





Fotografía: © Luis Carlos Celis Calderón. De la serie "Atardeceres".

¿Calentamiento o glaciación?

Avances en el conocimiento sobre el cambio climático en las últimas tres décadas

EDILBERTO LEÓN Y JIMMY ÁLVAREZ

Este artículo es una revisión de la vigencia teórica de las hipótesis y teorías sobre el calentamiento global y las glaciaciones enunciados en *Un ensayo sobre las perspectivas climáticas mundiales*, texto preparado por José Fernando Isaza y publicado por el Centro Las Gaviotas en 1983 [1]. Este ensayo analizó las consecuencias del calentamiento global observado sobre una nueva glaciación esperada, manteniendo como premisa central que el sistema climático terrestre es complejo e involucra un imperceptible arreglo de procesos internos y externos en la atmósfera. Esta idea sigue dominando los escenarios de investigación actuales con el propósito de identificar los factores que afectan el macro-clima [2]. Por tanto, los argumentos científicos expresados en este ensayo, divulgado hace más de 25 años, no han cambiado sustancialmente en el presente, aunque a partir de la década de los 90 surgieron nuevos hallazgos científicos que han servido como base para formular nuevas hipótesis que han dilucidado o aumentado las altas incertidumbres que emergen del estudio del sistema climático.¹

¹ El sistema climático está formado por cinco subsistemas (atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera) que interactúan e intercambian entre sí masa, energía y movimiento. La respuesta de cada subsistema ante una perturbación o forzamiento es característica para cada uno de ellos, lo que produce bastantes incertidumbres en las predicciones climáticas (Viñas, 2005).

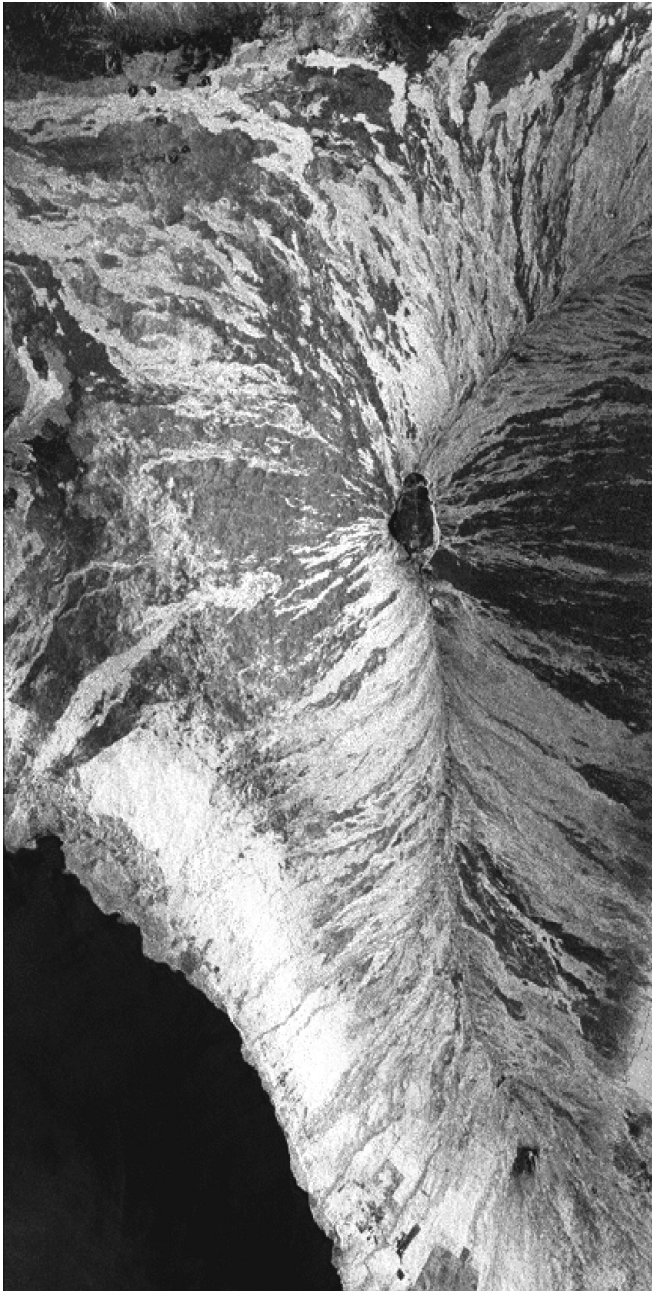


Imagen satelital del volcán Mauna Loa en Hawaii, centro de mediciones regulares de CO₂.

Históricamente, las iniciativas científicas para el estudio del cambio climático tuvieron lugar tres décadas antes de 1985. Hacia finales de los 70 ya se había consolidado un considerable cuerpo de evidencia científica acerca del cambio climático y los efectos positivos del CO₂. Por ejemplo, se iniciaron medidas regulares de CO₂ en Mauna Loa (Hawái), y para esa fecha claramente se demostró un incremento constante en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera [3]. Desde esta época los reportes científicos ya alcanzaban conclusiones acerca del problema del cambio climático, que hasta la actualidad siguen enfocándose en tres puntos básicos [4]: 1) la proyección del calentamiento debido a la duplicación del CO₂; 2) la predicción de la fecha exacta en la cual se espera que ocurra este calentamiento; y 3) la contribución relativa del CO₂ y otros gases invernadero.

Para la década de los 90, los informes de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, sigla en inglés) se convirtieron en la fuente principal de información científica, y a partir de su establecimiento en 1988 el IPCC tomó las banderas del desarrollo de políticas ambientales internacionales y la negociación de los acuerdos internacionales para limitar los cambios en el clima global inducidos por la actividad humana.

Las comparaciones entre las diferentes predicciones del cambio climático (por ejemplo, aquellas hechas por el NAS o el IPCC) sugieren que las conclu-

Prefiera empresas con conciencia ambiental

En la mayoría de los sectores de la economía hay empresas que se distinguen por los esfuerzos que hacen en emitir la menor cantidad posible de CO₂. Identifíquelas y utilice sus servicios, esto motivará un cambio positivo en las empresas que todavía no tienen esa preocupación ambiental.

siones alcanzadas hasta 1985 no fueron significativamente diferentes de aquellas postuladas con posterioridad a esta fecha. Es así como el rango de las predicciones del cambio de temperatura en respuesta a la duplicación de CO_2 , se ha mantenido muy estable en un rango entre $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ y $4,5\text{ }^\circ\text{C}$ desde el reporte de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos [5] en 1979, que fue incluido en el primer reporte del IPCC en 1991 [4].

Sin embargo, hasta 1990 los científicos carecían de modelos teóricos sólidos que permitieran establecer una causa directa entre los niveles de CO_2 y la temperatura terrestre, lo que produjo imprecisiones en las predicciones del aumento de la temperatura a un nivel particular de CO_2 . Esto ocasionó, a partir de la década de los 90, el aumento de los estudios sofisticados que intentaban describir el papel de otros gases de invernadero diferentes al CO_2 , causantes de otros forzamientos climáticos en la atmósfera.

Al tiempo que más científicos se sumaban a la investigación de posibles forzamientos sobre el cambio climático, se identificaban otros forzamientos climáticos diferentes del CO_2 . Por ejemplo, se propone que las mareas incidían en el clima en un ciclo de 1.800 años y otros investigadores se enfocaban en la importancia de otros gases de invernadero sobre el calentamiento global [6]. Adicionalmente, se propone la hipótesis de los pulsos de metano, al descubrir evidencias de un súbito y fatal calentamiento global hace unos 55 millones de años [7]. En este clima extremo, se produjo la adición de metano a la atmósfera, unas 10 veces más que la actual, lo que tuvo un severo impacto en el medioambiente, elevando la temperatura del planeta en la mis-

ma proporción. El estudio de los gases de hidratos de metano se hizo popular después de la publicación de estos resultados, ya que la evidencia acumulada sugería que la liberación de este gas almacenado en el lecho marino constituía uno de los mayores forzamientos en los diferentes ciclos climáticos de la Tierra.

A pesar de los avances técnicos en el entendimiento del clima de la Tierra, las estimaciones del aumento de la temperatura global debido a la duplicación del CO_2 atmosférico no han cambiado sustancialmente en los últimos cien años, aunque la incertidumbre de tales estimaciones sí

se ha venido incrementando con el tiempo. Esto es debido a que el mecanismo básico del forzamiento climático de los gases de invernadero está bien identificado, pero no así los mecanismos de realimentación que amplifican este efecto. Del reporte del IPCC en 2007 [8] se concluye que hay un gran consenso sobre el calentamiento global ocasionado por la emisión humana de gases de invernadero a la atmósfera. Sin embargo, permanece aún una alta incertidumbre de los detalles importantes, aquellos que indican cuál será el cambio en una región dada o qué modelos de precipitación cambiarán. Asimismo, la incertidumbre en la asignación de

las proyecciones del calentamiento global para el año 2100 permanece aún muy alta por el poco control que se tiene de los factores físicos durante el modelamiento del sistema climático.

Es por esta alta incertidumbre que el debate del cambio climático ha sido movido del argumento central acerca de la existencia del calentamiento global hacia su significado para el futuro de la humanidad y en particular hacia la cuestión de “si es mejor adaptarse a este cambio, o por el contrario mitigarlo”. Por

A pesar de los avances técnicos en el entendimiento del clima de la Tierra, las estimaciones del aumento de la temperatura global debido a la duplicación del CO_2 atmosférico no han cambiado sustancialmente en los últimos cien años, aunque la incertidumbre de tales estimaciones sí se ha venido incrementando con el tiempo.

lo tanto, en la actualidad resalta el debate de la alta incertidumbre científica sobre el cambio climático, que es crucial para decidir si nuestras acciones serán diferentes dependiendo si se acepta la creencia que el mundo será 1 °C o 5 °C más templado para el año 2100. Tanto razones económicas como éticas de ambas creencias conducirán a la sociedad a tomar partido por la adaptación en el primer caso o por la mitigación en el segundo [9].

En las dos últimas décadas, los estudios sobre el cambio climático han resaltado el uso de la temperatura como el principal indicador de las variaciones en el sistema climático, tanto que el concepto de *forzamiento radiativo* ha guiado las investigaciones y políticas en todo este tiempo [10]. El forzamiento radiativo ha sido empleado por el IPCC en sus diferentes evaluaciones para indicar cualquier proceso que perturbe el balance de la radiación solar incidente y afecte los flujos de energía entrante o saliente; además este concepto ha resultado ser esencial para una comprensión adecuada de las causas de los cambios del clima en cualquiera de sus escalas de tiempo. El IPCC mide estos forzamientos como flujos netos, en $W\ m^{-2}$, en la tropopausa, o cima de la tropósfera,² ya que resultan ser fácilmente computables en modelos climáticos. Sin embargo, tiene importantes limitaciones cuando

se consideran factores como los aerosoles o cuando se utilizan otras implicaciones climáticas diferentes a la temperatura media global (p.e., la precipitación regional). La NRC [10] ha trabajado en la solución de estas limitaciones, expandiendo el concepto de forzamiento radiativo en su revisión del desarrollo teórico de este concepto.

Hipótesis sobre el calentamiento global

En el ensayo de 1983 se da como un hecho comprobado que la quema de carbón y los crudos sintéticos son mayores emisores de CO₂ por unidad de energía, que el petróleo convencional o el gas. Esta misma tendencia se observa hoy en día, con tasas compartidas del 35% en emisiones globales a partir de estas fuentes primarias de combustibles, mientras que las emisiones a partir del gas sólo informan de un 20% del total de emisiones en el período 2000-2004 [11]. Adicionalmente, la distribución de estas emisiones varía considerablemente entre regiones; por ejemplo, el uso del carbón ha crecido rápidamente gracias a países como China o India y el uso del gas ha crecido, en mayor proporción que el promedio global, en países de la antigua Unión Soviética. Aunque estas economías en desarrollo y aquellas menos desarrolladas (80% de la población mundial) contribuyeron con un 73% en el crecimiento de las emisiones globales observadas en 2004, se infiere un gran desequilibrio en

² La tropósfera es la zona de la atmósfera entre la superficie y alturas entre 8 y 10 kilómetros, y en ella se desarrollan los movimientos y fenómenos meteorológicos más comunes.

Tenga una actitud proactiva hacia el medio ambiente

Manténgase conciente de sus responsabilidades con el planeta Tierra. En la toma de decisiones de cada habitante está el éxito de esta cruzada para evitar el calentamiento global. Participe, si puede, en los comités ecológicos de la escuela de su hijos, de su empresa y/o del barrio donde vive.

el aporte de emisiones con respecto a países desarrollados, ya que sólo son responsables de un 41% de las emisiones globales y tan sólo de un 23% de las emisiones globales acumuladas desde mitades del siglo XVIII. A largo plazo, esto trae consigo implicaciones globales en la reducción equitativa de las emisiones en respuesta al cambio climático.

Las previsiones de la escuela de “efecto invernadero” resaltadas en el ensayo de 1983 se recogen en la hipótesis del *efecto nocivo de un incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera*, pero al mismo tiempo son expuestas evidencias que ponen en duda la existencia de este efecto, como el descenso de la temperatura en 1940 en un período de incremento de las emisiones de CO₂. Así que son muchas las imprecisiones originadas de las proyecciones del calentamiento global para 2050 a partir de la teoría del *efecto de invernadero*. Este debate

continúa hoy en día y parece haberse acelerado desde la publicación del reporte del IPCC en 1996 [13], donde se recopila evidencia que sugiere una notoria influencia humana sobre el clima [12].

El calentamiento global se sustenta en el análisis de la variación de la temperatura de la superficie terrestre en un período largo de tiempo (1860-2000) hecho por Jones [14]. En los últimos 100 años, la (figura 1) muestra un primer incremento de temperatura hasta 1940 y un segundo a partir de 1977 alrededor de 0,3 °C. Este último aumento es la causa del presente debate, aquí enunciado. Una gráfica similar (figura 2) fue publicada en el reporte del IPCC de 2001 [15], y tomaba como fuente las medidas de la variación de la temperatura a partir de la medición de los anchos de anillos de crecimiento de árboles, lo que dio origen a la hipótesis del “*palo de Hockey*” de Mann [16].

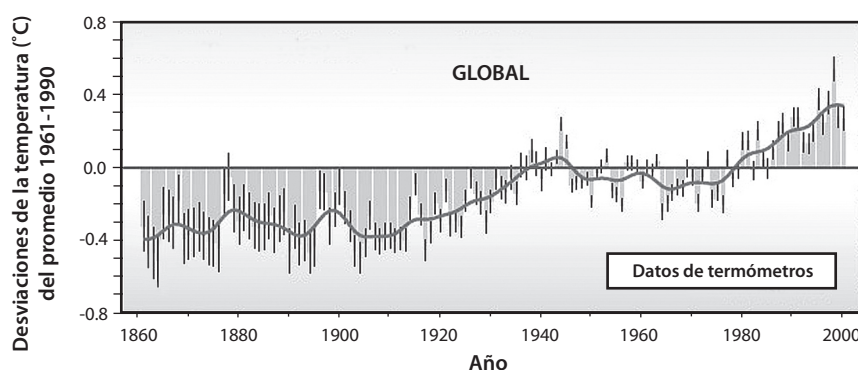


Figura 1. Variación de la temperatura media de la Tierra en el período 1860-2000, con respecto al promedio 1961-90. Fuente: Khandekar *et al.*, 2005, tomado de IPCC, 2001.

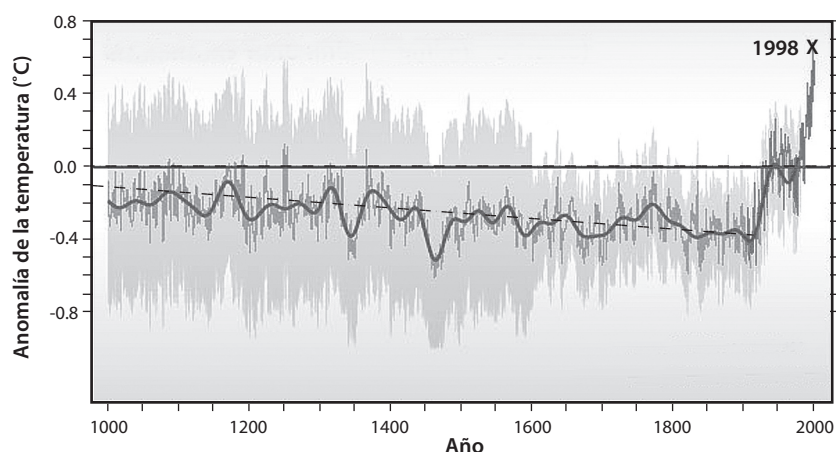


Figura 2. Variación de la temperatura media en el hemisferio norte para los pasados 1.000 años con respecto al promedio 1961-1990. Fuente: IPCC, 2001; www.john-daly.com.

Estos autores concluyeron la existencia de un calentamiento actual en el hemisferio norte sin precedentes, con la década de los 90 como la más cálida de los últimos mil años. Esta hipótesis fue rápidamente descartada y sometida a un amplio escrutinio científico y público porque no representó la Pequeña Edad Glaciar (1550-1850) ni tampoco el Período Medieval Cálido (alrededor del año 1000).

Además, se argumentó en contra que la técnica utilizada no es adecuada debido a que los registros obtenidos de anillos de crecimiento reflejan mejor la sequía o la lluvia, pero no la temperatura [17]. Así que esta teoría pasó de ser el icono del calentamiento global en el reporte del IPCC en 2001 [15] a desaparecer completamente en un nuevo reporte [8].

El reporte más reciente del IPCC [8] indica que las concentraciones de CO₂ atmosférico se ha incrementado desde 280 ppm en 1750 hasta 367 ppm en 1999 (31% de incremento) y 379 ppm en 2005 (35% de incremento), valores actuales que exceden con mucho el intervalo natural de los últimos 650.000 años, según el IPCC. Las proyecciones de duplicación de CO₂ atmosférico en los próximos 75 años previstas por la teoría del efecto invernadero enunciados en

el ensayo de 1983, están en congruencia con los datos actuales que proyectan un aumento de las emisiones mundiales de gases de invernadero de entre 25% y 90% (CO₂-eq) entre 2000 y 2030 [8], suponiendo que no se tome medida alguna de mitigación en el uso de los combustibles de origen fósil.

Para el 2100, la concentración de CO₂ estará en el orden de 500 ppm, pero podría aproximarse a las 1.000 ppm dependiendo de los escenarios de emisión y mitigación [15]. Sin embargo, aquellas predicciones con respecto a un aumento de la temperatura esperado de entre 3 °C y 12 °C para 2060, del ensayo de 1983, están muy por encima de las proyecciones actuales, que indican un calentamiento por decenio de aproximadamente 0,3 °C, lo que indica un incremento de la temperatura media para el período 1990-2100 entre 1,4 °C y 5,8 °C, mante-

niendo constantes las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y aerosoles en los niveles de 2000 [8].

Otro punto de importancia para retomar es el papel de los bosques y los océanos en la captación de CO₂. En 1983 se creía que los bosques eran la principal fuente de captación, pero a partir de 1995, a través

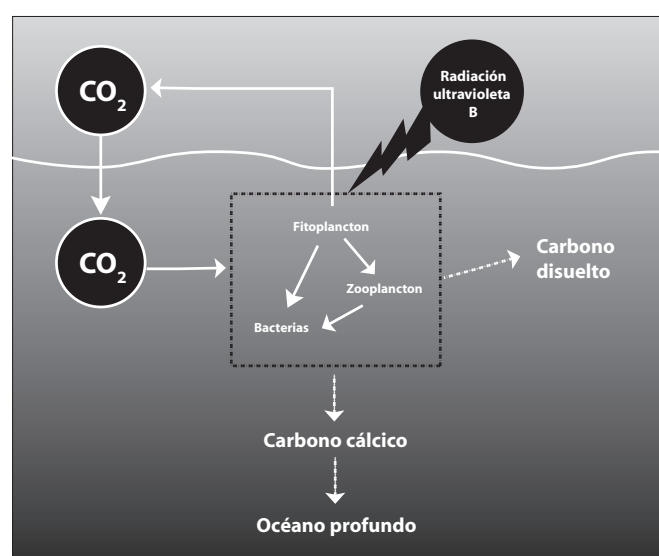
En la actualidad, se considera que los impactos de la contaminación térmica y los cambios en el uso de la tierra son un forzamiento climático importante de la misma proporción que el forzamiento provocado por los gases de invernadero.

Promueva la difusión de información ecológica

Es importante mantenerse informado sobre las oportunidades que surgen a nuestro alrededor que nos permitan evitar el calentamiento global. Se pueden enviar, y reenviar, correos electrónicos con este tipo de información y ¿por qué no? fijar una cartelera con estas oportunidades a la vista.

de campañas de observación por satélite, se llegó a la conclusión de que los océanos (fitoplancton marino) eran comparables a los ecosistemas terrestres en cuanto a la captación de CO_2 atmosférico [18]. Los océanos contienen las más grandes reservas de carbono ($\approx 39.000 \text{ pgr C}$),³ la mayoría de las cuales se encuentran en las capas profundas y no están en circulación activa a menos que se produzca una liberación debida a causas naturales (actividad volcánica y procesos de subducción en las fallas oceánicas) o quema humana de combustibles fósiles.

En los océanos existen cerca de 1.000 pgr C en circulación libre, y se calcula que han captado cerca de 2 pgr de los cerca de 8 pgr C producto de las emisiones en la década de los 90. Este carbono extra es captado por el fitoplancton, que lo distribuye por las cadenas tróficas hasta los fondos marinos en forma de carbonato cálcico, en un mecanismo llamado *bomba biológica*, (figura 3) que culmina en la formación de inmensos depósitos de sedimentos [19]. Sin embargo, el océano tiene una capacidad limitada para almacenar CO_2 , lo que produciría un efecto de sobresaturación con grandes consecuencias secundarias, como la acidificación de los océanos y el desequilibrio en la dinámica de las corrientes marinas, por lo que en principio tendría que haber un equilibrio en la captación de dicho CO_2 y el desprendimiento de energía por parte del suelo.



Bomba biológica.

A pesar de todos los avances en las predicciones de aumento de temperatura debido al efecto invernadero, todavía permanecen imprecisiones en la teoría que provocan incongruencias entre las concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera y la temperatura esperada que no permiten establecer conclusiones exactas sobre el calentamiento global. Dentro de los principales aspectos discutidos hoy en día, uno ya fue tratado en el ensayo de 1983: los impactos de la *contaminación térmica*, que han sido ignorados en los cálculos de la temperatura media, así como aquellos provocados por el cambio del uso de la tierra. Existen otros aspectos discutidos actualmente para debatir el calentamiento global, como el impacto de la variabilidad solar sobre el cambio climático (en tiempos geológicos y escalas de tiempo más cortas) y las consecuencias del calentamiento global en términos del incremento medio del nivel del mar y de eventos de clima extremos [12].

En la actualidad, se considera que los impactos de la contaminación térmica y los cambios en el uso de la tierra son un forzamiento climático importante de la misma proporción que el forzamiento provocado por los gases de invernadero. Para el IPCC [15] estos impactos son la fuente más importante de error en el cálculo de la temperatura media, en cerca de $0,05$ a $0,06 \text{ }^\circ\text{C}$ en 100 años, mientras que otros estudios muestran que el efecto es mucho mayor, entre 1 y $5 \text{ }^\circ\text{C}$ en cien años [20]. Esto apunta a la necesidad de retomar la discusión de estos impactos que no han sido suficientemente tratados en los modelos climáticos actuales [21].

Por otra parte, en el ensayo de 1983 se hizo poco hincapié a la importancia de otros gases de invernadero diferentes al CO_2 que no resultan menos importantes en la estimación del calentamiento global. La concentración del metano, en 2005 de 1.774 ppm , se ha incrementado lentamente desde comienzo de los 90 con respecto a las emisiones humanas totales, que han sido constantes durante este período. La importancia de gases de invernadero como CH_4 y N_2O ra-

3 1 pentagramo (pgr) = 1.015 gramos (gr)

dica también en su incremento de 145% y 15% respectivamente en los últimos 250 años. Estos gases de invernadero provocan un forzamiento radiativo directo de $\approx 2,45 \text{ W m}^{-2}$, que acorde con el IPCC aumenta la temperatura media de la superficie de la Tierra. Es muy probable que el aumento observado de la concentración de CH_4 se deba predominantemente a la agricultura y a la utilización de combustibles de origen fósil, mientras que el aumento de la concentración de N_2O procede principalmente de la agricultura.

Hipótesis sobre una nueva glaciación

Son muchos los contradictores de la hipótesis de que el planeta se está calentando por las emisiones antrópicas de gases de invernadero, ya que argumentan que la Tierra, en sus distintas eras geológicas, ha vivido ciclos glaciación-interglaciares bien establecidos o ha sufrido de cambios drásticos del clima. Igualmente, el debate del cambio climático ha tenido también connotaciones políticas y económicas, por lo que ha sido tratado en términos de pérdidas en bienestar económico desde la publicación del reporte Stern en 2007 [22]. En este apartado se examinarán estas visiones, desde las perspectivas del examen de las contradicciones del calentamiento global y del análisis de otra hipótesis válida y avalada por la periodicidad de las glaciaciones de acuerdo con la teoría astronómica de las glaciaciones. Esta hipótesis

fue tratada ampliamente en el ensayo de 1983, cuando analizó las predicciones hechas por la Escuela de la Glaciación para esa época.

Hipótesis explicativas de las glaciaciones

Las oscilaciones climáticas del Cuaternario, de 100.000 años de duración, son la base para la predicción de las glaciaciones a escala global, ya que el avance global de estos glaciares corresponde con períodos de veranos frescos e inviernos templados en el hemisferio norte. De acuerdo con registros de indicadores paleoclimáticos, se ha comprobado que la causa principal de estas glaciaciones es la variación de los parámetros orbitales, pero el mecanismo asociado se mantiene aún inexplicable [23] debido a que estas variaciones no produjeron una variación energética suficiente que provocara el suficiente enfriamiento para la formación de casquetes.

Estas glaciaciones comenzaron bajo un clima mundial cálido parecido al actual, razón por la cual también se han convertido en sustento para detectar un eventual enfriamiento en el presente. Las hipótesis de reforzamiento propuestas indican que debió existir un calentamiento previo al crecimiento del hielo polar [24]; por ejemplo, altas concentraciones de CO_2 en el pasado evitaron que el clima fuera demasiado frío por mucho tiempo, permitiendo el crecimiento de casquetes masivos en Norteamérica y Escandinavia

Ambientalice su portafolio de inversión

Manténgase informado sobre las acciones que constituyen su portafolio de inversión. Hable con su banco y/o corredor de bolsa para que inviertan su plata con criterio ambiental. Capitalice con las empresas que se la juegan por el futuro del planeta, al fin y al cabo se trata del futuro de todos.



FOTO: NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), At The Ends of the Earth Collection.

[23]. Esta explicación surge de la necesidad de responder por qué el ciclo de glaciaciones de 100.000 años sólo aparece hace 800.000 años, ya que de 3 a 1 millón de años atrás, los casquetes de hielo variaban a un ritmo de 41.000 años en respuesta a la inclinación del eje de la Tierra.

En el mismo sentido, a partir de testigos de hielo de períodos interglaciares se ha encontrado que el forzamiento conjunto de los cambios de la radiación solar y la concentración de gases condujeron al clima hacia condiciones glaciares durante los últimos miles de años [25]. Esta hipótesis, conocida como *la glaciación retrasada*, indica que las emisiones tempranas humanas impidieron el inicio de una nueva glaciación y así produjeron una estabilidad fortuita del clima hace 8.000 años. Las predicciones de esta hipótesis refuerzan las previsiones hechas por la escuela de la glaciación resumidas en el ensayo de 1983 y además explican por qué el interglaciar actual ha durado mucho más tiempo del espe-

rado (11.600 años en comparación con la media de 10.000 años).

Una de las evidencias para formular esta hipótesis fue la inusual concentración de CO_2 para los últimos 8.000 años, que subió hasta niveles de 280-285 ppm, mientras que estimaciones hechas en períodos interglaciares anteriores sugerían una concentración de 240-345 ppm. Estos autores concluyen que, sin el calentamiento provocado por los humanos, el clima no se hubiera mantenido en un estado interglaciar, sino que se habría provocado una glaciación. Éste sería uno de los mecanismos que cambiaron la temperatura, aunque puede ser un argumento débil debido a la escasa población y la poca actividad agrícola de ese entonces si la comparamos con niveles más actuales [25]. Sin embargo, no hay duda de la correlación entre la temperatura y el CO_2 atmosférico durante los últimos 400.000 años [26], cuando las concentraciones de CO_2 caían hasta 200 ppm durante períodos glaciares y alcanzaban 280 ppm durante los interglaciares.

Por el contrario, otros autores consideran que las concentraciones de CO_2 varían naturalmente y constituyen un proceso de retroalimentación antes que ser una causa primaria del ciclo glaciar-interglaciar [27]. Por tanto, se convierten en amplificadores de las respuestas del clima [28]. Otra explicación del incremento de la concentración de CO_2 en el Holoceno parte de la *hipótesis oceánica*, que formula una compensación de carbonatos en el océano en respuesta a los cambios glaciar-interglaciar en el almacenamiento de carbono terrestre [29]. Con todo, el debate de las variaciones de CO_2 en el Holoceno sigue abierto, y ninguna teoría expuesta queda libre de problemas, mientras que modelamientos recientes indican que no hay necesidad de inclusión de un forzamiento antrópico que explique la tendencia detectada en el Holoceno [30].

Las discrepancias encontradas entre las hipótesis surgen de la falta de consenso acerca de la historia del clima de la Tierra, mientras que no hay dudas sobre la historia de la temperatura, que cuenta con varias fuentes de información fidedigna, como los registros de indicadores (*proxy*) del pasado geológico o los registros instrumentales para los siglos XIX y XX. A partir de toda esta información documentada se ha refutado que el calentamiento observado entre 1975 y 2000 haya sido un evento inusual en la historia climática de la Tierra. Algunos estudios sugieren que han existido períodos más cálidos que

el presente [31], como el siglo XV (1400-1500 d.C.), mientras que otros estudios aseveran que el Período Medieval Cálido y la Pequeña Edad de Hielo fueron anomalías climáticas a escala global y no simplemente fenómenos regionales, como ha sido argumentado por el IPCC [15].

El calentamiento actual, si existe, también ha sido debatido a partir de su estructura y ubicación, ya que parece que se confina principalmente a anticiclones secos y fríos de Siberia y el noroeste de Norteamérica durante el invierno. Estacionalmente, se sugiere que una pequeña área (12,8%) contribuye con la mitad del calentamiento anual, mientras en la estación invernal del hemisferio norte (26% del área) contabiliza el 78% del calentamiento. Por lo tanto, el modelo espacial del calentamiento observado [32] no es consistente con el proyectado por varios modelos climáticos reportados por el IPCC [13]. De otro lado, el proyecto Climap, que utilizó sondeos de la cobertura de testigos de hielo de Groenlandia y la Antártida para relacionar la temperatura de la tierra y el CO_2 en el Holoceno, encontró una relación directa entre las curvas del CO_2 atmosférico y las temperaturas isotópicas- $\delta^{18}\text{O}$, si bien esta relación se vuelve difusa en una escala mayor. Además, se puede encontrar que la variación de CO_2 atmosférico puede o no preceder a la de temperatura, y en sentido más estricto puede que no esté relacionada del todo en el hemisferio norte [33].

Recoja agua de lluvia

El agua de lluvia sirve para llenar piscinas, para el abrevadero de los animales, para cocinar, para soltar el agua de los inodoros, para las fuentes y para regar las plantas interiores, entre otras cosas. Existen sistemas para recogerla en buena cantidad y con efectividad, pregunte por esta alternativa.

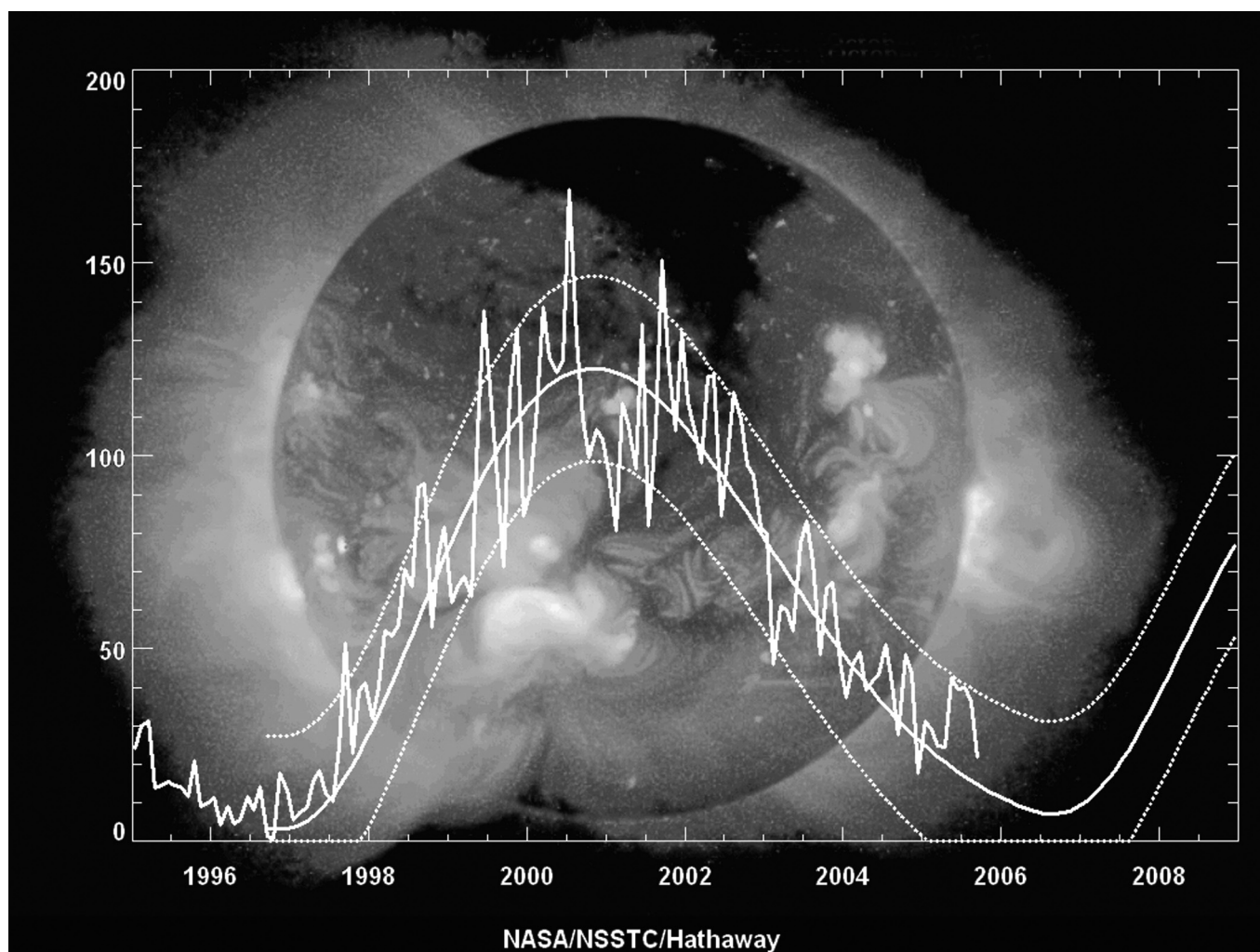


FOTO: NASA

Manchas solares

En busca de los mecanismos de potenciación del efecto de los gases de invernadero en el Holoceno, se ha formulado la hipótesis de *Bjerknes* [34], que establece que el gradiente normal de las temperaturas superficiales del mar entre el Pacífico oeste (cálido) y el Pacífico este (frío) da lugar a una enorme celda de circulación de masas de aire (vientos) de dirección este-oeste. Un cambio en la circulación de viento en invierno, como aquella asociada con las condiciones del Mínimo de Dalton (1790-1829), conduce a una reducción de las temperaturas tanto de invierno como de verano en toda Europa, y secundariamente influye en el cambio de la temperatura de la superficie de los océanos en el noreste del Atlántico norte, como producto de un proceso de realimentación. De esta forma, la circulación atmos-

férica anómala de invierno es capaz de explicar gran parte del enfriamiento que ocurre en el invierno de Europa noroccidental.

El Mínimo de Dalton corresponde con un ciclo solar que dura entre 150 y 200 años, y un nuevo ciclo estaría por llegar y si las predicciones son válidas; nuevamente la Tierra entraría en un período de enfriamiento. Igualmente, entramos en un nuevo ciclo solar de 11 años, el ciclo magnético número 24, que también nos llevará a nuevos mínimos. La aparición de una mancha solar con polaridad invertida marcó el inicio de un nuevo ciclo de actividad solar, el 4 de enero de 2008; en estos días nos encontramos en un mínimo solar. El ciclo anterior tuvo su máximo de intensidad entre 2000 y 2002, y tal como se esperaba, el ciclo decayó hasta llegar a la quietud actual.

Cuando el número de manchas solares alcanza un mínimo existen interacciones indirectas a través

de los rayos cósmicos o la radiación ultravioleta que aumentan el número de iones que alcanza la Tierra en sus capas altas que actúan como núcleos de condensación del vapor de agua, formando más nubes por acumulación. Este aumento de rayos cósmicos extrasolares (mínimo de manchas solares) produce un aumento de la nubosidad que contribuye negativamente al calentamiento global [19]. En definitiva, como complemento a las oscilaciones orbitales de Milankovitch, la existencia de una correlación entre la intensidad de los rayos cósmicos (partículas muy energéticas de origen extrasolar) que alcanzan la Tierra y la nubosidad, es una explicación plausible de que se puede alcanzar un enfriamiento en la quietud del sol, situación que se presenta actualmente.

Con respecto a las causas que produjeron dos eventos climáticos trascendentales en la historia del clima de la Tierra, el Período Medieval Cálido y la Pequeña Edad de Hielo, es posible reconstruir la historia del clima a partir de registros de observaciones directas del sol. Hay una clara correlación entre esta variable y ambos períodos; además, la actividad solar antes de 1600 d.C. indica que había un alto nivel de actividad solar durante el período medieval, au-

mentando la temperatura. En esta discusión resulta muy relevante la alta correlación con el Mínimo de Maunder (ciclo de 70 años) sin actividad alguna, que ocurrió al mismo tiempo del inicio de la Pequeña Edad de Hielo.

Para que se produzca un ciclo glaciar-interglaciar, éste debe estar unido a los cambios cíclicos en los parámetros de la Tierra y ser amplificado por otros fenómenos positivos, como la circulación oceánica y los ciclos de carbono.

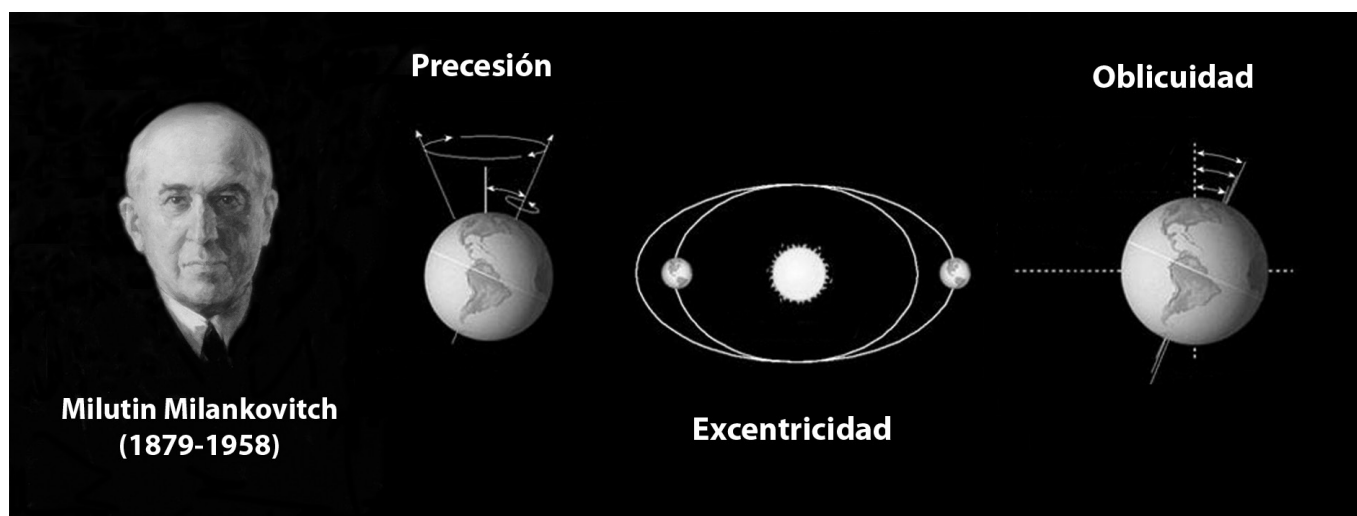
Aerosoles

Otro de los puntos discutidos en favor de un enfriamiento generalizado es la presencia de grandes cantidades de aerosoles en la atmósfera que conllevan un efecto “anti-invernadero” de sentido opuesto al de los gases de invernadero. En el ensayo de 1983 ya se abordaba el efecto negativo de los aerosoles que disminuyen hasta en un 20% la radiación solar, neutralizando en esta forma el

efecto del CO₂ atmosférico y anulando el incremento de la temperatura. Según el IPCC [8]: las contribuciones antropógenas a los aerosoles (principalmente sulfatos, carbono orgánico, carbono negro, nitratos y polvo) producen conjuntamente un efecto de enfriamiento, con un forzamiento radiativo directo total de $-0,5 \pm -0,4 \text{ W m}^{-2}$ y un forzamiento por albedo de nubes y directo de $-0,7$ [entre $-1,8$ y $-0,3$] W m^{-2} .

Utilice reductores eléctricos

Los venden en todas las ferreterías, supermercados y almacenes especializados. Mecanismos para reducir la luminosidad de los bombillos, reguladores de energía, medidores de consumo que permiten racionalizar el gasto y temporizadores que prenden ciertos aparatos a ciertas horas.



Ciclos de Milankovitch

Los aerosoles producen un efecto de forzamiento negativo que es muy heterogéneo si se compara con el efecto de forzamiento del CO_2 . Sin nubosidad, los aerosoles presentan un forzamiento directo especialmente aquellos sulfatados,⁴ que reflejan la radiación solar incidente. Igualmente, producen un efecto de enfriamiento indirecto cuando actúan como núcleos de condensación de nubes, es decir, un albedo de nubes. Se ha comprobado que este efecto es potenciado por la presencia de hielo en grandes escalas o de nubes convectivas que aumentan las interacciones aerosol-nube [35].

Hipótesis de Milankovitch

La evidencia geológica que soporta la hipótesis de Milutin Milankovitch del control de los ciclos orbitales sobre el clima de la Tierra fue identificada en registros estratigráficos en 1976, cuando Hays *et al.* demostraron ciclos regulares de 100.000, 23.000 y 19.000 años en proporciones de isótopos de oxígeno y otros registros de indicadores que abarcaban los últimos 500.000 años [24]. En estos estudios hay una periodicidad bien marcada de los fenómenos orbitales terrestres que corresponden a la variación de la órbi-

ta de la Tierra alrededor del sol (100.000 años), a la variación de la oblicuidad del eje de rotación (41.000 años), y la precesión axial (23.000 años). Por tanto, se establecen las mismas frecuencias de cambio entre la variabilidad climática y las variables astronómicas [28]. Aunque el mecanismo no está completamente esclarecido, la respuesta climática al forzamiento de la radiación solar se retarda en varios miles de años [25].

Para que se produzca un ciclo glacial-interglacial, éste debe estar unido a los cambios cíclicos en los parámetros orbitales de la Tierra y ser amplificado por otros forzamientos positivos, como la circulación oceánica y los ciclos de carbono. Por tanto, la variación de la cantidad de radiación solar por sí sola no fuerza una variación del clima terrestre y no da lugar a los ciclos de glaciación y deglaciación. Estos hechos pueden indicarnos hacia dónde se está moviendo el clima actual, hacia una glaciación o un calentamiento. Se sugiere que es muy improbable, con las variaciones actuales de la órbita de la Tierra, que las condiciones climáticas naturales evolucionen en una continuación prolongada del interglacial, es decir, se espera que el nuevo ciclo glacial aparezca pronto, acorde con las teorías de glaciación aquí examinadas [24]. Sin embargo, citando estos autores las concentraciones actuales de gases de invernadero (las más altas en los 500.000 años) ejercen un efecto importante que no ha sido dilucidado completamente. Mientras tanto, muchos

⁴ Son compuestos derivados del SO_2 , que es producido junto con el CO_2 , por la combustión de combustibles fósiles.

modelos sugieren que un incremento de CO₂ producirá derretimiento de hielo, pero la magnitud del impacto y su repercusión sobre el gradiente de temperatura entre el ecuador y los polos, así como sus efectos sobre la circulación atmosférica y oceánica aún se mantienen sin respuesta.

Bibliografía

1. ISAZA, J.F. 1983. *Un ensayo sobre las perspectivas climáticas mundiales. Calentamiento o glaciación*. Bogotá, Centro Las Gaviotas.
2. MCELROY, M.B. 1994. «Climate of the Earth: an overview». *Environmental Pollution*, **83** 3.
3. KEELING, C.D. 1978. «The Influence of Mauna Loa Observatory on the Development of Atmospheric CO₂ Research». En: *Mauna Loa Observatory: A 20th Anniversary Report (National Oceanic and Atmospheric Administration Special Report, september 1978)*. Edited by John Miller. Boulder (Co): NOAA Environmental Research Laboratories. Pp. 36-54.
4. RONALD, M. 2006. *Global Environmental Assessments: Information and Influence*. Cambridge (Ma), MIT Press.
5. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1979. *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment Report of an Ad Hoc Group on Carbon Dioxide and Climate*. Woods Hole (Ma), july 23-27. Assembly of Mathematical and Physical Sciences, Climate Research Board. Washington, D.C., National Academy Press.
6. KEELING, C.D. & T.P. WHORF. 2000. «The 1,800-year oceanic tidal cycle: A possible cause of rapid climate change». *Proc. Natl. Acad. Sci.* **97** 8.
7. KATZ, M.E., D.K. PAK, G.R. DICKENS & K.G. MILLER. 1999. «The source and fate of massive carbon input during the latest paeocene thermal maximum». *Science* **285** 5444.
8. IPCC. 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. R.K. Pachauri & A. Reisinger, directores de la publicación. Ginebra, IPCC. 104 pp.
9. SWART, R. & L. BERNSTEIN. 2009. «Agreeing to disagree: uncertainty management in assessing climate change, impacts and responses by the IPCC». *Climatic Change*, **92** 1.
10. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 2005. *Radiative forcing of climate change: Expanding the concept and addressing uncertainties*. Committee on Radiative Forcing Effects on Climate Change, Climate Research Committee, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division on Earth and Life Studies. Washington D.C., The National Academies Press. 208 pp.
11. RAUPACH, M.R., G. MARLAND, P. CIAIS, C. LE

Viva pendiente de los demás

Las actividades en grupo suelen ser más efectivas que las individuales para ahorrar energía. Si va a salir pregunte a los demás qué necesitan que les traiga o a quién puede llevar, o recoger. Si va a lavar ropa, lave la de otras personas. Si va a prender el calentador procure que se bañen otros, etc.

- QUÉRÉ, J.G. CANADELL, G. KLEPPER & C.B. FIELD. 2007. «Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions». *PNAS* **104** 24.
12. KHANDEKAR, M.L., MURTY, T.S., CHITTIBABU, P. 2005. «The global warming debate: a review of the state of science». *Pure Appl. Geophys.*, **162** 1557.
 13. IPCC. 1996. *The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC*. J.T. Houghton *et al.*, eds. Cambridge University Press, New York.
 14. JONES, P.D. M. NEW, D.E. PARKER, S. MARTIN & I.G. RIGOR. 1999. «Surface Air Temperature and its Changes over the Past 150 Years». *Rev. Geophys.* **37** 2.
 15. IPCC. 2001. *Climate Change (2001). The Scientific Basis*. Cambridge University Press.
 16. MANN, M., R. BRADLEY & M. HUGHES. 1999. «Northern Hemisphere Temperature during the Past Millennium: Inferences, Uncertainties and Limitations». *Geophys. Res. Lett.* **26** 759.
 17. PEARCE, F. 2006. «Climate: The great hockey stick debate». *New Scientist* 2543.
 18. JANZEN, H.H. 2004. «Carbon cycling in earth systems. A soil science perspective». *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104 399.
 19. VIÑAS, J.M. 2005. *¿Estamos cambiando el clima?* España, Editorial Equipo Sirius.
 20. FUJIBE, F. 1995. «Temperature Rising Trends at Japanese Cities during the Last Hundred Years and their Relationships with Population, Population Increasing Rates and Daily Temperature Changes». *Papers in Meteorology and Geophys.* 46 35.
 21. PIELKE (sr.), R.A., G. MARLAND, R. BELTS, R.A. CHASE, T.N. EASTMAN, J.L. NIBE, J.O. NEYOG & S.W. RUNNING. 2002. «The Influence of Land Use Change and Land-scale Dimensions on the Climate System. Relevance to Climate-Change Policy Beyond the Radiative Effect of Greenhouse Gases». *Phil. Trans Roy.* **360** 1705.
 22. JAEGER, C., H.J., SCHELLNHUBER & V. BROVKIN. 2008. «Stern's review and Adam's fallacy». *Climatic Change* **89** 207.
 23. RAYMO, M.E. 1998. «Glacial Puzzles». *Science (New Series)*, 281 5382.
 24. KUKLA, G. & J. GAVIN. 2005. «Did glacials start with global warming?» *Quaternary Science Reviews*, 24 1547.
 25. RUDDIMAN, W.F. 2006. «Orbital changes and climate». *Quaternary Science Reviews* 25 3092.
 26. PETTIT, 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, V. LIPENKOV, C. LORIUS, L. PEPIN, C. RITZ, E. SALTZMAN & M. STIEVENARD. 1999. «Climate and atmospheric history of the last 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica». *Nature* **399** 429.
 27. SHACKLETON, N.J. 2000. «The 100,000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity». *Science* **289** 1897.
 28. HAYS, J.D., J. IMBRIE & N.J. SHACKLETON. 1976. «Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages». *Science* **194** 1121.
 29. BROECKER, W.S., E. CLARK, D.C. MCCORKLE, T.-H. PENG, I. HAJDAS & G. BONANI. 1999. «Evidence for a reduction in the carbonate ion content of the deep sea during the course of the Holocene». *Paleoceanography* **14** 744.
 30. CLAUSSEN, M., V. BROVKIN, R. CALOV, A. GANOPOLSKI & C. KUBATZKI. 2005. «Did human prevent a Holocene glaciations: Comment on Ruddiman's Hypothesis of a Pre-historic Anthropocene». *Climatic Change* 69 409.
 31. MCINTYRE, S. & R. MCKITRICK. 2003. «Corrections to Mann *et al.* (1998). Proxy Database and Northern Hemispheric Average Temperature Series». *Energy and Environ.* **14** 751.
 32. MICHAELS, P.G., P.C. KNAPPENBERGER, C. BALLING (jr.) & R.E. DAVIS. 2000. «Observed Warming in Cold Anticyclones». *Climate Research* **14**, 1.

33. CAILLON, N., J. JOUZEL, J.P. SEVERINGHAUS, J. CHAPPELLAZ & T. BLUNIER. 2003. «A novel method to study the phase relationship between Antarctic and Greenland climate». *Geophysical Research Letters* 30 17.
34. VAN DER SCHRIER, G. & J. BARKMEIJER. 2005. «Bjerknes' hypothesis on the coldness during A.D. 1790-1820 revisited». *Climate Dynamics* 25 537.
35. LOHMANN, U. 2002. «Possible aerosol effects on ice clouds via contact nucleation». *Journal of the Atmospheric Sciences* 59 3.

EDILBERTO LEÓN

Director de la Maestría en Ciencias Ambientales,
Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.

JIMMY ÁLVAREZ

Becario AECI del Instituto de Recursos Naturales y
Agrobiología, IRNASA - CSIC, Salamanca, España.

Ponga más de un grano de arena

Muchas de las acciones aquí descritas pueden parecer insignificantes, pero si usted se empeña en realizar varias de las aquí señaladas, las que no violenten sus hábitos y/o su presupuesto, usted ayudará a incrementar y mejorar la capacidad natural que tiene el planeta para reciclarse a sí mismo.