The Clean Paper

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

# ¿Cuánto tiempo puede seguir verde la Tierra? Un modelo climático ofrece intervalos, no una fecha del fin del mundo

*Veintinueve simulaciones climáticas tridimensionales sitúan distintos límites de la biosfera fotosintética de la Tierra aproximadamente entre 1.350 y 1.870 millones de años a partir de ahora. Los valores dependen de trayectorias deliberadamente simplificadas para la meteorización de las rocas, el calor y los niveles mínimos de dióxido de carbono que podrían utilizar las plantas. No predicen cuándo terminarán todas las plantas, toda la vida, la civilización o el 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

# ¿Cuánto tiempo puede seguir verde la Tierra? Un modelo climático ofrece intervalos, no una fecha del fin del mundo

Una hoja vive dentro de un equilibrio estrecho. Necesita luz, agua, dióxido de carbono y una temperatura que su química pueda tolerar. A lo largo de una vida humana, el Sol parece la parte fija de ese equilibrio. A lo largo de mil millones de años, no lo es.

A medida que el Sol envejece en la secuencia principal, se vuelve lentamente más luminoso. Una mayor cantidad de luz solar calienta la Tierra, pero el planeta dispone de una respuesta a largo plazo: las reacciones entre el agua de lluvia, el dióxido de carbono y las rocas de silicato pueden retirar dióxido de carbono de la atmósfera. Eso debilita el efecto invernadero y compensa parte del calentamiento. La misma respuesta que enfría el planeta puede acabar privando a los organismos fotosintéticos del carbono con el que construyen tejido vivo.

Un nuevo artículo de Journal of Geophysical Research: Atmospheres pregunta qué límite podría llegar antes: demasiado calor o demasiado poco dióxido de carbono. Su respuesta no es una fecha en la que la Tierra muera. A lo largo de dos trayectorias futuras deliberadamente simplificadas, los límites adoptados para la vida fotosintética se sitúan aproximadamente entre **1.350 y 1.870 millones de años a partir de ahora**.

Ese intervalo se refiere a la **biosfera vegetal**: la parte del sistema vivo de la Tierra sustentada por organismos fotosintéticos, en especial plantas y otras formas de vida que convierten la luz y el dióxido de carbono en material biológico. No es un pronóstico para cada microbio. No es la duración de la civilización humana. No es la duración del planeta.

## El termostato planetario tiene dos ajustes inciertos

La incertidumbre central es la **meteorización de silicatos**. El dióxido de carbono se disuelve en el agua de lluvia, reacciona con rocas de silicato y termina siendo transportado hacia océanos y sedimentos. Los volcanes devuelven dióxido de carbono a lo largo del tiempo geológico. Juntos, estos procesos forman parte del ciclo carbonato-silicato, descrito a menudo como un termostato planetario.

En un mundo más cálido y húmedo, la meteorización puede acelerarse y retirar el dióxido de carbono con mayor rapidez. Pero los científicos no saben con qué intensidad gobernará esa respuesta a la Tierra bajo un Sol futuro más luminoso. Por eso Jacob Haqq-Misra y Eric Wolf no eligieron una única trayectoria supuestamente correcta. Modelizaron dos **casos extremos**: escenarios intencionadamente extremos utilizados para acotar la incertidumbre.

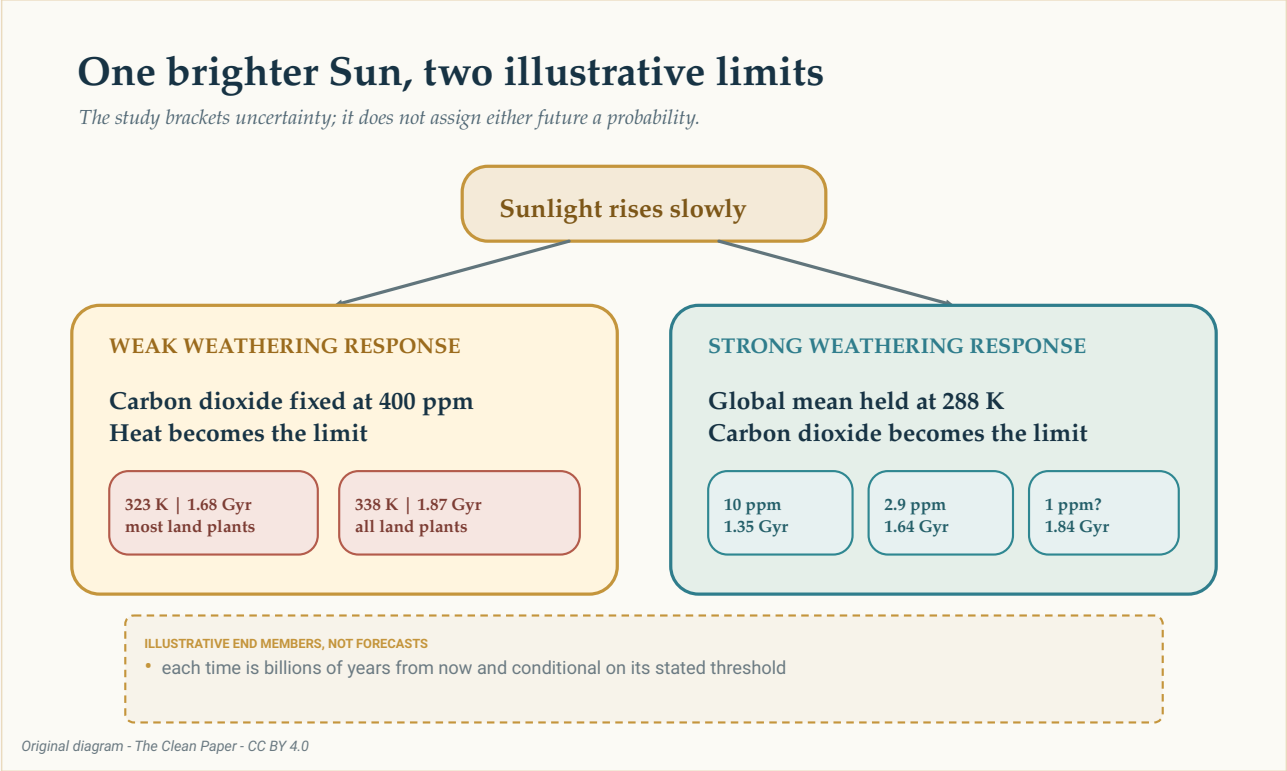
- En el **caso extremo de meteorización débil**, el dióxido de carbono atmosférico permanece en 400 partes por millón mientras el Sol, cada vez más luminoso, eleva la temperatura.
- En el **caso extremo de meteorización fuerte**, la temperatura media global de la superficie se mantiene en 288 kelvin, unos 15 grados Celsius, mientras el dióxido de carbono disminuye a

medida que aumenta la luz solar.

Ninguna rama se presenta como el futuro real de la Tierra. La primera pregunta qué haría el calor si el dióxido de carbono permaneciera alto. La segunda pregunta qué haría la escasez de carbono si la meteorización mantuviera la temperatura global cerca de la media actual.

### ¿Cómo puede actuar la meteorización como un termostato?

La analogía se refiere a una retroalimentación, no a un mando de control literal. Cuando un clima más cálido acelera la meteorización química, una mayor cantidad de dióxido de carbono atmosférico puede acabar en material disuelto, minerales y sedimentos. Retirar ese gas de efecto invernadero se opone a parte del calentamiento inicial. A escalas temporales muy largas, la desgasificación volcánica devuelve dióxido de carbono.
La intensidad de cada eslabón depende de la lluvia, las rocas expuestas, la erosión, la biología, la tectónica y la química oceánica. Por eso el artículo prueba respuestas límite en lugar de tratar el termostato como una máquina conocida.




El artículo acota un futuro incierto con dos casos extremos ilustrativos. Si la meteorización responde débilmente, el aumento del calor alcanza los umbrales adoptados para las plantas terrestres. Si responde con fuerza, la caída del dióxido de carbono alcanza los umbrales adoptados para la fotosíntesis. Son ramas condicionales del modelo, no probabilidades ni cuentas atrás.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Veintinueve mundos de modelo estabilizados, no una película de dos mil millones de años

Los investigadores utilizaron ExoCAM, un modelo climático global tridimensional, para calcular **29 climas en estado estacionario** con distintas combinaciones de mayor luz solar y menor dióxido de carbono. Cada caso se ejecutó durante 70 años de modelo. Aquí, un año de modelo es un ciclo anual simulado bajo condiciones fijas: es tiempo de ejecución utilizado para que el clima artificial se estabilice, no un paso de un pronóstico año a año del futuro de la Tierra. Después de dar tiempo al clima simulado para asentarse, se promediaron los 20 años finales.

Esos 29 casos son mundos de modelo independientes. Cada ejecución constituye un punto de una cuadrícula y responde a la pregunta «¿qué clima estabilizado corresponde a esta combinación elegida de luz solar y dióxido de carbono?». El ordenador no partió de la Tierra actual y evolucionó continuamente su atmósfera, rocas, océanos y seres vivos durante los dos mil millones de años siguientes. En su lugar, los autores trazaron las dos trayectorias esquemáticas de meteorización a través de esos puntos precalculados; la trayectoria entre puntos no se simuló por sí misma.

La tabla reproduce las combinaciones de luz solar y dióxido de carbono del archivo oficial de datos del modelo. Los identificadores de caso son ayudas de lectura añadidas aquí en el orden del archivo. **S/S0** es la constante solar relativa: la energía solar entrante empleada en el modelo dividida por su valor actual, S0. Por tanto, un valor de 1.2 significa un 20% más de energía solar entrante que hoy. **CO2 (ppm)** es la proporción de mezcla del dióxido de carbono atmosférico, expresada en moléculas por cada millón de moléculas atmosféricas.

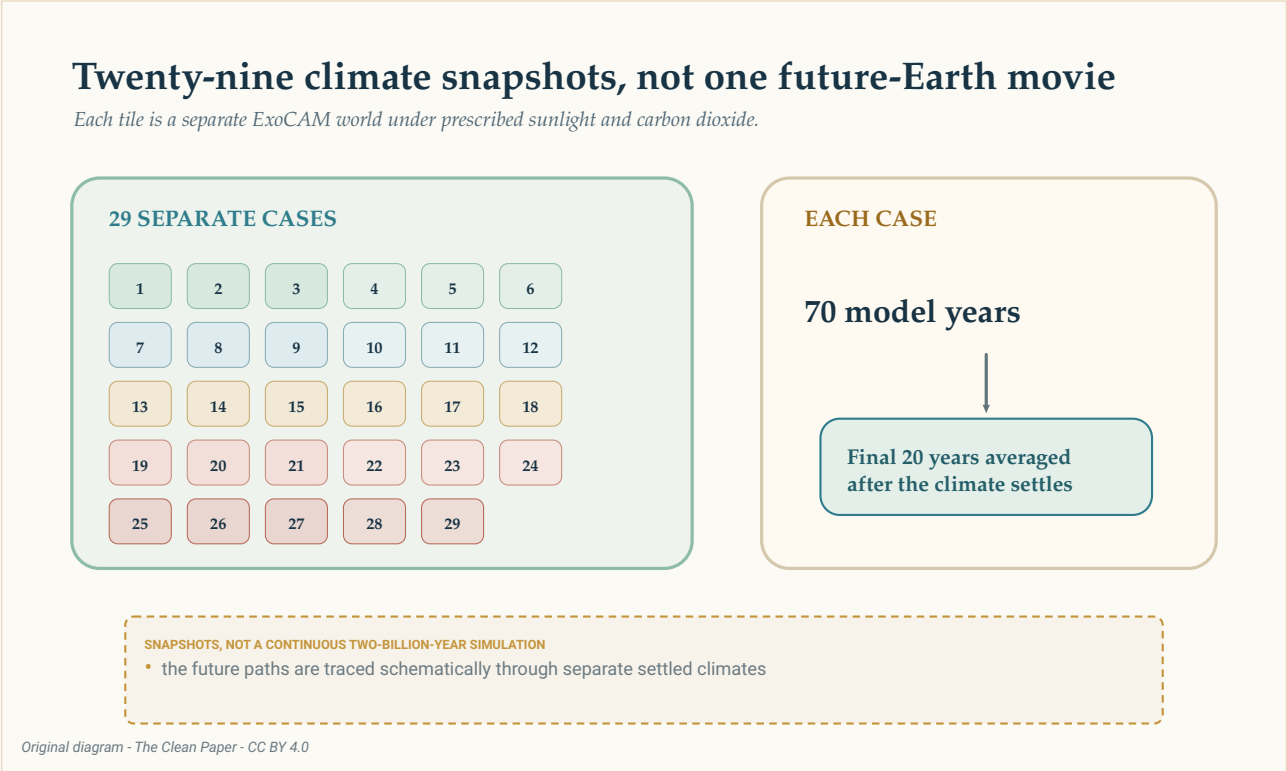
| ID del caso | S/S0 | CO2 (ppm) |
|---:|---:|---:|
| 1 | 1.0 | 400 |
| 2 | 1.0 | 180 |
| 3 | 1.0 | 11.25 |
| 4 | 1.0 | 1.40625 |
| 5 | 1.044 | 400 |
| 6 | 1.044 | 180 |
| 7 | 1.044 | 135 |
| 8 | 1.044 | 11.25 |
| 9 | 1.044 | 1.40625 |
| 10 | 1.081 | 400 |
| 11 | 1.081 | 180 |
| 12 | 1.081 | 11.25 |
| 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 |

| ID del caso | S/S0 | CO2 (ppm) |
|---|---|---|
| 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 |

La Tierra del modelo resulta reconocible, pero está intencionadamente limitada. Tiene el tamaño de la Tierra y utiliza la geografía actual. Incluye un océano de capa simplificado en lugar de un océano con circulación completa, una presión atmosférica fijada aproximadamente en el valor actual terrestre —un bar— y metano fijo. Su órbita es perfectamente circular —excentricidad cero— y su eje de rotación no está inclinado —oblicuidad cero—. No contiene suelos ni vegetación explícitos, ni retroalimentación de una biosfera cambiante. Y, sobre todo, el modelo climático no está acoplado dinámicamente a un modelo de meteorización de las rocas. Es decir, ExoCAM no calcula la meteorización, la utiliza para actualizar el dióxido de carbono y después ejecuta el clima siguiente dentro de un bucle de retroalimentación. Los investigadores prescribieron las dos trayectorias límite y las trazaron sobre la cuadrícula de 29 casos climáticos.

**¿Qué significa «estado estacionario» en un modelo climático?**

Un caso en estado estacionario es un clima de modelo al que se permite estabilizarse bajo un Sol y una atmósfera elegidos. El tiempo meteorológico sigue cambiando de un día a otro y de un año a otro dentro de la simulación, pero sus promedios a largo plazo dejan de derivar con fuerza.
Esto resulta útil para preguntar «¿qué clima corresponde a estas condiciones?». Es distinto de predecir la ruta exacta por la que la Tierra real pasa de un conjunto de condiciones al siguiente.




Cada mosaico es una ejecución climática independiente de ExoCAM durante 70 años de modelo, de la que se promediaron los 20 años finales. El estudio muestreó 29 climas estabilizados bajo condiciones prescritas de luz solar y dióxido de carbono; no simuló una única Tierra en evolución continua durante dos mil millones de años.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Caso extremo uno: suficiente dióxido de carbono, demasiado calor

En la rama de meteorización débil, el dióxido de carbono permanece fijo en 400 partes por millón. A medida que aumenta la entrada solar, el calor se convierte en el factor limitante.

El artículo utiliza dos umbrales de temperatura media global tomados de trabajos anteriores:

- A **323 kelvin**, unos **50 grados Celsius** como media global anual, el mundo se considera demasiado caliente para la mayoría de las plantas terrestres. El modelo alcanza ese umbral en aproximadamente **1.680 millones de años**.
- A **338 kelvin**, unos **65 grados Celsius** como media global anual, el mundo se considera demasiado caliente para todas las plantas terrestres. El modelo alcanza ese umbral en aproximadamente **1.870 millones de años**.

Son límites biológicos adoptados, no temperaturas universales a las que necesariamente fracase todo organismo fotosintético. Una media global también oculta grandes diferencias regionales. El estudio examina por separado dónde podrían seguir siendo adecuadas determinadas combinaciones

de temperatura y agua, pero una etiqueta sobre un mapa climático no puede catalogar todos los refugios o adaptaciones futuros.

## Caso extremo dos: temperatura tolerable, demasiado poco dióxido de carbono

En la rama de meteorización fuerte, la temperatura media global se mantiene en 288 kelvin, unos 15 grados Celsius, mientras disminuye el dióxido de carbono atmosférico. Aquí la respuesta depende de cuánto carbono puedan utilizar las distintas vías fotosintéticas.

- Con el umbral tradicional de **10 partes por millón** —10 moléculas de dióxido de carbono por cada millón de moléculas atmosféricas—, el límite para la fotosíntesis C4 llega en aproximadamente **1.350 millones de años**. La fotosíntesis C4, utilizada por plantas como el maíz y la caña de azúcar, concentra dióxido de carbono alrededor de la enzima que lo fija.
- El uso de un umbral alternativo de **2,9 partes por millón** para C4, analizado en trabajos anteriores, desplaza el límite a aproximadamente **1.640 millones de años**.
- Un umbral provisional de **1 parte por millón**, asociado a la posible persistencia de algunas plantas CAM —plantas que utilizan metabolismo ácido de las crasuláceas y separan la captación nocturna de dióxido de carbono de su uso diurno— o de plantas acuáticas capaces de utilizar bicarbonato disuelto, lo desplaza a aproximadamente **1.840 millones de años**.

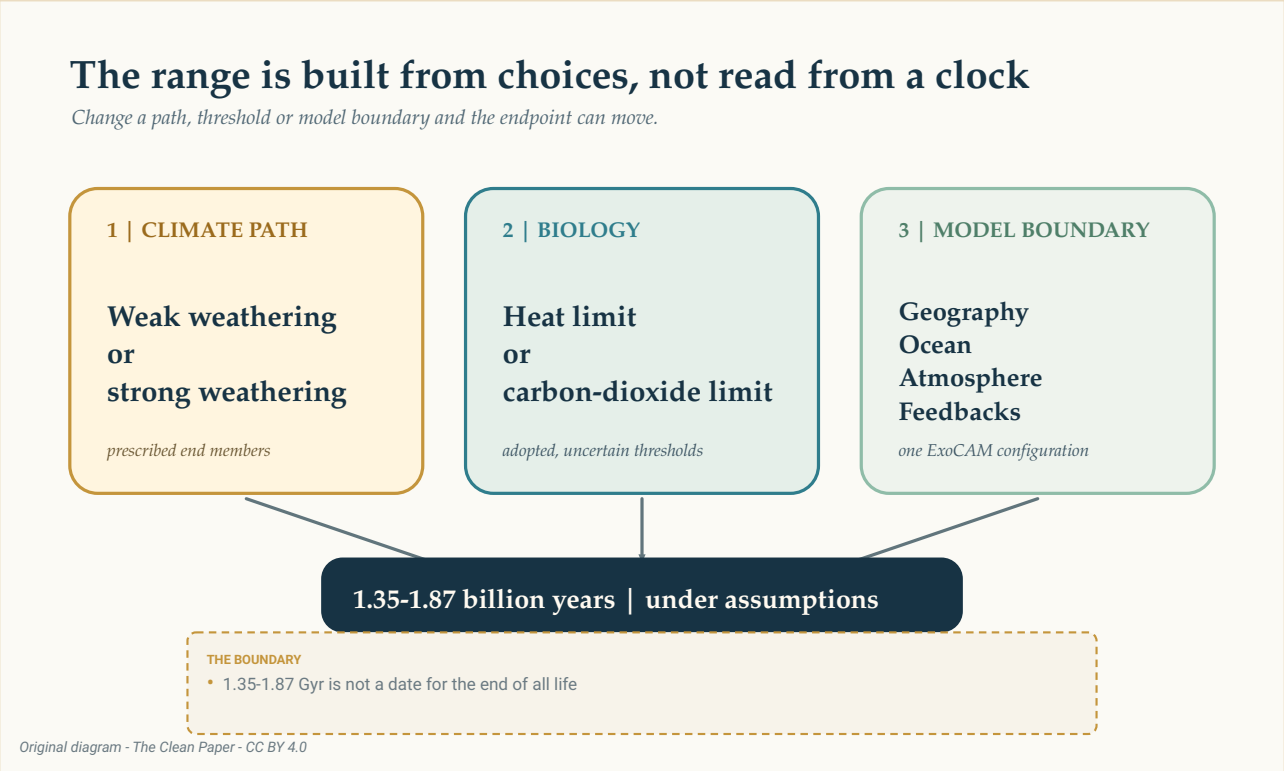
La última cifra lleva asociada la mayor cautela biológica. Los autores califican explícitamente de provisional el límite de una parte por millón. No es un umbral de supervivencia establecido experimentalmente para todas las plantas CAM o la vegetación acuática bajo las condiciones de la Tierra futura.

> **C3, C4 y CAM son estrategias, no una escala jerárquica**
>
> Las plantas emplean rutas bioquímicas distintas para capturar carbono. La **fotosíntesis C3** es la más común. La **fotosíntesis C4**, utilizada por plantas como el maíz y la caña de azúcar, concentra dióxido de carbono alrededor de la enzima que fija el carbono y puede funcionar mejor cuando el dióxido de carbono es escaso. El **metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM)** separa la captación y el uso del carbono entre la noche y el día, lo que ayuda a muchas plantas a conservar agua.
> Son familias de estrategias con muchas diferencias entre especies, no rangos sucesivos de plantas «mejores». Los umbrales extremadamente bajos de dióxido de carbono del artículo son supuestos para explorar posibles límites, no garantías de que un ecosistema futuro evolucione para utilizarlos.

# Por qué 1.860 millones de años no es una fecha de caducidad

La estimación principal del artículo, de aproximadamente **1.860 millones de años**, es la media de los dos extremos superiores optimistas: 1.840 millones de años en la rama limitada por dióxido de carbono y 1.870 millones en la rama limitada por calor. Es un resumen compacto de dos escenarios distintos. No es un tercer resultado del modelo con mayor precisión, ni una fecha estimada como más probable.

Ni siquiera el intervalo más amplio, de 1.350 a 1.870 millones de años, lleva asociada una única probabilidad. Sus valores inferior y superior dependen de supuestos diferentes sobre meteorización, de umbrales biológicos distintos y de una configuración concreta del modelo climático. El intervalo mide tanto las decisiones del experimento como el tiempo.




El intervalo de 1.350 a 1.870 millones de años solo aparece después de elegir una trayectoria de meteorización, un umbral biológico y unos límites del modelo. Es un mapa de supuestos, no un reloj que termine con la extinción de toda la vida.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Otros límites podrían llegar antes

Las estimaciones más largas de la biosfera vegetal se aproximan a otra frontera incierta: un efecto invernadero húmedo o desbocado que podría provocar una gran pérdida de los océanos. Los modelos climáticos discrepan mucho sobre cuándo comienzan esos estados bajo una luz solar creciente,

especialmente lejos de las condiciones actuales. Algunas estimaciones los sitúan antes del límite más optimista para la fotosíntesis.

Eso significa que la rama superior no puede leerse como una promesa de que la Tierra conservará sus océanos, continentes familiares o condiciones superficiales habitables hasta dentro de 1.870 millones de años. El modelo tampoco incluye la futura tectónica de placas, cambios en la superficie terrestre, ecosistemas en evolución ni un océano plenamente dinámico. Sus cálculos sobre cómo la atmósfera absorbe y emite energía también se llevan a regímenes de luz solar intensa y dióxido de carbono extremadamente bajo en los que los distintos modelos divergen.

La adaptación evolutiva y la intervención tecnológica aparecen como posibilidades en la discusión del artículo. No son resultados de las 29 simulaciones climáticas. El modelo no muestra organismos futuros que evolucionen una vía fotosintética capaz de funcionar con una parte por millón, ni una civilización que gestione la atmósfera durante mil millones de años.

## Esto no es un resultado sobre la crisis climática actual

El aumento de brillo del Sol actúa durante cientos de millones o miles de millones de años. El calentamiento moderno provocado por los seres humanos procede del rápido aumento de gases de efecto invernadero durante décadas y siglos. Son forzamientos distintos, en escalas temporales radicalmente diferentes, que responden a preguntas diferentes.

Nada en este estudio debilita las pruebas del cambio climático actual ni constituye un argumento para retrasar las medidas. Una biosfera que quizá conserve alguna forma de vida fotosintética bajo un escenario lejano de modelo no es lo mismo que un clima en el que las sociedades y los ecosistemas actuales permanezcan seguros.

El artículo es valioso porque plantea de forma más rigurosa una pregunta remota. Muestra que modelos anteriores y más sencillos quizá calentaban demasiado cuando aumentaba la luz solar y el dióxido de carbono permanecía fijo, y que la vida fotosintética puede disponer de más vías de persistencia de las que sugiere un único umbral canónico de carbono. También muestra por qué cada fracción adicional de mil millones de años viene acompañada de una cadena de supuestos.

El Sol que alimenta una hoja está cambiando lentamente. Que la Tierra siga verde otros 1.350, 1.870 o cualquier otro número de millones de años dependerá de cómo respondan juntos las rocas, el agua, la atmósfera y la vida. El resultado honesto no es una fecha. Es una visión más amplia de ese equilibrio.

## En pocas palabras

Un estudio climático tridimensional pregunta cuánto tiempo podría persistir la biosfera vegetal —fotosintética— de la Tierra mientras el Sol aumenta lentamente de brillo. Los investigadores calcularon 29 climas independientes en estado estacionario y trazaron sobre ellos dos casos extremos ilustrativos. Con meteorización débil y dióxido de carbono fijo en 400 partes por millón, los límites

de calor adoptados para las plantas terrestres aparecen dentro de aproximadamente 1.680 y 1.870 millones de años. Con meteorización fuerte y temperatura media global fija en 288 kelvin, unos 15 grados Celsius, los límites de dióxido de carbono adoptados para la fotosíntesis aparecen dentro de aproximadamente 1.350, 1.640 y, utilizando un umbral provisional, 1.840 millones de años. La cifra citada a menudo de 1.860 millones de años es solo la media redondeada de los dos extremos superiores optimistas. Son intervalos de modelo dependientes de escenarios, no una fecha en la que terminen la Tierra, la humanidad o toda la vida. El modelo utiliza trayectorias prescritas, geografía actual, un océano de capa y ningún acoplamiento explícito suelo-vegetación o clima-meteorización; además, las estimaciones más largas se aproximan a límites inciertos de efecto invernadero y pérdida oceánica.

## Sin rodeos

**Lo que muestra el artículo:** en esta configuración de ExoCAM, los climas tridimensionales generalmente se calientan menos bajo una luz solar creciente y un dióxido de carbono fijo que los modelos simplificados utilizados como comparación. Entre dos casos extremos de meteorización prescritos y varios umbrales biológicos adoptados, los límites de la biosfera vegetal se sitúan aproximadamente entre 1.350 y 1.870 millones de años a partir de ahora.

**Lo que es plausible, pero no está establecido:** que algunas plantas CAM o plantas acuáticas que utilicen bicarbonato disuelto puedan mantener la fotosíntesis cerca de una parte por millón de dióxido de carbono atmosférico; que la adaptación o la tecnología puedan prolongar aún más la vida fotosintética; y que la trayectoria real clima-meteorización permanezca entre los dos casos extremos del modelo.

**Lo que no muestra:** una fecha fija para el final de todas las plantas, toda la vida, la civilización humana, los océanos de la Tierra o el planeta; una simulación continua de los próximos dos mil millones de años; ni motivo alguno para restar importancia al cambio climático actual provocado por los seres humanos.

**Limitaciones principales:** 29 casos en estado estacionario de una sola familia de modelos climáticos; trayectorias de meteorización prescritas en lugar de acopladas dinámicamente; geografía actual; océano de capa; metano fijo; oblicuidad y excentricidad cero; ausencia de suelos, vegetación o retroalimentación explícita de la biosfera; umbrales inciertos de calor y dióxido de carbono; y grandes discrepancias entre modelos cerca de condiciones de efecto invernadero húmedo y desbocado.

**¿Cuánta confianza debería tener un lector general?** Confianza alta en que el estudio amplía el intervalo plausible de los modelos e identifica los supuestos que lo controlan. Confianza moderada en el intervalo numérico como una delimitación útil dentro de este modelo. Confianza baja en cualquier fecha exacta, porque los extremos más lejanos dependen de trayectorias climáticas deliberadamente extremas y de biología incierta.

# Fuentes

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