



WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Uma primeira crosta fina e meio derretida: um modelo em que impactos, não calor interno, conduziram o Hadeano

O primeiro éon da Terra, o Hadeano, deixou quase nenhum registro rochoso. Este estudo de modelagem pergunta como a crosta teria sido quando se para de ignorar impactos. Usando um modelo estocástico e declinante de fluxo de impactos e simulações validadas por benchmark do fluxo de calor na crosta e no manto, os autores concluem que o calor de impactos teria excedido todo o calor interno da Terra por pelo menos uma ordem de magnitude durante a maior parte do Hadeano, deixando uma crosta fina (com menos de ~5 km), parcialmente fundida a apenas alguns quilômetros de profundidade — fraca demais, argumentam eles, para tectônica de placas, e propensa a se reciclar de volta ao manto, o que explicaria por que tão pouco material hadeano sobrevive. À medida que os impactos enfraqueceram depois de ~3,9 Ga (cerca de 3,9 bilhões de anos atrás), crosta continental duradoura pôde se formar, exatamente quando aparecem as rochas félsicas sobreviventes mais antigas — “provavelmente não é coincidência”, nas palavras cuidadosas dos autores. Como eles usaram deliberadamente 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.

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](https://doi.org/10.1126/science.aeb5402)

O capítulo da história da Terra com quase nenhuma página restante

A Terra é o único planeta que conhecemos com continentes — as terras emersas flutuantes, ricas em sílica, sobre as quais todos vivemos. Mas como os continentes se formaram pela primeira vez é um dos problemas não resolvidos mais antigos da geologia, e por um motivo brutal: a evidência quase desapareceu por completo.

O primeiro éon da Terra, o Hadeano, vai do nascimento do planeta até cerca de 4,03 bilhões de anos atrás (Ga). Desse primeiro meio bilhão 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 uma dispersão de cristais de zircão — os mais famosos vindos de Jack Hills, na Austrália Ocidental — datados de 4,4 Ga. Esse é todo o arquivo da infância da Terra: um punhado de localidades e alguns minerais do tamanho de grãos de areia.

Este estudo não acrescenta uma nova rocha a esse arquivo. Ele faz outra coisa: constrói um modelo físico de como a crosta hadeana teria sido sob essa física e faz uma pergunta que a maioria dos modelos da Terra primitiva deixa de fora. O que acontece quando você para de ignorar o fato de que a Terra primitiva estava sendo bombardeada?

A resposta a que os autores chegam é marcante. Durante a maior parte do Hadeano, o calor entregue por impactos teria sufocado todo o calor interno da Terra, deixando a crosta fina e meio derretida — fraca demais, argumentam eles, para algo parecido com a tectônica de placas moderna. É um modelo, não uma memória. Mas é um modelo que, desta vez, tenta levar em conta a violência da era que descreve.

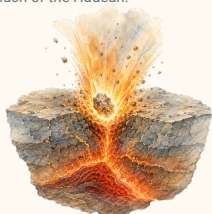
A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.

Energy

Impact heat dominates

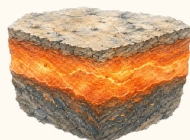
At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.



Consequence

Thin, shallowly molten crust

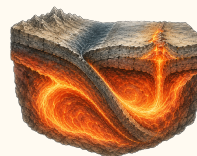
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



Around the 4.0-3.9 Ga transition, lasting crust appears.

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

The Clean Paper CC BY 4.0

O que os autores fizeram

A equipe combinou três ingredientes que normalmente ficam separados.

Primeiro, um **modelo estocástico do fluxo de impactos** — a chuva de asteroides e corpos maiores atingindo o Sistema Solar interno ao longo do Hadeano e do Arqueano inicial. Crucialmente, essa não é a velha ideia de um único pico de “Late Heavy Bombardment”. É um fluxo que é intenso no começo e **declina com o tempo**, com grandes impactos chegando ao acaso (estocasticamente), não em uma agenda. O modelo é reescalado a partir de estatísticas de impactos lunares e do Sistema Solar interno, e escolhido para ser consistente com espectros de idade de zircões e com a evidência paleomagnética disponível.

Segundo, **simulações geodinâmicas** de como o calor se move pela crosta e pelo manto superior. Eles usaram um código lattice-Boltzmann validado em benchmarks (Planet_LB), rodando tanto cálculos simples 1D de temperatura versus profundidade quanto instantâneos completos 2D de convecção do manto em 4,1 Ga. Eles incluem as fontes comuns de calor interno — decaimento radioativo e calor do núcleo — e, o que é importante, **advecção magmática**: calor levado para cima por material fundido ascendente, que a maioria dos modelos térmicos da crosta omite.

Terceiro, **modelagem de equilíbrio de fases** de uma crosta inicial realista — um metabasalto hadeano hidratado do cinturão de rochas verdes de Nuvvuagittuq — para calcular a que temperatura e profundidade essa rocha começaria a derreter.

Uma escolha metodológica importa para como ler o artigo inteiro: os autores empilharam deliberadamente as cartas *contra* a própria conclusão. Eles assumiram um manto “não condritico” (com menos material radioativo produtor de calor do que a referência condritica), com menos da metade do aquecimento interno do modelo padrão, usaram taxas conservadoras de aquecimento e ignoraram o aquecimento de maré da Lua jovem e próxima. Isso significa que as temperaturas crustais calculadas são **mínimos** — limites inferiores. Se algo, o Hadeano real foi mais quente do que o modelo deles.

O que encontraram

Impactos, não calor interno, dominaram o orçamento de energia hadeano. Quando o calor dos impactos é integrado ao longo do tempo, ele supera de longe a contribuição interna — por pelo menos uma ordem de magnitude durante a maior parte do Hadeano. Nesse quadro, o aquecimento por impactos, não o decaimento radioativo, é o principal motor do tectonismo inicial, e só passa a ter papel menor depois de cerca de **3,9 Ga**.

Esse calor manteve a crosta fina e rasa parcialmente fundida. Sem impactos e sem advecção de material fundido, o modelo deles dá uma crosta hadeana parcialmente fundida apenas abaixo de cerca de 10-15 km. Acrescente o calor dos impactos, e a zona de fusão sobe drasticamente: a crosta passa a ficar parcialmente fundida a apenas **alguns quilômetros de profundidade** (abaixo de cerca de 2-5 km). Por volta de 5 km de profundidade, os modelos preveem mais de 30% de fusão — um estado em que a rocha é fraca demais para se manter como uma placa rígida. A 5-10 km, temperaturas de ~1000-1100°C significam que a crosta está extensamente fundida quase independentemente de sua composição. A crosta sólida sobrevivente teria sido **fina, com menos de cerca de 5 km**.

Uma crosta meio derretida apaga a si mesma. A fusão extensa permite que material denso, rico em ferro e magnésio, afunde e se separe, enquanto fusões mais leves, ricas em sílica, sobem. Com o tempo, isso empurra a crosta média para composições mais evoluídas, ricas em sílica — e produz o tipo de fusão félsica que pode cristalizar zircão. Quase toda essa crosta fina teria então sido reciclada de volta para o manto convectivo, o que é consistente com o registro químico (isotópico). Neste modelo, a ausência quase total de rochas hadeanas não é uma lacuna no registro — é uma *previsão*. As rochas de 4,2 Ga e os zircões de 4,4 Ga são os raros sobreviventes de uma crosta que foi em grande parte destruída tão rápido quanto se formava.

O fim do bombardeio se alinha com os primeiros continentes duradouros. À medida que o bombardeio enfraqueceu na transição de 4,0-3,9 Ga, a crosta pôde finalmente engrossar e durar. As rochas continentais sobreviventes mais antigas aparecem por volta dessa mesma transição. Os autores formulam com cuidado: o fato de crosta continental duradoura ter aparecido por volta desse momento “provavelmente não é coincidência”.

A inferência principal deles: nessas condições — uma crosta fina, fundida a alguns quilômetros de profundidade — **a tectônica de placas hadeana é implausível**.

Eles também mostram por que trabalhos anteriores chegaram à conclusão oposta. Estudos anteriores de impactos estocásticos encontraram apenas um efeito menor, com menos de 2,5% da crosta fundida em qualquer momento. Esses estudos deixaram de fora duas coisas que este inclui: o efeito global de grandes impactos sobre a fusão profunda no manto, e o transporte para cima desse calor por magma ascendente. Coloque isso de volta, e o quadro térmico muda drasticamente.

Por que um modelo não é uma memória

Tudo acima é saída de simulações, não uma leitura tomada de rochas hadeanas — porque essas rochas quase não existem mais. Isso não torna o resultado fraco, mas fixa que tipo de resultado ele é.

A cadeia é: um *modelo* do fluxo de impactos alimenta um *modelo* do fluxo de calor no manto e na crosta, checado contra um *modelo* de como uma rocha específica derrete. Cada elo tem motivação física e, quando possível, foi validado por benchmark — mas o conjunto é um argumento coerente sobre como o Hadeano *deve* ter parecido dada uma física plausível, não uma medição de como ele *de fato* pareceu.

É por isso que as suposições conservadoras dos autores importam mais do que poderia parecer.

Como escolheram aquecimento de limite inferior e ainda assim obtiveram uma crosta rasa amplamente fundida, a conclusão qualitativa — a crosta hadeana era quente e fraca — é robusta às escolhas deles. O que *não* fica fixado por isso é o número preciso: os geotermas exatos, as frações exatas de fusão, a espessura exata da crosta. Leia a direção do resultado como forte e as casas decimais como provisórias.

O que isso *não* prova

- Ele **não** observa diretamente a crosta hadeana. Quase não há rocha dessa era; este é um resultado de modelagem sobre o que a física implica, não uma medição.
- Ele **não** depende de um “Late Heavy Bombardment”. O fluxo de impactos usado é declinante e estocástico — o modelo não precisa de, nem invoca, um pico súbito de bombardeio.
- Ele **não** encerra o debate sobre tectônica de placas. “Implausível” aqui é uma inferência forte, fisicamente fundamentada, a favor de uma Terra inicial quente, de tampa estagnada ou flexível — mas o modo tectônico do Hadeano continua genuinamente contestado.
- Ele **não** prova que impactos *causaram* o aparecimento dos continentes por volta da transição de 4,0-3,9 Ga. A coincidência temporal é uma associação forte que os próprios autores chamam de “provavelmente não é coincidência” — linguagem cuidadosa para uma correlação convincente, não uma causa demonstrada.
- Os zircões de Jack Hills **não** são continentes preservados. São grãos sobreviventes raros que mostram que material félsico e água existiam cedo; o ponto central do modelo é que a crosta que os produziu foi em grande parte reciclada.
- Ele **não** reconstrói uma história completa da Terra primitiva. As simulações são idealizadas — perfis 1D e cortes equatoriais 2D, com impactos confinados perto do equador, capturados como instantâneos — não um modelo quadridimensional completo do planeta.

Quão sólidas são as evidências?

Para sua alegação central — que o aquecimento por impactos foi um controle de primeira ordem sobre a crosta hadeana, mantendo-a fina e rasa parcialmente fundida — o argumento é coerente e, em um sentido importante, conservador. Ele usa um código geodinâmico validado por benchmark, entradas fisicamente razoáveis e suposições de limite inferior, e integra uma fonte de calor que a maioria dos modelos anteriores simplesmente ignorava. Também ganha credibilidade por explicar dois fatos teimosos de uma vez: por que quase nenhuma rocha mais antiga que ~4 Ga sobrevive (reciclagem quase total), e por que crosta duradoura aparece justamente quando o bombardeio enfraquece.



Jack Hills, na Austrália Ocidental, visto pelo instrumento ASTER da NASA. Zircões dessa região incluem alguns dos materiais sobreviventes mais antigos conhecidos da crosta inicial da Terra, pequenas pistas de um éon cujas rochas foram em grande parte 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 sobre modelos, ancorados em um registro rochoso muito escasso, e sua conclusão mais citável — “a tectônica de placas é implausível” — é uma inferência, não uma observação. A postura certa é tratar isto como uma hipótese forte e bem fundamentada que reenquadra o Hadeano, e que agora convida outros a testar suas suposições — especialmente a escolha do modelo de fluxo de impactos —, não como um caso encerrado.

O resumo mais útil não é “foi assim que o Hadeano era” nem “é só uma simulação”. É: dada uma física plausível e conservadora, uma Terra primitiva sob bombardeio pesado teria tido uma crosta fina, meio derretida e autorreciclante — e essa única ideia explica uma quantidade surpreendente do pouco que conseguimos de fato ver.

Por que isso importa

A imagem popular da Terra primitiva tende a oscilar entre dois extremos: um mundo aquático sereno, com tectônica de placas quase como a de hoje, ou um planeta infernal de lava. Este trabalho esboça um meio termo específico, fisicamente motivado: uma crosta fina e repetidamente refundida a partir de alguns quilômetros de profundidade, continuamente destruída e refeita, com impactos — não calor interno — definindo as regras.

Esse reenquadramento faz trabalho real. Ele oferece um mecanismo para dois dos maiores fatos sobre a infância da Terra — a ausência quase total de um registro rochoso e o momento dos primeiros continentes duradouros — e coloca um processo geralmente negligenciado, o aquecimento por impactos, no centro da história. Se se sustentar, muda como raciocinamos sobre quando a Terra se tornou, afinal, um planeta de continentes estáveis, e se transfere para outros mundos rochosos que se formaram sob seus próprios bombardeios.

Nada disso exige que o modelo seja a palavra final. Exige que ele seja uma hipótese boa o suficiente para ser testada — e, ao se amarrar ao registro sobrevivente de zircões e isótopos, ele é. O “Hadeano oculto” do título é exatamente o ponto: uma era que só podemos alcançar em grande parte por modelagem, porque a era apagou sua própria evidência.

Em resumo

O primeiro éon da Terra, o Hadeano (antes de ~4,03 Ga), deixou quase nenhum registro rochoso. Este estudo de modelagem pergunta como a crosta teria sido quando se inclui uma fonte de calor geralmente deixada de fora: impactos. Usando um modelo estocástico e declinante de fluxo de impactos junto com simulações 1D e 2D, validadas por benchmark, do fluxo de calor na crosta e no manto (incluindo calor levado por material fundido ascendente), os autores concluem que o calor integrado dos impactos teria excedido todo o calor interno da Terra por pelo menos uma ordem de magnitude durante a maior parte do Hadeano. A consequência é uma crosta fina (com menos de ~5 km), parcialmente fundida a apenas alguns quilômetros de profundidade e, a ~5 km, mais de 30% derretida — fraca demais para sustentar tectônica de placas, que os autores chamam de implausível para o Hadeano. Essa crosta teria em grande parte se reciclado de volta ao manto, o que explicaria por que tão pouco material hadeano sobrevive; à medida que os impactos enfraqueceram na transição de 4,0-3,9 Ga, crosta continental duradoura pôde se formar, por volta de quando aparecem as rochas félsicas sobreviventes mais antigas — “provavelmente não é coincidência”. Como os autores usaram deliberadamente 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.

Leitura crítica

O que o artigo mostra: Em simulações fisicamente fundamentadas que incluem aquecimento por impactos e transporte de calor magmático, a crosta hadeana sai fina e parcialmente fundida a apenas alguns quilômetros de profundidade, dominada por calor de impactos e não por calor interno, reciclada em grande parte de volta ao manto e — neste modelo — incapaz de sustentar tectônica de placas.

O que é plausível, mas não provado: Que impactos sejam a razão pela qual continentes duradouros aparecem por volta de 3,9 Ga; que o Hadeano tenha sido um mundo de tampa estagnada ou flexível, em vez de um mundo com tectônica de placas inicial; que quase nenhuma rocha hadeana sobreviva especificamente porque uma crosta fundida se reciclou.

O que ele não mostra: Uma medição direta da crosta hadeana; uma resposta encerrada ao debate sobre tectônica de placas; um elo causal demonstrado entre o enfraquecimento do bombardeio e os primeiros continentes; que os zircões de Jack Hills representem continentes preservados; um modelo completo do planeta primitivo.

Principais limitações: O registro rochoso hadeano é quase inexistente, então o resultado é um modelo restringido por pouquíssimos dados; ele empilha modelos sobre modelos (fluxo de impactos → geodinâmica → equilíbrio de fases); o próprio fluxo de impactos é uma escolha representativa e incerta; as simulações são idealizadas (fatias equatoriais 1D e 2D, instantâneos no tempo). Suposições conservadoras de limite inferior fortalecem a conclusão qualitativa, mas não tornam precisos os geotermas específicos.

Quanta confiança um leitor geral deve ter? Alta de que, sob uma física plausível, uma Terra primitiva fortemente bombardeada teria tido uma crosta quente, fina e rasa parcialmente fundida. Moderada de que isso torne improvável a tectônica de placas hadeana e explique o registro rochoso ausente. Baixa para qualquer alegação de que isto *prova* como os continentes se formaram ou exatamente quando — este é um modelo forte e conservador que reenquadra o Hadeano, não um olhar direto para ele.

Fontes

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