





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

Principios físicos e incertidumbres en el calentamiento global y cambio climático

GERARDO DE JESÚS MONTOYA GAVIRIA

De acuerdo con el IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), las expectativas sobre cambio climático y calentamiento global en los próximos años van desde moderadas hasta catastróficas en algunos sectores. Sin embargo, el aún incompleto conocimiento científico, la complejidad del sistema climático y las múltiples interacciones que determinan su comportamiento, imponen limitaciones en nuestra habilidad para comprender completamente el curso futuro del clima global del planeta. Esta situación ha creado la necesidad de analizar las incertidumbres asociadas con la complejidad del clima, el estado de su conocimiento, los modelos y la proyección de escenarios de cambio climático. En este artículo se presentan algunos principios físicos que sustentan la teoría del cambio climático y las incertidumbres asociadas sin tratar, de manera alguna, de minimizar, con esto último, la severidad de los cambios climáticos que se avecinan ni la urgente necesidad de toma de decisiones tanto a nivel político como económico y social.

Como en otros campos del estudio científico, existen incertidumbres asociadas con la ciencia del calentamiento global. Esto no implica que todas las cosas sean igualmente inciertas. Algunos aspectos de la ciencia son basados en leyes bien conocidas de la física, mientras que otros aspectos se encuentran dentro del rango desde “cercanamente ciertos” hasta “grandes preguntas”.

No hay duda de que el aumento de gas carbónico en la atmósfera y de otros gases de invernadero es en gran medida el resultado de actividades humanas. También es bien aceptado por los científicos que los gases de invernadero atrapan el calor en la atmósfera de la Tierra y que tienden a calentar el planeta.

También es absolutamente cierto que, en las últimas décadas, una tendencia de calentamiento se viene registrando tanto en el hemisferio norte como en el sur. Confirmación de esto se puede observar en las mediciones de la temperatura media, el continuo deshielo de los glaciares, decrecimiento de la cobertura de nieve en el hemisferio norte y otras evidencias.

Sin embargo, algunos hechos son probables pero no completamente ciertos. Por ejemplo, no podemos asegurar con 100% de certeza que el proceso de calentamiento global sea únicamente debido a la actividad humana, ya que en este proceso intervienen otros factores. El entendimiento científico de la influencia de factores tales como variaciones climáticas natura-

les, cambios en la energía solar, o el efecto de enfriamiento de los aerosoles producidos por contaminación, continúa siendo incompleto.

El IPCC advierte que el calentamiento proyectado podría ser mayor a cualquiera otro que haya sido observado en los últimos 10.000 años. Sin embargo, hay grandes preguntas que quedan pendientes.

Los científicos han construido con cierto grado de confiabilidad, a nivel global, proyecciones de cambio climático en la temperatura, la precipitación, aumento medio del nivel de mar y otras variables meteorológicas (por ejemplo: la temperatura media aumentará 3 o 4 °C, el nivel del mar subirá 0,5 m, etc...). Sin embargo, cuando estas proyecciones se llevan a escalas regional y local, la confiabilidad de estos escenarios disminuye, a pesar de que se requiere bastante exactitud, especialmente cuando se trata de identificar, a escala local, el grado de vulnerabilidad para ciertas áreas de la salud, la agricultura, recursos hídricos, bosques y biodiversidad, por ejemplo.

Como el mismo IPCC advierte, sistemas tan complejos como el clima pueden responder de manera no lineal y producir sorpresas. Por ejemplo, es probable que en un planeta más caliente sean más frecuentes y más intensas las tormentas tropicales y los huracanes. Las evidencias preliminares sugieren que una vez el huracán se haya formado será más intenso al moverse sobre una superficie oceánica más cálida. La pregunta que se hacen los científicos es:

Use más tiempo la ropa

Los bluyines, las medias y las sudaderas, por ejemplo, pueden ser usados, por lo menos, dos días seguidos. Usar la lavadora de ropa con mucha frecuencia gasta mucha energía (algunas: combustible fósil) y daña las prendas. Puede optar, también, por lavarla sólo cuando se arrugue.

¿qué tan frecuente serán los huracanes y otras tormentas? Su temor es que se acumulen demasiado los gases de invernadero y calienten las aguas del Pacífico, al punto de que el fenómeno del Niño sea más frecuente y feroz, lo que llevaría a una redistribución de huracanes y tormentas, al menos en el Pacífico. Éstos y otros interrogantes preocupan no sólo a la comunidad científica sino también a ambientalistas, sociólogos, políticos, hombres de empresa y a la comunidad en general.

En este artículo se describen principios físicos y algunas incertidumbres asociadas con el problema del cambio climático y el calentamiento global. Para mayor claridad, ellas se presentan dentro de la problemática del clima y los modelos climáticos. En el siguiente párrafo se introduce el clima de equilibrio y el sistema climático, luego se discute sobre los modelos climáticos y sus resultados y finalmente se describen los diferentes tipos de incertidumbre.

El clima de equilibrio y el sistema climático

La palabra clima, proveniente del griego “*klinein*” (inclinación), hace referencia a la inclinación de la órbita de la eclíptica con relación al ecuador celeste. El ángulo de inclinación actual ($23,5^\circ$) determina la cantidad de la energía solar proveniente del sol duran-

te el año en diferentes latitudes, lo que, a la vez, hace parte del balance energético del planeta (figura 1).

La vida en nuestro planeta se hizo posible solamente a través del establecimiento de un clima de equilibrio. La radiación solar es abundante en los trópicos y escasa en latitudes cercanas a los polos. A causa de las diferencias en tempe-

ratura, se forman los vientos, las perturbaciones en la atmósfera (ciclones extratropicales, tormentas, huracanes, etc.) y corrientes marinas (figura 2). Por medio de estos mecanismos, se transporta calor entre diferentes latitudes, lo que a la postre resulta en equilibrio climático.

La palabra clima, proveniente del griego “*klinein*” (inclinación), hace referencia a la inclinación de la órbita de la eclíptica con relación al ecuador celeste.

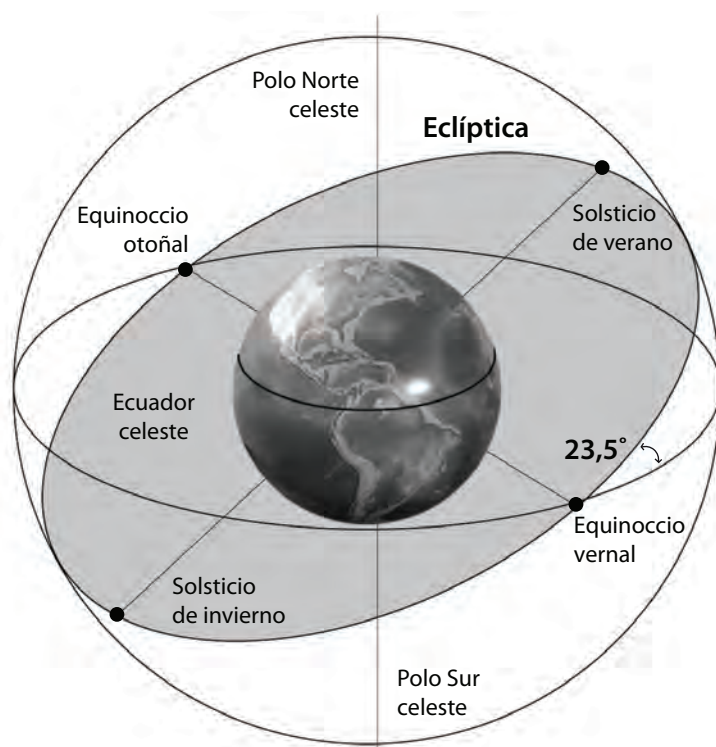


Figura 1. Eclíptica.

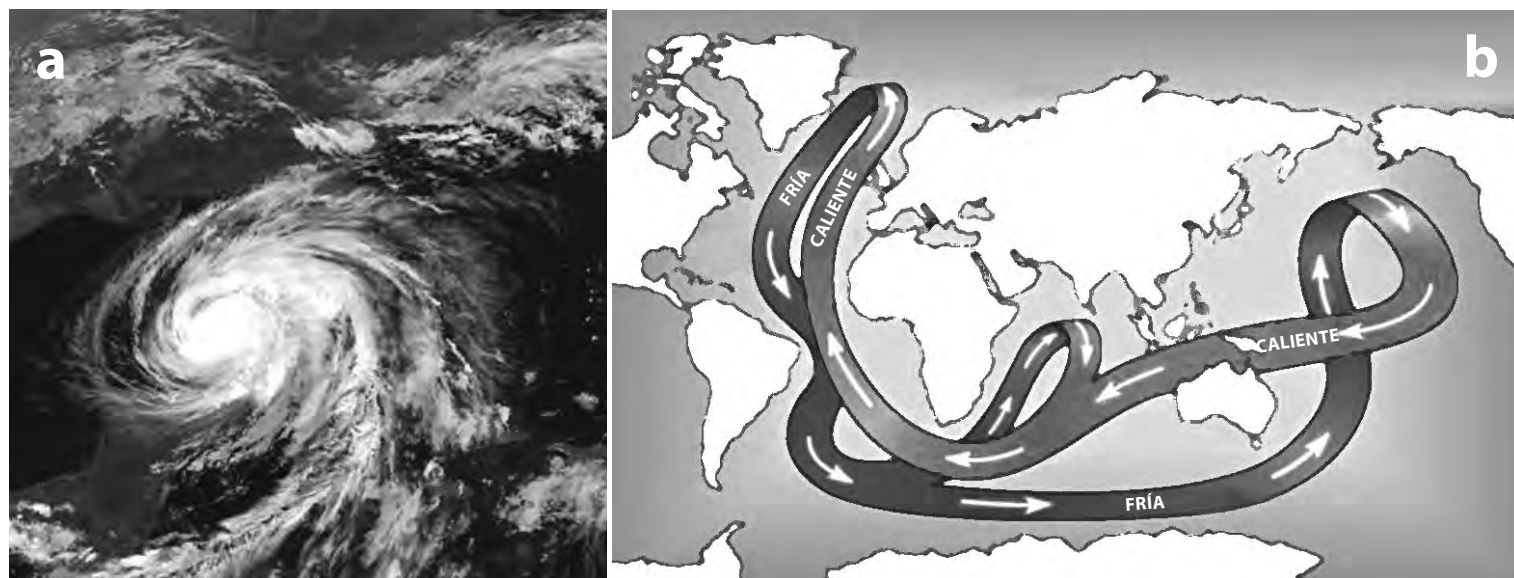


Figura 2. (a) Ejemplo de una perturbación atmosférica, huracán Ike. (b) Circulación oceánica.

Además de las corrientes atmosféricas y oceánicas, en el sistema climático intervienen otros componentes, tales como radiación solar, aerosoles y gases atmosféricos, nubes, hielo marino, glaciares, la superficie terrestre, la biosfera, la criosfera, etc. Algunos de estos sistemas se presentan en la figura 3.

Estos componentes intervienen en complejas interacciones no lineales, a menudo con efectos de retroalimentación positiva o negativa. Por ejemplo, respondiendo al calentamiento diferencial provocado por el sol en la superficie terrestre, se forman nubes que, con su cobertura superior expuesta al espacio exterior, reflejan la radiación solar provocando enfriamiento o retroalimentación negativa. Por

otro lado, la parte inferior de la nube devuelve la radiación de onda larga emitida por la Tierra, provocando calentamiento o retroalimentación positiva. El efecto neto provocado por las nubes sobre el calentamiento global es una de las mayores incertidumbres en el estado actual del conocimiento. Otro ejemplo de retroalimentación positiva es la interacción entre el calentamiento global y el derretimiento del hielo y la nieve en latitudes medias (cuadro 1).

Además de la complejidad, una dificultad adicional se presenta para el modelador climático, y es que cada uno de los componentes del sistema climático tiene diferente tiempo de respuesta. Por el ejemplo, la atmósfera puede responder en cuestión de horas a cambios

Instale un calentador solar para el agua

Los calentadores solares suelen ser más costosos que los eléctricos, o los de gas natural, en el mercado. Sin embargo, es una inversión que dura más tiempo y que reduce sustancialmente las cuentas de energía y gas.

Construir uno usted mismo, es otra opción más barata e interesante.

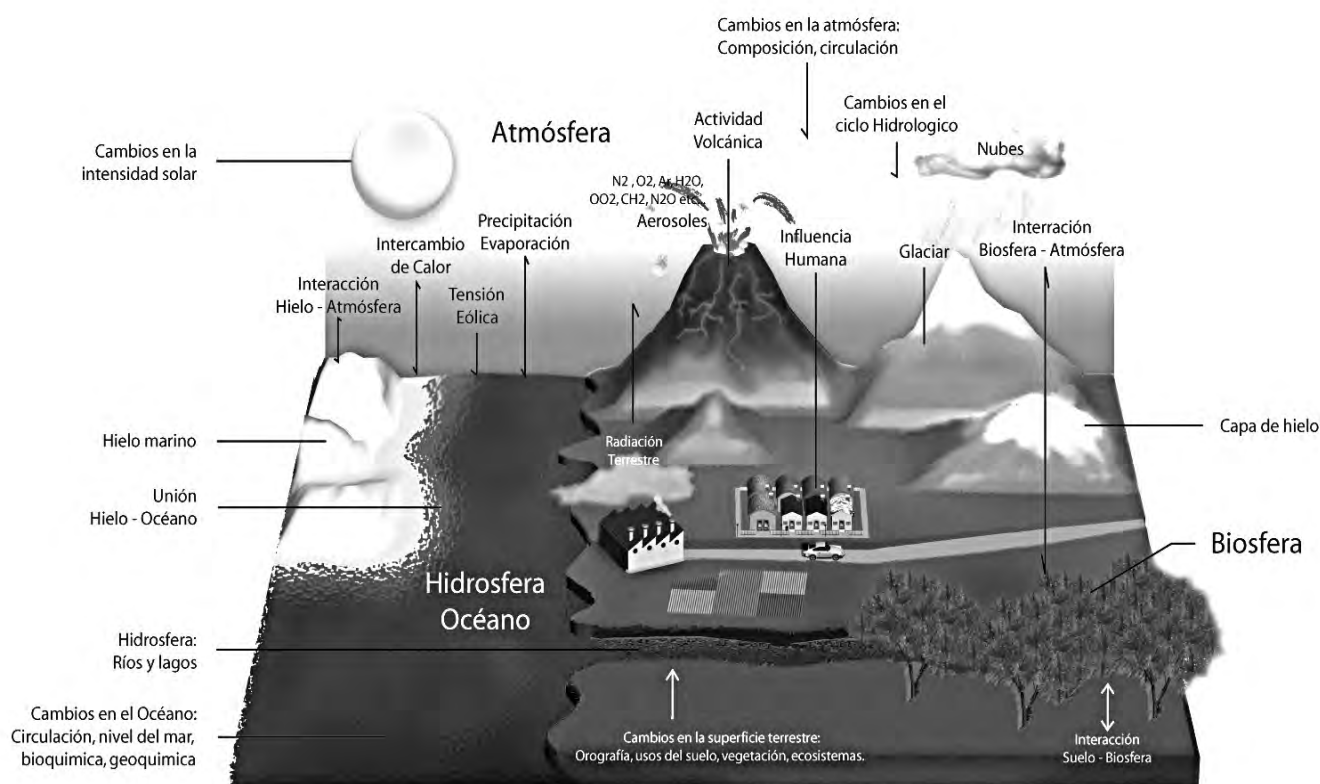


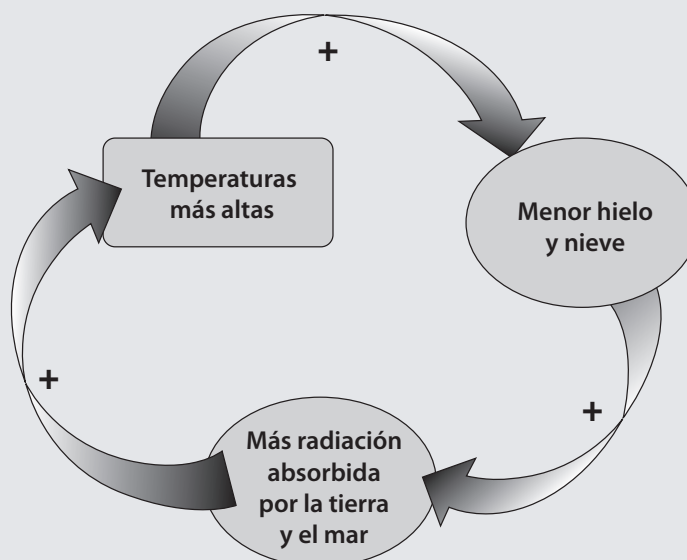
Figura 3. Componentes del sistema climático (Infografía: José Luis Pacateque).

CUADRO 1 PROCESOS DE RETROALIMENTACIÓN

En teoría de sistemas, el procesos de reatoolimentación se pueden entender como un proceso cíclico, casual donde la salida (efecto) comienza a ser parte de la entrada (causa).

El hielo marino y la nieve, debido a su alto albedo, reflejan gran parte de la radiación solar contribuyendo con esto al balance energético del planeta.

Sin embargo, debido al calentamiento global, la cobertura de hielo y nieve disminuye, dejando expuesta una superficie (el mar o la Tierra) con gran capacidad de absorción de la radiación solar, lo que aumenta aun más el calentamiento global (Euskirchen, *et al.*, 2005). Este tipo de respuesta en donde el efecto final incrementa la causa que lo produce, se conoce como efecto de retroalimentación positiva.



en la superficie de la Tierra, mientras que para un cambio en la circulación en el océano profundo se necesitan cientos de años, y en los glaciares miles de años.

3. Cambio climático y modelamiento climático

El cambio climático se puede entender como la transición, debido a una forzante (cuadro 2), a un nuevo estado de equilibrio, pero con nuevos valores para algunos de sus componentes, como la temperatura media en la superficie de la Tierra, la precipitación, etc.

En el calentamiento global actual y cambio climático que se avecina, la forzante es el aumento de CO₂ en la atmósfera y de otros gases de invernadero. Sin embargo, en el pasado se han registrado cambios climáticos debido a otras forzantes, tales como cambios en los parámetros de la órbita de la Tierra, la circulación oceánica, etc. (Stute *et al.*, 2001). Sobre los cambios climáticos sucedidos en el pasado se puede

inferir a través de evidencias registradas en la corteza de los árboles, las capas de hielo, corales, sedimentos lacustres y otros registros paleoclimáticos. Sin embargo, sobre los cambios que sucederán en el futuro sólo se puede concluir a través de modelos climáticos.

Un modelo, o sistema de modelamiento climático, es un conjunto de programas basados en principios generales de la dinámica de fluidos y la termodinámica. Los modelos climáticos tienen su origen en la predicción numérica del tiempo, describen de manera explícita la dinámica de la atmósfera y el océano y son diseñados para reproducir, lo más fielmente posible, el sistema climático real. El núcleo central en el sistema de modelamiento climático (figura 4) es el modelo atmosférico o de circulación global.

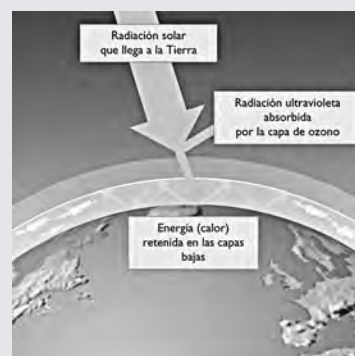
Las etapas más importantes en la construcción de un modelo atmosférico son: a) la estructuración de las ecuaciones del modelo, b) las parametrizaciones físicas, c) la grilla de puntos, d) la solución nu-

CUADRO 2

FORZANTES EN CAMBIO CLIMÁTICO

La forzante climática es el conductor inicial del clima.

La irradiancia, o intensidad de la radiación solar, es la forzante primaria en el sistema climático. Si el sol genera más luz, la Tierra será más caliente.



Ilumine con cautela

Afortunadamente ya no es extraño encontrar vitrinas apagadas por la noche, inclusive algunos almacenes tienen controles para iluminar solamente los departamentos donde hay clientes.

Haga lo mismo en su casa, si está leyendo usted no necesita más que una lamparita de luz focalizada.

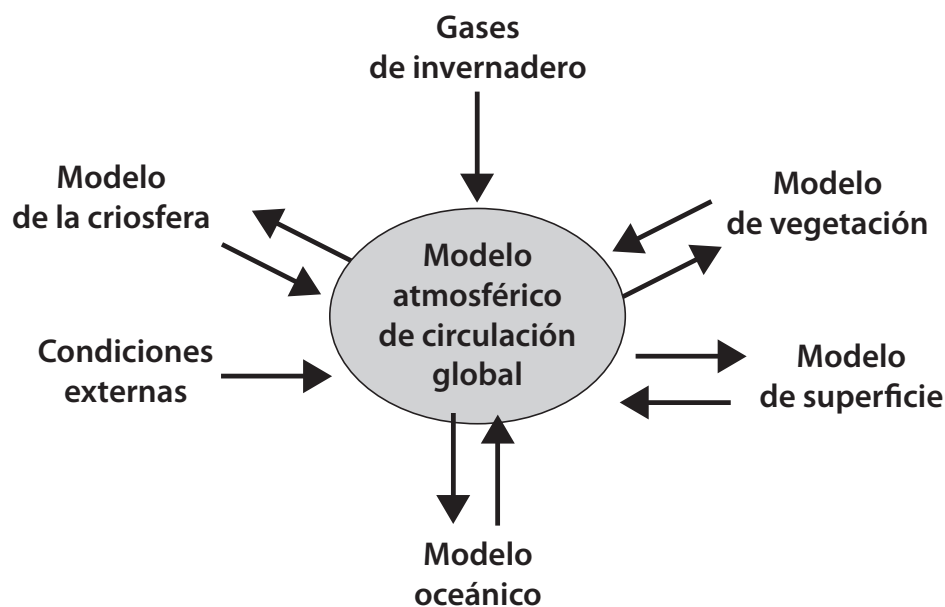


Figura 4. Sistema de modelamiento climático.

mérica, y e) las condiciones iniciales y de contorno. Todas estas consideraciones se tienen en cuenta, dentro del modelo, sólo de manera aproximada, y de su nivel de aproximación depende la exactitud de los resultados del modelo. Una vez construido el modelo climático, el siguiente paso es validarlo recreando climas del pasado y simulando el clima actual. A manera de ejemplo se muestra una comparación entre la precipitación media anual observada en el planeta (figura 5a) y la simulada (figura 5b) (IPCC, 2007). Comparando las figuras 5a y 5b se puede observar que el modelo capta bien los principales rasgos de la precipitación mundial como, por ejemplo, la zona de convergencia intertropical y el bosque lluvioso en la parte central y occidental de la Amazonía. Sin embargo, el modelo subvalora la lluvia al este de la Amazonía, en la ITCZ (*Intertropical Convergence Zone*) entre África y Suramérica y en el Atlántico al este de los EE.UU. Por otro lado, el modelo sobreestima la precipitación sobre las áreas montañosas de la cordillera de los Andes y en los Himalayas entre India y China.

Después de la validación, el siguiente paso es correr el modelo con una forzante, por ejemplo dupli-

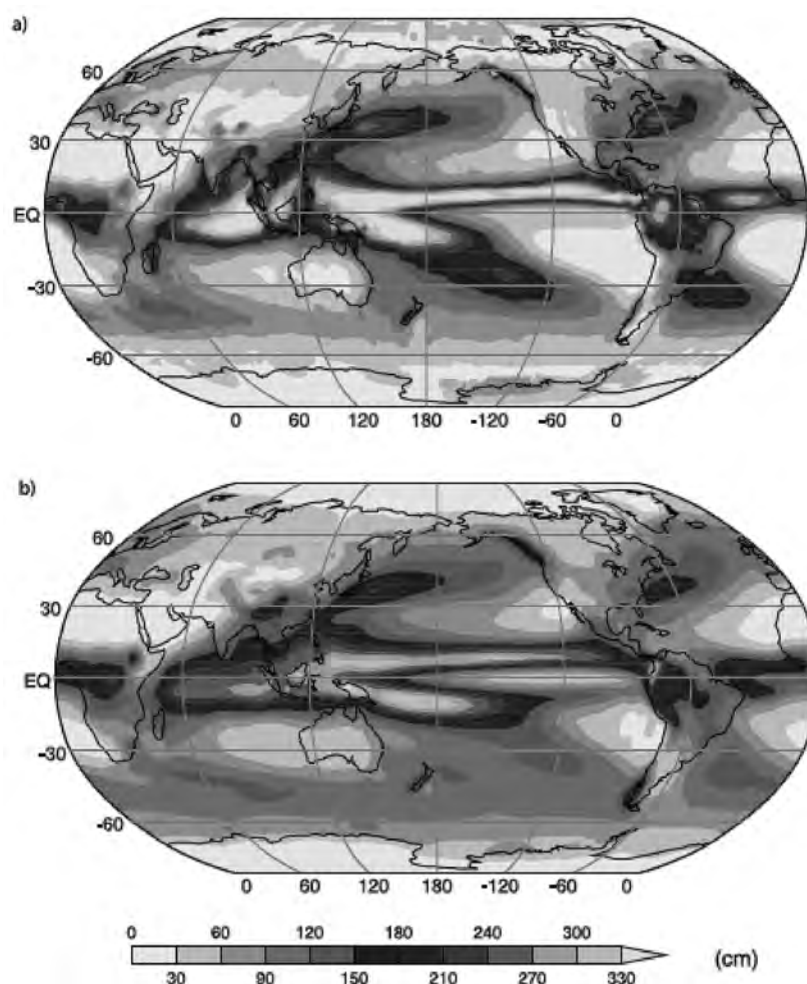


Figura 5. Comparación de la precipitación mundial media anual: (a) observada y (b) simulada de acuerdo con el IPCC (2007).

cando el contenido de CO₂ en la atmósfera, durante 100 a 150 años o más. En esto consiste la construcción de escenarios de cambio climático.

En la figura 6 se muestra la proyección de la precipitación global media anual, construida por el IPCC para el período 2080 a 2099, referente al período 1980 a 2099. Para la construcción de esta proyección, el modelo climático ha sido forzado con un escenario de emisión de gases de invernadero, proyectado para el mismo período.

En la proyección global de la figura 6 se observa que, para el caso de Colombia, probablemente habrá deficiencia de lluvia en la región Caribe y en la parte norte de la región andina, exceso en el centro y sur de la región andina y en la región pacífica.

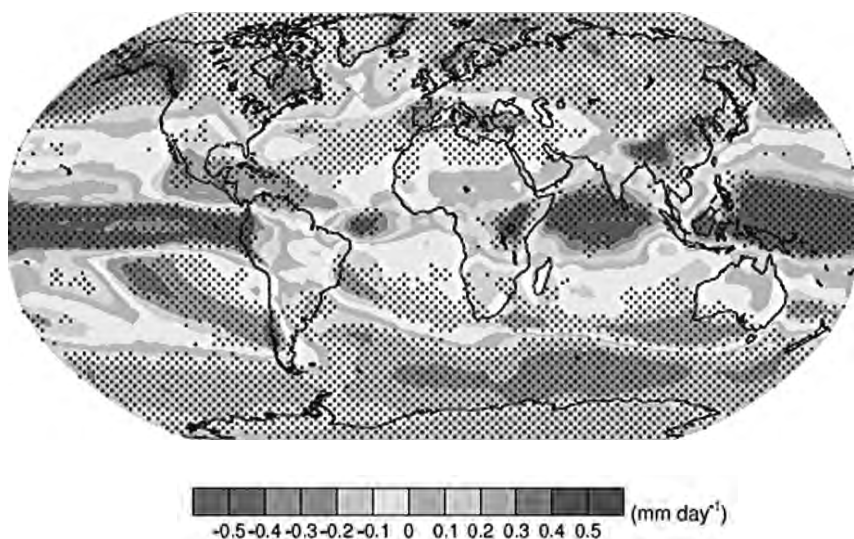


Figura 6. Proyección de la precipitación mundial, media anual para el período 2080 a 2099 de acuerdo con el IPCC (2007).

Incertidumbres

El papel de las incertidumbres en la toma de decisiones

Las naciones del mundo están actualmente enfrentadas a un largo proceso de discusiones y toma de decisiones sobre la manera en que intentan manejar el impacto humano en la atmósfera del planeta. Por un lado, debido a que muchos de los gases de invernadero tienen tiempos de residencia en la atmósfera de decenios, hasta centurias, el efecto sobre el balance energético y el clima del planeta puede ser irreversible. Por otro lado, las medidas de control que se tomen serán costosas y afectarán el nivel de vida de los pueblos. Desafortunadamente, estas medidas hay que tomarlas aun encarando grandes incertidumbres acerca de los efectos antropogénicos y el curso que tomará el clima en el futuro.

Como se mencionó en el resumen, las incertidumbres en el cambio climático se pueden agrupar asociadas con: 1) complejidad del clima y el estado de su conocimiento, 2) inexactitudes en los modelos, 3) incertidumbre en la proyección de escenarios locales de cambio climático, 4) incertidumbre en la proyección de impactos socio-económicos y 5) incertidumbre asociada con la proyección de futuros escenarios de emisión de gases de invernadero dependiendo de si se toman, o no, medidas para la reducción de las emisiones en el futuro próximo.

Encienda sólo lo necesario

Usted no necesita tener dos televisores prendidos, al mismo tiempo, en el mismo canal. Si está aspirando apague la música, si se está secando el pelo apague el computador y no deje la estufa prendida si está hablando por teléfono. También, es bueno apagar la nevera si está de vacaciones.

Incertidumbres asociadas con la complejidad del clima y su conocimiento

Como se mencionó anteriormente, la forzante del cambio climático actual es el efecto de invernadero provocado por el aumento de la concentración del CO₂ en la atmósfera. Sin embargo, existe la posibilidad de que el cambio climático pueda ser forzado igualmente por algunos de los siguientes factores:

Cambio en la irradiancia o intensidad solar

Mediciones de la irradiancia solar a través del seguimiento de las manchas solares, muestran ciclos de once años, con una variación de la intensidad solar en 0,08% entre un máximo y un mínimo, pero sin ninguna tendencia a largo plazo. A pesar de que no existen evidencias sobre tendencias en el cambio de la irradiancia solar durante los últimos 50 años, los científicos no descartan la posibilidad de que existan otros ciclos mayores a los de las manchas solares, ya que antes de 1972 no se realizaba este tipo de mediciones.

Erupciones volcánicas

Los aerosoles emitidos durante las erupciones volcánicas afectan los balances de radiación en la estratosfera, la troposfera y la superficie de la Tierra. Estos aerosoles tienen la capacidad de reflejar la luz solar y absorber tanto la radiación de onda corta como la de onda larga. En el primer caso se produce enfriamiento y en el segundo calentamiento. Las erupciones volcánicas enfrían la superficie pero calientan la estratosfera, siendo este calentamiento mayor en el trópico que en latitudes altas. La última erupción volcánica fue la del Pinatubo en 1992, cuyos efectos se extendieron durante dos años. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de nuevas y mayores erupciones volcánicas en el futuro.

Efecto de las nubes

Nubes en diferentes niveles de la atmósfera pueden tener efectos opuestos sobre el clima, debido a

que ellas pueden de igual forma atrapar la radiación terrestre y reflejar la radiación solar. Nubes altas tienen topes más fríos e irradian menos radiación infrarroja. Nubes finas tipo cirro reflejan menos radiación solar que nubes tipo estrato.

Las nubes y el vapor de agua transportan energía potencial y en forma de calor latente. Además, las nubes pueden ser generadas por núcleos de condensación compuestos por aerosoles sulfatados de origen tanto natural como antropogénico. Esto hace aun más difícil la tarea de resolver el signo de las retroalimentaciones.

Por eso, como se mencionó al principio, una de las mayores incertidumbres en el cambio climático es el papel definitivo que jugarían las nubes. Además, debido al calentamiento global, éstas se pueden incrementar a medida que se incremente el ciclo hidrológico sobre superficies oceánicas más cálidas.

Efecto de los aerosoles

Los aerosoles producidos por la contaminación reflejan la radiación solar produciendo un efecto de retroalimentación negativa. Pero, al servir de núcleos de condensación en la formación de nubes, pueden tener, como ya se vio, un efecto tanto positivo como negativo. Estudios recientes muestran que el aumento de núcleos de condensación conlleva a un aumento en la concentración de gotas y disminución del radio medio de las mismas. Esto último conlleva a una disminución de la precipitación, lo que también afectaría la extensión vertical de la nube.

Efecto del vapor de agua

El vapor de agua posee un efecto de invernadero más potente que el del CO₂. Sobre una superficie oceánica más cálida, se aumenta la evaporación. Sin embargo el mayor efecto de esta retroalimentación positiva depende de su transporte hacia latitudes medias. Su efecto también puede ser negativo o positivo dependiendo de la cantidad que sea transferida para formar nubes.

Efecto del océano

La radiación solar afecta al océano a través de calentamiento y evaporación en la interfase mar/atmósfera y suministrando luz para la fotosíntesis en la capa superficial. Por su lado, el océano afecta al clima con enfriamiento y remoción de CO_2 . Sin embargo, la habilidad del océano para remover CO_2 de la atmósfera disminuye con el aumento de la temperatura, afectando con esto el ciclo del carbono y originando una retroalimentación positiva para el CO_2 .

En cantidades que varían de un lugar a otro y de una estación a otra, la atmósfera intercambia con el océano calor y humedad. Aquella también le imparte momento a través del viento, con el cual ayuda a crear muchas de las corrientes superficiales marinas. Los flujos de momento, calor y humedad entre el océano y la atmósfera ayudan a determinar el clima regional y

la temperatura media del planeta. Sin embargo, existen incertidumbres tanto en el cálculo de los flujos observados como en los simulados por los modelos acoplados océano-atmósfera, tal como se muestra en la figura 7, tomada de IPCC (2007). En esta figura las líneas negras (continua y punteada) corresponden a dos flujos de calor medidos por diferentes instituciones. Las líneas en color corresponden a los flujos calculados por varios modelos.

Otro aspecto crucial está asociado con el papel que juega la circulación oceánica profunda o circulación termohalina, que transporta calor, masas de agua y también CO_2 y sal, circundando todo el planeta (cuadro 3).

En resumen, la gran incertidumbre sobre el efecto del océano en el calentamiento global es: ¿cuál es el papel que jugarían los océanos planetarios en el intercambio de calor y CO_2 con la atmósfera?

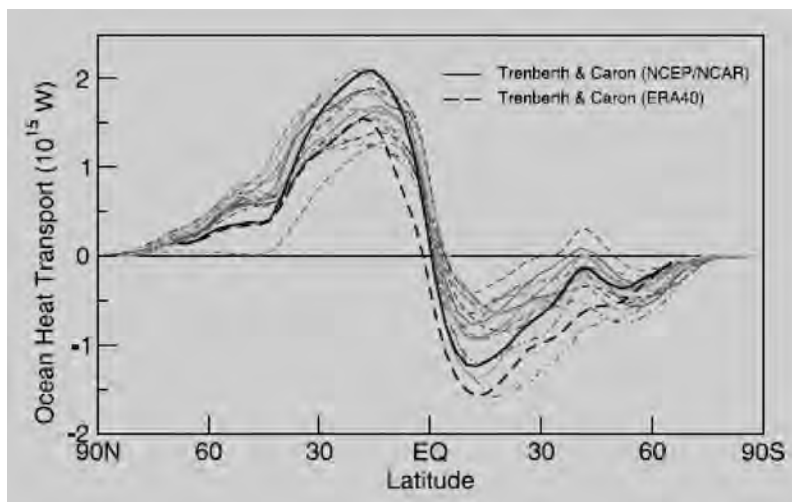


Figura 7. Flujo de calor en la interfase océano atmósfera. Tomado de IPCC (2007).

Efecto de la reducción de los glaciares y de la capa de hielo

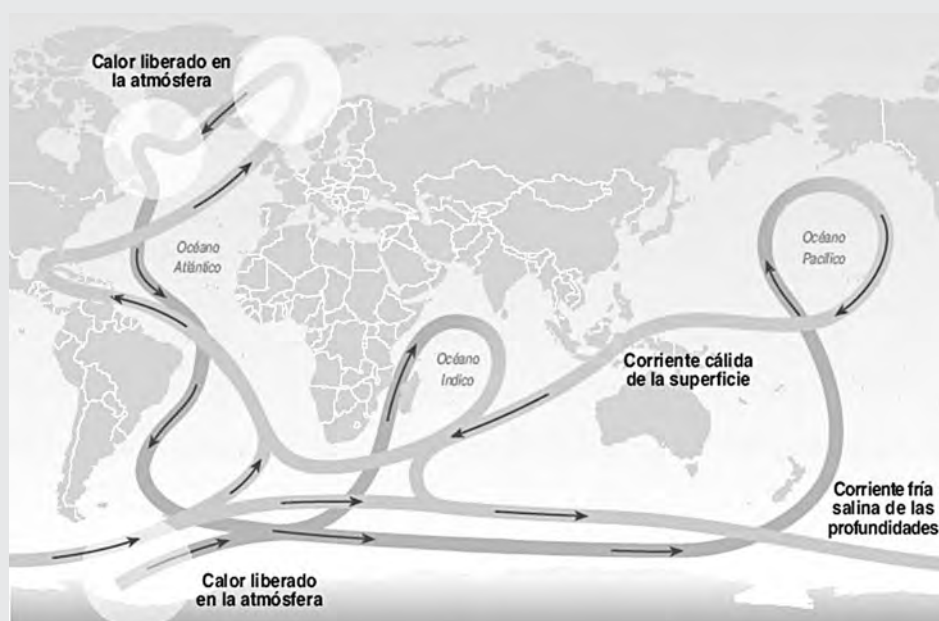
La reducción de los glaciares y de las capas de hielo puede afectar la circulación oceánica disminuyendo su temperatura y su salinidad al aumentar el flujo de agua más fría y fresca. Esto podría debilitar la corriente del Atlántico norte tornando el noroeste de Europa más frío.

El descongelamiento de la capa de hielo en latitudes altas llamada *permafrost*, además del efecto de

Sea una persona diurna

Las personas nocturnas gastan un porcentaje bastante mayor de electricidad porque necesitan de luz en los distintos espacios de la casa que utilizan.
¡Viva de día! Abra las ventanas, deje que entre el sol, no cometa el error de encerrarse y tener que prender luces sin necesidad.

CUADRO 3
CIRCULACIÓN TERMOHALINA



La circulación termohalina es una corriente marina, o sistema de corrientes, mantenida por diferencias en temperatura y salinidad en dirección tanto horizontal como vertical. Comenzando el recorrido, por ejemplo, en el golfo de México, la corriente transporta aguas cálidas y superficiales hacia latitudes altas. Este tramo horizontal se le conoce también con el nombre de corriente de volcamiento meridional, MOC (meridional overturning circulation). Al alcanzar el Ártico, la corriente, ya más fría y más densa, se sumerge en las profundidades oceánicas formando una corriente de retorno que va hasta el océano Índico y el Polo Sur. La corriente de retorno serpentea y se expande abarcando decenas de miles de kilómetros. Después de alcanzar las latitudes más sureñas, la corriente regresa de nuevo sobre aguas cada vez más cálidas hasta su surgimiento en latitudes tropicales, en un viaje que puede durar hasta 1.600 años (UCAR, 2007).

La corriente MOC hace que el clima frío de latitudes medias y altas sea más suave y que el trópico no sea tan caliente. Sin embargo, la circulación termohalina puede colapsar, debido a la mezcla con grandes cantidades de agua dulce, lo que de hecho ya sucedió en el pasado, durante el período del “Younger Dryas”, cuando inmensas cantidades de agua dulce fueron vertidas al océano Atlántico por los lagos Agassiz y Ojibway que cubrían parte de Norte América y Canadá, con los correspondientes efectos de enfriamiento, como la pequeña edad de hielo sucedida en Europa por aquel entonces.

retroalimentación positiva ya mencionado, permitirá adicionalmente la liberación de grandes cantidades de gas metano, retenido durante milenios. El efecto de invernadero del gas metano es 20 veces mayor que el del CO₂.

La pregunta es: ¿qué tan grande sería este efecto de retroalimentación positiva, provocado por el descongelamiento, en el calentamiento global?

Efecto en la vegetación

Uno de los efectos en la vegetación es que, a medida que el calentamiento global avanza, algunas regiones del planeta se cubren de vegetación, como la zona de tundra en latitudes medias. Al aumentar la vegetación, también se cambia el albedo y en consecuencia el balance de radiación solar.

Incertidumbres asociadas con los modelos

Las incertidumbres en los modelos de simulación climática pueden estar vinculadas con:

a) Falta de observaciones e imperfecciones en los modelos, debido al uso de métodos aproximados en alguna de las etapas del modelamiento mencionadas anteriormente, como: las parametrizaciones físicas, la solución numérica, etc. Este tipo de incertidumbre puede ser minimizado en investigaciones futuras. De hecho, los modelos presentes son de mejor calidad que los del pasado.

b) Incertidumbres asociadas con procesos de variabilidad natural que involucran interacciones complejas, no lineales y caóticas, haciendo a las variables climáticas muy sensibles a pequeñas variaciones en el sistema. En este caso el sistema natural le impone restricciones a la predictabilidad del sistema, limitándolo a estimar cambios en valores medios de las variables.

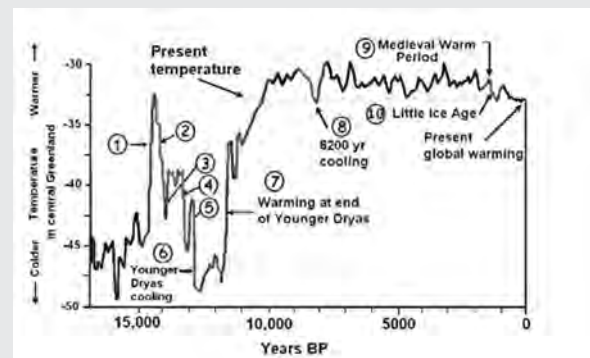
c) Incertidumbre con procesos que son esencialmente impredecibles como, por ejemplo, los avances tecnológicos.

Otro problema de los modelos climáticos es que, de acuerdo con registros del pasado, el clima,

CUADRO 4 CAMBIOS CLIMÁTICOS ABRUPTOS

Los Cambios climáticos abruptos son cambios rápidos, en tiempos tan cortos como una década, en donde la temperatura, la precipitación, etc., cambian significativamente. Estos cambios están asociados con un cambio en la circulación termohalina, y de hecho ya han sucedido en el pasado, como el que ocurrió durante el período llamado el “Younger Dryas”, 12.800 años a.C., o el sucedido 8.200 años a.C. (ver figura).

Algunos observadores han manifestado su preocupación en el sentido de que el calentamiento global puede conducir a un umbral climático desde el cual se dispararía un cambio climático abrupto hacia un nuevo estado de equilibrio climático. Los expertos consideran que, aunque un cambio climático de ese tipo es posible, es poco probable que suceda dentro de los próximos 100 años.



Aproveche el sol

El sol ilumina, da calor, en pocas cantidades es bueno para la piel, para el ánimo y para evitar la anemia, entre otras cosas. Reduzca el tiempo que dedica a ver televisión y a entretenerse con video-juegos o en el computador. ¡Salga! Sea menos sedentario, gaste más de su propia energía.

en varias ocasiones, cambió abruptamente. Los cambios simulados por los modelos son, por el contrario, paulatinos (Pen State, 2001), y éstos no están actualmente capacitados para incluir este tipo de efectos (cuadro 4).

Incertidumbres en las proyecciones de cambio climático

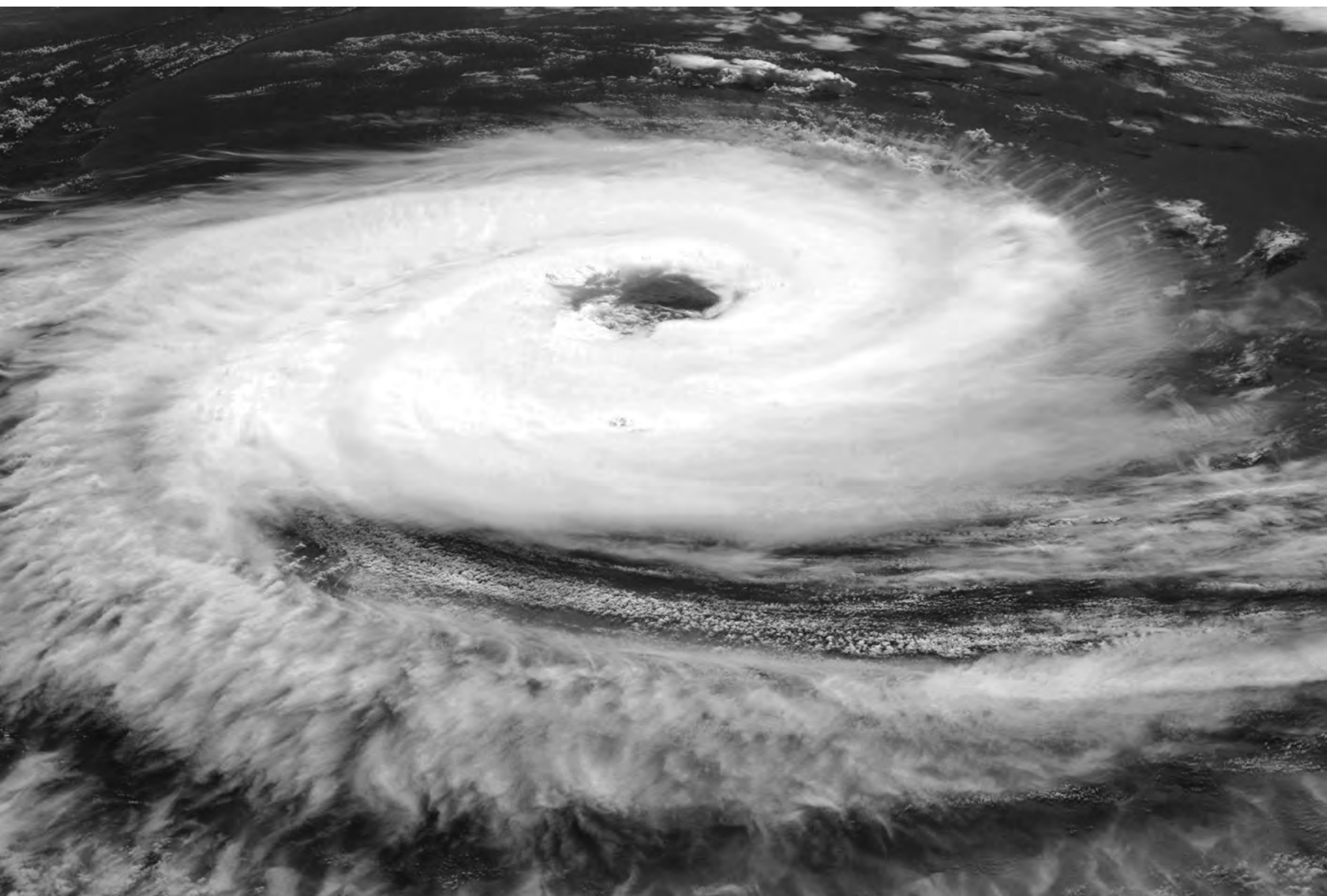
Una de las mayores incertidumbres en las proyecciones de cambio climático es acerca de cómo los cambios en la temperatura global se distribuirían entre las regiones, a lo largo de las estaciones y, también, cómo se verían afectadas otras características climáti-

cas como la precipitación, la severidad de las tormentas, el nivel del mar, etc.

Cambios en la precipitación y en episodios extremos del estado del tiempo y del clima

Los científicos esperan un planeta más cálido y más húmedo. En término medio, las temperaturas más altas conducen a mayor evaporación, humedad y lluvias. El IPCC espera un incremento en los valores extremos con temperaturas mínimas diarias más altas, más días cálidos y más ondas de calor. Sin embargo, la relación entre el aumento de la temperatura media y

Huracán Katrina, 2004. Foto tomada por un astronauta.
 Archivo del Johnson Space Center de la NASA.



los eventos extremos es muy incierta. El calentamiento también puede cambiar la frecuencia e intensidad de las tormentas y tornados, pero el IPCC considera que no se dispone de información suficiente para llegar a este tipo de conclusiones.

De acuerdo con el IPCC, la precipitación aumentará en latitudes altas —arriba de 50° de latitud— como una respuesta a una superficie más cálida, y al transporte regular de vapor de agua desde los trópicos hacia latitudes polares. Debido a este último efecto y a la expansión de las latitudes altas subtropicales, para las latitudes tropicales se espera una reducción de la precipitación. Sin embargo, la franja de latitudes en donde se dará este cambio de signo en la tendencia de la precipitación es también incierta.

Las observaciones muestran, confirmando el cambio climático actual, un incremento en el vapor de agua desde 1980. La precipitación es localmente muy variable, pero también se ha incrementado en regiones extensas incluyendo el occidente de Norteamérica y Suramérica y la región norte y central de Asia. También han sido registradas sequías en el Sahara, el Mediterráneo, Sudáfrica y partes del sur de Asia (Collins *et al.*, 2008).

Incertidumbres en los impactos socio-económicos

La incertidumbre en el impacto socio económico del cambio climático se refiere a la manera en que los

cambios en el clima regional afectarían los sistemas naturales y humanos, tales como cultivos agrícolas, biodiversidad, salud humana, etc.

Esta incertidumbre se debe en parte a que el cambio climático no afectaría igualmente a todo el planeta, como es el caso del cambio en la precipitación analizado arriba.

Otros impactos esperados (Biello, 2007), son:

- Derretimiento de las capas de hielo y glaciares, poniendo en peligro el suministro de agua en el sur de EEUU, China, India y Pakistán;

- Migración de especies anima-

les en busca de climas más fríos;

- Aumento de las cosechas de trigo, maíz y arroz en latitudes como las de EEUU mientras que éstas declinarán precipitadamente en regiones tropicales;

- Aumento de las inundaciones en regiones costeras, de las enfermedades y de la desnutrición.

Adicionalmente a las numerosas incertidumbres científicas y económicas involucradas en la determi-

No obstante, la comunidad científica ya posee suficientes elementos para afirmar con alto grado de confiabilidad que a pesar de las preguntas aún sin resolver, el cambio climático será una realidad y de hecho ya está aconteciendo en el presente.

Utilice las fotocélulas

Las fotocélulas son pequeños captadores de energía solar que sirven para las luces del jardín, las luces del garaje y la puerta principal, para alarmas localizadas exteriores y el timbre, para ciertos adornos navideños y para ponerle música a las plantas, se recargan de día y duran prendidas toda la noche.

nación los daños causados por el cambio climático, se levanta una pregunta no menos importante acerca de cómo esos daños deben ser evaluados.

Incertidumbres en los escenarios de emisión

Las tendencias futuras en emisiones de gases de invernadero alrededor del planeta, son inciertas. Ellas dependen del aumento de la población, el crecimiento económico, el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías y la demanda por combustibles fósiles. Además, el costo de reducir las emisiones depende en gran medida de las políticas que motiven esas reducciones.

Conclusiones

De este corto recorrido por los principios físicos y las incertidumbres asociadas con la problemática del cambio climático, se puede concluir que el calentamiento global y sus efectos en el clima es un problema bastante complejo. No obstante, la comunidad científica ya posee suficientes elementos para afirmar con alto grado de confiabilidad que a pesar de las preguntas aún sin resolver, el cambio climático será una realidad y de hecho ya está aconteciendo en el presente.

Dada la complejidad del sistema climático, y a pesar de las incertidumbres, los modelos son la mejor guía que tenemos en el presente para orientarnos hacia el futuro del clima en nuestro planeta.

Finalmente, una pregunta que se pueden hacer tanto los defensores como los detractores de la teoría de cambio climático –basados en que la experiencia nos muestra que desde el punto de vista ambiental ya hemos intervenido bastante en la naturaleza y, en algunos casos, negativamente, contaminando los ríos, destruyendo los bosques, acabando con la biodiversidad, etc.– es: ¿será que las emisiones antropogénicas pueden cambiar el clima de una manera similar?

Bibliografía

- BIELLO, David. 2007. «Changing Climes: Global Warming Impacts Appearing Around the Globe». *Scientific American*. April 09. <http://www.sciam.com/article.cfm?id=changing-climes-global-warming-impacts-appearing-around-globe>.
- COLLINS, W., R. COLMAN, J. HAYWOOD, M.R. MANNING y P. MOTE. 2008. «The Physical Science behind Climate Change». *Scientific American*. October 6. <http://www.sciam.com/article.cfm?id=science-behind-climate-change>.
- Euskirchen, E.S., L.D. HINZMAN, G. JIA, C.L. PING, K.D. TAPE, C.D.C. THOMPSON, D.A. WALKER y J.M. WELKER. 2005. «Role of land surface changes in Arctic summer warming». *Science*, 310, 657-660. (Ver también: <http://maps.grida.no/go/graphic/climate-feedbacks-the-connectivity-of-the-positive-ice-snow-albedo-feedback-terrestrial-snow-and-vegetation-feedbacks-and-the-negative-cloud-radiation-feedback>).
- MEEHL, G.A, T.F. STOCKER, W.D. COLLINS, P. FRIEDLINGSTEIN, A.T. GAYE, J.M. GREGORY, A. KITOH, R. KNUTTI, J.M. MURPHY, A. NODA, S.C.B. RAPER, I.G. WATTERSON, A.J. WAVER y Z.C. ZHAO. 2007. «Global climate projections». In: *Climate Change 2007: The physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chrn, M. Marquis, K.B.M Tignor y H.L Miller, eds.). Cambridge (U.K.) / New York, IPCC / Cambridge University Press.
- PENN STATE UNIVERSITY. 2001. «The Past Says Abrupt Climate Change In Our Future». *Science Daily*. December 14 (retrieved October 23, 2008). <http://www.sciencedaily.com/releases/2001/12/011214081853.htm>.
- STUTE, Martin, A. CLEMENT y G. LOHMANN. 2001. «Global climate models. Past, present and future». *PNAS*. September 11. Vol. 98, N° 19,

10529-10530. (Ver también: <http://www.pnas.org/content/98/19/10529.full>).

UCAR. 2007. «The thermohaline circulation. Windows to the Universe». http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/Water/thermohaline_ocean_circulation.html.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad Nacional de Colombia, y en particular al Departamento de Geociencias de la Facultad de Ciencias, por el apoyo en la preparación de este documento.

GERARDO DE JESÚS MONTOYA GAVIRIA

Ph.D. en Ciencias Físico-Matemáticas del Centro de Investigaciones Hidrometeorológicas de Moscú, profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia y autor del libro *Lecciones de meteorología dinámica y modelamiento atmosférico*. Es miembro del Centro de Estudios Interdisciplinarios Básicos y Aplicados (CEIBA), y actualmente es profesor de meteorología dinámica en el Postgrado de Meteorología del Departamento de Geociencias, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia.

Tape lo que ponga en la nevera

Los alimentos, en general, despiden humedad al ambiente, en la nevera aumentan la carga energética porque el termostato se demora más en bajar, por eso es mejor guardarlos en envases plásticos, o de vidrio. Igual, mantenga las frutas y verduras en bolsas plásticas bien selladas.