



# Cambio





# climático

## ¿qué sigue?

**Jorge Zavala Hidalgo y Rosario Romero Centeno**

**Un fenómeno que no tiene vuelta atrás.**

**Ahora se trata de mitigar sus efectos**

**y adaptarnos, y para ello necesitamos**

**nuevas tecnologías y modificar**

**nuestros patrones de consumo.**

A LO LARGO del año 2007 el tema del cambio climático ha acaparado titulares en todo el mundo. En el mes de febrero, una noticia de gran impacto fue la presentación del reporte sobre las bases científicas del cambio climático, que forma parte del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). El reporte señala que hay evidencias concluyentes de un cambio climático y de que éste es causado por las actividades humanas, principalmente debido al aumento de gases de efecto invernadero por la quema





de combustibles fósiles y la deforestación. El panel calificó esta conclusión de “muy probable”, lo que en términos estadísticos significa que la confianza con que hoy sabemos que las actividades humanas son la causa de este cambio es de 90%. El informe vino acompañado del análisis de los probables escenarios climáticos que podrían presentarse para el año 2100.

En septiembre se llevaron a cabo dos eventos muy importantes. El primero, una reunión histórica en las oficinas principales de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en donde más de 80 jefes de Estado y de gobierno discutieron la

urgencia de combatir el cambio climático, el cual consideraron el mayor reto para la humanidad en el siglo XXI. El segundo, la reunión organizada por el presidente Bush con los representantes de las principales economías mundiales para lanzar su propia iniciativa sobre el cambio climático, al margen de la ONU. La propuesta de Bush es trabajar con los principales usuarios de energía y mayores productores de emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo tanto naciones desarrolladas como en vías de desarrollo, para establecer una nueva pauta internacional sobre seguridad energética y cambio climático en 2008.

Con esta nueva pauta Bush busca orientar en un sentido favorable a los intereses de los Estados Unidos al acuerdo global que, bajo la Convención Marco para el Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC, por sus siglas en inglés), se tomará en el año 2009.

En octubre el IPCC volvió a ser noticia mundial cuando se le otorgó el Premio Nobel de la Paz 2007, compartido con el ex vicepresidente de los Estados Unidos Al Gore, por sus esfuerzos para acrecentar y difundir el conocimiento sobre el cambio climático provocado por el ser humano y por establecer las bases de las medidas necesarias para contrarrestar dicho cambio.

## EL IPCC

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) con el objeto de evaluar, sobre una base exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica disponible sobre el cambio climático en todo el mundo, incluyendo sus impactos potenciales y las opciones para la adaptación y mitigación. El IPCC es un órgano abierto a todos los países miembros de la OMM y del PNUMA.

El IPCC está formado por tres grupos de trabajo y un equipo especial sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. El Grupo I evalúa los aspectos científicos del sistema climático y del cambio en el clima. El Grupo II examina la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales frente al cambio climático, las consecuencias negativas y positivas de dicho cambio y las posibilidades de adaptación. El Grupo III evalúa cómo limitar las emisiones de gases de efecto invernadero y atenuar por otros medios los efectos del cambio climático.

Una actividad principal del IPCC es proporcionar regularmente una evaluación del estado del conoci-

miento sobre el cambio climático. Las evaluaciones del IPCC se apoyan en la labor de cientos de expertos de todo el mundo, algunos de los cuales participan en las tareas de redacción y otros en el proceso de revisión de los informes. Cabe mencionar que 15 científicos mexicanos, de los cuales 10 son de la UNAM, forman parte del Panel: Carlos Gay, Graciela Binimelis, Víctor Magaña, Cecilia Conde, Francisco Estrada, Ana Rosa Moreno, Blanca Jiménez, Claudia Sheinbaum, Omar Masera, Carlos Anaya, Edmundo de Alba, Mario Molina, Patricia Romero, Ricardo Zapata y Jorge Gasca.

Desde 1988 el IPCC ha producido una serie de publicaciones que son ya obras de referencia en la materia y que son utilizadas por un gran número de responsables de políticas, científicos, estudiantes y expertos en temas diversos. Estas publicaciones consisten en informes de evaluación, informes especiales, guías metodológicas y documentos técnicos. Cada informe del IPCC va acompañado de un resumen para responsables de políticas, que se publica en todos los idiomas oficiales de las Naciones Unidas. Los documentos del IPCC se pueden consultar en <http://www.ipcc.ch>.

## Las evidencias

El término “clima” se refiere a las condiciones promedio del estado del tiempo en una región particular, calculadas a partir de varios años de datos (por ejemplo, la temperatura promedio en enero en Ciudad Universitaria). Pero este promedio cambia a través del tiempo. El clima ha variado siempre en distintas escalas de tiempo y estas variaciones están sólidamente documentadas. Entre las causas más importantes se encuentran los cambios en la cantidad de energía que la Tierra recibe del Sol (debido a variaciones naturales en la actividad solar) y la manera en que se distribuye esta energía por el planeta. También afectan los movimientos de la Tierra, cuyo eje de rotación cambia de orientación y cuya órbita se vuelve más o menos alargada en escalas de tiempo muy grandes. Sin embargo, la mayoría de los estudios serios indican que el cambio climático que se está observando y el que se prevé para los próximos 100



años se debe principalmente a la actividad humana.

Echemos un vistazo a las principales evidencias que señalan estos estudios y que recoge el reporte del IPCC:

Los datos de largo plazo indican un claro y consistente incremento en las temperaturas, particularmente desde la revolución industrial en los países occidentales. El aumento ha sido mayor en latitudes más altas del norte en los últimos 30 años. El incremento en la temperatura promedio del planeta fue de  $0.74^{\circ}\text{C}$  en el periodo de 1906 a 2005, con una tasa de incremento prome-

dio durante los últimos 50 años ( $0.13^{\circ}\text{C}$  por década) de casi el doble de la observada en los últimos 100 años.

Al mismo tiempo, se han observado cambios en la ocurrencia de eventos extremos como las lluvias intensas, sequías y ondas de calor. Desde 1950, la frecuencia de lluvias intensas se ha incrementado en la mayoría de las áreas continentales. Un aumento significativo en la precipitación se ha observado en los últimos 100 años en regiones orientales de América del Norte y del Sur, el norte de Europa y el norte y el centro de Asia. Por otra parte, se ha observado

aridez sobre grandes regiones; por ejemplo el Sahel, el Mediterráneo, el sur de África y partes del sur de Asia. En las grandes cuencas de captación de África, en Níger, Chad y Senegal, la cantidad de agua total disponible ha disminuido entre 40 y 60% en los últimos 50 años, y la desertificación se ha agravado debido a una disminución en el promedio anual de lluvia, especialmente en el sur, norte y occidente de África.

Las temperaturas promedio en el Ártico se incrementaron a casi el doble

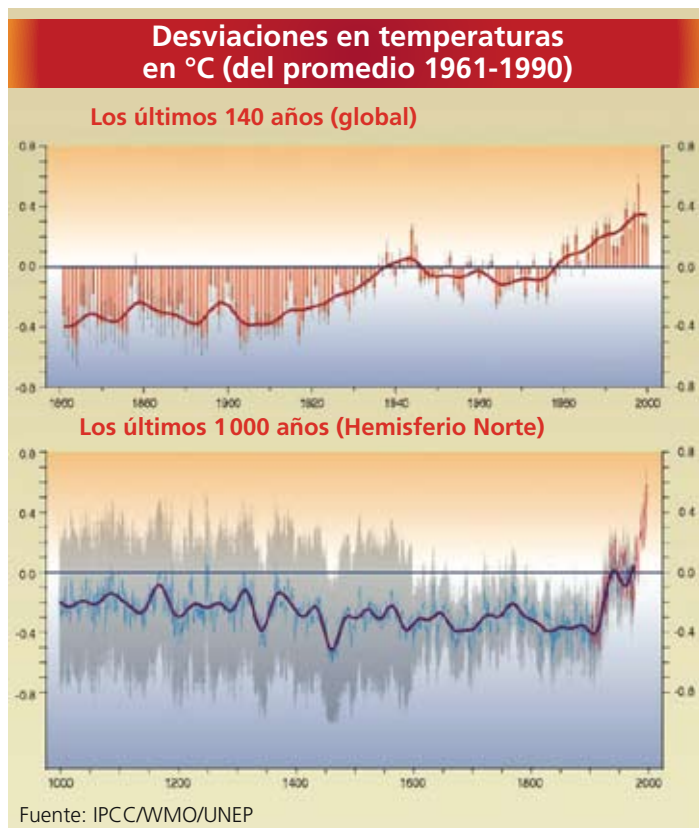
**La mayoría de los estudios serios indican que el cambio climático que se está observando y el que se prevé para los próximos 100 años se debe principalmente a la actividad humana.**

del ritmo global en los últimos 100 años. Las temperaturas en el tope de la capa de *permafrost* han aumentado desde los años 80 hasta  $3^{\circ}\text{C}$ . En el ártico ruso se han derrumbado edificios debido al derretimiento del *permafrost* bajo sus cimientos.

La cubierta de nieve ha disminuido alrededor de 10% en latitudes medias y altas del Hemisferio Norte desde finales de los años 60. Los glaciares montañosos y la cubierta de nieve han disminuido en ambos hemisferios, lo que ha contribuido a elevar el nivel del mar. El nivel medio global del mar se elevó a un ritmo promedio de alrededor de 1.8 mm por año entre 1961 y 2003, pero entre 1993 y 2003 se elevó 3 mm por año.

Existe evidencia de cambios de largo plazo en la circulación atmosférica de gran escala, como la intensificación y desplazamiento de los vientos del oeste hacia los polos.

El vapor de agua en la troposfera está aumentando y el océano mundial se ha







calentado desde 1955. Este calentamiento se ha extendido sobre los primeros 700 m de profundidad.

También hay amplia evidencia de cambios en la salinidad del océano en los últimos 50 años, con aumentos en la salinidad de las aguas cercanas a la superficie en las regiones con más evaporación. Estos cambios en la salinidad implican cambios en el ciclo hidrológico sobre los océanos.

Datos obtenidos por satélite desde 1993 dan fe de cambios regionales del nivel del mar. En algunas regiones, las tasas de elevación durante este periodo son de varias veces la media mundial, mientras que en otras regiones el nivel del mar está disminuyendo. Las observaciones sugieren incrementos en las elevaciones extremas del agua en gran parte del mundo desde 1975.

No obstante que la gran mayoría de los científicos está de acuerdo en que las variaciones del clima que se han observado en las décadas recientes, se deben principalmente a la actividad humana, hay científicos y organizaciones que no lo están. Ellos se preguntan, por ejemplo, si el incremento de las temperaturas mundiales es real o es producto de mediciones deficientes, o si el calentamiento observado es extraordinario o está dentro de las variaciones climáticas normales. Algunos científicos afirman, por ejemplo, que el calentamiento se debe a cambios en el número y tamaño de las manchas solares y como se espera que el Sol entre en una fase menos activa en las próximas décadas, prevén una disminución de la temperatura. Debemos tener cuidado con estas posturas, pues si bien hay investigadores serios que las apoyan, otros están ligados a intereses económicos; por ejemplo, los de algunas compañías petroleras.

## Una mirada al clima

El clima promedio de la Tierra está determinado por la energía que llega del Sol y por las propiedades de la superficie terrestre y de la atmósfera, como la reflexión, absorción y emisión de energía. Los cambios en estas propiedades de la Tierra y su atmósfera alteran el balance global de energía del sistema y pueden provocar cambios en el clima. Por ejemplo, un incremento en las concentraciones de los llamados gases de efecto invernadero aumenta la absorción atmosférica de la energía que emite la superficie terrestre en forma de radiación infrarroja. Una parte de la energía que antes escapaba al espacio se queda en la atmósfera, como el calor en un invernadero. Este efecto es la causa principal del cambio climático actual.

El gas de efecto invernadero que tiene mayor impacto sobre el clima de la Tierra es el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Este gas es transparente a la radiación visible, por lo que no absorbe la energía del Sol, pero retiene la que emite la Tierra como radiación infrarroja, de longitud de onda más larga. Por ello, el aumento en la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera produce un incremento en la temperatura de la superficie terrestre. El aumento en la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera es un dato duro e inobjetable que ningún análisis serio niega. Desde el inicio de la industrialización, la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera ha aumentado 35%, pasando de 280 partes por millón (ppm) a 379 ppm, mientras que en los 8000 años previos a la industrialización sufrió un incremento de tan sólo 20 ppm. La tasa de incremento anual del  $\text{CO}_2$  ha sido mayor durante los últimos 10 años, con una tasa promedio de 1.9 ppm/año en el periodo de 1995 a 2005.

Varios de los principales gases de efecto invernadero están presentes en la atmósfera de forma natural, pero el aumento en sus concentraciones atmosféricas en los últimos 250 años se debe en gran medida a las actividades humanas, principalmente a la quema de combustibles fósiles (carbón y derivados del petróleo) y a la deforestación. Cabe señalar que no todo el  $\text{CO}_2$  generado durante la era industrial se encuentra en la atmósfera, pues alrededor del 50% ha sido absorbido por la biosfera y los océanos. Aunque la fracción de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera es muy pequeña (del orden del 0.038% del volumen total de ésta), por sus propiedades de absorción de la radiación infrarroja basta un cambio pequeño en su concentración para incrementar notablemente la cantidad de energía que se queda en la atmósfera.

Asimismo, el cambio en los flujos de energía provocado por el aumento del  $\text{CO}_2$  afecta procesos como el ciclo hidrológico, que es de vital importancia pues el agua desempeña un papel primordial en el clima terrestre. Las nubes, por ejemplo, reflejan parte de la energía que llega del Sol y la devuelven al espacio. También modifican la retención de energía en las capas bajas de la atmósfera y en la superficie del planeta dependiendo de su altura. Pero aún hay mucha incertidumbre acerca de la magnitud del efecto del aumento del  $\text{CO}_2$  sobre el ciclo hidrológico, porque éste depende de muchos factores que es difícil medir con precisión, como la cobertura de nubes, su tipo y altura.

Con el cambio climático también se ven afectados los patrones de circulación oceánica y atmosférica, lo que a su vez modifica los climas regionales.

## ¿Y el futuro?

Los documentos del IPCC contienen predicciones del cambio climático basadas en observaciones directas, así como en modelos numéricos que simulan lo que podría pasar con el clima a partir de las condiciones actuales. Estas predicciones indican que los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero producirán calentamiento y otros cambios climáticos. He aquí lo que prevén los científicos.

El cambio climático debido a la composición atmosférica observada en el año 2000 corresponde a una tendencia de calentamiento de alrededor de  $0.1^\circ\text{C}$  por década durante las dos décadas siguientes.

Para cada una de las regiones continentales, la temperatura promedio proyectada





para el periodo 2000-2050, como resultado de los distintos escenarios de emisiones, se elevará a un ritmo mayor que el promedio global y el calentamiento observado será mayor que en el siglo pasado.

Se prevé que el nivel del mar se siga elevando en las próximas décadas y disminuya la cubierta de nieve. De hecho, el calentamiento pronosticado como producto de la emisión de gases de efecto invernadero durante el siglo XXI seguirá contribuyendo a la elevación del nivel del mar por muchos siglos.

Se pronostican incrementos generalizados en los deshielos sobre la mayoría de las regiones de *permafrost* y que amplias regiones del Océano Ártico no permanezcan cubiertas de hielo durante todo el año para fines del siglo XXI.

La mayoría de los modelos predicen que las temperaturas superficiales del mar en la región central y oriental del Pacífico ecuatorial se elevarán más que en la región occidental, con un correspondiente desplazamiento promedio de la precipitación hacia el este.

La intensidad de los ciclones tropicales cambiará. Se intensificarán los vientos máximos y las precipitaciones máximas, con la posibilidad de una disminución en el número de huracanes relativamente débiles y un incremento en el número de huracanes intensos. Sin embargo, se proyecta que el número total de ciclones tropicales decrezca globalmente.

Las investigaciones indican una tendencia hacia un incremento en los eventos diarios de lluvias intensas en muchas regiones, incluyendo algunas en las cuales la precipitación promedio se espera que disminuya debido a una reducción en el número de días con lluvia, pero no en la intensidad de la lluvia cuando ésta ocurre.

Por último, en el Hemisferio Norte se pronostica para el siglo XXI un aumento de la precipitación subpolar y polar, así como una disminución de la precipitación en muchas regiones subtropicales.

## Calentamiento global o cambio climático

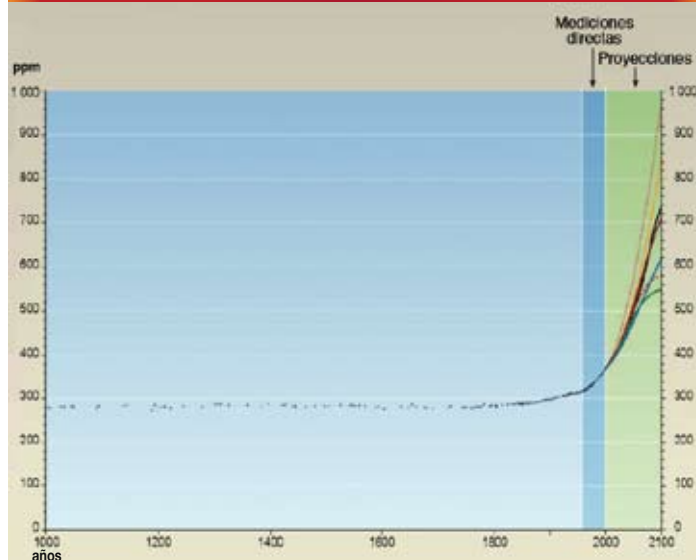
Frecuentemente hablamos de calentamiento global para referirnos a los cambios del clima que se han detectado en las últimas décadas. Pero el clima es resultado de la interacción entre el océano, la atmósfera, la litósfera, la criósfera y la biosfera, alimentados por la energía del Sol, en un complejo sistema del cual aún falta mucho por saber. Los cambios climáticos que se están observando modifican la temperatura promedio de la Tierra, pero también alteran los otros componentes del clima, los cuales son tan o más importantes para nuestra vida cotidiana como los cambios en la temperatura.

## Mitigación y adaptación

El cambio climático es real y no hay punto de retorno. El gas de efecto invernadero que tiene mayor impacto sobre el clima de la Tierra es el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y su nivel actual de concentración en la atmósfera ya lo está afectando. Este gas de efecto invernadero es el que tiene mayor impacto sobre el clima de la Tierra. Mientras tanto, cada año consumimos más combustibles fósiles que el año anterior. Se ha propuesto disminuir el ritmo de aumento en la producción de  $\text{CO}_2$ , pero según todas las predicciones, la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera continuará en ascenso en las próximas décadas. Ante esta situación el IPCC propone mitigar el impacto para hacer menos drástico el cambio climático.

Incluso si cortáramos de tajo las emisiones (lo cual sería imposible porque la economía mundial se detendría), el exceso de  $\text{CO}_2$  asociado a las actividades humanas se mantendría en la atmósfera por muchos años. Esto se debe a que el  $\text{CO}_2$ , como el

## Concentraciones atmosféricas de $\text{CO}_2$ pasadas y futuras



Fuente: IPCC/WMO/UNEP



metano y el óxido nitroso, es químicamente estable. Pero aun si restableciéramos los niveles originales de gases de efecto invernadero en la atmósfera, el clima no regresaría a su estado anterior.

Ante el fenómeno del cambio climático se requiere preparación y adaptación para disminuir la vulnerabilidad de las poblaciones, incluyendo el desarrollo de nuevas tecnologías y patrones de consumo. Algunas

medidas, que ya se están implementando en algunos países, incluyen el diseño de infraestructura apropiada para proteger zonas costeras y prevenir inundaciones repentinas.

Asimismo, se requieren políticas y estrategias para el manejo eficiente del agua y del suelo, y para enfrentar fenómenos como las ondas de calor. Las medidas de adaptación son altamente dependientes de factores de riesgo específicos asociados con las condiciones geográficas, sociales y climáticas de cada región, así como de restricciones financieras, institucionales y políticas. Los países en desarrollo, como el nuestro, son más vulnerables al cambio climático debido a la falta de recursos y a diversas limitaciones para desarrollar una capacidad de adaptación adecuada.

Entre las nuevas tecnologías que se contemplan para mitigar los impactos adversos sobre el clima se pueden mencionar las siguientes:

En el sector energético se plantea el desarrollo de energías renovables como la hidroeléctrica, la energía solar, la eólica, la geotermia y la bioenergía.

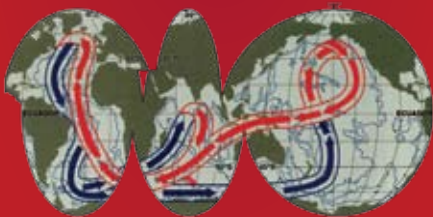
En el sector de transportes se sugiere fabricar vehículos más eficientes en el consumo de combustible, vehículos híbridos y de diesel más limpios, así como el desarrollo de biocombustibles. Es necesario mejorar los sistemas de transporte público y favorecer el uso de transportes ferroviarios.

Por otra parte, hay que fabricar aparatos eléctricos y de acondicionamiento ambiental más eficientes, utilizar fluidos de refrigeración alternativos y mejorar el

### El mar y el clima

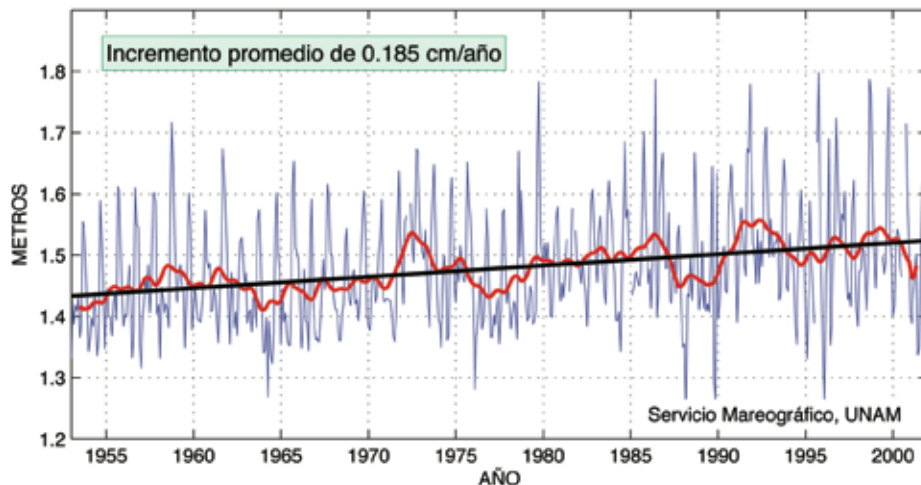
El océano intercambia masa y energía con la atmósfera. Su capacidad de absorber calor es mucho mayor que la de ésta: una columna de agua de 2.5 metros de profundidad tiene la misma capacidad calorífica que toda la columna de aire que tiene encima.

La luz del Sol penetra varias decenas de metros y su calor se distribuye en una zona de aguas superficiales llamada *capa de mezcla oceánica*, que es la parte del océano que interactúa directamente con la atmósfera. Las aguas superficiales se hunden en ciertas regiones muy restringidas del océano. Al hundirse transportan al fondo el CO<sub>2</sub> que han absorbido. Las características de temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> y de otros gases en el océano profundo están determinadas por las propiedades del agua de las regiones de hundimiento (conocidas como *regiones de formación de agua profunda*). Una masa de agua que se hunde en estas zonas vuelve a entrar en contacto con la atmósfera en un promedio de 2000 años, por lo que el fondo del mar guarda una especie de memoria climática.



La circulación vertical en el océano: en azul la circulación profunda y en rojo la superficial.

### El nivel del mar en Veracruz



Cambio en el nivel del mar en el Puerto de Veracruz, México. Los datos de 1953 a 2001 muestran una elevación promedio de 0.18 cm/año, al igual que los cambios estimados a nivel planetario para ese periodo.

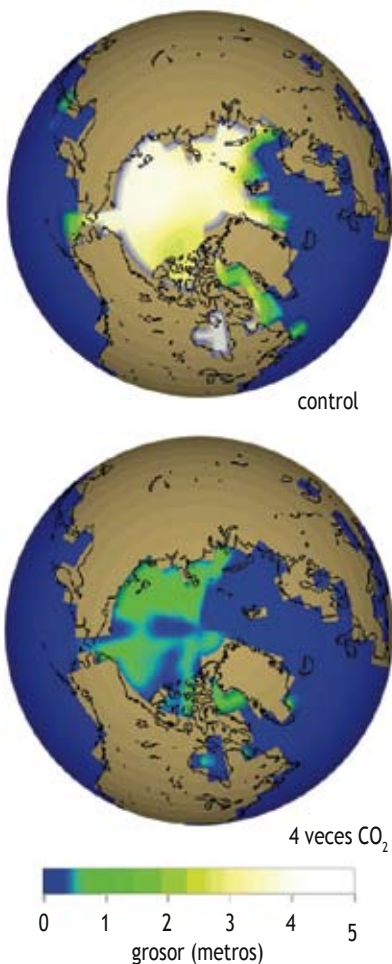
Fuente: Servicio Mareográfico Nacional, Instituto de Geofísica, UNAM





aislamiento en las construcciones. En la industria se requiere equipo eléctrico más eficiente, el uso de materiales reciclables

### El deshielo



Se prevé un deshielo sustancial del Océano Ártico. Aquí se muestra un modelo del grosor del hielo a finales del invierno en el Polo Norte para control y una simulación de cómo se vería al incrementar cuatro veces el CO<sub>2</sub>. Fuente: GFDL/NOAA

y un control estricto de las emisiones. Asimismo, es preciso mejorar las técnicas de cultivo y de aplicación de fertilizantes, combatir la deforestación y estimular la reforestación.

### México ante el cambio climático

Si bien es cierto que todos somos ciudadanos del mundo, también es cierto que no todos contribuimos igual al aumento de los gases de efecto invernadero, ni individual ni nacionalmente. Por ejemplo, con base en datos del 2004 de las Naciones Unidas, los países que contribuyen con una mayor cantidad de emisiones anuales de CO<sub>2</sub> producto de la actividad humana son: los Estados Unidos con 6049 Mt (millones de toneladas métricas), equivalentes al 22.2% del total mundial; China con 5010 Mt, equivalentes al 18.4%, y la Unión Europea con 3115 Mt, que equivalen al 11.4%. A ellos le siguen Rusia, India y Japón con cantidades aproximadas de 5%, y México ocupa el onceavo lugar en la lista, con el 1.6% de las emisiones totales.

También es distinta la capacidad de las naciones de modificar las estructuras socioeconómicas para disminuir el impacto sobre el clima. Los acuerdos sobre cuáles medidas se tomen y con qué ritmo se implementen, afectarán de diferente forma a las sociedades y provocarán un reacomodo de las economías nacionales. Debemos tener claro que hay grandes intereses económicos y políticos que están empujando para definir, no sólo si se toman más o menos medidas para aminorar el impacto sobre el clima, sino cuáles y con qué ritmo.

México tiene que desarrollar un debate profundo sobre la posición que tomará en los organismos internacionales. La Orga-

nización de las Naciones Unidas es el foro que conviene privilegiar. Nuestro país debe informarse para adoptar una estrategia que no agrave nuestra dependencia científica y tecnológica. No basta disminuir las emisiones y sembrar arbolitos. Se debe planear el desarrollo del país con una perspectiva de mediano y largo plazo en todas las áreas, principalmente las de energéticos y medio ambiente. Habrá que decidir, por ejemplo, qué medidas se tomarán para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y a qué ritmo se van a aplicar; y también lo que se hará para desarrollar fuentes alternativas de energía. Es indispensable que se estudien los distintos escenarios que se prevén con el cambio climático a nivel regional, evaluando el impacto en la economía, salud y vulnerabilidad de la población a eventos extremos y estableciendo las medidas para mitigarlos.

Éste es un gran tema del desarrollo científico y tecnológico nacional para los próximos años. 🗨️

#### Para nuestros suscriptores

La presente edición va acompañada por una guía didáctica, en forma de separata, para abordar en el salón de clases el tema de este artículo.

Jorge Zavala Hidalgo es investigador en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Estudió física y realizó sus estudios de maestría en la UNAM y el doctorado en el CICESE. Fue investigador posdoctoral e investigador visitante en la Universidad Estatal de Florida, EUA.

Rosario Romero Centeno estudió matemáticas en la Facultad de Ciencias de la UNAM, realizó su maestría en oceanografía física en el CICESE y obtuvo su doctorado en física de la atmósfera. Actualmente, es investigadora en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.