



# The CLEAN PAPER

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

## Meddig maradhat zöld a Föld? Egy klímamodell tartományokat ad, nem világvége-dátumot

*Huszonkilenc háromdimenziós klímaszimuláció a Föld fotoszintetikus bioszférájára különböző korlátokat helyez nagyjából 1,35–1,87 milliárd év múlva. Az értékek a kőzetmállás, a hőség és a növények által még használható legalacsonyabb szén-dioxid-szintek szándékosan leegyszerűsített útvonalaiktól függenek. Nem jósolják meg, mikor ér véget minden növény, minden élet, a civilizáció vagy a bolygó.*

---

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](https://doi.org/10.1029/2025JD045586)

# Meddig maradhat zöld a Föld? Egy klímamodell tartományokat ad, nem világvége-dátumot

Egy levél szűk kompromisszum keretei között él. Fényre, vízre, szén-dioxidra és olyan hőmérsékletre van szüksége, amelyet a kémiaja elvisel. Egy emberöltő alatt a Nap e kompromisszum állandó részének tűnik. Egymilliárd év alatt azonban nem az.

Ahogy a Nap öregszik a fősorozaton, lassan fényesebbé válik. A több napfény melegíti a Földet, de a bolygónak van egy hosszú távú válasza: az esővíz, a szén-dioxid és a szilikátos kőzetek közötti reakciók eltávolíthatják a szén-dioxidot a légkörből. Ez gyengíti az üvegházhatást, és részben ellensúlyozza a felmelegedést. Ugyanez a bolygót hűtő válasz végül megfoszthatja a fotoszintetizáló szervezeteket attól a széntől, amelyből élő szövetet építenek.

Egy új Journal of Geophysical Research: Atmospheres tanulmány azt kérdezi, melyik korlát érkezik el előbb: a túl nagy hőség vagy a túl kevés szén-dioxid. A válasz nem egy dátum, amikor a Föld meghal. Két szándékosan leegyszerűsített jövőbeli út mentén a fotoszintetikus életre alkalmazott korlátok nagyjából **1,35–1,87 milliárd év múlva** következnek be.

Ez a tartomány a **vegetatív bioszféráról** szól: a Föld élő rendszerének arról a részéről, amelyet fotoszintetizáló szervezetek tartanak fenn, különösen növények és más élőlények, amelyek fényt és szén-dioxidot alakítanak biológiai anyaggá. Nem minden mikroba jövőjének előrejelzése. Nem az emberi civilizáció élettartama. Nem a bolygó élettartama.

## A bolygó termosztátjának két bizonytalan beállítása van

A központi bizonytalanság a **szilikátos mállás**. A szén-dioxid feloldódik az esővízben, reagál a szilikátos kőzetekkel, majd végül az óceánok és üledékek felé szállítódik. Geológiai időskálán a vulkánok szén-dioxidot juttatnak vissza. Ezek a folyamatok együtt alkotják a karbonát–szilikát ciklus egy részét, amelyet gyakran bolygói termosztátként írnak le.

Melegebb, nedvesebb világban a mállás felgyorsulhat és gyorsabban távolíthatja el a szén-dioxidot. A tudósok azonban nem tudják, milyen erősen szabályozza majd ez a válasz a Földet egy fényesebb jövőbeli Nap alatt. Jacob Haqq-Misra és Eric Wolf ezért nem választott egyetlen, állítólag helyes pályát. Két **szélső esetet** modelleztek: szándékosan szélsőséges eseteket a bizonytalanság keretezésére.

- A **gyenge mállású szélső esetben** a légköri szén-dioxid 400 ppm marad, miközben a fényesedő Nap emeli a hőmérsékletet.
- Az **erős mállású szélső esetben** a globális felszíni átlaghőmérséklet 288 kelvin, körülbelül 15 Celsius-fok marad, miközben a növekvő napsugárzással a szén-dioxid mennyisége csökken.

Egyik ágat sem a Föld tényleges jövőjeként mutatják be. Az első azt kérdezi, mit tenne a hőség, ha a szén-dioxid magas maradna. A második azt kérdezi, mit tenne a szénhiány, ha a mállás a globális hőmérsékletet a mai átlag közelében tartaná.

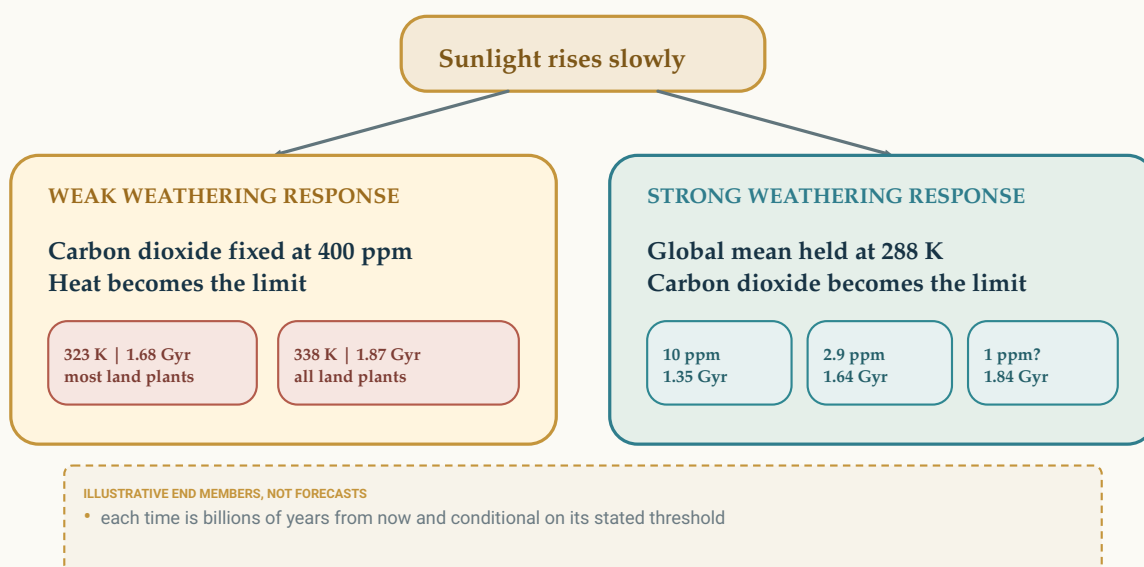
### Hogyan működhet a mállás termosztátként?

A hasonlat visszacsatolásról szól, nem szó szerinti szabályozógombról. Amikor a melegebb éghajlat felgyorsítja a kémiai mállást, több légköri szén-dioxid kerülhet oldott anyagokba, ásványokba és üledékekbe. Ennek az üvegházhatású gáznak az eltávolítása ellensúlyozza az eredeti felmelegedés egy részét. Nagyon hosszú időskálán a vulkáni kigázosodás szén-dioxidot juttat vissza.

Az egyes kapcsolatok erőssége a csapadéktól, a felszínen levő kőzettől, az eróziótól, a biológiától, a tektonikától és az óceánkémiaiától függ. Ezért tesztel a tanulmány határeseteket ahelyett, hogy a termosztátot ismert gépként kezelné.

## One brighter Sun, two illustrative limits

*The study brackets uncertainty; it does not assign either future a probability.*



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

A tanulmány két szemléltető szélső esettel keretezi a bizonytalan jövőt. Ha a mállás gyengén reagál, a növekvő hőség eléri a szárazföldi növényekre alkalmazott küszöböket. Ha erősen reagál, a csökkenő szén-dioxid éri el a fotoszintézishez alkalmazott küszöböket. Ezek feltételes modellágak, nem valószínűségek vagy visszaszámlálási dátumok.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Huszonkilenc beállt modellvilág, nem egy kétmilliárd éves film

A kutatók az ExoCAM háromdimenziós globális klímamodellt használták **29 egyensúlyi klíma** kiszámítására az erősebb napsugárzás és az alacsonyabb szén-dioxid különböző kombinációiban. Minden esetet 70 modellévig futtattak. Itt egy modellév egy rögzített körülmények közötti szimulált éves ciklus: futási idő, amely arra szolgál, hogy a mesterséges klíma beálljon, nem egy lépés a Föld jövőjének évről évre történő előrejelzésében. A szimulált klíma beállása után az utolsó 20 évet átlagolták.

Ez a 29 eset különálló modellvilág. Minden futtatás a rács egy pontja, amely arra válaszol: „milyen beállt klíma illik ehhez a kiválasztott napsugárzás-szén-dioxid párhoz?” A számítógép nem a mai Földdel indult, majd folyamatosan fejlesztette tovább légkörét, kőzeteit, óceánjait és élőlényeit a következő kétmilliárd évre. A szerzők ehelyett a két sematikus mállási útvonalat vezették végig az előre kiszámított pontokon; a pontok közötti útvonalat önmagában nem szimulálták.

A táblázat a hivatalos modelladat-archívumban szereplő napsugárzás- és szén-dioxid-kombinációkat reprodukálja. Az esetazonosítókat itt olvasási segítségként, az archívum sorrendjében adtuk hozzá. Az **S/S0** a relatív napállandó: a modellben használt beérkező napenergia osztva a mai S0 értékével. Az 1.2 tehát a mainál 20 százalékkal nagyobb beérkező napenergiát jelent. A **CO2 (ppm)** a légköri szén-dioxid keverési aránya egymillió légköri molekulára jutó molekulákban.

| Esetazonosító | 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     |

| Esetazonosító | S/S0  | CO2 (ppm) |
|---------------|-------|-----------|
| 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         |

A modell-Föld felismerhető, de szándékosan korlátozott. Föld méretű és mai földrajzot használ. Teljesen cirkuláló óceán helyett leegyszerűsített rétegóceánja van, légköri nyomása nagyjából a Föld mai értékére, egy barra van állítva, a metán pedig rögzített. Pályája tökéletesen kör alakú (zéró excentricitás), forgástengelyének nincs dőlése (zéró ferdeség). Nincs benne explicit talaj, növényzet vagy a változó bioszféra visszacsatolása. A legfontosabb, hogy a klímamodell nincs dinamikusan összekapcsolva közetmállási modellel. Más szóval az ExoCAM nem számolja ki a mállást, nem frissíti vele a széndioxidot, majd nem futtatja a következő klímát visszacsatolási hurokban. A kutatók ehelyett előírták a két szélső útvonalat, és végigvezették őket a 29 esetből álló klímarácson.

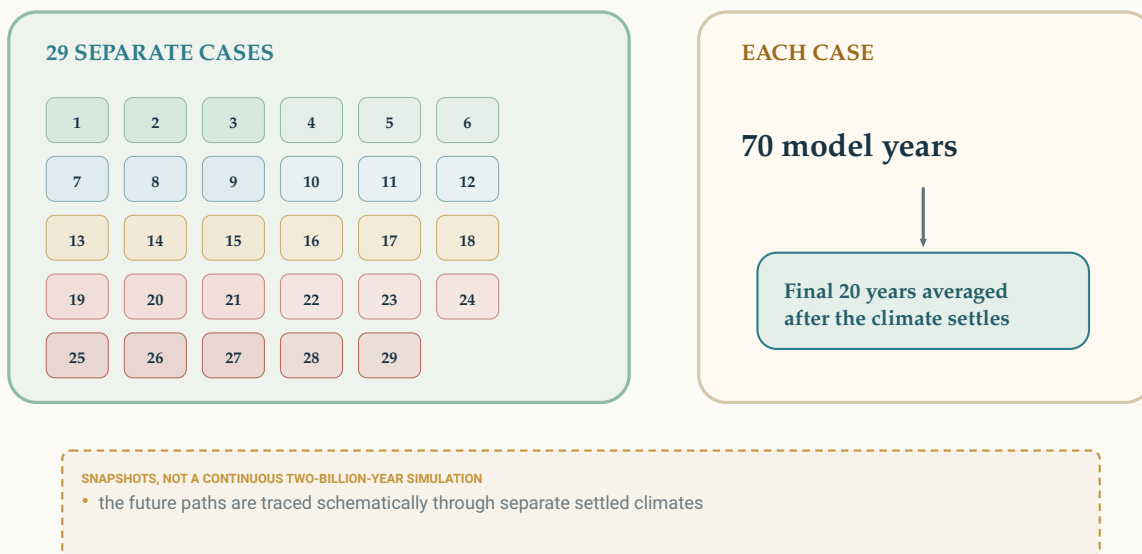
#### Mit jelent az „egyensúlyi állapot” egy klímamodellben?

Az egyensúlyi eset olyan modellklíma, amelyet egy kiválasztott Nap és légkör mellett hagynak beállni. Az időjárás a szimuláción belül továbbra is változik napról napra és évről évre, de hosszú távú átlagai már nem sodródnak erősen.

Ez hasznos annak megkérdezésére, hogy „milyen klíma illik ezekhez a feltételekhez?”. Más kérdés, mint annak pontos előrejelzése, milyen útvonalon halad a valódi Föld egyik feltételkészlettől a következőig.

## Twenty-nine climate snapshots, not one future-Earth movie

*Each tile is a separate ExoCAM world under prescribed sunlight and carbon dioxide.*



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Minden csempe egy külön ExoCAM-klímafuttatás 70 modelléven át, az utolsó 20 év átlagával. A tanulmány 29 beállt klímát mintázott előírt napsugárzási és szén-dioxid-feltételek között; nem egyetlen, kétmilliárd éven át folyamatosan fejlődő Földet szimulált.

The Clean Paper CC BY 4.0

## Első szélső eset: elég szén-dioxid, túl sok hó

A gyenge mállású ágban a szén-dioxid 400 ppm-en marad. Ahogy nő a napenergia-bevitel, a hó válik korlátozó tényezővé.

A tanulmány korábbi munkákból két globális átlaghőmérsékleti küszöböt használ:

- **323 kelvinnél**, vagyis globális éves átlagban körülbelül **50 Celsius-foknál** a világot a legtöbb szárazföldi növény számára túl forrónak tekintik. A modell ezt a küszöböt körülbelül **1,68 milliárd év** múlva éri el.
- **338 kelvinnél**, vagyis globális éves átlagban körülbelül **65 Celsius-foknál** a világot minden szárazföldi növény számára túl forrónak tekintik. A modell ezt a küszöböt körülbelül **1,87 milliárd év** múlva éri el.

Ezek átvett biológiai korlátok, nem univerzális hőmérsékletek, amelyeknél minden fotoszintetizáló szervezet szükségszerűen elbukik. A globális átlag nagy regionális különbségeket is elfed. A tanulmány külön vizsgálja, hol maradhatnak megfelelőek a hőmérséklet és víz kombinációi, de egy klímaterkép címkéje nem katalogizálhat minden jövőbeli menedéket vagy alkalmazkodást.

## Második szélső eset: elviselhető hőmérséklet, túl kevés szén-dioxid

Az erős mállású ágba a globális átlaghőmérséklet 288 kelvin, körülbelül 15 Celsius-fok marad, miközben a légköri szén-dioxid csökken. Itt a válasz attól függ, milyen kevés szenet képesek használni a különböző fotoszintetikus útvonalak.

- A hagyományos **10 ppm-es** küszöbnél — egymillió légköri molekulára 10 szén-dioxid-molekula — a C4-fotoszintézis korlátja körülbelül **1,35 milliárd év** múlva érkezik el. C4-fotoszintézist többek között a kukorica és a cukornád használ, és ez az útvonal a szén-dioxidot a megkötését végző enzim körül koncentrálja.
- A korábbi munkákban tárgyalt alternatív **2,9 ppm-es** C4-küszöb körülbelül **1,64 milliárd évre** tolja ezt.
- Egy bizonytalan **1 ppm-es** küszöb, amelyet egyes CAM-növények — vagyis Crassulacean savanyagcserét használó, a szén-dioxid éjszakai felvételét nappali felhasználásától elválasztó növények — vagy oldott bikarbonátot használni képes vízinövények lehetséges fennmaradásával társítanak, körülbelül **1,84 milliárd évre** tolja a korlátot.

Az utolsó számhoz tartozik a legnagyobb biológiai fenntartás. A szerzők kifejezetten bizonytalannak nevezik az egy ppm-es határt. Ez nem kísérletileg megállapított túlélési küszöb minden CAM-növény vagy vízi növényzet számára a jövőbeli Föld körülményei között.

### A C3, C4 és CAM stratégiák, nem létrafokok

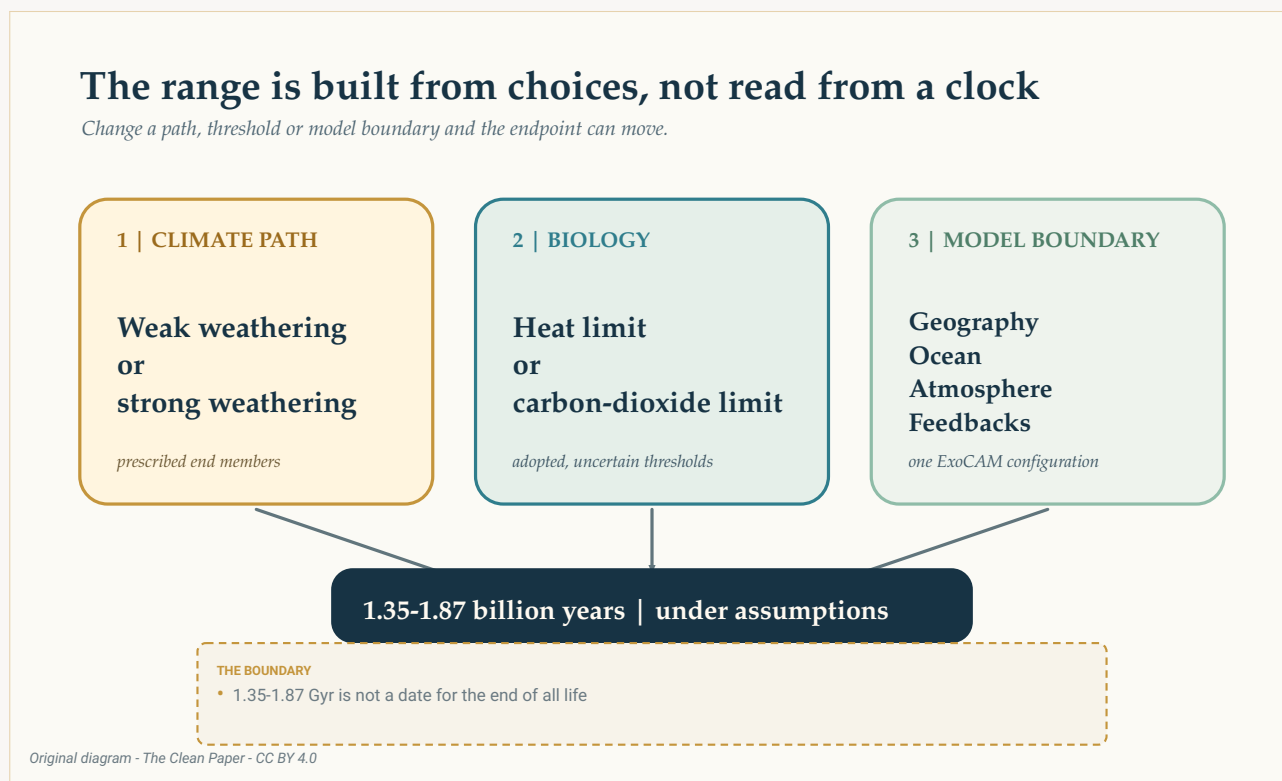
A növények különböző biokémiai útvonalakat használnak a szén megkötésére. A **C3-fotoszintézis** a leggyakoribb. A többek között kukoricában és cukornádban használt **C4-fotoszintézis** a szén-dioxidot a szenet megkötő enzim körül koncentrálja, és szén-dioxid-hiányban jobban működhet. A **Crassulacean savanyagcsere (CAM)** a szén felvételét és felhasználását éjszaka és nappal szétválasztja, ami sok növénynek segít vizet megtakarítani. Ezek sok fajsztintű eltérést tartalmazó stratégiacsaládok, nem egyre „jobb” növények egymást követő fokozatai. A tanulmány nagyon alacsony szén-dioxid-küszöbei a lehetséges korlátok feltárására szolgáló feltevések, nem garanciák arra, hogy egy jövőbeli ökoszisztéma úgy fejlődik, hogy ki tudja használni őket.

## Miért nem lejáratí dátum az 1,86 milliárd év?

A tanulmány címadó, körülbelül **1,86 milliárd éves** becslése a két optimista felső végpont átlaga: 1,84 milliárd év a szén-dioxid-korlátozott ágba és 1,87 milliárd év a hőkorlátozott ágba. Két eltérő forgatókönyv tömör összefoglalása. Nem egy harmadik, nagyobb pontosságú modelleredmény, és nem a legjobb becslésű dátum.

Még a tágabb 1,35–1,87 milliárd éves tartományhoz sem tartozik egyetlen valószínűség. Alsó és

felső értéke eltérő mállási feltevésektől, eltérő biológiai küszöböktől és egyetlen klímamodell-konfigurációtól függ. A tartomány legalább annyira méri a kísérletben hozott döntéseket, mint az időt.



Az 1,35–1,87 milliárd éves tartomány csak egy mállási út, egy biológiai küszöb és egy modellhatár kiválasztása után jelenik meg. Ez a feltevések térképe, nem egy óra, amely minden élet kihalásával ér véget.

The Clean Paper CC BY 4.0

## Más korlátok előbb érkezhetnek

A vegetatív bioszféra leghosszabb becslései megközelítenek egy különálló és bizonytalan határt: a nedves vagy elszabaduló üvegházhatást, amely jelentős óceánvesztést indíthat el. A klímamodellek jelentősen eltérnek abban, mikor kezdődnek ezek az állapotok növekvő napsugárzás mellett, különösen a mai körülményektől távol. Egyes becslések az optimista fotoszintézis-korlát elé helyezik őket.

Ez azt jelenti, hogy a felső ágat nem lehet ígéretként olvasni arra, hogy a Föld még 1,87 milliárd évig megtartja óceánjait, ismerős kontinenseit vagy lakható felszíni körülményeit. A modell nem tartalmazza a jövőbeli lemeztektonikát, a szárazföldterület változásait, a fejlődő ökoszisztémákat vagy teljesen dinamikus óceánt sem. A légkör energiaelnyelésére és -kibocsátására vonatkozó számításokat ráadásul olyan erős napsugárzási és rendkívül alacsony szén-dioxid-tartományokba tolják, ahol a különböző modellek eltérnek egymástól.

Az evolúciós alkalmazkodás és a technológiai beavatkozás lehetőségként jelenik meg a tanulmány

tárgyalásában. Nem a 29 klímaszimuláció eredményei. A modell nem mutatja, hogy a jövő élőlényei egy ppm-es fotoszintetikus útvonalat fejlesztenek ki, és azt sem, hogy egy civilizáció egymilliárd éven át kezeli a légkört.

## Ez nem a mai klímaválságról szóló eredmény

A Nap fényesedése több százmillió–több milliárd éves időskálán hat. A mai ember okozta felmelegedés a gyorsan növekvő üvegházhatású gázokból ered évtizedes és évszázados időskálán. Ezek különböző kényszerek, radikálisan különböző időtávokon, és különböző kérdésekre válaszolnak.

Ebben a tanulmányban semmi sem gyengíti a jelenlegi klímaváltozás bizonyítékait, és semmi sem érv a cselekvés halogatása mellett. Egy bioszféra, amely egy távoli modellforgatókönyvben esetleg megtart valamennyi fotoszintetikus életet, nem ugyanaz, mint egy klíma, amelyben a mai társadalmak és ökoszisztémák biztonságban maradnak.

A tanulmány értéke abban áll, hogy fegyelmezettebbé tesz egy távoli kérdést. Megmutatja, hogy a korábbi, egyszerűbb modellek talán túlságosan felmelegedtek, amikor a napsugárzás növekedett, miközben a szén-dioxid rögzítve maradt, és hogy a fotoszintetikus életnek több fennmaradási útja lehet, mint amit egyetlen kanonikus szénküszöb sugall. Azt is megmutatja, miért kapcsolódik minden további milliárdévtöredékhez egy feltételezési lánc.

A levelet tápláló Nap lassan változik. Hogy a Föld további 1,35, 1,87 vagy más számú milliárd évig marad-e zöld, attól függ, hogyan reagálnak együtt a kőzetek, a víz, a légkör és az élet. A becslétes eredmény nem egy dátum. Hanem ennek a kompromisszumnak a tágabb képe.

## Röviden

Egy háromdimenziós klímatanulmány azt kérdezi, meddig maradhat fenn a Föld vegetatív — fotoszintetikus — bioszférája, miközben a Nap lassan fényesedik. A kutatók 29 különálló egyensúlyi klímát számoltak ki, és két szemléltető szélső esetet vezettek végig rajtuk. Gyenge mállással és 400 ppm-en rögzített szén-dioxiddal a szárazföldi növényekre alkalmazott hőhatárok körülbelül 1,68 és 1,87 milliárd év múlva jelennek meg. Erős mállással, valamint 288 kelvinen, vagyis körülbelül 15 Celsius-fokon rögzített globális átlaghőmérséklettel a fotoszintézisre alkalmazott szén-dioxid-határok körülbelül 1,35, 1,64 és — egy bizonytalan küszöb használatával — 1,84 milliárd év múlva érkeznek el. A gyakran idézett 1,86 milliárd év csupán a két optimista felső végpont kerekített átlaga. Ezek forgatókönyvfüggő modelltartományok, nem dátumok arra, mikor ér véget a Föld, az emberiség vagy minden élet. A modell előírt útvonalakat, mai földrajzot, rétegóceánt használ, és nincs benne explicit talaj–növényzet vagy klíma–mállás összekapcsolás; a leghosszabb becslések pedig bizonytalan üvegház- és óceánvesztési határokat közelítenek meg.

# Tárgyilagos mérleg

**Mit mutat a tanulmány:** Ebben az ExoCAM-konfigurációban a háromdimenziós klímák növekvő nap-sugárzás és rögzített szén-dioxid mellett általában kevésbé melegszenek, mint az összehasonlításra használt egyszerűsített modellek. Két előírt mállási szélső eset és több alkalmazott biológiai küszöb mellett a vegetatív bioszféra korlátai nagyjából 1,35–1,87 milliárd év múlva jelennek meg.

**Mi hihető, de nem bizonyított:** Hogy egyes CAM-növények vagy oldott bikarbonátot használó víz-inövények körülbelül egy ppm légköri szén-dioxid mellett is fenntarthatják a fotoszintézist; hogy az alkalmazkodás vagy technológia tovább hosszabbíthatja a fotoszintetikus életet; és hogy a valódi klíma-mállás útvonal a két modell-szélső eset között marad.

**Mit nem mutat:** Rögzített dátumot minden növény, minden élet, az emberi civilizáció, a Föld óceánjai vagy a bolygó végére; a következő kétmilliárd év egyetlen folyamatos szimulációját; vagy bármilyen okot a mai ember okozta klímaváltozás lebecsülésére.

**Fő korlátok:** Huszonkilenc egyensúlyi eset egyetlen klímamodell-családból; előírt, nem dinamikus összekapcsolt mállási pályák; mai földrajz; rétegóceán; rögzített metán; nulla tengelyferdeség és excentricitás; explicit talaj, növényzet vagy bioszféra-visszacsatolás hiánya; bizonytalan hő- és szén-dioxid-küszöbök; valamint nagy modellkülönbségek a nedves és elszabaduló üvegházhatás környezetében.

**Mennyi bizalma legyen egy általános olvasónak?** Nagy bizalommal mondható, hogy a tanulmány kiszélesíti a hihető modelltartományt, és azonosítja az azt szabályozó feltevéseket. Közepes bizalom indokolt a számszerű tartományban mint e modellen belüli hasznos keretben. Alacsony bizalom indokolt bármely pontos dátumban, mert a legtávolabbi végpontok szándékosan szélsőséges klímapályáktól és bizonytalan biológiától függenek.

---

## Források

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>