



Trayectorias del Sistema Tierra en el Antropoceno

Will Steffen, Johan Rockström, Katherine Richardson, Timothy M. Lenton, Carl Folke, Diana Liverman, Colin P. Summerhayes, Anthony D. Barnosky, Sarah E. Cornell, Michel Crucifix, Jonathan F. Donges, Ingo Fetzer, Steven J. Lade, Marten Scheffer, Ricarda Winkelmann and Hans Joachim Schellnhuber

Síntesis

Exploramos el riesgo de que las retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas puedan empujar al Sistema Tierra hacia un umbral planetario que, si se cruza, podría impedir la estabilización del clima con aumentos de temperatura intermedios y causar un calentamiento continuado en una trayectoria de "Tierra Invernadero", incluso aunque se reduzcan las emisiones humanas. Cruzar el umbral llevaría a una temperatura media global mucho más alta que la de cualquier interglacial de los últimos 1,2 millones de años y a niveles del mar significativamente más altos que en cualquier momento del Holoceno. Examinamos las pruebas de que ese umbral podría existir y dónde podría estar. Si se cruza el umbral, la trayectoria resultante causaría probablemente graves trastornos en los ecosistemas, la sociedad y las economías. La acción humana colectiva es necesaria para alejar el Sistema Tierra de un posible umbral y estabilizarlo en un estado habitable similar al interglacial. Dicha acción implica la gestión de todo el Sistema Tierra -biosfera, clima y sociedades- y podría incluir la descarbonización de la economía mundial, la mejora de los sumideros de carbono de la biosfera, los cambios de comportamiento, las innovaciones tecnológicas, los nuevos acuerdos de gobernanza y la transformación de los valores sociales.

El Antropoceno es una propuesta de nueva época geológica¹ basada en la observación de que los impactos humanos sobre los procesos planetarios



Foto de [Mohammad hussein kazemi](#) en [Unsplash](#)

¹ ↪ PJ Crutzen, Geology of mankind. Nature **415**, 23 (2002). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

esenciales han llegado a ser tan profundos² que han sacado a la Tierra de la época del Holoceno en la que se desarrollaron la agricultura, las comunidades sedentarias y, finalmente, las sociedades humanas social y tecnológicamente complejas. La comunidad estratigráfica,³ está considerando la formalización del Antropoceno como

Sostenemos que las tendencias y decisiones sociales y tecnológicas que se produzcan en la próxima década o dos podrían influir significativamente en la trayectoria del Sistema Tierra durante decenas o cientos de miles de años y conducir potencialmente a condiciones que serían inhóspitas para las sociedades humanas actuales y para muchas otras especies contemporáneas.

una nueva época geológica, pero independientemente del resultado de ese proceso, se está haciendo evidente que las condiciones del Antropoceno transgreden las del Holoceno en varios aspectos (2). El conocimiento de que la actividad humana rivaliza ahora con las fuerzas geológicas a la hora de influir en la trayectoria del Sistema Tierra tiene importantes implicaciones tanto para la ciencia del Sistema Tierra como para la

toma de decisiones de la sociedad. Si bien se reconoce que las distintas sociedades del mundo han contribuido de manera diferente y desigual a las presiones sobre el Sistema Tierra y que tendrán distintas capacidades para alterar las trayectorias futuras,⁴ es necesario tener en cuenta la suma total de los impactos humanos sobre el sistema para analizar las trayectorias futuras del Sistema Tierra.

Aquí exploramos las posibles trayectorias futuras del Sistema Tierra abordando las siguientes preguntas.

¿Qué acciones humanas podrían crear una vía que alejara al Sistema Tierra del posible umbral y lo condujera hacia el mantenimiento de las condiciones interglaciales? Abordar estas cuestiones requiere una profunda integración de los conocimientos de la ciencia biogeofísica del Sistema Tierra con los de las ciencias sociales y las humanidades sobre el desarrollo y el funcionamiento de las sociedades humanas.⁵ La integración de los conocimientos necesarios puede resultar difícil, sobre todo por la enorme variedad de escalas temporales que se manejan. Cada vez más, los conceptos del análisis de sistemas complejos proporcionan un marco que une los diversos campos de investigación relevantes para el Antropoceno.⁶ La dinámica del Sistema Tierra puede describirse, estudiarse y entenderse en términos de trayectorias entre estados alternativos separados por umbrales que son controlados por procesos no lineales, interacciones y retroalimentaciones. Basándonos en este marco, sostenemos que las tendencias y decisiones sociales y tecnológicas que se produzcan en la próxima década o dos podrían influir significativamente en la trayectoria del Sistema Tierra durante decenas o cientos de miles de años y conducir potencialmente a condiciones que se asemejan a los estados planetarios que se vieron por última vez hace varios millones de años, condiciones que serían inhóspitas para las sociedades humanas actuales y para muchas otras especies contemporáneas.

² ↗ W Steffen, W Broadgate, L Deutsch, O Gaffney, C Ludwig, The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *Anthropocene Rev* **2**, 81–98 (2015). [CrossrefGoogle Scholar](#)

³ ↗ CN Waters, et al., The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science* **351**, aad2622 (2016). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁴ ↗ A Malm, A Hornborg, The geology of mankind? A critique of the Anthropocene narrative. *Anthropocene Rev* **1**, 62–69 (2014). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁵ ↗ JF Donges, et al., Closing the loop: Reconnecting human dynamics to Earth System science. *Anthropocene Rev* **4**, 151–157 (2017). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁶ ↗ SA Levin, Complex adaptive systems: Exploring the known, the unknown and the unknowable. *Bull Am Math Soc* **40**, 3–20 (2003). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

Riesgo de una Senda de Tierra Invernadero

Ciclos Límite y Umbrales Planetarios

La trayectoria del Sistema Tierra a lo largo del Cuaternario tardío, en particular el Holoceno, proporciona el contexto para explorar los cambios impulsados por el hombre en el Antropoceno y las futuras trayectorias del sistema (el [Apéndice SI](#) tiene más detalles). La Fig. 1 muestra una representación simplificada de la compleja dinámica del Sistema Tierra, en la que el sistema climático físico está sometido a los efectos de los lentos cambios en la órbita y la inclinación de la Tierra. A lo largo del Cuaternario tardío (últimos 1,2 millones de años), el sistema ha permanecido acotado entre los extremos glaciales e interglaciales. No todos los ciclos glaciales-interglaciales del último millón de años siguen exactamente la misma trayectoria,⁷ pero los ciclos siguen la misma vía general (término que utilizamos para referirnos a una familia de trayectorias ampliamente similares). Los estados glaciales e interglaciales completos y las oscilaciones de unos 100.000 años entre ellos en el Cuaternario Tardío constituyen vagamente ciclos límite (técnicamente, la dinámica asintótica de las edades de hielo se modela mejor como atrayentes de retroceso en un sistema dinámico no autónomo). Este ciclo límite se muestra de forma esquemática en azul en la Fig. 1, abajo a la izquierda, utilizando la temperatura y el nivel del mar como ejes. El Holoceno está representado por la parte superior del bucle del ciclo límite cerca de la etiqueta A.

La posición actual del Sistema Tierra en el Antropoceno se muestra en la Fig. 1, arriba a la derecha, por la pequeña bola en el camino que se aleja del ciclo glacial-interglacial límite. En la [Fig. 2](#), un paisaje de estabilidad, la posición actual del Sistema Tierra está representada por el globo al final de la flecha sólida en la cuenca de atracción del Antropoceno que se profundiza.

El Antropoceno representa el inicio de una trayectoria muy rápida del Sistema Tierra, impulsada por el hombre, que se aleja del ciclo glacial-interglacial límite hacia unas condiciones climáticas nuevas y más cálidas y una biosfera profundamente diferente ([2](#), [8](#), [9](#)) ([Apéndice del SI](#)). La posición actual, a más de 1 °C por encima de la línea de base

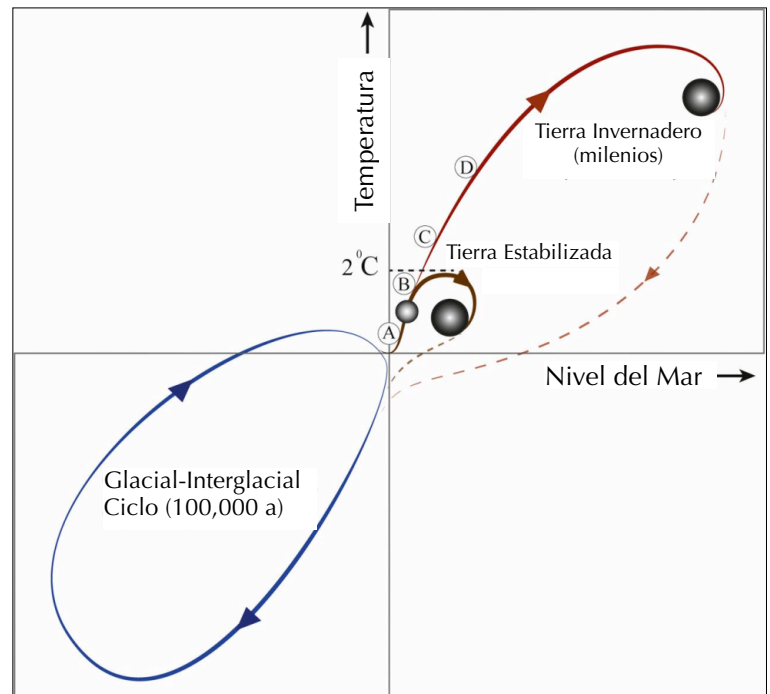


Figura 1. Ilustración esquemática de las posibles trayectorias futuras del clima sobre el fondo de los típicos ciclos glaciales-interglaciales (abajo a la izquierda). El estado interglacial del Sistema Tierra se encuentra en la parte superior del ciclo glacial-interglacial, mientras que el estado glacial está en la parte inferior. El nivel del mar sigue el cambio de temperatura de forma relativamente lenta a través de la expansión térmica y el deshielo de los glaciales y los casquetes polares. La línea horizontal en el centro de la figura representa el nivel de temperatura preindustrial, y la posición actual del Sistema Tierra se muestra con la pequeña esfera en la línea roja cerca de la divergencia entre las vías de la Tierra Estabilizada y la Tierra Invernadero. También se muestra el umbral planetario propuesto en $\sim 2^\circ\text{C}$ por encima del nivel preindustrial. Las letras a lo largo de las vías Tierra Estabilizada/Tierra Invernadero representan cuatro periodos de tiempo en el pasado reciente de la Tierra que pueden dar una idea de las posiciones a lo largo de estas vías ([Apéndice SI](#)): A, mediados del Holoceno; B, Eemiano; C, mediados del Plioceno; y D, mediados del Mioceno. Sus posiciones en la ruta son sólo aproximadas. Sus rangos de temperatura relativos a la época preindustrial se indican en el [Apéndice SI](#), Tabla S1.

⁷ ↪ Past Interglacial Working Group of PAGES, Interglacials of the last 800,000 years. *Rev Geophys* **54**, 162–219 (2016). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁸ ↪ M Williams, et al., The Anthropocene biosphere. *Anthropocene Rev* **2**, 196–219 (2015). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁹ ↪ JR McNeill, P Engelke The Great Acceleration (Harvard Univ Press, Cambridge, MA, 2016). [Google Scholar](#)

preindustrial,¹⁰ se acerca a la envoltura superior de las condiciones interglaciales de los últimos 1,2 millones de años

Sostenemos que existe un riesgo significativo de que estas dinámicas internas se conviertan en un factor importante, o tal vez incluso dominante, a la hora de dirigir la trayectoria que el Sistema Tierra siga realmente en los próximos siglos.

([Apéndice SI](#), Tabla S1). Y lo que es más importante, la rápida trayectoria del sistema climático durante el último medio siglo, junto con el bloqueo tecnológico y la inercia socioeconómica de los sistemas humanos, hacen que el sistema climático se encuentre en condiciones más allá de las condiciones interglaciales del pasado. Por lo tanto,

sugerimos que el Sistema Tierra puede haber pasado ya una "bifurcación" de caminos potenciales, una bifurcación (cerca de A en la [Fig. 1](#)) que saca al Sistema Tierra del próximo ciclo de glaciación.¹¹

En el futuro, el Sistema Tierra podría seguir potencialmente muchas trayectorias, (¹², ¹³) a menudo representadas por la gran gama de aumentos de temperatura global simulados por los modelos climáticos.¹⁴ En la mayoría de los análisis, estas trayectorias están impulsadas en gran medida por la cantidad de gases de efecto invernadero que las actividades humanas ya han emitido y seguirán emitiendo a la atmósfera durante el resto de este siglo y más allá, con una supuesta relación cuasilineal entre las emisiones acumuladas de dióxido de carbono y el aumento de la temperatura global (¹⁴). Sin embargo, aquí sugerimos que los procesos de retroalimentación biogeofísica dentro del Sistema Tierra, junto con la degradación directa de la biosfera por parte del ser humano, pueden desempeñar un papel más importante de lo que normalmente se supone, limitando la gama de posibles trayectorias futuras y eliminando potencialmente la posibilidad de las trayectorias intermedias. Sostenemos que existe un riesgo significativo de que estas dinámicas internas, especialmente las fuertes no linealidades en los procesos de retroalimentación, se conviertan en un factor importante, o tal vez incluso dominante, a la hora de dirigir la trayectoria que el Sistema Tierra siga realmente en los próximos siglos.

Este riesgo está representado en las [Figs. 1](#) y [2](#) por un umbral planetario (línea horizontal discontinua en la [Fig. 1](#) sobre la trayectoria de la Tierra Invernadero alrededor de 2 °C por encima de la temperatura preindustrial). Más allá de este

Incluso si se cumple el objetivo del Acuerdo de París de un aumento de la temperatura de 1,5 °C a 2,0 °C, no podemos excluir el riesgo de que una cascada de retroalimentación pueda empujar al sistema Tierra de forma irreversible hacia una senda de "Tierra Invernadero".

umbral, las retroalimentaciones bio-geofísicas intrínsecas del sistema Tierra ([Retroalimentaciones Bio-geofísicas](#)) podrían convertirse en los procesos dominantes que controlan la trayectoria del sistema. No se sabe con exactitud dónde podría estar el posible umbral planetario (¹⁵, ¹⁶). Sugerimos 2 °C debido al riesgo de que un calentamiento de 2 °C pueda activar importantes elementos de inflexión (¹², ¹⁷), elevando la

temperatura aún más para activar otros elementos de inflexión en una cascada tipo dominó que podría llevar al Sistema

¹⁰ ↪ E Hawkins, et al., Estimating changes in global temperature since the pre-industrial period. *Bull Am Meteorol Soc* **98**, 1841–1856 (2017). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

¹¹ ↪ A Ganopolski, R Winkelmann, HJ Schellnhuber, Critical insolation-CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* **529**, 200–203 (2016). [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

¹² ↪ HJ Schellnhuber, S Rahmstorf, R Winkelmann, Why the right climate target was agreed in Paris. *Nat Clim Change* **6**, 649–653 (2016). [CrossrefGoogle Scholar](#)

¹³ ↪ HJ Schellnhuber, 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature* **402**, C19–C23 (1999). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

¹⁴ ↪ ; IPCC, Summary for policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds TF Stocker, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp. 3–29 (2013). [Google Scholar](#)

¹⁵ ↪ S Drijfhout, et al., Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models. *Proc Natl Acad Sci USA* **112**, E5777–E5786 (2015). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

¹⁶ ↪ TF Stocker, et al., Technical summary. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds TF Stocker, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK, 2013). Go to reference [Google Scholar](#)

¹⁷ ↪ TM Lenton, et al., Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc Natl Acad Sci USA* **105**, 1786–1793 (2008). [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

Tierra a temperaturas aún más altas (Cascadas de Inflexión). Estas cascadas constituyen, en esencia, el proceso dinámico que conduce a los umbrales en los sistemas complejos (sección 4.2 de la ref.¹⁸).

Este análisis implica que, incluso si se cumple el objetivo del Acuerdo de París de un aumento de la temperatura de 1,5 °C a 2,0 °C, no podemos excluir el riesgo de que una cascada de retroalimentación pueda empujar al sistema Tierra de forma irreversible hacia una senda de "Tierra Invernadero". El reto al que se enfrenta la humanidad es crear una trayectoria de "Tierra Estabilizada" que aleje al Sistema Tierra de su trayectoria actual hacia el umbral más allá del cual se encuentra la Tierra Invernadero (Fig. 2). La vía de la Tierra Estabilizada creada por el ser humano conduce a una cauce de atracción que no es probable que exista en el paisaje de la estabilidad del Sistema Tierra sin la administración humana para crearla y mantenerla. La creación de esta vía y del cauce de atracción requiere un cambio fundamental en el papel de los seres humanos en el planeta. Este papel de administración requiere una acción deliberada y sostenida para convertirse en una parte integral y adaptativa de la dinámica del Sistema Tierra, creando retroalimentaciones que mantengan el sistema en una senda de Tierra Estabilizada ([senda alternativa de estabilización de la Tierra](#)). A continuación, exploramos esta cuestión crítica con más detalle considerando las retroalimentaciones bio-geofísicas relevantes ([Retroalimentaciones Bio-geofísicas](#)) y el riesgo de cascadas de inflexión ([Cascadas de Inflexión](#)).

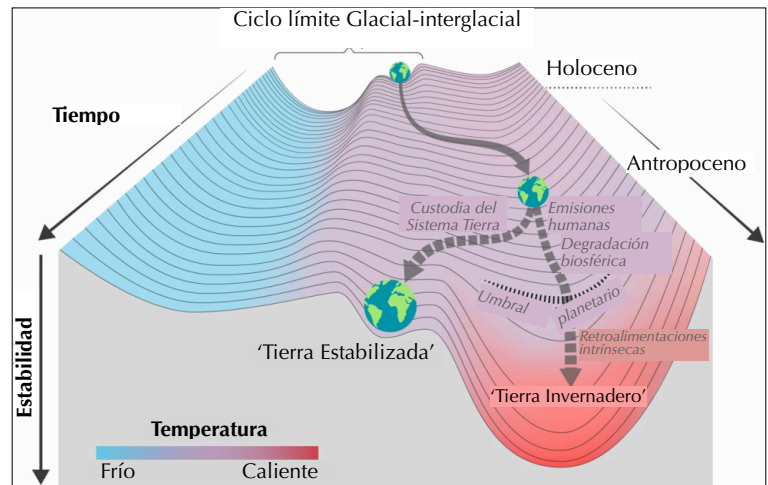


Figura 2. Paisaje de estabilidad que muestra el camino del Sistema Tierra desde el Holoceno y, por tanto, desde el ciclo glacial-interglacial límite hasta su posición actual en el Antropoceno más cálido. La bifurcación del camino en la Fig. 1 se muestra aquí como las dos vías divergentes del Sistema Tierra en el futuro (flechas rotas). Actualmente, el Sistema Tierra se encuentra en una senda de Tierra Invernadero impulsada por las emisiones humanas de gases de efecto invernadero y la degradación de la biosfera hacia un umbral planetario a ~2 °C (línea horizontal discontinua a 2 °C en la Fig. 1), más allá de la cual el sistema sigue una senda esencialmente irreversible impulsada por las retroalimentaciones bio-geofísicas intrínsecas. La otra vía conduce a la Tierra Estabilizada, una vía de administración del Sistema Tierra guiada por las retroalimentaciones creadas por el ser humano hacia un cauce de atracción cuasi-estable y mantenida por el ser humano. La "estabilidad" (eje vertical) se define aquí como la inversa de la energía potencial del sistema. Los sistemas que se encuentran en un estado altamente estable (valle profundo) tienen una energía potencial baja, y se requiere una energía considerable para sacarlos de este estado estable. Los sistemas que se encuentran en un estado inestable (en la cima de una colina) tienen una energía potencial alta y sólo necesitan un poco de energía adicional para sacarlos de la colina y llevarlos a un valle de menor energía potencial.

Retroalimentaciones Bio-geofísicas

La trayectoria del Sistema Tierra está influenciada por las retroalimentaciones bio-geofísicas dentro del sistema que pueden mantenerlo en un estado determinado (retroalimentaciones negativas) y las que pueden amplificar una perturbación e impulsar una transición a un estado diferente (retroalimentaciones positivas). Algunas de las retroalimentaciones negativas clave que podrían mantener el Sistema Tierra en condiciones similares a las del Holoceno -en particular, la absorción de carbono por parte de los sistemas terrestres y oceánicos- se están debilitando en relación con la agresión humana (19),¹⁹ lo que aumenta el riesgo de que las retroalimentaciones positivas puedan desempeñar un papel importante en la determinación de la trayectoria del Sistema Tierra. La Tabla 1 resume las retroalimentaciones del ciclo del carbono que podrían acelerar el calentamiento, mientras que la Tabla S2 del Apéndice del SI describe en

¹⁸ ↪ M Scheffer Critical Transitions in Nature and Society (Princeton Univ Press, Princeton, 2009). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

¹⁹ ↪ MR Raupach, et al., The declining uptake rate of atmospheric CO₂ by land and ocean sinks. Bio-geosciences **11**, 3453–3475 (2014). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

detalle un conjunto más completo de retroalimentaciones bio-geofísicas que pueden ser desencadenadas por los niveles de agresión que probablemente se alcancen en lo que queda de siglo.

Tabla 1. La retroalimentación del ciclo del carbono en el Sistema Tierra que podría acelerar el calentamiento global

Retroalimentación	Fuerza de retroalimentación en 2100,* °C	Refs. (SI Appendix, Table S2 tiene mayores detalles)
Deshielo del permafrost	0.09 (0.04–0.16)	20–23
Debilitamiento relativo de los sumideros fisiológicos C terrestres y oceánicos	0.25 (0.13–0.37)	24
Aumento de la respiración bacteriana en el océano	0.02	25, 26
Muerte de bosques amazónicos	0.05 (0.03–0.11)	27
Muerte de bosques boreales	0.06 (0.02–0.10)	28
Total	0.47 (0.24–0.66)	

La fuerza de la retroalimentación se estima en 2100 para un calentamiento de ~2 °C.
* El aumento adicional de la temperatura (grados Celsius) en 2100 derivado de la retroalimentación.

([20](#), [21](#), [22](#), [23](#), [24](#), [25](#), [26](#), [27](#), [28](#))

La mayoría de las retroalimentaciones pueden mostrar respuestas continuas así como un comportamiento de punto de inflexión en el que el proceso de retroalimentación se auto perpetúa tras cruzar un umbral crítico; los subsistemas que muestran este comportamiento suelen denominarse "elementos de inflexión" ([17](#)). El tipo de comportamiento -respuesta continua o punto de inflexión/cambio brusco- puede depender de la magnitud o de la tasa de agresión, o de ambas. Muchas retroalimentaciones mostrarán algún cambio gradual antes de que se alcance el punto de inflexión.

²⁰ ↪ K Schaefer, H Lantuit, VE Romanovsky, EAG Schuur, R Witt, The impact of the permafrost carbon feedback on global climate. *Environ Res Lett* **9**, 085003 (2014). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

²¹ ↪ T Schneider von Deimling, et al., Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences* **12**, 3469–3488 (2015). [CrossrefGoogle Scholar](#)

²² ↪ CD Koven, et al., A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon-climate feedback. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* **373**, 20140423 (2015). [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

²³ ↪ SE Chadburn, et al., An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nat Clim Change* **7**, 340–344 (2017). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

²⁴ ↪ P Ciais, et al., Carbon and other biogeochemical cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds TF Stocker, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp. 465–570 (2013). Go to reference [Google Scholar](#)

²⁵ ↪ J Segschneider, J Bendsen, Temperature-dependent remineralization in a warming ocean increases surface pCO₂ through changes in marine ecosystem composition. *Global Biogeochem Cycles* **27**, 1214–1225 (2013). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

²⁶ ↪ J Bendsen, KM Hilligsøe, J Hansen, K Richardson, Analysis of remineralisation, lability, temperature sensitivity and structural composition of organic matter from the upper ocean. *Prog Oceanogr* **130**, 125–145 (2015). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

²⁷ ↪ C Jones, J Lowe, S Liddicoat, R Betts, Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nat Geosci* **2**, 484–487 (2009). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

²⁸ ↪ WA Kurz, MJ Apps, A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecol Appl* **9**, 526–547 (1999). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

Algunos de los cambios asociados a las retroalimentaciones son reversibles en plazos cortos de 50 a 100 años (por ejemplo, el cambio en la extensión del hielo marino del Ártico con un calentamiento o enfriamiento del clima; el hielo

La mayoría de los cambios son en gran medida irreversibles en plazos importantes para las sociedades contemporáneas.

marino de la Antártida puede ser menos reversible debido a la acumulación de calor en el Océano Antártico), pero la mayoría de los cambios son en gran medida irreversibles en plazos importantes para las sociedades contemporáneas (por ejemplo, la pérdida de

carbono del permafrost). Algunas de las retroalimentaciones no tienen umbrales aparentes (por ejemplo, el cambio en los sumideros fisiológicos de carbono terrestre y oceánico, como el aumento de la captación de carbono debido al efecto de fertilización del CO₂ o la disminución de la captación debido a la disminución de las precipitaciones). Para algunos de los elementos de inflexión, cruzar el punto de inflexión podría desencadenar una respuesta abrupta y no lineal (por ejemplo, la conversión de grandes áreas de la selva amazónica en una sabana o bosque estacionalmente seco), mientras que para otros, cruzar el punto de inflexión llevaría a una respuesta más gradual pero auto perpetuante (pérdida a gran escala del permafrost). También podría haber retrasos considerables tras el cruce de un umbral, sobre todo en el caso de los elementos de inflexión que implican la fusión de grandes masas de hielo. Sin embargo, en algunos casos, la pérdida de hielo puede ser muy rápida cuando se produce como brotes masivos de témpanos (por ejemplo, los eventos Heinrich).

En el caso de algunos procesos de retroalimentación, la magnitud -e incluso la dirección- depende del ritmo del cambio climático. Si el índice de cambio climático es pequeño, el cambio de los biomas puede seguir el cambio de temperatura/humedad, y los biomas pueden cambiar gradualmente, absorbiendo potencialmente el carbono de la atmósfera a medida que el clima se calienta y la concentración atmosférica de CO₂ aumenta. Sin embargo, si el ritmo del cambio climático es demasiado grande o demasiado rápido, puede cruzarse un punto de inflexión y producirse un rápido cambio de bioma a través de grandes perturbaciones (por ejemplo, incendios forestales, ataques de insectos, sequías) que pueden eliminar abruptamente un bioma existente. En algunos casos terrestres, como los incendios forestales generalizados, podría producirse un impulso de carbono a la atmósfera que, si es lo suficientemente grande, podría influir en la trayectoria del Sistema Tierra.²⁹

La variación de las tasas de respuesta a un clima cambiante podría dar lugar a una dinámica compleja de la biosfera con implicaciones para los procesos de retroalimentación. Por ejemplo, los retrasos en el deshielo del permafrost retrasarían con toda probabilidad la migración prevista hacia el norte de los bosques boreales,³⁰ mientras que el calentamiento de las zonas meridionales de estos bosques podría provocar su conversión en pastizales esteparios con una capacidad de almacenamiento de carbono significativamente menor. El resultado global sería una retroalimentación positiva para el sistema climático.

El llamado "reverdecimiento" del planeta, causado por el mayor crecimiento de las plantas debido al aumento de la concentración atmosférica de CO₂,³¹ ha aumentado el sumidero de carbono terrestre en las últimas décadas.³² Sin embargo, el aumento del CO₂ atmosférico eleva la temperatura, y las hojas más calientes hacen menos fotosíntesis.

²⁹ ↪ SL Lewis, PM Brando, OL Phillips, GMF van der Heijden, D Nepstad, The 2010 Amazon drought. *Science* **331**, 554 (2011). [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

³⁰ ↪ U Herzschuh, et al., Glacial legacies on interglacial vegetation at the Pliocene-Pleistocene transition in NE Asia. *Nature Commun* **7**, 11967 (2016). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

³¹ ↪ J Mao, et al., Human-induced greening of the northern extratropical land surface. *Nat Clim Change* **6**, 959–963 (2016). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

³² ↪ TF Keenan, et al., Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nature Commun* **7**, 13428, and erratum (2017) 8:16137 (2016). [CrossrefGoogle Scholar](#)

También intervienen otras retroalimentaciones: por ejemplo, el calentamiento del suelo aumenta la respiración microbiana, liberando CO₂ de nuevo a la atmósfera.

Nuestro análisis se centra en la fuerza de la retroalimentación de aquí a 2100. No obstante, varias de las retroalimentaciones que muestran una magnitud insignificante o muy pequeña de aquí a 2100 podrían desencadenarse mucho antes de esa fecha, y podrían acabar generando una fuerza de retroalimentación significativa en plazos más largos -siglos e incluso milenios- y, por tanto, influir en la trayectoria a largo plazo del sistema Tierra. Estos procesos de retroalimentación incluyen el descongelamiento del permafrost, la descomposición de los hidratos de metano del océano, el aumento de la respiración bacteriana marina y la pérdida de las capas de hielo polares, acompañada de un aumento del nivel del mar y una posible amplificación del aumento de la temperatura a través de cambios en la circulación oceánica.³³

Cascadas de Inflexión ^(34, 35,36, 37, 38)

La [Fig. 3](#) muestra un mapa global de algunas cascadas de inflexión potenciales. Los elementos de inflexión se clasifican en tres grupos en función de su temperatura umbral estimada ([12](#), [17](#),³⁹). Las cascadas podrían formarse cuando un aumento de la temperatura global alcance el nivel del grupo de temperaturas más bajas, activando elementos de inflexión, como la pérdida de la capa de hielo de Groenlandia o del hielo marino del Ártico. Estos elementos de inflexión, junto con algunas de las retroalimentaciones de los elementos que no son de inflexión (por ejemplo, el debilitamiento gradual de los sumideros fisiológicos de carbono de la tierra y el océano), podrían empujar la temperatura media global aún más alto, induciendo la inflexión en los grupos de temperatura media y alta. Por ejemplo, el vuelco (pérdida) de la capa de hielo de Groenlandia podría desencadenar una transición crítica en la Circulación Oceánica Meridional del Atlántico (COMA), que podría, al provocar conjuntamente el aumento del nivel del mar y la acumulación de calor en el Océano Austral, acelerar la pérdida de hielo de la capa de hielo de la Antártida Oriental ([32](#),⁴⁰) en escalas de tiempo de siglos.⁴¹

³³ ↪ J Hansen, et al., Ice melt, sea level rise and superstorms: Evidence from paleoclimatedata, climate modeling, and modern observations that 2 °C global warming could be dangerous. Atmos Chem Phys **16**, 3761–3812 (2016). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

³⁴ ↪ E Kriegler, JW Hall, H Held, R Dawson, HJ Schellnhuber, Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system. Proc Natl Acad Sci USA **106**, 5041–5046 (2009). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

³⁵ ↪ D Pollard, RM DeConto, Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. Nature **458**, 329–332 (2009). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

³⁶ ↪ D Pollard, RM DeConto, RB Alley, Potential Antarctic Ice Sheet retreat driven by hydrofracturing and ice cliff failure. Earth Planet Sci Lett **412**, 112–121 (2015) [Crossref Google Scholar](#)

³⁷ ↪ RM DeConto, D Pollard, Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. Nature **531**, 591–597 (2016). [Crossref PubMed](#)

³⁸ ↪ SR Rintoul, et al., Ocean heat drives rapid basal melt of the Totten Ice Shelf. Sci Adv **2**, e1601610 (2016). [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

³⁹ ↪ ; US Department of Defense, National security implications of climate-related risks and a changing climate. Available at [archive.defense.gov/pubs/150724-congressional-report-on-national-implications-of-climate-change.pdf?source=govdelivery](#). Accessed February 7, 2018. (2015). [Google Scholar](#)

⁴⁰ ↪ M Mengel, A Levermann, Ice plug prevents irreversible discharge from East Antarctica. Nat Clim Change **4**, 451–455 (2014). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁴¹ ↪ KC Armour, et al., Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport. Nat Geosci **9**, 549–554 (2016). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

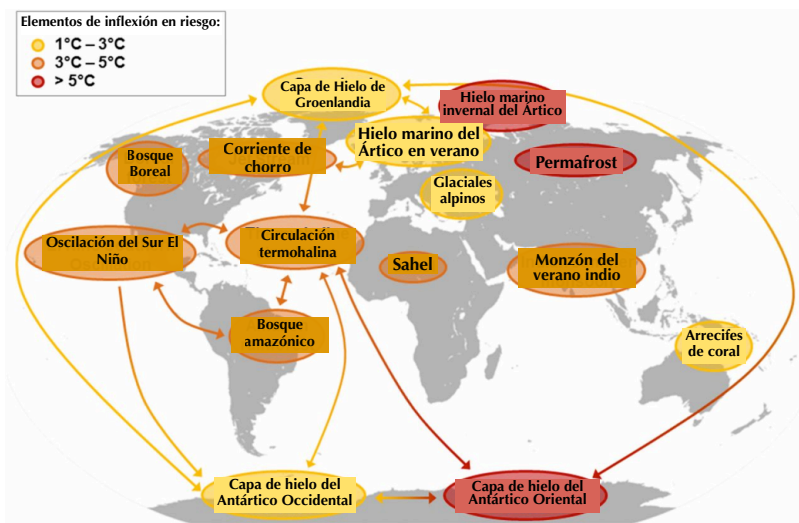


Figura 3. Mapa global de las posibles cascadas de inflexión. Los elementos de inflexión individuales están codificados por colores según los umbrales estimados en la temperatura media global de la superficie (puntos de inflexión) (12, 34). Las flechas muestran las interacciones potenciales entre los elementos de inflexión basadas en la estimación de expertos que podrían generar cascadas. Obsérvese que, aunque el riesgo de vuelco (pérdida) de la capa de hielo de la Antártida Oriental se propone a $>5^{\circ}\text{C}$, algunos sectores marinos de la Antártida Oriental pueden ser vulnerables a temperaturas más bajas (35-38).

Las observaciones del comportamiento del pasado apoyan una importante contribución de los cambios en la circulación

El calentamiento sostenido de las altas latitudes del norte como resultado de este proceso podría acelerar las retroalimentaciones o activar elementos de inflexión en esa región, como la degradación del permafrost, la pérdida de hielo marino del Ártico y el retroceso de los bosques boreales.

oceánica a esas cascadas de retroalimentación. Durante las glaciaciones anteriores, el sistema climático osciló entre dos estados que parecen reflejar cambios en la actividad convectiva de los mares nórdicos y cambios en la actividad del AMOC. Estas variaciones provocaron los típicos patrones de respuesta de la temperatura denominados "balancín bipolar" (42, 43, 44). Durante las condiciones de

frío extremo en el norte, el calor se acumuló en el Océano Austral y la Antártida se calentó. Finalmente, el calor se dirigió hacia el norte y generó un calentamiento subsuperficial que puede haber contribuido a desestabilizar los bordes de las capas de hielo del hemisferio norte.⁴⁵

Si Groenlandia y la capa de hielo de la Antártida Occidental se derriten en el futuro, el refrescamiento y el enfriamiento de las aguas superficiales cercanas tendrán efectos significativos en la circulación oceánica. Aunque la probabilidad de que se produzcan cambios significativos en la circulación es difícil de cuantificar, las simulaciones de modelos climáticos sugieren que los aportes de agua dulce compatibles con las tasas actuales de deshielo de Groenlandia son

⁴² ↪ TF Stocker, SJ Johnsen, A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Paleoceanography* **18**–1087 (2003). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁴³ ↪ S Rahmstorf, Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* **419**, 207–214 (2002). [Crossref PubMedGoogle Scholar](#)

⁴⁴ ↪ SR Hemming, Heinrich events: Massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Rev Geophys* **42**, 1–43 (2004). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁴⁵ ↪ J Alvarez-Solas, et al., Link between ocean temperature and iceberg discharge during Heinrich events. *Nat Geosci* **3**, 122–126 (2010). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

suficientes para tener efectos medibles en la temperatura y la circulación oceánicas (⁴⁶, ⁴⁷). El calentamiento sostenido de las altas latitudes del norte como resultado de este proceso podría acelerar las retroalimentaciones o activar elementos de inflexión en esa región, como la degradación del permafrost, la pérdida de hielo marino del Ártico y el retroceso de los bosques boreales.

Aunque pueda parecer un escenario extremo, esto ilustra que un calentamiento en el rango incluso del grupo de temperaturas más bajas (es decir, los objetivos de París) podría llevar a un vuelco en los grupos de temperaturas medias y altas a través de efectos en cascada. Sobre la base de este análisis de las cascadas de inflexión y adoptando un enfoque de aversión al riesgo, sugerimos que un potencial umbral planetario podría ocurrir en un aumento de la temperatura tan bajo como ~2,0 °C por encima de la preindustrial ([Fig. 1](#)).

Senda Alternativa de Tierra Estabilizada

Si las sociedades del mundo quieren evitar cruzar un umbral potencial que encierre al Sistema Tierra en la vía de la Tierra Invernadero, es fundamental que tomen decisiones deliberadas para evitar este riesgo y mantener el Sistema Tierra

La estabilización de la Tierra requeriría profundos recortes en las emisiones de gases de efecto invernadero, la protección y la mejora de los sumideros de carbono de la biosfera, esfuerzos para eliminar el CO₂ de la atmósfera, posiblemente la gestión de la radiación solar, y la adaptación a los impactos inevitables del calentamiento que ya se está produciendo.

en condiciones similares a las del Holoceno. Esta vía creada por el ser humano está representada en las [Figs. 1 y 2](#) por lo que llamamos Tierra Estabilizada (pequeño bucle en la parte inferior de la [Fig. 1](#), arriba a la derecha), en la que el Sistema Tierra se mantiene en un estado con un aumento de la temperatura no superior a 2 °C por encima de la preindustrial (un estado "superholoceno") ([11](#)). La Tierra Estabilizada requeriría

profundos recortes en las emisiones de gases de efecto invernadero, la protección y la mejora de los sumideros de carbono de la biosfera, esfuerzos para eliminar el CO₂ de la atmósfera, posiblemente la gestión de la radiación solar, y la adaptación a los impactos inevitables del calentamiento que ya se está produciendo.⁴⁸ La corta línea roja discontinua más allá de la Tierra Estabilizada en la [Fig. 1](#), arriba a la derecha, representa un posible retorno a condiciones interglaciales a largo plazo.

En esencia, la senda de la Tierra Estabilizada podría conceptualizarse como un régimen del Sistema Tierra en el que la

Una cuestión crítica es que, si se cruza un umbral planetario hacia la senda de la Tierra Invernadero, acceder a la senda de la Tierra Estabilizada se volvería muy difícil

humanidad desempeña un papel activo de custodia planetaria para mantener un estado intermedio entre el ciclo límite glacial-interglacial del Cuaternario tardío y una Tierra Invernadero ([Fig. 2](#)). Insistimos en que la Tierra Estabilizada no es un estado intrínseco del Sistema Tierra, sino más bien uno en el que la

humanidad se compromete con una vía de gestión continua de su relación con el resto del Sistema Tierra.

Una cuestión crítica es que, si se cruza un umbral planetario hacia la senda de la Tierra Invernadero, acceder a la senda de la Tierra Estabilizada se volvería muy difícil, independientemente de las acciones que pudieran tomar las sociedades

⁴⁶ ↪ R.J. Stouffer, et al., Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes. *J Clim* **19**, 1365–1387 (2006). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁴⁷ ↪ D. Swingedow, et al., Decadal fingerprints of freshwater discharge around Greenland in a multi-model ensemble. *Clim Dyn* **41**, 695–720 (2013). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁴⁸ ↪ J. Rockström, et al., A roadmap for rapid decarbonization. *Science* **355**, 1269–1271 (2017). [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

Es probable que la Tierra Invernadero sea incontrolable y peligrosa para muchos, y, en última instancia, la habitabilidad del planeta para los seres humanos.

humanas. Más allá del umbral, las retroalimentaciones positivas (de refuerzo) dentro del Sistema Tierra—fuera de la influencia o el control humano—podrían convertirse en el motor dominante de la senda del sistema, ya que los elementos individuales de inflexión crean cascadas vinculadas a través del tiempo y con el aumento de la temperatura

(Fig. 3). En otras palabras, una vez que el Sistema Tierra se haya comprometido con la vía de la Tierra Invernadero, es muy probable que la vía alternativa de la Tierra Estabilizada se vuelva inaccesible, como se ilustra en la Fig. 2.

¿Qué está en juego?

Es probable que la Tierra Invernadero sea incontrolable y peligrosa para muchos, sobre todo si hacemos la transición a ella en sólo uno o dos siglos, y plantea graves riesgos para la salud, las economías, la estabilidad política (12, 39, 49, 50) (especialmente para los más vulnerables al clima) y, en última instancia, la habitabilidad del planeta para los seres humanos.

La percepción de los riesgos que plantean los rápidos cambios climáticos que están surgiendo en el Antropoceno puede obtenerse no sólo de las observaciones contemporáneas (51, 52, 53, 54, 55), sino también de las interacciones en el pasado entre las sociedades humanas y la variabilidad hidroclimática regional y estacional. Esta variabilidad fue a menudo mucho más pronunciada que la variabilidad global a largo plazo del Holoceno (Apéndice SI). La producción agrícola y el suministro de agua son especialmente vulnerables a los cambios en el hidroclima, lo que lleva a extremos de calor/seco o frío/húmedo. Los declives sociales, los colapsos, las migraciones/reasentamientos, las reorganizaciones y los cambios culturales se asociaron a menudo con graves sequías regionales y con la megasequía global de 4,2 a 3,9 mil años antes del presente, todo ello dentro de la relativa estabilidad del estrecho rango de temperatura global del Holoceno de aproximadamente $\pm 1^\circ\text{C}$.⁵⁶

En el Apéndice del SI, la Tabla S4 resume los biomas y los subsistemas climáticos físicos regionales críticos para el bienestar humano y los riesgos resultantes si el Sistema Tierra sigue una trayectoria de Tierra Invernadero. Mientras que la mayoría de estos biomas o sistemas regionales podrían conservarse en una trayectoria de Tierra Estabilizada, la mayoría o todos ellos probablemente se verían sustancialmente modificados o degradados en una trayectoria de Tierra Invernadero, lo que supondría graves problemas para la viabilidad de las sociedades humanas.

⁴⁹ ↪ C-F Schleussner, JF Donges, RV Donner, HJ Schellnhuber, Armed-conflict risks enhanced by climate-related disasters in ethnically fractionalized countries. *Proc Natl Acad Sci USA* **113**, 9216–9221 (2016). Go to reference [CrossrefPubMed](#)

⁵⁰ ↪, eds AJ McMichael, et al. (WHO, Geneva Climate Change and Human Health: Risks and Responses, 2003). Go to reference [Google Scholar](#)

⁵¹ ↪ PD Udmale, et al., How did the 2012 drought affect rural livelihoods in vulnerable areas? Empirical evidence from India. *Int J Disaster Risk Reduct* **13**, 454–469 (2015). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁵² ↪ JK Maldonado, C Shearer, R Bronen, K Peterson, H Lazrus, The impact of climate change on tribal communities in the US: Displacement, relocation, and human rights. *Clim Change* **120**, 601–614 (2013). [Crossref Google Scholar](#)

⁵³ ↪ K Warner, T Afifi, Where the rain falls: Evidence from 8 countries on how vulnerable households use migration to manage the risk of rainfall variability and food insecurity. *Clim Dev* **6**, 1–17 (2014). [Crossref Google Scholar](#)

⁵⁴ ↪ WW Cheung, R Watson, D Pauly, Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature* **497**, 365–368 (2013). [Crossref PubMedGoogle Scholar](#)

⁵⁵ ↪ K Nakano, Screening of climatic impacts on a country's international supply chains: Japan as a case study. *Mitig Adapt Strategies Glob Change* **22**, 651–667 (2017). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁵⁶ ↪, eds C Latorre, J Wilmschurst, L von Gunten, Climate change and cultural evolution. *PAGES (Past Global Changes) Magazine* **24**, 1–32 (2016). Go to reference [Google Scholar](#)

Los sistemas agrícolas son especialmente vulnerables, porque están organizados espacialmente en torno a los patrones relativamente estables del Holoceno.

Por ejemplo, los sistemas agrícolas son especialmente vulnerables, porque están organizados espacialmente en torno a los patrones relativamente estables del Holoceno de productividad primaria terrestre, que dependen de una distribución espacial bien establecida y predecible de la temperatura y la precipitación en relación con la

ubicación de los suelos fértiles, así como de una determinada concentración atmosférica de CO₂. Los conocimientos actuales sugieren que, mientras que una trayectoria de Tierra Estabilizada podría dar lugar a un equilibrio aproximado entre los aumentos y las disminuciones de la producción regional a medida que los sistemas humanos se adaptan, una trayectoria de Tierra Invernadero probablemente superará los límites de la adaptación y dará lugar a una disminución global sustancial de la producción agrícola, a un aumento de los precios y a una disparidad aún mayor entre los países ricos y los pobres.⁵⁷

Cuanto mayor sea el impacto en términos de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, mayor será la temperatura media global.

especialmente importantes para el bienestar humano. En estas zonas vive gran parte de la población mundial, la mayoría de las megaciudades emergentes y una cantidad significativa de infraestructuras vitales tanto para las economías nacionales como para el comercio internacional. Una trayectoria de Tierra Invernadero

inundaría con toda seguridad los entornos deltaicos, aumentaría el riesgo de daños por tormentas costeras y eliminaría los arrecifes de coral (y todos los beneficios que aportan a las sociedades) a finales de este siglo o antes.⁵⁸

Retroalimentación Humana en el Sistema Tierra

En la narrativa dominante sobre el cambio climático, los seres humanos son una fuerza externa que impulsa el cambio en el Sistema Tierra de una manera ampliamente lineal y determinista; cuanto mayor sea el impacto en términos de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, mayor será la temperatura media global. Sin embargo, nuestro análisis sostiene que las sociedades humanas y nuestras actividades deben ser reformuladas como un componente integral e interactivo de un Sistema Tierra complejo y adaptable. Este planteamiento se centra no sólo en las dinámicas del sistema humano que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también en las que crean o potencian las retroalimentaciones negativas que reducen el riesgo de que el Sistema Tierra cruce un umbral planetario y entre en la senda de la Tierra Invernadero.

El reto de la humanidad es, por tanto, influir en las propiedades dinámicas del Sistema Tierra de tal manera que las condiciones inestables emergentes en la zona entre el Holoceno y un estado muy caliente se conviertan en un estado intermedio estable de facto (Tierra Estabilizada) (Fig. 2). Esto requiere que los seres humanos tomen medidas deliberadas, integrales y adaptativas para reducir los impactos peligrosos en el Sistema Tierra, controlando y cambiando efectivamente el comportamiento para formar bucles de retroalimentación que estabilicen este estado intermedio.

Hay mucha incertidumbre y debate sobre cómo se puede hacer esto—técnica, ética, equitativa y económicamente—y no hay duda de que los aspectos normativos, políticos e institucionales son un gran desafío. Sin embargo, las sociedades

⁵⁷ ↪ IPCC, Summary for policymakers. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds CB Field, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp. 1–32 (2014). Go to reference [Google Scholar](#)

⁵⁸ ↪ C-F Schleussner, et al., Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. Nat Clim Change **6**, 827–835 (2016). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

podrían emprender una amplia gama de acciones que constituyen retroalimentaciones negativas, resumidas en el [Apéndice SI](#), Tabla S5, para dirigir el sistema Tierra hacia una Tierra Estabilizada. Algunas de estas acciones ya están alterando las trayectorias de las emisiones. Las acciones de retroalimentación negativa se dividen en tres grandes categorías: (i) reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, (ii) mejorar o crear sumideros de carbono (por ejemplo, protegiendo y mejorando los sumideros de carbono de la biosfera y creando nuevos tipos de sumideros),⁵⁹ y (iii) modificar el equilibrio energético de la Tierra (por ejemplo, mediante la gestión de la radiación solar, aunque esa retroalimentación concreta conlleva riesgos muy grandes de desestabilización o degradación de varios procesos clave del Sistema Tierra)^(60, 61). Aunque la reducción de las emisiones es una prioridad, se podría hacer mucho más para reducir las

Los cambios lineales incrementales en el sistema socioeconómico actual no son suficientes para estabilizar el Sistema Tierra. Para reducir el riesgo de cruzar el umbral y entrar en la senda de la Tierra Invernadero, es probable que se necesiten transformaciones generalizadas, rápidas y fundamentales, como cambios en el comportamiento, la tecnología y la innovación, la gobernanza y los valores.

presiones humanas directas sobre biomas críticos que contribuyen a la regulación del estado del Sistema Tierra a través de los sumideros de carbono y las retroalimentaciones de humedad, como el Amazonas y los bosques boreales ([Tabla 1](#)), y para construir una administración mucho más eficaz de las biosferas marina y terrestre en general.

Sin embargo, el sistema socioeconómico dominante en la actualidad se basa en un crecimiento económico con altas emisiones de carbono y en la explotación de los recursos ([9](#)). Los intentos de modificar este sistema han tenido cierto éxito a nivel local, pero muy poco a nivel mundial en lo que respecta a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero o a la creación de una gestión más eficaz de la biosfera. Los cambios lineales incrementales en el sistema

La custodia eficaz del Sistema Tierra es una condición previa esencial para el desarrollo próspero de las sociedades humanas en una senda de estabilización de la Tierra.

socioeconómico actual no son suficientes para estabilizar el Sistema Tierra. Para reducir el riesgo de cruzar el umbral y entrar en la senda de la Tierra Invernadero, es probable que se necesiten transformaciones generalizadas, rápidas y fundamentales, como cambios en el comportamiento, la tecnología y la innovación, la

gobernanza y los valores ([48](#), ⁶², ⁶³).

Los esfuerzos internacionales para reducir el impacto humano en el sistema Tierra y mejorar el bienestar incluyen los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y el compromiso del Acuerdo de París de mantener el calentamiento por debajo de los 2 °C. Estas iniciativas de gobernanza internacional van acompañadas de compromisos

⁵⁹ ↪ BW Griscom, et al., Natural climate solutions. Proc Natl Acad Sci USA **114**, 11645–11650 (2017). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁶⁰ ↪ S Barrett, et al., Climate engineering reconsidered. Nat Clim Change **4**, 527–529 (2014). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁶¹ ↪ S Mathesius, M Hofmann, K Calderia, HJ Schellnhuber, Long-term response of oceans to CO₂ removal from the atmosphere. Nat Clim Change **5**, 1107–1113 (2015). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁶² ↪ FW Geels, BK Sovacool, T Schwanen, S Sorrell, Sociotechnical transitions for deep decarbonization. Science **357**, 1242–1244 (2017). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁶³ ↪ K O'Brien, Is the 1.5 °C target possible? Exploring the three spheres of transformation. Curr Opin Environ Sustain **31**, 153–160 (2018). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

de reducción de carbono por parte de países, ciudades, empresas y particulares, ^(64,65,66) pero por el momento no son suficientes para cumplir el objetivo de París. Una mayor ambición requerirá nuevos valores, principios y marcos compartidos colectivamente, así como la educación para apoyar esos cambios ^(67, 68). En esencia, la custodia eficaz del Sistema Tierra es una condición previa esencial para el desarrollo próspero de las sociedades humanas en una senda de estabilización de la Tierra ^(69, 70).

Además de la innovación institucional y social a nivel de gobernanza global, los cambios en la demografía, el consumo, el comportamiento, las actitudes, la educación, las instituciones y las tecnologías socialmente arraigadas son

Las transformaciones necesarias para lograr la vía de la Tierra Estabilizada requieren una reorientación y reestructuración fundamentales de las instituciones nacionales e internacionales, con un énfasis mucho mayor en las consternaciones planetarias en la gobernanza económica, el comercio mundial, las inversiones y las finanzas, y el desarrollo tecnológico.

importantes para maximizar las posibilidades de lograr una senda de estabilización de la Tierra.⁷¹ Muchos de los cambios necesarios pueden tardar décadas en tener un impacto global ([Apéndice SI](#), Tabla S5), pero hay indicios de que la sociedad puede estar alcanzando algunos puntos de inflexión importantes. Por ejemplo, se ha producido un progreso relativamente rápido hacia la ralentización

o inversión del crecimiento de la población a través de la disminución de la fertilidad resultante de facultar a las mujeres, el acceso a las tecnologías de control de la natalidad, la expansión de las oportunidades educativas y el aumento de los niveles de ingresos ^(72, 73). Estos cambios demográficos deben complementarse con modelos de consumo per cápita sostenibles, especialmente entre los consumidores de mayor nivel. Se han observado algunos cambios en el comportamiento de los consumidores ^(74, 75), y pueden surgir oportunidades para las consiguientes transiciones importantes en las normas sociales a gran escala.⁷⁶ La innovación tecnológica está contribuyendo a una descarbonización más rápida y a la posibilidad de eliminar el CO₂ de la atmósfera ([48](#)).

⁶⁴ ↪OR Young, et al., The globalization of socioecological systems: An agenda for scientific research. *Glob Environ Change* **16**, 304–316 (2006). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁶⁵ ↪NW Adger, H Eakin, A Winkels, Nested and teleconnected vulnerabilities to environmental change. *Front Ecol Environ* **7**, 150–157 (2009). [Crossref PubMedGoogle Scholar](#)

⁶⁶ ↪; UN General Assembly, Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development, A/RES/70/1. Available at <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>. Accessed July 18, 2018. (2015). Go to reference [Google Scholar](#)

⁶⁷ ↪AE Wals, M Brody, J Dillon, RB Stevenson, Science education. Convergence between science and environmental education. *Science* **344**, 583–584 (2014). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁶⁸ ↪K O'Brien, et al., You say you want a revolution? Transforming education and capacity building in response to global change. *Environ Sci Policy* **28**, 48–59 (2013). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁶⁹ ↪III FS Chapin, et al., Earth stewardship: A strategy for social–ecological transformation to reverse planetary degradation. *J Environ Stud Sci* **1**, 44–53 (2011). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁷⁰ ↪C Folke, R Biggs, AV Norström, B Reyers, J Rockström, Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. *Ecol Soc* **21**, 41 (2016). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁷¹ ↪F Westley, et al., Tipping toward sustainability: Emerging pathways of transformation. *Ambio* **40**, 762–780 (2011). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁷² ↪W Lutz, R Muttarak, E Striessnig, Environment and development. Universal education is key to enhanced climate adaptation. *Science* **346**, 1061–1062 (2014). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁷³ ↪J Bongaarts, Development: Slow down population growth. *Nature* **530**, 409–412 (2016). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁷⁴ ↪, eds R Defila, A Di Giulio, R Kaufmann-Hayoz (Oakum, Munich The Nature of Sustainable Consumption and How to Achieve It: Results from the Focal Topic “From Knowledge to Action–New Paths Towards Sustainable Consumption”, 2012). Go to reference [Google Scholar](#)

⁷⁵ ↪, eds MJ Cohen, H Szejnwald Brown, P Vergragt (Edward Elgar, Cheltenham, UK Innovations in Sustainable Consumption: New Economics, Socio-Technical Transitions and Social Practices, 2013). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁷⁶ ↪K Nyborg, et al., Social norms as solutions. *Science* **354**, 42–43 (2016). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

La Tierra Estabilizada será probablemente más cálida que en cualquier otro momento de los últimos 800.000 años como mínimo (es decir, más cálida que en cualquier otro momento en el que hayan existido seres humanos plenamente modernos).

En última instancia, las transformaciones necesarias para lograr la vía de la Tierra Estabilizada requieren una reorientación y reestructuración fundamentales de las instituciones nacionales e internacionales hacia una gobernanza más eficaz a nivel del Sistema Tierra,⁷⁷ con un énfasis mucho mayor en las consternaciones planetarias

en la gobernanza económica, el comercio mundial, las inversiones y las finanzas, y el desarrollo tecnológico.⁷⁸

Construyendo Resiliencia en un Sistema Tierra en Rápido Cambio

Incluso si se logra una vía de estabilización de la Tierra, la humanidad se enfrentará a un camino turbulento de cambios rápidos y profundos e incertidumbres en el camino hacia ella—política, social y ambientalmente—que desafían la capacidad de recuperación de las sociedades humanas (^{79, 80, 81, 82}). La Tierra Estabilizada será probablemente más cálida que en cualquier otro momento de los últimos 800.000 años como mínimo⁸³ (es decir, más cálida que en cualquier otro momento en el que hayan existido seres humanos plenamente modernos).

Además, la trayectoria de la Tierra Estabilizada se caracterizará casi con toda seguridad por la activación de algunos elementos de inflexión (cascadas de inflexión y [Fig. 3](#)) y por una dinámica no lineal y cambios bruscos a nivel de biomas críticos que sustentan a la humanidad ([Apéndice SI](#), Tabla S4). Los ritmos actuales de cambio de características importantes del Sistema Tierra ya igualan o superan los de los eventos geofísicos abruptos del pasado ([Apéndice SI](#)). Dado que es probable que estas tendencias continúen durante las próximas décadas, como mínimo, la forma contemporánea de guiar el desarrollo, basada en teorías, herramientas y creencias de cambio gradual o incremental, con un enfoque en la eficiencia económica, probablemente no será adecuada para hacer frente a esta trayectoria. Así, además de la adaptación, el aumento de la resiliencia se convertirá en una estrategia clave para navegar por el futuro.

Las estrategias genéricas de aumento de la resiliencia incluyen el desarrollo de seguros, amortiguadores, redundancia, diversidad y otras características de la resiliencia que son fundamentales para transformar los sistemas humanos ante el calentamiento y la posible sorpresa asociada a los puntos de inflexión.⁸⁴ Entre las características de dicha estrategia se encuentran (i) el mantenimiento de la diversidad, la modularidad y la redundancia; (ii) la gestión de la conectividad, la apertura, las variables lentas y las retroalimentaciones; (iii) la comprensión de los sistemas socioecológicos como sistemas adaptativos complejos, especialmente a nivel del Sistema Tierra en su conjunto;⁸⁵ (iv) el fomento del

⁷⁷ ↪ F Biermann, et al., Science and government. Navigating the anthropocene: Improving Earth system governance. *Science* **335**, 1306–1307 (2012). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁷⁸ ↪ V Galaz Global Environmental Governance, Technology and Politics: The Anthropocene Gap (Edward Elgar, Cheltenham, UK, 2014). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁷⁹ ↪ DPC Peters, et al., Cross-scale interactions, nonlinearities, and forecasting catastrophic events. *Proc Natl Acad Sci USA* **101**, 15130–15135 (2004). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁸⁰ ↪ B Walker, et al., Environment. Looming global-scale failures and missing institutions. *Science* **325**, 1345–1346 (2009). [Crossref PubMedGoogle Scholar](#)

⁸¹ ↪ J Hansen, M Sato, R Ruedy, Perception of climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* **109**, E2415–E2423 (2012). [Crossref PubMedGoogle Scholar](#)

⁸² ↪ V Galaz, et al., Global governance dimensions of globally networked risks: The state of the art in social science research. *Risks Hazards Crisis Public Policy* **8**, 4–27 (2017). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁸³ ↪ L Augustin, et al., Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*; EPICA community members **429**, 623–628 (2004). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁸⁴ ↪ S Polasky, SR Carpenter, C Folke, B Keeler, Decision-making under great uncertainty: Environmental management in an era of global change. *Trends Ecol Evol* **26**, 398–404 (2011). Go to reference [CrossrefPubMedGoogle Scholar](#)

⁸⁵ ↪ F Capra, PL Luisi The Systems View of Life; A Unifying Vision (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK, 2014). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

aprendizaje y la experimentación; y (v) la ampliación de la participación y el fomento de la confianza para promover sistemas de gobernanza policéntricos ^(86, 87).

Conclusiones

Nuestro enfoque sistémico, centrado en las retroalimentaciones, los puntos de inflexión y la dinámica no lineal, ha abordado las cuatro cuestiones planteadas en la Introducción.

Nuestro análisis sugiere que el Sistema Tierra puede estar acercándose a un umbral planetario que podría asegurar una

El Sistema Tierra puede estar acercándose a un umbral planetario que podría asegurar una vía rápida y continuada hacia condiciones mucho más cálidas: la Tierra Invernadero.

vía rápida y continuada hacia condiciones mucho más cálidas: la Tierra Invernadero. Esta trayectoria estaría impulsada por fuertes retroalimentaciones bio-geofísicas intrínsecas, difíciles de influir por la acción humana, una trayectoria que no podría revertirse, dirigirse o frenarse

sustancialmente.

No se sabe con certeza dónde podría estar ese umbral, pero podría estar a sólo unas décadas de distancia con un aumento de la temperatura de ~2,0 °C por encima de la preindustrial y, por tanto, podría estar dentro del rango de los objetivos de temperatura del Acuerdo de París.

Los impactos de una vía de Tierra Invernadero sobre las sociedades humanas serían probablemente masivos, a veces abruptos, y sin duda perturbadores.

Evitar este umbral mediante la creación de una trayectoria de la Tierra Estabilizada sólo puede lograrse y mantenerse mediante un esfuerzo coordinado y deliberado de las sociedades humanas para gestionar nuestra relación con el resto del sistema Tierra, reconociendo que la humanidad es un componente integral e interactivo del sistema. La humanidad se enfrenta ahora a la necesidad de tomar decisiones y acciones críticas que podrían influir en nuestro futuro durante siglos, si no milenios.⁸⁸

¿Qué credibilidad tiene este análisis? Hay pruebas significativas procedentes de varias fuentes que indican que el riesgo de un umbral planetario y, por tanto, la necesidad de crear una vía divergente debe tomarse en serio:

En primer lugar, el complejo comportamiento del sistema Tierra en el Cuaternario tardío está bien documentado y se comprende. Los dos estados límite del sistema -glacial e interglacial- están razonablemente bien definidos, la periodicidad de unos 100.000 años del ciclo límite está establecida, y los procesos impulsores internos (ciclo del carbono y retroalimentación del albedo del hielo) y externos (cambios en la insolación causados por cambios en los parámetros orbitales de la Tierra) son generalmente conocidos. Además, sabemos con gran seguridad que la desintegración progresiva de las capas de hielo y la transgresión de otros elementos de inflexión son difíciles de revertir una vez alcanzados los niveles críticos de calentamiento.

⁸⁶ ↪SR Carpenter, et al., General resilience to cope with extreme events. Sustainability **4**, 3248–3259 (2012). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁸⁷ ↪R Biggs, et al., Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. Annu Rev Environ Resour **37**, 421–448 (2012). Go to reference [CrossrefGoogle Scholar](#)

⁸⁸

En segundo lugar, los conocimientos sobre el pasado geológico reciente de la Tierra ([Apéndice](#) del SI) sugieren que las condiciones consistentes con la vía de la Tierra Invernadero son accesibles con niveles de concentración de CO₂ atmosférico y aumento de la temperatura ya realizados o proyectados para este siglo ([Apéndice](#) del SI, Tabla S1).

En tercer lugar, los elementos de inflexión y los procesos de retroalimentaciones que operaron durante los ciclos glaciales-interglaciales del Cuaternario son los mismos que varios de los propuestos como críticos para la trayectoria futura del Sistema Tierra (Retroalimentaciones bio-geofísicas, cascadas de inflexión, [Fig. 3](#), [Tabla 1](#), y [Apéndice](#) SI, Tabla S2).

En cuarto lugar, las observaciones contemporáneas ([29](#), [38](#)) ([Apéndice](#) del SI) del comportamiento de los elementos de

Es necesaria una profunda transformación basada en una reorientación fundamental de los valores humanos, la equidad, el comportamiento, las instituciones, las economías y las tecnologías. Aun así, el camino hacia la estabilización de la Tierra implicará cambios considerables.

inflexión a una anomalía de temperatura observada de aproximadamente 1 °C por encima de la preindustrial sugieren que algunos de estos elementos son vulnerables a la inflexión con sólo un aumento de 1 °C a 3 °C en la temperatura global, y muchos más de ellos son vulnerables a temperaturas más altas (Retroalimentaciones bio-geofísicas y cascadas de inflexión) ([12](#), [17](#), [39](#)). Esto sugiere que el riesgo

de cascadas de inflexión podría ser significativo a partir de un aumento de la temperatura de 2 °C y podría aumentar considerablemente más allá de ese punto. Sostenemos que podría existir un umbral planetario en el Sistema Tierra con un aumento de la temperatura tan bajo como 2 °C por encima de la época preindustrial.

La trayectoria de la Tierra Estabilizada requiere una gestión deliberada de la relación de la humanidad con el resto del

Los puntos de inflexión sociales y políticos que alejan definitivamente la trayectoria actual de la Tierra Invernadero aún no se han cruzado, mientras que la puerta a la vía de la Tierra Estabilizada puede estar cerrándose rápidamente.

Sistema Tierra si el mundo quiere evitar cruzar un umbral planetario. Sugerimos que es necesaria una profunda transformación basada en una reorientación fundamental de los valores humanos, la equidad, el comportamiento, las instituciones, las economías y las tecnologías. Aun así, el camino hacia la estabilización de la Tierra implicará cambios considerables en la estructura y el funcionamiento del Sistema

Tierra, lo que sugiere que las estrategias de creación de resiliencia deben tener una prioridad mucho mayor que la actual en la toma de decisiones. Hay indicios de que las sociedades están iniciando algunas de las transformaciones necesarias. Sin embargo, estas transformaciones se encuentran todavía en las fases iniciales, y los puntos de inflexión sociales y políticos que alejan definitivamente la trayectoria actual de la Tierra Invernadero aún no se han cruzado, mientras que la puerta a la vía de la Tierra Estabilizada puede estar cerrándose rápidamente.

La trayectoria de la Tierra Estabilizada requiere una gestión deliberada de la relación de la humanidad con el resto del Sistema Tierra si el mundo quiere evitar cruzar un umbral planetario. Sugerimos que es necesaria una profunda transformación basada en una reorientación fundamental de los valores humanos, la equidad, el comportamiento, las instituciones, las economías y las tecnologías. Aun así, el camino hacia la estabilización de la Tierra implicará cambios considerables en la estructura y el funcionamiento del Sistema Tierra, lo que sugiere que las estrategias de creación de resiliencia deben tener una prioridad mucho mayor que la actual en la toma de decisiones. Hay indicios de que las sociedades están iniciando algunas de las transformaciones necesarias. Sin embargo, estas transformaciones se encuentran todavía en las fases iniciales, y los puntos de inflexión sociales y políticos que alejan definitivamente la

trayectoria actual de la Tierra Invernadero aún no se han cruzado, mientras que la puerta a la vía de la Tierra Estabilizada puede estar cerrándose rápidamente.

Nuestro análisis inicial debe apoyarse en un análisis más profundo y cuantitativo del Sistema Tierra y en estudios de modelización para responder a tres preguntas críticas. (i) ¿Corre la humanidad el riesgo de empujar el sistema a través de un umbral planetario y de caer irreversiblemente en la vía de la Tierra Invernadero? (ii) ¿Qué otras vías podrían ser posibles en el complejo panorama de la estabilidad del Sistema Tierra, y qué riesgos podrían conllevar? (iii) ¿Qué estrategias de gestión planetaria son necesarias para mantener el Sistema Tierra en un estado de Tierra Estabilizada manejable?

Información de respaldo:

Variabilidad del Holoceno y tasas de cambio del Antropoceno

[Apéndice\(PDF\) BAJAR](#)

Vínculos relacionados:

- La Alianza Global Jus Semper
- John Bellamy Foster: [La Crisis del Antropoceno](#)
- John Bellamy Foster: [El Capitalismo Ha Fracasado — ¿Qué Sigue?](#)
- Álvaro de Regil Castilla: [Los Delirios Fraudulentos del Capitalismo Verde](#)
- Álvaro de Regil Castilla: [Mercadocracia y el Secuestro de la Gente y el Planeta](#)
- Álvaro de Regil Castilla: [Transitando a Geocracia — Paradigma de la Gente y el Planeta y No el Mercado — Primeros Pasos](#)
- Giorgos Kallis: [La Alternativa del Decrecimiento](#)
- Johan Rockström, Joyeeta Gupta, Timothy M. Lenton, Dahe Qin, Steven J. Lade ET AL: [Identificando un Pasaje Seguro y Justo para las Personas y el Planeta](#)
- Christine Corlet Walker, Angela Druckman, Tim Jackson: [Sistemas de Bienestar sin Crecimiento Económico: Una revisión de los desafíos y los próximos pasos para el ámbito](#)
- Simon Mair, Angela Druckman y Tim Jackson: [Una Historia de Dos Utopías: El Trabajo en un Mundo Post-Crecimiento](#)
- Paul Burkett: [¿Un Punto de Inflexión Eco-Revolucionario?](#)
- Víctor M. Toledo: [¿De qué hablamos cuando hablamos de sustentabilidad?](#)

❖ **Acerca de Jus Semper:** La Alianza Global Jus Semper aspira a contribuir a alcanzar un ethos sostenible de justicia social en el mundo, donde todas las comunidades vivan en ámbitos verdaderamente democráticos que brinden el pleno disfrute de los derechos humanos y de normas de vida sostenibles conforme a la dignidad humana. Para ello, coadyuva a la liberalización de las instituciones democráticas de la sociedad que han sido secuestradas por los dueños del mercado. Con ese propósito, se dedica a la investigación y análisis para provocar la toma de conciencia y el pensamiento crítico que generen las ideas para la visión transformadora que dé forma al paradigma verdaderamente democrático y sostenible de la Gente y el Planeta y NO del mercado.

❖ **Acerca de los autores:** **Will Steffen:** Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, Sweden (SRC) and Fenner School of Environment and Society (FSES), The Australian National University, Canberra, Australia; **Johan Rockström:** (SRC); **Katherine Richardson:** Center for Macroecology, Evolution, and Climate, University of Copenhagen, Natural History Museum of Denmark, Copenhagen, Denmark; **Timothy M. Lenton:** Earth System Science Group, College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, United Kingdom; **Carl Folke:** (SRC) and The Beijer Institute of Ecological Economics, The Royal Swedish Academy of Science, Stockholm, Sweden; **Diana Liverman:** School of Geography and Development, The University of Arizona, Tucson, AZ; **Colin P. Summerhayes:** Scott Polar Research Institute, Cambridge University, United Kingdom; **Anthony D. Barnosky:** Jasper Ridge Biological Preserve, Stanford University, CA; **Sarah E. Cornell:** (SRC); **Michel Crucifix:** Earth and Life Institute, Université Catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve, and Belgian National Fund of Scientific Research, Brussels, Belgium; **Jonathan F. Donges:** (SRC) and Research Domain Earth System Analysis (RDESA), Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany; **Ingo Fetzer:** (SRC); **Steven J. Lade:** (SRC) and (FSES); **Marten Scheffer:** Department of Environmental Sciences, Wageningen University & Research, Wageningen, The Netherlands; **Ricarda Winkelmann:** (RDESA) and Department of Physics and Astronomy (DPA), University of Potsdam, Germany; **Hans Joachim Schellnhuber:** (SRC), (RDESA) and (DPA).

❖ **Editores Académicos:** Editado por William C. Clark, Harvard University, Cambridge, MA, y aprobado el 6 de julio de 2018 (recibido para su revisión el 19 de junio de 2018). **Contribuciones de los autores:** W.S., J.R., K.R., T.M.L., C.F., D.L., C.P.S., A.D.B., S.E.C., M.C., J.F.D., I.F., S.J.L., M.S., R.W. y H.J.S. escribieron el artículo. Intereses en conflicto: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. **Autores a los que debe dirigirse la correspondencia:** will.steffen@anu.edu.au o john@pik-potsdam.de.

❖ **Acerca de este trabajo:** Este artículo fue publicado originalmente en inglés como PNAS Direct Submission y publicado en línea el 6 de agosto de 2018. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>

❖ **Cite este trabajo como:** Will Steffen, Johan Rockström, Katherine Richardson, Timothy M. Lenton, Carl Folke, Diana Liverman, Colin P. Summerhayes, Anthony D. Barnosky, Sarah E. Cornell, Michel Crucifix, Jonathan F. Donges, Ingo Fetzer, Steven J. Lade, Marten Scheffer, Ricarda Winkelmann and Hans Joachim Schellnhuber: Trayectorias del Sistema Tierra en el Antropoceno – La Alianza Global Jus Semper, junio 2022.

❖ **Licencia Creative Commons:** Este artículo ha sido publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License 4.0 (CC BY-NC-ND). Puede compartir - copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar - remezclar, transformar y construir sobre el material para cualquier propósito, incluso comercialmente. Debe dar el crédito apropiado, proporcionar un enlace a la licencia, indicar si se hicieron cambios, dar crédito a los autores y proporcionar un enlace al editor original.

❖ **Etiquetas:** Trayectorias del Sistema Tierra | Cambio climático | Antropoceno | Retroalimentación de la biosfera | Elementos de inflexión

❖ La responsabilidad por las opiniones expresadas en los trabajos firmados descansa exclusivamente en su(s) autor(es), y su publicación no representa un respaldo por parte de La Alianza Global Jus Semper a dichas opiniones.



Bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

© 2022. La Alianza Global Jus Semper
Portal en red: https://www.jussemper.org/Inicio/Index_castellano.html
Correo-e: informa@jussemper.org