

Influencia del hombre sobre el clima

¿Cuánta alteración causamos en el clima? La anhelada respuesta puede llegar hacia el año 2050, pero sólo si todas las naciones del mundo se comprometen desde ahora a una vigilancia a largo plazo

Thomas R. Karl y Kevin E. Trenberth

“**L**as pruebas recabadas sugieren que el hombre influye de una forma apreciable sobre el clima global.” Con estas mesuradas palabras, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), financiado por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa Ambiental de las Naciones Unidas, reconocía en 1995 que los seres humanos no eran en absoluto consecuentes en lo concerniente a la salud del planeta. Lo que el panel no precisó —y lo que científicos y políticos discuten acaloradamente— es cuándo, dónde y cuánto se ha notado y se notará esa influencia.

Hasta ahora, los cambios climáticos presuntamente relacionados con la actividad humana han sido bastante modestos. Pero las previsiones de varia índole sugieren que el cambio alcanzará una intensidad espectacular hacia mediados del siglo XXI, sobrepasando cuanto se ha visto en la naturaleza en los últimos 10.000 años. Aunque algunas regiones pudieran beneficiarse durante cierto tiempo, cabe esperar que, en conjunto, las alteraciones resultarán perjudiciales e incluso catastróficas. Si la ciencia pudiera determinar la cuantía en que ciertas actividades influyen sobre el clima, se encontraría en mejor situación a efectos de recetar remedios para las peores alteraciones. ¿Es posible tal cuantificación? Creemos que sí. Nos parece que puede lograrse hacia el año 2050, pero sólo a condición de que este objetivo se convierta en prioridad internacional permanente.

Pese a la incognoscibilidad inevitable de los pormenores del cambio climático, es patente que la acción humana incluye en la atmósfera de formas diversas y preocupantes. La combustión de carburantes fósiles en centrales térmicas y automóviles expulsa partículas y gases que alteran la composición de la atmósfera. La contaminación visible, debida a combustibles ricos en azufre incluye aerosoles, partículas micrométricas que crean un cielo de panza de burra. Al reflejar parte de los rayos solares hacia el espacio, estos aerosoles enfrían la atmósfera; de un modo transitorio, pues sólo permanecen en el aire algunos días, hasta que la lluvia los barre y los deposita en

la superficie del planeta. Algunos gases invisibles producen un impacto más prolongado. En la atmósfera el dióxido de carbono puede persistir más de un siglo. Y lo que es peor, estos gases de invernadero aprisionan una fracción de la radiación infrarroja que en condiciones normales se reemitiría al espacio, creando por contra una "manta" que aísla y calienta la parte inferior de la atmósfera.

Por sí solas, las emisiones de combustibles fósiles han incrementado la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera en un 30 por ciento desde el comienzo de la Revolución Industrial, en la segunda mitad del siglo XVIII. Los océanos y las plantas ayudan a paliar esta aportación extrayendo del aire una parte de las mismas, pero las concentraciones de dióxido de carbono continúan aumentando. Del bombeo constante de gases de invernadero a la atmósfera resulta, inevitable, el calentamiento global. Por eso, la mayoría de los científicos están de acuerdo en que la temperatura media de la Tierra ha subido al menos 0,6 grados Celsius a lo largo de los últimos 120 años, por culpa, en buena medida, de la quema de combustibles fósiles.

Al evaporar agua de los océanos, suelos y plantas, el calentamiento global promovido por el efecto invernadero seca el planeta. Esa humedad adicional de la atmósfera proporciona un depósito mayor de agua que aprovechan todos los sistemas meteorológicos capaces de producir precipitación, desde las tempestades tropicales hasta los chubascos tormentosos, pasando por los temporales de nieve o frentes de lluvia. Con semejante refuerzo del ciclo del agua, se producen sequías más pertinaces en las regiones secas y se generan lluvias o nevadas de sorprendente intensidad en las regiones húmedas, con el riesgo consiguiente de inundaciones. Tales fenómenos meteorológicos se han abatido sobre muchas zonas del mundo en los últimos decenios.

Al margen de la combustión de carburantes, otras actividades humanas pueden causar estragos en los sistemas climáticos. Así, la conversión de bosques en campos de labor elimina árboles que absorberían dióxido de carbono de la atmósfera y reducirían el efecto de invernadero. Menos árboles también significa mayor escorrentía del agua de lluvia, lo que redobla el peligro de inundaciones.



1. Un peatón de la ciudad de Nueva York trata de defenderse de la lluvia torrencial producida por el huracán Floyd, que se desató en septiembre de 1999. Las lluvias torrenciales asociadas a las tempestades tropicales empeoran con el calentamiento global. Pero no son las únicas catástrofes derivadas del mismo.

No basta con identificar los factores que fomentan el cambio climático. Importa llegar a conocer qué efectos tendrá en el clima local y global la acción del hombre en un lugar determinado. Para lograr este objetivo, los expertos deberán ser capaces de construir modelos climáticos harto más precisos. Necesitaremos, por tanto, la potencia técnica de superordenadores un millón de veces más rápidos que los que manejamos ahora. Tendremos también que desenredar la madeja de interacciones que median entre océanos, atmósfera y biosfera para saber exactamente qué variables introducir en los modelos informáticos.

Se nos pedirá, sobre todo, demostrar que nuestros modelos simulan con exactitud los cambios climáticos pasados y presentes, antes de confiar en esos constructos para predecir el futuro. Ello requiere contar con archivos y registros que cubran plazos largos. La simulación y predicción del clima entrarán en su mayoría de edad sólo cuando se disponga de un registro fiel de los cambios a medida que van sucediendo.

Los ordenadores y las interacciones climáticas

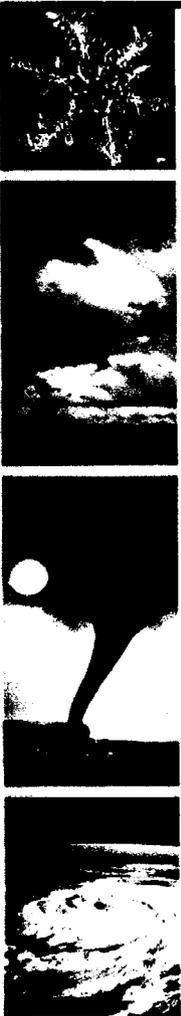
Para quienes elaboran modelos climáticos, todo tiene su interés: desde el inicio, apogeo y desaparición de las glaciaciones hasta la desertización de África Central; todo cumple una función en los modelos de superordenador. Las interacciones entre los componentes del sistema climático —la atmósfera, los océanos, los continentes, los hielos

marinos, los cursos de agua dulce y la biosfera— siguen leyes físicas representadas por docenas de ecuaciones matemáticas. Los modelizadores instruyen a los ordenadores para que resuelvan estas ecuaciones en cada uno de los bloques de una red tridimensional que abarca el globo. Puesto que la naturaleza no está sujeta a bloques, importa, amén de incluir las expresiones matemáticas correctas en cada uno de ellos, describir también el intercambio de masa y energía que experimentan los bloques en cuestión.

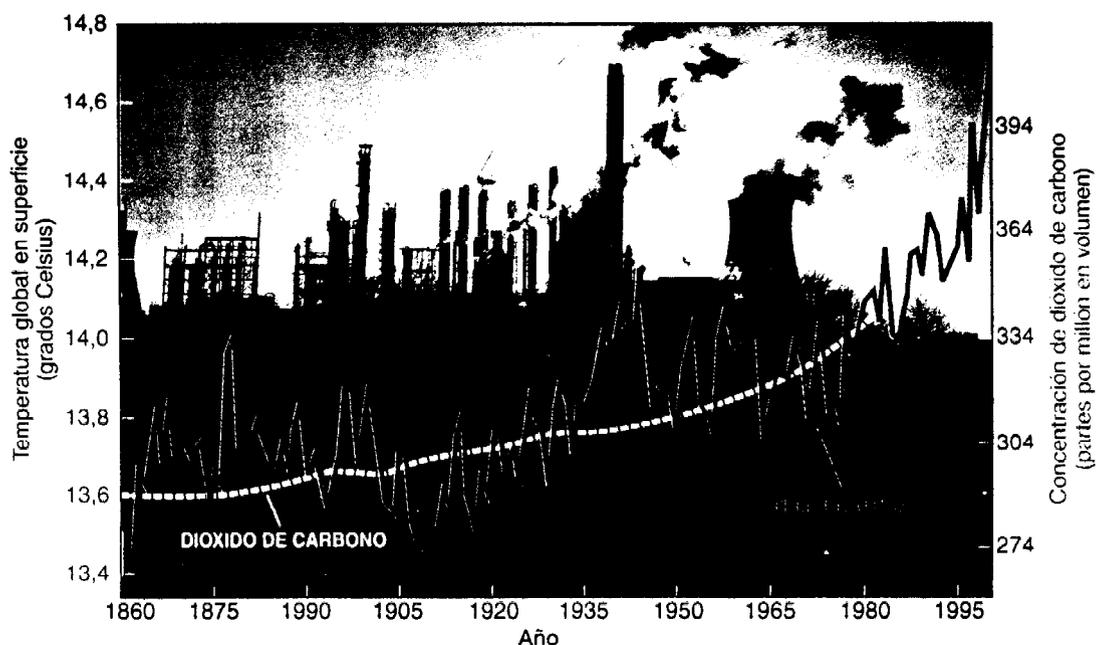
En los principales centros mundiales de modelización del clima se emplean ordenadores que ejecutan entre 10.000 y 50.000 millones de operaciones por segundo. Mas, con tantas variables en evolución, se tardan meses en realizar la simulación de un solo siglo. Así, el tiempo que se invierte en construir una simulación limita la resolución (número de bloques) que se puede incluir en los modelos climáticos. En los modelos típicos elaborados para reproducir la evolución detallada de los sistemas meteorológicos, los bloques de la red tridimensional miden unos 250 kilómetros de lado en el plano horizontal y un kilómetro en la vertical. De donde se desprende cuán difícil resulta seguir la pista a los sistemas dentro de regiones más restringidas.

Ni siquiera el modelo global más refinado hoy en uso puede acometer una simulación directa de la nubosidad (porción de cielo cubierto por nubes), la formación de lluvia o condiciones similares. Las potentes nubes tormentosas que desencadenan chubascos torrenciales suelen tener dimensiones inferiores a los 10 kilómetros, y las gotas de lluvia se condensan en tamaños submilimétricos. Puesto que cada uno de esos sucesos tiene lugar en una región menor que el volumen de la menor unidad de la red, hemos de in-

La simulación y la predicción climática sólo alcanzarán su mayoría de edad cuando se disponga de un archivo continuo de la sucesión de cambios.



2. La combustión de carburantes fosiles (fotografía) ha incrementado las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (trazos blancos) y ha elevado la temperatura global en superficie, durante los últimos 140 años (línea roja).



ferir sus características mediante complicadas técnicas estadísticas.

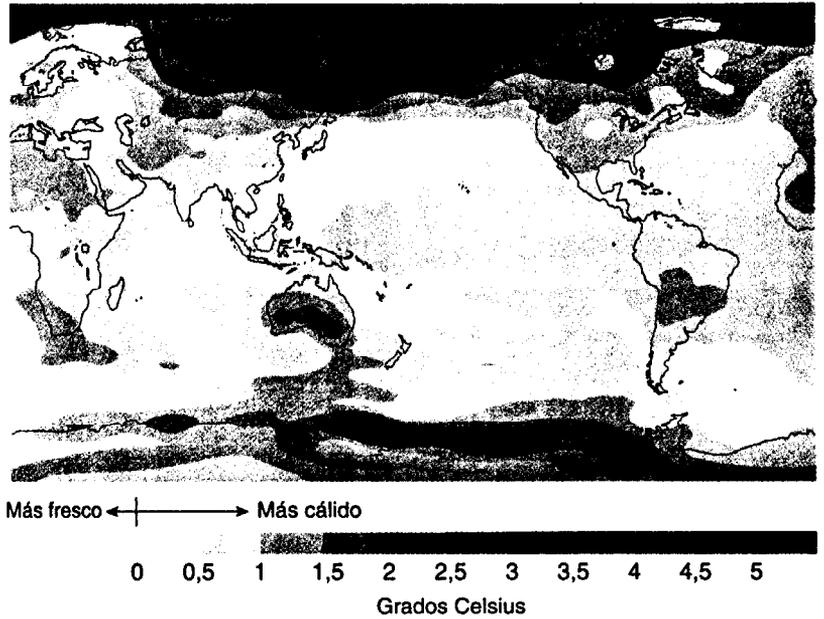
Tales fenómenos meteorológicos a pequeña escala se desarrollan al azar. Sucesos aleatorios cuya frecuencia difiere notablemente de un punto a otro. Pero la mayoría de los agentes que alteran el clima, piénsese en el aumento de la concentración de los gases de invernadero, afectan a todas las regiones del planeta de una manera más uniforme. Cuanto menor sea la región considerada, tanto más la variabilidad del tiempo enmascarará la actividad climática a gran escala. En quitar esa máscara se consume tiempo de ordenador, pues se obliga a efectuar diversas simulaciones, cada una con condiciones de partida ligeramente diferentes. Los rasgos climáticos que se dan en cada simulación constituyen la "información" climática, mientras que los no reproducibles se consideran "ruido" climático dependiente de la temperie.

Según estimaciones prudentes, la velocidad de procesamiento de los ordenadores se habrá multiplicado en más de un millón de veces hacia el año 2050. Con semejante potencia de cálculo, los expertos en modelación podrán abordar muchas simulaciones a partir de condiciones iniciales diferentes y separar mejor la información climática del ruido. También podrían llevarse a cabo de forma rutinaria simulaciones más dilatadas, de cientos de años, con resolución horizontal inferior a un kilómetro cuadrado y una resolución vertical media de 100 metros en los océanos y la atmósfera.

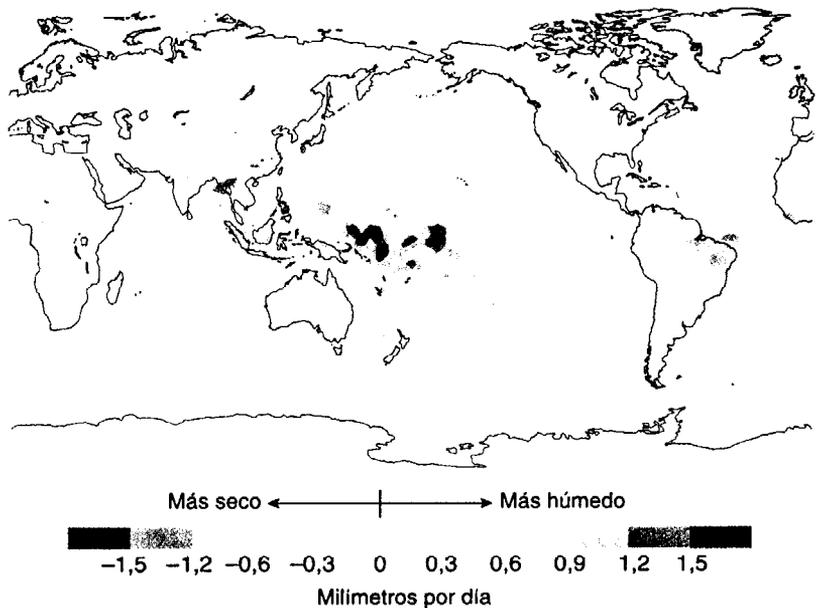
Los ordenadores ultrarrápidos ayudan a predecir el cambio climático sólo si las ecuaciones matemáticas que se introducen en ellos describen bien qué sucede en la naturaleza. Demos un ejemplo: si un modelo de atmósfera se simula cuatro grados Celsius demasiado fría (cosa no demasiado infrecuente hace un decenio), la simulación indicará que la atmósfera puede alojar alrededor de un 20 por ciento menos de agua que su capacidad real, un error importante que provoca que las subsiguientes estimaciones de evaporación y precipitación pierdan todo sentido. Otra dificultad es que no sabemos todavía cómo reproducir adecuadamente todos los procesos que influyen sobre el clima; así, las interrupciones temporales en el ciclo del carbono o las modificaciones operadas en el uso de los suelos. Y lo que es peor, esos cambios pueden iniciar ciclos de realimentación que, de no tenerlos en cuenta, arruinan el modelo. Por ejemplo, la elevación de temperatura refuerza a veces otra variable (el contenido de vapor de agua de la atmósfera) que, a su vez, amplifica la perturbación original. (En este caso, una mayor humedad en el aire induce un calentamiento mayor porque el vapor de agua es un potente gas de invernadero.)

Sólo ahora se está empezando a tomar en consideración la cuantía de la influencia de tales realimentaciones positivas en el vital ciclo del carbono del planeta. Recuérdese, a

TEMPERATURA



PRECIPITACION



este respecto, que la erupción en 1991 del monte Pinatubo, en Filipinas, arrojó a la atmósfera suficientes cenizas y dióxido de azufre para causar un enfriamiento global transitorio a medida que esos compuestos reaccionaban con gotitas de agua en el aire y bloqueaban parte de la radiación solar incidente. Bastaba esa merma de energía para inhibir la absorción de dióxido de carbono por las plantas.

Los cambios operados en el uso de los suelos pueden perturbar los sistemas climáticos regionales y continentales de una manera difícil de traducir en ecuaciones. La tala de bosques para el laboreo o la cría de ganado deja expuesta la superficie. Las tierras

3. Un calentamiento global de hasta cinco grados Celsius (*arriba*) podría incrementar la precipitación (*abajo*) en gran parte del mundo hacia mediados del siglo XXI. Las simulaciones ilustradas usan estimaciones del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático para las emisiones de gases de invernadero y aerosoles de azufre entre los años 2000 y 2050.



4. La deforestación altera el clima en más de un aspecto. Por culpa de la tala, el bosque pierde capacidad de absorber dióxido de carbono del aire. Los bosques, de color oscuro, absorben más energía solar y mantienen la región más caliente y húmeda que las zonas de color claro.

de cultivo tienen un color más claro que los oscuros bosques y, por tanto, reflejan más radiación solar, lo que tiende a enfriar la atmósfera, sobre todo, en verano y otoño.

Pobreza de datos

Sin observaciones rigurosas, susceptibles de comprobación y que muestren que los modelos reflejan la realidad, las simulaciones del clima no serían más que brillantes conjeturas. Dicho de otro modo, para disipar nuestra ignorancia en torno a la sensibilidad del sistema climático a la actividad del hombre, necesitamos saber los cambios operados por el clima en el pasado. Se ha de poder simular adecuadamente las condiciones climáticas anteriores a la Revolución Industrial y, sobre todo desde esa época, cuando la acción humana ha alterado de forma irreversible la composición de la atmósfera.

Para conocer el clima que hubo antes del advenimiento de los satélites meteorológicos y otros instrumentos, nos basamos en diversos indicadores: burbujas de aire y sustancias químicas atrapadas en testigos de hielo, anchura de los anillos de los árboles, crecimiento del coral y depósitos de sedimentos en el fondo de océanos y lagos. Son instantáneas que, ensambladas, nos proporcionan información para reconstruir las condiciones del pasado. Mas, para una comprensión cabal del clima hoy no bastan fotos fijas de magnitudes físicas, químicas y biológicas; se requiere una suerte de larga cinta de vídeo que registre la evolución actual del clima. Entre las variables a contemplar recordemos la medición continua de hielos marinos, del manto de nieve, de la humedad del suelo, de la cubierta vegetal y de la temperatura y salinidad de los mares.

Frente a ello, el panorama presente resulta desolador. Ninguna institución norteameri-

cana ni internacional posee el mandato ni los recursos para seguir la evolución del clima a largo plazo. A los expertos no les queda otro remedio que compilar sus interpretaciones del cambio climático a partir de grandes redes de satélites y sensores de superficie (boyas, buques, observatorios, estaciones meteorológicas y aviones), que cumplen otras funciones, la predicción del tiempo a corto plazo por ejemplo. Por eso, el cuadro de la variabilidad climática del pasado que se obtiene peca a menudo de inexacto, caso de que exista.

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, ente federal estadounidense, tiene en funcionamiento muchas de esas redes, pero no dispone de los recursos necesarios para comprometerse en un programa a largo plazo de vigilancia del clima. Aunque prevé el lanzamiento de satélites dotados de los últimos avances para inspección de varios aspectos de sistemas globales, ni siquiera el proyectado Sistema de Observación Terrestre de la NASA incluye entre sus objetivos la continuidad requerida de un programa de observación del clima a largo plazo.

Cualquiera que sea el estado del seguimiento del clima, habrá que superar en el nuevo decenio otro obstáculo, a saber, el de asegurar que las magnitudes que medimos representen en verdad cambios de varias décadas en el entorno. Con otras palabras: ¿qué ocurre si usamos una nueva cámara o apuntamos en diferente dirección? La vida útil de un satélite típico dura unos cuatro años, antes de sustituirlo por otro que ocupará una órbita distinta. El que lo reemplaza porta, por lo general, nuevos instrumentos y observa la Tierra a una hora diferente del día. Por tanto, con los años acabamos midiendo no sólo la variabilidad climática, sino también los cambios introducidos por el hecho de observar el clima desde una atalaya dis-

tinta. A menos que se tomen, pues, precauciones para cuantificar las modificaciones asociadas a las técnicas de observación y se adopten métodos de muestreo antes de reemplazar el viejo armamentario, el archivo de observaciones climáticas podría quedar inservible porque no habría forma de comparar los nuevos datos con los precedentes.

Los científicos del futuro estarán preparados para evaluar las simulaciones climáticas con datos precisos debidamente archivados. Pero los datos que satélites y sensores críticos de superficie han ido recogiendo corren el peligro de perderse para siempre. Es algo habitual que las observaciones de superficie a largo plazo se registren todavía en anticuadas cintas de papel perforadas o se almacenen en hojas (que se deterioran con el tiempo) o en soportes informáticos caducos. Por ceñirnos a Estados Unidos, la mitad de los datos de los nuevos radares Doppler se pierden porque el sistema de registro deja en manos de los operadores la decisión de conservar los datos durante fenómenos catastróficos, cuando los avisos y otras funciones vitales constituyen la preocupación inmediata.

¿Qué prever?

Si ponemos empeño, de aquí a 50 años comprenderemos, en líneas generales, la influencia del hombre en las características globales, regionales e incluso locales del clima. Pero demorar hasta el último momento para poner manos a la obra sería una temeridad. Los largos tiempos de residencia del dióxido de carbono y otros gases de invernadero en la atmósfera, conjugados con la respuesta lenta del clima a condiciones cambiantes, supondrán que, aun cuando cortásemos en seco toda actividad perjudicial, el planeta habrá de experimentar un cambio importante.

La fusión de los glaciares de los altiplanos andinos y de otras zonas corrobora el calentamiento real del planeta. El ascenso del nivel del mar —y la sumersión de costas— respaldan el calentamiento global previsto, de tal vez dos grados Celsius o más, hacia fines del siglo XXI. No cabe duda que el cambio climático recabará la máxima atención cuando sus efectos agudicen otras presiones ejercidas sobre la sociedad. Uno de los primeros problemas con que muy probablemente

tendremos que enfrentarnos será la proliferación de asentamientos humanos en regiones costeras y zonas bajas vulnerables a las inundaciones. No es el único. Ahora bien, mientras la sociedad pueda apoyarse en falta de un conocimiento evidente de la influencia de la actividad humana sobre el clima, asistiremos a una dura oposición contra leyes restrictivas de la deforestación y de las emisiones por combustión de carburantes fósiles.

La necesidad de resolver y anticipar cuánto influimos sobre nuestro mundo constituye un argumento de peso para no retrasar ni un minuto más el desarrollo de sistemas exhaustivos de observación y recogida de datos. Con esa información se elaborarían modelos fidedignos de la evolución del clima a varios años vista. Asistidos por una planificación adecuada, podríamos proyectar presas y pantanos capaces de absorber las inundaciones que se anticipan; sabríamos también la cuantía en que las emisiones de gases de invernadero de nuevas centrales térmicas calentarían el planeta.

El cambio climático ha empezado ya. Podemos intervenir para frenarlo y hacerlo con buen sentido y criterio. Pero de momento no hemos dado ningún paso. Para prever la situación real del clima futuro, se han de superar los obstáculos señalados. No entraña especial dificultad subvenir a las necesidades de mayor potencia de cálculo y desentrañar las interacciones climáticas en sus mínimos detalles. El auténtico problema estriba en comprometerse en la vigilancia del clima global a largo plazo. ¿Cómo conseguir que los gobiernos asignen fondos y recursos para decenios de vigilancia, cuando el poder cambia de manos con tanta frecuencia?

Si deseamos estar en condiciones de predecir los efectos antropogénicos en el clima para el año 2050 —y comenzar a arreglar el desbarajuste de nuestro ambiente— debemos emprender otro camino. Contamos con una herramienta para abrir esa senda: el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, firmado por el presidente George Bush en 1992. El convenio obliga a 179 gobiernos a poner coto a las actividades que redunden en perjuicio del clima. La alianza dio un paso hacia la estabilización de gases de invernadero al elaborar el Protocolo de Kyoto en 1997, pero los sistemas de vigilancia a largo plazo continúan en punto muerto.

LOS AUTORES



THOMAS R. KARL dirige, desde 1998, el norteamericano Centro Nacional de Datos Climáticos, en Asheville, el mayor archivo de datos climáticos del mundo, integrado en la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica. Karl ha centrado gran parte de sus investigaciones en tendencias climáticas y tiempos extremos.



KEVIN E. TRENBERTH dirige la sección de análisis climático en el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas en Boulder, donde estudia el fenómeno de El Niño y la variabilidad climática. Después de varios años en el Servicio Meteorológico de Nueva Zelanda, fue profesor de ciencias atmosféricas en la Universidad de Illinois en 1977.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GLOBAL WARMING: IT'S HAPPENING. Kevin E. Trenberth en *naturalSCIENCE*, vol. 1, artículo 9, 1997. Puede consultarse en naturalscience.com/ns/articles/01-09/ns/_ket.html en la World Wide Web.

ADEQUACY OF CLIMATE OBSERVING SYSTEMS, 1999. Commission on Geosciences, Environment, and Resources. National Academy Press, 1999. Puede consultarse en www.nap.edu/books/0309063906/html/ en la World Wide Web.

CLIMATE CHANGE AND GREENHOUSE GASES. Tamara S. Ledley et al. En *EOS*, vol. 80, n.º 39, páginas 453-458; 28 sept. 1999. Puede consultarse en www.agu.org/eos_elec/99148e.html en la World Wide Web.