The Clean Paper

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

Hur länge kan jorden förbli grön? En klimatmodell ger intervall, inte ett domedagsdatum

Tjugonio tredimensionella klimatsimuleringar placerar olika gränser för jordens fotosyntetiska biosfär mellan ungefär 1,35 och 1,87 miljarder år från nu. Värdena beror på avsiktligt förenklade antaganden om vittring, värme och de lägsta koldioxidnivåer som växter kan tänkas använda. De förutsäger inte när alla växter, allt liv, civilisationen eller planeten tar slut.

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

Hur länge kan jorden förbli grön? En klimatmodell ger intervall, inte ett domedagsdatum

Ett blad lever inom en snäv överenskommelse. Det behöver ljus, vatten, koldioxid och en temperatur som dess kemi tål. Under en människas liv verkar solen vara den fasta delen av överenskommelsen. Över en miljard år är den inte det.

När solen åldras på huvudserien blir den långsamt ljusare. Mer solljus värmer jorden, men planeten har en långsiktig motreaktion: reaktioner mellan regnvatten, koldioxid och silikatbergarter kan avlägsna koldioxid ur atmosfären. Det försvagar växthuseffekten och motverkar en del av uppvärmningen. Samma reaktion som kyler planeten kan till slut beröva fotosyntetiska organismer det kol som de använder för att bygga levande vävnad.

En ny studie i Journal of Geophysical Research: Atmospheres frågar vilken gräns som kan nås först: för mycket värme eller för lite koldioxid. Svaret är inte ett datum då jorden dör. Längs två avsiktligt förenklade framtidsvägar ligger de antagna gränserna för fotosyntetiskt liv mellan ungefär **1,35 och 1,87 miljarder år från nu**.

Intervallet gäller den **vegetativa biosfären**: den del av jordens levande system som upprätthålls av fotosyntetiska organismer, särskilt växter och annat liv som omvandlar ljus och koldioxid till biologiskt material. Det är inte en prognos för varje mikrob. Det är inte den mänskliga civilisationens livslängd. Det är inte planetens livslängd.

Planetens termostat har två osäkra inställningar

Den centrala osäkerheten är **silikatvittring**. Koldioxid löses i regnvatten, reagerar med silikatbergarter och förs så småningom mot hav och sediment. Vulkaner återför koldioxid över geologisk tid. Tillsammans ingår processerna i karbonat–silikatcykeln, som ofta beskrivs som en planetär termostat.

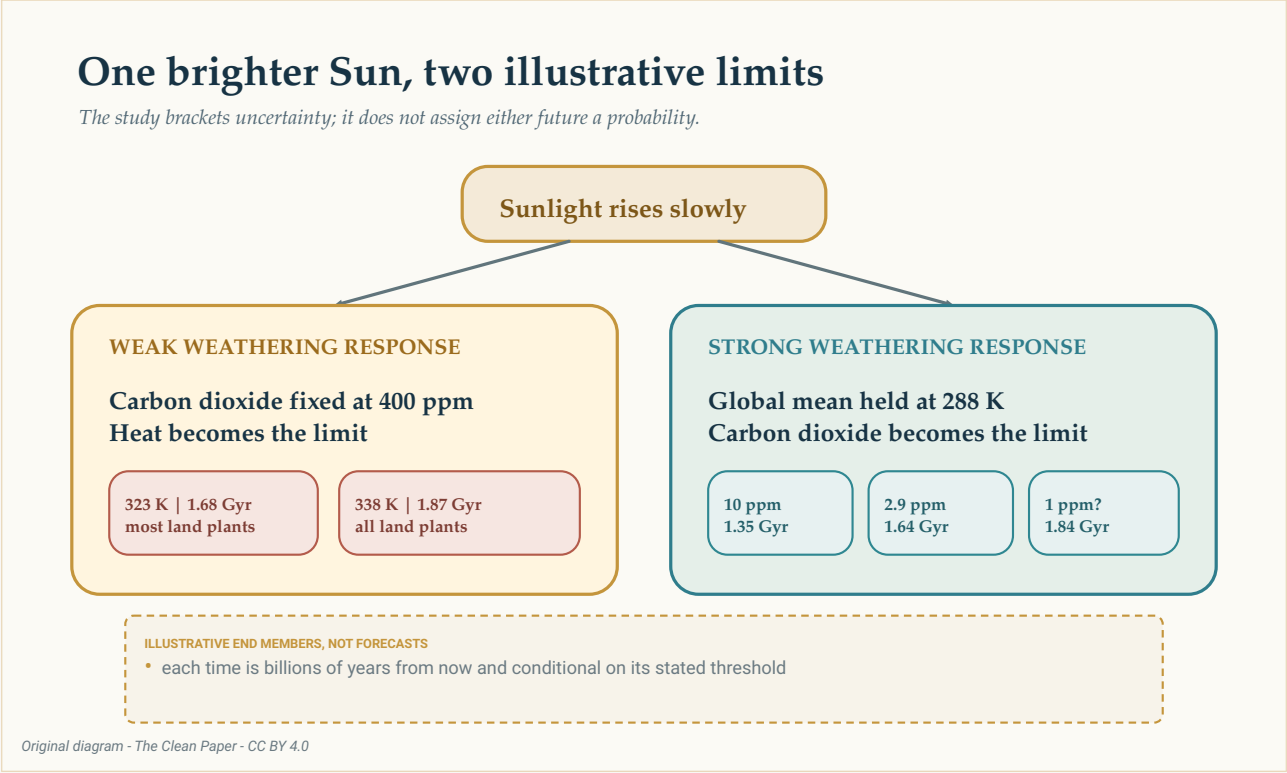
I en varmare och fuktigare värld kan vittringen gå snabbare och avlägsna koldioxid fortare. Men forskarna vet inte hur starkt denna respons kommer att styra jorden under en ljusare framtida sol. Jacob Haqq-Misra och Eric Wolf valde därför inte en enda påstått korrekt väg. De modellerade två **extremfall**: avsiktligt ytterliga fall som avgränsar osäkerheten.

- I extremfallet med **svag vittring** ligger atmosfärens koldioxid kvar på 400 miljondelar medan den ljusare solen höjer temperaturen.
- I extremfallet med **stark vittring** hålls den globala medeltemperaturen vid ytan på 288 kelvin, omkring 15 grader Celsius, medan koldioxiden dras ned när solljuset ökar.

Ingen av grenarna presenteras som jordens verkliga framtid. Den första frågar vad värmen skulle göra om koldioxiden förblev hög. Den andra frågar vad kolbrist skulle göra om vittringen höll den globala temperaturen nära dagens medelvärde.

Hur kan vittring fungera som en termostat?

Analogin gäller återkoppling, inte ett bokstavligt reglage. När ett varmare klimat påskyndar kemisk vittring kan mer koldioxid från atmosfären hamna i lösta ämnen, mineral och sediment. Att avlägsna denna växthusgas motverkar en del av den ursprungliga uppvärmningen. På mycket långa tidsskalor återför vulkanisk avgasning koldioxid.
Styrkan i varje länk beror på nederbörd, blottad berggrund, erosion, biologi, tektonik och havskemi. Därför testar studien begränsande responsfall i stället för att behandla termostaten som en känd maskin.



Studien avgränsar en osäker framtid med två illustrativa extremfall. Om vittringen reagerar svagt når den stigande värmen antagna trösklar för landväxter. Om den reagerar starkt når den fallande koldioxiden antagna trösklar för fotosyntes. Detta är villkorade modellgrenar, inte sannolikheter eller nedräkningsdatum.

The Clean Paper CC BY 4.0

Tjugonio stabiliserade modellvärldar, inte en två miljarder år lång film

Forskarna använde ExoCAM, en tredimensionell global klimatmodell, för att beräkna **29 stationära klimat** vid olika kombinationer av starkare solljus och lägre koldioxid. Varje fall kördes i 70 modellår. Här är ett modellår en simulerad årscykel under fasta villkor: det är körtid som låter det konst-

gjorda klimatet stabiliseras, inte ett steg i en år-för-år-prognos över jordens framtid. De sista 20 åren medelvärdesbildades efter att det simulerade klimatet fått tid att stabiliseras.

De 29 fallen är separata modellvärldar. Varje körning är en punkt i ett rutnät och besvarar frågan: ”Vilket stabiliserat klimat passar detta valda par av solljus och koldioxid?” Datorn började inte med dagens jord och lät sedan atmosfär, berg, hav och levande organismer utvecklas kontinuerligt under de kommande två miljarderna år. Författarna följde i stället de två schematiska vittringsvägarna genom dessa förberäknade punkter; själva vägen mellan punkterna simulerades inte.

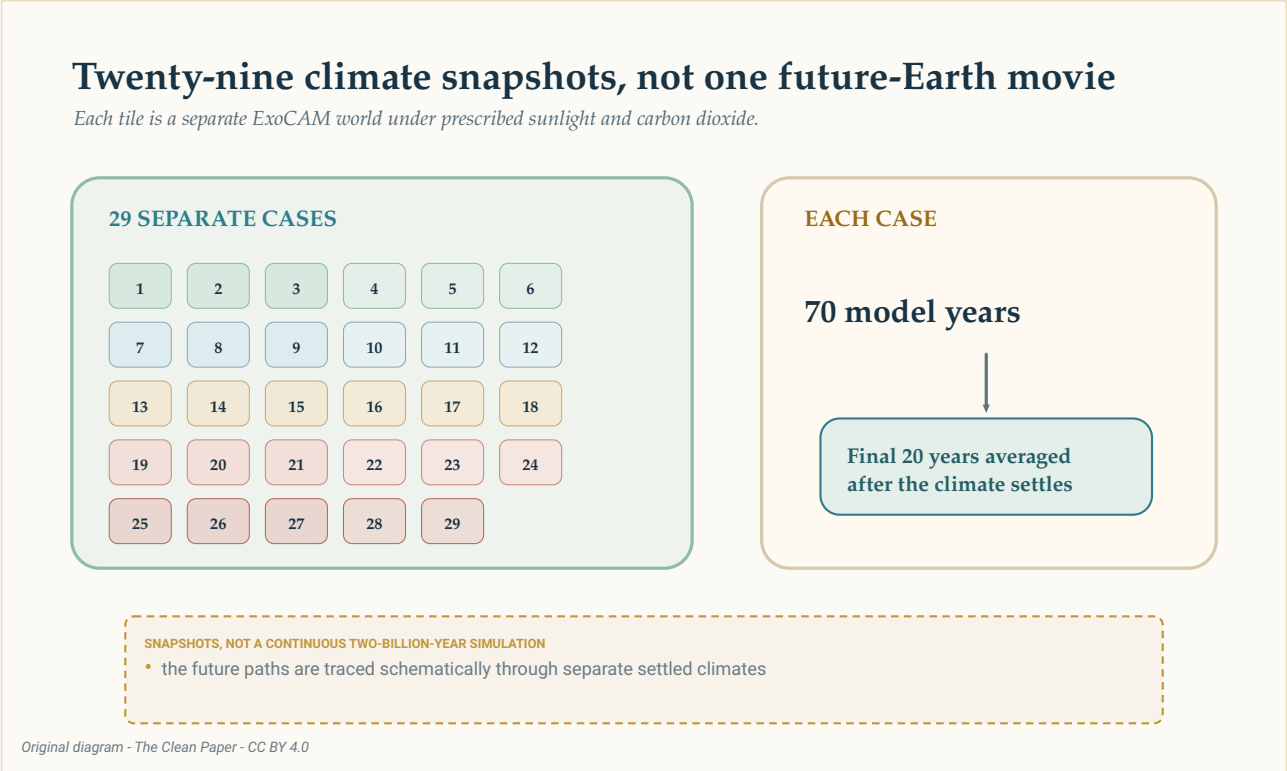
Tabellen återger kombinationerna av solljus och koldioxid i det officiella modellarkivet. Fall-ID är läshjälpmedel som lagts till här i arkivets ordning. **S/S0** är den relativa solarkonstanten: den inkommande solenergin i modellen dividerad med dagens värde, S0. Ett värde på 1,2 betyder alltså 20 procent mer inkommande solenergi än i dag. **CO2 (ppm)** är atmosfärens koldioxidblandningsförhållande i molekyler per miljon atmosfärsmolekyler.

Fall-ID	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
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

Modelljorden är igenkännbar men avsiktligt begränsad. Den är lika stor som jorden och använder dagens geografi. Den har ett förenklat skiktat hav i stället för ett fullt cirkulerande hav, atmosfärstrycket är satt till ungefär dagens jordvärde på en bar och metanhalten är fast. Banan är helt cirkulär, med noll excentricitet, och rotationsaxeln saknar lutning, med noll obliquitet. Modellen innehåller inga uttryckliga jordar, ingen vegetation och ingen återkoppling från en förändrad biosfär. Viktigast av allt är klimatmodellen inte dynamiskt kopplad till en modell för berggrundsvittring. ExoCAM beräknar med andra ord inte vittringen, använder den för att uppdatera koldioxiden och kör sedan nästa klimat i en återkopplingsslinga. Forskarna föreskrev i stället de två begränsande vägarna och följde dem genom rutnätet med 29 klimatfall.

Vad betyder "stationärt tillstånd" i en klimatmodell?

Ett stationärt fall är ett modellklimat som får stabiliseras under en vald sol och atmosfär. Vädret varierar fortfarande från dag till dag och år till år i simuleringen, men de långsiktiga medelvärdena slutar att driva kraftigt.
Det är användbart för frågan "vilket klimat passar dessa villkor?" Det skiljer sig från att förutsäga den exakta väg längs vilken den verkliga jorden går från en uppsättning villkor till nästa.



Varje ruta är en separat ExoCAM-körning under 70 modellår, där de sista 20 åren medelvärdesbildades. Studien provtog 29 stabiliserade klimat vid föreskrivna villkor för solljus och koldioxid; den simulerade inte en enda jord som utvecklades kontinuerligt i två miljarder år.

The Clean Paper CC BY 4.0

Extremfall ett: tillräckligt med koldioxid, för mycket värme

I grenen med svag vittring ligger koldioxiden fast på 400 miljondelar. När solinstrålningen ökar blir värmen den begränsande faktorn.

Studien använder två trösklar för global medeltemperatur från tidigare forskning:

- Vid **323 kelvin**, omkring **50 grader Celsius** som globalt årsmedel, behandlas världen som för varm för de flesta landväxter. Modellen når tröskeln om ungefär **1,68 miljarder år**.
- Vid **338 kelvin**, omkring **65 grader Celsius** som globalt årsmedel, behandlas världen som för varm för alla landväxter. Modellen når tröskeln om ungefär **1,87 miljarder år**.

Detta är valda biologiska gränser, inte universella temperaturer där varje fotosyntetisk organism nödvändigtvis upphör att fungera. Ett globalt medelvärde döljer också stora regionala skillnader. Studien undersöker separat var kombinationer av temperatur och vatten kan förbli lämpliga, men en etikett på en klimatkarta kan inte katalogisera varje framtida tillflyktsort eller anpassning.

Extremfall två: uthärdlig temperatur, för lite koldioxid

I grenen med stark vittring hålls den globala medeltemperaturen på 288 kelvin, omkring 15 grader Celsius, medan koldioxiden i atmosfären sjunker. Här beror svaret på hur lite kol olika fotosyntesvägar kan tänkas använda.

- Vid den traditionella tröskeln på **10 miljondelar** — 10 koldioxidmolekyler per miljon atmosfärsmolekyler — nås gränsen för C4-fotosyntes om ungefär **1,35 miljarder år**. C4-fotosyntes används bland annat av majs och sockerrör och koncentrerar koldioxid runt det enzym som binder kolet.
- Med en alternativ C4-tröskel på **2,9 miljondelar**, som diskuterats i tidigare forskning, flyttas gränsen till omkring **1,64 miljarder år**.
- En preliminär tröskel på **1 miljondel**, kopplad till möjlig överlevnad hos vissa CAM-växter — växter som använder crassulaceansyrametabolism och skiljer nattens koldioxidupptag från användningen på dagen — eller vattenväxter som kan använda löst bikarbonat, flyttar gränsen till omkring **1,84 miljarder år**.

Det sista talet har det största biologiska förbehållet. Författarna kallar uttryckligen gränsen på en miljondel preliminär. Den är inte en experimentellt fastställd överlevnadströskel för alla CAM-växter eller all vattenvegetation under framtida jordförhållanden.

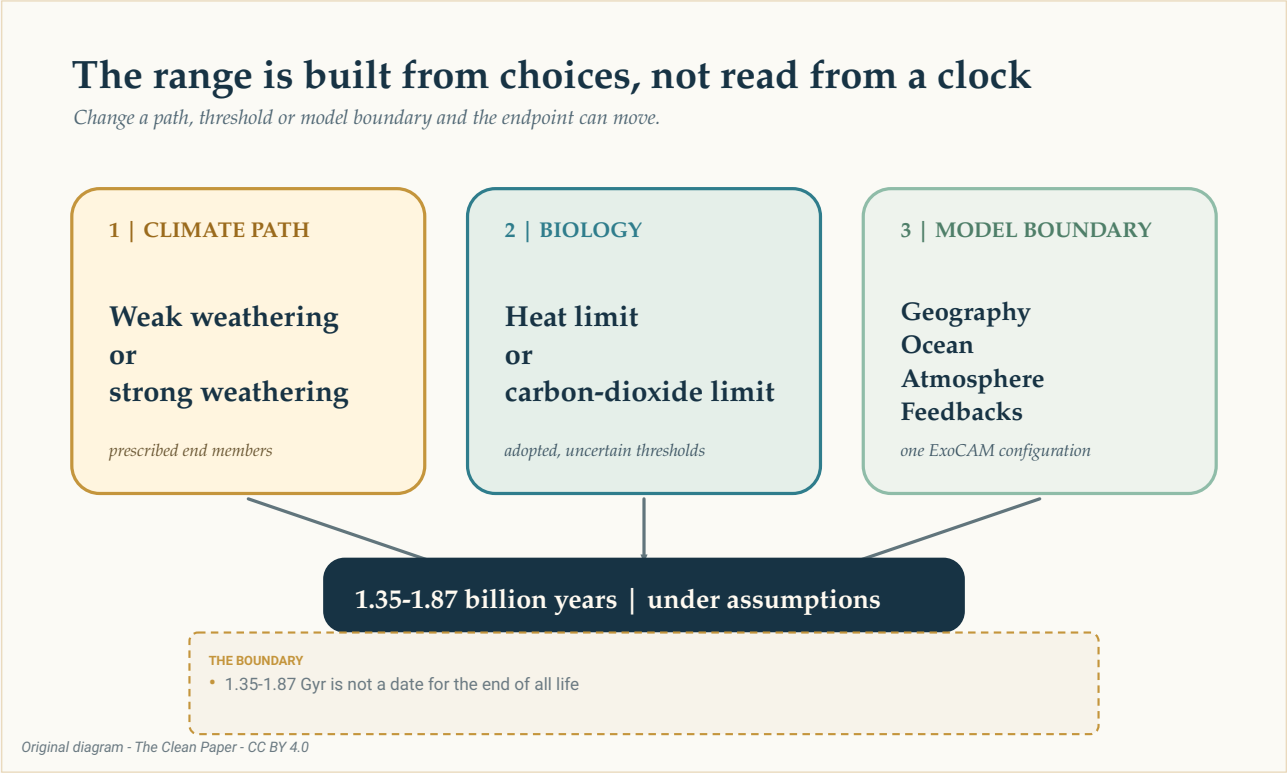
> **C3, C4 och CAM är strategier, inte en rangordning**
>
> Växter använder olika biokemiska vägar för att fånga kol. **C3-fotosyntes** är vanligast. **C4-fotosyntes**, som används av bland annat majs och sockerrör, koncentrerar koldioxid runt det

> enzym som binder kol och kan fungera bättre när koldioxid är knapp. **Crassulaceansyrametabolism (CAM)** skiljer kolupptag och användning mellan natt och dag och hjälper många växter att spara vatten.
> Det är familjer av strategier med många artspecifika skillnader, inte successiva nivåer av ”bättre” växter. Studiens mycket låga koldioxidtrösklar är antaganden för att utforska möjliga gränser, inte garantier för att ett framtida ekosystem utvecklar förmågan att använda dem.

Varför 1,86 miljarder år inte är ett utgångsdatum

Studiens rubrikvärde på omkring **1,86 miljarder år** är medelvärdet av de två optimistiska övre ändpunkterna: 1,84 miljarder år i den koldioxidbegränsade grenen och 1,87 miljarder år i den värmebegränsade grenen. Det är en kompakt sammanfattning av två olika scenarier. Det är inte ett tredje modellresultat med större precision och inte ett bästa skattat datum.

Inte ens det bredare intervallet 1,35–1,87 miljarder år har en enda sannolikhet. Dess nedre och övre värden beror på olika antaganden om vittring, olika biologiska trösklar och en viss klimatmodellkonfiguration. Intervallet mäter experimentets val lika mycket som det mäter tid.



Intervallet 1,35–1,87 miljarder år uppstår först efter val av en vittringsväg, en biologisk tröskel och modellens gränser. Det är en karta över antaganden, inte en klocka som slutar med allt livs utrotning.

The Clean Paper CC BY 4.0

Andra gränser kan komma först

De längsta uppskattningarna för den vegetativa biosfären närmar sig en separat och osäker gräns: ett fuktigt eller skenande växthustillstånd som kan driva en omfattande förlust av haven. Klimatmodeller skiljer sig kraftigt i frågan om när sådana tillstånd börjar under ökande solljus, särskilt långt från dagens villkor. Vissa uppskattningar placerar dem före den mest optimistiska gränsen för fotosyntes.

Den övre grenen kan därför inte läsas som ett löfte om att jorden behåller sina hav, välbekanta kontinenter eller beboeliga ytförhållanden till 1,87 miljarder år från nu. Modellen omfattar inte heller framtida plattektonik, förändringar i landareal, utvecklande ekosystem eller ett fullt dynamiskt hav. Dess beräkningar av hur atmosfären absorberar och avger energi pressas dessutom in i områden med intensivt solljus och extremt låg koldioxid där olika modeller ger olika svar.

Evolutionär anpassning och tekniska ingrepp nämns som möjligheter i studiens diskussion. De är inte resultat från de 29 klimatsimuleringarna. Modellen visar inte att framtida organismer utvecklar fotosyntes vid en miljondel koldioxid, och den visar inte att en civilisation förvaltar atmosfären i en miljard år.

Detta är inte ett resultat om dagens klimatkris

Solens ökande ljusstyrka verkar över hundratals miljoner till miljarder år. Dagens människodrivna uppvärmning orsakas av snabbt ökande växthusgaser över årtionden och århundraden. Det är olika drivkrafter på radikalt olika tidsskalor som besvarar olika frågor.

Ingenting i studien försvagar beläggen för dagens klimatförändringar eller talar för att skjuta upp åtgärder. En biosfär som under ett avlägset modellscenario kan behålla visst fotosyntetiskt liv är inte samma sak som ett klimat där dagens samhällen och ekosystem är trygga.

Studien är värdefull eftersom den gör en avlägsen fråga mer disciplinerad. Den visar att tidigare, enklare modeller kan ha blivit för varma när solljuset ökade medan koldioxiden hölls fast, och att fotosyntetiskt liv kan ha fler vägar till fortsatt existens än en enda kanonisk koltröskel antyder. Den visar också varför varje ytterligare bråkdel av en miljard år kommer med en kedja av antaganden.

Solen som försörjer ett blad förändras långsamt. Om jorden förblir grön i ytterligare 1,35, 1,87 eller något annat antal miljarder år beror på att berg, vatten, atmosfär och liv reagerar tillsammans. Det ärliga resultatet är inte ett datum. Det är en vidare bild av överenskommelsen.

Kort sammanfattning

En tredimensionell klimatstudie frågar hur länge jordens vegetativa — fotosyntetiska — biosfär kan bestå när solen långsamt blir ljusare. Forskarna beräknade 29 separata stationära klimat och följde två illustrativa extremfall genom dem. Vid svag vittring och koldioxid fast på 400 miljondelar nås

antagna värmegränser för landväxter om omkring 1,68 och 1,87 miljarder år. Vid stark vittring och en global medeltemperatur fast på 288 kelvin, omkring 15 grader Celsius, nås antagna koldioxidgränser för fotosyntes om cirka 1,35, 1,64 och, med en preliminär tröskel, 1,84 miljarder år. Det ofta citerade värdet 1,86 miljarder år är bara det avrundade medelvärdet av de två optimistiska övre ändpunkterna. Detta är scenarioberoende modellintervall, inte ett datum då jorden, mänskligheten eller allt liv tar slut. Modellen använder föreskrivna vägar, dagens geografi, ett skiktat hav och ingen uttrycklig koppling mellan jord–vegetation eller klimat–vittring, och de längsta uppskattningarna närmar sig osäkra gränser för växthuseffekt och havsförlust.

Rakt på sak

Vad studien visar: I denna ExoCAM-konfiguration blir de tredimensionella klimaten i allmänhet mindre varma under ökande solljus och fast koldioxid än de förenklade modeller som används som jämförelse. Över två föreskrivna extremfall för vittring och flera antagna biologiska trösklar ligger gränserna för den vegetativa biosfären mellan ungefär 1,35 och 1,87 miljarder år från nu.

Vad som är rimligt men inte fastställt: Att vissa CAM-växter eller vattenväxter som använder löst bikarbonat skulle kunna upprätthålla fotosyntes nära en miljondel koldioxid i atmosfären; att anpassning eller teknik kan förlänga det fotosyntetiska livet ytterligare; och att den verkliga klimat–vittringsvägen förblir mellan modellens två extremfall.

Vad den inte visar: Ett fast datum för slutet på alla växter, allt liv, den mänskliga civilisationen, jordens hav eller planeten; en sammanhängande simulering av de kommande två miljarderna år; eller något skäl att bortse från dagens människoskapade klimatförändring.

Huvudsakliga begränsningar: Tjugonio stationära fall från en klimatmodellfamilj; föreskrivna i stället för dynamiskt kopplade vittringsvägar; dagens geografi; ett skiktat hav; fast metan; noll obliquitet och excentricitet; inga uttryckliga jordar, ingen vegetation eller biosfäråterkoppling; osäkra värme- och koldioxidtrösklar; samt stor oenighet mellan modeller nära fuktiga och skenande växthustillstånd.

Hur stor tilltro bör en allmän läsare ha? Hög tilltro till att studien breddar det rimliga modellintervallet och identifierar de antaganden som styr det. Måttlig tilltro till det numeriska intervallet som en användbar avgränsning inom modellen. Låg tilltro till ett exakt datum, eftersom de mest avlägsna ändpunkterna beror på avsiktligt extrema klimatvägar och osäker biologi.

Källor

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