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