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.