The Clean Paper

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

Kuinka kauan Maa voi pysyä vihreänä? Ilmastomalli antaa vaihteluvälejä, ei tuomiopäivää

Kaksikymmentäyhdeksän kolmiulotteista ilmastosimulaatiota sijoittaa Maan yhteyttävän biosfäärin erilaiset rajat noin 1,35–1,87 miljardin vuoden päähän. Arvot riippuvat tarkoituksella yksinkertaistetuista kallioperän rapautumisen ja kuumuuden kehityspoluista sekä pienimmistä hiilidioksidipitoisuuksista, joita kasvit mahdollisesti voisivat käyttää. Ne eivät ennusta, milloin kaikki kasvit, kaikki elämä, sivilisaatio tai planeetta päättyvät.

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

Kuinka kauan Maa voi pysyä vihreänä? Ilmastomalli antaa vaihteluvälejä, ei tuomiopäivää

Lehti elää kapean tasapainon varassa. Se tarvitsee valoa, vettä, hiilidioksidia ja lämpötilan, jonka sen kemia kestää. Ihmisen eliniän aikana Aurinko näyttää tämän tasapainon muuttumattomalta osalta. Miljardin vuoden mittakaavassa se ei ole sitä.

Auringon vanhetessa pääsarjassa se kirkastuu hitaasti. Lisääntynyt auringonvalo lämmittää Maata, mutta planeetalla on pitkäaikainen vastareaktio: sadeveden, hiilidioksidin ja silikaattikivien väliset reaktiot voivat poistaa hiilidioksidia ilmakehästä. Tämä heikentää kasvihuoneilmiötä ja kompensoi osan lämpenemisestä. Sama planeettaa viilentävä vaste voi lopulta viedä yhteyttäviltä eliöiltä hiilen, jota ne käyttävät elävän kudoksen rakentamiseen.

Uusi Journal of Geophysical Research: Atmospheres -julkaisu kysyy, kumpi raja voisi tulla ensin: liiallinen kuumuus vai liian vähäinen hiilidioksidi. Vastaus ei ole päivämäärä, jolloin Maa kuolee. Kahdessa tarkoituksella yksinkertaistetussa tulevaisuuden kehityskulussa yhteyttävän elämän oletetut rajat sijoittuvat noin **1,35–1,87 miljardin vuoden päähän**.

Tämä vaihteluväli koskee **kasvillista biosfääriä**: sitä osaa Maan elävästä järjestelmästä, jota yhteyttävät eliöt ylläpitävät, erityisesti kasveja ja muuta elämää, joka muuttaa valoa ja hiilidioksidia biologiseksi aineeksi. Se ei ole ennuste jokaiselle mikrobille. Se ei ole ihmiskunnan sivilisaation elinikä. Se ei ole planeetan elinikä.

Planeetan termostaatissa on kaksi epävarmaa asetusta

Keskeinen epävarmuus on **silikaattien rapautuminen**. Hiilidioksidi liukenee sadeveteen, reagoi silikaattikivien kanssa ja kulkeutuu lopulta kohti meriä ja sedimenttejä. Tulivuoret palauttavat hiilidioksidia geologisilla aikaskaaloilla. Yhdessä nämä prosessit muodostavat osan karbonaatti-silikaattikierrosta, jota kuvataan usein planeetan termostaattina.

Lämpimämmässä ja kosteammassa maailmassa rapautuminen voi nopeutua ja poistaa hiilidioksidia entistä nopeammin. Tutkijat eivät kuitenkaan tiedä, kuinka voimakkaasti tämä vaste hallitsee Maata tulevaisuuden kirkkaamman Auringon alla. Jacob Haqq-Misra ja Eric Wolf eivät siksi valinneet yhtä oletettavasti oikeaa kehityskulkua. He mallinsivat kaksi **ääripäätä**: tarkoituksella äärimmäisiä tapauksia, joilla epävarmuutta rajataan.

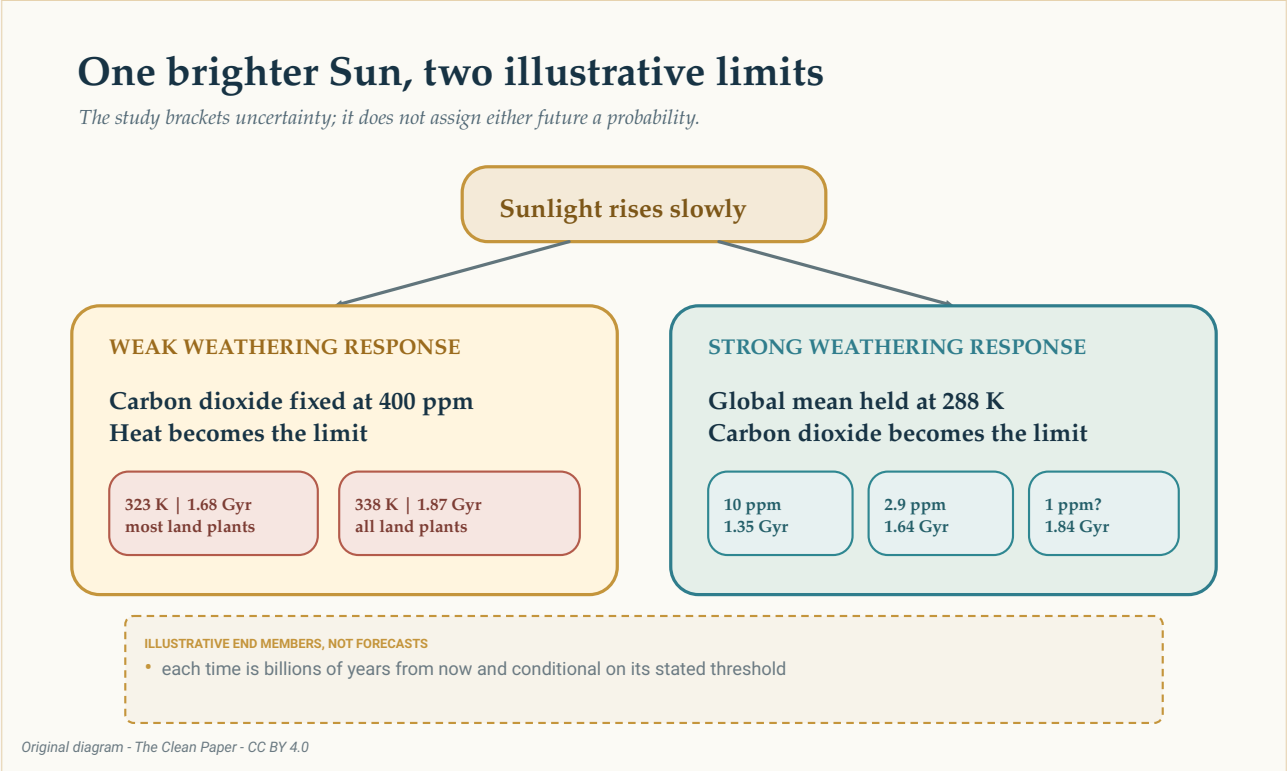
- **Heikon rapautumisen ääripäässä** ilmakehän hiilidioksidipitoisuus pysyy 400 miljoonasosassa samalla kun kirkastuva Aurinko nostaa lämpötilaa.
- **Voimakkaan rapautumisen ääripäässä** maapallon keskimääräinen pintalämpötila pysyy 288 kelvinissä eli noin 15 celsiusasteessa samalla kun hiilidioksidipitoisuus laskee auringonsäteilyn lisääntyessä.

Kumpaakaan haaraa ei esitetä Maan todellisena tulevaisuutena. Ensimmäinen kysyy, mitä kuumuus

tekisi, jos hiilidioksidipitoisuus pysyisi korkeana. Toinen kysyy, mitä hiilen puute tekisi, jos rapautuminen pitäisi maapallon keskilämpötilan lähellä nykyistä.

Miten rapautuminen voi toimia termostaattina?

Vertaus koskee takaisinkytkentää, ei kirjaimellista säätönuppia. Kun lämpimämpi ilmasto nopeuttaa kemiallista rapautumista, suurempi osa ilmakehän hiilidioksidista voi päätyä liuenneeseen aineeseen, mineraaleihin ja sedimentteihin. Tämän kasvihuonekaasun poistaminen vastustaa osaa alkuperäisestä lämpenemisestä. Hyvin pitkillä aikaskaaloilla tulivuorten kaasupäästöt palauttavat hiilidioksidia.
Jokaisen yhteyden voimakkuus riippuu sateista, paljastuneesta kallioperästä, eroosiosta, biologiasta, tektoniikasta ja merikemiasta. Siksi tutkimuksessa testataan rajaavia vasteita sen sijaan, että termostaattia käsiteltäisiin tunnettuna koneena.



Tutkimus rajaa epävarmaa tulevaisuutta kahdella havainnollistavalla ääripäällä. Jos rapautuminen reagoi heikosti, kasvava kuumuus saavuttaa maakasveille oletetut lämpörajat. Jos se reagoi voimakkaasti, laskeva hiilidioksidipitoisuus saavuttaa yhteyttämiselle oletetut rajat. Nämä ovat ehdollisia mallihaaroja, eivät todennäköisyyksiä tai lähtölaskentapäivämääriä.

The Clean Paper CC BY 4.0

Kaksikymmentäyhdeksän vakiintunutta mallimaailmaa, ei yksi kahden miljardin vuoden elokuva

Tutkijat käyttivät ExoCAMia, kolmiulotteista globaalia ilmastomallia, laskemaan **29 tasapainotilan ilmastoa** erilaisilla voimakkaamman auringonsäteilyn ja pienemmän hiilidioksidipitoisuuden yhdistelmillä. Kutakin tapausta ajettiin 70 mallivuotta. Tässä yksi mallivuosi tarkoittaa yhtä simuloitua vuosisykliä kiinteissä olosuhteissa: se on ajoaikaa, jonka avulla keinotekoinen ilmasto saa vakiintua, ei yksi askel Maan tulevaisuuden vuosi vuodelta etenevässä ennusteessa. Viimeisten 20 vuoden tuloksista laskettiin keskiarvo sen jälkeen, kun simuloitu ilmasto oli ehtinyt vakiintua.

Nämä 29 tapausta ovat erillisiä mallimaailmoja. Jokainen ajo on yksi piste ruudukossa ja vastaa kysymykseen: ”millainen vakiintunut ilmasto sopii tähän valittuun auringonsäteilyn ja hiilidioksidin yhdistelmään?” Tietokone ei aloittanut nykyisestä Maasta ja kehittänyt sen ilmakehää, kiviä, meriä ja eliöstöä jatkuvasti seuraavien kahden miljardin vuoden ajan. Sen sijaan kirjoittajat jäljittivät kaksi kaavamaista rapautumispolkua näiden ennalta laskettujen pisteiden kautta; pisteiden välistä polkua ei itsessään simuloitu.

Taulukko toistaa virallisessa mallidatan arkistossa käytetyt auringonsäteilyn ja hiilidioksidin yhdistelmät. Tapaustunnukset on lisätty tähän lukemisen helpottamiseksi arkiston järjestyksessä. **S/S0** on suhteellinen aurinkovakio: mallissa käytetty saapuva aurinkoenergia jaettuna sen nykyarvolla S0. Arvo 1,2 tarkoittaa siis 20 prosenttia enemmän saapuvaa aurinkoenergiaa kuin nykyään. **CO2 (ppm)** on ilmakehän hiilidioksidin sekoitussuhde molekyyleinä miljoonaa ilmakehän molekyyliä kohti.

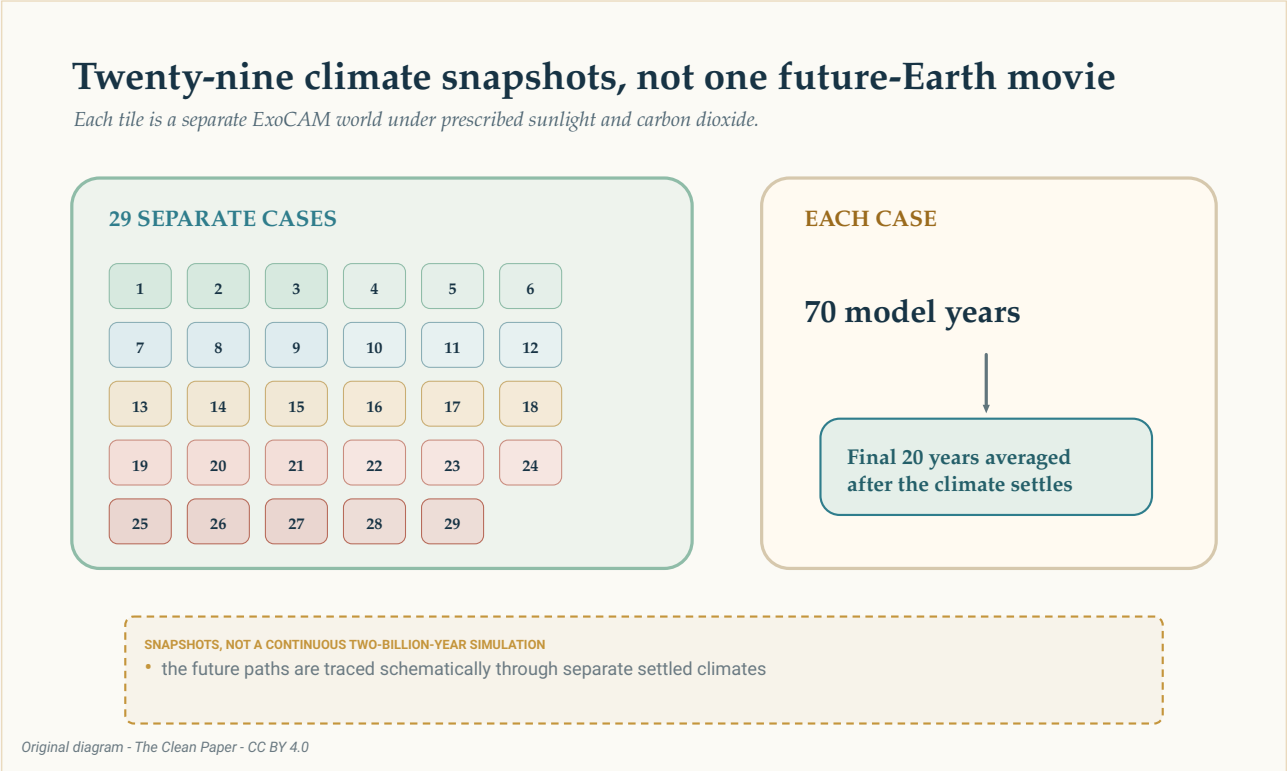
Tapaus	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

Tapaus	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

Mallin Maa on tunnistettavissa, mutta tarkoituksella rajattu. Se on Maan kokoinen ja käyttää nykyistä maantiedettä. Siinä on yksinkertaistettu laatta-meri täysin kiertävän valtameren sijasta, ilmanpaine on asetettu suunnilleen Maan nykyiseen arvoon eli yhteen baariin, ja metaanipitoisuus on kiinteä. Rata on täydellisen ympyränmuotoinen eli eksentrisyys on nolla, ja pyörimisakselilla ei ole kallistumaa eli obliikvisuus on nolla. Mallissa ei ole eksplisiittisiä maaperiä tai kasvillisuutta eikä muuttuvan biosfäärin takaisinkytkentää. Tärkeintä on, ettei ilmastomallia ole dynaamisesti kytketty kallioperän rapautumismalliin. Toisin sanoen ExoCAM ei laske rapautumista, päivitä sen perusteella hiilidioksidipitoisuutta ja aja sitten seuraavaa ilmastoa takaisinkytkentäsilmukassa. Sen sijaan tutkijat määräsivät kaksi rajaavaa polkua ja jäljittivät ne 29 tapauksen ilmastoruudukon läpi.

Mitä ”tasapainotila” tarkoittaa ilmastomallissa?

Tasapainotilan tapauksessa mallin ilmaston annetaan vakiintua yhden valitun Auringon ja ilmakehän alla. Sää vaihtelee simulaation sisällä edelleen päivästä päivään ja vuodesta vuoteen, mutta pitkän aikavälin keskiarvot eivät enää ajelehdi voimakkaasti.
Tämä on hyödyllistä kysyttäessä ”millainen ilmasto sopii näihin olosuhteisiin?” Se on eri asia kuin ennustaa tarkka reitti, jota pitkin todellinen Maa siirtyy yhdestä olosuhdejoukosta seuraavaan.



Jokainen ruutu on erillinen ExoCAM-ilmastoajo 70 mallivuodelle, ja viimeisistä 20 vuodesta laskettiin keskiarvo. Tutkimuksessa otettiin näyte 29 vakiintuneesta ilmastosta määrätyillä auringonsäteilyn ja hiilidioksidin ehdoilla; siinä ei simuloitu yhtä jatkuvasti muuttuvaa Maata kahden miljardin vuoden ajan.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ääripää yksi: riittävästi hiilidioksidia, liikaa kuumuutta

Heikon rapautumisen haarassa hiilidioksidipitoisuus pysyy kiinteänä 400 miljoonasosassa. Auringon säteilytehon kasvaessa kuumuudesta tulee rajoittava tekijä.

Tutkimus käyttää aiemmasta kirjallisuudesta kahta maapallon keskilämpötilan kynnystä:

- **323 kelvinissä**, eli noin **50 celsiusasteen** vuotuisessa globaalissa keskilämpötilassa, maailman oletetaan olevan liian kuuma useimmille maakasveille. Malli saavuttaa tämän kynnyksen noin **1,68 miljardin vuoden** kuluttua.
- **338 kelvinissä**, eli noin **65 celsiusasteen** vuotuisessa globaalissa keskilämpötilassa, maailman oletetaan olevan liian kuuma kaikille maakasveille. Malli saavuttaa tämän kynnyksen noin **1,87 miljardin vuoden** kuluttua.

Nämä ovat oletettuja biologisia rajoja, eivät yleispäteviä lämpötiloja, joissa jokainen yhteyttävä eliö välttämättä lakkaa toimimasta. Globaali keskiarvo myös peittää suuria alueellisia eroja. Tutkimus tarkastelee erikseen, missä lämpötilan ja veden yhdistelmät voisivat pysyä sopivina, mutta ilmastokartan merkintä ei voi luetteloida kaikkia tulevia turvapaikkoja tai sopeutumistapoja.

Ääripää kaksi: siedettävä lämpötila, liian vähän hiilidioksidia

Voimakkaan rapautumisen haarassa maapallon keskilämpötila pidetään 288 kelvinissä eli noin 15 celsiusasteessa samalla kun ilmakehän hiilidioksidipitoisuus laskee. Tässä vastaus riippuu siitä, kuinka vähäistä hiilimäärää eri yhteyttämisreitit voisivat käyttää.

- Perinteisellä **10 miljoonasosan** kynnyksellä — 10 hiilidioksidimolekyyliä jokaista miljoonaa ilmakehän molekyyliä kohti — C4-yhteyttämisen raja saavutetaan noin **1,35 miljardin vuoden** kuluttua. C4-yhteyttämistä käyttävät muun muassa maissi ja sokeriruoko, ja siinä hiilidioksidia keskitetään hiiltä sitovan entsyymin ympärille.
- Aiemmassa tutkimuksessa käsitellyn vaihtoehtoisen **2,9 miljoonasosan** C4-kynnyksen käyttäminen siirtää rajan noin **1,64 miljardin vuoden** päähän.
- Alustava **1 miljoonasosan** kynnys, joka liittyy joidenkin CAM-kasvien mahdolliseen säilymiseen — CAM eli crassulacean acid metabolism erottaa hiilidioksidin yöaikaisen oton sen päiväaikaisesta käytöstä — tai liuennutta bikarbonaattia hyödyntäviin vesikasveihin, siirtää rajan noin **1,84 miljardin vuoden** päähän.

Viimeiseen lukuun liittyy suurin biologinen varaus. Kirjoittajat kutsuvat yhden miljoonasosan rajaa nimenomaisesti alustavaksi. Se ei ole kokeellisesti vahvistettu selviytymiskynnys kaikille CAM-kasveille tai vesikasvillisuudelle tulevaisuuden Maan olosuhteissa.

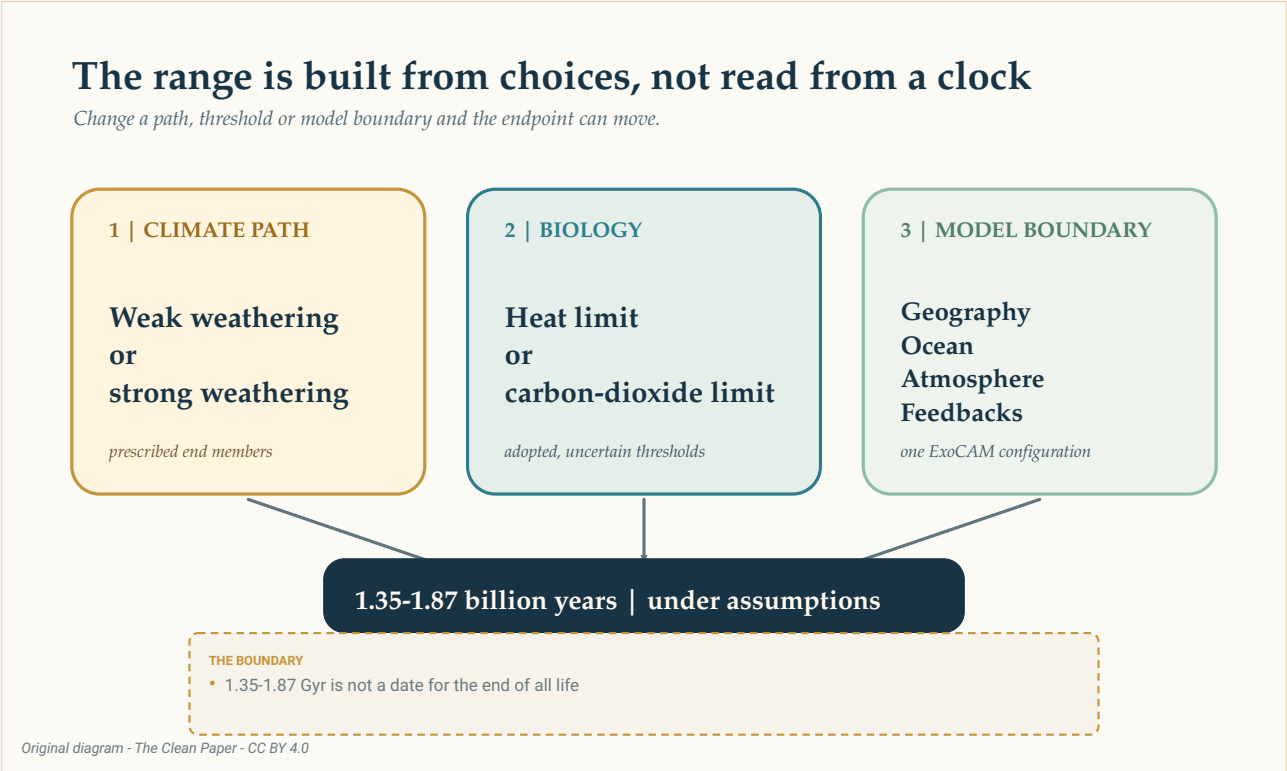
> **C3, C4 ja CAM ovat strategioita, eivät paremmuusjärjestys**
>
> Kasvit käyttävät erilaisia biokemiallisia reittejä hiilen sitomiseen. **C3-yhteyttäminen** on yleisin. **C4-yhteyttäminen**, jota käyttävät muun muassa maissi ja sokeriruoko, keskittää hiilidioksidia hiiltä sitovan entsyymin ympärille ja voi toimia paremmin, kun hiilidioksidia on vähän. **CAM-yhteyttäminen** eli crassulacean acid metabolism erottaa hiilen oton ja käytön yön ja päivän välille, mikä auttaa monia kasveja säästämään vettä.
> Nämä ovat strategiaryhmiä, joiden sisällä on paljon lajikohtaisia eroja, eivät peräkkäisiä ”parempien” kasvien tasoja. Tutkimuksen erittäin pienet hiilidioksidikynnykset ovat oletuksia mahdollisten rajojen tutkimiseen, eivät takeita siitä, että tuleva ekosysteemi kehittyisi käyttämään niitä.

Miksi 1,86 miljardia vuotta ei ole viimeinen käyttöpäivä

Tutkimuksen otsikoihin päätynyt arvio noin **1,86 miljardista vuodesta** on kahden optimistisen ylärajan keskiarvo: 1,84 miljardia vuotta hiilidioksidin rajoittamassa haarassa ja 1,87 miljardia vuotta kuumuuden rajoittamassa haarassa. Se on kahden eri skenaarion tiivis yhteenveto. Se ei ole kolmas, tarkempi mallitulos eikä paras arvio päivämäärästä.

Edes laajempi 1,35–1,87 miljardin vuoden vaihteluväli ei vastaa yhtä todennäköisyysjakaumaa. Sen

ala- ja ylärajat riippuvat erilaisista rapautumisoletuksista, erilaisista biologisista kynnyksistä ja yhdestä ilmastomallin konfiguraatiosta. Vaihteluväli mittaa yhtä paljon kokeessa tehtyjä valintoja kuin aikaa.



1,35–1,87 miljardin vuoden vaihteluväli syntyy vasta, kun valitaan rapautumispolku, biologinen kynnys ja mallin reunaehdot. Se on oletusten kartta, ei kello, joka päättyy kaiken elämän sukupuuttoon.

The Clean Paper CC BY 4.0

Muut rajat voivat tulla vastaan ensin

Pisimmät kasvillisen biosfäärin arviot lähestyvät erillistä ja epävarmaa rajaa: kosteaa tai karkaavaa kasvihuoneilmiötä, joka voisi johtaa merkittävään valtamerten menetykseen. Ilmastomallit ovat huomattavan erimielisiä siitä, milloin nämä tilat alkavat auringonsäteilyn lisääntyessä, erityisesti kaukana nykyoloista. Joissakin arvioissa ne sijoittuvat ennen kaikkein optimistisinta yhteyttämisen rajaa.

Siksi ylähaaraa ei voi lukea lupaukseksi siitä, että Maa säilyttää valtamerensä, tutut mantereensa tai elinkelpoiset pintaolosuhteensa 1,87 miljardin vuoden päähän. Malli ei myöskään sisällä tulevaa laattatektoniikkaa, maa-alan muutoksia, kehittyviä ekosysteemejä tai täysin dynaamista valtamerta. Myös sen laskelmat siitä, miten ilmakehä absorboi ja säteilee energiaa, viedään voimakkaan auringonsäteilyn ja äärimmäisen pienen hiilidioksidipitoisuuden alueille, joilla eri mallit erkanevat toisistaan.

Evolutiivinen sopeutuminen ja teknologinen puuttuminen mainitaan tutkimuksen keskustelussa

mahdollisuuksina. Ne eivät ole 29 ilmastosimulaation tuloksia. Malli ei osoita, että tulevat eliöt kehittäisivät yhden miljoonasosan hiilidioksidissa toimivan yhteyttämisreitin, eikä se osoita sivilisaation hallitsevan ilmakehää miljardin vuoden ajan.

Tämä ei ole tulos nykyisestä ilmastokriisistä

Auringon kirkastuminen vaikuttaa satojen miljoonien tai miljardien vuosien aikana. Nykyinen ihmisen aiheuttama lämpeneminen johtuu kasvihuonekaasujen nopeasta lisääntymisestä vuosikymmenten ja vuosisatojen aikana. Ne ovat eri pakotteita täysin eri aikaskaaloilla ja vastaavat eri kysymyksiin.

Mikään tässä tutkimuksessa ei heikennä nykyistä ilmastonmuutosta koskevaa näyttöä eikä puolla toimien lykkäämistä. Biosfääri, joka saattaisi säilyttää jonkin verran yhteyttävää elämää yhden kaukaisen malliskenaarion oloissa, ei ole sama asia kuin ilmasto, jossa nykyiset yhteiskunnat ja ekosysteemit pysyvät turvassa.

Tutkimus on arvokas, koska se tekee hyvin kaukaisesta kysymyksestä kurinalaisemman. Se osoittaa, että aiemmat yksinkertaisemmat mallit ovat saattaneet lämmetä liikaa, kun auringonsäteilyä lisättiin hiilidioksidipitoisuuden pysyessä vakiona, ja että yhteyttävällä elämällä voi olla enemmän selviytymisreittejä kuin yksi vakiintunut hiilikynnys antaa ymmärtää. Se osoittaa myös, miksi jokainen lisätty miljardin vuoden murto-osa tulee oletusketjun mukana.

Lehteä ruokkiva Aurinko muuttuu hitaasti. Pysyykö Maa vihreänä vielä 1,35, 1,87 vai jonkin muun miljardimäärän vuosia, riippuu siitä, miten kivet, vesi, ilmakehä ja elämä reagoivat yhdessä. Rehellinen tulos ei ole päivämäärä. Se on laajempi kuva tästä tasapainosta.

Selkeä yhteenveto

Kolmiulotteinen ilmastotutkimus kysyy, kuinka kauan Maan kasvillinen eli yhteyttävä biosfääri voisi säilyä Auringon hitaasti kirkastuessa. Tutkijat laskivat 29 erillistä tasapainotilan ilmastoa ja jäljittivät niiden läpi kaksi havainnollistavaa ääripäätä. Heikon rapautumisen tapauksessa hiilidioksidipitoisuus pidetään 400 miljoonasosassa ja maakasveille oletetut lämpörajat saavutetaan noin 1,68 ja 1,87 miljardin vuoden kuluttua. Voimakkaan rapautumisen tapauksessa maapallon keskilämpötila pidetään 288 kelvinissä eli noin 15 celsiusasteessa ja yhteyttämiselle oletetut hiilidioksidirajat saavutetaan noin 1,35, 1,64 ja alustavaa kynnystä käyttäen 1,84 miljardin vuoden kuluttua. Usein siteerattu 1,86 miljardia vuotta on vain kahden optimistisen ylärajan pyöristetty keskiarvo. Nämä ovat skenaarioista riippuvia mallivaihteluvälejä, eivät päivämäärä, jolloin Maa, ihmiskunta tai kaikki elämä päättyvät. Mallissa käytetään ennalta määrättyjä polkuja, nykyistä maantiedettä, laatta-merta eikä eksplisiittistä maaperä–kasvillisuus- tai ilmasto–rapautumiskytkentää, ja pisimmät arviot lähestyvät epävarmoja kasvihuone- ja valtamerten menetyksen rajoja.

Rehellisyystarkistus

Mitä tutkimus osoittaa: Tässä ExoCAM-konfiguraatiossa kolmiulotteiset ilmastot lämpenevät yleisesti vähemmän auringonsäteilyn kasvaessa ja hiilidioksidipitoisuuden pysyessä vakiona kuin vertailussa käytetyt yksinkertaistetut mallit. Kahdessa ennalta määrätyssä rapautumisen ääripäässä ja useilla oletetuilla biologisilla kynnyksillä kasvillisen biosfäärin rajat sijoittuvat noin 1,35–1,87 miljardin vuoden päähän.

Mikä on mahdollista mutta ei vahvistettu: Että jotkin CAM-kasvit tai liuennutta bikarbonaattia käyttävät vesikasvit voisivat ylläpitää yhteyttämistä lähellä yhden miljoonasosan ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta; että sopeutuminen tai teknologia voisi pidentää yhteyttävän elämän kestoa entisestään; ja että todellinen ilmasto–rapautumispolku pysyisi mallin kahden ääripään välissä.

Mitä tutkimus ei osoita: Kiinteää päivämäärää kaikkien kasvien, kaiken elämän, ihmiskunnan sivilisaation, Maan valtamerten tai planeetan lopulle; yhtä jatkuvaa simulaatiota seuraavista kahdesta miljardista vuodesta; eikä mitään syytä vähätellä nykyistä ihmisen aiheuttamaa ilmastonmuutosta.

Tärkeimmät rajoitteet: Kaksikymmentäyhdeksän tasapainotilan tapausta yhdestä ilmastomalliperheestä; ennalta määrätyt eikä dynaamisesti kytketyt rapautumispolut; nykyinen maantiede; laattameri; kiinteä metaani; nolla obliikvisuutta ja eksentrisyyttä; ei eksplisiittisiä maaperiä, kasvillisuutta tai biosfäärin takaisinkytkentää; epävarmat lämpö- ja hiilidioksidikynnykset; sekä mallien suuri erimielisyys kostean ja karkaavan kasvihuoneilmiön lähellä.

Kuinka paljon yleislukijan pitäisi luottaa tulokseen? Suuri luottamus siihen, että tutkimus laajentaa uskottavaa mallivaihteluväliä ja tunnistaa sitä hallitsevat oletukset. Kohtalainen luottamus numeeriseen vaihteluväliin hyödyllisenä rajauksena tässä mallissa. Heikko luottamus mihinkään tarkkaan päivämäärään, koska kaukaisimmat päätepisteet riippuvat tarkoituksella äärimmäisistä ilmastopoluista ja epävarmasta biologiasta.

Lähteet

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