Uma primeira crosta fina e parcialmente fundida: um modelo em que os impactos, e não o calor interno, dominaram o Hadeano

O primeiro éon da Terra, o Hadeano, quase não deixou registo rochoso. Este estudo de modelação pergunta como seria a crosta quando deixamos de ignorar os impactos. Usando um modelo estocástico e decrescente do fluxo de impactos e simulações validadas do fluxo de calor na crosta e no manto, os autores concluem que o calor dos impactos teria ultrapassado todo o calor interno da Terra em pelo menos uma ordem de grandeza durante a maior parte do Hadeano, deixando uma crosta fina (menos de ~5 km), parcialmente fundida a poucos quilómetros de profundidade — demasiado fraca, argumentam, para tectónica de placas e propensa a reciclar-se para o manto, o que explicaria por que sobrevive tão pouco material hadeano. À medida que os impactos diminuíram após ~3,9 Ga (há cerca de 3,9 mil milhões de anos), pôde formar-se crosta continental duradoura, precisamente quando aparecem as rochas félsicas sobreviventes mais antigas — «provavelmente mais do que uma coincidência», nas palavras cuidadosas dos autores. Como utilizaram deliberadamente um aquecimento conservador de limite inferior, o resultado qualitativo é robusto mesmo que os números exatos não estejam fixados. É um modelo forte e coerente da infância da Terra — não uma observação direta dela.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: 10.1126/science.aeb5402

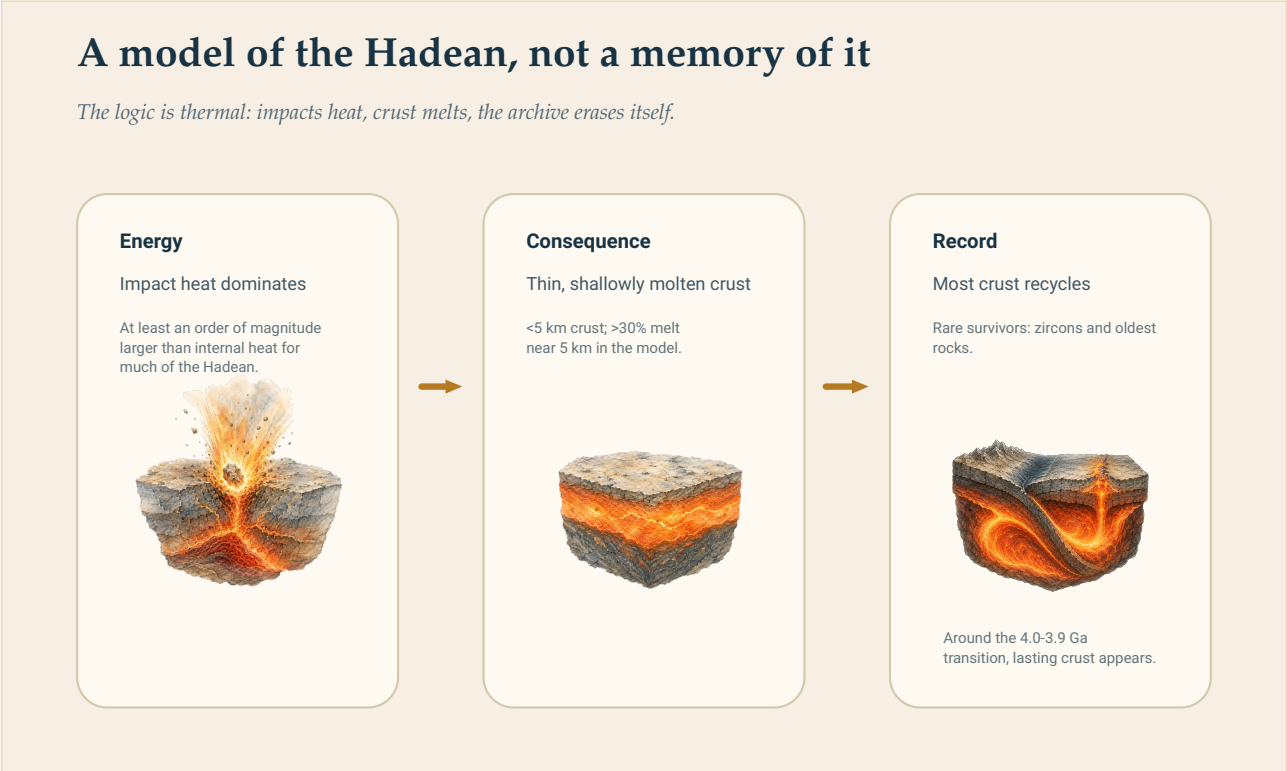
O capítulo da história da Terra de que quase não restam páginas

A Terra é o único planeta que conhecemos com continentes — as massas de terra flutuantes e ricas em sílica onde todos vivemos. No entanto, a forma como os continentes surgiram pela primeira vez continua a ser um dos problemas por resolver mais antigos da geologia, por uma razão brutal: quase toda a evidência desapareceu.

O primeiro éon da Terra, o Hadeano, vai do nascimento do planeta até há cerca de 4,03 mil milhões de anos (Ga). Desse primeiro meio milhar de milhões de anos, quase nada sobrevive. As rochas félsicas intactas mais antigas — do tipo continental — têm cerca de 4,03 Ga. Algumas raras rochas basálticas chegam a ~4,2 Ga. O material mais antigo de qualquer tipo é um conjunto disperso de cristais de zircão — sobretudo os famosos zircões de Jack Hills, na Austrália Ocidental — datados de 4,4 Ga. Este é praticamente todo o arquivo da infância da Terra: um punhado de locais e alguns minerais do tamanho de grãos de areia.

Este estudo não acrescenta uma nova rocha a esse arquivo. Faz algo diferente: constrói um modelo físico de como seria a crosta hadeana sob essas condições e faz uma pergunta que a maioria dos modelos da Terra primitiva deixa de fora. O que acontece quando deixamos de ignorar o facto de que a Terra primitiva estava a ser bombardeada?

A resposta a que os autores chegam é impressionante. Durante a maior parte do Hadeano, o calor fornecido pelos impactos teria superado largamente todo o calor interno da Terra, deixando a crosta fina e parcialmente fundida — demasiado fraca, argumentam, para algo semelhante à tectónica de placas moderna. É um modelo, não uma memória. Mas é um modelo que, desta vez, tenta realmente ter em conta a violência da época que descreve.



O calor dos impactos domina o orçamento energético do modelo, uma crosta fina e parcialmente fundida a pouca profundidade recicla-se a si própria e uma crosta continental duradoura só aparece por volta da transição entre 4,0 e 3,9 Ga. É um modelo do Hadeano, não uma memória direta dele.

The Clean Paper CC BY 4.0

O que fizeram os autores

A equipa combinou três elementos que normalmente são tratados em separado.

Primeiro, um **modelo estocástico do fluxo de impactos** — a chuva de asteroides e corpos maiores que atingiu o Sistema Solar interior ao longo do Hadeano e do início do Arqueano. É importante notar que não se trata da antiga ideia de um único pico de «Bombardeamento Intenso Tardio». É um fluxo muito intenso no início que **diminui com o tempo**, com os grandes impactos a ocorrer aleatoriamente (estocasticamente), e não segundo um calendário. O modelo é reescalado a partir de estatísticas de impactos lunares e do Sistema Solar interior e foi escolhido para ser compatível com os espectros de idades dos zircões e com a evidência paleomagnética disponível.

Segundo, **simulações geodinâmicas** de como o calor se desloca através da crosta e do manto superior. Os autores utilizaram um código lattice-Boltzmann validado por benchmarks (Planet_LB), executando tanto cálculos simples 1D de temperatura em função da profundidade como instantâneos completos 2D da convecção do manto a 4,1 Ga. Estes incluem as fontes internas habituais de calor — decaimento radioativo e calor proveniente do núcleo — e, de forma importante, **advecção magmática**: o calor transportado para cima pelo magma ascendente, que a maioria dos modelos térmicos da crosta omite.

Terceiro, **modelação de equilíbrio de fases** de uma crosta primitiva realista — um metabasálto hadeano hidratado do cinturão de rochas verdes de Nuvvuagittuq — para determinar a que temperatura e profundidade esse tipo de rocha começaria a fundir.

Há uma escolha metodológica que importa para a leitura de todo o artigo: os autores deliberadamente tornaram mais difícil obter a sua própria conclusão. Assumiram um manto «não condrítico» — com menos material radioativo produtor de calor do que a referência condrítica — e menos de metade do aquecimento interno do modelo padrão, utilizaram taxas de aquecimento conservadoras e ignoraram o aquecimento de maré causado pela Lua jovem e próxima. Isto significa que as temperaturas da crosta calculadas são **mínimos** — limites inferiores. Se alguma coisa, o Hadeano real terá sido mais quente do que o modelo.

O que encontraram

Os impactos, e não o calor interno, dominavam o orçamento energético do Hadeano. Quando o calor dos impactos é integrado ao longo do tempo, ultrapassa enormemente a contribuição interna — em pelo menos uma ordem de grandeza durante a maior parte do Hadeano. Neste quadro, o aquecimento por impactos, e não o decaimento radioativo, é o principal motor do tectonismo inicial, perdendo importância apenas depois de cerca de **3,9 Ga**.

Esse calor manteve a crosta fina e fundida a pouca profundidade. Sem impactos nem advecção do magma, o modelo produz uma crosta hadeana apenas parcialmente fundida abaixo de cerca de 10–15 km. Acrescentando o calor dos impactos, a zona de fusão sobe drasticamente: a crosta torna-se parcialmente fundida a apenas **alguns quilómetros de profundidade** (abaixo de aproximadamente 2–5 km). A cerca de 5 km, os modelos preveem mais de 30% de material fundido — um estado em que a rocha é demasiado fraca para se manter coesa como uma placa rígida. Entre 5 e 10 km, temperaturas de ~1000–1100°C implicam uma crosta extensamente fundida quase independentemente da composição. A crosta sólida sobrevivente teria sido **fina, com menos de cerca de 5 km**.

Uma crosta parcialmente fundida apaga-se a si própria. A fusão extensa permite que materiais densos, ricos em ferro e magnésio, afundem e se separem, enquanto fundidos mais leves e ricos em sílica sobem. Ao longo do tempo, isto empurra a composição média da crosta para materiais mais evoluídos e ricos em sílica — e produz o tipo de fundido félsico capaz de cristalizar zircão. Quase toda esta crosta fina teria depois sido reciclada para o manto convectivo, em consonância com o registo químico (isotópico). Neste modelo, a ausência quase total de rochas hadeanas não é uma lacuna do registo — é uma *previsão*. As rochas de 4,2 Ga e os zircões de 4,4 Ga são raros sobreviventes de uma crosta que, em grande parte, era destruída quase tão depressa quanto se formava.

O fim do bombardeamento coincide com os primeiros continentes duradouros. À medida que o bombardeamento diminuiu durante a transição entre 4,0 e 3,9 Ga, a crosta pôde finalmente engrossar e persistir. As rochas continentais sobreviventes mais antigas aparecem aproximadamente nessa mesma transição. Os autores formulam-no com cuidado: o facto de a crosta continental duradoura ter surgido por essa altura é «provavelmente mais do que uma coincidência».

A sua principal inferência: nestas condições — uma crosta fina, fundida a poucos quilómetros de

profundidade — **a tectónica de placas no Hadeano é implausível**.

Os autores mostram também por que razão trabalhos anteriores tinham chegado à conclusão oposta. Estudos prévios de impactos estocásticos encontraram apenas um efeito pequeno, com menos de 2,5% da crosta fundida em qualquer momento. Esses estudos deixavam de fora duas coisas que este inclui: o efeito global dos grandes impactos na fusão profunda do manto e o transporte ascendente desse calor por magma em subida. Reintroduzidos esses processos, o quadro térmico muda drasticamente.

Porque um modelo não é uma memória

Tudo o que foi descrito acima é resultado de simulações, não de medições feitas em rochas hadeanas — porque essas rochas quase já não existem. Isso não torna o resultado fraco, mas define que tipo de resultado ele é.

A cadeia é esta: um *modelo* do fluxo de impactos alimenta um *modelo* do fluxo de calor no manto e na crosta, confrontado depois com um *modelo* de como uma determinada rocha funde. Cada ligação é fisicamente motivada e, quando possível, validada por benchmarks — mas o conjunto é um argumento coerente sobre como o Hadeano *teria de* ser sob física plausível, e não uma medição de como ele *foi* de facto.

É por isso que as hipóteses conservadoras dos autores importam mais do que pode parecer. Como escolheram um aquecimento de limite inferior e, mesmo assim, obtiveram uma crosta superficial extensamente fundida, a conclusão qualitativa — a crosta hadeana era quente e fraca — é robusta face às escolhas do modelo. O que isto *não* fixa são os números exatos: os geotermas precisos, as frações de fusão precisas, a espessura exata da crosta. A direção do resultado é forte; as casas decimais são provisórias.

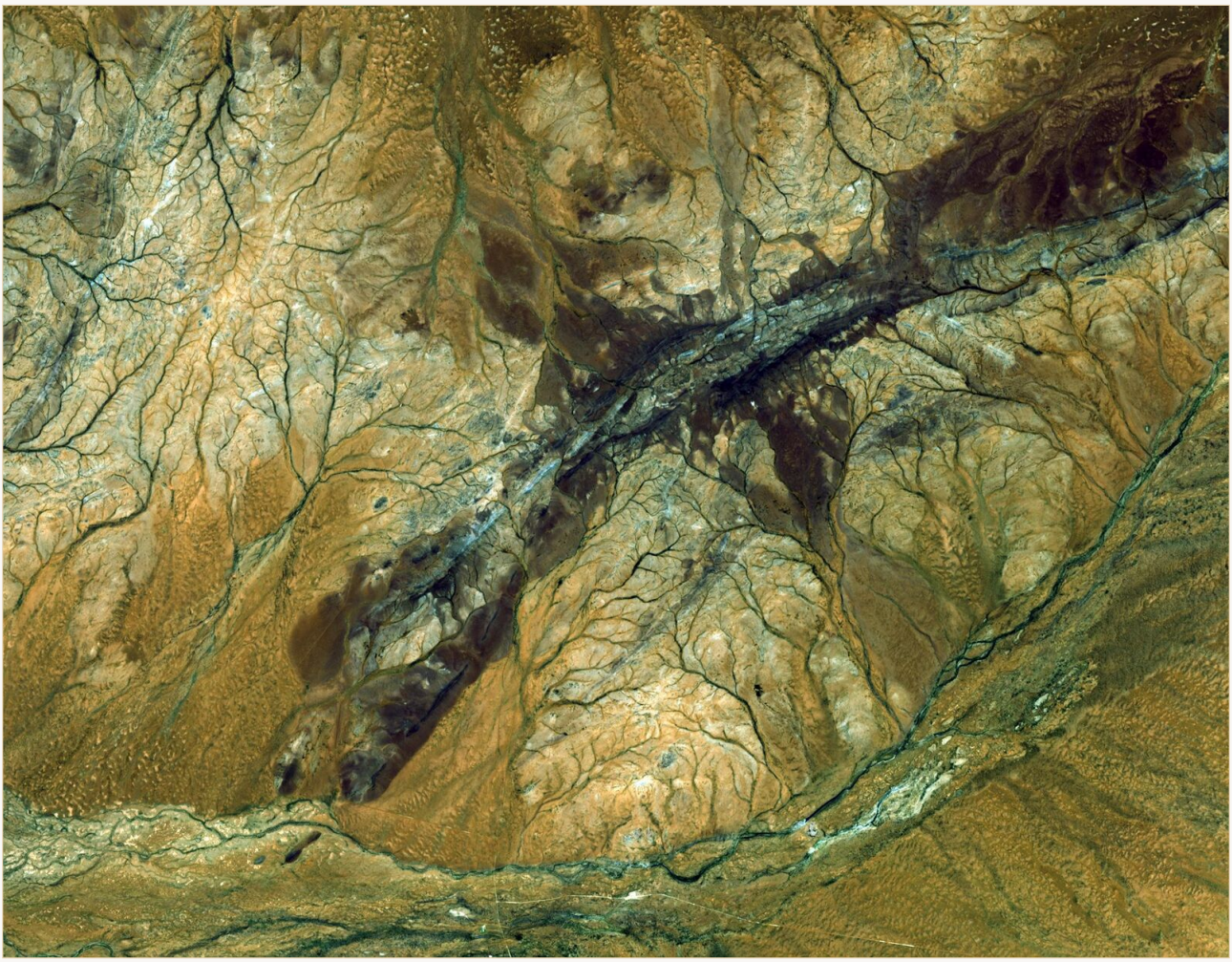
O que isto *não* demonstra

- **Não** observa diretamente a crosta hadeana. Quase não existem rochas desta época; este é um resultado de modelação sobre o que a física implica, não uma medição.
- **Não** depende de um «Bombardeamento Intenso Tardio». O fluxo de impactos utilizado é estocástico e decrescente — o modelo não precisa nem invoca um pico súbito de bombardeamento.
- **Não** resolve o debate sobre tectónica de placas. «Implausível» é aqui uma inferência forte e fisicamente fundamentada, que favorece uma Terra primitiva quente com uma tampa estagnada ou deformável (*stagnant/squishy lid*) — mas o regime tectónico do Hadeano continua genuinamente em debate.
- **Não** demonstra que os impactos *causaram* o aparecimento dos continentes por volta da transição 4,0–3,9 Ga. A coincidência temporal é uma associação forte que os próprios autores dizem ser «provavelmente mais do que uma coincidência» — linguagem cuidadosa para uma correlação convincente, não para uma causa demonstrada.

- Os zircões de Jack Hills **não** são continentes preservados. São raros grãos sobreviventes que mostram que material félsico e água existiam cedo; todo o argumento do modelo é precisamente que a crosta que os produziu foi, em grande parte, reciclada.
- **Não** reconstrói uma história completa da Terra primitiva. As simulações são idealizadas — perfis 1D e cortes equatoriais 2D com impactos confinados às proximidades do equador, captados como instantâneos — e não um modelo completo em quatro dimensões do planeta.

Quão forte é a evidência?

Para a afirmação central — de que o aquecimento por impactos foi um controlo de primeira ordem sobre a crosta hadeana, mantendo-a fina e fundida a pouca profundidade — o argumento é coerente e, num sentido importante, conservador. Utiliza um código geodinâmico validado por benchmarks, parâmetros fisicamente razoáveis e hipóteses de limite inferior, e integra uma fonte de calor que a maioria dos modelos anteriores simplesmente ignorava. Ganha também credibilidade por explicar simultaneamente dois factos persistentes: por que quase nenhuma rocha com mais de ~4 Ga sobrevive (reciclagem quase total) e por que a crosta duradoura aparece justamente quando o bombardeamento diminui.



Jack Hills, na Austrália Ocidental, vistos pelo instrumento ASTER da NASA. Os zircões desta região incluem alguns dos materiais sobreviventes mais antigos conhecidos da crosta primitiva da Terra — pequenas pistas de um éon cujas rochas foram quase todas apagadas.

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

Os limites são igualmente claros — e são os limites de qualquer modelo de tempo profundo: são modelos construídos sobre outros modelos, ancorados num registo rochoso muito escasso, e a sua conclusão mais citável — «a tectónica de placas é implausível» — é uma inferência, não uma observação. A postura correta é tratar este trabalho como uma hipótese forte e bem fundamentada que reformula o Hadeano e convida agora outros investigadores a testar as suas hipóteses — sobretudo a escolha do modelo de fluxo de impactos — e não como um caso encerrado.

O resumo mais útil não é «era assim o Hadeano» nem «é apenas uma simulação». É: dada uma física plausível e conservadora, uma Terra primitiva sob forte bombardeamento teria tido uma crosta fina, parcialmente fundida e em autorreciclagem — e esta única ideia explica uma quantidade surpreendente da pouca evidência que conseguimos realmente observar.

Porque importa

A imagem popular da Terra primitiva tende a oscilar entre dois extremos: um mundo aquático sereno, com tectónica de placas quase como a atual, ou um planeta infernal de lava. Este trabalho esboça uma posição intermédia específica e fisicamente motivada: uma crosta fina e repetidamente refundida a partir de poucos quilómetros de profundidade, continuamente destruída e refeita, com os impactos — e não o calor interno — a ditar as condições.

Esta reformulação faz trabalho real. Propõe um mecanismo para dois dos maiores factos sobre a infância da Terra — a ausência quase total de um registo rochoso e o momento em que aparecem os primeiros continentes duradouros — e coloca no centro da história um processo normalmente negligenciado, o aquecimento por impactos. Se resistir aos testes, muda a forma como pensamos sobre quando a Terra se tornou, sequer, um planeta de continentes estáveis, e pode aplicar-se também a outros mundos rochosos formados sob os seus próprios bombardeamentos.

Nada disto exige que o modelo seja a última palavra. Exige apenas que seja uma hipótese suficientemente boa para ser testada — e, ao ligar-se ao registo sobrevivente de zircões e isótopos, é isso que é. O «Hadeano oculto» do título é precisamente a questão: uma época a que, em grande medida, só podemos chegar através de modelos, porque a própria época apagou as suas evidências.

Resumo claro

O primeiro éon da Terra, o Hadeano (antes de ~4,03 Ga), quase não deixou registo rochoso. Este estudo de modelação pergunta como teria sido a crosta quando se inclui uma fonte de calor normalmente omitida: os impactos. Utilizando um modelo estocástico e decrescente do fluxo de impactos

em conjunto com simulações 1D e 2D, validadas por benchmarks, do fluxo de calor na crosta e no manto (incluindo o calor transportado por magma ascendente), os autores concluem que o calor integrado dos impactos teria ultrapassado todo o calor interno da Terra em pelo menos uma ordem de grandeza durante a maior parte do Hadeano. A consequência é uma crosta fina (menos de ~5 km), parcialmente fundida a apenas alguns quilómetros de profundidade e, a ~5 km, com mais de 30% de material fundido — demasiado fraca para sustentar tectónica de placas, que os autores consideram implausível no Hadeano. Uma crosta assim seria em grande parte reciclada para o manto, explicando por que sobrevive tão pouco material hadeano; à medida que os impactos diminuíram na transição entre 4,0 e 3,9 Ga, pôde formar-se crosta continental duradoura, aproximadamente quando aparecem as rochas félsicas sobreviventes mais antigas — «provavelmente mais do que uma coincidência». Como os autores usaram deliberadamente um aquecimento conservador de limite inferior, o resultado qualitativo é robusto, embora os números exatos não estejam fixados. É um modelo forte e coerente da infância da Terra — não uma observação direta dela.

Verificação sem exageros

O que o artigo mostra: Em simulações fisicamente fundamentadas que incluem aquecimento por impactos e transporte magmático de calor, a crosta hadeana surge fina e parcialmente fundida a poucos quilómetros de profundidade, dominada pelo calor dos impactos em vez do calor interno, em grande parte reciclada para o manto e — neste modelo — incapaz de sustentar tectónica de placas.

O que é plausível, mas não está demonstrado: Que os impactos expliquem por que os continentes duradouros aparecem por volta de 3,9 Ga; que o Hadeano tenha sido um mundo de tampa estagnada ou deformável em vez de um mundo com tectónica de placas precoce; que quase nenhuma rocha hadeana sobreviva especificamente porque uma crosta fundida se reciclava a si própria.

O que não mostra: Uma medição direta da crosta hadeana; uma resposta definitiva ao debate sobre tectónica de placas; uma relação causal demonstrada entre o declínio do bombardeamento e os primeiros continentes; que os zircões de Jack Hills representem continentes preservados; um modelo completo do planeta primitivo.

Principais limitações: O registo rochoso hadeano é quase inexistente, por isso o resultado é um modelo limitado por muito poucos dados; empilha modelos sobre modelos (fluxo de impactos → geodinâmica → equilíbrios de fases); o próprio fluxo de impactos é uma escolha representativa e incerta; as simulações são idealizadas (cortes equatoriais 1D e 2D, instantâneos no tempo). Hipóteses conservadoras de limite inferior reforçam a conclusão qualitativa, mas não tornam precisos os geotermas específicos.

Quanta confiança deve ter um leitor geral? Elevada de que, sob física plausível, uma Terra primitiva fortemente bombardeada teria uma crosta quente, fina e fundida a pouca profundidade. Moderada de que isso torne improvável a tectónica de placas no Hadeano e explique a ausência do registo rochoso. Baixa para qualquer afirmação de que isto *demonstre* como ou exatamente quando os continentes se formaram — é um modelo forte e conservador que reformula o Hadeano, não uma observação direta dele.

Fontes

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
https://doi.org/10.1126/science.aeb5402