The Clean Paper

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

Por quanto tempo a Terra pode continuar verde? Um modelo climático oferece intervalos, não uma data para o fim do mundo

Vinte e nove simulações climáticas tridimensionais colocam diferentes limites para a biosfera fotossintética da Terra entre aproximadamente 1,35 e 1,87 bilhão de anos no futuro. Os valores dependem de trajetórias deliberadamente simplificadas para o intemperismo das rochas, o calor e os menores níveis de dióxido de carbono que as plantas talvez consigam usar. Eles não preveem quando todas as plantas, toda a vida, a civilização ou o planeta chegarão ao fim.

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

Por quanto tempo a Terra pode continuar verde? Um modelo climático oferece intervalos, não uma data para o fim do mundo

Uma folha existe dentro de um acordo estreito. Precisa de luz, água, dióxido de carbono e uma temperatura que sua química consiga tolerar. Ao longo de uma vida humana, o Sol parece ser a parte fixa desse acordo. Ao longo de um bilhão de anos, não é.

À medida que envelhece na sequência principal, o Sol se torna lentamente mais brilhante. Mais luz solar aquece a Terra, mas o planeta possui uma resposta de longo prazo: reações entre água da chuva, dióxido de carbono e rochas silicáticas podem remover dióxido de carbono da atmosfera. Isso enfraquece o efeito estufa e compensa parte do aquecimento. A mesma resposta que resfria o planeta pode, no fim, privar organismos fotossintéticos do carbono usado para construir tecido vivo.

Um novo artigo no Journal of Geophysical Research: Atmospheres pergunta qual limite pode chegar primeiro: calor demais ou dióxido de carbono de menos. A resposta não é uma data em que a Terra morrerá. Em duas trajetórias futuras deliberadamente simplificadas, os limites adotados para a vida fotossintética ficam entre aproximadamente **1,35 e 1,87 bilhão de anos a partir de agora**.

Esse intervalo se refere à **biosfera vegetal**: a parte do sistema vivo da Terra sustentada por organismos fotossintéticos, especialmente plantas e outros seres que transformam luz e dióxido de carbono em material biológico. Não é uma previsão para todos os microrganismos. Não é o tempo de vida da civilização humana. Não é o tempo de vida do planeta.

O termostato planetário tem dois ajustes incertos

A incerteza central é o **intemperismo de silicatos**. O dióxido de carbono se dissolve na água da chuva, reage com rochas silicáticas e acaba sendo transportado em direção aos oceanos e sedimentos. Vulcões devolvem dióxido de carbono ao longo do tempo geológico. Juntos, esses processos formam parte do ciclo carbonato-silicato, muitas vezes descrito como um termostato planetário.

Em um mundo mais quente e úmido, o intemperismo pode acelerar e remover dióxido de carbono mais rapidamente. Mas os cientistas não sabem com que intensidade essa resposta governará a Terra sob um Sol futuro mais brilhante. Por isso, Jacob Haqq-Misra e Eric Wolf não escolheram uma única trajetória supostamente correta. Modelaram dois **casos extremos**: situações intencionalmente extremas usadas para delimitar a incerteza.

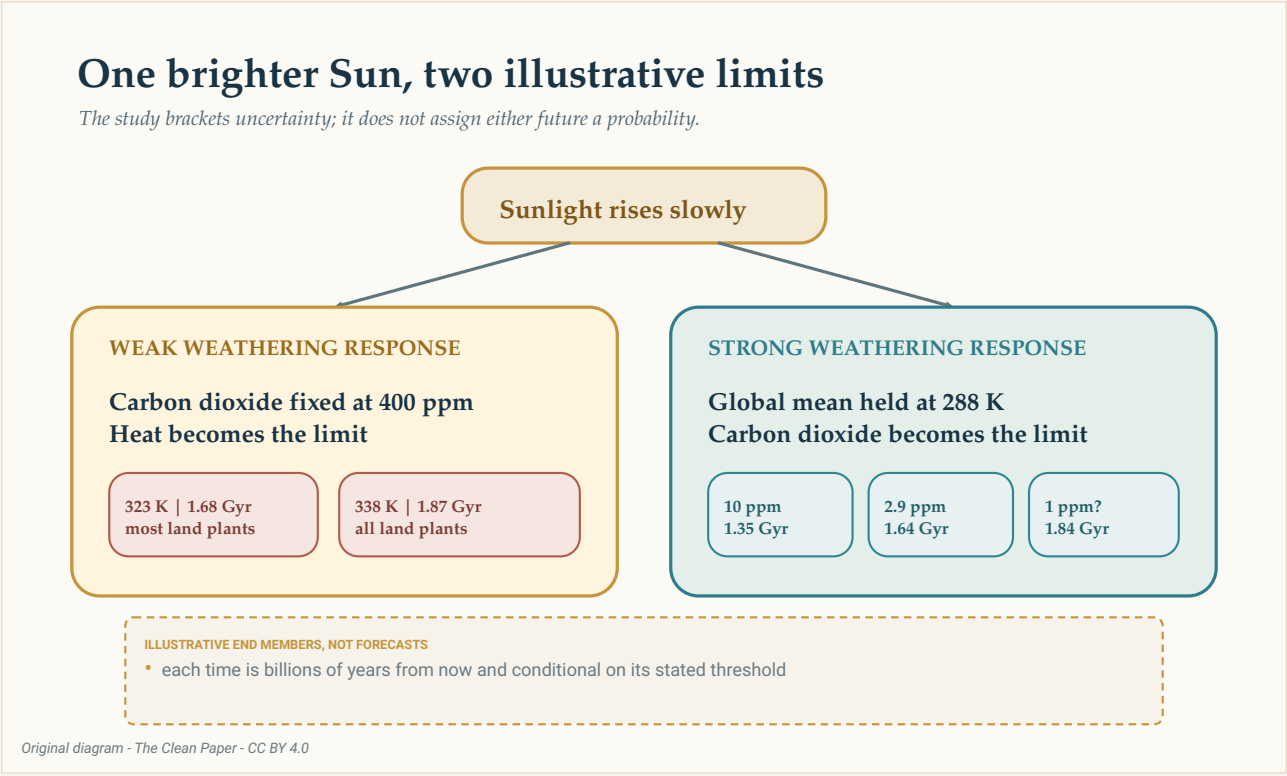
- No **caso extremo de intemperismo fraco**, o dióxido de carbono atmosférico permanece em 400 partes por milhão enquanto o aumento do brilho solar eleva a temperatura.
- No **caso extremo de intemperismo forte**, a temperatura média global da superfície permanece em 288 kelvins, aproximadamente 15 graus Celsius, enquanto o dióxido de carbono é retirado à medida que a luz solar aumenta.

Nenhum dos ramos é apresentado como o futuro real da Terra. O primeiro pergunta o que o calor faria se o dióxido de carbono permanecesse alto. O segundo pergunta o que a falta de carbono faria se o intemperismo mantivesse a temperatura média global próxima da atual.

Como o intemperismo pode agir como um termostato?

A analogia se refere a uma retroalimentação, não a um botão de controle literal. Quando um clima mais quente acelera o intemperismo químico, mais dióxido de carbono atmosférico pode acabar em material dissolvido, minerais e sedimentos. Remover esse gás de efeito estufa se opõe a parte do aquecimento original. Em escalas de tempo muito longas, a liberação vulcânica devolve dióxido de carbono.

A força de cada elo depende da chuva, da quantidade de rocha exposta, da erosão, da biologia, da tectônica e da química dos oceanos. É por isso que o artigo testa respostas-limite em vez de tratar o termostato como uma máquina conhecida.



O artigo delimita um futuro incerto com dois casos extremos ilustrativos. Se o intemperismo responder pouco, o aumento do calor alcança os limiares adotados para plantas terrestres. Se responder fortemente, a queda do dióxido de carbono alcança os limiares adotados para a fotossíntese. Esses são ramos condicionais do modelo, não probabilidades nem contagens regressivas.

The Clean Paper CC BY 4.0

Vinte e nove mundos-modelo estabilizados, não um filme de dois bilhões de anos

Os pesquisadores usaram o ExoCAM, um modelo climático global tridimensional, para calcular **29 climas em estado estacionário** em combinações de maior luz solar e menor dióxido de carbono. Cada caso foi executado por 70 anos de modelo. Aqui, um ano de modelo é um ciclo anual simulado sob condições fixas: é tempo de execução usado para permitir que o clima artificial se estabilize, não uma etapa de uma previsão ano a ano do futuro da Terra. A média dos 20 anos finais foi calculada depois que o clima simulado teve tempo para se acomodar.

Esses 29 casos são mundos-modelo separados. Cada execução é um ponto em uma grade, respondendo à pergunta "qual clima estabilizado corresponde a este par escolhido de luz solar e dióxido de carbono?". O computador não começou com a Terra atual e evoluiu continuamente sua atmosfera, rochas, oceanos e seres vivos pelos próximos dois bilhões de anos. Em vez disso, os autores traçaram as duas trajetórias esquemáticas de intemperismo através desses pontos pré-calculados; a trajetória entre os pontos não foi simulada.

A tabela reproduz as combinações de luz solar e dióxido de carbono do arquivo oficial de dados do modelo. Os identificadores dos casos são recursos de leitura acrescentados aqui na ordem do arquivo. **S/S0** é a constante solar relativa: a energia solar incidente usada no modelo dividida por seu valor atual, S0. Um valor de 1,2 significa, portanto, 20% mais energia solar incidente do que hoje. **CO2 (ppm)** é a razão de mistura do dióxido de carbono atmosférico em moléculas por milhão de moléculas da atmosfera.

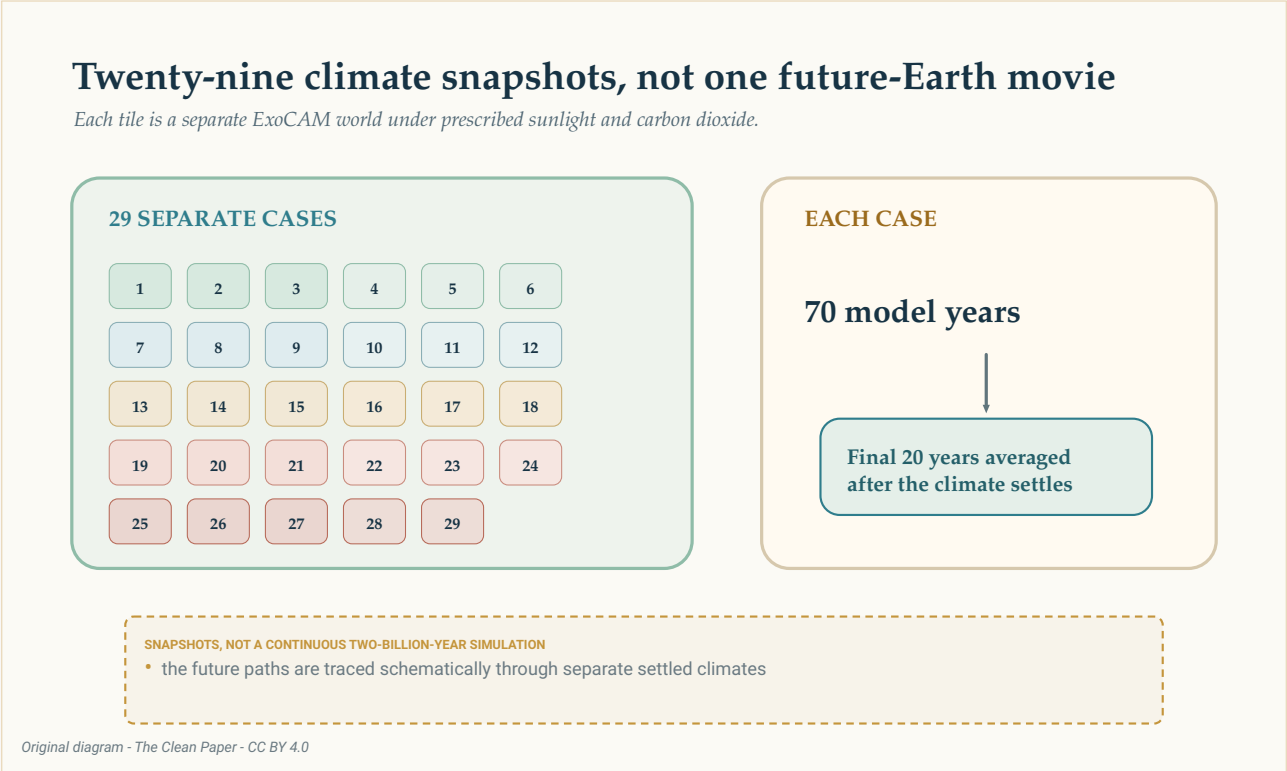
ID do caso	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

ID do caso	S/S0	CO2 (ppm)
21	1.143	11.25
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

A Terra do modelo é reconhecível, mas intencionalmente limitada. Tem o tamanho da Terra e usa a geografia atual. Possui um oceano simplificado de camada mista, em vez de um oceano com circulação completa, pressão atmosférica ajustada aproximadamente ao valor atual da Terra — um bar — e metano fixo. Sua órbita é perfeitamente circular, com excentricidade zero, e seu eixo de rotação não tem inclinação, com obliquidade zero. Não contém solos nem vegetação explícitos, tampouco retroalimentação de uma biosfera em mudança. Mais importante: o modelo climático não está acoplado dinamicamente a um modelo de intemperismo das rochas. Em outras palavras, o ExoCAM não calcula o intemperismo, usa o resultado para atualizar o dióxido de carbono e então executa o clima seguinte em um ciclo de retroalimentação. Os pesquisadores prescreveram as duas trajetórias-limite e as traçaram através da grade climática de 29 casos.

O que significa "estado estacionário" em um modelo climático?

Um caso em estado estacionário é um clima de modelo que teve tempo para se estabilizar sob um Sol e uma atmosfera escolhidos. O tempo meteorológico ainda muda de um dia para outro e de um ano para outro dentro da simulação, mas suas médias de longo prazo deixam de apresentar uma deriva intensa.
Isso é útil para perguntar "qual clima corresponde a estas condições?". É diferente de prever a rota exata pela qual a Terra real passará de um conjunto de condições para o seguinte.



Cada bloco é uma execução climática separada do ExoCAM por 70 anos de modelo, com a média dos 20 anos finais. O estudo amostrou 29 climas estabilizados sob condições prescritas de luz solar e dióxido de carbono; não simulou uma única Terra evoluindo continuamente por dois bilhões de anos.

The Clean Paper CC BY 4.0

Primeiro caso extremo: dióxido de carbono suficiente, calor demais

No ramo de intemperismo fraco, o dióxido de carbono permanece fixo em 400 partes por milhão. À medida que a energia solar incidente aumenta, o calor se torna o fator limitante.

O artigo usa dois limiares de temperatura média global obtidos de trabalhos anteriores:

- A **323 kelvins**, aproximadamente **50 graus Celsius** como média global anual, o mundo é tratado como quente demais para a maioria das plantas terrestres. O modelo alcança esse limiar em cerca de **1,68 bilhão de anos**.
- A **338 kelvins**, aproximadamente **65 graus Celsius** como média global anual, o mundo é tratado como quente demais para todas as plantas terrestres. O modelo alcança esse limiar em cerca de **1,87 bilhão de anos**.

Esses são limites biológicos adotados, não temperaturas universais nas quais todo organismo fotossintético necessariamente falha. Uma média global também esconde grandes diferenças regionais. O estudo examina separadamente onde combinações de temperatura e água poderiam permanecer

adequadas, mas um rótulo em um mapa climático não consegue catalogar todos os futuros refúgios ou adaptações.

Segundo caso extremo: temperatura tolerável, dióxido de carbono de menos

No ramo de intemperismo forte, a temperatura média global é mantida em 288 kelvins, aproximadamente 15 graus Celsius, enquanto o dióxido de carbono atmosférico diminui. Aqui, a resposta depende de quanto carbono diferentes vias fotossintéticas poderiam usar.

- No limiar tradicional de **10 partes por milhão** — dez moléculas de dióxido de carbono para cada milhão de moléculas atmosféricas —, o limite da fotossíntese C4 chega em aproximadamente **1,35 bilhão de anos**. A fotossíntese C4 é usada por plantas como milho e cana-de-açúcar e concentra dióxido de carbono ao redor da enzima que o fixa.
- O uso de um limiar C4 alternativo de **2,9 partes por milhão**, discutido em trabalhos anteriores, desloca o limite para aproximadamente **1,64 bilhão de anos**.
- Um limiar provisório de **1 parte por milhão**, associado à possível persistência de algumas plantas CAM — plantas que usam o metabolismo ácido das crassuláceas, separando a absorção de dióxido de carbono à noite de seu uso durante o dia — ou de plantas aquáticas capazes de utilizar bicarbonato dissolvido, desloca o limite para aproximadamente **1,84 bilhão de anos**.

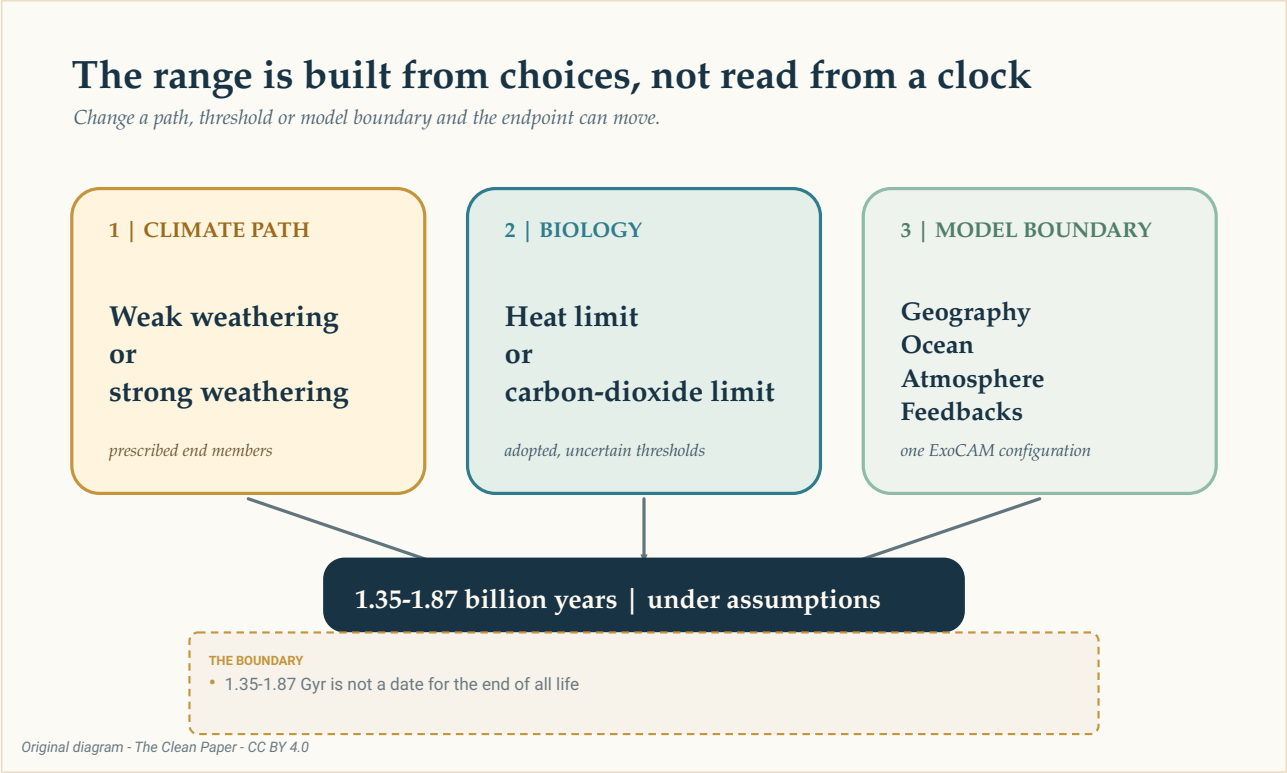
O último número carrega a maior ressalva biológica. Os autores chamam explicitamente o limite de uma parte por milhão de provisório. Não se trata de um limiar de sobrevivência estabelecido experimentalmente para todas as plantas CAM ou para a vegetação aquática sob condições da Terra futura.

> **C3, C4 e CAM são estratégias, não uma escada**
>
> As plantas usam diferentes rotas bioquímicas para capturar carbono. A **fotossíntese C3** é a mais comum. A **fotossíntese C4**, usada por plantas como milho e cana-de-açúcar, concentra dióxido de carbono ao redor da enzima que fixa carbono e pode funcionar melhor quando esse gás é escasso. O **metabolismo ácido das crassuláceas (CAM)** separa a absorção e o uso do carbono entre a noite e o dia, ajudando muitas plantas a conservar água.
> São famílias de estratégias com muitas diferenças entre espécies, não níveis sucessivos de plantas “melhores”. Os limiares extremamente baixos de dióxido de carbono usados no artigo são hipóteses para explorar possíveis limites, não garantias de que um ecossistema futuro evoluirá para utilizá-los.

Por que 1,86 bilhão de anos não é uma data de validade

A estimativa de destaque do artigo, aproximadamente **1,86 bilhão de anos**, é a média dos dois limites superiores otimistas: 1,84 bilhão de anos no ramo limitado por dióxido de carbono e 1,87 bilhão no ramo limitado pelo calor. É um resumo compacto de dois cenários diferentes. Não é um terceiro resultado do modelo com maior precisão e não é uma data de melhor estimativa.

Nem mesmo o intervalo mais amplo, de 1,35 a 1,87 bilhão de anos, carrega uma única probabilidade. Seus valores inferior e superior dependem de hipóteses diferentes sobre intemperismo, de limiares biológicos diferentes e de uma configuração específica do modelo climático. O intervalo mede as escolhas do experimento tanto quanto mede o tempo.



O intervalo de 1,35 a 1,87 bilhão de anos só surge depois de se escolher uma trajetória de intemperismo, um limiar biológico e os limites de um modelo. É um mapa de hipóteses, não um relógio que termina na extinção de toda a vida.

The Clean Paper CC BY 4.0

Outros limites podem chegar primeiro

As estimativas mais longas para a biosfera vegetal se aproximam de outro limite incerto: um efeito estufa úmido ou descontrolado, capaz de provocar grande perda dos oceanos. Modelos climáticos discordam consideravelmente sobre quando esses estados começariam sob luz solar crescente, sobretudo longe das condições atuais. Algumas estimativas os colocam antes do limite fotossintético

mais otimista.

Isso significa que o ramo superior não pode ser lido como uma promessa de que a Terra manterá seus oceanos, continentes familiares ou condições habitáveis na superfície até daqui a 1,87 bilhão de anos. O modelo também não inclui as futuras placas tectônicas, mudanças na área continental, ecossistemas em evolução ou um oceano plenamente dinâmico. Seus cálculos de como a atmosfera absorve e emite energia também são levados a regimes de luz solar intensa e dióxido de carbono extremamente baixo nos quais modelos diferentes divergem.

A adaptação evolutiva e a intervenção tecnológica aparecem na discussão do artigo como possibilidades. Não são resultados das 29 simulações climáticas. O modelo não mostra organismos futuros evoluindo uma via fotossintética capaz de funcionar com uma parte por milhão, nem mostra uma civilização administrando a atmosfera durante um bilhão de anos.

Este não é um resultado sobre a crise climática atual

O aumento do brilho solar atua ao longo de centenas de milhões a bilhões de anos. O aquecimento moderno causado pelos seres humanos vem do rápido aumento dos gases de efeito estufa ao longo de décadas e séculos. São forçantes diferentes, em escalas de tempo radicalmente distintas, respondendo a perguntas diferentes.

Nada neste estudo enfraquece as evidências sobre a mudança climática atual nem defende o adiamento de ações. Uma biosfera que talvez preserve alguma vida fotossintética em um cenário distante de modelo não é o mesmo que um clima no qual as sociedades e os ecossistemas atuais permaneçam seguros.

O artigo é valioso porque torna uma pergunta remota mais disciplinada. Mostra que modelos anteriores e mais simples podem ter produzido aquecimento excessivo quando a luz solar aumentava e o dióxido de carbono permanecia fixo, e que a vida fotossintética talvez tenha mais rotas de persistência do que sugere um único limiar canônico de carbono. Também mostra por que cada fração adicional de um bilhão de anos vem acompanhada de uma cadeia de hipóteses.

O Sol que alimenta uma folha está mudando lentamente. A Terra permanecer verde por mais 1,35, 1,87 ou outro número de bilhões de anos dependerá da resposta conjunta das rochas, da água, da atmosfera e da vida. O resultado honesto não é uma data. É uma visão mais ampla desse acordo.

Em resumo

Um estudo climático tridimensional pergunta por quanto tempo a biosfera vegetal — fotossintética — da Terra poderia persistir enquanto o Sol se torna lentamente mais brilhante. Os pesquisadores calcularam 29 climas separados em estado estacionário e traçaram por eles dois casos extremos ilustrativos. Com intemperismo fraco e dióxido de carbono fixo em 400 partes por milhão, os limites de calor adotados para plantas terrestres chegam em aproximadamente 1,68 e 1,87 bilhão de

anos. Com intemperismo forte e temperatura média global fixa em 288 kelvins, cerca de 15 graus Celsius, os limites adotados de dióxido de carbono para a fotossíntese chegam em aproximadamente 1,35, 1,64 e, usando um limiar provisório, 1,84 bilhão de anos. O valor frequentemente citado de 1,86 bilhão de anos é apenas a média arredondada dos dois limites superiores otimistas. Esses são intervalos de modelo dependentes do cenário, não uma data em que a Terra, a humanidade ou toda a vida acabarão. O modelo usa trajetórias prescritas, geografia atual, um oceano de camada mista e nenhum acoplamento explícito solo–vegetação ou clima–intemperismo, e as estimativas mais longas se aproximam de limites incertos de efeito estufa e perda dos oceanos.

Leitura crítica

O que o artigo mostra: Nesta configuração do ExoCAM, climas tridimensionais geralmente aquecem menos sob maior luz solar e dióxido de carbono fixo que os modelos simplificados usados para comparação. Em dois casos extremos prescritos de intemperismo e vários limiares biológicos adotados, os limites da biosfera vegetal ficam entre aproximadamente 1,35 e 1,87 bilhão de anos a partir de agora.

O que é plausível, mas não foi estabelecido: Que algumas plantas CAM ou plantas aquáticas capazes de usar bicarbonato dissolvido possam sustentar fotossíntese perto de uma parte por milhão de dióxido de carbono atmosférico; que adaptação ou tecnologia possam prolongar ainda mais a vida fotossintética; e que a trajetória real entre clima e intemperismo permaneça entre os dois casos extremos do modelo.

O que ele não mostra: Uma data fixa para o fim de todas as plantas, toda a vida, a civilização humana, os oceanos da Terra ou o planeta; uma única simulação contínua dos próximos dois bilhões de anos; ou qualquer motivo para desconsiderar a mudança climática atual causada pelos seres humanos.

Principais limitações: Vinte e nove casos em estado estacionário de uma única família de modelos climáticos; trajetórias de intemperismo prescritas, e não acopladas dinamicamente; geografia atual; oceano de camada mista; metano fixo; obliquidade e excentricidade zero; ausência de solos, vegetação ou retroalimentação explícita da biosfera; limiares incertos de calor e dióxido de carbono; e grande divergência entre modelos perto das condições de efeito estufa úmido e descontrolado.

Quanta confiança um leitor geral deve ter? Alta confiança de que o estudo amplia o intervalo plausível do modelo e identifica as hipóteses que o controlam. Confiança moderada no intervalo numérico como delimitação útil dentro deste modelo. Baixa confiança em qualquer data exata, porque os pontos mais distantes dependem de trajetórias climáticas deliberadamente extremas e de biologia incerta.

Fontes

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870