



Copyright © 2009 del/de los autor(es). Publicado aquí bajo licencia de la Alianza para la Resiliencia.  
 Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, A. Persson, F.S. Chapin, III, E. Lambin, T.M. Lenton, M. Scheffer,  
 J. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C.A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P.  
 K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R.W. Corell, V.J. Fabry, J. Hansen, B.  
 Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen y J. Foley. 2009. Límites planetarios: explorando los  
 Espacio operativo seguro para la humanidad. *Ecología y Sociedad* 14(2): 32. [en línea] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>

Investigación

# Límites planetarios: Explorando el espacio operativo seguro para la humanidad

[Johan Rockstrom](#) 1,2, [Will Steffen](#) 1,3, [Kevin Noone](#) 1,4, [Asa Persson](#) 1,2, [F. Stuart III Chapin](#) 5, [Eric Lambin](#) 6, [Timothy M. Lenton](#) 7, [Marten Scheffer](#) 8, [Carl Folke](#) 1,9, [Hans Joachim Schellnhuber](#) 10,11, [Björn Nykvist](#) 1,2, [Cynthia A. de Wit](#) 4, [Terry Hughes](#) 12, [Sander van der Leeuw](#) 13, [Henning Rodhe](#) 14, [Sverker Sörlin](#) 1,15, [Peter K. Snyder](#) 16, [Robert Costanza](#) 1,17, [Uno Svedin](#) 1, [Malin Falkenmark](#) 1,18, [Louise Karlberg](#) 1,2, [Robert W. Corell](#) 19, [Victoria J. Fabry](#) 20, [James Hansen](#) 21, [Brian Walker](#) 1,22, [Diana Liverman](#) 23,24, [Katherine Richardson](#) 25, [Paul Crutzen](#) 26, y [Jonathan Foley](#)

27

RESUMEN. Las presiones antropogénicas sobre el sistema terrestre han alcanzado una escala donde los cambios globales abruptos...

El cambio ambiental ya no puede excluirse. Proponemos un nuevo enfoque para la sostenibilidad global en el que definimos los límites planetarios dentro de los cuales esperamos que la humanidad pueda operar con seguridad.

Transgredir uno o más límites planetarios puede ser perjudicial o incluso catastrófico debido al riesgo de cruzar umbrales que desencadenarán cambios ambientales abruptos y no lineales en áreas continentales sistemas a escala planetaria. Hemos identificado nueve límites planetarios y, basándonos en la ciencia actual

Para comprender mejor el problema, proponemos cuantificaciones para siete de ellos. Estos siete son el cambio climático (CO<sub>2</sub>) concentración en la atmósfera <350 ppm y/o un cambio máximo de +1 W m<sup>-2</sup> en el forzamiento radiativo);

Acidificación de los océanos (estado medio de saturación del agua de mar superficial con respecto a la aragonita ≥ 80% del nivel preindustrial) niveles); ozono estratosférico (<5% de reducción en la concentración de O<sub>3</sub> respecto del nivel preindustrial de 290 Dobson

Unidades); ciclo biogeoquímico del nitrógeno (N) (limita la fijación industrial y agrícola de N<sub>2</sub> a 35 Tg N año<sup>-1</sup>)

y el ciclo del fósforo (P) (el flujo anual de P a los océanos no debe superar 10 veces el fondo natural)

meteorización de P); uso global de agua dulce (<4000 km<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de uso consuntivo de recursos de escorrentía); tierra cambio del sistema (<15% de la superficie terrestre libre de hielo bajo tierras de cultivo); y la tasa a la que la diversidad biológica se pierde (tasa anual de <10 extinciones por millón de especies). Los dos límites planetarios adicionales para

Las que aún no hemos podido determinar un nivel límite son la contaminación química y la atmosférica.

carga de aerosoles. Estimamos que la humanidad ya ha transgredido tres límites planetarios: el climático

cambio climático, tasa de pérdida de biodiversidad y cambios en el ciclo global del nitrógeno. Los límites planetarios son

interdependientes, porque transgredir uno puede cambiar la posición de otros límites o hacer que estos cambien.

ser transgredidos. Los impactos sociales de la transgresión de los límites serán una función del contexto socioecológico.

resiliencia de las sociedades afectadas. Nuestros límites propuestos son aproximados, solo estimaciones iniciales, rodeados por

Grandes incertidumbres y lagunas de conocimiento. Llenar estas lagunas requerirá avances importantes en el Sistema Tierra.

y la ciencia de la resiliencia. El concepto propuesto de "límites planetarios" sienta las bases para cambiar

Nuestro enfoque de gobernanza y gestión, lejos de los análisis esencialmente sectoriales de los límites a

crecimiento orientado a minimizar las externalidades negativas, hacia la estimación del espacio seguro para los humanos

desarrollo. Los límites planetarios definen, por así decirlo, los límites del "campo de juego planetario" para

la humanidad si queremos estar seguros de evitar grandes cambios ambientales inducidos por el hombre a escala global.

Palabras clave: carga atmosférica de aerosoles; ciclo biogeoquímico del nitrógeno; diversidad biológica; química

contaminación; cambio climático; Tierra; uso global de agua dulce; cambio del sistema terrestre; acidificación de los océanos;

ciclo del fósforo; límites planetarios; ozono estratosférico; sostenibilidad

<sup>1</sup> Centro de Resiliencia de Estocolmo, Universidad de Estocolmo, <sup>2</sup> Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, <sup>3</sup> Universidad Nacional Australiana, Australia, <sup>4</sup> Departamento de Ciencias Aplicadas  
 Ciencias Ambientales, Universidad de Estocolmo, <sup>5</sup> Instituto de Biología del Ártico, Universidad de Alaska Fairbanks, <sup>6</sup> Departamento de Geografía, Universidad de  
 Lovaina, <sup>7</sup> Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de East Anglia, <sup>8</sup> Grupo de Ecología Acuática y Gestión de la Calidad del Agua, Universidad de Wageningen,  
<sup>9</sup> Instituto Beijer de Economía Ecológica, Real Academia Sueca de Ciencias, <sup>10</sup> Instituto de Potsdam para la Investigación del Impacto Climático, <sup>11</sup> Agencia Ambiental  
 Change Institute y Tyndall Centre, Universidad de Oxford, <sup>12</sup> ARC Centro de Excelencia para Estudios de Arrecifes de Coral, Universidad James Cook, <sup>13</sup> Escuela de Ciencias Humanas  
 Evolución y cambio social, Universidad Estatal de Arizona, <sup>14</sup> Departamento de Meteorología, Universidad de Estocolmo, <sup>15</sup> División de Historia de la Ciencia y  
 Tecnología, Instituto Real de Tecnología, <sup>16</sup> Departamento de Suelo, Agua y Clima, Universidad de Minnesota, <sup>17</sup> Instituto Gund de Economía Ecológica,  
 Universidad de Vermont, <sup>18</sup> Instituto Internacional del Agua de Estocolmo, <sup>19</sup> Centro H. John Heinz III para la Ciencia, la Economía y el Medio Ambiente, <sup>20</sup> Departamento de  
 Ciencias Biológicas, Universidad Estatal de California en San Marcos, <sup>21</sup> Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, <sup>22</sup> CSIRO Sustainable  
 Ecosistemas, <sup>23</sup> Instituto de Cambio Ambiental, Facultad de Geografía y Medio Ambiente, <sup>24</sup> Instituto de Medio Ambiente, Universidad de Arizona, <sup>25</sup> Tierra  
 Centro de Ciencias de Sistemas, Universidad de Copenhague, <sup>26</sup> Instituto Max Planck de Química, <sup>27</sup> Instituto de Medio Ambiente, Universidad de Minnesota

## NUEVOS DESAFÍOS REQUIEREN NUEVOS PENSANDO EN LA SOSTENIBILIDAD GLOBAL

Las actividades humanas influyen cada vez más en el clima de la Tierra (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC) 2007a) y los ecosistemas (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA) 2005a). La Tierra ha entrado en una nueva era, el Antropoceno, donde los seres humanos constituyen el principal impulsor del cambio en el sistema terrestre (Crutzen 2002, Steffen et al.). 2007). El crecimiento exponencial de las actividades humanas genera preocupación por la posibilidad de que una mayor presión sobre el sistema terrestre pueda desestabilizar sistemas biofísicos críticos y desencadenar cambios ambientales abruptos o irreversibles que serían perjudiciales o incluso catastróficos para el bienestar humano. Este es un profundo dilema, ya que el paradigma predominante del desarrollo social y económico sigue ignorando en gran medida el riesgo de desastres ambientales de origen humano a escala continental y planetaria (Stern, 2007).

Aquí presentamos un concepto novedoso, los límites planetarios, para estimar un espacio operativo seguro para la humanidad con respecto al funcionamiento del Sistema Tierra. Realizamos un primer esfuerzo preliminar para identificar los procesos clave del Sistema Tierra e intentamos cuantificar, para cada proceso, el nivel límite que no debe traspasarse para evitar un cambio ambiental global inaceptable.

El cambio inaceptable se define aquí en relación con los riesgos que enfrenta la humanidad en la transición del planeta del Holoceno al Antropoceno. El entorno relativamente estable del Holoceno, el período interglaciario actual que comenzó hace unos 10 000 años, permitió el desarrollo y la prosperidad de la agricultura y de las sociedades complejas, incluidas las actuales (Fig. 1). Dicha estabilidad indujo a los humanos, por primera vez, a invertir de forma significativa en su entorno natural, en lugar de simplemente explotarlo (van der Leeuw, 2008). Actualmente, nos hemos vuelto tan dependientes de dichas inversiones para nuestro estilo de vida y para la forma en que hemos organizado la sociedad, las tecnologías y las economías en torno a ellas, que debemos tomar el rango dentro del cual variaron los procesos del Sistema Tierra en el Holoceno como punto de referencia científico para un estado planetario deseable.

A pesar de algunas fluctuaciones ambientales naturales durante los últimos 10 000 años (p. ej., patrones de lluvia, distribución de la vegetación, ciclo del nitrógeno), la Tierra se ha mantenido dentro del dominio de estabilidad del Holoceno. La resiliencia del planeta lo ha mantenido dentro del rango de variación asociado con el estado del Holoceno, con

parámetros biogeoquímicos y atmosféricos clave que fluctúan dentro de un rango relativamente estrecho (Fig. 1; Dansgaard et al. 1993, Petit et al. 1999, Rioual et al.

2001). Al mismo tiempo, durante ese período se produjeron cambios marcados en la dinámica del sistema regional. Aunque la huella de las actividades humanas tempranas a veces puede observarse a escala regional (p. ej., alteración de los regímenes de incendios, extinciones de la megafauna), no existe evidencia clara de que los humanos hayan afectado el funcionamiento del Sistema Tierra a escala global hasta hace muy poco (Steffen et al., 2007). Sin embargo, desde la revolución industrial (la llegada del Antropoceno), los humanos están empujando al planeta fuera del rango de variabilidad del Holoceno para muchos procesos clave del Sistema Tierra (Steffen et al.

2004). Sin tales presiones, el estado del Holoceno podría mantenerse durante miles de años en el futuro (Berger y Loutre 2002).

Hasta ahora, la ciencia ha proporcionado advertencias sobre los riesgos planetarios de cruzar los umbrales en las áreas del cambio climático y el ozono estratosférico (IPCC 1990, 2007a, b, Organización Meteorológica Mundial 1990).

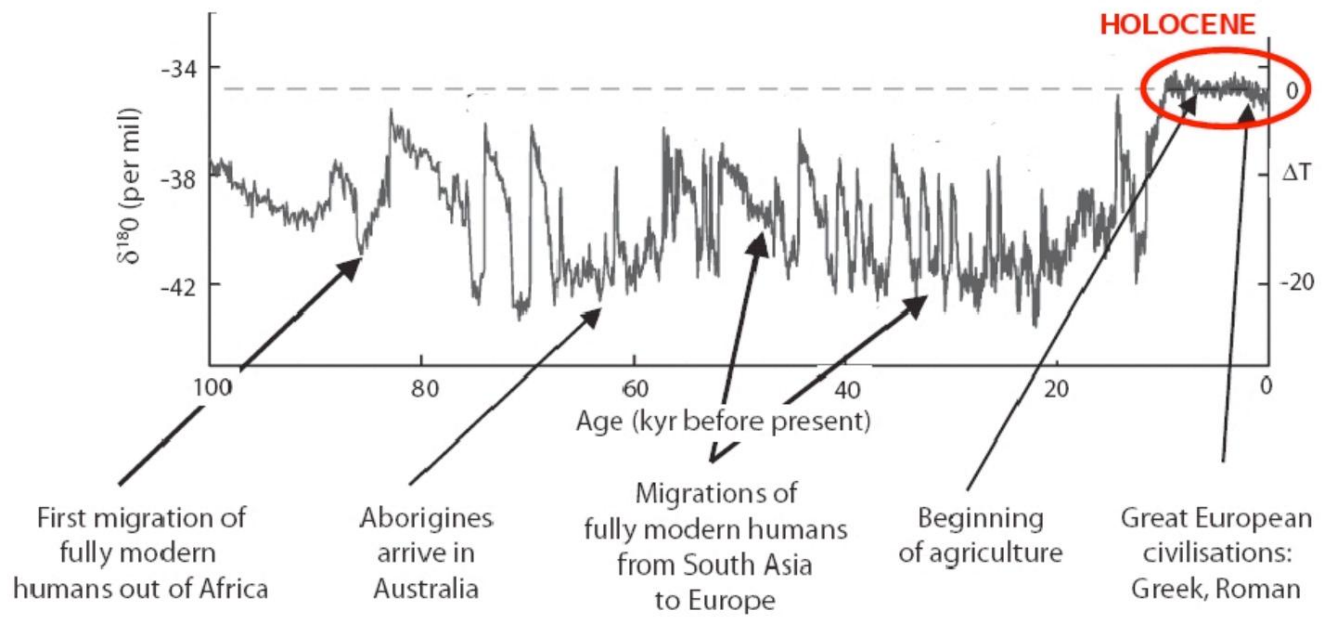
Sin embargo, la creciente presión humana sobre el planeta (Vitousek et al., 1997; MEA, 2005a) exige prestar atención a otros procesos biofísicos importantes para la resiliencia de los subsistemas terrestres (Holling, 1973; Folke et al., 2004; Gordon et al., 2008) y del sistema terrestre en su conjunto. La erosión de la resiliencia se manifiesta cuando largos períodos de condiciones aparentemente estables son seguidos por períodos de cambio abrupto y no lineal, lo que se refleja en transiciones críticas de un dominio de estabilidad a otro cuando se traspasan los umbrales (Scheffer et al., 2001; Walker et al., 2004; Lenton et al., 2008; Scheffer, 2009).

El Antropoceno plantea una nueva pregunta: "¿Cuáles son las condiciones planetarias indispensables que la humanidad debe respetar para evitar el riesgo de cambios ambientales deletéreos o incluso catastróficos a escala continental y global?". Realizamos un primer intento por identificar los límites planetarios de procesos clave del Sistema Tierra asociados con umbrales peligrosos, cuyo cruce podría alejar al planeta del estado Holoceno deseado.

## INTRODUCCIÓN DEL CONCEPTO DE LÍMITES PLANETARIOS

Aquí, los umbrales se definen como transiciones no lineales en el funcionamiento de sistemas humanos-ambientales acoplados (Schellnhuber 2002, Lenton

Fig. 1. El último ciclo glacial de  $\delta^{18}\text{O}$  (un indicador de temperatura) y eventos seleccionados en la historia humana. El Holoceno abarca los últimos 10.000 años. Adaptado de Young y Steffen (2009).



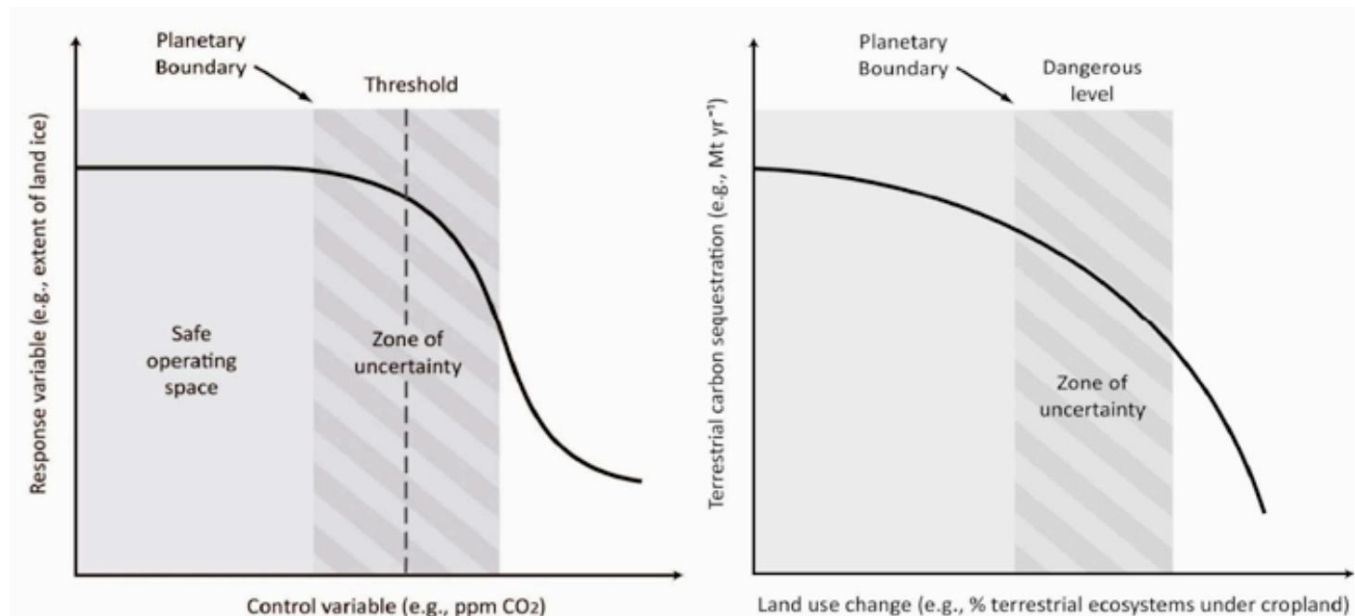
et al. 2008), como el reciente retroceso abrupto del hielo marino del Ártico causado por el calentamiento global antropogénico (Johannessen 2008). Los umbrales son características intrínsecas de esos sistemas y a menudo se definen por una posición a lo largo de una o más variables de control (Fig. 2a), como la temperatura y la retroalimentación hielo-albedo en el caso del hielo marino. Algunos procesos del Sistema Tierra, como el cambio de uso del suelo, no están asociados con umbrales conocidos a escala continental a global, pero pueden, a través del declive continuo de funciones ecológicas clave (como el secuestro de carbono), causar colapsos funcionales, generando retroalimentaciones que desencadenan o aumentan la probabilidad de un umbral global en otros procesos (como el cambio climático) (Fig. 2b). Sin embargo, dichos procesos pueden desencadenar dinámicas no lineales a escalas más bajas (p. ej., cruce de umbrales en lagos, bosques y sabanas, como resultado del cambio de uso del suelo, uso del agua y carga de nutrientes). Estos cambios no lineales, de un estado deseado a uno no deseado, pueden en conjunto convertirse en una preocupación global para la humanidad, si ocurren en todo el planeta.

Los límites, por otro lado, son valores determinados por el ser humano de la variable de control establecida en un

Distancia "segura" respecto a un nivel peligroso (para procesos sin umbrales conocidos a escala continental o global) o respecto a su umbral global. Determinar una distancia segura implica juicios normativos sobre cómo las sociedades deciden gestionar el riesgo y la incertidumbre (véanse las figuras 2a y 2b). La elección de la variable de control para cada límite planetario se basó en nuestra evaluación de la variable que, en general, podría proporcionar el parámetro más completo, agregado y medible para los límites individuales (Apéndice 1, Métodos complementarios 1).

Gran parte de la incertidumbre en la cuantificación de los límites planetarios se debe a nuestra falta de conocimiento científico sobre la naturaleza de los propios umbrales biofísicos (Apéndice 1, Discusión suplementaria 1), la incertidumbre intrínseca del comportamiento de los sistemas complejos, las formas en que otros procesos biofísicos, como los mecanismos de retroalimentación, interactúan con la variable de control principal, y la incertidumbre respecto al tiempo permitido para sobrepasar una variable de control crítica en el sistema terrestre antes de que se cruce un umbral. Esto genera una zona de incertidumbre alrededor de cada umbral (Fig. 2a, b).

Fig. 2. Descripción conceptual de los límites planetarios. En (a), el límite está diseñado para evitar el cruce de un umbral crítico continental a global en un proceso del Sistema Tierra. El conocimiento insuficiente y la naturaleza dinámica del umbral generan una zona de incertidumbre sobre su posición precisa, lo que influye en la determinación de su ubicación. En (b), no existe un efecto de umbral global hasta donde sabemos, pero superar el nivel del límite provocará interacciones significativas con los umbrales regionales y globales, o podría causar numerosos efectos de umbral no deseados a escala local o regional, lo que, en conjunto, constituye una grave preocupación global para la humanidad.



La naturaleza y el tamaño de esa zona son fundamentales para determinar dónde situar el límite planetario.

Hemos definido la posición límite para que corresponda a nuestra evaluación del límite inferior de la zona de incertidumbre para cada límite (Figs. 2a, b, 3). Cada posición límite propuesta asume que no se transgreden otros límites.

El enfoque de los límites planetarios se basa en tres ramas de investigación científica. La primera aborda la escala de la acción humana en relación con la capacidad de la Tierra para sustentarla, un aspecto importante de la agenda de investigación de la economía ecológica (Costanza, 1991), basándose en trabajos sobre el papel esencial del entorno vital para el bienestar humano (Odum, 1989; Vitousek et al., 1997) y las limitaciones biofísicas para la expansión del subsistema económico (Boulding, 1966; Arrow et al., 1995). La segunda se centra en la comprensión de la Tierra esencial.

Los procesos sistémicos (Bretherton 1988, Schellnhuber 1999, Steffen et al. 2004), incluyendo las acciones humanas (Clark y Munn 1986, Turner et al. 1990), se unieron en la evolución de la investigación del cambio global hacia la ciencia del sistema terrestre y en el desarrollo de la ciencia de la sostenibilidad (Clark y Dickson 2003). El tercero es el marco de la resiliencia (Holling 1973, Gunderson y Holling 2002, Walker et al. 2004, Folke 2006) y sus vínculos con dinámicas complejas (Kaufmann 1993, Holland 1996) y la autorregulación de los sistemas vivos (Lovelock 1979, Levin 1999), enfatizando múltiples cuencas de atracción y efectos de umbral (Scheffer et al. 2001, Folke et al. 2004, Biggs et al. 2009).

Nuestro marco propuesto se basa en y amplía los enfoques basados en los límites al crecimiento (Meadows et al. 1972, 2004), estándares mínimos seguros (Ciriacy-Wantrup 1952, Bishop 1978, Crowards 1998),



Fig. 3. Resumen de criterios y proceso para la identificación y definición de límites planetarios.

Although current scientific understanding underpins the analysis of the existence, location, and nature of thresholds, normative judgments influence the definition and the position of planetary boundaries:

- The selection of planetary boundaries emerges from the definition of what constitutes unacceptable human-induced global environmental change.
- The position of a planetary boundary is a function of the degree of risk the global community is willing to take, e.g., how close to an uncertainty zone around a dangerous level or threshold of a Earth System process humanity is willing to place itself, and/or for how long a boundary can temporarily be transgressed before a threshold is crossed.
- The position is furthermore a function of the social and ecological resilience of the impacted societies (e.g., the ability of coastal communities to cope with sea level rise later this century if a climate-change boundary is transgressed for too long).
- Boundaries are identified for processes where the time needed to trigger an abrupt or irreversible change is within an "ethical time horizon" – a timeframe (i) short enough to influence today's decisions yet long enough to provide the basis for sustainability over many generations to come, and (ii) within which decisions taken can influence whether or not the estimated threshold is crossed.

Having identified boundary candidates among Earth System processes, a set of criteria were considered in identifying appropriate control variables: (i) that the variable is universally applicable for the sub-systems linked to the same boundary, (ii) that it can function as a robust indicator of process change, and (iii) that there are available and reliable data. This means that we have taken a pragmatic approach in the first round of defining the planetary boundary variables, sometimes choosing a parameter of ultimate ecological impact (e.g., rate of extinction of species for biodiversity loss), a proxy indicator (e.g., aragonite saturation state for ocean acidification), or a human driving-force variable (e.g.,  $P$  load in the oceans).

el principio de precaución (Raffensperger y Tickner, 1999) y las ventanas tolerables (WBGU, 1995; Petschel-Held et al., 1999) (véase el Apéndice 1, Discusión complementaria 2). Un avance clave es que el enfoque de los límites planetarios se centra en los procesos biofísicos del sistema terrestre que determinan la capacidad de autorregulación del planeta.

Incorpora el papel de los umbrales relacionados con los procesos a gran escala del Sistema Tierra, cuyo cruce puede desencadenar cambios no lineales en el funcionamiento del Sistema Tierra, desafiando así la resiliencia socioecológica a escala regional y global.

En conjunto, el conjunto de límites representa el "espacio" biofísico dinámico del Sistema Tierra.

dentro del cual la humanidad ha evolucionado y prosperado. Los límites respetan las reglas del juego de la Tierra o, por así decirlo, definen el terreno de juego planetario para la actividad humana. Los umbrales en los procesos clave del Sistema Tierra existen independientemente de las preferencias, valores o compromisos de las personas basados en la viabilidad política y socioeconómica, como las expectativas de avances tecnológicos y las fluctuaciones del crecimiento económico.

Sin embargo, las decisiones y las acciones determinarán en gran medida cuán cerca estamos de los umbrales críticos involucrados, o si los superamos. Nuestro enfoque no ofrece una hoja de ruta para la sostenibilidad.

desarrollo; simplemente proporciona, en el contexto de la difícil situación humana en el Antropoceno, el primer paso al identificar límites biofísicos a escala planetaria dentro de los cuales la humanidad tiene la flexibilidad de elegir una multitud de caminos para el bienestar y el desarrollo humano. Será necesario profundizar en las dinámicas sociales que han conducido a la situación actual y proponer maneras en que nuestras sociedades puedan mantenerse dentro de estos límites.

Hemos realizado una búsqueda exhaustiva de estos procesos críticos del Sistema Tierra y sus variables de control asociadas (véase el Apéndice 1, Métodos Suplementarios 1). Hasta el momento, hemos podido identificar nueve de estos procesos para los cuales es necesario establecer límites a fin de minimizar el riesgo de sobrepasar umbrales críticos que puedan dar lugar a efectos indeseables. resultados.

#### CATEGORIZACIÓN PLANETARIA LÍMITES

Los nueve límites planetarios identificados aquí (Fig. 4) abarcan los ciclos biogeoquímicos globales del nitrógeno, el fósforo, el carbono y el agua; los principales sistemas de circulación física del planeta (el clima, la estratosfera y los sistemas oceánicos); las características biofísicas de la Tierra que contribuyen a la resiliencia subyacente de su capacidad de autorregulación (biodiversidad marina y terrestre, sistemas terrestres); y dos características críticas asociadas con el cambio global antropogénico (carga de aerosoles y contaminación química). Evaluamos que existe suficiente evidencia científica para realizar un primer intento preliminar de cuantificar las variables de control para siete de estos límites (Tabla 1). Creemos que los dos restantes (carga de aerosoles y contaminación química) deberían incluirse entre los límites planetarios, pero aún no podemos sugerir niveles límite cuantitativos.

Distinguimos entre límites que están directamente relacionados con umbrales continentales o planetarios agudos, como el riesgo de fusión de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida al cruzar permanentemente un umbral de forzamiento radiativo (Lenton et al. 2008, Schellnhuber 2002), y límites basados en procesos planetarios "lentos" sin evidencia actual de comportamiento de umbral a escala planetaria, que proporcionan la resiliencia subyacente del Sistema Tierra al funcionar como sumideros y fuentes de

carbono y regulando los flujos de agua, nutrientes y minerales (Fig. 4).

Existe amplia evidencia, proveniente de ecosistemas de escala local a regional, como lagos, bosques y arrecifes de coral, de que cambios graduales en ciertas variables de control clave (p. ej., biodiversidad, cosechas, calidad del suelo, flujos de agua dulce y ciclos de nutrientes) pueden desencadenar un cambio abrupto en el estado del sistema cuando se superan umbrales críticos (Carpenter et al., 2001; Folke et al., 2004; Hughes et al., 2007; Scheffer, 2009). Se necesita urgentemente más investigación sobre la dinámica de los umbrales y las retroalimentaciones que operan a escala continental y global, especialmente para variables de control de evolución lenta, como el uso y la cobertura del suelo, el uso de los recursos hídricos, la tasa de pérdida de biodiversidad y los flujos de nutrientes. Aquí, distinguimos entre umbrales planetarios identificables impulsados por procesos sistémicos a escala global (que impactan en los subsistemas "de arriba hacia abajo") y umbrales que pueden surgir a escala local y regional, que se convierten en una preocupación global a nivel agregado (si ocurren en múltiples ubicaciones simultáneamente) o donde los impactos agregados graduales pueden aumentar la probabilidad de cruzar umbrales planetarios en otros procesos del Sistema Terrestre (afectando así al Sistema Terrestre "de

Muchos procesos a escala planetaria (como el cambio climático) producen impactos principalmente a escala subterránea, donde dichos subsistemas muestran distintos grados de sensibilidad al cambio. Por ejemplo, el cambio climático se asocia con al menos nueve "elementos de inflexión" de subsistemas (p. ej., el monzón de la India y los fenómenos de El Niño), todos los cuales muestran distintos grados de sensibilidad a un cambio en el forzamiento radiativo o al aumento de la temperatura (Lenton et al., 2008). Abordamos dicha complejidad interesalar proponiendo límites planetarios para evitar todos los umbrales conocidos del sistema subterráneo en el futuro previsible.

#### CUANTIFICANDO EL PLANETARIO LÍMITES

A continuación, presentamos la justificación y las cuantificaciones de los límites planetarios propuestos en la Tabla 1. Descripciones ampliadas y adicionales de algunos de los límites están disponibles en la información complementaria (Apéndice 1, Discusión complementaria 3-4).

Fig. 4. Categorías de límites planetarios.

Boundary character	Processes with global scale thresholds	Slow processes without known global scale thresholds
Scale of process		
Systemic processes at planetary scale	Climate Change	
	Ocean Acidification	
		Stratospheric Ozone
Aggregated processes from local/regional scale		Global P and N Cycles
		Atmospheric Aerosol Loading
		Freshwater Use
		Land Use Change
		Biodiversity Loss
		Chemical Pollution

## Cambio climático

El límite del cambio climático es actualmente objeto de un intenso debate a medida que la comunidad internacional se acerca a la 15ª Conferencia de las Partes de la CMNUCC en Copenhague en diciembre de 2009. Hay una creciente convergencia hacia una "barrera de protección de 2°C"

Enfoque, es decir, contener el aumento de la temperatura media global a no más de 2 °C por encima del nivel preindustrial. La consideración de esta medida de contención se basa en una combinación de argumentos analíticos y políticos, considerando (i) las proyecciones científicas de los respectivos daños climáticos que se desprenden a distintos niveles de calentamiento global, (ii)

Tabla 1. Límites planetarios propuestos.

Proceso del sistema terrestre	Variable de control	Umbral evitado o influenciado por variable lenta	Límite planetario (zona de incertidumbre)	Estado del conocimiento*
cambio climático	Concentración atmosférica de CO <sub>2</sub> , ppm;  Desequilibrio energético ante Superficie de la Tierra, W m <sup>-2</sup>	Pérdida de las capas de hielo polares. Alteraciones climáticas regionales. Pérdida de suministros de agua dulce glacial. debilitamiento de los sumideros de carbono.	Concentración atmosférica de CO <sub>2</sub> : 350 ppm (350–550 ppm)  Desequilibrio energético: +1 W m <sup>-2</sup> (+1,0–+1,5 W m <sup>-2</sup> )	1. Amplia evidencia científica. 2. Umbrales de subsistemas múltiples. 3. Debate sobre la posición del límite.
Acidificación de los océanos	Concentración de iones carbonato, estado promedio global de saturación superficial del océano con respecto a la aragonita (Ω <sub>arag</sub> )	Conversión de arrecifes de coral para mantener ≥80% de los sistemas dominados por algas. Eliminación regional de algunos saturación de aragonito y alto estado de calcita formadora de aragonito de magnesio medio superficial, incluyendo la variabilidad del océano y del sumidero marino natural. Variable lenta que afecta a diario y estacional de carbono.		1. Procesos geofísicos bien conocidos. 2. Umbral probable. 3. Posición límite incierta debido a la respuesta poco clara del ecosistema.
Estratosférico ozono agotamiento	Concentración de O <sub>3</sub> estratosférico, DU	Efectos graves e irreversibles de la radiación UV-B en la salud humana y los ecosistemas.	<5% de reducción respecto del nivel preindustrial de 290 DU (5%–10%)	1. Amplia evidencia científica. 2. Umbral bien establecido. 3. Posición límite implícitamente acordada y respetada.
Carga de aerosoles atmosféricos	Concentración general de partículas en la atmósfera, a nivel regional	Alteración de los sistemas monzónicos. Efectos sobre la salud humana. Interactúa con el cambio climático y los límites de agua dulce.	Por determinar	1. Amplia evidencia científica. 2. Se desconoce el comportamiento del umbral global. 3. Aún no es posible sugerir un límite.
Flujos biogeoquímicos: interferencias con los ciclos de P y N	P: entrada de fósforo al océano, aumento en comparación con la meteorización natural de fondo  N: cantidad de N <sub>2</sub> extraída de la atmósfera para uso humano, Mt N año <sup>-1</sup>	P: evitar un evento anóxico oceánico mayor (incluso regional), con impactos sobre los ecosistemas marinos.  N: variable lenta que afecta la resiliencia general de los ecosistemas a través de la acidificación de los ecosistemas terrestres y la eutrofización de los sistemas costeros y de agua dulce.	P: < 10× (10× - 100×)  N: Limitar la fijación industrial y agrícola de N <sub>2</sub> a 35 Mt N año <sup>-1</sup> , lo que es ~ N: (1) Se conocen 25% de la cantidad total de N <sub>2</sub> fijada naturalmente por año por los ecosistemas terrestres (25%–35%)	P: (1) Conocimiento limitado sobre las respuestas del ecosistema; (2) Alta probabilidad de umbral pero el momento es muy incierto; (3) Posición fronteriza muy incierta.  algunas respuestas del ecosistema; (2) Actúa como una variable lenta, se desconoce la existencia de umbrales globales; (3) Posición fronteriza muy incierta.
Uso mundial de agua dulce	Uso consuntivo de agua azul, km <sup>3</sup> año <sup>-1</sup>	Podría afectar los patrones climáticos regionales (por ejemplo, el comportamiento del monzón).  Variable principalmente lenta que afecta la retroalimentación de la humedad, la producción de biomasa, la absorción de carbono por los sistemas terrestres y la reducción de la biodiversidad.	<4000 km <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> (4000–6000 km <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> )	1. La evidencia científica de la respuesta del ecosistema es incompleta y fragmentada. 2. Existen umbrales variables, regionales o de subsistema lento. 3. El valor límite propuesto es un agregado global, la distribución espacial determina los umbrales regionales.

(con)



Cambio del sistema territorial	Porcentaje de la cobertura terrestre global desencadenante de una conversión generalizada e irreversible de los biomas de tierras de cultivo a estados no deseados.	Actúa principalmente como una variable lenta que afecta el almacenamiento de carbono y la resiliencia a través de cambios en la biodiversidad y la heterogeneidad del paisaje.	≤15% de la superficie terrestre mundial libre de hielo convertida en tierras de cultivo (15%–20%)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Amplia evidencia científica de los impactos del cambio de cobertura del suelo sobre los ecosistemas, en gran medida locales y regionales.</li> <li>2. Variable lenta, umbral global poco probable pero umbrales regionales probables.</li> <li>3. El límite es un agregado global con alta incertidumbre; la distribución regional del cambio del sistema terrestre es crítica.</li> </ol>
Tasa de pérdida de biodiversidad	Tasa de extinción, extinciones por millón de especies por año (E/MSY)	<p>Variable lenta que afecta el funcionamiento de los ecosistemas a escala continental y de cuencas oceánicas.</p> <p>Impacto en muchos otros límites: almacenamiento de C, agua dulce, ciclos de N y P, sistemas terrestres.</p> <p>La pérdida masiva de biodiversidad es inaceptable desde el punto de vista ético. razones.</p>	<10 E/RMS (10–100 E/RMS)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Conocimiento incompleto sobre el papel de la biodiversidad para el funcionamiento de los ecosistemas en diferentes escalas.</li> <li>2. Umbrales probables a escala local y regional.</li> <li>3. Posición límite altamente incierta.</li> </ol>
contaminación química	<p>Por ejemplo, los umbrales que conducen a emisiones, impactos inaceptables en las concentraciones o efectos sobre la salud humana y el funcionamiento del ecosistema son posibles pero en gran medida desconocidos, como los contaminantes orgánicos persistentes (COP), los plásticos, los disruptores endocrinos, los metales pesados y los desechos nucleares.</p>	<p>Puede actuar como una variable lenta que socava la resiliencia y aumenta el riesgo de cruzar otros umbrales.</p>	Por determinar	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Existe amplia evidencia científica sobre sustancias químicas individuales pero falta un análisis agregado a nivel global.</li> <li>2. Variable lenta, umbrales de gran escala desconocidos.</li> <li>3. Aún no es posible sugerir un límite.</li> </ol>

Juicios de valor sobre la (no) aceptabilidad de tales impactos, y (iii) consideraciones políticas sobre lo que se percibe como un objetivo realista dada la difícil situación que enfrenta la humanidad hoy debido al calentamiento global ya comprometido. Sin embargo, es necesario enfatizar que se deben afrontar riesgos significativos de impactos climáticos nocivos para la sociedad y el medio ambiente, incluso si se logra mantener el límite de 2 °C (Richardson et al., 2009).

El enfoque que presentamos aquí para definir un límite de cambio climático (descrito más adelante) se basa en nuestra comprensión científica de lo que se requiere para evitar cruzar los umbrales críticos que separan estados cualitativamente diferentes del sistema climático. De hecho, el límite así identificado ofrece una alta probabilidad de que también se respete el límite de 2 °C (Hare y Meinshausen, 2006).

El límite del cambio climático propuesto aquí busca minimizar el riesgo de respuestas altamente no lineales, posiblemente abruptas e irreversibles, del Sistema Tierra (Consejo Nacional de Investigación (NRC) 2002, IPCC 2007b) relacionadas con uno o más umbrales, cuyo cruce podría conducir a la alteración de los climas regionales (Lenton et al. 2008), desencadenar el colapso de los principales patrones de dinámica climática como la circulación termohalina (Clark et al. 2002), e impulsar otros impactos difíciles de afrontar para la sociedad, como el rápido aumento del nivel del mar. El riesgo de cruzar dichos umbrales aumentará drásticamente con una mayor desviación antropogénica de la variabilidad natural del clima del Holoceno.

Proponemos un enfoque dual para definir el límite planetario del cambio climático, utilizando tanto la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> como la radiación.

Forzamiento como variables de control a escala global. Sugerimos valores límite de 350 ppm de CO<sub>2</sub> y 1 W m<sup>-2</sup> por encima del nivel preindustrial, respectivamente. El límite se basa en (i) un análisis de la sensibilidad del equilibrio del sistema climático al forzamiento de los gases de efecto invernadero, (ii) el comportamiento de las grandes capas de hielo polar en climas más cálidos que los del Holoceno (Hansen et al., 2008), y (iii) el comportamiento observado del sistema climático con una concentración actual de CO<sub>2</sub> de aproximadamente 387 ppm y un forzamiento radiativo neto de +1,6 W m<sup>-2</sup> (+0,8/-1,0 W m<sup>-2</sup>) (IPCC, 2007a).

La sensibilidad climática, estimada por el conjunto actual de modelos climáticos, incluye únicamente retroalimentaciones rápidas, como cambios en el vapor de agua, las nubes y el hielo marino, y arroja un valor de ~3 °C (rango: 2-4,5 °C) para una duplicación de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> por encima de los niveles preindustriales (IPCC 2007a). La inclusión de retroalimentaciones lentas, como la disminución del volumen de la capa de hielo, los cambios en la distribución de la vegetación y la inundación de las plataformas continentales, arroja una sensibilidad climática estimada de ~6 °C (rango: 4-8 °C) (Hansen et al. 2008). Por lo tanto, el conjunto actual de modelos climáticos puede subestimar significativamente la gravedad del cambio climático futuro a largo plazo para una concentración dada de gases de efecto invernadero.

Los datos paleoclimáticos de hace 65 millones de años hasta la actualidad apuntan a la disminución de la concentración de CO<sub>2</sub> como el principal factor en la tendencia de enfriamiento a largo plazo durante ese período. Los datos sugieren además que el planeta estaba en gran parte libre de hielo hasta que las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> cayeron a 450 ppm (±100 ppm), lo que indica una zona de peligro cuando las concentraciones de CO<sub>2</sub> aumentan dentro del rango de 350-550 ppm (Hansen et al. 2008). A pesar de las incertidumbres relacionadas con el grado de histéresis en la relación entre el crecimiento del hielo y la creación de hielo en respuesta al cambio de temperatura, lo anterior sugiere que elevar la concentración de CO<sub>2</sub> por encima de 350 ppm puede llevar a cruzar un umbral que resulte en la eventual desaparición de algunas de las grandes capas de hielo polares, con un mayor riesgo de cruzar el umbral a medida que la concentración de CO<sub>2</sub> se acerca al extremo superior del rango.

El clima contemporáneo se está alejando así de los límites de la variabilidad del Holoceno, lo que aumenta drásticamente el riesgo de un cambio climático peligroso.

Las observaciones de una transición climática incluyen un rápido retroceso del hielo marino de verano en el océano Ártico (Johannessen 2008), el retroceso de los glaciares de montaña en todo el mundo (IPCC 2007a), la pérdida de masa de

las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida occidental (Cazenave 2006), un aumento de la tasa de aumento del nivel del mar en los últimos 10 a 15 años (Church y White 2006), un desplazamiento de 4° de latitud hacia los polos de las regiones subtropicales (Seidel y Randel 2006), un aumento del blanqueamiento y la mortalidad en los arrecifes de coral (Bellwood et al. 2004, Stone 2007), un aumento en el número de grandes inundaciones (Milly et al. 2002, MEA 2005a) y la activación de procesos de retroalimentación lenta como el debilitamiento del sumidero de carbono oceánico (Le Quéré et al. 2007).

La equivalencia actual del límite para el CO<sub>2</sub> y el forzamiento radiativo neto surge porque el efecto de enfriamiento de los aerosoles contrarresta el efecto de calentamiento de los gases de efecto invernadero distintos del CO<sub>2</sub> (IPCC 2007a, Ramanathan y Feng 2008). Sin embargo, estos forzamientos distintos del CO<sub>2</sub> podrían cambiar en el futuro, lo que requeriría un ajuste del límite del CO<sub>2</sub>.

#### Acidificación de los océanos

La acidificación de los océanos supone un desafío para la biodiversidad marina y la capacidad de los océanos de seguir funcionando como sumidero de CO<sub>2</sub> (actualmente eliminan aproximadamente el 25 % de las emisiones humanas). El proceso de eliminación atmosférica incluye tanto la disolución del CO<sub>2</sub> en el agua de mar como la absorción de carbono por los organismos marinos. La absorción oceánica de CO<sub>2</sub> antropogénico no se distribuye uniformemente ni espacialmente (Sabine et al., 2004) ni temporalmente (Canadell et al., 2007).

La adición de CO<sub>2</sub> a los océanos aumenta la acidez (reduce el pH) del agua marina superficial. Muchos organismos marinos son muy sensibles a los cambios en la composición química del CO<sub>2</sub> oceánico, especialmente aquellos que utilizan los iones carbonato disueltos en el agua marina para formar conchas o estructuras esqueléticas protectoras de carbonato de calcio. El pH de la superficie oceánica ha disminuido aproximadamente 0,1 unidades de pH (lo que corresponde a un aumento del 30 % en la concentración de iones hidrógeno y una disminución del 16 % en la de carbonato) desde la época preindustrial (Guinotte et al., 2003; Feely et al., 2004; Orr et al., 2005).

2005, Guinotte y Fabry 2008, Doney et al. 2009). Esta tasa de acidificación es al menos 100 veces más rápida que en cualquier otro momento de los últimos 20 millones de años.

Los organismos marinos secretan carbonato de calcio principalmente en forma de aragonito (que es producido por los corales, muchos moluscos y otras formas de vida marina) y calcita (que es producida por diferentes plancton unicelulares y otros grupos).

El aragonito es aproximadamente un 50 % más soluble en agua de mar que la calcita (Mucci, 1983). Por lo tanto, con el aumento del nivel del mar

Debido a la acidez, se espera que las conchas de aragonito se disuelvan antes que las de calcita, a menos que el organismo haya desarrollado algún mecanismo para prevenir la disolución de la concha. Un tercer tipo de carbonato de calcio biogénico, la calcita con alto contenido de magnesio, es secretado por algunos organismos marinos, como las algas rojas coralinas y los erizos de mar. Dependiendo de su concentración de magnesio, la calcita con alto contenido de magnesio puede ser más soluble en agua de mar que el aragonito. Para estos tres tipos de carbonato de calcio, la concentración de iones carbonato afecta considerablemente el estado de saturación del mineral en el agua de mar. Si el pH de los océanos disminuye lo suficiente, la reducción concomitante de la concentración de iones carbonato resulta en una disminución del estado de saturación del agua de mar con respecto al aragonito o la calcita. Si el estado de saturación del carbonato de calcio es inferior a uno, el carbonato de calcio producido por los organismos marinos para formar sus conchas sólidas se vuelve soluble, a menos que el organismo tenga alguna forma de prevenir la disolución (Feely et al., 2004; Fabry et al., 2008).

A nivel mundial, el estado de saturación de aragonito en la superficie del océano ( $\Omega_{\text{arag}}$ ) está disminuyendo a medida que aumenta la acidez del océano. Ha caído de un valor preindustrial de  $\Omega_{\text{arag}} = 3,44$  a un valor actual de 2,9. Se proyecta un valor de  $\Omega_{\text{arag}}$  de 2,29 para una duplicación del  $\text{CO}_2$  (Guinotte y Fabry 2008). Aunque los valores de  $\Omega_{\text{arag}}$  promediados globalmente en aguas superficiales se mantienen por encima de la unidad para una duplicación del  $\text{CO}_2$  atmosférico, se proyecta que grandes partes del Océano Antártico y el Océano Ártico se subsaturarán con respecto a la aragonita ya en 2030-2060 (Orr et al. 2005, McNeil y Matear 2008, Steinacher et al. 2009). La subsaturación de aragonita significa que estas aguas se volverán corrosivas para las conchas de aragonita y calcita con alto contenido de magnesio secretadas por una amplia variedad de organismos marinos. La tasa proyectada de cambio en la química del  $\text{CO}_2$  oceánico deja poco tiempo para que los organismos desarrollen adaptaciones. Aunque algunas especies pueden ser insensibles al  $\text{CO}_2$  o capaces de adaptarse (por ejemplo, Miller et al. 2009), los costos energéticos de lograr un crecimiento neto de la concha y prevenir la disolución en condiciones de subsaturación de aragonito probablemente tendrán otros impactos en las tasas generales de crecimiento, la depredación, el metabolismo o la reproducción, como se observa en organismos de otras regiones (por ejemplo, Iglesias-Rodríguez et al. 2008, Fabry et al. 2008, Wood et al. 2008, Tunnicliffe et al. 2009).

El agotamiento a gran escala de los organismos formadores de aragonito constituiría una perturbación importante en los ecosistemas marinos, cuyas consecuencias e impactos son muy inciertos. Efectos perjudiciales en muchos...

Los organismos marinos comienzan muy por encima del umbral geoquímico de  $\Omega_{\text{arag}} = 1$ , y las tasas de calcificación de algunos organismos se reducen entre un 10 % y un 60 % al duplicarse el  $\text{CO}_2$  atmosférico (Guinotte y Fabry, 2008; Fabry et al., 2008). Incluso pequeñas sensibilidades de la biota al aumento del  $\text{CO}_2$  se amplificarán con el paso de las generaciones, lo que podría impulsar la reestructuración de diversos ecosistemas marinos, cuyas consecuencias son muy difíciles de predecir (Fabry, 2008). Además, para el año 2200, en un escenario en el que se mantenga el consumo de combustibles fósiles, la reducción del pH del agua de mar y del fitoplancton podría inducir una gran reducción en la exportación de materia orgánica marina desde las aguas costeras, lo que provocaría una expansión considerable de las zonas hipóxicas (Hofmann y Schellnhuber, 2009).

La acidificación de los océanos puede tener graves impactos en los arrecifes de coral y los ecosistemas asociados. Los arrecifes de coral corren el riesgo de quedar expuestos a condiciones marginales (valores de  $\Omega_{\text{arag}}$  entre 3 y 3,5) o extremadamente marginales (valores de  $\Omega_{\text{arag}}$  inferiores a 3) en casi todas partes ya en 2050 (Kleypas et al., 1999; Guinotte et al., 2003; Langdon y Atkinson, 2005; Hoegh-Guldberg et al., 2007), lo que provocaría cambios sustanciales en la composición de las especies y en la dinámica de las comunidades de coral y otros arrecifes (Kuffner et al., 2008; Guinotte y Fabry, 2008; Doney et al., 2009). De igual forma, el plancton marino también es vulnerable (Riebesell et al., 2000), presumiblemente con un efecto dominó en la cadena alimentaria.

La acidificación y el calentamiento de los océanos se combinan e interactúan para disminuir la productividad de los arrecifes de coral (Anthony et al. 2008), lo que refuerza la noción de que múltiples factores estresantes sobre los arrecifes de coral a menudo se combinan para tener efectos negativos que van mucho más allá de los esperados de un solo factor estresante (Bellwood et al. 2004).

Aunque el umbral de saturación de aragonito es fácil de definir y cuantificar, persisten importantes interrogantes sobre a qué distancia de este umbral debe establecerse el valor límite. La combinación de estimaciones del punto en el que las tasas de calcificación comienzan a verse sustancialmente afectadas, los valores del estado de saturación de aragonito en los que las condiciones para los corales pasan de adecuadas a marginales, y el punto en el que las aguas superficiales en latitudes altas comienzan a acercarse a la subsaturación de aragonito, sugiere que el límite de acidificación oceánica se sitúa bastante lejos del estado de saturación de aragonito en disolución ( $\Omega_{\text{arag}} = 1$ ).

Como primera estimación, proponemos un límite planetario donde el estado de saturación de aragonito oceánico se mantiene al 80 % o más del promedio global.

Agua de mar superficial preindustrial  $\Omega_{arag}$  de 3,44. Reconociendo que la química de los carbonatos puede variar en escalas temporales diurnas y estacionales (Tyrrell et al., 2008; Feely et al., 2008; Miller et al., 2009), sugerimos incorporar el rango típico diurno y estacional de valores del estado de saturación de aragonito en este límite (es decir, >80 % del promedio del océano superficial, estado de saturación de aragonito preindustrial  $\pm$  variabilidad diurna y estacional). La principal justificación de este valor subjetivo es doble: mantener las aguas superficiales de latitudes altas por encima de la subsaturación de aragonito y garantizar condiciones adecuadas para la mayoría de los sistemas coralinos.

#### Agotamiento del ozono estratosférico

El ozono estratosférico filtra la radiación ultravioleta del Sol. La aparición del agujero de ozono antártico fue un ejemplo clásico de cómo se traspasó un umbral en el sistema terrestre de forma completamente inesperada. Una combinación de mayores concentraciones de sustancias antropogénicas que agotan la capa de ozono (como los clorofluorocarbonos) y las nubes estratosféricas polares llevó a la estratosfera antártica a un nuevo régimen: uno en el que el ozono desapareció efectivamente en la estratosfera inferior de la región durante la primavera austral. Este adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico polar austral tiene impactos negativos en los organismos marinos (Smith et al. 1992) y plantea riesgos para la salud humana. Aunque no parece haber un umbral similar para el ozono global, existe la posibilidad de que el calentamiento global (que conduce a una estratosfera más fría) pueda causar un aumento en la formación de nubes estratosféricas polares. Si esto ocurriera en la región ártica, podría desencadenar agujeros de ozono sobre los continentes del hemisferio norte, con posibles impactos en las poblaciones allí.

Aunque el fenómeno del agujero de ozono es un ejemplo clásico de umbral, hemos optado por enmarcar el límite planetario en torno al ozono estratosférico extrapolar. Hay dos razones principales para esta enmarcación. En primer lugar, el punto de inflexión del agujero de ozono depende de sustancias antropogénicas que agotan la capa de ozono, pero también de temperaturas suficientemente frías y una cantidad suficiente de vapor de agua y, en algunos casos, de ácido nítrico. Los seres humanos contribuyen directamente al primero (y, en cierta medida, al último) de estos factores, e indirectamente al resto. En segundo lugar, si bien los agujeros de ozono polares tienen impactos locales, un adelgazamiento de la capa de ozono extrapolar tendría un impacto mucho mayor en los seres humanos y los ecosistemas.

En el caso del ozono estratosférico global extrapolar, no existe un umbral claro para establecer un límite. Por lo tanto, la ubicación de nuestro límite en este caso es necesariamente más incierta que, por ejemplo, en el caso de la acidificación de los océanos.

Consideramos que el límite planetario para los niveles de ozono es una disminución <5% en los niveles de ozono en columna para cualquier latitud particular con respecto a los valores de 1964-1980 (Chipperfield et al. 2006).

Afortunadamente, gracias a las medidas adoptadas como resultado del Protocolo de Montreal (y sus enmiendas posteriores), parece que estamos encaminados a evitar la transgresión de este límite. En 2005, las concentraciones troposféricas de gases que agotan la capa de ozono habían disminuido entre un 8 % y un 9 % con respecto a sus valores máximos alcanzados entre 1992 y 1994 (Clerbaux et al., 2006). Si bien existe un lapso considerable entre la disminución de las concentraciones en la troposfera y la recuperación del ozono estratosférico, al menos se está reduciendo el principal factor antropogénico del agotamiento del ozono. La disminución de las concentraciones de ozono estratosférico entre 60°S y 60°N observada desde la década de 1990 se ha detenido (Chipperfield et al., 2006).

Sin embargo, se prevé que el agujero de ozono antártico persista durante varias décadas, y las pérdidas de ozono en el Ártico podrían continuar durante las próximas dos décadas. En resumen, el caso del ozono estratosférico es un buen ejemplo de cómo el esfuerzo humano concertado y la toma de decisiones acertadas parecen habernos permitido mantenernos dentro de un límite planetario.

#### Interferencia con el fósforo global y Ciclos del nitrógeno

La interferencia antropogénica a escala local y regional en el ciclo del nitrógeno y los flujos de fósforo ha inducido cambios abruptos en los lagos (Carpenter 2005) y los ecosistemas marinos (por ejemplo, anoxia en el mar Báltico).

(Zillén et al. 2008). La eutrofización debida a los influjos de nitrógeno (N) y fósforo (P) inducidos por el hombre puede empujar a los sistemas acuáticos y marinos a través de umbrales, generando un cambio no lineal abrupto de, por ejemplo, un estado oligotrófico de agua clara a un estado eutrófico de agua turbia (Carpenter et al.

1999) Los cambios entre estos estados estables alternativos dependen de interacciones complejas entre los flujos de N y P y del entorno biogeoquímico predominante.

La degradación inducida por el hombre de los estados de los ecosistemas (por ejemplo, sobrepesca, degradación de la tierra) y el aumento de los flujos de N y P a escala regional y global pueden causar cambios no lineales no deseados en los sistemas terrestres, acuáticos y marinos, al mismo tiempo que

funcionando como un impulsor lento que influye en el cambio climático antropogénico a nivel planetario.

No podemos descartar la posibilidad de que los ciclos de N y P constituyan, de hecho, límites planetarios separados por sí mismos. Ambos influyen, de forma compleja y no lineal, en los sistemas de soporte vital humano a escala regional, y ambos tienen importantes impactos planetarios agregados, lo que los convierte en procesos clave del Antropoceno. La razón para mantenerlos como un solo límite en este artículo radica principalmente en las estrechas interacciones entre N y P, como nutrientes biológicos clave que impulsan cambios abruptos en los subsistemas de la Tierra.

La modificación humana del ciclo del nitrógeno es profunda (Galloway y Cowling, 2002; Gruber y Galloway, 2008). Las actividades humanas convierten ahora más nitrógeno de la atmósfera en formas reactivas que todos los procesos terrestres de la Tierra juntos. La conversión impulsada por el hombre se produce principalmente a través de cuatro procesos: fijación industrial del nitrógeno atmosférico en amoníaco (~80 Mt N año<sup>-1</sup>); fijación agrícola del nitrógeno atmosférico mediante el cultivo de leguminosas (~40 Mt N año<sup>-1</sup>); combustión de combustibles fósiles (~20 Mt N año<sup>-1</sup>); y quema de biomasa (~10 Mt N año<sup>-1</sup>). Aunque el propósito principal de la mayor parte de este nuevo nitrógeno reactivo es mejorar la producción de alimentos mediante la fertilización, mucho nitrógeno reactivo acaba en el medio ambiente, contaminando las vías fluviales y las zonas costeras, aumentando la carga de contaminación local y global en la atmósfera y acumulándose en la biosfera. Hasta la fecha, los esfuerzos para limitar la contaminación por N se han llevado a cabo únicamente a escala local y regional (por ejemplo, limitando la concentración de nitrato en las aguas subterráneas o la emisión de óxidos nítricos a las cuencas atmosféricas urbanas).

A escala global, la adición de diversas formas de nitrógeno reactivo al medio ambiente actúa principalmente como una variable de efecto lento, erosionando la resiliencia de importantes subsistemas del sistema terrestre. La excepción es el óxido nítrico, uno de los gases de efecto invernadero más importantes y, por lo tanto, un factor sistémico a escala planetaria. El óxido nítrico se incluye en el límite del cambio climático aplicando el forzamiento radiativo (máximo +1 W m<sup>-2</sup> de forzamiento antropogénico) como variable de control.

Para las demás formas de N reactivo, establecer un límite planetario no es sencillo. El enfoque más simple y directo es considerar la fijación humana de N de la atmósfera como una válvula gigante que controla un flujo masivo de nuevo N reactivo hacia

El Sistema Terrestre. El límite puede entonces establecerse usando esa válvula para controlar la cantidad de N reactivo adicional que fluye hacia el Sistema Terrestre. Sugerimos que el límite se fije inicialmente en aproximadamente el 25% de su valor actual, o en aproximadamente 35 Mt N año<sup>-1</sup>. Enfatizamos que esto es solo una estimación inicial. Se requiere mucha más investigación y síntesis de información para poder determinar un límite más fundamentado.

Incluso este límite inicial reduciría considerablemente la cantidad de nitrógeno reactivo que se introduce en los sistemas terrestres, oceánicos y atmosféricos. Eliminaría el flujo actual de nitrógeno hacia la tierra y podría impulsar métodos mucho más eficientes y menos contaminantes para mejorar la producción de alimentos. Casi con toda seguridad, también impulsaría el retorno del nitrógeno presente en los efluentes humanos a los paisajes productivos, reduciendo así aún más la fuga de nitrógeno reactivo a los ecosistemas.

Aunque el N forma parte de un ciclo biológico global, el P es un mineral fósil finito extraído para el consumo humano y añadido naturalmente al sistema terrestre mediante procesos de meteorización geológica. Se ha sugerido que el cruce de un umbral crítico de entrada de P a los océanos es el factor clave de los eventos anóxicos oceánicos (EAO) a escala global, lo que podría explicar las extinciones masivas de vida marina ocurridas en el pasado (Handoh y Lenton, 2003). Se cree que la dinámica entre las condiciones óxicas y anóxicas biestables se debe a la retroalimentación positiva entre la anoxia, el reciclaje de P de los sedimentos y la productividad marina.

Los modelos sugieren que un aumento sostenido de la entrada de P a los océanos, superior al 20 % de la tasa de meteorización natural de fondo, podría haber sido suficiente para inducir las OAE anteriores (Handoh y Lenton, 2003). Suponiendo una estimación relativamente baja de la entrada de P «preagrícola» a los océanos de 1,1 Mt año<sup>-1</sup> (3,5 E<sup>-1</sup> mol P año<sup>-1</sup>), este aumento de la entrada corresponde a tan solo unas 225 000 toneladas de P año<sup>-1</sup> (0,72 E<sup>-1</sup> mol P año<sup>-1</sup>).

De la extracción humana global de ~20 Mt/año de P, se estima que 10,5 Mt/año se pierden en las tierras de cultivo del mundo, la principal fuente de entrada de P a los océanos. El aumento de P reactivo en los océanos, debido a las actividades humanas, se ha estimado (año 2000) en ~9 Mt/año (8,5–9,5 Mt/año, dependiendo de cómo se gestionen los flujos de detergentes y efluentes de aguas residuales). (Mackenzie et al., 2002). A pesar de un aumento sustancial en la entrada de P antropogénico a los océanos (hasta 8-9 veces mayor que la tasa natural de fondo), sigue siendo muy incierto si la entrada de P antropogénico podría alcanzar un punto en el que se desencadenara una OAE inducida por el hombre, y en caso afirmativo, cuándo. Para el



Para que el océano profundo global pase a un estado anóxico, se requiere un fuerte reciclaje de P de los sedimentos a medida que las aguas del fondo se vuelven más anóxicas, lo que impulsa una mayor productividad y amplifica el cambio inicial en un ciclo de retroalimentación positiva. En los modelos existentes, la dinámica resultante tiene una escala temporal de 10 000 años debido al largo tiempo de residencia del P en las profundidades oceánicas (Lenton et al., 2008). Además, aunque la actividad humana ha acelerado considerablemente la entrada de P a los océanos, aún se necesitarían unos 10 000 años para duplicar el P en ellos. Esto sugiere que para que la actividad humana desencadene una OAE aún deberían faltar más de 1000 años, lo que la sitúa en un nivel inferior en nuestra esfera actual. Nuestros análisis de modelado tentativos, utilizando el modelo de Handoh y Lenton (2003), muestran que un aumento de 10 veces en la entrada de P a los océanos (es decir, ligeramente superior al nivel actual), si se mantiene durante 1000 años, elevaría la fracción anóxica del océano de 0,14 a 0,22. Las estimaciones actuales de las reservas de roca fosfórica disponibles (hasta 20 Gt de P) sugieren que dicha entrada no podría mantenerse durante más de 1000 años. Incluso si las entradas de P volvieran a los niveles preindustriales, la fracción anóxica seguiría aumentando durante otros 1000 años. Sin embargo, se evitaría una OAE completa (fracción anóxica de 1). No se sabe con certeza qué cambios cualitativos y cambios de estado regional desencadenaría una entrada sostenida de este tipo; sin embargo, la evidencia actual sugiere que induciría cambios de estado importantes a nivel local y regional, incluida una anoxia generalizada en algunos mares costeros y de plataforma.

Estos análisis tienen grandes incertidumbres debido a las complejas interacciones entre los estados óxico-anóxicos, las diferentes formas de P en los sistemas marinos y las interacciones entre las condiciones abióticas y bióticas en los océanos (impulsadas en particular por otros límites planetarios como la acidificación de los océanos, la entrada de N, la biodiversidad marina y el cambio climático). Por lo tanto, es difícil cuantificar con precisión un límite planetario de entrada de P a los océanos que sitúe a la humanidad a una distancia segura de desencadenar una anoxia oceánica generalizada y perjudicial. El problema radica, en parte, en definir qué es perjudicial, dadas las observaciones (actuales) de eventos anóxicos regionales abruptos inducidos por P.

Sugerimos que, como mínimo, se establezca un nivel límite que (con el conocimiento actual) permita a la humanidad evitar con seguridad el riesgo de desencadenar una OAE incluso en horizontes temporales más largos (más de 1000 años). Esto, a su vez, podría requerir que no se permita la entrada de P antropogénico al océano.

Superar un nivel antropogénico de aproximadamente 10 veces la tasa natural de fondo de aproximadamente 1 Mt P año<sup>-1</sup>. Esto es mayor que la tasa de activación propuesta para eventos oceánicos atmosféricos (OEA) anteriores, pero se cree que crea un espacio operativo global seguro a largo plazo (durante siglos). Por lo tanto, el límite planetario propuesto para la entrada de P antropogénico a los océanos se sitúa tentativamente en <10 veces (<10×) el flujo natural de meteorización de fondo de P, con un rango de incertidumbre igualmente tentativo (<10×–<100×).

#### Tasa de pérdida de biodiversidad

Al igual que los cambios en los sistemas terrestres (véase más adelante), los cambios en la biodiversidad local y regional pueden tener efectos generalizados en el funcionamiento del sistema terrestre e interactuar con otros límites planetarios. Por ejemplo, la pérdida de biodiversidad puede aumentar la vulnerabilidad de los ecosistemas terrestres y acuáticos a los cambios en el clima y la acidez de los océanos, reduciendo así los límites seguros para estos procesos.

Las tasas actuales y proyectadas de pérdida de biodiversidad constituyen el sexto evento de extinción más importante en la historia de la vida en la Tierra, el primero impulsado específicamente por el impacto de las actividades humanas en el planeta (Chapin et al., 2000). Eventos de extinción anteriores, como la extinción terciaria de los dinosaurios y el auge de los mamíferos, causaron cambios permanentes masivos en la composición biótica y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. Esto sugiere consecuencias no lineales y en gran medida irreversibles de la pérdida de biodiversidad a gran escala.

La pérdida acelerada de biodiversidad durante el Antropoceno (Mace et al., 2005) es particularmente grave, dada la creciente evidencia de la importancia de la biodiversidad para sostener el funcionamiento y los servicios ecosistémicos, así como para evitar que los ecosistemas se deterioren (Folke et al., 2004). La diversidad de mecanismos funcionales de respuesta a la variación ambiental entre las especies de un ecosistema mantiene la resiliencia a las perturbaciones. En consecuencia, los ecosistemas (tanto gestionados como no gestionados) con bajos niveles de diversidad de respuesta dentro de los grupos funcionales son particularmente vulnerables a perturbaciones (como enfermedades) y presentan un mayor riesgo de sufrir cambios catastróficos de régimen (Scheffer y Carpenter, 2003).

Las especies desempeñan diferentes funciones en los ecosistemas, en el sentido de tener diferentes efectos sobre ellos.

Procesos y/o diferentes respuestas a cambios en el entorno físico o biótico (es decir, ocupan nichos diferentes). Por lo tanto, la pérdida de especies afecta tanto el funcionamiento de los ecosistemas como su capacidad para responder y adaptarse a los cambios en las condiciones físicas y bióticas (Elmqvist et al., 2003; Suding et al., 2008).

Actualmente, la tasa global de extinción supera con creces la tasa de especiación y, en consecuencia, la pérdida de especies es el principal factor que impulsa los cambios en la biodiversidad global. La tasa promedio de extinción de los organismos marinos en el registro fósil es de 0,1 a 1 extinciones por millón de especies-año (E/RMS), y las tasas de extinción de los mamíferos en el registro fósil también se encuentran dentro de este rango (Pimm et al., 1995; Mace et al., 2005). Es cada vez más probable que la pérdida acelerada de especies comprometa la capacidad biótica de los ecosistemas para sostener su funcionamiento actual en nuevas circunstancias ambientales y bióticas (Walker et al. 1999).

Desde el advenimiento del Antropoceno, la actividad humana ha incrementado la tasa de extinción de especies entre 100 y 1000 veces las tasas de referencia típicas a lo largo de la historia de la Tierra (Mace et al., 2005), lo que ha resultado en una tasa de extinción global promedio actual de  $\geq 100$  E/RMS. Se proyecta que esta tasa de extinción global promedio se multiplicará por diez, hasta alcanzar 1000-10 000 E/RMS durante el siglo actual (Mace et al. 2005). Actualmente, alrededor del 25% de las especies de grupos taxonómicos bien estudiados se encuentran en peligro de extinción (desde el 12% en el caso de las aves hasta el 52% en el de las cícadas). Hasta hace poco, la mayoría de las extinciones (desde 1500) ocurrían en islas oceánicas. Sin embargo, en los últimos 20 años, aproximadamente la mitad de las extinciones registradas han ocurrido en continentes, principalmente debido al cambio de uso del suelo, la introducción de especies y, cada vez más, al cambio climático, lo que indica que la biodiversidad se encuentra actualmente en grave peligro en todo el planeta.

Los límites inferior y superior de las tasas de extinción en el registro fósil (0,1-1,0 E/MSY, con una tasa mediana estimada en 0,3 E/MSY para los mamíferos) proporcionan las mejores estimaciones a largo plazo de las tasas de extinción de fondo que históricamente han conservado la biodiversidad global. Se ha propuesto una tasa de extinción de fondo de 1 E/MSY en muchos taxones como referencia para evaluar el impacto de las acciones humanas (Pimm et al., 2006). Existe amplia evidencia de que las tasas de extinción actuales y proyectadas son insostenibles (MEA, 2005b). No obstante, sigue siendo muy difícil definir un nivel límite.

para la tasa de pérdida de biodiversidad que, si se transgrede durante largos períodos de tiempo, podría resultar en un cambio no deseado y no lineal del Sistema Tierra a escalas regionales y globales. Nuestra razón principal para incluir la diversidad biológica como un límite planetario es su papel en proporcionar funciones ecológicas que sustentan los subsistemas biofísicos de la Tierra y, por lo tanto, proporcionan la resiliencia subyacente de otros límites planetarios. Sin embargo, nuestra evaluación es que la ciencia es, hasta ahora, incapaz de proporcionar una medida de límite que capture, a nivel agregado, el papel regulador de la biodiversidad. En su lugar, sugerimos, como un indicador provisional, usar la tasa de extinción como un sustituto. Al hacerlo, concluimos que la humanidad ya ha entrado profundamente en una zona de peligro donde el cambio no deseado del sistema no puede excluirse, si la tasa de extinción actual muy elevada (en comparación con la extinción de fondo natural) se mantiene durante largos períodos de tiempo. Sugerimos un rango de incertidumbre para este cambio no deseado de 10-100 E/MSY, lo que indica que un límite planetario seguro (aquí establecido en 10 E/MSY) es una tasa de extinción dentro de un orden de magnitud de la tasa de fondo. Este límite relativamente seguro de pérdida de biodiversidad está siendo claramente excedido por al menos uno o dos órdenes de magnitud, lo que indica una necesidad urgente de reducir radicalmente las tasas de pérdida de biodiversidad (Díaz et al. 2005). Una advertencia importante al establecer una tasa de extinción segura es la observación común de que las especies no son igualmente importantes para la función del ecosistema. En particular, la pérdida de depredadores superiores y especies estructuralmente importantes, como los corales y las algas marinas, resulta en impactos desproporcionadamente grandes en la dinámica del ecosistema.

#### Uso mundial de agua dulce

El ciclo global del agua dulce ha entrado en el Antropoceno (Meybeck, 2003) debido a que los seres humanos son ahora la principal fuerza impulsora que altera el caudal fluvial a escala global (Shiklomanov y Rodda, 2003), así como los patrones espaciales y la estacionalidad de los flujos de vapor (Gordon et al., 2005). Se estima que el 25 % de las cuencas fluviales del mundo se secan antes de llegar a los océanos debido al uso de los recursos de agua dulce en ellas (Molden et al., 2007).

Las manipulaciones globales del ciclo del agua dulce afectan la biodiversidad, la seguridad alimentaria y sanitaria, y el funcionamiento ecológico, como la provisión de hábitats para el reclutamiento de peces, la captura de carbono y la regulación climática, socavando la resiliencia de los ecosistemas terrestres y acuáticos. Amenazas para la salud humana.

Los efectos en la calidad de vida debido al deterioro de los recursos hídricos mundiales son triples: (i) la pérdida de recursos de humedad del suelo (agua verde) debido a la degradación de la tierra y la deforestación, que amenaza la producción de biomasa terrestre y el secuestro de carbono, (ii) el uso y los cambios en los volúmenes y patrones de escorrentía (agua azul) que amenazan el suministro de agua para los seres humanos y las necesidades de agua acuática, y (iii) los impactos en la regulación del clima debido a la disminución de la retroalimentación de la humedad de los flujos de vapor (flujos de agua verde) que afectan los patrones de precipitación locales y regionales.

Las estimaciones indican que el 90% de los flujos de agua verde globales son necesarios para sustentar servicios ecosistémicos críticos (Rockström et al. 1999), mientras que entre el 20% y el 50% de los flujos anuales medios de agua azul en las cuencas fluviales son necesarios para sustentar el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos (Smakhtin 2008).

Los umbrales inducidos por el agua a escala continental o planetaria pueden cruzarse como resultado de impactos agregados de subsistemas a escala local (por ejemplo, cuenca fluvial) o regional (por ejemplo, sistema monzónico) (Fig. 4) causados tanto por cambios en el uso de los recursos hídricos como por cambios inducidos por el cambio climático en el ciclo hidrológico.

Los flujos de agua verde influyen, a escala regional, en los niveles de precipitaciones a través de la retroalimentación de humedad y, por tanto, en la disponibilidad de recursos de agua azul. Los umbrales inducidos por el agua verde incluyen el colapso de subsistemas biológicos como resultado de procesos de desecación regional. Algunos ejemplos incluyen el cambio abrupto de un estado estable húmedo a uno seco en la región del Sahel hace aproximadamente 5000-6000 años (Scheffer et al. 2001, Foley et al. 2003) y el riesgo futuro de una rápida sabanización de la selva amazónica debido a la disminución abrupta de la retroalimentación de humedad (Oyama y Nobre 2003). Los umbrales inducidos por el agua azul incluyen el colapso de los hábitats ribereños si se superan los umbrales mínimos de caudal ambiental (Smakhtin 2008) y el colapso de los sistemas lacustres regionales (como el Mar de Aral).

Por lo tanto, es necesario establecer un límite planetario para los recursos de agua dulce a fin de mantener de forma segura suficientes flujos de agua verde para la retroalimentación de la humedad (para regenerar la precipitación), permitir el funcionamiento y los servicios de los ecosistemas terrestres (p. ej., captura de carbono, crecimiento de la biomasa, producción de alimentos y diversidad biológica), y asegurar la disponibilidad de recursos de agua azul para los ecosistemas acuáticos. Los umbrales relacionados con la retroalimentación de la humedad se producen aguas arriba y tienen un impacto directo.

sobre los flujos de agua de escorrentía. Las estrechas interacciones entre la tierra y el agua, y entre los flujos de vapor y la escorrentía, dificultan la definición de un límite de agua dulce adecuado que capture la complejidad de la distribución de la lluvia a diferentes escalas. Sin embargo, como primer intento, proponemos el agotamiento de la escorrentía en forma de escorrentía consuntiva o uso de agua azul como indicador para capturar la complejidad total de los umbrales globales de agua dulce.

El límite superior de los recursos de agua azul accesibles se estima en ~12 500–15 000 km<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> (Postel 1998, DeFraiture et al. 2001). La escasez hídrica física se alcanza cuando las extracciones de agua azul superan los 5000–6000 km<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> (Raskin et al. 1997, Vörösmarty et al. 2000, DeFraiture et al. 2001).

Con base en las evaluaciones globales de los impactos del uso global de agua verde y azul (véase el Apéndice 1, Discusión Suplementaria 4), estimamos que traspasar un límite de ~4000 km<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de uso consuntivo de agua azul (con una zona de incertidumbre de 4000–6000 km<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>) aumentará significativamente el riesgo de acercarse a los umbrales inducidos por el agua verde y azul (colapso de los ecosistemas terrestres y acuáticos, cambios importantes en la retroalimentación de la humedad y mezcla de agua dulce y oceánica) a escala regional y continental. Actualmente, las extracciones de agua azul ascienden a ~4000 km<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> (Oki y Kanae, 2006), mientras que el uso consuntivo es de ~2600 km<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> (Shiklomanov y Rodda, 2003), lo que deja a la humanidad cierto margen de maniobra.

Sin embargo, la presión sobre los recursos mundiales de agua dulce está creciendo rápidamente, principalmente debido a la creciente demanda de alimentos. El uso de agua verde en la agricultura de secano, estimado actualmente en ~5000 km<sup>3</sup> /año, podría tener que aumentar un 50% para 2030, hasta alcanzar ~7500 km<sup>3</sup> /año, para garantizar la seguridad alimentaria (Rockström et al., 2007), mientras que el uso consuntivo de agua azul para riego podría aumentar entre un 25% y un 50%, lo que corresponde a 400-800 km<sup>3</sup> /año para 2050 (Evaluación Integral de la Gestión del Agua en la Agricultura, 2007). Esto indica que el espacio operativo seguro restante para el agua podría estar ya comprometido en gran medida para cubrir las demandas humanas de agua necesarias en el futuro.

#### Cambio del sistema territorial

El cambio del sistema territorial, impulsado principalmente por la expansión e intensificación agrícola, contribuye al cambio ambiental global, con el riesgo de socavar el bienestar humano y la sostenibilidad a largo plazo (Foley et al. 2005, MEA 2005a).

La conversión de bosques y otros ecosistemas a tierras agrícolas se ha producido a una tasa promedio del 0,8 % anual durante los últimos 40 a 50 años y constituye la principal causa mundial de la pérdida del funcionamiento y los servicios ecosistémicos (MEA, 2005a). La humanidad podría estar llegando a un punto en el que una mayor expansión de las tierras agrícolas a escala global podría amenazar gravemente la biodiversidad y socavar la capacidad reguladora del sistema terrestre (al afectar el sistema climático y el ciclo hidrológico).

Como límite planetario, proponemos que no más del 15% de la superficie terrestre libre de hielo se convierta en tierras de cultivo. Dado que este límite constituye un agregado global complejo, la distribución espacial y la intensidad de los cambios en el sistema terrestre son cruciales para la producción de alimentos, la regulación de los flujos de agua dulce y la retroalimentación sobre el funcionamiento del sistema terrestre. Al establecer un límite terrestre en términos de cambios en la superficie cultivada, reconocemos las limitaciones de esta métrica, dada su estrecha relación con los demás límites de uso de P y N, la tasa de pérdida de biodiversidad y el uso global de agua dulce.

Para que la humanidad se mantenga dentro de este límite, las tierras de cultivo deben asignarse a las zonas más productivas y deben controlarse los procesos que conducen a la pérdida de tierras productivas, como la degradación del suelo, la pérdida de agua de riego y la competencia con usos del suelo como el desarrollo urbano o la producción de biocombustibles. También puede ser necesario gestionar los procesos relacionados con la demanda, como la dieta, el consumo per cápita de alimentos, el tamaño de la población y el desperdicio en la cadena de distribución alimentaria. Los sistemas agrícolas que imitan mejor los procesos naturales (por ejemplo, los agroecosistemas complejos) también podrían permitir una ampliación de este límite (Ericksen et al., 2009).

Si bien los efectos del cambio en los sistemas terrestres actúan como una variable lenta que influye en otros límites, como la biodiversidad, el agua y el clima, también pueden desencadenar cambios rápidos a escala continental cuando se superan los umbrales de cobertura terrestre. Por ejemplo, la conversión de la selva amazónica en sistemas de cultivo o pastoreo puede alcanzar un nivel tal que una pequeña conversión adicional llevaría a la cuenca a una transformación irreversible en una sabana semiárida (Oyama y Nobre, 2003; Foley et al., 2007). A escala global, si se pierde suficiente tierra de alta productividad debido a la degradación, la producción de biocombustibles o la urbanización, la producción de alimentos puede extenderse a tierras marginales con menor rendimiento y mayor riesgo de degradación.

Esto puede constituir un umbral a partir del cual un pequeño incremento de la producción adicional de alimentos puede desencadenar un aumento acelerado de la tierra cultivada.

El límite entre el sistema terrestre y la tierra se debe implementar en múltiples escalas a través de una arquitectura terrestre global de grano fino (Turner 2009) que (i) reserve la tierra más productiva para uso agrícola, (ii) mantenga los bosques y otros ecosistemas de alto valor de conservación en sus estados actuales, y (iii) mantenga los suelos y ecosistemas ricos en carbono en su condición inalterada o cuidadosamente gestionada.

Aproximadamente el 12 % de la superficie terrestre mundial se dedica actualmente a cultivos (Foley et al., 2005; Ramankutty et al., 2008). La expansión permitida del 3 % (aproximadamente 400 Mha) hasta el nivel que proponemos como límite del sistema terrestre se alcanzará probablemente en las próximas décadas e incluye tierras aptas que actualmente no se cultivan o se encuentran bajo cubierta forestal, por ejemplo, tierras de cultivo abandonadas en Europa, América del Norte y la antigua Unión Soviética, así como algunas zonas de las sabanas africanas y el cerrado sudamericano.

#### Carga de aerosol

Consideramos la carga de aerosoles atmosféricos como un proceso de cambio global antropogénico con un límite planetario potencial por dos razones principales: (i) la influencia de los aerosoles en el sistema climático y (ii) sus efectos adversos sobre la salud humana a escala regional y global.

Las actividades humanas desde la era preindustrial han duplicado la concentración global de la mayoría de los aerosoles (Tsigaridis et al., 2006). Los aerosoles influyen en el balance de radiación de la Tierra directamente al dispersar la radiación entrante de vuelta al espacio (Charlson et al., 1991, 1992) o indirectamente al influir en la reflectividad y persistencia de las nubes (Twomey, 1977; Albrecht, 1989). Los aerosoles también pueden influir en el ciclo hidrológico al alterar los mecanismos que forman la precipitación en las nubes (Ferek et al., 2000; Rosenfeld, 2000). Los aerosoles pueden tener una influencia sustancial en la circulación monzónica asiática (Ramanathan et al., 2005; Lau et al., 2008): la absorción de aerosoles sobre la llanura indogangética, cerca de las estribaciones del Himalaya, actúa como una fuente adicional de calor en altura, lo que mejora la incipiente circulación monzónica (Lau y Kim, 2006). Los mismos aerosoles provocan un enfriamiento de la superficie en el centro de la India, desplazando las precipitaciones hacia la región del Himalaya. Esta "bomba de calor elevada"

Previene el inicio de las lluvias monzónicas entre mayo y junio en el norte de la India y la meseta tibetana meridional, aumenta las precipitaciones monzónicas en toda la India entre julio y agosto y reduce las precipitaciones en el océano Índico. Si bien la influencia de los aerosoles en el monzón asiático es ampliamente aceptada, aún existe mucha incertidumbre en torno a los procesos físicos que subyacen a sus efectos y las interacciones entre ellos.

Desde la perspectiva de los efectos sobre la salud humana, la contaminación atmosférica por partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) es responsable de aproximadamente el 3% de la mortalidad por enfermedades cardiopulmonares en adultos, cerca del 5% de la mortalidad por cáncer de tráquea, bronquios y pulmón, y cerca del 1% de la mortalidad por infecciones respiratorias agudas en niños de zonas urbanas de todo el mundo (Cohen et al., 2005). Estos efectos se traducen en unas 800 000 muertes prematuras y una pérdida anual de 6,4 millones de años de vida, principalmente en países asiáticos en desarrollo. La mortalidad por exposición al humo de combustibles sólidos en interiores es aproximadamente el doble que la de la contaminación atmosférica urbana (aproximadamente 1,6 millones de muertes), y la exposición a partículas en suspensión en el aire en el trabajo causa aproximadamente 300 000 muertes al año, principalmente en países en desarrollo.

Los mismos componentes de los aerosoles (p. ej., partículas, ozono troposférico, óxidos de azufre y nitrógeno) producen otros efectos nocivos. Los daños a los cultivos por la exposición al ozono, la degradación forestal y la pérdida de peces de agua dulce debido a las precipitaciones ácidas, así como los cambios en los patrones globales de precipitación y en el balance energético, son otros ejemplos de los efectos indirectos de la contaminación atmosférica sobre el bienestar humano.

La complejidad de los aerosoles, en términos de la gran variedad de partículas involucradas, con diferentes fuentes, impactos y dinámicas espaciales y temporales, hace difícil definir un límite planetario por encima del cual los efectos puedan causar cambios inaceptables.

Además, si bien los aerosoles se han vinculado claramente con cambios en la circulación monzónica y con efectos adversos para la salud humana, los procesos y mecanismos que subyacen a estas correlaciones aún no se han explicado completamente. Por estas razones, concluimos que aún no es posible identificar un valor límite seguro para la carga de aerosoles.

#### Contaminación química

Los principales tipos de contaminación química incluyen compuestos radiactivos, metales pesados y una amplia gama de compuestos orgánicos de origen humano. La contaminación química afecta negativamente a los seres humanos y

La salud de los ecosistemas, que se ha observado con mayor claridad a escala local y regional, ahora es evidente a escala global. Nuestra evaluación de por qué la contaminación química se considera un límite planetario se basa en dos maneras en que puede influir en el funcionamiento del sistema terrestre: (i) a través de un impacto global y ubicuo en el desarrollo fisiológico y la demografía de los humanos y otros organismos, con impactos finales en el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas, y (ii) actuando como una variable lenta que afecta a otros límites planetarios. Por ejemplo, la contaminación química puede influir en el límite de la biodiversidad al reducir la abundancia de especies y potencialmente aumentar la vulnerabilidad de los organismos a otros factores de estrés, como el cambio climático (Jenssen 2006, Noyes et al. 2009). La contaminación química también interactúa con el límite del cambio climático a través de la liberación y propagación global de mercurio procedente de la quema de carbón y del hecho de que la mayoría de los productos químicos industriales se producen actualmente a partir del petróleo, liberando CO<sub>2</sub> al degradarse o incinerarse como residuos. Podrían existir conexiones aún más complejas entre los límites químicos, de biodiversidad y del cambio climático. Por ejemplo, el cambio climático modificará la distribución de las plagas, lo que podría conducir a un uso mayor y más generalizado de pesticidas.

Establecer un límite planetario para la contaminación química requiere conocer los impactos críticos que la exposición a una gran variedad de sustancias químicas tiene en los organismos y las concentraciones umbral a las que se producen estos efectos. La exposición directa a sustancias químicas en el entorno abiótico (aire, agua o suelo) o la bioacumulación o biomagnificación en las cadenas tróficas podrían tener consecuencias perjudiciales, lo que podría afectar, por ejemplo, a los grandes depredadores.

Según las estimaciones actuales, existen entre 80 000 y 100 000 sustancias químicas en el mercado mundial (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 1998; Comisión de las Comunidades Europeas, 2001). Es imposible medir todas las sustancias químicas presentes en el medio ambiente, lo que dificulta enormemente definir un límite planetario único derivado de los efectos agregados de decenas de miles de ellas. Existen datos de toxicidad para unos pocos miles de estas sustancias, pero prácticamente no se conoce su efecto combinado.

Podemos identificar dos enfoques complementarios para definir un límite planetario para la contaminación química. Uno consiste en centrarse en los contaminantes persistentes.



con distribuciones globales, y el otro para identificar efectos inaceptables, a largo plazo y a gran escala sobre los organismos vivos de la contaminación química.

El primer enfoque destaca sustancias químicas como el mercurio, que pueden transportarse a larga distancia a través de la dinámica oceánica o atmosférica.

Específicamente, identifica contaminantes que tienen efectos significativos en diversos organismos a escala global y los niveles umbral asociados a estos efectos. La exposición crónica a dosis bajas puede provocar efectos subletales sutiles que dificultan el desarrollo, alteran los sistemas endocrinos, impiden la reproducción o causan mutagénesis. A menudo, los organismos más jóvenes son los más vulnerables a la exposición a un contaminante específico (p. ej., neurotoxicidad por plomo en niños).

Solo se pueden identificar umbrales para unas pocas sustancias químicas o grupos químicos, y solo para unas pocas especies biológicas, como algunos depredadores superiores (de Wit et al., 2004; Fisk et al., 2005). Un ejemplo bien conocido es la concentración umbral de DDT en los huevos de aves rapaces, que causa un adelgazamiento crítico de la cáscara y fallo reproductivo (Lincer, 1975).

Aunque la mayoría de los esfuerzos para reducir la contaminación química se han centrado en escalas locales y regionales, el Convenio de Estocolmo de las Naciones Unidas de 2001 sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP) reconoció implícitamente que las concentraciones globales de unos pocos COP específicos (por ejemplo, PCB, dioxinas, DDT y varios otros pesticidas) han cruzado un límite planetario aún no cuantificado. Las prohibiciones impuestas se basaron en los efectos conocidos y en las altas concentraciones observadas de estos COP en algunos depredadores principales y poblaciones humanas. Ampliar el enfoque a partir de unos pocos contaminantes bien estudiados requeriría determinar los efectos críticos de cada sustancia química o grupo químico, lo cual supone una tarea gigantesca y requeriría la identificación de umbrales asociados a mezclas de sustancias químicas, un desafío igualmente abrumador.

Por otro lado, un límite centrado en los efectos de la contaminación química podría basarse en la reproducción reducida o fallida, los déficits neuroconductuales o el deterioro del sistema inmunitario, que están vinculados a la exposición combinada a numerosas sustancias químicas. Dicho límite planetario debería abarcar los efectos sutiles en las etapas más sensibles de la vida de las especies más sensibles o de los seres humanos, con efectos observables a escala global. Se ha revisado un ejemplo de este enfoque basándose en el aumento sugerido de trastornos del desarrollo neurológico, como el autismo y el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH), en niños.

La exposición generalizada a bajas concentraciones de múltiples sustancias químicas con efectos neurotóxicos conocidos o sospechados podría haber creado una pandemia silenciosa de trastornos sutiles del desarrollo neurológico en niños, posiblemente a escala mundial (Grandjean y Landrigan, 2006). De las 80 000 sustancias químicas comercializadas, se sabe que 1000 son neurotóxicas en experimentos, 200 son neurotóxicas en humanos y cinco (metilmercurio, arsénico, plomo, PCB y tolueno) son tóxicas para el desarrollo neurológico humano.

En última instancia, un límite de contaminación química podría requerir el establecimiento de una serie de sublímites basados en los efectos de muchas sustancias químicas individuales, junto con la identificación de efectos específicos en organismos sensibles. Además, un límite de contaminación química interactúa con el límite planetario de aerosoles, ya que muchos contaminantes persistentes se transportan a largas distancias en partículas de aerosoles. En resumen, sin embargo, concluimos que actualmente no es posible definirlos ni está claro cómo agruparlos en un único límite planetario integral.

## INTERACCIONES ENTRE LOS LÍMITES

Las interacciones entre los límites planetarios pueden modificar el nivel de seguridad de uno o varios límites, que hemos establecido provisionalmente bajo la suposición (fuerte) de que no se transgreden otros límites. En realidad, lo que puede parecer un límite físico con un umbral claramente definido puede cambiar de posición a medida que una variable de lenta evolución (sin umbrales globales conocidos), como la tasa de pérdida de biodiversidad, excede su nivel límite. A nivel agregado, la desecación de la tierra debido a la escasez de agua inducida por la transgresión del límite climático, por ejemplo, puede causar una pérdida tan grande de tierra disponible para fines agrícolas que el límite terrestre también se desplaza hacia abajo. A escala regional, la deforestación en la Amazonia en un régimen climático cambiante puede reducir la disponibilidad de recursos hídricos en Asia (véase el Apéndice 1, Discusión complementaria 5 para otros ejemplos), lo que destaca la sensibilidad del límite hídrico a los cambios en los límites del uso del suelo y el cambio climático.

Los bosques tropicales son un componente clave de los balances energéticos y los ciclos hidrológicos regionales y globales. En la cuenca amazónica, una cantidad significativa del agua presente en la atmósfera...

Se recicla a través de la vegetación. Además, el bosque produce partículas de aerosol que pueden formar gotitas en las nubes. Los cambios en la concentración de partículas influyen en la probabilidad de que las nubes produzcan lluvia y en la intensidad de la circulación convectiva. La deforestación y la quema de biomasa asociadas con las prácticas de uso del suelo han modificado la convección y la precipitación en la cuenca amazónica (Andreae et al., 2004). Estos cambios en la precipitación completan un ciclo de retroalimentación, ya que la disponibilidad de agua influye en la cantidad y el tipo de partículas de aerosol que emite la vegetación (Kesselmeier et al., 2000). Estos procesos interactivos, impulsados por el cambio en el uso del suelo y el clima, podrían alcanzar un punto crítico en el que la selva amazónica sea reemplazada por vegetación similar a la sabana para finales del siglo XXI (Nepstad et al., 2008).

Este ciclo de retroalimentación no se limita a los efectos regionales; también puede influir en las temperaturas superficiales en lugares tan lejanos como el Tíbet (véase la Fig. 5). Las simulaciones de modelos predicen que la deforestación a gran escala en el norte de la Amazonia alteraría drásticamente el balance energético superficial, lo que provocaría un debilitamiento de la convección profunda (Snyder et al., 2004a,b). Esto, a su vez, provocaría un debilitamiento y un desplazamiento hacia el norte de la Zona de Convergencia Intertropical, lo que provoca cambios en la corriente en chorro que dirige la trayectoria de los sistemas meteorológicos de latitudes medias, lo que en última instancia influye en la temperatura superficial y la precipitación en el Tíbet.

Los cambios en las condiciones climáticas del Tíbet afectan directamente a gran parte de los recursos hídricos de Asia. Los 15 000 glaciares de la región del Himalaya-Hindu Kush almacenan aproximadamente 12 000 km<sup>3</sup> de agua dulce, que constituye una fuente principal de agua dulce para aproximadamente 500 millones de personas en la región, además de otros 250 millones en China (Cruz et al., 2007). El derretimiento de los glaciares, que inicialmente causa aumentos a corto plazo en la escorrentía, conlleva un mayor riesgo de inundaciones, cambios estacionales en el suministro de agua y una mayor variabilidad en las precipitaciones. Si bien los cambios calculados en la cobertura terrestre que se analizan aquí son extremos, los resultados ilustran que los cambios en el sistema climático global, impulsados por el cambio de uso del suelo en una región, pueden afectar los recursos hídricos en otras partes del planeta.

Aunque no hemos analizado las interacciones entre los límites planetarios, los ejemplos que presentamos sugieren que muchas de estas interacciones reducirán, en lugar de expandir, los niveles límite que proponemos, reduciendo así el espacio operativo seguro para la humanidad. Esto sugiere la necesidad de medidas extremas.

Precaución al acercarse o transgredir cualquier límite planetario individual.

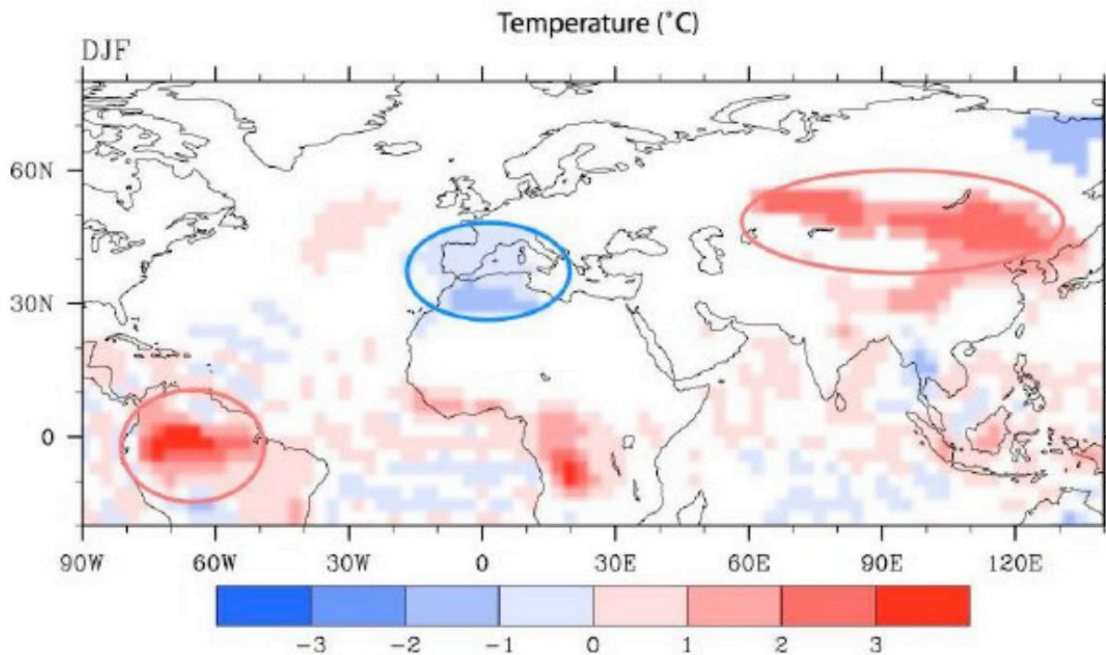
## LA HUMANIDAD YA TIENE TRANSGREDIÓ AL MENOS TRES LÍMITES PLANETARIOS

Hemos intentado cuantificar la trayectoria temporal de siete de los límites planetarios propuestos desde los niveles preindustriales hasta la actualidad (Fig. 6) (véase el Apéndice 1, Métodos Suplementarios 2 para las fuentes y el tratamiento de los datos). La aceleración de la actividad humana desde la década de 1950, en particular el aumento del uso de fertilizantes en la agricultura moderna, provocó la transgresión del límite de la tasa de interferencia humana en el ciclo global del nitrógeno. No se dispone de datos agregados sobre períodos de tiempo más largos para el límite de la biodiversidad, pero la definición de límite propuesta aquí se supera con creces (incluso fuera de escala en la Fig. 6, ilustrada por el sombreado). No sugerimos que el estado actual de la biodiversidad haya superado un límite. Afirmamos que el mundo no puede sostener el ritmo actual de pérdida de especies sin provocar colapsos funcionales. No fue hasta la década de 1980 que la humanidad se acercó al límite climático, pero la tendencia hacia una mayor concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> no muestra signos de desaceleración. En cambio, gracias a la firma del Protocolo de Montreal, la humanidad logró revertir la tendencia respecto al límite del ozono estratosférico en la década de 1990. Como se observa en la Figura 6, nuestras estimaciones indican que la humanidad se está acercando, además, a un ritmo acelerado, a los límites del uso del agua dulce y la transformación del sistema terrestre. El límite de la acidificación oceánica está en riesgo, aunque se carece de datos de series temporales para la variable límite seleccionada, así como de información sobre la respuesta de los organismos y ecosistemas marinos a la perturbación proyectada del CO<sub>2</sub>.

## DISCUSIÓN

Según se planteó en este documento de prueba de concepto, existen nueve límites planetarios. Si no se transgreden durante demasiado tiempo, la humanidad parece tener libertad de acción en la búsqueda del desarrollo social y económico a largo plazo dentro del ámbito de estabilidad proporcionado por la resiliencia observada del sistema terrestre en el Holoceno.

Fig. 5. Simulación de los cambios en la temperatura superficial global como resultado de la conversión de las cuencas de bosque tropical de la Amazonia, África y el archipiélago indio de selva tropical a suelo desnudo. En esta simulación, los cambios en la cobertura vegetal del bosque tropical de la Amazonia provocan cambios generalizados de temperatura en la región, pero también importantes conexiones a distancia con otras partes del mundo, incluyendo Europa occidental y Asia central. Esta simulación se realizó mediante el modelo climático CCM3, acoplado al modelo de superficie terrestre/ecosistema IBIS (Snyder et al., 2004a,b).



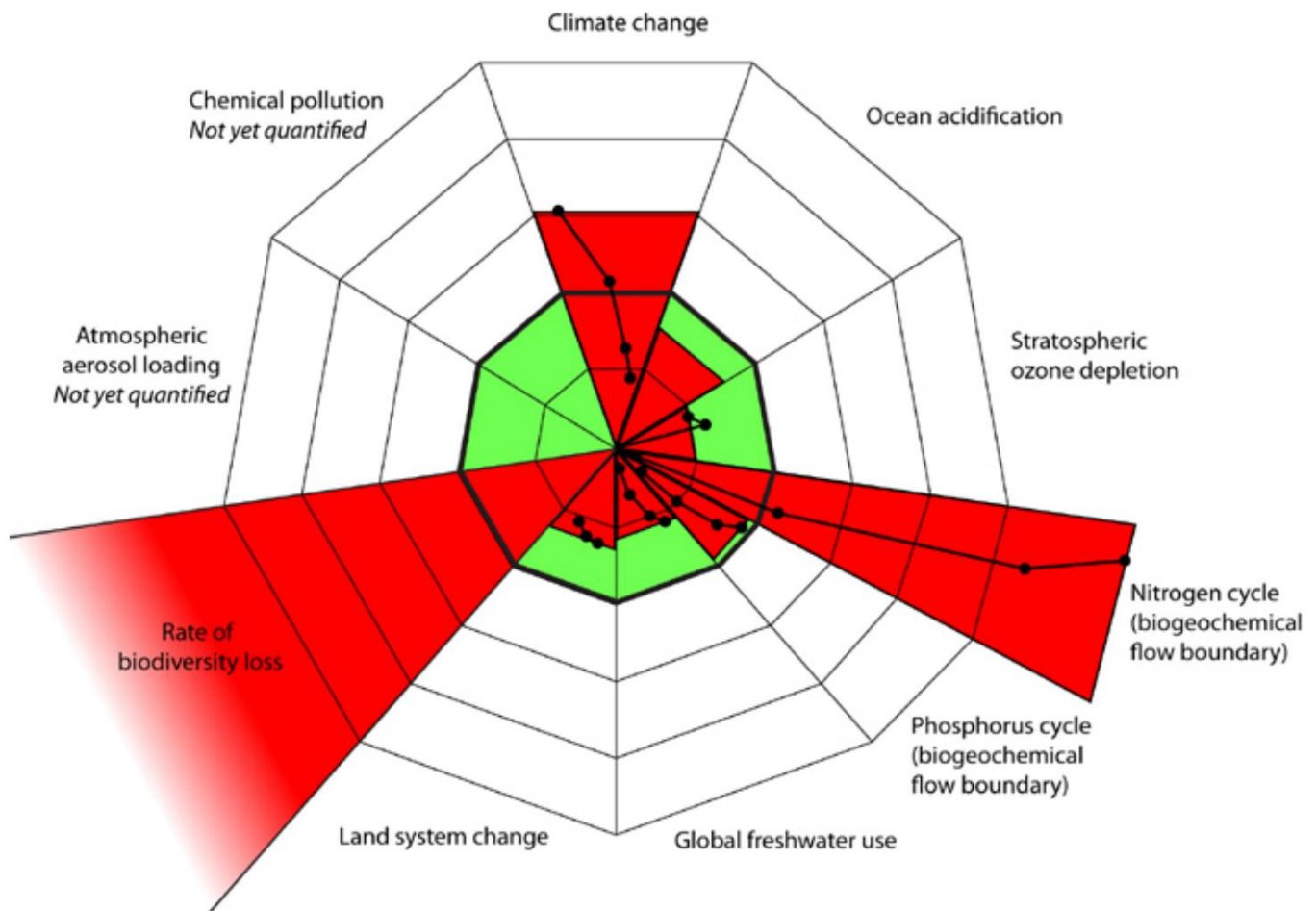
Un marco de límites planetarios plantea un nuevo reto para la ciencia del sistema terrestre y podría tener profundos impactos en la gobernanza ambiental, desde la escala local hasta la global. Sin embargo, aún persisten numerosas lagunas de conocimiento para implementar un marco de límites planetarios. Como se indica en el caso de varios límites, estos presentan variabilidad espacial e irregularidad, tanto en términos de impactos (al traspasar un nivel límite) como en términos de mecanismos de retroalimentación, lo que podría requerir un enfoque más amplio que combine estimaciones de límites globales y regionales. Además, solo podemos cuantificar tres con cierta fiabilidad. Cuatro son sugerencias provisionales, algunas de las cuales son solo nuestras mejores estimaciones basadas en el estado actual del conocimiento.

Además, traspasar un límite puede amenazar seriamente la capacidad de mantenerse dentro de los niveles seguros para otros límites. Esto significa que ningún límite puede traspasarse durante largos períodos sin poner en peligro el espacio operativo seguro.

La humanidad, por lo tanto, necesita convertirse en un administrador activo de todos los límites planetarios —los nueve identificados en este documento y otros que puedan identificarse en el futuro— para evitar el riesgo de una desastrosa perturbación social y ambiental a largo plazo.

Las lagunas de conocimiento son preocupantes. Es urgente identificar los umbrales del Sistema Tierra, analizar los riesgos e incertidumbres y, aplicando el principio de precaución, identificar los límites planetarios para evitar cruzar estos umbrales indeseados. Los paradigmas actuales de gobernanza y gestión a menudo ignoran o carecen del mandato para actuar ante estos riesgos planetarios (Walker et al., 2009), a pesar de la evidencia de una aceleración de las presiones antropogénicas sobre los procesos biofísicos del Sistema Tierra. Además, el marco de límites planetarios que se presenta aquí sugiere la necesidad de una gobernanza novedosa y adaptativa.

Fig. 6. Estimación de la evolución cuantitativa de las variables de control para siete límites planetarios desde niveles preindustriales hasta la actualidad (véase el Apéndice 1, Métodos Suplementarios 2 para más detalles). El nonágono interior (verde) representa el espacio operativo seguro con los niveles límite propuestos en su contorno exterior. La extensión de las cuñas para cada límite muestra la estimación de la posición actual de la variable de control (ver Tabla 2). Los puntos muestran la trayectoria temporal reciente estimada (1950-presente) de cada variable de control. Para la pérdida de biodiversidad, el nivel límite actual estimado de >100 extinciones por millón de especies-año excede el espacio disponible en la figura. Aunque el cambio climático, la acidificación de los océanos, el agotamiento del ozono estratosférico, el cambio de uso del suelo, el uso de agua dulce y la interferencia con el ciclo del fósforo son límites definidos como el estado de una variable (concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, estado de saturación de aragonito y concentración de ozono estratosférico, porcentaje de tierra cultivada, cantidad máxima de uso anual global de agua dulce, carga acumulada de P en los océanos, respectivamente), el límite restante, la pérdida de biodiversidad y el componente del límite biogeoquímico relacionado con la interferencia humana con el ciclo del N se definen por las tasas de cambio para cada variable de control respectiva (extinciones por millón de especies por año, tasa de N<sub>2</sub> eliminado de la atmósfera para uso humano





enfoques a escala global, regional y local (Dietz et al. 2003, Folke et al. 2005, Berkman y Young 2009).

Nuestro análisis preliminar indica que la humanidad ya ha transgredido tres límites (el cambio climático, la tasa de pérdida de biodiversidad y la tasa de interferencia con el ciclo del nitrógeno). Existe una incertidumbre significativa en torno al tiempo durante el cual se pueden transgredir los límites antes de causar un cambio ambiental inaceptable y antes de desencadenar retroalimentaciones que pueden resultar en el cruce de umbrales que reducen drásticamente la capacidad de regresar a niveles seguros. Las retroalimentaciones rápidas (por ejemplo, la pérdida de hielo marino del Ártico) parecen haber comenzado ya después de haber transgredido el límite climático durante un par de décadas. Las retroalimentaciones lentas (por ejemplo, la pérdida de capas de hielo polares terrestres) operan en períodos de tiempo más largos. A pesar de la eliminación gradual de las emisiones de CFC y del hecho de que los agujeros de ozono no se extendieron más allá de las regiones de vórtices polares, que permanecieron en gran parte intactas, los agujeros de ozono sobre las regiones polares solo disminuirán lentamente durante el próximo medio siglo.

Sin embargo, cabe duda de que la complejidad de los procesos y retroalimentaciones interconectados, tanto lentos como rápidos, en el Sistema Tierra plantea a la humanidad una paradoja desafiante. Por un lado, estas dinámicas sustentan la resiliencia que permite al planeta Tierra mantenerse en un estado propicio para el desarrollo humano. Por otro lado, nos inducen a una falsa sensación de seguridad, ya que los cambios graduales pueden llevar a traspasar umbrales inesperados que llevan al Sistema Tierra, o a subsistemas significativos, abruptamente a estados perjudiciales o incluso catastróficos para el bienestar humano. El concepto de límites planetarios proporciona un marco para que la humanidad opere dentro de esta paradoja.

#### Notas al pie

El Sistema Tierra se define como los procesos e interacciones biofísicos y socioeconómicos integrados (ciclos) entre la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la biosfera, la geosfera y la antroposfera (actividad humana), tanto a escala espacial —de local a global— como temporal, que determinan el estado ambiental del planeta en su posición actual en el universo. Por lo tanto, los seres humanos y sus actividades forman parte integral del Sistema Tierra, interactuando con otros componentes.

ii La resiliencia proporciona a un sistema la capacidad de persistir (absorber y resistir impactos), adaptarse y transformarse ante perturbaciones naturales y antropogénicas.

En este artículo, nos centramos en la capacidad de los estados deseables (desde una perspectiva humana) del Sistema Tierra para persistir ante perturbaciones antropogénicas.

iii Los aerosoles son partículas inorgánicas u orgánicas suspendidas en la atmósfera y se emiten directamente como aerosoles primarios (emisiones de polvo o partículas de motores diésel) o como aerosoles secundarios, que incluyen nitratos, sulfatos, compuestos de amonio y compuestos orgánicos no volátiles, formados por conversión en reacciones químicas atmosféricas a partir de óxidos de nitrógeno, amoníaco y compuestos orgánicos. Los aerosoles varían en tamaño, desde unos pocos nanómetros hasta decenas de micrómetros, y tienen una vida útil que va desde un par de días hasta semanas. Se transportan, se transforman químicamente y afectan a zonas alejadas de sus orígenes.

Los aerosoles tienen un efecto de enfriamiento sobre el clima al reflejar la radiación solar entrante (por ejemplo, de nitratos, sulfatos y ácidos sulfúricos) y un efecto de calentamiento, absorbiendo directamente la radiación térmica e indirectamente al cambiar el albedo de la superficie (por ejemplo, el hollín de carbono negro de la combustión de biomasa).

Las respuestas a este artículo se pueden leer en línea en: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/responses/>

#### Expresiones de gratitud:

Las amplias consultas científicas y de partes interesadas sobre el concepto de límites planetarios se llevaron a cabo en el Foro Tällberg en junio de 2008, organizado por el Centro de Resiliencia de Estocolmo, el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo y la Fundación Tällberg. Un agradecimiento especial a Anders Wijkman, Martin Lees, Bo Ekman, Tariq Banuri, Christine Loh, Jacqueline McGlade y Catherine McMullen por sus perspectivas científico-políticas. Paul Ehrlich, Garry Peterson, Oonsie Biggs y Line Gordon contribuyeron de forma crucial al artículo, y Susan Owens, Carlos Nobres, Sybil Seitzinger y Oran Young realizaron importantes contribuciones en seminarios sobre el avance del concepto de límites planetarios. Mark Lynas realizó valiosas aportaciones para el avance de este artículo mediante su iniciativa de escribir un libro de divulgación científica.



Tras el análisis de nuestros límites planetarios. El proceso de revisión interna y el apoyo editorial de Nature para desarrollar el breve resumen del artículo principal de este artículo más extenso de Ecología y Sociedad aportaron valiosos comentarios que mejoraron considerablemente ambos artículos.

## LITERATURA CITADA

- Albrecht, BA 1989. Aerosoles, microfísica de nubes y nubosidad fraccionada. *Science* 245:1227–1230.
- Andreae, MO, D. Rosenfeld, P. Artaxo, AA Costa, GP Frank, KM Longo y MAF Silva Dias. 2004. Nubes de lluvia humeantes sobre la Amazonía. *Science* 303:1337–1342.
- Anthony, KRN, et al. 2008. La acidificación de los océanos causa blanqueamiento y pérdida de productividad en los corales constructores de arrecifes. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 105:17442–17446.
- Arrow, K., B. Bolin, R. Costanza, P. Dasgupta, C. Folke, CS Holling, B.-O. Jansson, S. Levin, K.-G. Mäler, C. Perrings y D. Pimentel. 1995. Crecimiento económico, capacidad de carga y medio ambiente. *Science* 268:520–521.
- Bellwood, DR, TP Hughes, C. Folke y M. Nyström. 2004. Enfrentando la crisis de los arrecifes de coral. *Naturaleza* 429(6994):827–833.
- Berger, A. y MF Loutre. 2002. ¿Un interglaciar excepcionalmente largo por delante? *Science* 297:1287–1288.
- Berkman, PA, y OR Young. 2009. Gobernanza y cambio ambiental en el Océano Ártico. *Science* 324:339–340.
- Biggs, R., SR Carpenter y WA Brock. 2009. Dar marcha atrás: detectar a tiempo un cambio de régimen inminente para evitarlo. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 106:826–831.
- Bishop, RC 1978. Especies en peligro de extinción e incertidumbre: la economía de un estándar mínimo seguro. *Revista Americana de Economía Agrícola* 61:10–18.
- Boulding, KE 1966. La economía de la futura nave espacial Tierra. En HE Daly, editor. Problemas de calidad ambiental en una economía en crecimiento. Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, Estados Unidos.
- Bretherton, F. 1988. Ciencias del sistema terrestre: una perspectiva más detallada. Comité de Ciencias del Sistema Terrestre, NASA, Washington, D. C., EE. UU.
- Canadell, JG, D. Le Quéré, MR Raupach, C. R. Field, E. Buitenhuis, P. Ciais, T.J. Conway, N. P. Gillett, RA Houghton y G. Marland. 2007. Contribuciones a la aceleración del crecimiento del CO<sub>2</sub> atmosférico derivadas de la actividad económica, la intensidad del carbono y la eficiencia de los sumideros naturales. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 104:18866–18870.
- Charlson, R.J., J. Langner, H. Rodhe, C.B. Leovy y SG Warren. 1991. Perturbación del equilibrio radiativo del hemisferio norte por retrodispersión de aerosoles de sulfato antropogénicos. *Tierra B* 43 AB:152–163.
- Charlson, RJ, SE. Schwartz, J.M. Hales, R. D. Cess, JA Coakley, JE Hansen y DJ Hofmann. 1992. Forzamiento climático por aerosoles antropogénicos. *Science* 255:423–430.
- Carpenter, SR 2005. Eutrofización de ecosistemas acuáticos: biestabilidad y fósforo del suelo. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 102:10002–10005.
- Carpenter, SR, D. Ludwig y WA Brock. 1999. Gestión de la eutrofización de lagos sujetos a cambios potencialmente irreversibles. *Aplicaciones ecológicas* 9:751–771.
- Carpenter, SR, B. Walker, JM Anderies y N. Abel. 2001. De la metáfora a la medición: ¿resiliencia de qué a qué? *Ecosistemas* 4:765–781.
- Cazenave, A. 2006. ¿A qué velocidad se derriten las capas de hielo? *Science* 314:1250–1252.
- Chapín, FS, III, ES Zaveleta, VT Eviner, R. L. Naylor, P.M. Vitousek, S. Lavorel, H.L. Reynolds, DU Hooper, OE Sala, SE Hobbie, MC Mack y S. Diaz. 2000. Consecuencias de la alteración de la diversidad biótica. *Nature* 405:234–242.
- Chipperfield, diputado, VE Fioletov, B. Bregman, JP Burrows, BJ Connor, JD Haigh, NRP

Harris, A. Hauchecorne, LL Hood, SR Kawa, JW Krzyscin, JA Logan, Nueva Jersey Muthama, L.  
Polvani, WJ Randel, T. Sasaki, J. Stähelin, R.  
S. Stolarski, L.W. Thomason y J.M.  
Zawodny. 2006. Ozono global: pasado y presente. En la Organización Meteorológica Mundial (OMM).  
Evaluación científica del agotamiento de la capa de ozono. Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), OMM y Comisión Europea.

Church, JA, y NJ White. 2006. Una aceleración del siglo XX en el aumento global del nivel del mar.  
Cartas de investigación geofísica 33:LO1602.

Ciriacy-Wantrup, SV 1952. Conservación de recursos: economía y políticas. University of California Press, Berkeley, California, EE. UU.

Clark, PU, NG Pisias, TF Stocker y AJ Weaver. 2002. El papel de la circulación termohalina en el cambio climático abrupto. *Nature* 415:863–869.

Clark, WC, y NM Dickson. 2003.  
Ciencia de la sostenibilidad: el programa de investigación emergente. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 100:8059–8061.

Clark, WC, y RE Munn, editores. 1986.  
Desarrollo sostenible de la biosfera.  
Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Clerbaux, C., DM Cunnold, J. Anderson, A. Engel, PJ Fraser, E. Mahieu, A. Manning, J. Miller, S. Montzka, R. Nassar, R. Prinn, S. Reimann, CP Rinsland, P. Simmonds, D. Verdonik, R. Weiss, D. Wuebbles y Y.  
Yokouchi. 2006. Compuestos de larga duración. En la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Evaluación Científica del Agotamiento de la Capa de Ozono. Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), OMM y Comisión Europea.

Cohen, AJ, HR Anderson, B. Ostro, KD Pandey, M. Krzyzanowski, N. Künzli, K. Gutschmidt, A. Pope, I. Romieu, J. M. Samet y K. Smith. 2005. La carga mundial de morbilidad debida a la contaminación del aire exterior. *Revista de Toxicología y Salud Ambiental*, Parte A 68:1301–1307.

Comisión de las Comunidades Europeas.  
2001. Libro Blanco: Estrategia para la futura política de sustancias químicas. (COM2001 88 final). Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas, UE.

Evaluación integral de la gestión del agua en la agricultura.  
2007. Agua para la alimentación, agua para la vida: una evaluación integral de la gestión del agua en la agricultura. Earthscan e Instituto Internacional de Gestión del Agua, Londres, Reino Unido.

Costanza, R., editor. 1991. Economía ecológica: la ciencia y la gestión de la sostenibilidad.  
Columbia University Press, Nueva York, Nueva York, EE.UU.

Crowards, T. 1998. Estándares mínimos de seguridad: costos y oportunidades. *Economía Ecológica* 25:303–314.

Crutzen, PJ 2002. Geología de la humanidad: el Antropoceno. *Nature* 415:23.

Cruz, RV, H. Harasawa, M. Lal y SA Wu.  
2007. Páginas 469–506 en ML Parry, OF Canziani, JP Palokof, PJ van der Linden y CE  
Hanson, editores. Cambio climático 2007: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.  
Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Dansgaard, W., S.J. Johnsen, H.B. Clausen, D. Dahl-Jensen, NS Gundestrup, CU Hammer, CS Hvidberg, JP Steffensen y AE  
Sveinbjörnsdottir. 1993. Evidencia de inestabilidad general del clima pasado a partir de un registro de núcleos de hielo de 250.000 años. *Nature* 364:218–220.

de Wit, CA, AT Fisk, KE Hobbs, DCG  
Muir, G. W. Gabrielsen, R. Kallenborn, MM  
Krahn, RJ Norstrom y JU Skaare. 2004.  
En CA de Wit, AT Fisk, KE Hobbs y DC  
G. Muir, editores. Evaluación del AMAP 2002: contaminantes orgánicos persistentes en el Ártico. Programa de Monitoreo y Evaluación del Ártico, Oslo, Noruega.

DeFraiture, C., D. Molden, U. Amarasinghe y I. Makin. 2001. Podium: proyección de la oferta y la demanda de agua para la producción de alimentos en 2025. *Física y química de la Tierra*, Parte B 26:869–876.

Díaz, S., D. Tilman, J. Fargione, FS Chapin, III, R. Dirzo, T. Kitzberger, B. Gemmill, M. Zobel, M. Vilà, J. Mitchell, A. Wilby, GC Daily, M.

Galetti, WF Lawrence, J Pretty, R Naylor, A.

Power y D. Harvell. 2005. Regulación de la biodiversidad de los servicios ecosistémicos. Páginas 297–329 en H. Hassan, R. Scholes y N. Ash, editores.

Ecosistemas y bienestar humano: estado actual y tendencias. Island Press, Washington, D. C., EE. UU.

Dietz, T., E. Ostrom y PC Stern. 2003. La lucha por gobernar los bienes comunes. *Science* 302:1902–1912.

Doney, SC, VJ Fabry, RA Feely y JA

Kleypas. 2009. Acidificación de los océanos: el otro problema del CO<sub>2</sub>. *Revista Anual de Ciencias Marinas* 1:169–192.

Elmqvist, T., C. Folke, M. Nyström, G. Peterson, J. Bengtsson, B. Walker y J. Norberg. 2003.

Diversidad de respuestas, cambio ecosistémico y resiliencia. *Fronteras en Ecología y Medio Ambiente* 1:488–494.

Ericksen, PJ, JSI Ingram, D. Liverman, editores. 2009. Número especial sobre “Seguridad alimentaria y cambio ambiental”. *Environmental Science and Policy* 12(4):373–542.

Ezzati, M., AD Lopez, A. Rodgers, S. Vander Hoorn y CJL Murray. 2002. Factores de riesgo principales seleccionados y carga global y regional de enfermedad. *Lancet* 360:1347.

Fabry, VJ 2008. Calcificadores marinos en un océano con alto contenido de CO<sub>2</sub>. *Science* 320:1020–1022.

Fabry, VJ, BA Seibel, RA Feely y JC

Orr. 2008. Impactos de la acidificación de los océanos en la fauna marina y los procesos ecosistémicos. *Revista CIEM de Ciencias Marinas* 65:414–432.

Feely, RA, CL Sabine, JM Hernandez-Ayon, D. Ianson y B. Hales. 2008. Evidencia de afloramiento de agua corrosiva acidificada en la plataforma continental. *Science* 320:1490–1492.

Feely, RA, CL Sabine, K. Lee, W. Berelson, J. Kleyas, VJ

Fabry y FJ Millero. 2004.

Impacto del CO<sub>2</sub> antropogénico en el sistema CaCO<sub>3</sub> de los océanos. *Science* 305:362–366.

Ferek, RJ, T. Garrett, PV Hobbs, S. Strader, D. Johnson, JP Taylor, K. Nielsen, AS

Ackerman, Y. Kogan, Q. Liu, BA Albrecht y D. Babb. 2000.

Supresión de llovizna en trayectorias de barcos.

*Revista de Ciencias Atmosféricas* 57:2707–2728.

Fisk, AT, CA de Wit, M. Wayland, ZZ

Kuzyk, N. Burgess, R. Letcher, B. Braune, R.

Norstrom, S. Polischuk Blum, C. Sandau, E. Lie, H.J.S. Larsen, JU Skaare y DCG Muir.

2005. Evaluación de la importancia toxicológica de los contaminantes antropogénicos en la fauna ártica canadiense. *Science of the Total Environment* 351–352, 57–93.

Foley, JA, GP Asner, MH Costa, MT Coe, R. DeFries, HK

Gibbs, EA Howard, S. Olson, J. Patz, N. Ramankutty y P.

Snyder. 2007.

Amazonía revelada: degradación forestal y pérdida de bienes y servicios ecosistémicos en la cuenca amazónica.

*Fronteras en Ecología y Medio Ambiente* 5(1):25–32.

Foley, JA, MT Coe, M. Scheffer y G. Wang.

2003. Cambios de régimen en el Sahara y el Sahel: interacciones entre los sistemas ecológicos y climáticos en el norte de África. *Ecosystems* 6:524–539.

Foley, JA, R. DeFries, GP Asner, C. Barford, G. Bonan, SR Carpenter, FS Chapin, III, M.

T. Coe, GC Daily, HK Gibbs, JH Helkowski, T. Holloway, EA Howard, CJ Kucharik, C.

Monfreda, JA Patz, IC Prentice, N.

Ramankutty y P. K. Snyder. 2005. Consecuencias globales del uso del suelo. *Science* 309:570–574.

Folke, C. 2006. Resiliencia, el surgimiento de una perspectiva para el análisis de sistemas socioecológicos.

*Cambio ambiental global* 16:253–267.

Folke, C., SR Carpenter, B. Walker, M.

Scheffer, T. Elmqvist, L. Gunderson y C.S.

Holling. 2004. Cambios de régimen, resiliencia y biodiversidad en la gestión de ecosistemas. *Revista Anual de Ecología, Evolución y Sistemática* 35:557–581.

Folke, C., T. Hahn, P. Olsson y J. Norberg.

2005. Gobernanza adaptativa de sistemas socioecológicos. *Revista Anual de Medio Ambiente y Recursos* 30:441–473.

Galloway, JN y EB Cowling. 2002. Nitrógeno reactivo y el mundo: doscientos años de cambio. *Ambio* 31:64–71.

Gordon, L., G. Peterson y E. Bennett. 2008.

Modificaciones agrícolas de los caudales hidrológicos

Crean sorpresas ecológicas. *Tendencias en Ecología y Evolución* 23:211–219.

Gordon, L., W. Steffen, BF Jönsson, C. Folke, M. Falkenmark y Å. Johannessen. 2005.

Modificación humana de los flujos globales de vapor de agua desde la superficie terrestre. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 102:7612–7617.

Gunderson, LH, y CS Holling, editores.

2002. *Panarquía: comprensión de las transformaciones en los sistemas humanos y naturales*. Island Press, Washington, D.C., EE. UU.

Grandjean, P. y PJ Landrigan. 2006.

Neurotoxicidad del desarrollo de productos químicos industriales. *Lancet* 368:2167–2178.

Gruber, N., y JN Galloway. 2008. Una perspectiva del sistema terrestre del ciclo global del nitrógeno. *Naturaleza* 451:293–296.

Guinotte, JM, R. W. Buddemeier y JA

Kleypas. 2003. Futura marginalidad del hábitat de los arrecifes de coral: efectos temporales y espaciales del cambio climático en la cuenca del Pacífico. *Coral Reefs* 22:551–558.

Guinotte, JM, y VJ Fabry. 2008. Acidificación de los océanos y sus posibles efectos en los ecosistemas marinos. *Anales de la Academia de Ciencias de Nueva York* 1134:320–342.

Handoh, IC y TM Lenton. 2003. Eventos anóxicos oceánicos periódicos del Cretácico medio vinculados por oscilaciones de los ciclos biogeoquímicos del fósforo y el oxígeno. *Ciclos Biogeoquímicos Globales* 17:1092.

Hansen, J., M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R.

Berner, V. Masson-Delmotte, M. Pagani, M.

Raymo, DL Royer y JC Zachos. 2008.

Objetivo de CO<sub>2</sub> atmosférico : ¿hacia dónde debería apuntar la humanidad? *Open Atmospheric Science Journal* 2:217–231. doi:10.2174/1874282300802010217.

Hare, B. y M. Meinshausen. 2006. ¿A cuánto calentamiento estamos expuestos y cuánto podemos evitar? *Cambio Climático* 75:111–149.

Hoegh-Guldberg, O., PJ Mumby, AJ Hooten, RS Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, CD

Harvell, PF Sale, AJ Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, CM

Eakin, R. Iglesias-Prieto, N.

Muthiga, R.H. Bradbury, A. Dubi y ME

Hatzioios. 2007. Arrecifes de coral bajo el rápido cambio climático y la acidificación de los océanos. *Science* 318:1737–1742.

Hofmann, M., y H.-J. Schellnhuber. 2009.

La acidificación oceánica afecta la bomba de carbono marina y provoca agujeros de oxígeno marino extendidos.

*Actas de la Academia Nacional de Ciencias*, en prensa. doi 10.1073/Actas de la Academia Nacional de Ciencias.0813384106.

Holland, J. 1996. *Orden oculto: cómo la adaptación genera complejidad*. Basic Books, Jackson, Tennessee, EE. UU.

Holling, CS 1973. Resiliencia y estabilidad de los sistemas ecológicos. *Revista Anual de Ecología y Sistemática* 4:1–23.

Hughes, TP, MJ Rodrigues, DR. Bellwood, D. Ceccarelli, O.

Hoegh-Guldberg, L. McCook, N. Moltschanowskyj, M.S.

Pratchett, R.S.

Steneck y B. Willis. 2007. Cambios de fase, herbivoría y resiliencia de los arrecifes de coral al cambio climático. *Current Biology* 17:360–365.

Iglesias-Rodríguez, MD, PR Halloran, RE

M. Rickaby, IR Hall, E. Colmenero-Hidalgo, J.

R. Gittins, DRH Green, T. Tyrrell, SJ Gibbs, P. von Dassow,

E. Rehm, EV Armbrust y K.

P. Boessenkool. 2008. Calcificación del fitoplancton en un mundo con altos niveles de CO<sub>2</sub>. *Science* 320:336–340.

Panel Internacional sobre Cambio Climático (IPCC).

1990. Evaluación científica del cambio climático: informe del Grupo de Trabajo I. JT Houghton, GJ

Jenkins y JJ Ephraums, editores. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Panel Internacional sobre el Cambio Climático (IPCC). 2007a.

Cambio climático 2007: fundamentos científicos físicos. En S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. C. Marquis, K.

Avery, M. Tignor y HLJ.

Miller, editores. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio

Climático (IPCC). 2007b. Cambio climático 2007: impactos, adaptación y vulnerabilidad. En ML Parry, O.F. Canziani, J.

P. Palokof, PJ van der Linden y CEJ

Hanson, editores. Contribución del Grupo de Trabajo II

- al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Jenssen, BM 2006. Sustancias químicas disruptoras endocrinas y cambio climático: ¿una combinación desastrosa para los mamíferos y aves marinas del Ártico? *Perspectivas de Salud Ambiental* 114:76–80.
- Johannessen, OM 2008. La disminución del hielo marino del Ártico refleja el aumento del CO<sub>2</sub> en una escala de tiempo decenal. *Cartas de ciencia atmosférica y oceánica, Instituto de Física Atmosférica, Academia China de Ciencias* 1(1):51–56.
- Kaufmann, SA 1993. *Orígenes del orden*. Oxford University Press, Nueva York, Nueva York, EE. UU.
- Kesselmeier, J., U. Kuhn, A. Wolf, MO Andreae, P. Ciccioli, E. Brancaleoni, M. Frattoni, A. Guenther, J. Greenberg, P. D. Vasconcellos, T. de Oliva, T. Tavares y P. Artaxo. 2000. Compuestos orgánicos volátiles (COV) atmosféricos en un sitio remoto de bosque tropical en la Amazonia central. *Medio ambiente atmosférico* 34:4063–4072.
- Kleypas, JA, RW Buddemeier, D. Archer, J. P. Gattuso, C. Langdon y BN Opdyke. 1999. Consecuencias geoquímicas del aumento del dióxido de carbono atmosférico en los arrecifes de coral. *Science* 284:118–120.
- Kuffner, IB, AJ Andersson, PL Jokiel, KS Rodgers y FT Mackenzie. 2008. Disminución de la abundancia de algas coralinas crustosas debido a la acidificación de los océanos. *Nature Geoscience* 1:114–117.
- Langdon, C., y MJ Atkinson. 2005. Efecto del pCO<sub>2</sub> elevado en la fotosíntesis y la calcificación de los corales e interacciones con el cambio estacional en la temperatura/irradiación y el enriquecimiento de nutrientes. *Revista de investigación geofísica – Océanos* 110: C09S07.
- Lau, KM y KM Kim. 2006. Relaciones observacionales entre aerosoles, lluvia monzónica asiática y circulación. *Geophysical Research Letters* 33: L21810. doi:10.1029/2006GL027546.
- Lau, KM, V. Ramanathan, G.-X. Wu, Z. Li, S. C. Tsay, C. Hsu, R. Sikka, B. Holben, D. Lu, G. Tartari, M. Chin, P. Koudelova, H. Chen, Y. Ma, J. Huang, K. Taniguchi y R. Zhang. 2008. El Experimento conjunto de aerosoles y monzones: un nuevo reto para la investigación del clima monzónico. *Boletín de la Sociedad Meteorológica Americana* 89: 369. doi:10.1175/BAMS-89-3-369.
- Lenton, TM, H. Held, E. Kriegler, JW Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf y HJ Schellnhuber. 2008. Elementos de inflexión en el sistema climático de la Tierra. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 105:1786–1793.
- Le Quéré, C., C. Rödenbeck, ET Buitenhuis, T. J. Conway, R. Langenfelds, A. Gómez, C. Labuschagne, M. Ramonet, T. Nakazawa, N. Metzl, N. Gillett y M. Heimann. 2007. Saturación del sumidero de CO<sub>2</sub> del océano Antártico debido al cambio climático reciente. *Science* 316:1735–1738.
- Levin, SA 1999. *Dominio frágil: complejidad y los bienes comunes*. Perseus Books, Reading, Massachusetts, EE. UU.
- Lincer, JL 1975. Adelgazamiento de la cáscara del huevo inducido por DDE en el cernícalo americano: comparación de la situación de campo y los resultados de laboratorio. *Journal of Applied Ecology* 12:781–793.
- Lovelock, J. 1979. *Gaia: una nueva mirada a la vida en la Tierra*. Oxford University Press, Nueva York, Nueva York, EE.UU.
- Mace, G., H. Masundire, J. Baillie, . 2005. Biodiversidad. Páginas 79–115 en H. Hassan, R. Scholes y NJ Ash, editores. *Ecosistemas y bienestar humano: estado actual y tendencias*. Island Press, Washington, D. C., EE. UU.
- Mackenzie, FT, LM Ver y A. Lerman. 2002. Controles del ciclo del carbono por nitrógeno y fósforo a escala secular. *Geología Química* 190:13–32.
- McNeil, BI y RJ Mearns. 2008. Acidificación del océano Austral: un punto de inflexión con 450 ppm de CO<sub>2</sub> atmosférico. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 105:18860–18864.
- Meadows, DH, DL Meadows, J. Randers y WW Behrens. 1972. *Los límites del crecimiento*. Universe Books, Nueva York, Nueva York, EE.UU.
- Meadows, D., J. Randers y D. Meadows. 2004. *Límites del crecimiento: actualización a 30 años*. Chelsea Green, White River Junction, Vermont, EE. UU.



Meybeck, M. 2003. Análisis global de los sistemas fluviales: desde los controles del sistema terrestre hasta los controles del Antropoceno. *Philosophical Transactions of the Royal Academy* - Londres B 358:1935–1955.

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA). 2005a. Ecosistemas y bienestar humano: síntesis. Island Press, Washington, D. C., EE. UU.

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA). 2005b. Ecosistemas y bienestar humano: síntesis de la biodiversidad. Island Press, Washington, D.C.

C., Estados Unidos.

Miller, AW, AC Reynolds, C. Sobrino y G. F. Riedel. 2009. Los mariscos se enfrentan a un futuro incierto en un mundo con altos niveles de CO<sub>2</sub>: influencia de la acidificación en la calcificación y el crecimiento de larvas de ostras en estuarios. *PLoS ONE* 4(5):e5661. doi:10.1371/journal.pone.0005661

Milly, PCD, RT Wetherald, KA Dunne y TL Delworth. 2002. Riesgo creciente de grandes inundaciones en un clima cambiante. *Nature* 415:514–517.

Molden, D., K. Frenken, R. Barker, C. DeFraiture, B. Mati, M. Svendsen, C. Sadoff, M. Finlayson, S. Atapattu, M. Giordano, A. Inocencio, M. Lannerstad, N. Manning, F. Molle, B. Smedema y D. Vallee. 2007. Tendencias en agua y desarrollo agrícola. Páginas 57 a 89 en D. Molden, editor. *Agua para la alimentación, agua para la vida: una evaluación integral de la gestión del agua en la agricultura*. Earthscan, Londres, Reino Unido, e Instituto Internacional de Gestión del Agua, Colombo, Sri Lanka.

Mucci, A. 1983. La solubilidad de calcita y aragonito en agua de mar a diferentes salinidades, temperaturas y 1 atmósfera de presión total. *Revista estadounidense de ciencias* 238:780–799.

Consejo Nacional de Investigación (NRC). 2002. Cambio climático abrupto: sorpresas inevitables. Academia Nacional de Ciencias, Washington, D. C., EE. UU.

Nepstad, DC, CM Stickler, B. Soares-Filho y F. Merry. 2008. Interacciones entre el uso de la tierra, los bosques y el clima en la Amazonia: perspectivas de un punto de inflexión forestal a corto plazo. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363:1737–1746.

Noyes, PD, MK McElwee, HD Miller, BW Clark, LA Van Tiem, KC Walcott, KN Erwin y ED Levin. 2009. La toxicología de

Cambio climático: contaminantes ambientales en un mundo en calentamiento. *Environment International* 35, en prensa. doi:10.1016/j.envint.2009.02.006.

Odum, EP 1989. *Ecología y nuestros sistemas de soporte vital en peligro*. Sinuaer Associates, Sunderland, Massachusetts, EE. UU.

Oki, T. y S. Kanae. 2006. Ciclos hidrológicos globales y recursos hídricos mundiales. *Science* 313:1068–1072.

Orr, JC, VJ Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S. C. Doney, RA Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, RM Key, K. Lindsay, E. Maier-Reimer, R. Matear, P. Monfray, A. Mouchet, R. G. Najjar, G.-K. Plattner, K.B. Rodgers, CL Sabine, JL Sarmiento, R. Schlitzer, RD Slater, IJ. Totterdell, M.-F. Weirig, Y. Yamanaka y A. Yool. 2005.

Acidificación oceánica antropogénica durante el siglo XXI y su impacto sobre los organismos calcificadores. *Naturaleza* 437:681–686.

Oyama, MD, y CA Nobre. 2003. Un nuevo estado de equilibrio clima-vegetación para la Sudamérica tropical. *Geophysical Research Letters* 30:2199. doi:10.1029/2003GL018600.

Petit, J.R., J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman y M. Stievenard. 1999. Historia climática y atmosférica de los últimos 420 000 años a partir del núcleo de hielo de Vostok, Antártida. *Nature* 399:429–436.

Petschel-Held, G., H.-J. Schellnhuber, T. Bruckner, F. Tóth y K. Hasselman. 1999. El enfoque de las ventanas tolerables: fundamentos teóricos y metodológicos. *Cambio Climático* 41:303–331.

Pimm, SL, P. Raven, A. Peterson, Ç. H. Sekercioglu y P. Ehrlich. 2006. Impacto humano en las tasas de extinción de aves recientes, presentes y futuras. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 103(29):10941–10946.

Pimm, SL, GJ Russell, JL Gittleman y TM Brooks. 1995. El futuro de la biodiversidad. *Ciencia* 269:347–350.

Postel, SL 1998. Agua para la producción de alimentos: ¿habrá suficiente en 2025? *BioScience* 48:629–638.

Raffensperger, C., y W. Tickner, editores. 1999. *Protección de la salud pública y el medio ambiente: aplicación del principio de precaución*. Island Press, Washington, D. C., EE. UU.

Ramanathan, V., J. Chung, D. Kim, T. Bettge, L. Buja, JT Kiehl, WM Washington, Q. Fu, D. R. Sikka y M. Wild. 2005. Nubes atmosféricas marrones: impactos en el clima y el ciclo hidrológico del sur de Asia. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 102:5326–5333.

Ramanathan, V., y Y. Feng. 2008. Sobre cómo evitar interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático: formidables desafíos por delante. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 105:14245–14250.

Ramankutty, N., AT Evan, C. Monfreda y JA Foley. 2008. Cultivando el planeta: 1. Distribución geográfica de las tierras agrícolas globales en el año 2000. *Ciclos biogeoquímicos globales* 22:GB1003. doi:10.1029/2007GB002952.

Raskin, P., P. Gleick, P. Kirshen, G. Pontius y K. Strzepek. 1997. *Futuros del agua: evaluación de patrones y problemas a largo plazo*. En el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, editor. *Evaluación integral de los recursos de agua dulce del mundo*. Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, Estocolmo, Suecia.

Richardson, K., W. Steffen, H.-J. Schellnhuber, J. Alcamo, T. Barker, DM Kammen, R. Leemans, D. Liverman, M. Munasinghe, B. Osman-Elasha, N. Stern y O. Waever. 2009. *Informe de síntesis. Cambio climático: riesgos, desafíos y decisiones globales. Resumen del congreso sobre cambio climático de Copenhague, 10-12 de marzo de 2009*. Universidad de Copenhague, Copenhague, Dinamarca.

Riebesell, U., I. Zondervan, B. Rost, PD Tortell, RE Zeebe y FMM Morel. 2000. Reducción de la calcificación del plancton marino en respuesta al aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico. *Nature* 407:364–367.

Rioual, P., V. Andrieu-Ponel, M. Rietti-Shati, R. W. Battarbee, J. L. de Beaulieu, R. Cheddadi, M. Reille, H. Svobodova y A. Shemesh. 2001.

Registro de alta resolución de la estabilidad climática en Francia durante el último período interglaciario. *Nature* 413:293–296.

Rockström, J., M. Falkenmark y M. Lannerstad. 2007. Evaluación del desafío hídrico de una nueva revolución verde en los países en desarrollo. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* 104:6253–6260.

Rockström, J., L. Gordon, M. Falkenmark, C. Folke y M. Engvall. 1999. Vínculos entre los flujos de vapor de agua, la producción de alimentos y los servicios ecosistémicos terrestres. *Ecología de la Conservación* 3(2): 5. [en línea] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol3/iss2/art5>.

Rosenfeld, D. 2000. Supresión de la lluvia y la nieve por la contaminación atmosférica urbana e industrial. *Science* 287:1793–1796.

Sabine, CL, RA Feely, N. Gruber, RM Key, KH Lee, JL Bullister, R. Wanninkhof, CS Wong, DWR Wallace, B. Tilbrook, FJ Millero, T.-H. Peng, A. Kozyr, T. Ono y AF Ríos. 2004. El sumidero oceánico de CO<sub>2</sub> antropogénico. *Science* 305:367–371.

Scheffer, M. 2009. *Transiciones críticas en la naturaleza y la sociedad*. Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey, EE. UU.

Scheffer, M. y S. Carpenter. 2003. Cambios catastróficos de régimen en ecosistemas: vinculando la teoría con la observación. *Tendencias en Ecología y Evolución* 18:648–656.

Scheffer, M., SR Carpenter, JA Foley, C. Folke y BH Walker. 2001. Cambios catastróficos en los ecosistemas. *Nature* 413:591–596.

Schellnhuber, HJ 1999. Análisis del sistema terrestre y la segunda revolución copernicana. *Nature* 402: C19–C22.

Schellnhuber, HJ 2002. Afrontando la complejidad e irregularidad del sistema terrestre. Páginas 151–159 en W. Steffen, J. Jaeger, DJ Carson y C. Bradshaw, editores. *Desafíos de una Tierra cambiante*. Springer Verlag, Berlín, Alemania.

Seidel, DJ y WJ Randel. 2006. Variabilidad y tendencias en la tropopausa global estimadas a partir de

Datos de radiosonda. *Revista de Investigación Geofísica* 111:D21101. doi:10.1029/2006JD007363.

Shiklomanov, IA, y JC Rodda. 2003. Recursos hídricos mundiales a principios del siglo XXI. UNESCO y Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Smakhtin, V. 2008. Cierre de cuencas y requisitos de caudal ambiental. *Revista Internacional de Desarrollo de Recursos Hídricos* 24:227–233.

Smith, RC, BB Prezelin, KS Baker, RR Bidigare, NP Boucher, T. Coley, D. Karentz, S. MacIntyre, HA Matlick y D. Menzies. 1992. Agotamiento de la capa de ozono: radiación ultravioleta y biología del fitoplancton en aguas antárticas. *Science* 255:952–959.

Snyder, PK, C. Delire y JA Foley. 2004a. Evaluación de la influencia de diferentes biomas vegetales en el clima global. *Climate Dynamics* 23:279–302.

Snyder, PK, JA Foley, MH Hitchman y C. Delire. 2004b. Análisis de los efectos de la eliminación completa de los bosques tropicales en el clima regional mediante un balance energético tridimensional detallado: una aplicación a África. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 109:D21.

Steffen, W., PJ Crutzen y JR McNeill. 2007. El Antropoceno: ¿Están los humanos dominando las grandes fuerzas de la naturaleza? *Ambio* 36:614–621.

Steffen, W., A. Sanderson, J. Jäger, PD Tyson, B. Moore, III, PA Matson, K. Richardson, F. Oldfield, H.-J. Schellnhuber, BL Turner, II, y RJ Wassn. 2004. Cambio global y el sistema Tierra: un planeta bajo presión. Springer Verlag, Heidelberg, Alemania.

Steinacher, M., F. Joos, TL Frölicher, G.-K. Plattner y SC Doney. 2009. Acidificación inminente de los océanos en el Ártico proyectada con el modelo global acoplado ciclo del carbono-clima del NCAR. *Biogeociencias* 6:515–533.

Stern, N. 2007. La economía del cambio climático: la revisión Stern. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Stone, R. 2007. ¿Un mundo sin corales? *Science* 316:678–681.

Suding, KN, S. Lavorel, FS Chapin, III, JH C. Cornelissen, S. Diaz, E. Garnier, D. Goldberg, DU Hooper, ST Jackson y M.-L. Navas. 2008. Escalamiento del cambio ambiental a nivel comunitario: un marco de respuesta y efecto basado en rasgos para plantas. *Biología del Cambio Global* 14:1125–1140.

Tsigaridis, K., M. Krol, FJ Dentener, Y. Balkanski, J. Lathière, S. Metzger, DA Hauglustaine y M. Kanakidou. 2006. Cambio en la composición global de aerosoles desde la época preindustrial. *Química y Física Atmosférica* 6:5143–5162.

Tunncliffe, V., KT Davies, DA Buttefield, R. W. Embley, J. M. Rose, W. W. Chadwick, Jr. 2009. Supervivencia de mejillones en aguas extremadamente ácidas de un volcán submarino. *Nature Geoscience* 2:344–348.

Turner, BL II. 2009. Sostenibilidad y transiciones forestales en el sur de Yucatán: el enfoque de la arquitectura territorial. *Política de Uso del Suelo*, en prensa. doi:10.1016/j.landusepol.2009.03.006.

Turner, BL II, WC Clark, RW Kates, JF Richards, JT Mathews y WB Meyer, editores. 1990. La Tierra transformada por la acción humana: cambios globales y regionales en la biosfera durante los últimos 300 años. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Twomey, S. 1977. La influencia de la contaminación en el albedo de onda corta de las nubes. *Revista de Ciencias Atmosféricas* 34:1149–1152.

Tyrrell, TB Schneider, A. Charalampopoulou y U. Riebesell. 2008. Cocolitóforos y estado de saturación de calcita en los mares Báltico y Negro. *Biogeociencias* 5:485–494.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. 1998. Estudio sobre la disponibilidad de datos sobre riesgos químicos: ¿Qué sabemos realmente sobre la seguridad de las sustancias químicas de alto volumen de producción? Oficina de Prevención de la Contaminación y Sustancias Tóxicas, Washington, D. C., EE. UU.

van der Leeuw, SE 2008. Clima y sociedad: lecciones de los últimos 10 000 años. *Ambio* 14 (Número especial): 476–482.

Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco y J. M. Melillo. 1997. Dominación humana de los ecosistemas terrestres. *Science* 277:494–499.

Vörösmarty, C.J., P. Green, J. Salisbury y R. B. Lammers. 2000. Recursos hídricos globales: vulnerabilidad ante el cambio climático y el crecimiento poblacional. *Science* 289:284–288.

Walker, B.H., S. Barrett, V. Galaz, S. Polasky, C. Folke, G. Engström, F. Ackerman, K. Arrow, S. R. Carpenter, K. Chopra, G. Daily, P. Ehrlich, T. Hughes, N. Kautsky, S. A. Levin, K.-G. Mäler, J. Shogren, J. Vincent, T. Xepapadeous y A. de Zeeuw. 2009. Fracaso global inminente e instituciones ausentes. *Science*, en prensa.

Walker, B., C.S. Holling, S.R. Carpenter y A. Kinzig. 2004. Resiliencia, adaptabilidad y transformabilidad en sistemas socioecológicos. *Ecología y Sociedad* 9(2): 5. [en línea] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5>.

Walker, B., A. Kinzig y J. Langridge. 1999. Diversidad de atributos vegetales, resiliencia y función ecosistémica: naturaleza e importancia de las especies dominantes y secundarias. *Ecosistemas* 2:95–113.

WBGU (Consejo Asesor Alemán sobre el Cambio Global). 1995. Escenario para la determinación de objetivos globales de reducción de CO<sub>2</sub> y estrategias de implementación. Declaración con motivo de la Primera Conferencia de las Partes de la Convención Marco sobre el Cambio Climático en Berlín. Marzo de 1995. URL: [http://www.wbgu.de/wbgu\\_sn1995\\_engl.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_sn1995_engl.pdf).

Wood, H.L., J.I. Spicer y S. Widdicombe. 2008. La acidificación de los océanos puede aumentar las tasas de calcificación, pero a un costo. *Actas de la Royal Society B* 275:1767–1773.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). 1990. Evaluación científica del ozono estratosférico: 1989. Volumen 1, Informe 20. OMM, Ginebra, Suiza.

Young, O.R., y W. Steffen. 2009. El sistema Tierra: sustentando sistemas planetarios de soporte de vida. Páginas 295–315 de F.S. Chapin, III, G.P. Kofinas y C. Folke, editores. *Principios de gestión de ecosistemas: gestión de recursos naturales basada en la resiliencia en un mundo cambiante*. Springer, Nueva York, EE. UU.

Zillén, L., D.J. Conley, T. Andrén T., E. Andrén y S. Björck. 2008. Casos pasados de hipoxia en el Mar Báltico y el papel de la variabilidad climática, el cambio ambiental y el impacto humano. *Earth Science Reviews* 91:77–92.

---

## Apéndice 1. Información complementaria.

[Haga clic aquí para descargar el archivo 'appendix1.pdf'.](#)

---