The Clean Paper

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

Cât timp poate rămâne Pământul verde? Un model climatic oferă intervale, nu o dată a apocalipsei

Douăzeci și nouă de simulări climatice tridimensionale plasează diferite limite ale biosferei fotosintetice a Pământului la aproximativ 1,35–1,87 miliarde de ani de acum înainte. Valorile depind de traiectorii simplificate în mod deliberat pentru alterarea rocilor, căldură și cele mai scăzute niveluri de dioxid de carbon pe care plantele le-ar putea folosi. Ele nu prezic când se vor sfârși toate plantele, întreaga viață, civilizația sau planeta.

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

Cât timp poate rămâne Pământul verde? Un model climatic oferă intervale, nu o dată a apocalipsei

O frunză trăiește în limitele unui echilibru îngust. Are nevoie de lumină, apă, dioxid de carbon și de o temperatură pe care chimia ei o poate tolera. De-a lungul unei vieți umane, Soarele pare partea fixă a acestui echilibru. Pe durata unui miliard de ani, nu este.

Pe măsură ce îmbătrânește pe secvența principală, Soarele devine încet mai luminos. Mai multă lumină solară încălzește Pământul, dar planeta are un răspuns pe termen lung: reacțiile dintre apa de ploaie, dioxidul de carbon și rocile silicatice pot elimina dioxid de carbon din atmosferă. Aceasta slăbește efectul de seră și compensează o parte din încălzire. Același răspuns care răcește planeta poate ajunge în cele din urmă să priveze organismele fotosintetice de carbonul folosit pentru construirea țesutului viu.

Un nou articol din Journal of Geophysical Research: Atmospheres întreabă care limită ar putea fi atinsă prima: prea multă căldură sau prea puțin dioxid de carbon. Răspunsul său nu este o dată la care Pământul „moare”. În două traiectorii viitoare simplificate în mod deliberat, limitele adoptate pentru viața fotosintetică apar la aproximativ **1,35–1,87 miliarde de ani de acum înainte**.

Acest interval privește **biosfera vegetală**: partea sistemului viu al Pământului susținută de organisme fotosintetice, în special plante și alte forme de viață care transformă lumina și dioxidul de carbon în material biologic. Nu este o prognoză pentru fiecare microb. Nu este durata de viață a civilizației umane. Nu este durata de viață a planetei.

Termostatul planetar are două reglaje incerte

Incertitudinea centrală este **alterarea silicaților**. Dioxidul de carbon se dizolvă în apa de ploaie, reacționează cu rocile silicatice și este transportat în cele din urmă către oceane și sedimente. Vulcanii readuc dioxidul de carbon în atmosferă pe scări geologice de timp. Împreună, aceste procese formează o parte a ciclului carbonat–silicat, descris adesea ca un termostat planetar.

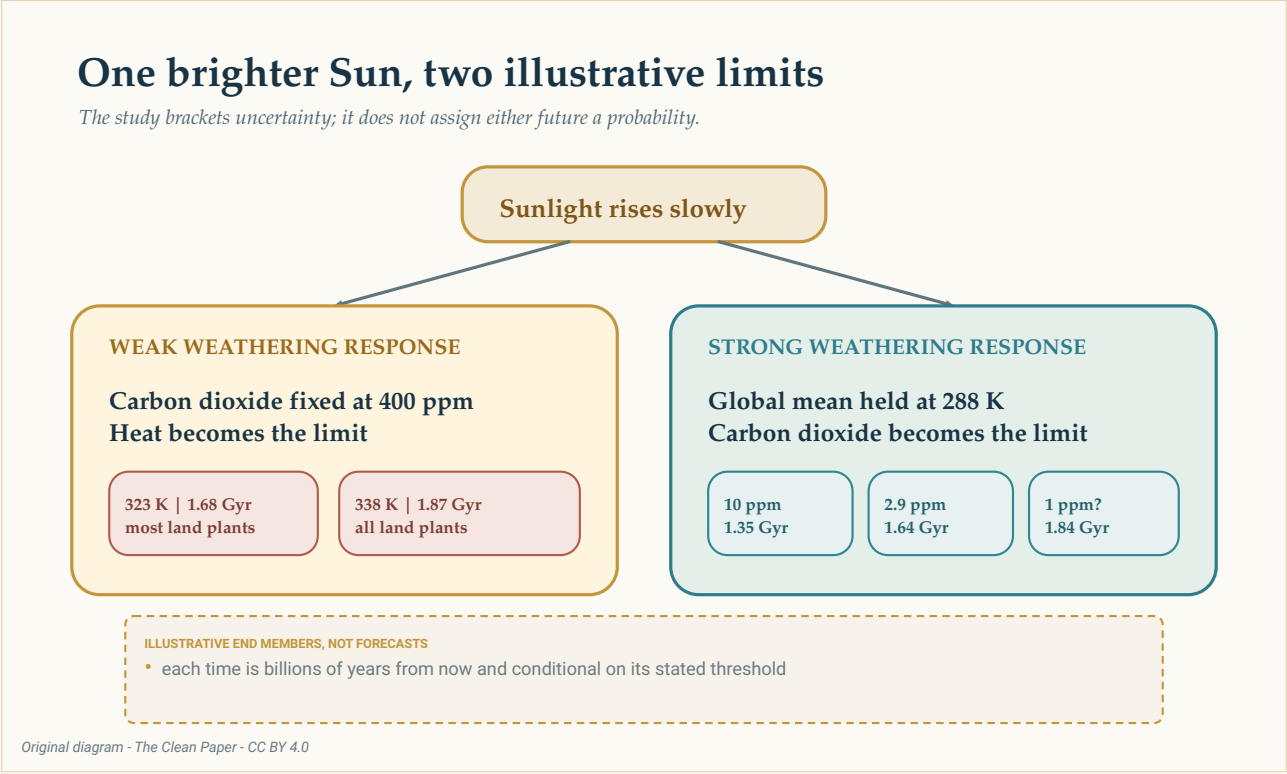
Într-o lume mai caldă și mai umedă, alterarea ar putea accelera și elimina mai rapid dioxidul de carbon. Dar oamenii de știință nu știu cât de puternic va controla acest răspuns Pământul sub un Soare viitor mai luminos. Jacob Haqq-Misra și Eric Wolf nu au ales, prin urmare, o singură traiectorie presupus corectă. Ei au modelat două **cazuri-limită**: situații intenționat extreme, folosite pentru a încadra incertitudinea.

- În **cazul-limită cu alterare slabă**, dioxidul de carbon atmosferic rămâne la 400 de părți pe milion, în timp ce Soarele tot mai luminos ridică temperatura.
- În **cazul-limită cu alterare puternică**, temperatura medie globală la suprafață rămâne la 288 kelvini, aproximativ 15 grade Celsius, în timp ce dioxidul de carbon scade pe măsură ce lumina solară crește.

Niciuna dintre ramuri nu este prezentată drept viitorul real al Pământului. Prima întreabă ce ar face căldura dacă dioxidul de carbon ar rămâne ridicat. A doua întreabă ce ar produce lipsa carbonului dacă alterarea ar menține temperatura globală aproape de media actuală.

Cum poate alterarea să acționeze ca un termostat?

Analogia se referă la feedback, nu la un buton de control literal. Când un climat mai cald accelerează alterarea chimică, o cantitate mai mare de dioxid de carbon atmosferic poate ajunge în material dizolvat, minerale și sedimente. Îndepărtarea acestui gaz cu efect de seră se opune unei părți din încălzirea inițială. Pe scări de timp foarte lungi, degazarea vulcanică readuce dioxidul de carbon.
Puterea fiecărei verigi depinde de precipitații, roca expusă, eroziune, biologie, tectonică și chimia oceanelor. De aceea, articolul testează răspunsuri-limită în loc să trateze termostatul ca pe o mașină cunoscută.



Articolul încadrează un viitor incert prin două cazuri-limită ilustrative. Dacă alterarea răspunde slab, creșterea căldurii atinge pragurile adoptate pentru plantele terestre. Dacă răspunde puternic, scăderea dioxidului de carbon atinge pragurile adoptate pentru fotosinteză. Acestea sunt ramuri condiționale ale modelului, nu probabilități sau date cu numărătoare inversă.

The Clean Paper CC BY 4.0

Douăzeci și nouă de lumi modelate la echilibru, nu un film de două miliarde de ani

Cercetătorii au folosit ExoCAM, un model climatic global tridimensional, pentru a calcula **29 de clime în stare staționară** în combinații de lumină solară mai intensă și dioxid de carbon mai scăzut. Fiecare caz a fost rulat timp de 70 de ani ai modelului. Aici, un an al modelului este un ciclu anual simulat în condiții fixe: este timp de rulare folosit pentru a permite climei artificiale să se stabilizeze, nu un pas dintr-o prognoză anuală a viitorului Pământului. Ultimii 20 de ani au fost mediați după ce clima simulată a avut timp să se stabilizeze.

Cele 29 de cazuri sunt lumi modelate separate. Fiecare rulare este un punct dintr-o grilă și răspunde la întrebarea: „Ce climă stabilizată corespunde acestei perechi alese de lumină solară și dioxid de carbon?” Calculatorul nu a pornit de la Pământul actual pentru a-i evolua continuu atmosfera, rocile, oceanele și organismele vii în următoarele două miliarde de ani. În schimb, autorii au trasat cele două traiectorii schematice ale alterării prin punctele precalculate; drumul dintre puncte nu a fost el însuși simulat.

Tabelul reproduce combinațiile de lumină solară și dioxid de carbon din arhiva oficială a datelor modelului. Identificatorii cazurilor sunt repere de lectură adăugate aici în ordinea arhivei. **S/S0** este constanta solară relativă: energia solară incidentă folosită în model împărțită la valoarea sa actuală, S0. O valoare de 1.2 înseamnă, prin urmare, cu 20% mai multă energie solară incidentă decât astăzi. **CO2 (ppm)** este fracția de amestec a dioxidului de carbon atmosferic, exprimată în molecule la un milion de molecule atmosferice.

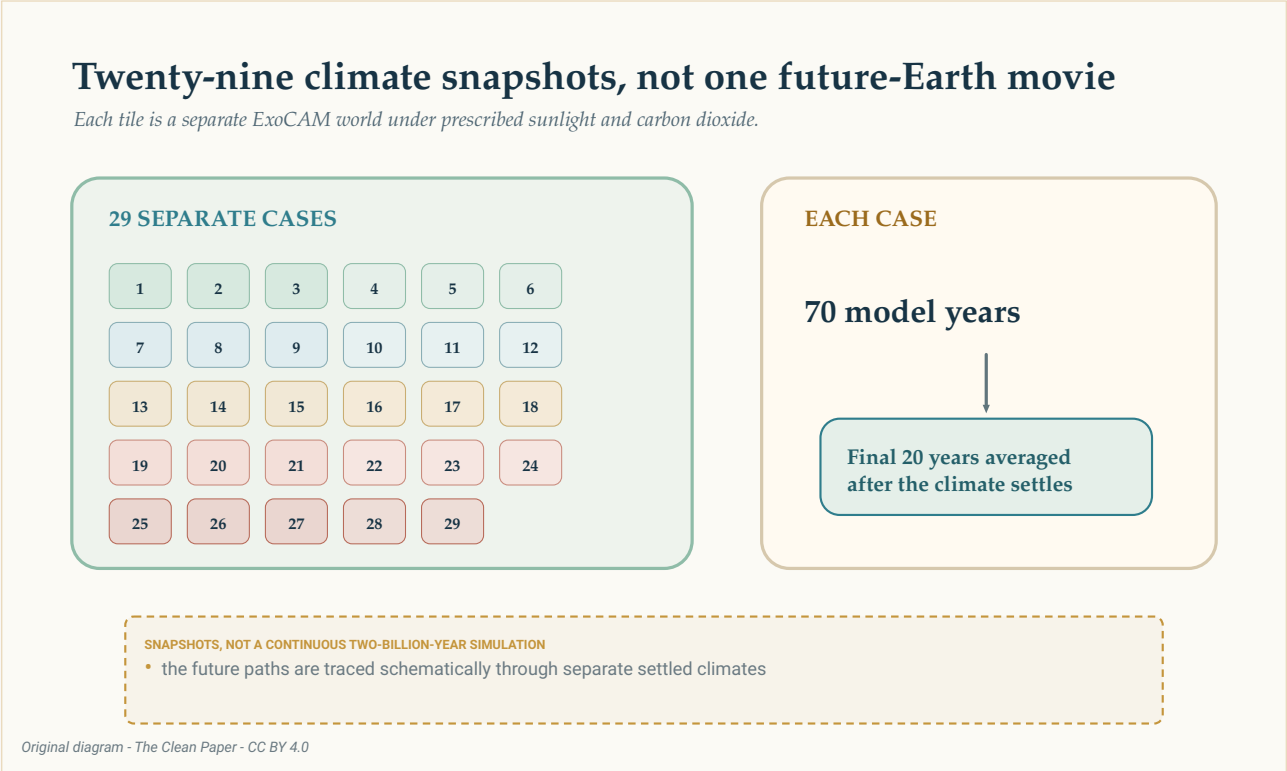
ID caz	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

ID caz	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

Pământul din model este recognoscibil, dar intenționat limitat. Are dimensiunile Pământului și folosește geografia actuală. Include un ocean simplificat de tip placă, nu un ocean cu circulație completă, presiunea atmosferică este stabilită aproximativ la valoarea actuală a Pământului — un bar — iar metanul este fix. Orbita este perfect circulară — excentricitate zero — iar axa de rotație nu are înclinare — oblicitate zero. Nu include explicit solurile, vegetația sau feedbackul unei biosfere în schimbare. Cel mai important, modelul climatic nu este cuplat dinamic cu un model al alterării rocilor. Cu alte cuvinte, ExoCAM nu calculează alterarea, nu folosește rezultatul pentru a actualiza dioxidul de carbon și apoi nu rulează următoarea climă într-o buclă de feedback. Cercetătorii au prescris cele două traiectorii-limită și le-au urmărit prin grila climatică de 29 de cazuri.

Ce înseamnă „stare staționară" într-un model climatic?

Un caz în stare staționară este o climă modelată căreia i se permite să se stabilizeze sub un anumit Soare și într-o anumită atmosferă. Vremea continuă să se schimbe de la o zi la alta și de la un an la altul în interiorul simulării, dar mediile sale pe termen lung nu mai derivă puternic.
Este util pentru întrebarea „Ce climă corespunde acestor condiții?" Este diferit de prezicerea traseului exact pe care Pământul real trece de la un set de condiții la următorul.



Fiecare dală este o rulare climatică ExoCAM separată, de 70 de ani ai modelului, cu media ultimilor 20 de ani. Studiul a eșantionat 29 de clime stabilizate în condiții prescrise de lumină solară și dioxid de carbon; nu a simulat un singur Pământ aflat în evoluție continuă timp de două miliarde de ani.

The Clean Paper CC BY 4.0

Primul caz-limită: suficient dioxid de carbon, prea multă căldură

În ramura cu alterare slabă, dioxidul de carbon rămâne fixat la 400 de părți pe milion. Pe măsură ce aportul solar crește, căldura devine factorul limitativ.

Articolul folosește două praguri ale temperaturii medii globale preluate din studii anterioare:

- La **323 kelvini**, aproximativ **50 de grade Celsius** ca medie globală anuală, lumea este considerată prea fierbinte pentru majoritatea plantelor terestre. Modelul atinge pragul în aproximativ **1,68 miliarde de ani**.
- La **338 kelvini**, aproximativ **65 de grade Celsius** ca medie globală anuală, lumea este considerată prea fierbinte pentru toate plantele terestre. Modelul atinge pragul în aproximativ **1,87 miliarde de ani**.

Acestea sunt limite biologice adoptate, nu temperaturi universale la care toate organismele fotosintetice eșuează neapărat. O medie globală ascunde și diferențe regionale mari. Studiul examinează separat locurile în care combinații de temperatură și apă ar putea rămâne adecvate, dar o etichetă

pe o hartă climatică nu poate inventaria fiecare refugiu sau adaptare viitoare.

Al doilea caz-limită: temperatură tolerabilă, prea puțin dioxid de carbon

În ramura cu alterare puternică, temperatura medie globală este menținută la 288 kelvini, aproximativ 15 grade Celsius, în timp ce dioxidul de carbon atmosferic scade. Aici răspunsul depinde de cât de puțin carbon ar putea folosi diferitele căi fotosintetice.

- La pragul tradițional de **10 părți pe milion** — 10 molecule de dioxid de carbon la fiecare milion de molecule atmosferice — limita pentru fotosinteza C4 apare în aproximativ **1,35 miliarde de ani**. Fotosinteza C4 este folosită de plante precum porumbul și trestia de zahăr și concentrează dioxidul de carbon în jurul enzimei care îl fixează.
- Folosirea unui prag alternativ C4 de **2,9 părți pe milion**, discutat în studii anterioare, mută limita la aproximativ **1,64 miliarde de ani**.
- Un prag provizoriu de **1 parte pe milion**, asociat cu posibila persistență a unor plante CAM — plante care folosesc metabolismul acid crassulacean, separând absorbția nocturnă a dioxidului de carbon de utilizarea sa diurnă — sau a unor plante acvatice capabile să folosească bicarbonat dizolvat, mută limita la aproximativ **1,84 miliarde de ani**.

Ultimul număr are cea mai importantă rezervă biologică. Autorii numesc în mod explicit provizorie limita de o parte pe milion. Ea nu este un prag de supraviețuire stabilit experimental pentru toate plantele CAM sau pentru vegetația acvatică în condițiile viitorului Pământ.

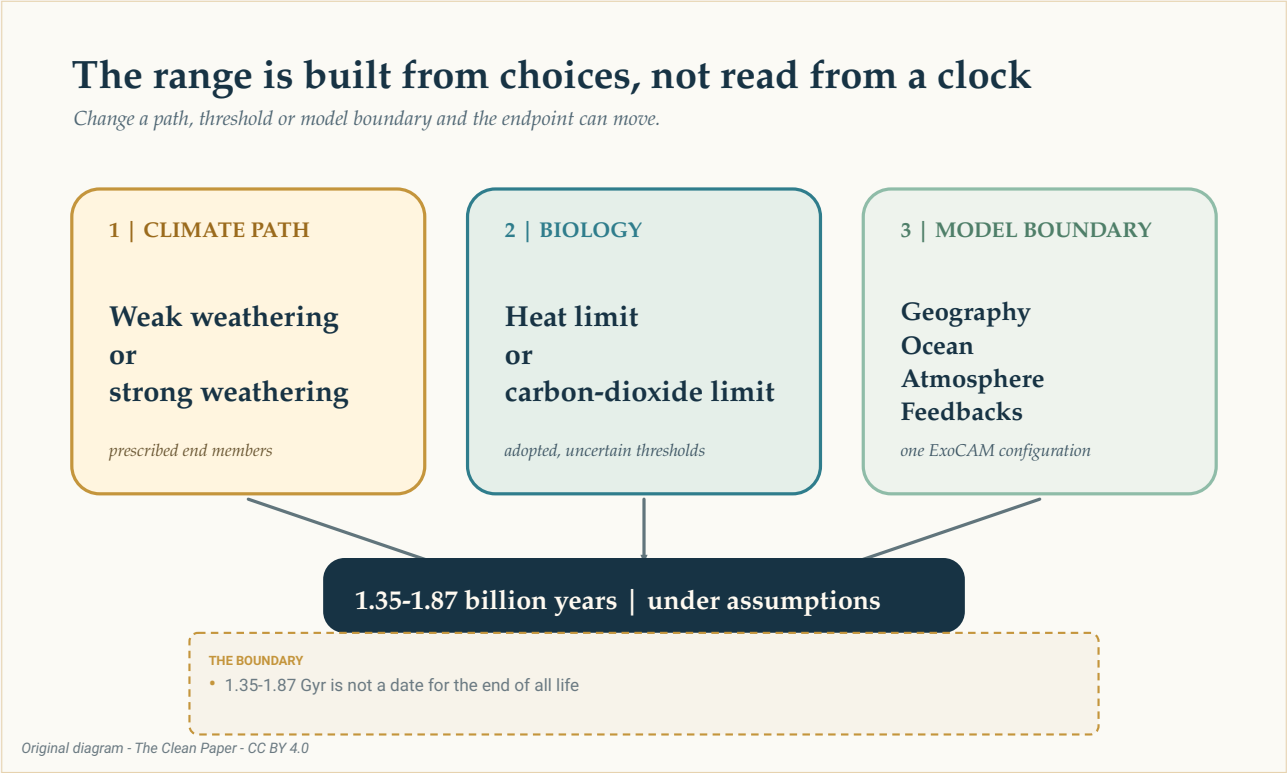
> **C3, C4 și CAM sunt strategii, nu trepte ale unei ierarhii**
>
> Plantele folosesc căi biochimice diferite pentru a capta carbonul. **Fotosinteza C3** este cea mai răspândită. **Fotosinteza C4**, folosită de plante precum porumbul și trestia de zahăr, concentrează dioxidul de carbon în jurul enzimei care fixează carbonul și poate funcționa mai bine când dioxidul de carbon este rar. **Metabolismul acid crassulacean (CAM)** separă captarea și utilizarea carbonului între noapte și zi, ajutând numeroase plante să economisească apă. Acestea sunt familii de strategii, cu numeroase diferențe între specii, nu ranguri succesive de plante „mai bune”. Pragurile foarte scăzute de dioxid de carbon din articol sunt ipoteze pentru explorarea unor limite posibile, nu garanții că un ecosistem viitor va evolua pentru a le folosi.

De ce 1,86 miliarde de ani nu este o dată de expirare

Estimarea din titluri de aproximativ **1,86 miliarde de ani** este media celor două capete superioare optimiste: 1,84 miliarde de ani în ramura limitată de dioxidul de carbon și 1,87 miliarde de ani în ramura limitată de căldură. Este un rezumat compact al două scenarii diferite. Nu este un al treilea

rezultat al modelului, cu precizie mai mare, și nu este data considerată cea mai probabilă.

Nici intervalul mai larg de 1,35–1,87 miliarde de ani nu are asociată o singură probabilitate. Valorile sale inferioară și superioară depind de ipoteze diferite privind alterarea, de praguri biologice diferite și de o singură configurație a modelului climatic. Intervalul măsoară alegerile din experiment în aceeași măsură în care măsoară timpul.



Intervalul de 1,35–1,87 miliarde de ani apare numai după alegerea unei traiectorii a alterării, a unui prag biologic și a unei limite a modelului. Este o hartă a ipotezelor, nu un ceas care se încheie cu dispariția întregii vieți.

The Clean Paper CC BY 4.0

Alte limite ar putea fi atinse mai întâi

Cele mai lungi estimări pentru biosfera vegetală se apropie de o limită separată și incertă: o stare de seră umedă sau scăpată de sub control, care ar putea provoca pierderi majore ale oceanelor. Modelele climatice diferă substanțial cu privire la momentul în care încep aceste stări sub o lumină solară în creștere, mai ales departe de condițiile actuale. Unele estimări le plasează înaintea celei mai optimiste limite pentru fotosinteză.

Aceasta înseamnă că ramura superioară nu poate fi citită ca o promisiune că Pământul își va păstra oceanele, continentele familiare sau condițiile locuibile la suprafață până peste 1,87 miliarde de ani. Modelul nu include nici tectonica plăcilor din viitor, modificările suprafeței uscatului, ecosistemele în evoluție sau un ocean complet dinamic. Calculele sale privind modul în care atmosfera absoarbe și emite energie sunt împinse, de asemenea, în regimuri de lumină solară intensă și dioxid de carbon

extrem de scăzut, în care modelele diferă.

Adaptarea evolutivă și intervenția tehnologică apar ca posibilități în discuția articolului. Ele nu sunt rezultate ale celor 29 de simulări climatice. Modelul nu arată organisme viitoare evoluând o cale fotosintetică funcțională la o parte pe milion și nu arată o civilizație administrând atmosfera timp de un miliard de ani.

Acesta nu este un rezultat despre criza climatică actuală

Creșterea luminozității solare acționează pe durata a sute de milioane până la miliarde de ani. Încălzirea modernă produsă de oameni provine din creșterea rapidă a gazelor cu efect de seră în decenii și secole. Sunt forțări diferite, pe scări de timp radical diferite, care răspund unor întrebări diferite.

Nimic din acest studiu nu slăbește dovezile privind schimbarea climatică actuală și nu susține amânarea acțiunii. O biosferă care ar putea păstra o anumită formă de viață fotosintetică într-un scenariu îndepărtat al modelului nu este același lucru cu un climat în care societățile și ecosistemele actuale rămân în siguranță.

Articolul este valoros deoarece disciplinează o întrebare foarte îndepărtată. Arată că modelele anterioare, mai simple, s-ar putea să fi produs o încălzire prea mare atunci când lumina solară creștea, iar dioxidul de carbon rămânea fix și că viața fotosintetică ar putea avea mai multe căi de persistență decât sugerează un singur prag canonic al carbonului. Arată și de ce fiecare fracțiune suplimentară de miliard de ani vine însoțită de un lanț de ipoteze.

Soarele care hrănește o frunză se schimbă încet. Faptul că Pământul va rămâne verde încă 1,35, 1,87 sau un alt număr de miliarde de ani va depinde de răspunsul comun al rocilor, apei, atmosferei și vieții. Rezultatul onest nu este o dată. Este o imagine mai largă a echilibrului.

Pe scurt

Un studiu climatic tridimensional întreabă cât timp ar putea persista biosfera vegetală — fotosintetică — a Pământului pe măsură ce Soarele devine încet mai luminos. Cercetătorii au calculat 29 de clime separate în stare staționară și au trasat prin ele două cazuri-limită ilustrative. Cu alterare slabă și dioxidul de carbon fixat la 400 de părți pe milion, limitele termice adoptate pentru plantele terestre apar peste aproximativ 1,68 și 1,87 miliarde de ani. Cu alterare puternică și temperatura medie globală fixată la 288 kelvini, aproximativ 15 grade Celsius, limitele adoptate ale dioxidului de carbon pentru fotosinteză apar peste aproximativ 1,35, 1,64 și — folosind un prag provizoriu — 1,84 miliarde de ani. Valoarea frecvent citată de 1,86 miliarde de ani este doar media rotunjită a celor două capete superioare optimiste. Acestea sunt intervale ale modelului dependente de scenariu, nu o dată la care Pământul, omenirea sau întreaga viață se vor sfârși. Modelul folosește traiectorii prescrise, geografia actuală, un ocean de tip placă și nu include cuplare explicită sol–vegetație sau climă–alterare, iar cele

mai lungi estimări se apropie de limite incerte legate de efectul de seră și pierderea oceanelor.

Verificare fără exagerări

Ce arată articolul: În această configurație ExoCAM, climele tridimensionale se încălzesc în general mai puțin odată cu intensificarea luminii solare și menținerea dioxidului de carbon fix decât modelele simplificate folosite pentru comparație. În cele două cazuri-limită prescrise ale alterării și la mai multe praguri biologice adoptate, limitele biosferei vegetale se află la aproximativ 1,35–1,87 miliarde de ani de acum înainte.

Ce este plauzibil, dar nu stabilit: Că unele plante CAM sau plante acvatice care folosesc bicarbonat dizolvat ar putea susține fotosinteza în apropierea unei părți pe milion de dioxid de carbon atmosferic; că adaptarea sau tehnologia ar putea prelungi și mai mult viața fotosintetică; și că traiectoria reală climă–alterare va rămâne între cele două cazuri-limită ale modelului.

Ce nu arată: O dată fixă pentru sfârșitul tuturor plantelor, întregii vieți, civilizației umane, oceanelor Pământului sau planetei; o singură simulare continuă a următoarelor două miliarde de ani; sau vreun motiv pentru a minimaliza schimbarea climatică actuală provocată de oameni.

Limitările principale: Douăzeci și nouă de cazuri în stare staționară dintr-o singură familie de modele climatice; traiectorii ale alterării prescrise, nu cuplate dinamic; geografia actuală; un ocean de tip placă; metan fix; oblicitate și excentricitate zero; absența explicită a solurilor, vegetației și feedbackului biosferei; praguri incerte de căldură și dioxid de carbon; și dezacorduri mari între modele în apropierea stărilor de seră umedă sau scăpată de sub control.

Câtă încredere ar trebui să aibă un cititor nespecialist? Încredere mare că studiul lărgește intervalul plauzibil al modelelor și identifică ipotezele care îl controlează. Încredere moderată în intervalul numeric ca încadrare utilă în interiorul acestui model. Încredere mică în orice dată exactă, deoarece capetele cele mai îndepărtate depind de traiectorii climatice intenționat extreme și de o biologie incertă.

Surse

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