu o mapa de favorabilidade. O mesmo esqueleto sustentou a avaliação da zona de cisalhamento Cinzento.

Este capítulo repete o procedimento com outro alvo. A província é a Via Láctea. O depósito procurado é água líquida estável na superfície de um planeta rochoso, mantida por tempo geológico. As camadas de evidência são as condições que os capítulos anteriores descreveram. O produto sai como uma distribuição de distâncias.

6. A Terra como jazida de água: o teor

Convém levar a metáfora até o fim, porque ela produz um resultado inesperado.

Os oceanos somam cerca de $1{,}34 \times 10^{21}$ quilogramas. A massa da Terra é $5{,}97 \times 10^{2}\square$ quilogramas. O teor superficial é de 0,022 por cento. Somando as estimativas de água armazenada no manto, entre meia e três massas oceânicas, o teor total do planeta fica entre 0,03 e 0,09 por cento.

Um depósito de cobre em Carajás pode ser lavrado com menos de um por cento de cobre. Comparada apenas a água superficial, a Terra tem um teor cerca de quarenta vezes menor; incluindo as estimativas do manto, a diferença cai para algo como dez a trinta vezes. Em teor, Europa e Encélado nos humilham, com vários por cento da massa em água. O que faz da Terra um depósito extraordinário é a tonelagem absoluta, o estado físico e a persistência de água líquida em contato com rocha e atmosfera.

E aqui aparece a inversão que a linguagem da exploração ajuda a ver. Em geologia econômica, teor alto costuma ser melhor. Neste sistema, água demais pode eliminar o alvo específico: continentes expostos, interação entre oceano, rocha e atmosfera e ciclagem comparável à terrestre. O limiar depende da topografia, da gravidade e da capacidade do manto de armazenar água; mundos oceânicos não são necessaria-

mente estéreis e podem permanecer habitáveis (Cowan e Abbot, 2014; Kite e Ford, 2018). O sistema procurado aqui tem uma janela operacional de teor, com piso e teto. A Terra ocupa uma faixa intermediária dessa janela, que a maioria das contas de habitabilidade não explicita.

7. As camadas do modelo e seus pesos

A tabela abaixo traduz o sistema planetário em critérios de mira, na mesma convenção do trabalho em Carajás. Importância mede o quanto o critério é essencial ao processo. Aplicabilidade mede o quanto ele pode ser observado ou mapeado com o que existe hoje. Confiança mede o crédito que merece, considerando a qualidade da evidência. O peso global é a média geométrica das três notas, para que uma nota baixa puxe o conjunto para baixo. Esses pesos funcionam como auditoria qualitativa do modelo; não entram como multiplicadores na Monte Carlo da Seção 10.

Tabela 15.1. Camadas de evidência do sistema planetário produtor de água superficial estável.

Cód.	Camada de evidência	Imp	Apl	Conf	Peso
S1	Estrela FGK na sequência principal, estável por bilhões de anos	9	10	9	9,3
S2	Metalicidade suficiente para formar planeta rochoso de massa terrestre	8	9	8	8,3
S3	Entrega de voláteis: hidrogênio nos condritos, captura nebular, corpos carbonáceos	10	5	6	6,7
S4	Teor de água dentro da janela útil, oceano sem afogar o continente	9	4	6	6,0
E1	Calor radiogênico e residual capaz de sustentar convecção por bilhões de anos	9	7	8	8,0
A1	Massa próxima de uma massa terrestre, para reter atmosfera e voláteis	10	10	9	9,7

Cód.	Camada de evidência	Imp	Apl	Conf	Peso
A2	Órbita na zona habitável, janela térmica da água líquida	10	9	8	9,0
A3	Impacto gigante com remoção postulada de grande parte da carapaça leve	10	3	5	5,3
G1	Impacto dentro da janela temporal, com as câmaras primordiais já destiladas	9	2	4	4,2
G2	Tectônica de placas iniciada e sustentada por tempo geológico	10	4	6	6,2
G3	Dínamo ativo e campo magnético modulando a interação atmosférica	8	6	7	7,0
G4	Sobrevivência dinâmica do sistema, sem esterilização por eventos externos	8	4	5	5,4

A leitura da tabela é imediata e desconfortável. As camadas de maior peso, A1, S1 e A2, são exatamente aquelas que a astronomia já sabe medir, e por isso ganham nota alta em aplicabilidade e confiança. As camadas de menor peso, G1, A3, G4 e G2, são as que carregam o argumento original deste livro. Elas têm importância máxima e confiança baixa. É assim que deve ser. Um modelo que atribuísse confiança alta a um postulado não testado estaria mentindo sobre si mesmo.

8. Um único ponto de treinamento

Há duas famílias de métodos em prospectividade. Os métodos guiados por dados aprendem os pesos a partir dos depósitos conhecidos, comparando o que existe onde há minério com o que existe onde não há. Regressão logística, pesos de evidência, redes neurais e *Random Forest* pertencem a essa família. Os métodos guiados por conhecimento atribuem os pesos a partir do entendimento do processo, sem treinamento, e são a escolha obrigatória quando os depósitos conhecidos são poucos demais para representar a variedade do alvo.

O caso planetário leva essa situação ao limite. Existe um único exemplo positivo conhecido, e estamos dentro dele; não há uma coleção representativa de negativos rotulados. Com uma amostra assim, nenhum algoritmo de aprendizado tem base para estimar generalização: um ajuste reproduziria a Terra e confundiria ajuste com previsão. O método guiado por conhecimento deixa de ser preferência e passa a ser a opção explicitamente auditável.

Duas consequências decorrem disso, e as duas são boas. A primeira é que a coluna de confiança da Tabela 15.1 vira a parte mais importante do modelo. Sem depósitos para calibrar, o que resta é declarar abertamente quanto crédito cada camada merece, e deixar que o leitor discorde de cada linha isoladamente.

A segunda é o viés de seleção que nenhum método guiado por dados corrigiria de qualquer maneira. Nós observamos a Terra porque a Terra produziu observadores. A amostra única não é uma amostra aleatória. É por isso que a conta a seguir usa distribuições de probabilidade em vez de valores pontuais, e é por isso que ela produz intervalos largos em vez de uma resposta.

9. O que os astrônomos já fazem sem usar a palavra

Nada disso é estranho à astronomia. É a mesma prática com outro vocabulário.

A equação de Drake (Drake, 1965) é uma cadeia de fatores multiplicativos que vai do número de estrelas ao número de civilizações detectáveis. Estruturalmente, é um modelo de favorabilidade com sete camadas e sem pesos. Seus termos podem ser escritos como frações condicionais, mas aplicações simplificadas frequentemente estimam cada um à parte e deixam dependências implícitas. Num sistema mineral, fonte, arquitetura, caminho, gradiente e preservação são declaradamente encadeados. Ganha-se a capacidade de dizer por que cada termo está ali e, sobretudo, a possibilidade de localizar onde o modelo pode falhar.

A zona habitável galáctica (Lineweaver, Fenner e Gibson, 2004) é uma sobreposição de camadas: metalicidade suficiente para formar planetas, ambiente radiativo menos hostil e tempo para evolução são combinados num mapa da galáxia, cujo resultado é uma faixa anelar mais favorável sob as premissas adotadas. É um mapa de prospectividade galáctico, feito por astrônomos que provavelmente nunca leram Wyborn.

Os índices de similaridade planetária, como o índice de similaridade com a Terra (Schulze-Makuch et al., 2011) e o índice de habitabilidade para planetas em trânsito (Barnes, Meadows e Evans, 2015), são sobreposições ponderadas explícitas, com parâmetros normalizados e pesos atribuídos por julgamento. São index overlay com outro nome.

Portanto a transferência que este capítulo propõe é menos ousada do que parece. A comunidade que procura planetas já usa o método. O que a exploração mineral acrescenta é a disciplina de separar importância, aplicabilidade e confiança em colunas distintas, e o hábito de terminar todo mapa com uma declaração do que ele não pode dizer.

10. A conta

Multiplicar os valores mais pessimistas de cada camada produz um número minúsculo; multiplicar os mais otimistas produz um número enorme; nenhum dos extremos isolados descreve o problema. Um procedimento transparente é atribuir a cada camada uma distribuição que represente o estado de ignorância e propagar a incerteza até o fim, como se faz com estimativas de recurso mineral. Sandberg, Drexler e Ord (2018) fizeram isso com a equação de Drake e mostraram como distribuições amplas alteram a leitura do paradoxo de Fermi. O resultado, porém, continua condicionado às distribuições escolhidas.

Cada camada recebeu uma distribuição log-uniforme entre um piso e um teto. Essa escolha é adequada quando se quer dar peso comparável a ordens de grandeza, mas não é uma prior objetiva. As camadas foram tratadas como independentes, simplificação discutida adiante, e foram

sorteados dois milhões de conjuntos. Uma reprodução independente, com novas sementes e dois milhões de sorteios, recuperou todos os percentis e coeficientes publicados até o arredondamento. A cadeia probabilística usada foi:

$$q = f_{FGK} \times f_Z \times \eta_\oplus \times f_{imp} \times f_{lua} \times f_{jan} \times f_{sob} \times f_{tec}$$

$$N_{fértil} = N_\square \times q$$

$$n_{fértil} = \rho \times q$$

Tabela 15.2. Intervalos adotados.

Camada	Símbolo	Intervalo	Origem
Estrelas na Via Láctea	$N_\square$	1×10^{11} a 4×10^{11}	contagens estelares e modelos de massa galáctica
Densidade estelar local	ρ	0,08 a 0,12 pc^{-3}	censo de sistemas dentro de 10 parsecs
Fração de estrelas FGK	f_{FGK}	0,15 a 0,30	função de massa inicial
Metalicidade suficiente	f_Z	0,40 a 0,90	distribuição de [Fe/H] no disco fino
Planeta rochoso de massa terrestre na zona habitável	$\eta_\oplus$	0,05 a 0,60	Kepler (Hsu et al., 2019; Bryson et al., 2021)
Impacto gigante tardio	f_{imp}	0,10 a 0,60	simulações de impactos formadores de satélites; faixa ampliada (Elser et al., 2011)
Geometria capaz de remover três quartos da carapaça	f_{lua}	0,10 a 0,50	postulado geométrico adicional deste livro
Impacto dentro da janela temporal	f_{jan}	0,20 a 0,80	postulado deste livro

Camada	Símbolo	Intervalo	Origem
Sobrevivência dinâmica do sistema	f_sob	0,60 a 1,00	estabilidade orbital de longo prazo
Tectônica iniciada e sustentada	f_tec	0,20 a 0,80	prior de cenário deste livro

Tabela 15.3. Resultados, em percentis.

Grandeza	p5	p25	p50	p75	p95
Funil do impacto (f_imp × f_lua × f_jan)	1 em 172	1 em 81	**1 em 46**	1 em 26	1 em 12
Cadeia completa por estrela	2,1 × 10□□	6,5 × 10□□	**1,5 × 10□□**	3,4 × 10□□	1,1 × 10□³
Sistemas férteis na Via Láctea	3,7 × 10□	1,3 × 10□	**3,0 × 10□**	7,2 × 10□	2,4 × 10□
Distância média condicional ao sistema fértil mais próximo	38 al	56 al	**74 al**	98 al	143 al

Sob essas premissas, o funil é estreito, mas não fechado. Na mediana, cerca de um sistema em quarenta e seis passa pelas três exigências postuladas para o impacto: acontecer, ter a geometria capaz de remover grande parte da carapaça leve e ocorrer depois que as câmaras primordiais já destilaram material suficiente. Mesmo com esse estrangulamento, o cenário mediano retorna dezenas de milhões de sistemas férteis, porque o número de estrelas é enorme. O cálculo não estima diretamente a frequência real; mostra a consequência quantitativa das faixas adotadas.

Uma comparação pela outra ponta ajuda a dimensionar o número. Frank e Sullivan (2016) perguntaram quão improvável a tecnologia teria de ser para que a humanidade fosse a única espécie tecnológica

já produzida no universo observável, e não apenas a única existente agora. O limiar encontrado é da ordem de dez elevado a menos vinte e quatro por planeta em zona habitável. Nenhum gargalo deste livro chega perto desse pedágio. Isso não confirma a cadeia; apenas mostra que um funil de um em quarenta e seis é estreito na escala humana e generoso na escala cosmológica.

11. A distância mínima ao próximo sistema fértil

Contar sistemas na galáxia inteira produz um número impressionante e inútil. A pergunta operacional de qualquer exploração é a distância até o alvo mais próximo.

Para pontos distribuídos como um processo de Poisson homogêneo em três dimensões, com densidade n, a distância média condicional ao vizinho mais próximo é

E[R | n] = Γ(4/3) · (3 / 4πn)^(1/3) ≈ 0,8930 · (3 / 4πn)^(1/3)

P(R ≤ r | n) = 1 − exp(−4πnr³ / 3)

Uma escolha importa muito aqui e merece ser justificada. A densidade usada é a densidade estelar local, entre 0,08 e 0,12 estrelas por parsec cúbico, medida no censo dos arredores do Sol. Usar o número total de estrelas dividido pelo volume do disco daria uma densidade média de galáxia inteira, dominada pelas regiões internas, muito maior do que a densidade da vizinhança solar, e produziria uma distância artificialmente curta. Um mapa de prospectividade é sempre local. A contagem galáctica é uma estimativa de recurso, enquanto a distância é uma decisão de logística de sondagem.

Com a densidade local e as faixas adotadas, a cadeia completa produz na mediana cerca de 1,5 × 10□□ sistemas férteis por parsec cúbico, ou aproximadamente um sistema fértil a cada setenta mil parsecs cúbicos.

A média condicional da distância até o sistema fértil mais próximo fica

em cerca de setenta e quatro anos-luz. Entre os conjuntos de parâmetros, metade dessas médias cai entre cinquenta e seis e noventa e oito anos-luz, e noventa por cento entre trinta e oito e cento e quarenta e três. A Tabela 15.3 descreve incerteza paramétrica, não toda a variabilidade espacial.

Três leituras acompanham esse número. Sob os valores medianos locais, há aproximadamente mil e cem estrelas FGK dentro de setenta e quatro anos-luz. O cenário está dizendo que a expectativa é da ordem de uma ocorrência entre elas.

Os setenta e sete por cento dentro de cem anos-luz e os dezessete por cento dentro de cinquenta, obtidos na primeira versão da conta, medem a fração de conjuntos de parâmetros cuja distância média condicional cai abaixo desses limites. Quando o acaso espacial do processo de Poisson também é amostrado, a previsão muda: a mediana fica em cerca de setenta e um anos-luz, o intervalo de noventa por cento se abre para aproximadamente vinte e cinco a cento e sessenta e sete, e as probabilidades de ao menos um sistema dentro de trinta, cinquenta e cem anos-luz ficam próximas de oito, vinte e oito e setenta e quatro por cento, respectivamente.

O número mediano esperado de sistemas férteis dentro de cem anos-luz é de aproximadamente 1,8. Dentro de cento e cinquenta anos-luz, sobe para cerca de seis. Expectativa não é garantia: a realização espacial pode conter zero, um ou vários sistemas.

Setenta e poucos anos-luz é uma distância caracteristicamente estranha. Longe demais para qualquer visita dentro da engenharia hoje concebível; próxima o bastante para integrar o espaço de projeto de futuros observatórios de caracterização atmosférica. É a faixa em que a pergunta deixa a filosofia e começa a disputar o orçamento de um instrumento.

12. O tempo como camada do modelo

Até aqui o modelo procurou a jazida. Falta perguntar se ela está sendo lavrada agora.

Em exploração mineral, preservação é um critério como qualquer outro. Depósitos são erodidos, oxidados, metamorfizados, cobertos. Um sistema que funcionou perfeitamente há dois bilhões de anos e depois foi destruído não aparece no mapa de hoje. A diferença, no caso planetário, é que a preservação tem relógio: a coisa procurada dura pouco em relação à idade da galáxia, e a nossa observação acontece num instante específico.

Duas camadas novas entram, e ambas têm a forma de uma fração de tempo.

Para uma biosfera complexa contemporânea, a fração é a duração da janela dividida pela idade do disco galáctico. Na Terra, a vida complexa ocupa uma fração recente da história, e estimativas de habitabilidade futura sugerem uma janela limitada pelo aumento do brilho solar. O modelo adota duração entre 0,5 e 5 bilhões de anos, sobre uma idade de disco de 10 bilhões, e probabilidade entre 0,2 e 1,0 de que tectônica sustentada produza uma biosfera complexa.

Para uma civilização tecnológica contemporânea, a fração é a duração da fase tecnológica dividida pela mesma idade. Aqui a ignorância é quase total. O modelo adota uma duração entre cem e dez milhões de anos, cobrindo de uma janela curta a uma estabilidade de longo prazo, e uma probabilidade entre 0,01 e 1,0 de que uma biosfera complexa produza tecnologia. São priors de cenário, não frequências observadas.

Tabela 15.4. O efeito do tempo.

Alvo	Contagem galáctica (mediana)	Distância média condicional	Intervalo de 90%
Sistema fértil, com tectônica sustentada	3,0 × 10□	74 al	38 a 143 al
Biosfera complexa contemporânea	2,1 × 10□	179 al	81 a 396 al
Civilização tecnológica contemporânea	4	14.000 al*	1.800 a 110.000 al*

A degradação é instrutiva. O cenário de água líquida e tectônica sustentada é relativamente abundante e local. Ao exigir uma biosfera complexa contemporânea, a distância média mais que dobra. Para tecnologia contemporânea, a mediana cai para quatro ocorrências em toda a Galáxia. Nesse regime, porém, a aproximação local homogênea e tridimensional já não vale: o disco galáctico é finito e achatado. Os 14 mil anos-luz e seu intervalo, marcados com asterisco, são extrapolações formais da equação local, não previsões espaciais interpretáveis.

A quantidade mais defensável nessa última linha é a contagem. Amostrando também a ocorrência como processo de Poisson, os próprios priors do modelo dão cerca de sessenta e sete por cento de chance de ao menos uma civilização tecnológica contemporânea na Via Láctea e cerca de trinta e três por cento de chance de nenhuma. Isso mede a ignorância embutida nas faixas, sobretudo quanto tempo dura uma fase tecnológica, e não uma propriedade já observada do universo.

13. A sensibilidade, e a coincidência que interessa

Toda estimativa de recurso termina com uma análise de sensibilidade que mostra qual variável domina o resultado. Foi calculada a correla-

ção de postos entre cada camada sorteada e a distância média condicional obtida.

Tabela 15.5. Sensibilidade da distância média condicional, correlação de Spearman em escala logarítmica.

Camada	Correlação
$\eta_{\oplus}$, rochoso de massa terrestre na zona habitável	−0,60
f_imp, ocorrência do impacto gigante	−0,42
f_lua, geometria capaz de arrancar a carapaça	−0,38
f_tec, tectônica sustentada	−0,33
f_jan, janela temporal do impacto	−0,32
f_Z, metalicidade	−0,19
f_FGK, tipo espectral	−0,16
f_sob, sobrevivência dinâmica	−0,12
ρ, densidade estelar local	−0,09
N□, número de estrelas na galáxia	0,00

A última linha merece uma leitura precisa. O número de estrelas da Via Láctea tem correlação zero com a distância local porque, por construção, ele não entra nessa equação: a distância usa a densidade estelar da vizinhança solar. N□ controla a contagem galáctica; ρ controla a logística local. A pergunta ‘quantos’ e a pergunta ‘a que distância’ são governadas por parâmetros diferentes.

Há uma concordância útil, mas não independente. Depois de $\eta_{\oplus}$, as variáveis que dominam a sensibilidade são f_imp, f_lua, f_tec e f_jan. Elas correspondem às linhas de menor confiança da Tabela 15.1. Isso ocorre em parte porque a baixa confiança levou à escolha de intervalos largos, e intervalos largos dominam a variância de um produto multiplicativo. A tabela qualitativa e a Monte Carlo expressam, por linguagens diferentes, os mesmos julgamentos de entrada.

O modelo é frágil precisamente onde este livro é original. Isso é útil porque a fragilidade está localizada e pode ser atacada. Medir melhor a frequência de impactos formadores de satélites, distinguir impactos

comuns da geometria especial postulada aqui e estimar a fração de planetas rochosos com tectônica sustentada estreitaria a conta. É um programa de pesquisa, com endereço.

14. A escada das crostas

Existe uma comparação observacional disponível na coleção de meteoritos e nas superfícies planetárias discutidas no Capítulo 1. Ela serve como teste de coerência, não como validação estatística independente.

Meteoritos são amostras de outros corpos, não apenas de suas crostas: há materiais indiferenciados, mantélicos, crustais e até metálicos. Lidos com dados orbitais e medições in situ, eles sugerem uma escada heurística de quatro regimes. Os degraus não são perfeitamente aninhados e não exigem sempre as mesmas condições.

O primeiro regime é a crosta basáltica, produzida por fusão parcial de silicatos. Corpos pequenos aquecidos por alumínio-26 puderam alcançá-la muito cedo. Os eucritos de Vesta datam de cerca de 4,56 bilhões de anos: crosta basáltica era possível antes de a Terra terminar de crescer. É um produto disseminado da diferenciação, não literalmente universal.

O segundo regime é a crosta de flotação, representada pelo anortosito lunar. Ela requer um oceano de magma profundo e duradouro no qual plagioclásio flutue enquanto minerais densos afundam (Warren, 1985). Não é simplesmente o degrau seguinte ao basalto: é uma trajetória específica de diferenciação em larga escala.

O terceiro regime é a crosta evoluída, intermediária a félsica. Água favorece a fusão a temperaturas menores e a produção de grandes volumes félsicos, mas não é condição exclusiva: cristalização fracionada e refusão também produzem rochas ricas em sílica. GRA 06128/9 registra crosta asteroidal andesítica e rica em feldspato, formada muito cedo (Day et al., 2009). Marte preserva composições félsicas e granitoides locais (Sautter et al., 2015). Em Vênus, a natureza félsica das tésseras continua hipótese a ser testada.

O quarto regime é a tectônica de placas sustentada: placas rígidas se separam, colidem, subductam e reciclam por bilhões de anos. A Terra é o único corpo conhecido em que esse regime opera hoje de forma inequívoca. Vesta, Lua, Marte e Vênus seguiram histórias diferentes; não formam uma sequência linear em que cada corpo simplesmente parou um degrau antes. A metáfora preserva a tendência geral sem apagar essas bifurcações.

A escada é, portanto, uma heurística observacional. Crosta basáltica é disseminada; diferenciação em escala de oceano de magma é menos comum; grandes volumes de crosta evoluída são mais raros; tectônica de placas sustentada só foi confirmada na Terra. O padrão é compatível com exigências crescentes, mas vieses de amostragem e caminhos não aninhados impedem tratá-lo como prova independente do modelo.

15. Onde apontar o telescópio

O modelo termina em instruções de sondagem. Sondar é caro; priorizar é essencial.

Primeiro critério, o alvo primário. Estrelas FGK na sequência principal, dentro de cem anos-luz, com planeta rochoso entre 0,8 e 1,5 massas terrestres na zona habitável conservadora (Kasting, Whitmire e Reynolds, 1993; Kopparapu et al., 2013). Isso corresponde a S1, A1 e A2, a parte do modelo que a astronomia já sabe executar. Com lançamento planejado para março de 2027, PLATO deverá ampliar o censo de trânsitos de longo período; a espectroscopia de precisão ajudará a fornecer massas.

Segundo critério, a lua. Uma lua grande pode se revelar por variações no instante e na duração do trânsito, causadas pelo movimento do planeta em torno do baricentro comum. Candidatos foram anunciados em Kepler-1625b e Kepler-1708b (Teachey e Kipping, 2018; Kipping et al., 2022), ambos ao redor de gigantes gasosos. Heller e Hippke (2024) atribuíram os sinais ao tratamento dos dados; Kipping et al. (2024) contestaram partes dessa reanálise. O estado da arte permanece: ne-

nhuma exolua confirmada, candidatos disputados e um limite de detecção muito acima do sistema Terra–Lua. Uma lua com um por cento da massa do planeta ao redor de uma Terra está fora do alcance atual.

O que existe de sólido é a prova de que sistemas de satélites se formam. O disco circumplanetário detectado ao redor de PDS 70c (Benisty et al., 2021) mostra material suficiente para formar luas em torno de um planeta ainda em construção. A fábrica existe e foi fotografada.

Terceiro critério, os indícios indiretos de tectônica. Como a lua é inacessível por enquanto, vale procurar as consequências. Uma amostra de planetas pode testar tendências de dióxido de carbono com insolação; continentes podem produzir variações rotacionais de refletância e brilho especular. Em rádio, buscas atuais são mais sensíveis a magnetosferas muito mais fortes que a terrestre, sobretudo em planetas gigantes ou sistemas intensamente irradiados. Um análogo do dínamo terrestre emite em frequências e potências abaixo do alcance prático dos radiotelescópios de solo, portanto ainda não é uma camada observável direta para o SKA. Nenhum sinal isolado demonstraria tectônica; o valor está na convergência.

Quarto critério, o experimento de controle. Vênus está a quarenta milhões de quilômetros e oferece a comparação mais direta com um planeta de massa terrestre que seguiu outra trajetória. DAVINCI investigará a atmosfera profunda e razões isotópicas; VERITAS, planejada para a década de 2030, mapeará topografia, deformação e emissividade. Se as tésseras forem confirmadas como crosta félsica antiga e se o regime tectônico puder ser reconstruído, o teste se tornará muito mais forte. Por enquanto, Vênus é a pergunta vizinha, não a resposta pronta.

16. Como este modelo morre, e o que ele nunca disse

Um mapa de favorabilidade que não pode ser refutado é decoração. Cinco observações derrubariam este.

Um planeta rochoso sem lua grande exibindo tectônica de placas inequívoca destruiria a necessidade universal da camada A3 e retiraria o impacto do funil geral. Não provaria, sozinho, que o impacto foi irrelevante para a história específica da Terra; para isso seriam necessárias previsões exclusivas do mecanismo.

Modelos de dano, herança e convecção já mostram rotas de iniciação de subducção sem remoção prévia de uma carapaça por Theia (Korenaga, 2013; Bercovici e Ricard, 2014; Weller e Lenardic, 2012). Portanto, A3 já compete com explicações alternativas. Ela só conserva função explicativa forte se produzir consequências exclusivas (no orçamento lunar, na densidade da crosta primitiva ou numa associação observável entre grandes luas e tampas móveis) que as alternativas não produzam.

O fechamento do orçamento de alumínio e de volume da Lua é uma verificação quantitativa que pode falhar. Se determinações melhores da espessura da crosta lunar e da composição do manto lunar exigirem uma carapaça terrestre removida muito diferente de sete a dez quilômetros equivalentes, a aritmética do capítulo do impacto quebra.

Levantamentos de exoluas que mostrem que grandes luas formadas por impacto são comuns elevariam f_lua e f_imp, encurtariam a distância e enfraqueceriam a tese da raridade. Para mim, seria o resultado mais bem-vindo da lista.

E qualquer evidência de tectônica de placas sustentada em Vênus, no passado ou agora, reduziria a necessidade de uma lua grande e de um oceano superficial para alcançar o regime móvel. Isso exigiria reescrever o mecanismo, embora não apagasse automaticamente todos os efeitos possíveis do impacto terrestre.

Faltam as ressalvas de método. Os intervalos da Tabela 15.2 são julgamentos informados; outro pesquisador poderia escolher outros. A distribuição log-uniforme e a independência entre camadas são priors de cenário, não fatos. Massa, metalicidade, arquitetura orbital e frequência de impactos podem ser correlacionadas. A homogeneidade espacial é aproximação local e falha em escala galáctica. Os pesos qualitativos não entram na probabilidade. E o viés de seleção antrópico

permanece sem correção satisfatória com uma única observação positiva.

Feitas as ressalvas, sobra o que sobra em todo mapa de prospectividade, e é bastante.

Na minha experiência profissional, nenhum mapa de favorabilidade acertava exatamente onde estava o minério. Não é para isso que serve. Um mapa de favorabilidade diz onde vale a pena furar, ordena o gasto e transforma uma pergunta vaga numa sequência de decisões com custo conhecido. Quando esses mapas eram entregues para publicação, a garantia possível era mais modesta: a área vermelha merecia a primeira sondagem; a área azul podia esperar.

Este capítulo entrega o mesmo produto em outra escala. Sob os priors adotados, a área vermelha começa na ordem de setenta anos-luz, ao redor de cerca de mil estrelas parecidas com o Sol. A sondagem não é uma viagem: é um programa progressivo de censos, espectros e comparações planetárias. Se houver água líquida sobre rocha, continentes emergindo e talvez uma lua grande no céu, alguma dessas estrelas pode guardar a resposta.

Resta a parte que a estatística não alcança, e que é o assunto do epílogo.

17. Níveis de confiança

O capítulo se encerra como um relatório: separando o que é evidência, o que é modelo publicado adotado como quadro e o que é hipótese deste livro. Um manifesto que não se oferece para teste é um sermão.

Evidência forte. A correlação entre fragmentação continental e diversidade marinha ao longo do Fanerozoico (Zaffos, Finnegan e Peters, 2017). A radiação dos ciclídeos nos lagos de rifte africanos (Seehausen, 2006). A realimentação entre alteração de silicatos, dióxido de carbono e temperatura (Walker, Hays e Kasting, 1981). A ampla ocorrência de planetas rochosos no censo Kepler, embora as taxas exatas na zona habitável dependam do modelo (Hsu et al., 2019; Bryson et

al., 2021). Leis de potência em populações de falhas e em magnitudes de terremotos (Gutenberg e Richter, 1944; Bonnet et al., 2001). E o fato observacional de que nenhuma exolua foi confirmada até hoje.

Modelos e leituras publicadas, adotados como quadro ou contraponto. A relação entre tectônica e diversidade (Valentine e Moores, 1970; Zaffos, Finnegan e Peters, 2017). A abordagem de sistemas minerais e sua tradução em critérios mapeáveis (Wyborn, Heinrich e Jaques, 1994; Skirrow et al., 2009; McCuaig, Beresford e Hronsky, 2010). O tratamento por Monte Carlo de cadeias multiplicativas incertas (Sandberg, Drexler e Ord, 2018). A zona habitável galáctica (Lineweaver, Fenner e Gibson, 2004). O limite empírico de Frank e Sullivan (2016). Modelos de mundos oceânicos, tampas estagnadas e iniciação de placas sem impacto lunar específico (Cowan e Abbot, 2014; Kite e Ford, 2018; Höning et al., 2021; Korenaga, 2013; Bercovici e Ricard, 2014).

Hipóteses de trabalho deste livro, oferecidas para teste. A remoção de grande parte da carapaça leve por Theia como condição importante para a história tectônica terrestre, camada A3 da Tabela 15.1. A janela temporal do impacto, camada G1. Os intervalos adotados para f_lua, f_jan e f_tec. A extensão poética da gramática fractal ao material humano. E a proposição central do manifesto: onde houver tectônica de placas sustentada, o espaço de oportunidades para diversificação e complexidade será continuamente renovado. Que isso conduza à inteligência, mesmo em bilhões de anos, permanece uma hipótese, a mais ousada do capítulo.

O contraponto publicado permanece registrado. A hipótese da Terra Rara (Ward e Brownlee, 2000) sustenta que a conjunção terrestre pode ser excepcional a ponto de nos deixar sozinhos. O desacordo é quantitativo, camada por camada, e também causal: quais condições são necessárias, quais apenas favorecem o processo e quais são acidentes da nossa própria história. O árbitro será uma coleção de planetas, não uma única Terra.

Referências

Barnes, R.; Meadows, V. S.; Evans, N. (2015). Comparative habitability of transiting exoplanets. The Astrophysical Journal, 814, 91.

Benisty, M. et al. (2021). A circumplanetary disk around PDS 70c. The Astrophysical Journal Letters, 916, L2.

Bercovici, D.; Ricard, Y. (2014). Plate tectonics, damage and inheritance. Nature, 508, 513–516.

Bonnet, E. et al. (2001). Scaling of fracture systems in geological media. Reviews of Geophysics, 39, 347–383.

Bryson, S. et al. (2021). The occurrence of rocky habitable-zone planets around solar-like stars from Kepler data. The Astronomical Journal, 161, 36.

Cowan, N. B.; Abbot, D. S. (2014). Water cycling between ocean and mantle: super-Earths need not be waterworlds. The Astrophysical Journal, 781, 27.

Day, J. M. D. et al. (2009). Early formation of evolved asteroidal crust. Nature, 457, 179–182.

Drake, F. D. (1965). The radio search for intelligent extraterrestrial life. In: Mamikunian, G.; Briggs, M. H. (eds.), Current Aspects of Exobiology. Pergamon, 323–345.

Dulfer, H. et al. (2016). Potential for intrusion-hosted Ni-Cu-PGE sulfide deposits in Australia: a continental-scale analysis of mineral system prospectivity. Geoscience Australia, Record 2016/01.

Elser, S.; Moore, B.; Stadel, J.; Morishima, R. (2011). How common are Earth-Moon planetary systems? Icarus, 214, 357–365.

Foley, B. J.; Driscoll, P. E. (2016). Whole planet coupling between climate, mantle, and core: implications for rocky planet evolution. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 17, 1885–1914.

Frank, A.; Sullivan, W. T. (2016). A new empirical constraint on the

prevalence of technological species in the Universe. Astrobiology, 16, 359–362. https://doi.org/10.1089/ast.2015.1418

Gülcher, A. J. P. et al. (2020). Corona structures driven by plume-lithosphere interactions and evidence for ongoing plume activity on Venus. Nature Geoscience, 13, 547–554.

Gunell, H. et al. (2018). Why an intrinsic magnetic field does not protect a planet against atmospheric escape. Astronomy & Astrophysics, 614, L3. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832934.

Gutenberg, B.; Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34, 185–188.

Heller, R.; Hippke, M. (2024). Large exomoons unlikely around Kepler-1625 b and Kepler-1708 b. Nature Astronomy, 8, 193–206.

Höning, D.; Baumeister, P.; Grenfell, J. L.; Tosi, N.; Way, M. J. (2021). Early habitability and crustal decarbonation of a stagnant-lid Venus. Journal of Geophysical Research: Planets, 126, e2021JE006895. https://doi.org/10.1029/2021JE006895.

Hronsky, J. M. A.; Groves, D. I. (2008). Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement. Australian Journal of Earth Sciences, 55, 3–12.

Hsu, D. C.; Ford, E. B.; Ragozzine, D.; Ashby, K. (2019). Occurrence rates of planets orbiting FGK stars: combining Kepler DR25, Gaia DR2 and Bayesian inference. The Astronomical Journal, 158, 109.

Kasting, J. F.; Whitmire, D. P.; Reynolds, R. T. (1993). Habitable zones around main sequence stars. Icarus, 101, 108–128.

Kipping, D. et al. (2022). An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i. Nature Astronomy, 6, 367–380.

Kipping, D. et al. (2024). A Reply to: Large exomoons unlikely around Kepler-1625 b and Kepler-1708 b. arXiv:2401.10333. https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.10333.

Kite, E. S.; Ford, E. B. (2018). Habitability of exoplanet waterworlds. The Astrophysical Journal, 864, 75.

Kopparapu, R. K. et al. (2013). Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. The Astrophysical Journal, 765, 131.

Korenaga, J. (2013). Initiation and evolution of plate tectonics on Earth: theories and observations. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 41, 117–151.

Lenardic, A. (2018). The diversity of tectonic modes and thoughts about transitions between them. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 376, 20170416.

Lineweaver, C. H.; Fenner, Y.; Gibson, B. K. (2004). The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way. Science, 303, 59–62.

Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. Science, 156, 636–638. https://doi.org/10.1126/science.156.3775.636

Martins, T. F.; Seoane, J. C. S.; Tavares, F. M. (2022). Cu-Au exploration target generation in the eastern Carajás Mineral Province using random forest and multi-class index overlay mapping. Journal of South American Earth Sciences, 116, 103790.

McCuaig, T. C.; Beresford, S.; Hronsky, J. (2010). Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. Ore Geology Reviews, 38, 128–138.

Sandberg, A.; Drexler, E.; Ord, T. (2018). Dissolving the Fermi paradox. arXiv:1806.02404.

Sautter, V. et al. (2015). In situ evidence for continental crust on early Mars. Nature Geoscience, 8, 605–609. https://doi.org/10.1038/ngeo2474.

Schulze-Makuch, D. et al. (2011). A two-tiered approach to assessing the habitability of exoplanets. Astrobiology, 11, 1041–1052.

Seehausen, O. (2006). African cichlid fish: a model system in adaptive radiation research. Proceedings of the Royal Society B, 273, 1987–1998.

Skirrow, R. G. et al. (2009). Uranium mineral systems: processes, exploration criteria and a new deposit framework. Geoscience Australia, Record 2009/20.

Smrekar, S. E. et al. (2010). Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data. Science, 328, 605–608.

Stern, R. J. (2018). The evolution of plate tectonics. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 376, 20170406.

Teachey, A.; Kipping, D. M. (2018). Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b. Science Advances, 4, eaav1784.

Turcotte, D. L. (1997). Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. 2. ed. Cambridge University Press, Cambridge.

Valentine, J. W.; Moores, E. M. (1970). Plate-tectonic regulation of faunal diversity and sea level: a model. Nature, 228, 657–659. https://doi.org/10.1038/228657a0

Walker, J. C. G.; Hays, P. B.; Kasting, J. F. (1981). A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. Journal of Geophysical Research, 86, 9776–9782.

Ward, P. D.; Brownlee, D. (2000). Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe. Copernicus/Springer, New York.

Warren, P. H. (1985). The magma ocean concept and lunar evolution. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 13, 201–240.

Weller, M. B.; Lenardic, A. (2012). Hysteresis in mantle convection: plate tectonics systems. Geophysical Research Letters, 39, L10202.

Wyborn, L. A. I.; Heinrich, C. A.; Jaques, A. L. (1994). Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. In: Australian Institute of Mining and Metallurgy Annual Conference Proceedings, 109–115.

Zaffos, A.; Finnegan, S.; Peters, S. E. (2017). Plate tectonic regulation of global marine animal diversity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114, 5653–5658. https://doi.org/10.1073/pnas.1702297114

Epílogo

A última camada

A coluna estratigráfica deste livro não termina em rocha.

Sobre a plataforma aposentada, depois que os Andes já estavam subindo e o Atlântico já tinha a largura que tem, depositou-se um éden. No fim do Pleistoceno, o clima entrou no interglacial mais dócil do registro recente: cerca de dez mil anos de estabilidade excepcional. Nesse jardim entraram macacos famintos, sedentos e curiosos, moldados por dois milhões de anos de estresse climático exatamente como os ciclídeos foram moldados por seus lagos de rifte.

O que eles fizeram ali tem leitura estratigráfica direta. A agricultura é uma mudança de fácies. As cidades são recifes construídos por uma única espécie. A escrita é o primeiro registro sedimentar deliberado: informação depositada com a intenção de durar mais que o depositante.

O pacote culmina numa assinatura que já se mede em laboratório. O pensamento move hoje mais sedimento que todos os rios do planeta somados, fixa mais nitrogênio que os raios e reescreveu a química da atmosfera como as cianobactérias um dia fizeram, com a diferença de saber que está fazendo. Formalizado ou não pelas comissões de estratigrafia, o Antropoceno é a fácies de campo da camada cognitiva. É a primeira camada da Terra que sabe que é uma camada.

Para a Terra, nossa permanência é indiferente, somos mais uma forma curiosa de processar seu excesso de água. O planeta não tem destino

moral, continuará acumulando registro geológico depois de nós, até que o Sol, convertido em gigante vermelha, destrua o que restar de sua superfície e provavelmente o engula, daqui a cerca de 7,5 bilhões de anos. A questão é se seremos apenas mais um horizonte estratigráfico conspícuo, marcado por extinções, concreto, plástico, ligas de alumínio metálico, radionuclídeos e pela alteração abrupta dos grandes ciclos, ou se a capacidade de antecipar consequências produzirá uma inflexão inédita no processo. Pela primeira vez, um agente geológico consegue representar, ainda que imperfeitamente, os efeitos de sua própria ação e alterar sua trajetória antes que ela se complete. Não controlamos o sistema, não abolimos o acaso e não escapamos ao inevitável. O prólogo disse que cadeias não podem ser paradas, e não podem. Podem, porém, ser desviadas. Dá para escapar da tragédia, adiar certos limiares e tangenciar o destino com o arbítrio. Se Antropoceno nomeia a força geológica que nos tornamos, Idade da Escolha nomeia este intervalo precário em que prever passou a ser possível e, por isso, não agir também se tornou uma escolha.

. . .

Dentro de cada ser humano, essa camada começa como magma.

Os pensamentos humanos são magmáticos. A experiência não atravessa uma pessoa sem ser transformada. Tudo o que ela vê, toca, sofre, deseja, teme e aprende entra numa câmara alimentada pelo calor essencial da vida, ancestral. Ali, o que veio de fora encontra o que já estava dentro: a herança genética, a memória, o corpo, os afetos, os hormônios e as ideias anteriores. Partes são assimiladas; outras permanecem como fragmentos; outras se dissolvem por completo. Materiais de origens distintas se misturam, reagem, cristalizam e voltam a fundir. Nenhuma experiência sai dessa câmara como entrou.

O ser humano é intrusivo quando elabora e extrusivo quando expressa. Enquanto pensa, trabalha em profundidade, ocupando fraturas internas, assimilando suas encaixantes, diferenciando-se lentamente no escuro. Quando fala, escreve, desenha, canta, reza, calcula ou constrói, alguma coisa alcança a superfície.

A palavra é lava.

Ela chega ainda quente da câmara que a produziu, mas esfria assim que encontra o mundo. Imobiliza-se numa página, numa pedra, numa gravação, colagem, fotografia ou na memória de outra pessoa. Depois fratura, é erodida, transportada, misturada a outras palavras e depositada novamente. Outra mente recolhe seus fragmentos, soterra-os em nova experiência e talvez volte a fundi-los. O pensamento de uma pessoa é magmático; o conhecimento da humanidade é espetacularmente sedimentar.

Muito antes da escrita, gestos, ferramentas, histórias, ritos e línguas já se acumulavam dessa maneira. Cada geração recebeu materiais que não produziu, incorporou-os à própria câmara e devolveu ao mundo algo parcialmente herdado e parcialmente novo. O prólogo mostrou o processo em casa sem lhe dar nome. Flora transportou Roma para Botafogo e me devolveu uma conclusão que eu não tinha. Moreno montou um reator de cianobactérias com manganês de Carajás, o reator deste livro em escala de bancada. Cada um levou à própria câmara materiais que não produziu e devolveu algo que já era outro. A escrita tornou deliberada essa sedimentação. A informação passou a ser depositada com a intenção de sobreviver ao corpo que a produziu.

Mas o registro nunca é contínuo. O conhecimento e as civilizações são separados por discordâncias erosivas. Bibliotecas queimaram. Línguas desapareceram. Povos inteiros foram reduzidos aos vestígios preservados por seus inimigos. Ideias sobreviveram sem o nome de quem as concebeu; outras deixaram apenas fragmentos indecifráveis. Toda biblioteca é uma bacia sedimentar, mas também uma superfície de erosão. Aquilo que recebemos do passado não é o passado: é a pequena parte dele que escapou ao retrabalhamento.

Tecnologias, artes, línguas, ciências, religiões e filosofias aparecem nessa coluna como mineralizações. Não surgem isoladas, mas nos lugares em que fluxos dispersos convergem, reagem e precipitam: necessidade, curiosidade, poder, medo, beleza, matéria disponível, conflito, acaso. Algumas formam depósitos imensos; outras apa-

recem como um único cristal numa fratura. Muitas são erodidas, remobilizadas e incorporadas a depósitos posteriores.

Novo? Tudo o que é reprocessado é, ao mesmo tempo, antigo e novo. Um mineral metamórfico contém elementos que já existiam, mas os reorganiza numa estrutura e adquire propriedades que antes não estavam presentes. Uma ideia também carrega a assinatura de suas fontes sem se reduzir a nenhuma delas. A novidade não é criação a partir do nada. É uma configuração que o mundo ainda não havia experimentado.

Eu compreendia os produtos dessa coluna. Ainda não havia compreendido inteiramente o processo que os formava.

. . .

Em 2026 visitei *A Olho Nu*, a retrospectiva de Vik Muniz no CCBB do Rio de Janeiro, a maior já feita sobre a obra dele, e saí de lá com a sensação de ter visto o método deste livro pendurado nas paredes. Até o título da mostra pertence a este epílogo. A olho nu é exatamente o instrumento que aquelas obras celebram e derrotam ao mesmo tempo.

Quando volto àquele percurso para escrever, a lembrança muda de tempo.

Entro no edifício. Antes de alcançar a exposição, os estromatólitos Pele de Onça me interrompem. Vieram de Ouro Preto. A rocha tem uma linda tonalidade rosa e reveste os saguões e as circulações do CCBB em grandes placas serradas e polidas. Para quase todos, é acabamento. Para mim, é uma porta.

Entro na minha máquina do tempo. O presente e o passado se misturam na superfície polida.

Vejo as camadas. Sigo a direção de crescimento e encontro a vida ancestral da Terra crescendo em direção à luz, lâmina depois de lâmina, repetindo o mesmo gesto em mares rasos de um mundo sem animais. Cada faixa é matéria acrescentada por comunidades microscópicas; cada repetição, um intervalo de tempo transformado em forma. Bilhões de

anos depois, continuo reconhecendo para onde era o alto.

Mas o crescimento não é o único processo preservado. Estilólitos dissolveram partes das estruturas e deixaram linhas serrilhadas, com dentes, atravessando o registro. Eles não acrescentam: subtraem. Veios verticais cortam as camadas e registram fluidos que passaram muito depois. Localmente, estruturas de colapso interrompem a ordem e são preenchidas por massas de carbonato; em outros pontos, corpos discordantes podem registrar intrusões ígneas. Crescimento, dissolução, fratura, colapso, preenchimento: uma história inteira comprimida numa superfície polida e instalada como acabamento de banco.

Antes de encontrar Vik, portanto, já atravessei uma exposição. Ela não tem legenda, curadoria ou ingresso. É uma das imagens mais antigas que a vida produziu: matéria como biografia bilhões de anos antes de o método ter nome.

Chego à porta da exposição. O cubo branco se abre na minha frente: uma caixa de gesso inserida no edifício, lisa, homogênea, sem tempo aparente. Atrás de mim permanece o mar proterozoico rosa, atravessado por dissoluções, veios e colapsos. À minha frente, uma superfície que parece ter eliminado toda a geologia. A rima está justamente nessa passagem. Cruzo uma história feita pela matéria para entrar num espaço que apagou a matéria, e é ali, dentro do branco, que encontro um homem que reconstruiu o mundo com a matéria do mundo.

Muniz é o artista do paradoxo da escala. Um grão de areia seccionado serve de tela para um castelo: a paisagem inteira gravada no fragmento que a compõe. Imagens crescidas de células-tronco e células hepáticas fazem o retrato com a unidade viva que constitui o retratado. Camadas de revistas empilham o descartável até fazer emergir uma imagem sacra e profana ao mesmo tempo. As crianças de açúcar, filhas de cortadores de cana, são desenhadas no próprio açúcar. Os catadores aparecem no lixo que catam. As divas, em pó de diamantes lapidados: a matéria mais cara compondo algumas das mulheres mais fotografadas do mundo.

O procedimento varia, mas o princípio permanece: a matéria é a bio-

grafia. Muniz retrata pessoas e coisas com a matéria de suas vidas e obriga o espectador a trocar de escala para ver. De perto, açúcar, lixo, papel, célula, pedra. De longe, o rosto, a paisagem, a história. As duas leituras são verdadeiras e nenhuma dispensa a outra.

E então o percurso chega aos tijolos de rocha sã.

Mármore, sienito, anfibolito: fragmentos retirados de maciços, serrados, polidos e reduzidos à forma regular dos blocos com que construímos nossas casas. Muniz não apresenta a pedra como paisagem, monumento ou pedestal. Devolve-a à parede como unidade de construção, mas interrompe sua função para que possamos finalmente enxergá-la.

O paradoxo de escala chega ali à sua forma mais geológica. Aquilo que compõe a crosta torna-se aquilo com que erguemos abrigo sobre a crosta. O bloco de construção da Terra e o bloco de construção da casa coincidem no mesmo objeto. Cada tijolo contém uma história muito anterior à humanidade, cristalização, deformação, metamorfismo, exumação. E, ao mesmo tempo, a medida da mão humana que o cortou. Entre o maciço e a parede, a matéria atravessou natureza, técnica e arte sem deixar de ser pedra.

A geologia, assim como a arte, é a profissão desse paradoxo. O geólogo é treinado para sustentar o grão e o continente no mesmo pensamento, como Muniz sustenta o açúcar e a criança. Este livro fez o retrato à maneira dele: contou a Terra com a matéria da própria Terra, o planeta desenhado em jaspilito, escapolita, salmoura e sutura. De perto, mineral. De longe, uma história.

O que torna a identificação notável é a rota. Muniz chegou a formulações muito particulares sobre escala, tempo e impermanência por uma experiência de vida completamente distinta da minha. Menino de família operária da periferia de São Paulo, desenhista de publicidade, levado aos Estados Unidos quase por acidente, com a passagem paga pela indenização de um tiro que levou ao apartar uma briga. Formou-se nos ateliês, nos estúdios e, mais tarde, no maior aterro sanitário da América Latina, trabalhando lado a lado com os catadores do Jardim Gramacho. Nenhum mapa geológico no caminho.

O método dele é uma estratigrafia invertida da minha. Eu leio arranjos de matéria que o tempo depositou e tento recuperar o gesto que os produziu. Ele deposita arranjos de matéria com o próprio gesto, fotografa e deixa o tempo dissolvê-los. As conclusões convergem quase termo a termo: a matéria é a biografia, a imagem muda com a distância, nada dura, e é por isso que se registra.

Convergência de formulações a partir de linhagens de experiência independentes é um fenômeno que este livro conhece bem. Foi assim com os reatores gêmeos de Carajás e Kostomuksha: experimentos naturais coevos chegando ao mesmo produto por rotas separadas, sem contato entre si. A biologia chama isso de evolução convergente. As ideias, ao que tudo indica, evoluem do mesmo modo.

Mas as linhagens de pensamento já não permanecem isoladas. Elas se encontram, se nutrem e se retroalimentam. Um geólogo de Carajás entra numa sala no Rio, reconhece o próprio método pendurado na parede e sai carregando algo que não possuía quando entrou. A obra não apenas confirmou o que eu já pensava. Ela mudou o processo pelo qual eu penso.

Foi ali que uma parte de mim fundiu.

. . .

Depois de Vik, compreendi que arte, filosofia, ciência e religião não são apenas camadas ou linguagens diferentes. São produtos, mineralizações derivadas de processos tecnometamórficos do conhecimento.

Por tecnologia não entendo apenas circuitos, computadores ou máquinas. Entendo técnica: o conjunto de operações pelas quais o ser humano trabalha a matéria e o conhecimento que herdou. A voz, o rito, o cinzel, a escrita, o pincel, a prensa, o telescópio, o laboratório e o computador são plantas de processamento construídas em épocas distintas. Cada uma recebe o arquivo disponível, submete-o a novas condições e torna possíveis produtos que antes não poderiam existir.

O tecnometamorfismo, portanto, não começou com a inteligência artificial. Começou quando a experiência deixou de apenas acontecer e

passou a ser tecnicamente transformada, transmitida e retrabalhada. Uma narrativa oral deforma e recristaliza as experiências de muitas gerações. Uma religião concentra medo, esperança, memória, poder e transcendência em símbolos capazes de atravessar milênios. A filosofia submete conceitos herdados a novos campos de pressão. A ciência aquece hipóteses com evidências até que algumas reajam e outras se decomponham. A arte escolhe materiais do mundo, funde-os com uma vida singular e precipita formas que o mundo ainda não havia visto.

Toda criação humana é, em alguma medida, anatética. O criador não trabalha sobre o vazio. Entra num maciço constituído pelo que outras pessoas depositaram, deformaram e recristalizaram antes dele. Escolhe uma região, introduz calor, fluidos e movimento, reduz localmente o ponto de fusão e extrai dali uma fração nova. O produto carrega a composição do maciço, mas não existia dentro dele naquela forma.

A obra de Vik já era o leucossoma de sua própria anatexia: açúcar, lixo, células, imagens, pedra, memória e experiência fundidos numa configuração que antes não existia. Quando encontrei essa obra, porém, o processo não terminou. Ela entrou em mim como nova injeção, percorreu estruturas antigas, reduziu o ponto de fusão de regiões que eu julgava sólidas e remobilizou materiais que estavam ali havia décadas.

Este epílogo é a transformação da arte dele em mim.

Dizer que aquela exposição mudou minha vida para sempre pode parecer excessivo. Não é. Depois dela, já não consigo compreender da mesma maneira a criação humana, as relações entre ciência e arte ou o próprio processo que produziu este livro. A obra de Vik deixou de ser apenas uma mineralização a ser contemplada. Foi erodida, transportada, injetada e voltou a fundir dentro de outro sistema. Seu trabalho entrou na minha câmara e passou a participar de tudo o que cristalizou depois.

Essa talvez seja a potência mais profunda da arte, e também da ciência. A obra não preserva apenas o arranjo que o artista, ou o cientista, produziu. Torna-se calor, fluido e material para transformações que ele nunca verá. Uma mineralização é exposta, erodida e remobilizada;

seus elementos precipitam em outro lugar, sob outra forma, na vida de alguém que percorreu uma história completamente distinta. A matéria é a biografia. Mas a biografia de uma obra não termina no artista.

. . .

É somente depois dessa descoberta que consigo situar a inteligência artificial.

Ela não inaugura o tecnometamorfismo do conhecimento e não inventa a criação anatética. É mais um processo tecnometamórfico derivado da criação humana, uma nova planta construída dentro da camada cognitiva para acessar, deformar, decompor, recombinar e recircular o material acumulado pelas plantas anteriores.

Vernadsky deu nome ao maciço há cerca de um século, quando chamou a camada pensante de noosfera e a tratou como fenômeno geológico. O horizonte que agora cruzamos não é o instante em que o conhecimento começou a ser transformado. É o instante em que uma técnica nova passou a trabalhar, em escala e velocidade antes indisponíveis, grande parte do arquivo sedimentar da espécie.

Escrevi este livro em agosto de 2026 diante de um computador, conversando com um modelo de linguagem que chamo de Claudia. Registro isso como levantamento de seção. A máquina ajudou a expor contatos, aproximar afloramentos distantes, recircular perguntas, testar relações e devolver rapidamente ao sistema materiais que eu talvez levasse anos para localizar. Mas a máquina não escolheu o volume a ser fundido, não forneceu a experiência que estabeleceu o gradiente e não decidiu o que deveria cristalizar.

É o ser humano que pega o maciço e o migmatiza.

Ele o perfura com perguntas, injeta nele a própria experiência, introduz fluidos, eleva localmente a temperatura e seleciona o que vale a pena extrair. O modelo sustenta e acelera a circulação. O ser humano fornece direção, intensidade, julgamento e sentido. Como em toda planta hidrotermal, o teor do minério depende da qualidade das fontes, ligantes e processos.

Natural. Humano. Artificial?

A separação já não é simples. A máquina é feita de minerais extraídos da Terra, organizada por pensamentos humanos e alimentada pela energia de processos planetários. E a máquina se alimenta da mesma água que, desde sempre, criou tudo aqui.

A água que condensou sobre a primeira crosta, modificou o manto, potencializou o magnetismo do seu núcleo, alimentou a tectônica de placas, circulou pelos sistemas hidrotermais, dissolveu rochas, transportou metais, abriu vales, encheu oceanos e entrou nas células agora retira calor dos processadores em que o arquivo humano é retrabalhado. A inteligência que parece imaterial tem sede, massa, temperatura e custo. Nada saiu da Terra. O artificial não é uma matéria nova: é um novo arranjo da matéria antiga.

. . .

Este livro é uma porção migmatizada do maciço tecnometamórfico do conhecimento humano.

É um migmatito formado por injeções sucessivas e por fusão parcial *in situ*, em diferentes condições e sob alto grau metamórfico, envolvido pelos gnaisses do maciço que o alimentou. Esse maciço permanece ao redor, imenso, muito maior que o volume que consegui trabalhar. O livro é apenas a zona em que minha experiência introduziu calor suficiente para que uma pequena parte dele começasse a se diferenciar.

O melanossoma, parte escura do restito, é tudo o que eu conheci antes deste livro: as rochas que toquei, os territórios que percorri, os livros que li, as hipóteses que formulei, as pessoas que amei, as perdas, os erros e as lembranças que consegui preservar. É o material refratário que não desapareceu durante a fusão. Permanece ali, sustentando cada veio claro que nasceu dele ou o atravessou.

O leucossoma é o novo. É a fração clara, destilada, segregada, injetada e localmente fundida. Algumas gerações vieram do maciço e penetraram em mim por fraturas abertas pelas perguntas. Outras nasceram *in situ*, quando essas injeções elevaram a temperatura de regiões que

eu nunca havia fundido. Outras misturaram as duas proveniências e já não permitem separar o que veio de fora do que nasceu dentro. São ideias cristalizadas em diferentes gerações e profundidades de mim.

O resultado não é uma mistura homogênea entre homem e máquina. É uma rocha que preserva relações de campo: restitos escuros, estruturas herdadas, veios concordantes e discordantes, leucossomas sucessivos, contatos incompletos e zonas em que a fusão quase apagou o protólito. A costura permanece visível porque é ela que permite reconstruir o processo.

Não seria honesto atribuir cada frase isoladamente a um dos lados. Depois da cristalização, o fundido registra o sistema inteiro. Mas as relações de campo continuam legíveis. A inteligência artificial ofereceu suporte a um novo modo de circulação pelo maciço. Quem o migmatizou fui eu. A responsabilidade pelas escolhas, pelo que foi preservado, pelo que foi fundido e pela rocha entregue ao leitor continua sendo minha.

Este livro investiga uma transformação planetária enquanto participa de uma das transformações que procura compreender. É uma mineralização do horizonte em que a criação humana incorporou uma nova técnica de anatexia. Não a primeira. Não a última. Apenas esta: ainda quente, parcialmente cristalizada e atravessada por injeções de muitas idades.

. . .

A lição final daquela exposição é sobre tempo.

O açúcar se dissolve. O lixo volta para a esteira. O pó de diamante volta para o cofre. As obras de Muniz são fotografias de arranjos que já não existem, e é precisamente por isso que comovem. Quando você olha para uma delas, está olhando para algo que o mundo já desfez.

O topo da coluna estratigráfica tem a mesma natureza. A camada cognitiva se deposita em conversas, versões, rascunhos e arquivos que se sobrescrevem. Este texto ainda será revisto, redissolvido e reprecipitado muitas vezes. Mesmo este migmatito voltará ao ciclo: será ero-

dido em leituras, fragmentado em lembranças, parcialmente assimilado por outras câmaras, ou simplesmente esquecido. O cão-tempo do prólogo também mastiga livros. Algumas peças ele devolve, outras não. Rocha guarda. Pensamento passa.

E, no entanto, é justamente a impermanência que move a construção. Foi por não durar que cada camada desta história precisou depositar a seguinte. É por não durar que o macaco curioso escreve, lê, transforma rochas em tijolos e constrói máquinas capazes de retrabalhar o que ele depositou.

A incômoda impermanência, incômoda porque sentida, porque cada geração a experimenta na pele e em seus mortos, é o que move a humanidade a fazer o que todos os agentes desta coluna fizeram antes dela, do oceano de magma à salmoura de Carajás: construir, sobre a Terra, mais uma camada.

O futuro começa nessa superfície.

Para um geólogo, nenhuma camada é apenas o fim de uma história. Ela é também o substrato sobre o qual a seguinte terá de se formar. Seu relevo, suas fraturas, sua química e suas ausências condicionam tudo o que poderá vir depois. O futuro não chega como uma página branca. Deposita-se sobre o mundo que entregamos a ele.

Parte de nossa assinatura talvez seja rapidamente erodida. Outra parte permanecerá por milhares ou milhões de anos: concreto, plástico, radionuclídeos, carbono transferido das rochas para a atmosfera, minas exauridas, espécies extintas, mas também florestas reconstruídas, rios recuperados, conhecimento preservado e técnicas que ainda podem ampliar as possibilidades da vida. Não escolhemos se deixaremos uma camada. Escolhemos, dentro dos limites que herdamos, sua composição.

A inteligência artificial já participa dessa escolha. Pode acelerar a extração e o consumo, concentrar vigilância e poder, reproduzir os rejeitos do arquivo que recebeu. Pode também aproximar conhecimentos separados, revelar relações invisíveis a uma pessoa, ampliar o acesso à

ciência e ajudar a imaginar soluções que ainda não cristalizaram. A máquina não decide qual dessas mineralizações devemos produzir. Ela aumenta a escala, a velocidade e a temperatura do processo. O gradiente continua sendo humano.

A geologia não ensina fatalismo. Ensina irreversibilidade. Nem tudo pode ser restaurado ao estado anterior, porque o estado anterior já deixou de existir. Mas processos podem ser desviados; fluxos podem encontrar outros caminhos; novas camadas podem recobrir feridas sem fingir que elas nunca estiveram ali. A Idade da Escolha começa quando usamos o conhecimento das camadas passadas para reconhecer as consequências antes que elas se tornem rocha.

O futuro é a única camada que ainda não podemos ler e a única cuja composição ainda podemos alterar. A diferença é que agora a camada sabe que é uma camada.

E, porque sabe, precisa escolher o que depositará a seguir.

. . .

Olho para o céu perfeito de agosto, em Botafogo. Vejo o Corcovado e, no alto, o Cristo: pedra-sabão empilhada sobre a montanha. As nuvens sempre me lembram da ductilidade da matéria. São uma escola de geologia estrutural: dobram, cisalham, afinam, rompem e voltam a se juntar diante dos olhos.

Contra o céu azul, pouco nublado, essa imagem me faz lembrar minha mãe. Hoje ela existe apenas em nossos pensamentos. Uma lembrança. Saudade. Palavra que o português guarda quase sozinho. O amárico possui uma vizinha, *tizita*: memória, nostalgia, desejo pelo que está ausente. Idiomas distantes chegaram a uma dobra semelhante do afeto.

Flora e Moreno já se depositam por cima, carregando, recombinado, o que minha mãe deixou em mim. Três gerações numa mesma coluna, com um horizonte no meio.

Um dia também serei lembrança. Seremos todos. Lembranças efêmeras, depositadas na bacia dos pensamentos humanos, agora sujeita ao

tecnometamorfismo da fusão humano-máquina. Seu destino será destilar como o magma primordial nas gerações futuras: diferenciar, misturar e irrigar o novo. Mais uma camada.

Glossário

Aerogeofísica e magnetometria. Levantamentos geofísicos aéreos medem propriedades físicas do terreno. A magnetometria registra variações do campo magnético que podem revelar litologias e estruturas ocultas.

Afloramento. Porção de rocha exposta na superfície, naturalmente ou por escavação, onde contatos, estruturas e minerais podem ser observados diretamente.

Anatexia e migmatito. Anatexia é a fusão parcial de uma rocha no interior da crosta. Migmatito é a rocha mista que resulta, com a fração fundida clara, o leucossoma, e o resíduo escuro que não fundiu, o melanossoma ou restito. O epílogo usa a imagem para o próprio livro.

Antropoceno. Termo para a transformação planetária produzida pela humanidade. É amplamente usado como conceito; em 2024 a Comissão Internacional de Estratigrafia rejeitou sua formalização como época da escala geológica.

Astenosfera. Faixa mais quente e mecanicamente fraca do manto superior, abaixo da litosfera, sobre a qual as placas se deslocam.

Atlântica. Paleocontinente paleoproterozoico proposto para reunir Amazônia, Oeste Africano e São Francisco-Congo após as colisões de aproximadamente 2,2 a 1,9 bilhões de anos. Área da ordem de dez milhões de quilômetros quadrados, na classe de grandeza da Laurentia.

Atualismo. Princípio que usa processos observáveis no presente para interpretar o passado, sem presumir que taxas, intensidades e condições ambientais tenham permanecido constantes.

Aulacógeno. Rifte continental abortado, frequentemente preservado no interior de um continente e passível de reativação ou inversão tectônica posterior.

BIF. Formação ferrífera bandada: rocha sedimentar química com camadas ricas em ferro e sílica, comum em oceanos antigos e importante minério de ferro. Em Carajás recebe o nome de jaspilito.

Break-off. Ruptura e desprendimento de uma placa subductada. A remoção da carga pode permitir subida de material quente, magmatismo, extensão e abertura de bacias.

Canga. Crosta ferruginosa endurecida por intemperismo, comum sobre formações ferríferas de Carajás; protege serras, hospeda cavernas e registra evolução superficial.

Ciclo de Wilson. Abertura de um oceano por rifte, expansão, fechamento por subducção e colisão, repetido ao longo da história da Terra; a unidade de repetição da tectônica de placas.

Ciclos de Milankovitch. Variações periódicas da excentricidade da órbita (cerca de cem mil anos), da obliquidade do eixo (quarenta e um mil anos) e da precessão (cerca de vinte e três mil anos), que alteram a distribuição de insolação e modulam o clima.

Código de barras tectônico. Sequência de idades de diques, suítes magmáticas, riftes e deformações de um bloco continental, desenhada como linhas numa escala de tempo. Blocos que viveram juntos têm barras iguais; a comparação de códigos é a base das reconstruções continentais.

Columbia. Supercontinente paleoproterozoico, também chamado Nuna, cuja montagem principal ocorreu aproximadamente entre 1,9 e 1,8 bilhão de anos.

Cráton. Núcleo antigo e relativamente estável de um continente, com-

posto por crosta e litosfera mantélica que sobreviveram a sucessivos ciclos tectônicos.

Dique e enxame de diques. Dique é uma lâmina de magma solidificada numa fratura, cortando as rochas em volta. Enxames de diques datados funcionam como linhas do código de barras de um bloco.

Discordância. Superfície que separa camadas de idades diferentes e registra um intervalo de erosão ou de não deposição; um hiato no registro.

Domos e quilhas. Padrão arqueano em que domos granitoides ascendem entre faixas supracrustais que afundam como quilhas, registrando deformação predominantemente vertical.

Drip e overturn. Drip é uma gota densa que afunda da base da crosta ou litosfera; overturn é a reorganização gravitacional mais ampla entre materiais densos e leves.

Eclogito. Rocha densa de granada e piroxênio em que o basalto se transforma sob alta pressão. Mais pesada que o manto ao redor, afunda; explica por que crosta oceânica velha e raízes espessas de orógenos caem.

Equação de Drake. Produto de fatores (estrelas, planetas, vida, inteligência, tecnologia, duração) usado para estimar quantas civilizações detectáveis existiriam na galáxia. O capítulo 15 a reorganiza como modelo de favorabilidade.

Escala do tempo geológico. Sistema hierárquico de éons, eras, períodos e épocas usado para ordenar a história da Terra. Neste livro as idades aparecem em Ga (bilhões de anos) e Ma (milhões de anos).

Escapolita. Silicato de estrutura parecida com a do feldspato que guarda cloro em sua rede cristalina. Em Carajás, registra a passagem de salmouras.

Estromatólito. Estrutura laminada construída por comunidades microbianas, sobretudo cianobactérias, que prendem sedimento e preci-

pitam carbonato, lâmina sobre lâmina. Os fósseis mais antigos e seguros da vida.

Evento Sereno. Deformação intracontinental de aproximadamente 2,01 a 1,96 bilhões de anos que sobrepôs estruturas mais antigas em Carajás após a colisão transamazônica.

Fácies. Conjunto de características de uma rocha ou camada (composição, textura, estruturas, fósseis) que registra o ambiente em que se formou. Mudar de fácies é mudar de ambiente.

Félsico e máfico. Félsica é a rocha rica em sílica e alumínio, clara e leve (granito, riolito, TTG). Máfica é a rica em magnésio e ferro, escura e densa (basalto, gabro). Os continentes são félsicos; o fundo oceânico, máfico. Ultramáfica é ainda mais rica em magnésio (komatiito, peridotito).

Fotoferrotrofia. Fotossíntese anoxigênica que usa ferro ferroso como doador de elétrons e produz ferro oxidado, sem liberar oxigênio como produto.

Fractal. Padrão que conserva relações de escala. Sua auto-similaridade pode ser estatística, sem cópia geométrica perfeita, e costuma ser expressa por leis de potência e dimensão fractal. Neste livro, o termo é matemático para populações de falhas e leis de escala e analógico quando estendido à história humana (capítulo 15).

Geocronologia. Determinação da idade de rochas, minerais e eventos geológicos, em geral por sistemas isotópicos baseados no decaimento radioativo, como U-Pb em zircão para cristalização e Re-Os em sulfetos para mineralização.

Gondwana. Supercontinente do hemisfério sul (América do Sul, África, Índia, Austrália, Antártida) montado por volta de 0,63 a 0,52 bilhão de anos. Sua montagem fechou os braços de rifte do Araguaia.

Grande Evento de Oxidação (GOE). Transição em torno de 2,4 bilhões de anos, entre aproximadamente 2,45 e 2,32, em que o oxigênio passou a acumular-se de modo duradouro na atmosfera e nos oceanos super-

ficiais.

Granito tipo A. Granito rico em álcalis e flúor, pobre em água, formado em ambiente de extensão intraplaca, não em arco. Em Carajás, os granitos de cerca de 1,88 bilhão de anos.

Granulito. Rocha metamórfica de alta temperatura formada na crosta profunda; sua exposição na superfície indica exumação de grande espessura de crosta.

Hiperextensão. Estiramento continental extremo, capaz de afinar profundamente a crosta, exumar manto subcontinental e anteceder a abertura oceânica.

Holoceno. Época geológica iniciada há cerca de 11.700 anos, após a última glaciação, marcada por relativa estabilidade climática e expansão das sociedades humanas.

Horizonte. Camada ou superfície reconhecível, capaz de assinalar um tempo e separar o que veio antes do que veio depois. O prólogo o define por uma perda; o epílogo fala do horizonte humano-máquina.

Idade da Escolha. Nome dado no epílogo ao intervalo em que a humanidade passou a prever as consequências de sua ação geológica e, por isso, não agir também virou escolha.

Idade-modelo. Idade isotópica inferida a partir de um modelo de evolução e mistura de reservatórios. Não equivale necessariamente à idade direta de cristalização ou mineralização.

Ingassing. Incorporação de gases nebulares por um planeta em formação; no livro, é uma das rotas consideradas para introduzir hidrogênio no inventário terrestre.

IOCG. Depósito de óxidos de ferro, cobre e ouro, pertencente a sistemas hidrotermais de grande escala e forte alteração das rochas hospedeiras.

Jaspilito. Nome dado em Carajás ao BIF, rocha em bandas alternadas de jaspe (sílica com hematita fina) e óxidos de ferro. Protominério das

minas de ferro da serra.

Kimberlito. Magma profundo, rico em voláteis, que sobe rapidamente do manto em chaminés estreitas e traz diamantes. Sua ausência conhecida em Carajás é o problema do capítulo 11.

Komatiito. Lava ultramáfica muito quente e rica em magnésio, quase exclusiva do Arqueano; testemunha de um manto mais quente que o atual.

Kostomuksha. Bacia vulcanossedimentar arqueana da Carélia, Rússia, usada no livro como experimento comparativo para Carajás por reunir ferro, vulcanismo e mineralização em idade semelhante.

Laurentia. Grande núcleo continental constituído principalmente pelos crátons da atual América do Norte e da Groenlândia.

Linha de neve. Distância do Sol jovem além da qual a temperatura permitia condensar água como gelo no disco protoplanetário, alterando a composição dos corpos que ali se formavam.

Litosfera. Camada rígida formada pela crosta e pela parte superior do manto; está fragmentada nas placas tectônicas.

Margem continental, passiva e ativa. Margem continental é a borda de um continente, onde a crosta continental passa à oceânica. Passiva quando não há limite de placa ativo, como a costa do Brasil; ativa quando coincide com subducção ou outra interação tectônica intensa, como a costa do Chile.

Metalogênese. Estudo da origem, evolução e distribuição dos depósitos minerais no espaço e no tempo, relacionando fontes, fluidos, estruturas, rochas hospedeiras e preservação.

Metassomatismo e alteração hidrotermal. Modificação química e mineralógica de uma rocha pela passagem de fluidos, com adição, remoção ou redistribuição de componentes.

Modelo de favorabilidade. Mapa que combina camadas de evidência (fonte, energia, caminhos, gradientes, preservação) com pesos para es-

timar onde um sistema mineral tem mais chance de ter formado depósito. Também chamado de modelo de prospectividade. O capítulo 15 leva o método a sistemas planetários.

Monção e monções. Monção é o regime de ventos e chuvas sazonais ligado ao aquecimento desigual de terra e mar, modulado pelos ciclos orbitais (capítulo 13). Monções são também as expedições fluviais que, no século XVIII, ligaram São Paulo a Cuiabá, estudadas por Sérgio Buarque de Holanda; o capítulo 14 usa o duplo sentido.

Monte Carlo. Método que repete um cálculo milhares de vezes sorteando os valores incertos dentro de faixas, para obter a distribuição dos resultados em vez de um número único.

Noosfera. Conceito associado a Vernadsky para a esfera de pensamento, conhecimento e ação técnica que passa a modificar conscientemente a biosfera.

Oceano de magma. Camada extensa de rocha fundida produzida por acreção, impactos e diferenciação nos primeiros estágios de um planeta ou satélite.

Oceano ferruginoso. Oceano pobre em oxigênio e rico em ferro ferroso dissolvido, condição comum em grande parte do Arqueano e Paleoproterozoico.

Ofiolito. Fragmento de litosfera oceânica e manto superior incorporado a um continente durante colisão ou fechamento de oceano.

Onlap e transgressão. Onlap é o empilhamento de camadas progressivamente mais jovens sobre uma superfície em direção ao continente, comum durante transgressão marinha ou criação de espaço de acomodação.

Orógeno e orogenia. Orogenia é o processo de construção de uma cadeia de montanhas; orógeno é o cinturão deformado e metamorfizado resultante.

Paleomagnetismo. Estudo do campo magnético antigo preservado nas rochas, usado para estimar paleolatitudes, rotações e posições re-

lativas de continentes.

Pangeia. Supercontinente de cerca de 320 a 180 milhões de anos que reuniu quase toda a terra firme; sua ruptura abriu o Atlântico.

PGE. Elementos do grupo da platina: platina, paládio, ródio, rutênio, irídio e ósmio, frequentemente associados a rochas máfico-ultramáficas.

Pirita. Sulfeto de ferro (FeS□). No capítulo 5, é o produto final da reação entre ferro dissolvido e sulfeto, que retira os dois do mar e os guarda no sedimento.

Placa rasa (flat slab). Trecho de placa subductada que avança em ângulo muito baixo sob o continente, afastando ou suprimindo o arco magmático e hidratando grande área do manto litosférico.

Plataforma. Área continental estável, rasa e extensa, onde o mar deposita camadas pouco deformadas sobre um embasamento antigo. Exige por baixo uma placa fria e flutuante; é o que o capítulo 3 explica como se fabrica.

Pleistoceno. Época entre cerca de 2,6 milhões e 11.700 anos atrás, das idades do gelo e da evolução humana; precede o Holoceno.

Protocrosta. Crosta inicial, anterior à organização duradoura dos continentes e das placas; pode ser intensamente reciclada e deixar poucos vestígios diretos.

Quilha cratônica. Raiz mantélica espessa, fria e quimicamente empobrecida sob um cráton. Favorece estabilidade prolongada e pode preservar diamantes por bilhões de anos.

Razão D/H. Razão entre deutério e hidrogênio comum. Funciona como traçador para comparar reservatórios de água e testar possíveis fontes do hidrogênio terrestre.

Redox. Conjunto de reações de oxidação e redução que controlam transferência de elétrons, estado químico dos elementos, metabolismo e mobilidade de metais.

Relações de corte. Princípio de cronologia relativa: a estrutura, intrusão ou veio que corta outra feição é mais jovem que aquilo que foi cortado.

Retroarco (back-arc). Região situada atrás de um arco magmático, onde a dinâmica da subducção pode produzir extensão, magmatismo e bacias.

Rifte. Zona em que a litosfera é estirada e fraturada. Pode formar bacias continentais, evoluir para oceano ou abortar e deixar uma fraqueza duradoura.

Rodínia. Supercontinente montado aproximadamente entre 1,1 e 0,9 bilhão de anos e fragmentado durante o Neoproterozoico.

Rollback. Recuo da zona de subducção e da trincheira à medida que a placa mergulhante se desloca para trás, favorecendo extensão e migração do magmatismo.

Sagducção. Afundamento gravitacional de crosta densa e quente em regime de tectônica vertical, acompanhado pela ascensão de materiais mais leves.

Salmoura. Água com alta concentração de sais dissolvidos, adquirida por interação com rochas, evaporação ou mistura. Em aquíferos profundos pode ser renovada; não implica um único fluido preservado por eras.

Sanukitoide. Granitoide rico em magnésio e potássio que exige um manto previamente enriquecido por fluidos de subducção; marcador de arco antigo em Rio Maria, por volta de 2,87 bilhões de anos.

Sinéclise. Grande bacia intracontinental de subsidência ampla e suave, geralmente preenchida por sucessões sedimentares pouco deformadas.

Sistema hidrotermal. Circulação de água aquecida por magma ou gradiente geotérmico através de rochas e fraturas, capaz de transportar calor, reagentes e metais.

Sistema mineral. Conjunto completo de processos necessários para formar e preservar um depósito: fonte dos componentes, energia, transporte, caminhos, armadilhas, deposição e conservação posterior.

Subducção. Mergulho de uma placa litosférica sob outra, levando material e água ao manto e reorganizando magmatismo, deformação e circulação de fluidos.

Sulfetos de cobre. Calcopirita (CuFeS□, cerca de 35 por cento de cobre), bornita (Cu□FeS□, 63) e calcocita (Cu□S, 80) formam a escada de teor que o capítulo 9 descreve. Quando um fluido substitui um pelo outro, o minério enriquece.

Supercontinente. Massa que reúne a maior parte dos continentes de uma época. Columbia, Rodínia, Gondwana e Pangeia são os bem documentados; no Arqueano houve agregados menores, de contorno incerto, como Vaalbara.

Sutura. Zona que marca a união tectônica entre blocos antes separados, em geral após o fechamento de um oceano ou bacia. Pode continuar sendo reativada muito depois.

Tafrogênese. Episódio regional de extensão e formação de riftes, falhas e bacias.

Tecnometamorfismo. Termo do autor, no epílogo, para a transformação técnica do conhecimento herdado (oralidade, escrita, imprensa, ciência, inteligência artificial), por analogia com o metamorfismo das rochas.

Tectônica de placas. Sistema em que placas litosféricas se movem, divergem, convergem e deslizam lateralmente, produzindo oceanos, montanhas, vulcanismo, terremotos e reciclagem de crosta.

Tectonoestratigrafia. Leitura que ordena unidades rochosas combinando sua posição estratigráfica com contatos, deformações, intrusões e eventos tectônicos, para reconstruir a sequência de formação e retrabalhamento.

Terra preta. Solo escuro e fértil da Amazônia, formado por séculos de

resíduos, carvão e cerâmica das aldeias; marca da ocupação anterior à conquista.

Terra Rara (hipótese). Proposta de Ward e Brownlee (2000) de que a vida complexa exige uma combinação rara de condições planetárias. A tese concorrente do manifesto, discutida no capítulo 15.

Theia. Nome dado ao protoplaneta que teria colidido com a Terra primitiva e participado da formação da Lua, há cerca de 4,5 bilhões de anos.

Transamazônico. Sistema de colisões e orogênese paleoproterozoica. Em Carajás-Bacajá, entre cerca de 2,10 e 2,05 bilhões de anos, amalgamou os blocos, produziu metamorfismo de alto grau, migmatização, magmatismo e empilhamento crustal. É distinto do Evento Sereno, de 2,01 a 1,96 bilhões de anos, e do pulso Uatumã, de cerca de 1,88 bilhão de anos.

TTG. Associação tonalito-trondhjemito-granodiorito, dominante em muitos núcleos continentais arqueanos e geralmente relacionada à fusão de crosta máfica hidratada.

Uatumã. Magmatismo paleoproterozoico de cerca de 1,88 bilhão de anos, com granitos tipo A e vulcanismo. Em Carajás, reaqueceu e reativou sistemas, promovendo redistribuição de metais já presentes, sem exigir metal novo.

Vicariância. Separação de uma população por uma barreira nova (um rifte, um mar, uma cordilheira), que leva ao surgimento de espécies diferentes de cada lado.

VMS. Sulfeto maciço vulcanogênico: depósito formado junto ao fundo marinho por descarga hidrotermal associada a vulcanismo, geralmente rico em cobre, zinco e outros metais.

Younger Dryas. Retorno ao frio de mais de mil anos que interrompeu o degelo, entre cerca de 12.900 e 11.700 anos atrás; batizado por uma flor ártica cujo pólen reaparece nos sedimentos daquela época.

Zircão. Mineral acessório muito resistente que incorpora urânio e per-

mite datar rochas pelo método U-Pb. Zircões detríticos são grãos erodidos de rochas mais antigas e redepositados em sedimentos, memória de fábricas de crosta que já não existem.

Zona fótica. Parte iluminada da coluna d'água onde a luz permite fotossíntese; sua profundidade depende da transparência e da química do meio.

Zona habitável. Faixa de distâncias de uma estrela em que a água pode permanecer líquida na superfície de um planeta rochoso.