The Clean Paper

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

Hoe lank kan die aarde groen bly? 'n Klimaatmodel bied reekse, nie 'n oordeelsdagdatum nie

Nege-en-twintig driedimensionele klimaatsimulasies plaas verskillende grense vir die aarde se fotosintetiese biosfeer tussen ongeveer 1,35 en 1,87 miljard jaar van nou af. Die waardes hang af van doelbewus vereenvoudigde paaie vir gesteenteverwering, hitte en die laagste koolstofdioksiedvlakke wat plante moontlik kan gebruik. Hulle voorspel nie wanneer alle plante, alle lewe, die beskawing of die planeet sal eindig nie.

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

Hoe lank kan die aarde groen bly? ’n Klimaatmodel bied reekse, nie ’n oordeelsdagdatum nie

’n Blaar bestaan binne ’n nou ooreenkoms. Dit het lig, water, koolstofdioksied en ’n temperatuur nodig wat sy chemie kan verdra. Oor ’n menseleeftyd lyk die Son soos die vaste deel van daardie ooreenkoms. Oor ’n miljard jaar is dit nie.

Namate die Son op die hoofreeks verouder, word dit stadig helderder. Meer sonlig verwarm die aarde, maar die planeet het ’n langtermynreaksie: reaksies tussen reënwater, koolstofdioksied en silikaatgesteentes kan koolstofdioksied uit die atmosfeer verwyder. Dit verswak die kweekhuiseffek en verreken ’n deel van die verwarming. Dieselfde reaksie wat die planeet afkoel, kan fotosintetiese organismes uiteindelik van die koolstof ontneem waarmee hulle lewende weefsel bou.

’n Nuwe artikel in Journal of Geophysical Research: Atmospheres vra watter grens eerste kan aanbreek: te veel hitte, of te min koolstofdioksied. Die antwoord is nie ’n datum waarop die aarde sterf nie. Oor twee doelbewus vereenvoudigde toekomstige paaie val die aangenome grense vir fotosintetiese lewe tussen ongeveer **1,35 en 1,87 miljard jaar van nou af**.

Daardie reeks handel oor die **vegetatiewe biosfeer**: die deel van die aarde se lewende stelsel wat deur fotosintetiese organismes onderhou word, veral plante en ander lewe wat lig en koolstofdioksied in biologiese materiaal omskakel. Dit is nie ’n voorspelling vir elke mikrobe nie. Dit is nie die leeftyd van die menslike beskawing nie. Dit is nie die leeftyd van die planeet nie.

Die planetêre termostaat het twee onseker instellings

Die sentrale onsekerheid is **silikaatverwering**. Koolstofdioksied los in reënwater op, reageer met silikaatgesteentes en word uiteindelik na oseane en sedimente vervoer. Vulkane gee koolstofdioksied oor geologiese tyd terug. Saam vorm hierdie prosesse deel van die karbonaat-silikaatsiklus, wat dikwels as ’n planetêre termostaat beskryf word.

In ’n warmer, natter wêreld kan verwering versnel en koolstofdioksied vinniger verwyder. Wetenskaplikes weet egter nie hoe sterk daardie reaksie die aarde onder ’n helderder toekomstige Son sal beheer nie. Jacob Haqq-Misra en Eric Wolf het daarom nie een sogenaamd korrekte pad gekies nie. Hulle het twee **eindlede** gemodelleer: doelbewus uiterste gevalle wat gebruik word om onsekerheid af te baken.

- In die **swakverwering-eindlid** bly atmosferiese koolstofdioksied op 400 dele per miljoen terwyl die helderder Son die temperatuur verhoog.
- In die **sterkverwering-eindlid** bly die globale gemiddelde oppervlaktemperatuur op 288 kelvin, ongeveer 15 grade Celsius, terwyl koolstofdioksied afgetrek word namate sonlig toeneem.

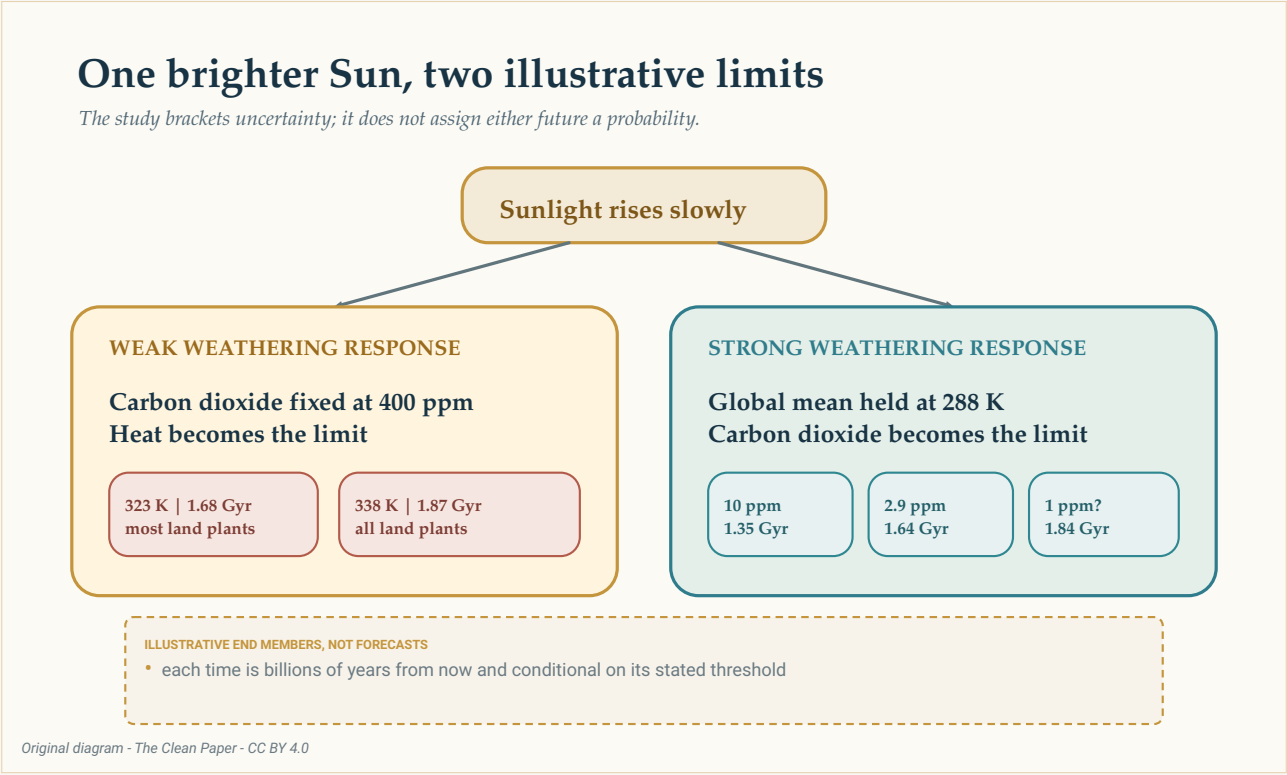
Nie een van die takke word as die aarde se werklike toekoms aangebied nie. Die eerste vra wat hitte sou doen as koolstofdioksied hoog bly. Die tweede vra wat koolstoftekort sou doen as verwering die

globale temperatuur naby vandag se gemiddelde hou.

Hoe kan verwering soos 'n termostaat werk?

Die analogie gaan oor terugvoer, nie 'n letterlike beheerknop nie. Wanneer 'n warmer klimaat chemiese verwering versnel, kan meer atmosferiese koolstofdioksied in opgeloste materiaal, minerale en sedimente beland. Die verwydering van daardie kweekhuisgas werk 'n deel van die oorspronklike verwarming teen. Oor baie lang tydskale gee vulkaniese uitgassing koolstofdioksied terug.

Die sterkte van elke skakel hang af van reënval, blootgestelde gesteente, erosie, biologie, tektoniek en oseaanchemie. Daarom toets die artikel beperkende reaksies in plaas daarvan om die termostaat as 'n bekende masjien te behandel.



Die artikel baken 'n onseker toekoms met twee illustratiewe eindlede af. As verwering swak reageer, bereik stygende hitte die aangenome drempels vir landplante. As dit sterk reageer, bereik dalende koolstofdioksied die aangenome fotosintesedrempels. Dit is voorwaardelike modeltakke, nie waarskynlikhede of afteldatums nie.

The Clean Paper CC BY 4.0

Nege-en-twintig gestabiliseerde modelwêrelde, nie een film van twee miljard jaar nie

Die navorsers het ExoCAM, 'n driedimensionele globale klimaatmodel, gebruik om **29 bestendige klimaatstoestande** oor kombinasies van sterker sonlig en laer koolstofdioksied te bereken. Elke geval is vir 70 modeljare geloop. Hier is een modeljaar een gesimuleerde jaarlikse siklus onder vaste toestande: dit is looptyd om die kunsmatige klimaat te laat stabiliseer, nie een stap in 'n jaar-vir-jaar-voorspelling van die aarde se toekoms nie. Die laaste 20 jaar is gemiddeld nadat die gesimuleerde klimaat tyd gehad het om te stabiliseer.

Daardie 29 gevalle is afsonderlike modelwêrelde. Elke lopie is een punt in 'n rooster en antwoord: "watter gestabiliseerde klimaat pas by hierdie gekose paar van sonlig en koolstofdioksied?" Die rekenaar het nie met vandag se aarde begin en sy atmosfeer, gesteentes, oseane en lewende dinge voortdurend oor die volgende twee miljard jaar laat ontwikkel nie. Die outeurs het eerder die twee skematiese verweringspaaie deur daardie vooraf berekende punte gevolg; die pad tussen punte is nie self gesimuleer nie.

Die tabel gee die kombinasies van sonlig en koolstofdioksied uit die amptelike modeldata-argief weer. Die geval-ID's is leeshulpmiddels wat hier in argiefvolgorde bygevoeg is. **S/S0** is die relatiewe sonkonstante: die inkomende sonenergie wat in die model gebruik word, gedeel deur die huidige waarde daarvan, S0. 'n Waarde van 1,2 beteken dus 20 persent meer inkomende sonenergie as vandag. **CO2 (dpm)** is die mengverhouding van atmosferiese koolstofdioksied in molekules per miljoen atmosferiese molekules.

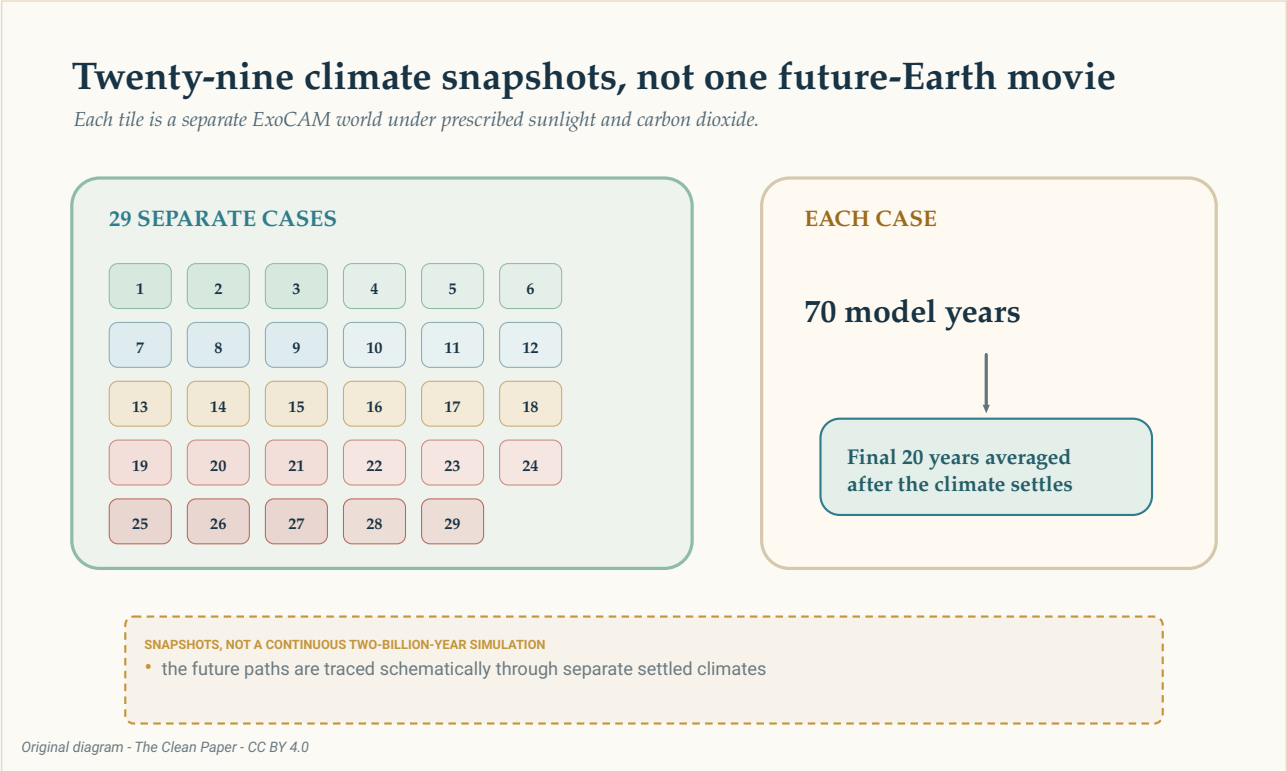
Geval-ID	S/S0	CO2 (dpm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

Geval-ID	S/S0	CO2 (dpm)
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

Die modelaarde is herkenbaar, maar doelbewus beperk. Dit is aardgroot en gebruik hedendaagse geografie. Dit het ’n vereenvoudigde plaatoseaan in plaas van ’n volledig sirkulerende oseaan, atmosferiese druk wat ongeveer op die aarde se huidige waarde gestel is (een bar), en vaste metaan. Sy baan is volmaak sirkelvormig (nul eksentrisiteit), en sy rotasie-as het geen helling nie (nul obliwiteit). Dit bevat geen eksplisiete grond, plantegroei of terugvoer van ’n veranderende biosfeer nie. Die belangrikste is dat die klimaatmodel nie dinamies aan ’n gesteenteverweringsmodel gekoppel is nie. Met ander woorde, ExoCAM bereken nie verwering, gebruik dit om koolstofdioksied by te werk en laat dan die volgende klimaat in ’n terugvoerlus loop nie. Die navorsers het eerder die twee beperkende paaie voorgeskryf en hulle deur die 29-geval-klimaatrooster gevolg.

Wat beteken “bestendige toestand” in ’n klimaatmodel?

’n Bestendigetoestand-geval is ’n modelklimaat wat toegelaat word om onder een gekose Son en atmosfeer te stabiliseer. Die weer verander steeds van dag tot dag en jaar tot jaar binne die simulasie, maar sy langtermyngemiddeldes hou op om sterk te dryf.
Dit is nuttig om te vra: “watter klimaat pas by hierdie toestande?” Dit verskil daarvan om die presiese roete te voorspel waarlangs die werklike aarde van een stel toestande na die volgende beweeg.



Elke teël is 'n afsonderlike ExoCAM-klimaatlopie van 70 modeljare, met die laaste 20 jaar gemiddeld. Die studie het 29 gestabiliseerde klimate oor voorgeskrewe sonlig- en koolstofdioksiedtoestande bemonster; dit het nie een aarde wat voortdurend ontwikkel vir twee miljard jaar gesimuleer nie.

The Clean Paper CC BY 4.0

Eindlid een: genoeg koolstofdioksied, te veel hitte

In die swakverwering-tak bly koolstofdioksied vas op 400 dele per miljoen. Namate soninset toeneem, word hitte die beperkende faktor.

Die artikel gebruik twee globale gemiddelde temperatuurdrempels uit vorige werk:

- By **323 kelvin**, ongeveer **50 grade Celsius** as 'n globale jaarlikse gemiddelde, word die wêreld as te warm vir die meeste landplante beskou. Die model bereik daardie drempel oor ongeveer **1,68 miljard jaar**.
- By **338 kelvin**, ongeveer **65 grade Celsius** as 'n globale jaarlikse gemiddelde, word die wêreld as te warm vir alle landplante beskou. Die model bereik daardie drempel oor ongeveer **1,87 miljard jaar**.

Dit is aangenome biologiese perke, nie universele temperature waarby elke fotosintetiese organisme noodwendig faal nie. 'n Globale gemiddelde verberg ook groot streeksverskille. Die studie ondersoek afsonderlik waar kombinasies van temperatuur en water geskik kan bly, maar 'n etiket op 'n klimaatkaart kan nie elke toekomstige toevlugsoord of aanpassing katalogiseer nie.

Eindlid twee: verdraagbare temperatuur, te min koolstofdioksied

In die sterkverwering-tak word die globale gemiddelde temperatuur op 288 kelvin, ongeveer 15 grade Celsius, gehou terwyl atmosferiese koolstofdioksied daal. Hier hang die antwoord af van hoe min koolstof verskillende fotosintetiese paaie moontlik kan gebruik.

- By die tradisionele **10 dele per miljoen**-drempel—10 koolstofdioksiedmolekules vir elke miljoen atmosferiese molekules—word die grens vir C4-fotosintese oor ongeveer **1,35 miljard jaar** bereik. C4-fotosintese word deur plante soos mielies en suikerriet gebruik en konsentreer koolstofdioksied rondom die ensiem wat dit vaslê.
- Die gebruik van 'n alternatiewe **2,9 dele per miljoen**-C4-drempel wat in vorige werk bespreek is, verskuif dit tot ongeveer **1,64 miljard jaar**.
- 'n Voorlopige drempel van **1 deel per miljoen**, wat verband hou met die moontlike voortbestaan van sommige CAM-plante—plante wat krassulaseaanse suurmetabolisme gebruik en koolstofdioksiedopname snags van die gebruik daarvan bedags skei—of waterplante wat opgeloste bikarbonaat kan gebruik, verskuif dit tot ongeveer **1,84 miljard jaar**.

Die laaste getal dra die grootste biologiese voorbehoud. Die outeurs noem die grens van een deel per miljoen uitdruklik voorlopig. Dit is nie 'n eksperimenteel vasgestelde oorlewingsdrempel vir alle CAM-plante of waterplante onder toekomstige aardtoestande nie.

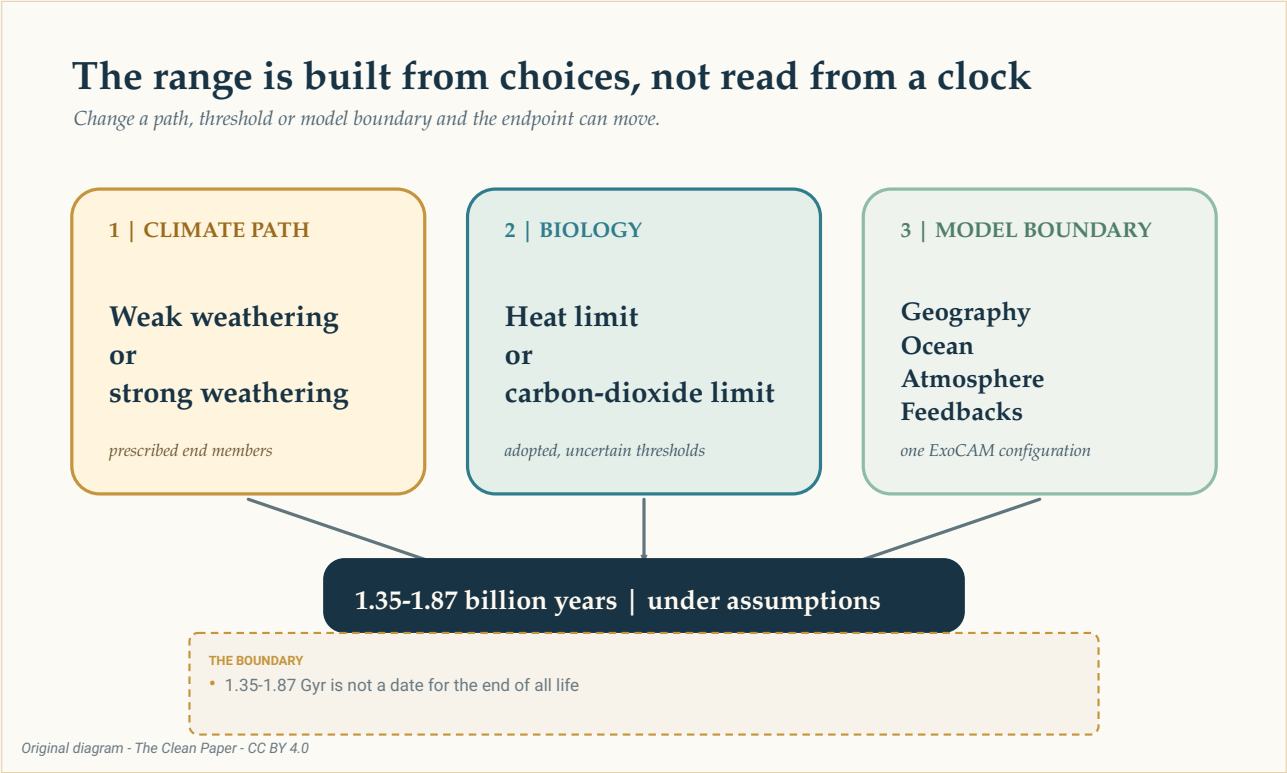
> **C3, C4 en CAM is strategieë, nie 'n rangorde nie**
>
> Plante gebruik verskillende biochemiese roetes om koolstof vas te vang. **C3-fotosintese** is die algemeenste. **C4-fotosintese**, wat deur plante soos mielies en suikerriet gebruik word, konsentreer koolstofdioksied rondom die ensiem wat koolstof vaslê en kan beter werk wanneer koolstofdioksied skaars is. **Krassulaseaanse suurmetabolisme (CAM)** skei koolstofopname en -gebruik oor nag en dag, wat baie plante help om water te bespaar.
> Dit is families van strategieë met baie verskille op spesievlak, nie opeenvolgende range van "beter" plante nie. Die artikel se baie lae koolstofdioksieddrempels is aannames om moontlike perke te verken, nie waarborge dat 'n toekomstige ekosisteem sal ontwikkel om hulle te gebruik nie.

Waarom 1,86 miljard jaar nie 'n vervaldatum is nie

Die artikel se hoofskatting van ongeveer **1,86 miljard jaar** is 'n gemiddelde van die twee optimistiese boonste eindpunte: 1,84 miljard jaar in die koolstofdioksiedbeperkte tak en 1,87 miljard jaar in die hittebeperkte tak. Dit is 'n kompakte opsomming van twee verskillende scenario's. Dit is nie 'n derde modelresultaat met groter presisie nie, en dit is nie 'n beste-skatting-datum nie.

Selfs die breër reeks van 1,35 tot 1,87 miljard jaar dra nie een waarskynlikheid nie. Die onderste en

boonste waardes hang van verskillende verweringsaannames, verskillende biologiese drempels en een klimaatmodelkonfigurasie af. Die reeks meet die keuses in die eksperiment net soveel as wat dit tyd meet.



Die reeks van 1,35 tot 1,87 miljard jaar ontstaan eers nadat 'n verweringspad, 'n biologiese drempel en 'n modelgrens gekies is. Dit is 'n kaart van aannames, nie 'n horlosie wat eindig met die uitsterwing van alle lewe nie.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ander grense kan eerste aanbreek

Die langste skattings vir die vegetatiewe biosfeer nader 'n afsonderlike en onseker grens: 'n vogtige of wegholkweekhuis wat groot oseaanverlies kan aandryf. Klimaatmodelle verskil aansienlik oor wanneer daardie toestande onder toenemende sonlig begin, veral ver van huidige toestande. Sommige skattings plaas hulle vóór die mees optimistiese fotosinteselimiet.

Dit beteken die boonste tak kan nie as 'n belofte gelees word dat die aarde sy oseane, bekende vastelande of bewoonbare oppervlaktoestande tot 1,87 miljard jaar van nou af sal behou nie. Die model sluit ook nie toekomstige plaattektoniek, veranderinge in landoppervlakte, ontwikkelende ekosisteme of 'n volledig dinamiese oseaan in nie. Sy berekeninge van hoe die atmosfeer energie absorbeer en uitstraal, word ook in regimes van intense sonlig en uiters lae koolstofdioksied gedruk waar verskillende modelle uiteenloop.

Evolusionêre aanpassing en tegnologiese ingryping verskyn in die artikel se bespreking as moont-

likhede. Dit is nie uitsette van die 29 klimaatsimulasies nie. Die model toon nie toekomstige organismes wat ’n fotosintetiese pad vir een deel per miljoen ontwikkel nie, en dit toon nie ’n beskawing wat die atmosfeer vir ’n miljard jaar bestuur nie.

Dit is nie ’n resultaat oor vandag se klimaatkrisis nie

Sonverheldering werk oor honderde miljoene tot miljarde jare. Moderne mensgedrewe verwarming kom van vinnig toenemende kweekhuisgasse oor dekades en eeue. Dit is verskillende dryfkragte, op radikaal verskillende tydskale, wat verskillende vrae beantwoord.

Niks in hierdie studie verswak die bewyse vir huidige klimaatsverandering of voer aan dat optrede uitgestel moet word nie. ’n Biosfeer wat onder een verre modelscenario moontlik ’n mate van fotosintetiese lewe behou, is nie dieselfde as ’n klimaat waarin vandag se samelewings en ekosisteme veilig bly nie.

Die artikel is waardevol omdat dit ’n verre vraag meer gedissiplineerd maak. Dit toon dat vroeëre, eenvoudiger modelle moontlik te veel verhit het wanneer sonlig toegeneem het terwyl koolstofdioksied vas gebly het, en dat fotosintetiese lewe moontlik meer roetes tot voortbestaan het as wat een kanonieke koolstofdrempel voorstel. Dit toon ook waarom elke ekstra breukdeel van ’n miljard jaar aan ’n ketting van aannames gekoppel is.

Die Son wat ’n blaar voed, verander stadig. Of die aarde nog 1,35, 1,87 of ’n ander aantal miljard jaar groen bly, sal daarvan afhang dat gesteentes, water, atmosfeer en lewe saam reageer. Die eerlike resultaat is nie ’n datum nie. Dit is ’n breër blik op die ooreenkoms.

Kortliks

’n Driedimensionele klimaatstudie vra hoe lank die aarde se vegetatiewe—fotosintetiese—biosfeer moontlik kan voortbestaan namate die Son stadig helderder word. Die navorsers het 29 afsonderlike bestendigetoestand-klimate bereken en twee illustratiewe eindlede daardeur gevolg. Met swak verwering en koolstofdioksied vas op 400 dele per miljoen word aangenome hittegrense vir landplante oor ongeveer 1,68 en 1,87 miljard jaar bereik. Met sterk verwering en die globale gemiddelde temperatuur vas op 288 kelvin, ongeveer 15 grade Celsius, word aangenome koolstofdioksiedgrense vir fotosintese oor ongeveer 1,35, 1,64 en, met ’n voorlopige drempel, 1,84 miljard jaar bereik. Die dikwels aangehaalde 1,86 miljard jaar is bloot die afgeronde gemiddelde van die twee optimistiese boonste eindpunte. Dit is scenariogebonde modelreekse, nie ’n datum waarop die aarde, die mensdom of alle lewe sal eindig nie. Die model gebruik voorgeskrewe paaie, huidige geografie, ’n plaatoseaan en geen eksplisiete grond-plantegroei- of klimaat-verweringskoppeling nie, en die langste skattings nader onseker kweekhuis- en oseaanverliesgrense.

Nugtere beoordeling

Wat die artikel toon: In hierdie ExoCAM-konfigurasie word driedimensionele klimate oor die algemeen minder warm onder toenemende sonlig en vaste koolstofdioksied as die vereenvoudigde modelle wat vir vergelyking gebruik is. Oor twee voorgeskrewe verweringseindlede en verskeie aangenome biologiese drempels val die grense vir die vegetatiewe biosfeer tussen ongeveer 1,35 en 1,87 miljard jaar van nou af.

Wat geloofwaardig maar nie vasgestel is nie: Dat sommige CAM-plante of waterplante wat opgeloste bikarbonaat gebruik, fotosintese naby een deel per miljoen atmosferiese koolstofdioksied kan volhou; dat aanpassing of tegnologie fotosintetiese lewe verder kan verleng; en dat die werklike klimaatverweringspad tussen die twee modeleindlede sal bly.

Wat dit nie toon nie: ’n Vaste datum vir die einde van alle plante, alle lewe, die menslike beskawing, die aarde se oseane of die planeet; een deurlopende simulasie van die volgende twee miljard jaar; of enige rede om huidige mensveroorsaakte klimaatsverandering te onderskat.

Belangrikste beperkings: Nege-en-twintig bestendigetoestand-gevalle uit een klimaatmodelfamilie; voorgeskrewe eerder as dinamies gekoppelde verweringspaaie; hedendaagse geografie; ’n plaatoseaan; vaste metaan; nul obliwiteit en eksentrisiteit; geen eksplisiete grond, plantegroei of biosfeerterugvoer nie; onseker hitte- en koolstofdioksieddrempels; en groot modelverskille naby vogtige en wegholkweekhuistoestande.

Hoeveel vertroue behoort ’n algemene leser te hê? Hoë vertroue dat die studie die geloofwaardige modelreeks verbreed en die aannames identifiseer wat dit beheer. Matige vertroue in die numeriese omvang as ’n nuttige afbakening binne hierdie model. Lae vertroue in enige presiese datum, omdat die verste eindpunte van doelbewus uiterste klimaatpaaie en onseker biologie afhang.

Bronne

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