The Clean Paper

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

Per quanto tempo la Terra potrà restare verde? Un modello climatico offre intervalli, non una data dell'apocalisse

Ventinove simulazioni climatiche tridimensionali collocano diversi limiti alla biosfera fotosintetica terrestre tra circa 1,35 e 1,87 miliardi di anni da oggi. I valori dipendono da percorsi deliberatamente semplificati per l'alterazione delle rocce, il calore e le concentrazioni minime di anidride carbonica che le piante potrebbero utilizzare. Non prevedono quando finiranno tutte le piante, tutta la vita, la civiltà o il pianeta.

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

Per quanto tempo la Terra potrà restare verde? Un modello climatico offre intervalli, non una data dell'apocalisse

Una foglia vive all'interno di un equilibrio ristretto. Ha bisogno di luce, acqua, anidride carbonica e di una temperatura che la sua chimica possa tollerare. Nell'arco di una vita umana, il Sole sembra la parte immutabile di questo equilibrio. Nell'arco di un miliardo di anni, non lo è.

Invecchiando sulla sequenza principale, il Sole diventa lentamente più luminoso. Una maggiore quantità di luce solare riscalda la Terra, ma il pianeta possiede una risposta a lungo termine: le reazioni tra acqua piovana, anidride carbonica e rocce silicatiche possono sottrarre anidride carbonica all'atmosfera. Ciò indebolisce l'effetto serra e compensa parte del riscaldamento. La stessa risposta che raffredda il pianeta può però finire per privare gli organismi fotosintetici del carbonio con cui costruiscono i tessuti viventi.

Un nuovo articolo sul Journal of Geophysical Research: Atmospheres si domanda quale limite potrebbe arrivare prima: troppo calore o troppo poca anidride carbonica. La risposta non è una data in cui la Terra morirà. In due percorsi futuri deliberatamente semplificati, i limiti adottati per la vita fotosintetica si collocano tra circa **1,35 e 1,87 miliardi di anni da oggi**.

L'intervallo riguarda la **biosfera vegetativa**, cioè la parte del sistema vivente terrestre sostenuta dagli organismi fotosintetici, in particolare piante e altre forme di vita che trasformano luce e anidride carbonica in materiale biologico. Non è una previsione per ogni microrganismo. Non è la durata della civiltà umana. Non è la durata del pianeta.

Il termostato planetario ha due regolazioni incerte

L'incertezza centrale riguarda l'**alterazione dei silicati**. L'anidride carbonica si scioglie nell'acqua piovana, reagisce con le rocce silicatiche e viene infine trasportata verso oceani e sedimenti. Su scale geologiche, i vulcani restituiscono anidride carbonica. Nel loro insieme, questi processi formano parte del ciclo carbonati-silicati, spesso descritto come un termostato planetario.

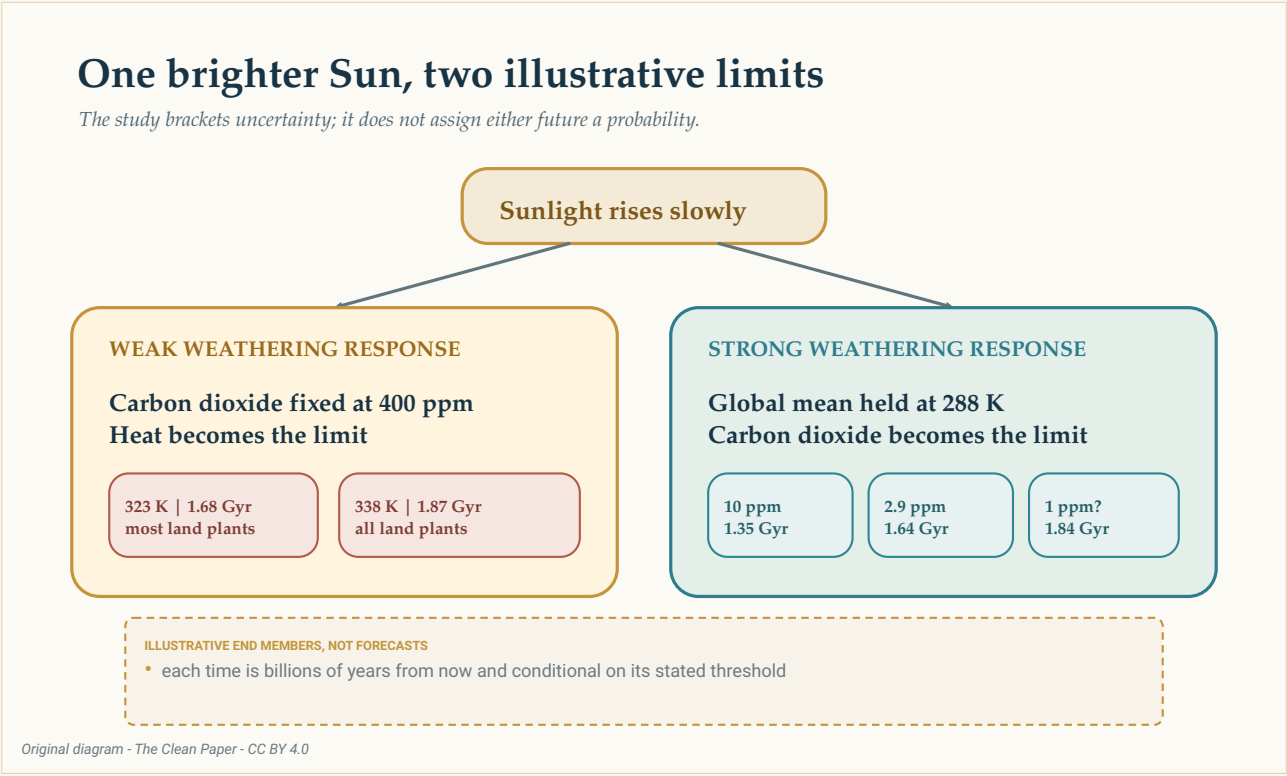
In un mondo più caldo e umido, l'alterazione potrebbe accelerare e rimuovere più rapidamente l'anidride carbonica. Gli scienziati non sanno però quanto fortemente questa risposta governerà la Terra sotto un Sole futuro più luminoso. Jacob Haqq-Misra ed Eric Wolf non hanno quindi scelto un unico percorso ritenuto corretto. Hanno modellato due **casi limite**: situazioni intenzionalmente estreme usate per circoscrivere l'incertezza.

- Nel **caso limite di alterazione debole**, l'anidride carbonica atmosferica rimane a 400 parti per milione mentre il Sole più luminoso aumenta la temperatura.
- Nel **caso limite di alterazione forte**, la temperatura superficiale media globale rimane a 288 kelvin, circa 15 gradi Celsius, mentre l'anidride carbonica diminuisce con l'aumento della luce solare.

Nessuno dei due rami viene presentato come il vero futuro della Terra. Il primo chiede che cosa farebbe il calore se l'anidride carbonica restasse elevata. Il secondo chiede che cosa farebbe la carenza di carbonio se l'alterazione mantenesse la temperatura globale vicina alla media odierna.

In che modo l'alterazione può funzionare come un termostato?

L'analogia riguarda una retroazione, non una manopola di controllo letterale. Quando un clima più caldo accelera l'alterazione chimica, una maggiore quantità di anidride carbonica atmosferica può finire in materiale disciolto, minerali e sedimenti. La rimozione di questo gas serra contrasta parte del riscaldamento iniziale. Su scale temporali molto lunghe, il degassamento vulcanico restituisce anidride carbonica.
La forza di ciascun passaggio dipende da precipitazioni, rocce esposte, erosione, biologia, tettonica e chimica oceanica. Per questo l'articolo esamina risposte limite invece di trattare il termostato come una macchina di cui conosciamo il funzionamento.



L'articolo circoscrive un futuro incerto con due casi limite illustrativi. Se l'alterazione reagisce debolmente, l'aumento del calore raggiunge le soglie adottate per le piante terrestri. Se reagisce fortemente, la diminuzione dell'anidride carbonica raggiunge le soglie adottate per la fotosintesi. Sono rami condizionati del modello, non probabilità né date di un conto alla rovescia.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ventinove mondi modellistici stabilizzati, non un film lungo due miliardi di anni

I ricercatori hanno usato ExoCAM, un modello climatico globale tridimensionale, per calcolare **29 climi in stato stazionario** con diverse combinazioni di luce solare più intensa e anidride carbonica più bassa. Ogni caso è stato eseguito per 70 anni di modello. Qui, un anno di modello è un ciclo annuale simulato sotto condizioni fisse: è tempo di calcolo usato per consentire al clima artificiale di stabilizzarsi, non un passaggio di una previsione anno per anno del futuro terrestre. Una volta concesso al clima simulato il tempo di assestarsi, è stata calcolata la media degli ultimi 20 anni.

I 29 casi sono mondi modellistici separati. Ogni esecuzione rappresenta un punto di una griglia e risponde alla domanda: «Quale clima stabilizzato corrisponde a questa particolare coppia di luce solare e anidride carbonica?». Il computer non è partito dalla Terra odierna per far evolvere in modo continuo atmosfera, rocce, oceani ed esseri viventi nei successivi due miliardi di anni. Gli autori hanno invece tracciato i due percorsi schematici di alterazione attraverso i punti precalcolati; il percorso tra un punto e l'altro non è stato simulato.

La tabella riproduce le combinazioni di luce solare e anidride carbonica presenti nell'archivio ufficiale dei dati del modello. Gli identificatori dei casi sono stati aggiunti qui, nell'ordine dell'archivio, per facilitarne la lettura. **S/S0** è la costante solare relativa: l'energia solare in ingresso usata nel modello divisa per il suo valore attuale, S0. Un valore di 1,2 indica quindi il 20% di energia solare in ingresso in più rispetto a oggi. **CO2 (ppm)** è il rapporto di mescolamento dell'anidride carbonica atmosferica espresso in molecole per milione di molecole atmosferiche.

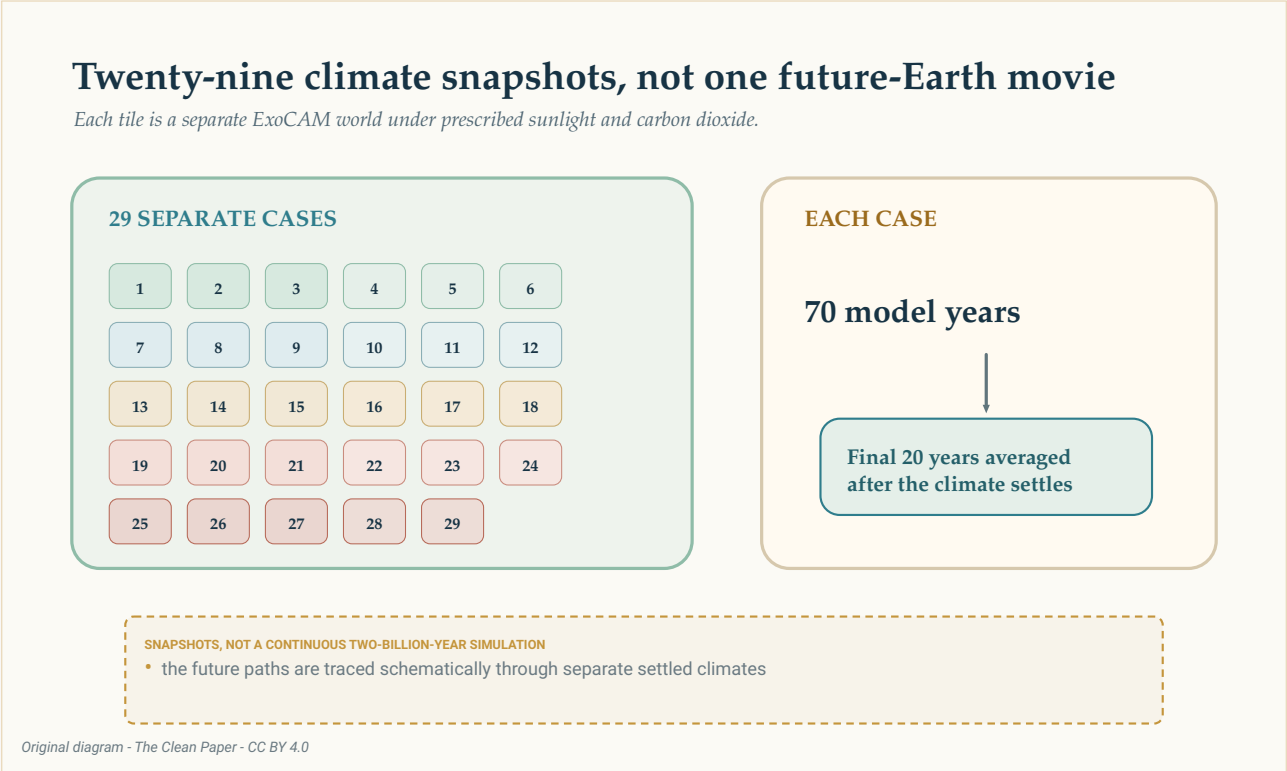
ID caso	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400

ID caso	S/S0	CO2 (ppm)
20	1.143	180
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

La Terra del modello è riconoscibile, ma intenzionalmente limitata. Ha le dimensioni della Terra e usa la geografia attuale. Possiede un oceano semplificato a strato uniforme, invece di un oceano con una circolazione completa, una pressione atmosferica impostata all'incirca al valore terrestre attuale — un bar — e una concentrazione fissa di metano. La sua orbita è perfettamente circolare — eccentricità nulla — e l'asse di rotazione non è inclinato — obliquità nulla. Non comprende suoli o vegetazione espliciti, né retroazioni prodotte da una biosfera in trasformazione. Soprattutto, il modello climatico non è accoppiato dinamicamente a un modello di alterazione delle rocce. In altre parole, ExoCAM non calcola l'alterazione, non usa il risultato per aggiornare l'anidride carbonica e non esegue poi il clima successivo in un ciclo di retroazione. I ricercatori hanno invece prescritto i due percorsi limite e li hanno tracciati sulla griglia dei 29 casi climatici.

Che cosa significa «stato stazionario» in un modello climatico?

Un caso in stato stazionario è un clima modellistico lasciato assestare sotto un Sole e un'atmosfera scelti. All'interno della simulazione il tempo meteorologico continua a cambiare da un giorno e da un anno all'altro, ma le sue medie di lungo periodo smettono di mostrare una forte deriva.
Questo è utile per chiedere «quale clima corrisponde a queste condizioni?». È diverso dal prevedere il percorso esatto con cui la Terra reale passa da un insieme di condizioni al successivo.



Ogni tessera è un'esecuzione climatica separata di ExoCAM durata 70 anni di modello, con la media calcolata sugli ultimi 20. Lo studio ha campionato 29 climi stabilizzati sotto condizioni prescritte di luce solare e anidride carbonica; non ha simulato una singola Terra in evoluzione continua per due miliardi di anni.

The Clean Paper CC BY 4.0

Primo caso limite: anidride carbonica sufficiente, troppo calore

Nel ramo di alterazione debole, l'anidride carbonica rimane fissa a 400 parti per milione. Con l'aumento dell'energia solare in ingresso, il calore diventa il fattore limitante.

L'articolo usa due soglie di temperatura media globale tratte da lavori precedenti:

- A **323 kelvin**, circa **50 gradi Celsius** come media globale annuale, il mondo viene considerato troppo caldo per la maggior parte delle piante terrestri. Il modello raggiunge questa soglia tra circa **1,68 miliardi di anni**.
- A **338 kelvin**, circa **65 gradi Celsius** come media globale annuale, il mondo viene considerato troppo caldo per tutte le piante terrestri. Il modello raggiunge questa soglia tra circa **1,87 miliardi di anni**.

Sono limiti biologici adottati, non temperature universali alle quali ogni organismo fotosintetico smetterebbe necessariamente di funzionare. Una media globale nasconde inoltre grandi differenze regionali. Lo studio esamina separatamente dove potrebbero rimanere adatte determinate combi-

nazioni di temperatura e acqua, ma un'etichetta su una mappa climatica non può catalogare ogni futuro rifugio o adattamento.

Secondo caso limite: temperatura tollerabile, troppo poca anidride carbonica

Nel ramo di alterazione forte, la temperatura media globale viene mantenuta a 288 kelvin, circa 15 gradi Celsius, mentre l'anidride carbonica atmosferica diminuisce. Qui la risposta dipende dalla quantità minima di carbonio che potrebbero usare i diversi percorsi fotosintetici.

- Con la soglia tradizionale di **10 parti per milione** — 10 molecole di anidride carbonica ogni milione di molecole atmosferiche — il limite per la fotosintesi C4 arriva tra circa **1,35 miliardi di anni**. La fotosintesi C4 è usata da piante come mais e canna da zucchero e concentra l'anidride carbonica intorno all'enzima che la fissa.
- Usando una soglia alternativa per la C4 di **2,9 parti per milione**, discussa in lavori precedenti, il limite si sposta a circa **1,64 miliardi di anni**.
- Una soglia provvisoria di **1 parte per milione**, associata alla possibile persistenza di alcune piante CAM — che usano il metabolismo acido delle Crassulacee, separando l'assorbimento notturno dell'anidride carbonica dal suo impiego diurno — o di piante acquatiche capaci di usare il bicarbonato disciolto, sposta il limite a circa **1,84 miliardi di anni**.

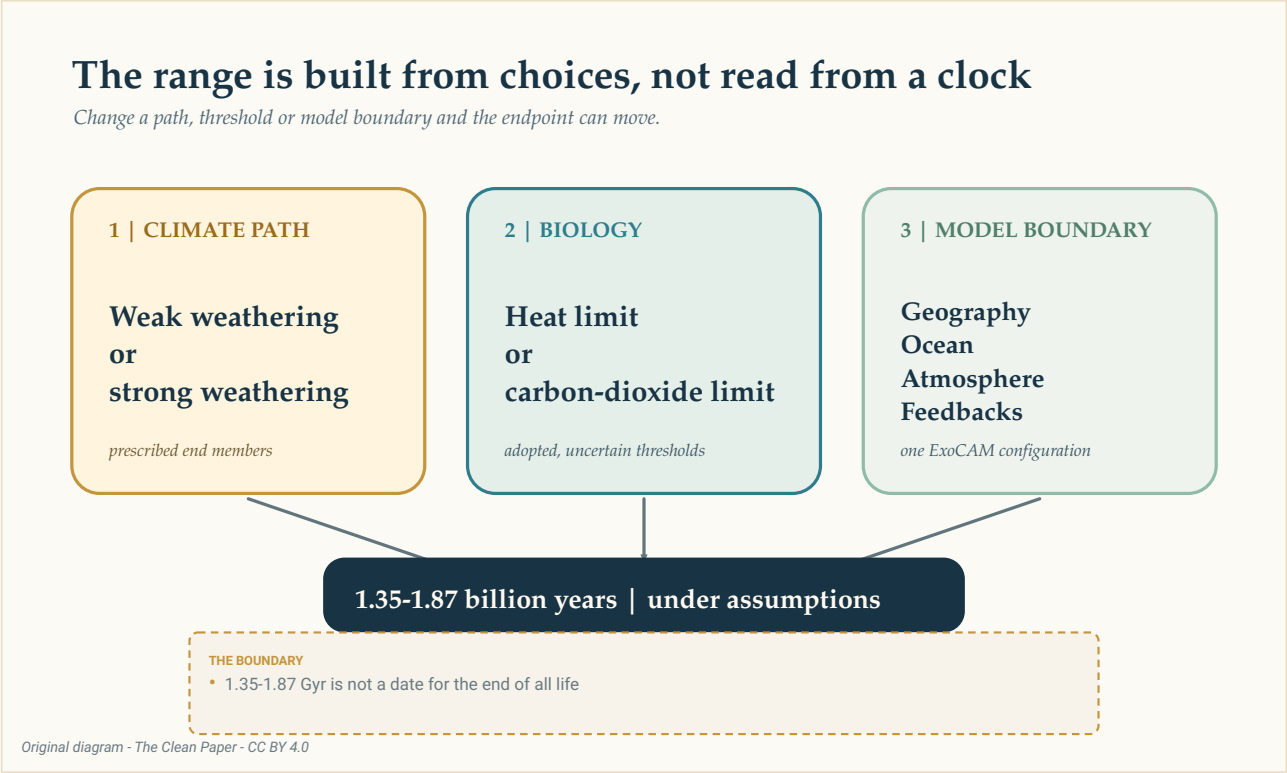
L'ultimo valore è accompagnato dalla maggiore riserva biologica. Gli autori definiscono esplicitamente provvisoria la soglia di una parte per milione. Non è una soglia di sopravvivenza dimostrata sperimentalmente per tutte le piante CAM o per la vegetazione acquatica nelle condizioni della Terra futura.

> **C3, C4 e CAM sono strategie, non gradini di una scala**
>
> Le piante usano diversi percorsi biochimici per catturare il carbonio. La **fotosintesi C3** è la più comune. La **fotosintesi C4**, usata da piante come mais e canna da zucchero, concentra l'anidride carbonica intorno all'enzima che fissa il carbonio e può funzionare meglio quando l'anidride carbonica è scarsa. Il **metabolismo acido delle Crassulacee (CAM)** separa tra notte e giorno l'assorbimento e l'uso del carbonio, aiutando molte piante a conservare acqua.
> Sono famiglie di strategie, con numerose differenze tra specie, non livelli successivi di piante «migliori». Le soglie molto basse di anidride carbonica usate nell'articolo sono ipotesi per esplorare possibili limiti, non garanzie che un ecosistema futuro si evolverà fino a usarle.

Perché 1,86 miliardi di anni non è una data di scadenza

La stima di circa **1,86 miliardi di anni** messa in evidenza dall'articolo è la media dei due estremi superiori più ottimistici: 1,84 miliardi di anni nel ramo limitato dall'anidride carbonica e 1,87 miliardi di anni nel ramo limitato dal calore. È un riassunto compatto di due scenari diversi. Non è un terzo risultato del modello dotato di maggiore precisione e non è la migliore stima di una data.

Anche l'intervallo più ampio, da 1,35 a 1,87 miliardi di anni, non porta con sé un'unica probabilità. Il limite inferiore e quello superiore dipendono da diverse ipotesi sull'alterazione, diverse soglie biologiche e una sola configurazione del modello climatico. L'intervallo misura le scelte dell'esperimento tanto quanto misura il tempo.



L'intervallo da 1,35 a 1,87 miliardi di anni emerge soltanto dopo aver scelto un percorso di alterazione, una soglia biologica e i confini del modello. È una mappa delle ipotesi, non un orologio che termina con l'estinzione di tutta la vita.

The Clean Paper CC BY 4.0

Altri limiti potrebbero arrivare prima

Le stime più lunghe per la biosfera vegetativa si avvicinano a un altro confine incerto: un effetto serra umido o incontrollato, capace di provocare una forte perdita degli oceani. I modelli climatici sono molto discordi su quando inizino questi stati con l'aumento della luce solare, soprattutto in condizioni lontane da quelle presenti. Alcune stime li collocano prima del limite più ottimistico per

la fotosintesi.

Il ramo superiore non può quindi essere letto come la promessa che la Terra conserverà oceani, continenti familiari o condizioni superficiali abitabili fino a 1,87 miliardi di anni da oggi. Il modello non comprende neppure la futura tettonica a placche, i cambiamenti nell'estensione delle terre emerse, ecosistemi in evoluzione o un oceano pienamente dinamico. Anche i calcoli su come l'atmosfera assorbe ed emette energia vengono spinti in regimi di luce solare intensa e anidride carbonica estremamente bassa nei quali i diversi modelli divergono.

L'adattamento evolutivo e l'intervento tecnologico compaiono nella discussione dell'articolo come possibilità. Non sono risultati delle 29 simulazioni climatiche. Il modello non mostra organismi futuri che evolvono un percorso fotosintetico capace di funzionare con una parte per milione, né una civiltà che gestisce l'atmosfera per un miliardo di anni.

Questo non è un risultato sull'attuale crisi climatica

L'aumento della luminosità solare agisce su centinaia di milioni o miliardi di anni. Il moderno riscaldamento causato dall'uomo deriva dal rapido aumento dei gas serra nell'arco di decenni e secoli. Sono forzanti diverse, su scale temporali radicalmente differenti, che rispondono a domande diverse.

Nulla in questo studio indebolisce le prove dell'attuale cambiamento climatico o invita a rimandare l'azione. Una biosfera che, in un lontano scenario modellistico, potrebbe conservare qualche forma di vita fotosintetica non equivale a un clima in cui le società e gli ecosistemi odierni restino al sicuro.

L'articolo è utile perché rende più rigorosa una domanda remota. Mostra che modelli precedenti e più semplici potrebbero aver prodotto un riscaldamento eccessivo quando aumentavano la luce solare mantenendo fissa l'anidride carbonica, e che la vita fotosintetica potrebbe avere più vie di persistenza rispetto a quanto suggerisca un'unica soglia canonica del carbonio. Mostra anche perché ogni ulteriore frazione di miliardo di anni porta con sé una catena di ipotesi.

Il Sole che alimenta una foglia sta cambiando lentamente. Che la Terra rimanga verde per altri 1,35, 1,87 o per un diverso numero di miliardi di anni dipenderà dalla risposta congiunta di rocce, acqua, atmosfera e vita. Il risultato onesto non è una data. È una visione più ampia dell'equilibrio.

In breve

Uno studio climatico tridimensionale chiede per quanto tempo possa persistere la biosfera vegetativa — fotosintetica — della Terra mentre il Sole diventa lentamente più luminoso. I ricercatori hanno calcolato 29 climi separati in stato stazionario e tracciato al loro interno due casi limite illustrativi. Con un'alterazione debole e l'anidride carbonica fissa a 400 parti per milione, i limiti termici adottati per le piante terrestri vengono raggiunti tra circa 1,68 e 1,87 miliardi di anni da oggi. Con un'alterazione forte e la temperatura media globale fissa a 288 kelvin, circa 15 gradi Celsius, i limiti adottati dell'anidride carbonica per la fotosintesi arrivano tra circa 1,35, 1,64 e — usando una soglia

provvisoria — 1,84 miliardi di anni. Il valore spesso citato di 1,86 miliardi di anni è soltanto la media arrotondata dei due estremi superiori più ottimistici. Sono intervalli modellistici dipendenti dallo scenario, non la data in cui finiranno la Terra, l'umanità o tutta la vita. Il modello usa percorsi prescritti, la geografia attuale, un oceano a strato uniforme e nessun accoppiamento esplicito suolo-vegetazione o clima-alterazione; inoltre, le stime più lunghe si avvicinano a limiti incerti legati all'effetto serra e alla perdita degli oceani.

Valutazione critica

Che cosa mostra l'articolo: in questa configurazione di ExoCAM, con l'aumento della luce solare e l'anidride carbonica fissa, i climi tridimensionali si riscaldano in genere meno dei modelli semplificati usati come confronto. In due casi limite prescritti per l'alterazione e con diverse soglie biologiche adottate, i limiti della biosfera vegetativa si collocano tra circa 1,35 e 1,87 miliardi di anni da oggi.

Che cosa è plausibile ma non dimostrato: che alcune piante CAM o piante acquatiche capaci di usare bicarbonato disciolto possano sostenere la fotosintesi con un'anidride carbonica atmosferica vicina a una parte per milione; che l'adattamento o la tecnologia possano prolungare ulteriormente la vita fotosintetica; e che il vero percorso clima-alterazione rimanga compreso tra i due casi limite del modello.

Che cosa non mostra: una data fissa per la fine di tutte le piante, di tutta la vita, della civiltà umana, degli oceani terrestri o del pianeta; un'unica simulazione continua dei prossimi due miliardi di anni; o un motivo per sminuire l'attuale cambiamento climatico causato dall'uomo.

Principali limiti: 29 casi in stato stazionario provenienti da un'unica famiglia di modelli climatici; percorsi di alterazione prescritti anziché accoppiati dinamicamente; geografia attuale; oceano a strato uniforme; metano fisso; obliquità ed eccentricità nulle; assenza di suoli, vegetazione o retroazioni esplicite della biosfera; soglie incerte per calore e anidride carbonica; e forte disaccordo tra modelli in prossimità di condizioni di effetto serra umido o incontrollato.

Quanta fiducia dovrebbe avere un lettore non specialista? Fiducia elevata nel fatto che lo studio ampli l'intervallo modellistico plausibile e identifichi le ipotesi che lo controllano. Fiducia moderata nell'intervallo numerico come utile delimitazione all'interno di questo modello. Fiducia bassa in qualunque data precisa, perché gli estremi più lontani dipendono da percorsi climatici volutamente estremi e da una biologia incerta.

Fonti

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