

condujo a una ecuación famosa, sencilla y elegante para el modelo del balance de energía del clima de la Tierra.

A diferencia del climatólogo de Estados Unidos William Sellers, que aproximadamente en el mismo tiempo publicó una ecuación similar del balance de energía, Budyko utilizó su ecuación para estudiar la sensibilidad del sistema climático de la Tierra a las variaciones de la constante solar, es decir, la aportación y la salida de energía solar desde la superficie de la Tierra. Fue el primero en establecer la posibilidad de un estado estable de "Tierra bola de nieve", con especial atención a la histéresis de la reacción de las temperaturas de la superficie de la Tierra a las variaciones de la constante solar. En aquella época se consideraba improbable la posibilidad de una "Tierra bola de nieve". Sin embargo, investigaciones más recientes por parte de paleoclimatólogos han demostrado que dicho escenario sería bastante posible en el pasado lejano, ya que ahora se sabe que el brillo solar ha sido significativamente más bajo que en la actualidad. Confirman esto las señales de antiguos glaciares encontrados en los

trópicos de África y América del Sur. Serían difíciles de explicar de otra manera. Budyko también prestó especial atención a cuestiones tales como la climatología aplicada y la influencia del clima sobre el bienestar y la salud del hombre, y la distribución de la radiación solar para la fotosíntesis en la superficie de la Tierra.

Un estudio importante que llevaron a cabo Budyko y sus colaboradores fue la evaluación de los volúmenes de aerosoles que habría que lanzar a la estratosfera mediante transportes supersónicos de gran altura para ofrecer una pantalla parcial contra la radiación solar. Dicha pantalla compensaría, teóricamente, el efecto invernadero creado por el aumento del dióxido de carbono atmosférico, contrarrestando de esta manera el calentamiento mundial antropogénico que de forma repetida predijo Budyko aproximadamente durante el mismo período. El personal del Observatorio llevó a cabo y publicó estas evaluaciones a principios de la década de 1970. Se estimó que tales aportes de aerosoles serían realistas utilizando aviones Concorde y TU-144 que estaban, y siguen estando en la actualidad, en servicio.

238

Nuestro clima futuro

Por Yadowsun BOODHOO*

Introducción

El tema del Día Meteorológico Mundial de 2003, "Nuestro Clima Futuro", es muy importante, si tenemos en cuenta el hecho de que estamos siendo testigos de muchos trastornos en el sistema climático. Uno de los logros más destacables de los científicos en las últimas décadas ha sido convencer a los responsables de la toma de decisiones de que acepten que el clima es un recurso importante. Esto sucedió después de que se demostrara, fuera de toda duda, que nosotros —los seres humanos— estamos interfiriendo con los mismísimos elementos de la naturaleza que se supone que nos mantienen. Entonces se planteó la pregunta, lógica pero enigmática: "¿Cómo será el clima futuro?". Una pregunta muy adecuada, ya que nuestro estilo de vida, los alimentos que consumimos y nuestras costumbres están influidos, todos, por el clima. Los psicólogos afirman que el clima afecta incluso al humor de la gente y que moldea su carácter y su cultura.

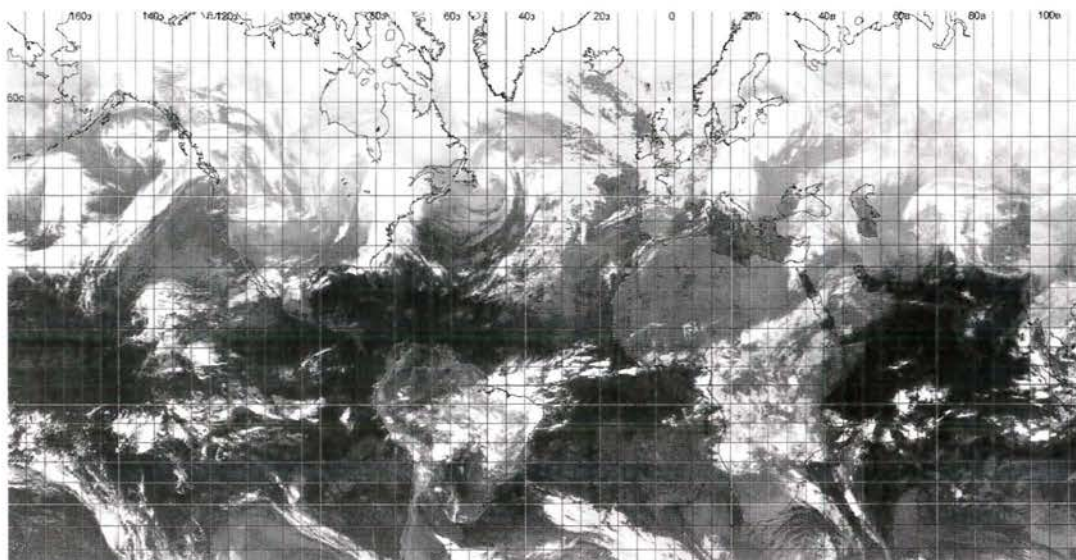
La forma más realista de enfrentarse al problema es tener en cuenta el clima del pasado y el del presente, determinar los factores que han provocado los cambios y extrapolar todo esto al clima futuro. Sin embargo, esto implicará un pero inevitable, ya que es seguro que la humanidad y las organizaciones internacionales, incluida la OMM, lucharán por cambiar a mejor la tendencia.

El clima actual

A menudo nos sorprende la ferocidad de los episodios climatológicos cuando cada año ciertas regiones del mundo caen presas de los caprichos de la naturaleza. Recordemos algunos episodios recientes:

El Niño de 1997-1998 y La Niña que vino a continuación causaron estragos en todo el mundo, con varias tormentas tropicales, inundaciones que se alternaron con una sequía sin precedentes. El año 2001 resultó ser el más cálido desde que empezaron los

* Jefe de División de los Servicios Meteorológicos de Mauricio, presidente de la Comisión de Climatología de la OMM y coautor del folleto del Día Meteorológico Mundial *Nuestro Clima Futuro*, disponible previa petición en la Secretaría de la OMM



Mosaico mundial de imágenes infrarrojas realizado a partir de datos de cinco satélites: dos GOES, dos METEOSAT y un GMS (Planeta)

registros mundiales superficiales, en 1861. En 2001, Canadá sufrió su estación más cálida de lo normal número 18 consecutiva, mientras que varios países del África Subsahariana sufrieron inundaciones severas.

Más recientemente, en el verano de 2002, inundaciones de una magnitud insólita en Europa —que se extendieron desde Inglaterra a Rumanía y Bulgaria, pasando por Francia, Alemania, Austria y la República Checa— dejaron cientos de muertos y miles de millones de dólares de daños. Más lejos, en Asia, la República de Corea tuvo que movilizar a sus tropas después de que cayeran dos quintos del promedio de la precipitación anual en una sola semana. En China, más de cien millones de personas se vieron afectadas por lluvias torrenciales e inundaciones de magnitud histórica. Durante el mismo período, algunas zonas de Asia, Australia y los EE.UU. sufrieron sequías severas que destruyeron millones de toneladas de cosechas. En Egipto, se registró en julio la temperatura más alta de su historia, 51°C.

Cambio y variabilidad del clima

El clima de la Tierra ha cambiado de un régimen a otro, tanto en la escala mundial como en la regional. Antes de la era industrial, los cambios se producían

como resultado de causas naturales y se tardaba miles de años para cambiar de un modo a otro. Pero, desde la revolución industrial, el cambio en el clima se produce a un ritmo acelerado como resultado de las actividades humanas.

Clima pasado

La evidencia del cambio climático pasado ha sido corroborada por numerosos estudios de pinturas rupestres, descubiertas en el desierto del Sáhara, que muestran a animales que sólo pueden sobrevivir en climas húmedos. Las excavaciones de Egipto han puesto al descubierto huesos de elefante, testimoniando épocas más verdes en el pasado. Otros tantos descubrimientos en zonas

áridas en la actualidad señalan el hecho de que una vez fueron exuberantes de vegetación y agua. Otros estudios, realizados a partir de datos paleoclimatológicos o indirectos, a partir de fuentes como los anillos de

ALGUNOS EFECTOS DEL AGOTAMIENTO DEL OZONO

El descubrimiento de que la capa de ozono estaba disminuyendo de grosor y de que el agujero de ozono se estaba haciendo más grande ha creado una gran preocupación entre los biometeorólogos, que han hecho sonar las alarmas para llamar la atención sobre los efectos negativos de la creciente radiación UV entrante. Los casos de cáncer de piel y de cataratas oculares se han incrementado de forma importante, y este incremento se atribuye directamente al mayor flujo de radiación UV incidente sobre la superficie de la Tierra. En Australia, uno de los países más afectados, se avisa a la población durante los meses de verano para asegurar que se toman las precauciones básicas, tales como llevar manga larga y sombreros que protejan la cabeza y el cuello. Los productos de belleza también son abundantes, y presumen de sus capacidades para luchar contra los efectos peligrosos de la radiación UV sobre la piel.

los árboles, los núcleos de hielo, los sedimentos lacustres y los arrecifes de coral, muestran que el clima ha estado sujeto a cambios. Algunos de estos cambios se han producido en períodos de tiempo relativamente cortos.

Transiciones climatológicas rápidas

Desde que los casquetes de hielo se retiraron por última vez de Europa central, ha habido dos fases de calentamiento natural rápido y notable. La primera de dichas fases se produjo hace unos 14 700 años, al final de la última Era Glacial durante la transición a lo que se llama la Última Glaciación. La segunda fue hace unos 11 500 años, durante la transición desde el último ataque frío de nuestro clima (el período del Joven Dryas), hasta nuestro clima cálido actual (el Holoceno).

Causas del cambio climático

Naturales

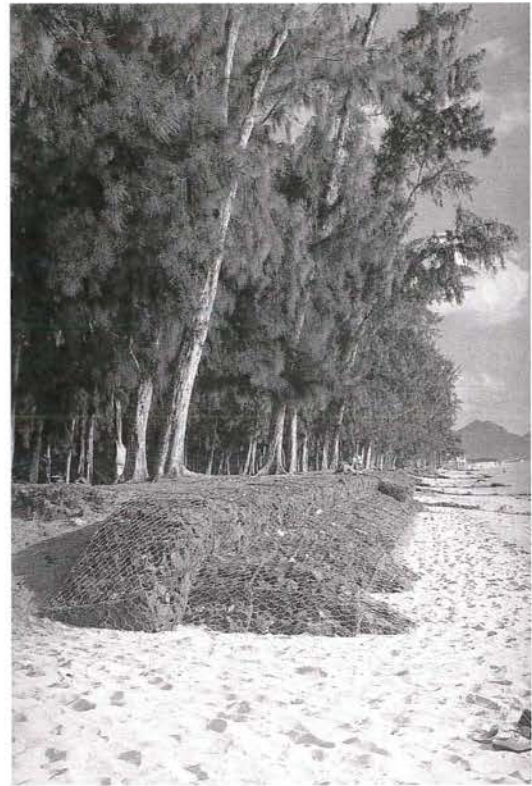
Los factores naturales que han originado que cambie el clima son: las erupciones volcánicas, los cambios en la actividad solar, los cambios de la órbita de la Tierra alrededor del sol y los cambios en la distribución de los aerosoles atmosféricos que se producen de forma natural. Sin embargo, dada la naturaleza inevitable de estos cambios naturales, son invariablemente las influencias antropogénicas las que llaman la atención.

Gases de efecto invernadero inducido por el hombre

El control sistemático llevado a cabo dentro de los programas de la OMM ha demostrado que han aumentado las concentraciones atmosféricas de gases cruciales de efecto invernadero antropogénicos, tales como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, sobre todo durante el siglo XX. La excepción son los halocarburos, cuya concentración aumentó hasta aproximadamente 1990, cuando el Protocolo de Montreal declaró las restricciones sobre el uso de estos compuestos. Sin embargo, es importante observar que estos gases tienen una vida larga en la atmósfera. Las evaluaciones demuestran que la mitad de todas las emisiones de CO₂ se trasladan a la atmósfera y permanecen ahí durante períodos de entre 50 y 200 años, mientras que la otra mitad es absorbida por los océanos, la tierra y la vegetación. Con los cambios en el uso del suelo y la mayor deforestación, se espera que aumente la proporción del CO₂ en la atmósfera.

Aerosoles

Los aerosoles provienen sobre todo de reacciones químicas entre contaminantes atmosféricos gaseosos, la arena que se eleva y el aerosol marino, los incendios forestales, las actividades agrícolas y de los tubos de escape de los vehículos. Forman una capa turbia en los



Mira lo que le han hecho a mi playa ... (Fotografía: Y. Boodhoo)

10 km más bajos de la atmósfera, la troposfera y, en un día sin nubes, hacen que el cielo no sea tan azul, sino blanquecino (sobre todo cerca del sol). También pueden darse en la atmósfera alta después de una erupción volcánica, e incluso en la estratosfera.

Debido a su tamaño (habitualmente, de unas pocas décimas de micrómetro) los aerosoles son muy eficaces para dispersar la luz solar. Parte de ésta se refleja así de vuelta al espacio. Algunos aerosoles (como el hollín) también absorben la luz. Ambas acciones, la reflexión y la absorción, originan que alcance la superficie terrestre menos calor. Sin embargo, a diferencia de los gases de efecto invernadero, la vida de los aerosoles en la atmósfera es mucho más corta y pueden eliminarse por precipitación en una semana. Los aerosoles tienen un efecto mayor en las escalas local o regional, a diferencia de los gases de efecto invernadero, que actúan a escala global.

Cambios en el uso del suelo

Con el crecimiento de la población, se ha multiplicado la presión para disponer de más superficie de tierra para el cultivo. La agricultura intensiva y la disminución continuada del agua subterránea para el riego han degradado el suelo de muchas zonas. Además del pasto de la fauna, los hombres han cambiado de forma

importante la frecuencia, la intensidad y la extensión del pastoreo a través del ganado domesticado. De hecho, los esfuerzos para contener la expansión del desierto en la región del Sahel y en otros lugares se han visto entorpecidos por el sobrepastoreo del ganado y por la tala de los árboles para leña.

Urbanización

En los albores del siglo actual, más de la mitad de la población mundial es urbana. Esto está relacionado con la producción de millones de toneladas de residuos urbanos y con la emisión de CO₂. Debido a la concentración de las actividades y de las emisiones, la circulación atmosférica local alrededor de las ciudades es tal que cambia la circulación regional, que a su vez tiene efectos sobre la circulación mundial.

Cambios importantes observados

Uno de los argumentos más convincentes relacionado con el cambio climático es que hay muchas observaciones independientes que están íntimamente correlacionadas aunque se hayan medido independientemente. Por ejemplo, de los incrementos de las medidas de temperatura de aire superficial, tanto sobre tierra como de la superficie del mar, se deriva un aumento mundial de 0,6°C en la temperatura de la superficie. Los cambios determinados por el Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) son los siguientes:

- Desde la revolución industrial, el dióxido de carbono atmosférico ha seguido aumentando a un ritmo cada vez mayor.
- Tanto las temperaturas promedio diarias máximas como las mínimas están aumentando, pero las temperaturas mínimas lo hacen a un ritmo mayor que las temperaturas máximas.
- Las medidas de temperatura de superficie, desde globos y satélites muestran que la troposfera y la superficie de la Tierra se han calentado y que la estratosfera se ha enfriado.
- La precipitación terrestre anual ha seguido aumentando en latitudes medias y altas del hemisferio norte, con la excepción del este de Asia.
- La nubosidad ha aumentado, probablemente, alrededor del 2 por ciento en las regiones continentales de latitudes medias y altas del hemisferio norte desde el inicio del siglo XX.
- La disminución de la capa de nieve y de la extensión del hielo terrestre sigue estando correlacionada positivamente con un incremento de la temperatura de la superficie terrestre.
- Las cantidades de hielo marino del hemisferio norte están disminuyendo, pero no existen tendencias significativas aparentes en la extensión del hielo marino antártico.

- Ha habido una disminución del 40 por ciento en el espesor del hielo marino ártico entre finales del verano y el inicio del otoño en los 45 a 50 últimos años.
- El incremento del aumento medio mundial del nivel del mar durante el siglo XX está en el intervalo comprendido entre 1,0 y 2,0 mm/año. Esto puede ser hasta 10 veces mayor que el aumento promedio de los 3 000 últimos años.
- El comportamiento de El Niño/Oscilación Austral (ENOA) ha sido extraño desde mediados de la década de 1970, en comparación con los 100 años anteriores.
- Se han observado aumentos pronunciados de la precipitación intensa y extrema.

Nuestro clima futuro

Predictibilidad del clima

Debido a la complejidad del propio sistema climático, hacer predicciones precisas no es una tarea fácil. La descripción del clima futuro se basa en las suposiciones de que los efectos observados hasta ahora seguirán con su inercia inherente. Cualquier forzamiento adicional, como el provocado por la emisión continua de gases de efecto invernadero, empeorará todavía más el cambio.

Proyecciones del clima futuro a partir de modelos

Algunos de los factores importantes que pueden caracterizar nuestro clima futuro, según predicen los modelos son los siguientes:

- Está previsto que la temperatura superficial media mundial aumente entre 1,4 y 5,8°C antes de que termine el presente siglo.
- Es probable que se den más días cálidos y más olas de calor en casi todas las zonas terrestres. Se esperan aumentos del índice de calor, una combinación de la temperatura y de la humedad. Es probable que disminuyan los días de helada y las olas de frío en latitudes altas.
- Está previsto que los extremos de precipitación aumenten más que la media y se espera que la intensidad de los episodios de precipitación aumente prácticamente en todas partes.
- Habrá pérdidas de hábitats de algunos peces de aguas frías, pero se ganarán hábitats para los peces de aguas cálidas. Los científicos predicen una disminución del 15 por ciento en la producción mundial total de fitoplancton marino antes de final de siglo debido a la lenta circulación oceánica resultante del calentamiento mundial y del cambio en la circulación atmosférica.

Gestión de los recursos hídricos

Con nuestro clima futuro, está previsto un aumento de precipitación de entre el 5 y el 10 por ciento. Está previsto que los aumentos se produzcan en latitudes medias septentrionales, en el África tropical y en la Antártida en invierno y en el sur y el este de Asia en verano. Australia, América Central y el sur de África muestran disminuciones consecuentes en la precipitación de invierno. Son probables mayores variaciones interanuales en la precipitación en la mayor parte de las zonas en las que está previsto un aumento de la precipitación media.

Sin embargo, se prevé una menor disponibilidad de agua para las poblaciones de muchas regiones con escasez de agua, en especial en las regiones subtropicales. La sequedad de las zonas medias continentales durante los meses de verano originará un aumento de las sequías.

Salud humana

Nuestro clima futuro nos hará más vulnerables a las amenazas de las enfermedades y de las plagas. El cambio climático afectará a la salud humana de múltiples formas, incluidos efectos directos (p. ej., menos estrés por frío en países templados, pero más estrés por calor, muertes por inundaciones y tormentas) y efectos indirectos que funcionan a través de cambios en las distribuciones de los vectores de enfermedades (p. ej., mosquitos), patógenos transportados por el agua, la calidad del agua, la calidad del aire, la disponibilidad y la calidad de los alimentos (p. ej., un menor contenido en proteínas de algunos cereales), el desplazamiento de población y la alteración económica. El mayor efec-

to del estrés por calor se sentirá en zonas urbanas, que seguirán creciendo y albergando porcentajes cada vez mayores de la población terrestre.

Efectos del aumento del nivel del mar

Las proyecciones del aumento del nivel del mar para el siglo XXI, sobre todo debido a la expansión térmica de los océanos, están en el intervalo comprendido entre 9 y 88 cm.

El nivel más alto de este incremento ocasionaría un aumento generalizado de las inundaciones en muchos asentamientos humanos (que afectarían a decenas de millones de habitantes). Las infraestructuras costeras resultarían dañadas, dando lugar a otros problemas como la salinización del agua potable.

El clima futuro pondrá a las poblaciones que habitan islas pequeñas y zonas costeras bajas en riesgo particular de efectos sociales y económicos calamitosos por aumento del nivel del mar y por olas de tempestad. Muchos asentamientos humanos ya se están enfrentando a un riesgo mayor de inundación y erosión costeras y continuarán haciendo frente a este riesgo. Millones de personas que viven en deltas, zonas costeras bajas y en islas pequeñas serán desplazados y perderán infraestructuras vitales. También se verán en peligro los recursos críticos para las poblaciones isleñas y costeras, tales como el agua dulce, las pesquerías, los arrecifes de coral y los atolones, las playas y el hábitat de la fauna.

Calidad del aire

Está previsto que el cambio climático empeore la contaminación atmosférica local y regional y retrase la recuperación de la capa de ozono estratosférica. Esto, junto con el agotamiento del ozono estratosférico, los cambios en los sistemas ecológicos y la degradación del suelo, cambiará las fuentes y los sumideros de los gases de efecto invernadero y alterará el equilibrio radiativo de la atmósfera.

Ecología

Es muy probable que algunos sistemas naturales como los glaciares, los arrecifes de coral y los atolones, los manglares, los bosques boreales y tropicales, los ecosistemas polares y alpinos, los humedales de llanura y las praderas nativas, sufran cambios importantes e irreversibles. Se espera que aumenten importantes perjuicios para los ecosistemas debidos a perturbaciones como el fuego, las



Las emisiones que siguen a las erupciones volcánicas, como la espectacular erupción del Monte Etna, en Sicilia, en octubre de 2002, inyectan cantidades importantes de partículas y de gases en el aire, destruyendo el ozono estratosférico e influyendo sobre el clima. (Fotografía: NASA)

sequías, las inundaciones, las plagas de insectos, la invasión de especies, las tormentas y los episodios de blanqueo de coral.

Glaciares y hielo

Los glaciares y los casquetes de hielo seguirán perdiendo terreno durante el siglo XXI y está previsto que la capa de nieve y el hielo marítimo sigan disminuyendo. Es probable que la capa de hielo antártica aumente de masa debido a una mayor precipitación, mientras que posiblemente la capa de hielo de Groenlandia pierda masa. Sin embargo, después del siglo XXI, si el globo sigue calentándose, es bastante probable que grandes porciones de la Capa de Hielo del Oeste Antártico se vuelvan vulnerables.

Marco internacional

Para comprender el cambio climático debe haber un fortalecimiento del marco internacional en la coordinación de los esfuerzos nacionales e institucionales para que los recursos de investigación, cálculo y observación puedan utilizarse para el mayor beneficio mundial. La OMM ha trabajado durante años en este problema con otros organismos de NU. La publicación de los informes de evaluación del IPCC es un ejemplo de los frutos de esta coordinación. La OMM emitió en 1999 la Declaración de Ginebra, que pide a los Miembros de la OMM que

apoyen a los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales en su misión de comprender la meteorología y el clima y de ofrecer los servicios afines necesarios.

Conclusiones

Es inconcebible que la humanidad, con todos sus nobles logros, sus aspiraciones y su buena voluntad, per-

manezca indiferente al grito del colectivo climatológico. La lucha para reparar el clima se abordará seguramente en varios terrenos y de tal manera que garantice la estabilidad entre los sistemas climáticos. Seguro que en el futuro nuestras industrias serán más eficaces a través de métodos más limpios de producción. Se complementará el combustible fósil en grandes cantidades con formas renovables. Se gestionará nuestra tierra de forma juiciosa. Se eliminarán los vertidos de las industrias y se mantendrán los océanos limpios. Se vol-

243

ACCIONES DE ALGUNOS ESTADOS INSULARES PARA MITIGAR EL EFECTO PREVISTO DEL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR

Mauricio: se están colocando pilares a lo largo de ciertas partes de las costas (véase la fotografía de la página 240)

Seychelles: se han revisado los planes de recuperación de tierras para incluir un aumento del nivel del mar previsto de 88 cm.

Maldivas: se están colocando estructuras de acero y de cemento reforzado como arrecifes de coral artificiales.

Pacífico Sur: está en marcha la reubicación de habitantes de islas inundadas en islas más seguras.

verán a diseñar nuestros vehículos para que utilicen formas más limpias de combustibles.

Pero lo más importante de todo es el hecho de que debemos cambiar urgentemente nuestras actitudes y acordar vivir de forma modesta y realista —todo en nombre del futuro— que no es nuestro, sino que hemos tomado prestado de las generaciones futuras.

