

# MODELIZACION DEL CLIMA

Por W. Lawrence GATES \*

La modelización está en el corazón de la moderna investigación del clima y es el mecanismo que nos permite relacionar entre sí los componentes de la atmósfera, de los océanos y de la superficie terrestre del sistema del clima. Se repasan brevemente los orígenes y el desarrollo de la modelización del clima en comparación con los antecedentes de la modelización de la predicción del tiempo. En los últimos decenios, los modelos del clima han ido incluyendo mejores parametrizaciones de los procesos físicos y se han utilizado en una gran variedad de experimentos de sensibilidad, muchos de los cuales han sido organizados por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) y por el anterior Programa Mundial de Investigación de la Atmósfera. Los principales errores sistemáticos de los modelos atmosféricos actuales son las temperaturas excesivamente bajas en la troposfera superior de las latitudes más altas y una subestimación general de los comportamientos extremos (tales como los episodios de bloqueo atmosférico), mientras que los modelos del océano usados para el clima, generalmente simulan demasiado poco la variabilidad y el transporte. En la actualidad, en los modelos del clima la mayor parte del énfasis recae en simular los efectos de los gases invernadero, cada vez más abundantes; los modelos atmósfera–océano usados para este fin tienen una resolución horizontal de algunos kilómetros y emplean ajustes de los flujos de calor y de agua dulce en superficie para reducir la deriva del clima. El principal problema en la modelización del clima continúa siendo la representación gráfica exacta del papel de las nubes y los aerosoles. Se observa que el futuro eje de la modelización del clima será simular la variabilidad del clima a escalas interanuales y

decenales y averiguar los límites de la predictibilidad del clima.

## Introducción

Los modelos del clima son representaciones matemáticas idealizadas del sistema del clima que constan, en general, de la atmósfera, los océanos, los hielos y la superficie terrestre, junto con los procesos o interacciones que sirven para asociar estos componentes (figura 1). Sin embargo, con frecuencia se fijan (o se omiten) una o más partes del sistema y entonces hablamos, por ejemplo, de los modelos del clima de la atmósfera o de los modelos del clima atmósfera–océano superior. Una característica importante de los modelos del clima es que están integrados durante muchos años bajo modulaciones externas específicas para generar las estadísticas que nosotros llamamos el clima, mientras que los modelos de predicción (atmosféricos) se integran para unos 10 días y dependen mucho más de la exactitud del estado inicial. Por lo tanto, los modelos de predicción son menos sensibles a los efectos de los procesos que actúan lentamente que los modelos del clima, aunque en los años recientes se está produciendo una fusión cada vez mayor de los dos tipos de modelos.

El grado de idealización o simplificación en los modelos del clima varía desde los modelos promediados globalmente, en los que sólo se consideran los efectos de la radiación y la convección en la vertical, hasta los modelos mundiales tridimensionales de la circulación general (MCG) conjunta de la atmósfera y los océanos. Aunque generalmente se piensa que los modelos más complejos son mejores, en muchos casos los modelos sencillos producen resultados de una precisión comparable (y con

\* Director del Programa para el diagnóstico y la comparación de los modelos del clima, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, Universidad de California, Livermore, California, EE.UU. El profesor Gates es presidente del Grupo Director del PMIC sobre la Modelización del Clima Mundial y miembro (y, anteriormente, presidente) del Grupo de Trabajo CCA/CCM sobre experimentación numérica.

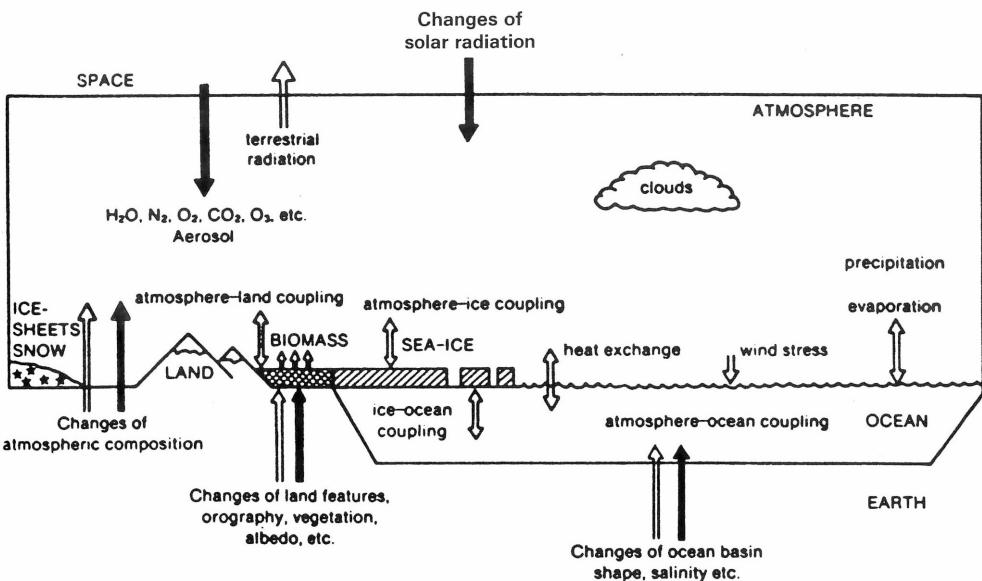


Figura 1 — Ilustración esquemática de los componentes del sistema mundial del clima, junto con las principales interacciones internas del sistema y las modulaciones externas (Organización Meteorológica Mundial, 1975).

costes muy inferiores, aunque con menos detalle). Sin embargo, se eligen cada vez más los modelos de la circulación general en la investigación climática y son estos el centro de este análisis de la modelización en el contexto del PMIC.

En general, los modelos (por ejemplo, los MCG) desempeñan un papel doble en la investigación del clima: primero, ellos y sólo ellos proporcionan la oportunidad de emprender una integración completa de los muchos procesos físicos que intervienen en el sistema del clima, aún cuando quizás se omitan algunos efectos. Los MCG más avanzados encaminan nuestro conocimiento actual de la mejor manera para representar o parametrizar los efectos de fenómenos tales como la radiación, la convección, las nubes y la mezcla turbulenta en el comportamiento a escala mundial de la atmósfera y los océanos, al tiempo que representan la evolución y el ajuste a gran escala de la circulación a escalas mundial y sinóptica. Por eso, los MCG son las mejores herramientas disponibles para la investigación cuantitativa del clima y constituyen nuestra mejor esperanza para una predicción sistemática del clima; segundo, los MCG, con sus resoluciones espacial y

cronológica, relativamente densas, proporcionan el mejor método disponible para interpolar o analizar nuestros datos incompletos de observación en las distribuciones mundiales dinámicamente coherentes. Por estas razones, los procedimientos modernos de asimilación de los datos dependen mucho de los MCG y, en la actualidad, se usan mucho los análisis mundiales de los datos atmosféricos mediante modelos para los estudios diagnósticos tanto dentro como fuera del PMIC. Se están desarrollando técnicas similares para los océanos, donde la escasez de observaciones es todavía más acusada.

### Perspectiva histórica

Los modernos modelos del clima han evolucionado continuamente durante los últimos decenios y, generalmente, han ido al mismo ritmo que los progresos de la modelización de la atmósfera y los océanos, así como de los avances en la capacidad de los ordenadores. Los modelos climáticos se distinguen de los modelos de predicción en que, para el clima, procuramos determinar las estadísticas, promediadas en el tiempo, de la simulación antes que la evolución de

acontecimientos sinópticos específicos; se puede considerar que el primer modelo del clima fue el de Phillips (1936), en el que se simulaba por primera vez la circulación general atmosférica. Este estudio, y las siguientes modelizaciones pioneras de Smagorinsky, Leith, Mintz y otros en los años 60, iniciaron el desarrollo de los modelos mundiales a varias instituciones.

Desde entonces, los MCG han experimentado un desarrollo progresivo con la inclusión de mejores parametrizaciones y el uso de mejores métodos de solución numérica. A mediados de los años 70, cuando se estaba planificando el PMIC, los MCG se usaban para estudiar la respuesta de la atmósfera a los cambios de temperatura de la superficie del mar (TSM), la radiación solar y la composición atmosférica, mientras se iban consiguiendo en los modelos importantes mejoras en el tratamiento de las nubes y de los procesos convectivos. Más tarde, se incorporaron con éxito a los MCG mejores tratamientos de la orografía y de las interacciones en la superficie terrestre y, en los años 80, la mayor velocidad de los ordenadores permitió realizar integraciones multianuales con los modelos de resolución horizontal ligeramente superior e incluir un océano acoplado. Durante este período, la atención se centró cada vez más en los efectos sobre el clima del aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico, aunque también se dedicó una parte importante de la experimentación con modelos, a los efectos climáticos de la TSM y de los cambios en la superficie terrestre. Durante este período, el desarrollo de los MCG de los océanos se centró en el tratamiento de los remolinos a mesoescala y en la simulación de la respuesta de la parte superior de los océanos al forzamiento superficial durante los episodios de El Niño.

## Situación actual

Las parametrizaciones físicas de los MCG atmosféricos y oceánicos, que se emplean actualmente para investigar el clima son generalmente tan sofisticadas como las de los modelos que se usan para predicción o para las simulaciones regionales. Los modelos del clima más avanzados, tales como los del Laboratorio para la Dinámica de los Fluidos Geofísicos (GFDL) en Princeton (EE.UU.), los del Centro Hadley de la Meteorological Office del Reino Unido (UKMO), en Bracknell (Reino Unido), los del Instituto de Meteorología Max

Planck (MPI), en Hamburgo, (Alemania) o los del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR), en Boulder (EE.UU.), constan de submodelos mundiales acoplados de la atmósfera y el océano, cada uno de ellos con 10 a 20 niveles horizontales, e incluyen efectos tales como la generación de agua líquida en las nubes y la vegetación superficial interactiva. Sin embargo, y a diferencia de lo que ocurre en los modelos de predicción, la resolución horizontal de los modelos del clima es, generalmente, del orden de unos pocos grados de latitud, es decir de varios cientos de kilómetros, en vista de los costes que supone el realizar integraciones durante años y decenios. Por lo tanto, los modelos mundiales del clima no resuelven los efectos regionales, aunque usarlos con los modelos locales anidados de malla fina es un campo de investigación activa actual.

La precisión representativa de los modelos del clima modernos se presenta en la figura 2, en donde se muestra la precipitación media estacional promediada por zonas, simulada mediante diversos MCG atmosféricos actuales. En comparación con la distribución climatológica observada, los modelos, en general, representan realmente la distribución de la precipitación a gran escala y su desplazamiento estacional, aunque hay errores sistemáticos evidentes, en especial en los modelos de baja resolución. Durante los últimos 20 años, ha habido una convergencia lenta hacia lo observado en esas estadísticas, aunque persiste un desacuerdo sustancial entre los resultados de los modelos, incluso cuando se normalizan las condiciones experimentales. Esta dispersión del modelo se ha observado también en otros resultados y podría representar la dependencia inevitable del modelo o la predictibilidad limitada del clima. (Sin embargo, obsérvese que en la figura 2 no se representa la varianza de la precipitación estacional y que la temperatura de la superficie del agua del mar en los modelos se mantiene próxima a la observada climatológicamente).

En general, los MCG atmosféricos actuales simulan bastante bien las distribuciones observadas de la temperatura y la circulación troposféricas, aunque se ha observado una tendencia común en los modelos al simular temperaturas que son demasiado bajas en la troposfera polar superior y en la estratosfera polar inferior en verano (y, en menor medida,

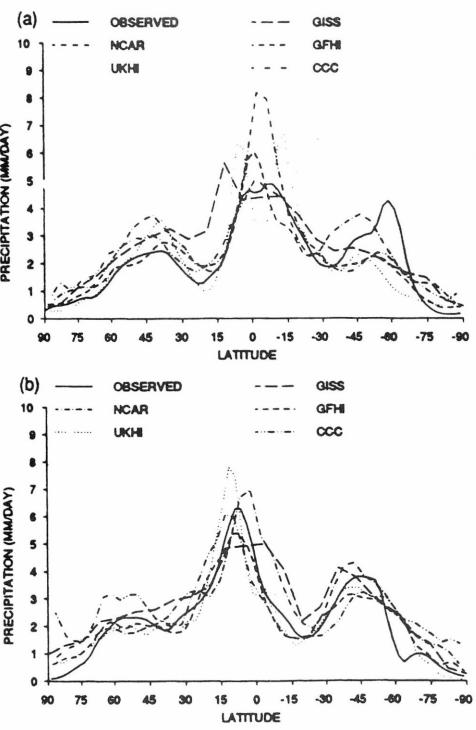


Figura 2 — La precipitación media estacional promediada zonalmente, simulada por varios modelos del clima actual y según se observó para (a) diciembre, enero y febrero y (b) junio, julio y agosto (la identificación de los modelos y la procedencia de los datos observados se ofrecen en Gates *y col.*, 1990)

en la troposfera tropical inferior). Como resultado de ello, la mayoría de los modelos simulan vientos del oeste excesivos por encima y hacia el polo de la corriente en chorro en el verano y muchos muestran vientos del este excesivos en la estratosfera inferior. Los MCG atmosféricos actuales, en general, subestiman también la energía cinética debida a circulaciones transitorias y subestiman la frecuencia y la duración de los episodios de bloqueo. Entre otros errores sistemáticos de los modelos del clima (atmosféricos) actuales están la subestimación aparente de la humedad del suelo en verano, subestimar la radiación de onda larga que se emite en las latitudes altas y subestimar el enfriamiento del aire cercano a la superficie en invierno en la Antártida. Estos errores se producen pese al hecho de que en las simulaciones del clima más recientes (incluyendo los ejemplos que se muestran en la figura 2), se obliga a que la

temperatura de la capa oceánica superficial permanezca cerca de la climatológica actual; sin esta restricción, los modelos actuales tenderían a simular hielos marinos excesivos en las latitudes altas.

Los modelos del clima actuales más sofisticados son aquellos en los que la atmósfera se acopla interactivamente a un MCG oceánico (pero sin resolución suficiente para representar los remolinos oceánicos a mesoscala). Cuando estos modelos se usan en simulaciones durante muchos años, a menudo se hace un ajuste o corrección del flujo de calor de la superficie del océano y de agua dulce para mantener la fidelidad de las simulaciones de la temperatura de la superficie del agua del mar y de las distribuciones de los hielos marinos. Aún así, esos modelos acoplados continúan presentando los mismos errores generales que son característicos de sus componentes atmosférica y oceánica, como se señaló antes. En particular, en los modelos acoplados actuales, los océanos subestiman de forma importante la intensidad de la circulación y de los gradientes horizontales de temperatura en las cuencas oceánicas principales y, por lo tanto, subestiman el transporte de calor en los océanos. No obstante, varios de estos modelos se han probado para períodos largos de tiempo y han simulado con éxito la estructura media a gran escala de la temperatura del sistema atmósfera-oceáno, como se muestra en la figura 3.

Una aplicación actual importante de los modelos acoplados atmósfera-oceáno es simular la respuesta del clima al aumento progresivo del CO<sub>2</sub> atmosférico. En estas pasadas de ordenador, se supone un escenario dado de la futura concentración de CO<sub>2</sub> (tal como los desarrollados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático), y se calcula la evolución temporal del sistema a partir de unas condiciones iniciales que normalmente se adoptan de los resultados de las pasadas anteriores. En la figura 4 se muestran los resultados de uno de estos cálculos en función de la variación de la temperatura del aire en superficie que se obtiene tras unos 100 años de crecimiento del CO<sub>2</sub>. El análisis de esta situación, comparada con una pasada paralela de control (en la que el CO<sub>2</sub> se mantenía constante), muestra que la mayor parte de la variación de la temperatura simulada está asociada realmente al

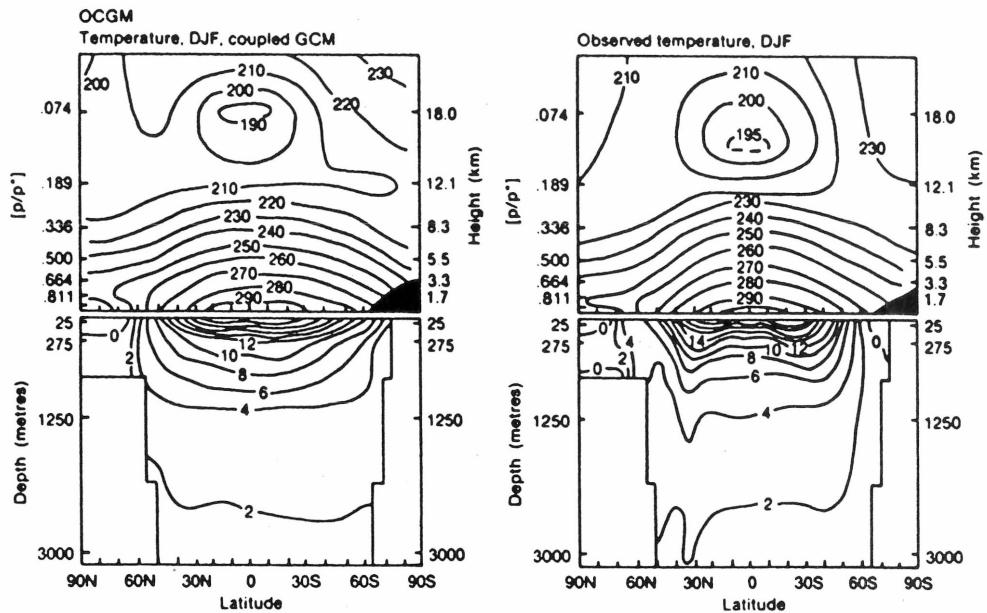


Figura 3 — La temperatura media estacional promediada zonalmente simulada por el MCG acoplado atmósfera-océano del NCAR y según se observó para diciembre, enero y febrero (*tomado de Washington y Meehl, 1989, y resumido por Gates y col, 1990*)

incremento del CO<sub>2</sub> y que no se debe a fluctuaciones no forzadas o naturales. En otras palabras, dentro de los límites de la fidelidad de los modelos, la distribución y la amplitud de la variación de la temperatura que se observan en la figura 4 son características de los cambios esperados debidos a un aumento de CO<sub>2</sub>. Aunque a estos cambios no se les puede asignar ni un horario ni una fecha (debido a la incertidumbre en las condiciones iniciales y en las concentraciones futuras de CO<sub>2</sub>), este es un ejemplo excelente del uso de modelos para representar los posibles cambios climáticos futuros. Cuando se aplican a otras variables (y a otros modelos), estos análisis del modelo pueden proporcionar la base de una estrategia para detectar el cambio climático asociada a un sistema mundial de observación del clima.

## **Temas destacables**

Uno de los temas destacables en la modelización del clima y que precisa más atención es la parametrización de las nubes. Estudios recientes de Cess y sus colaboradores han mostrado que las interacciones radiativas de las nubes determinan en gran medida una respuesta del modelo a los cambios en el forzamiento externo, tales como los cambios de la

temperatura de la superficie del mar o en la concentración de CO<sub>2</sub>. Investigaciones recientes han puesto de manifiesto también que la realimentación radiativa de las nubes introducida en los modelos se ve afectada al incluir la microfísica de la nube y por la resolución de los modelos, con variaciones relativamente pequeñas del albedo o la altitud de la nube se pueden producir alteraciones importantes en los efectos radiativos de onda corta y larga. Un tema afín destacable se refiere a los aerosoles: las investigaciones recientes indican que la dispersión de la radiación solar por los aerosoles sulfatados de la atmósfera y su posible efecto en el crecimiento del albedo de la nube pueden ejercer un forzamiento general del clima que es de una magnitud comparable, pero de signo contrario, al de los gases invernadero de origen antropogénico. Por lo tanto, incluir los aerosoles radiativa y físicamente interactivos en los modelos de la circulación general es una actividad prioritaria de investigación.

Aunque de ninguna manera es un elemento nuevo en la modelización del clima, el acoplamiento del océano y la atmósfera que lo cubre sigue requiriendo atención. Como se señaló anteriormente, la mayoría de los modelos acoplados muestra una desviación

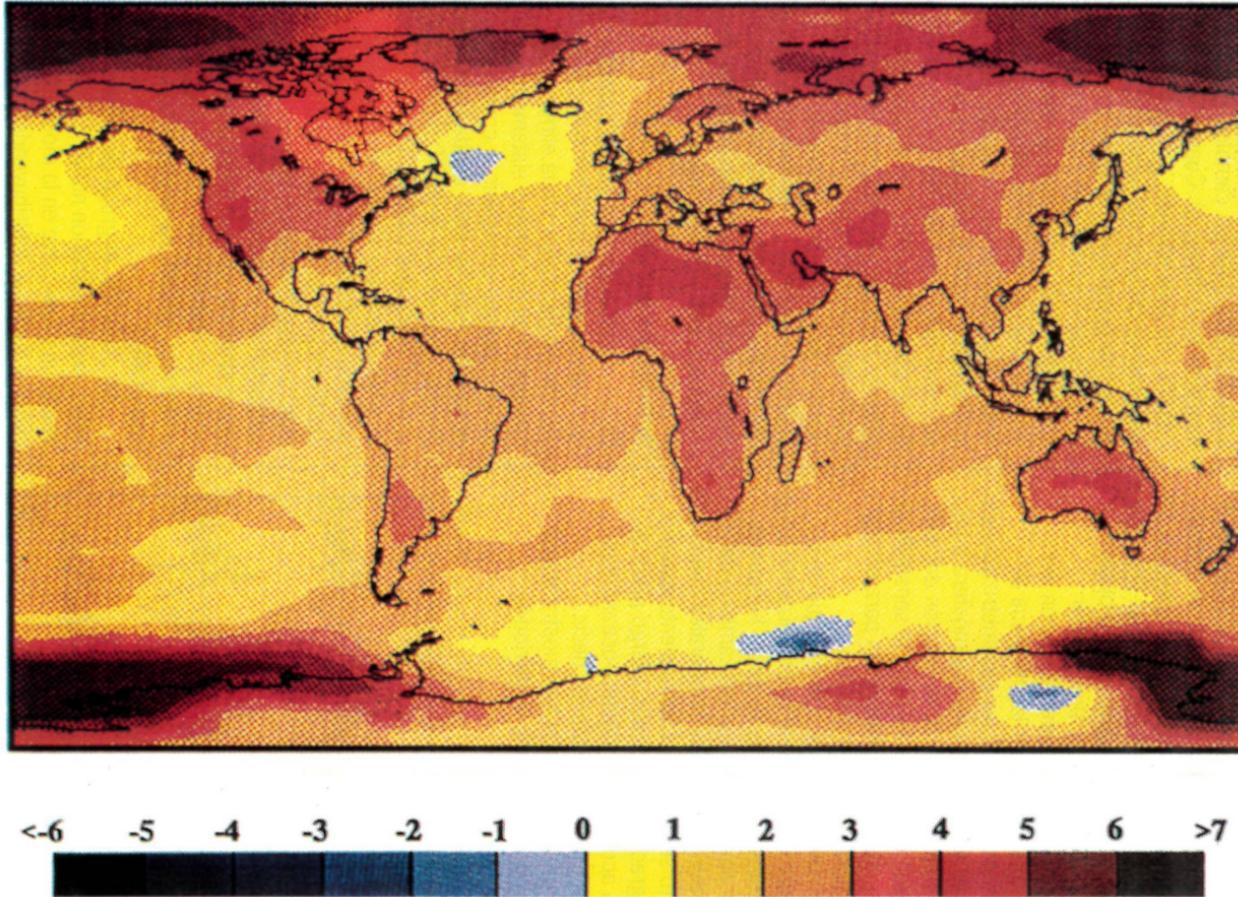


Figura 4 — El cambio de la temperatura del aire en superficie, simulado por el MCG acoplado atmósfera-océano del MPI, hacia el fin de un lapso de 100 años durante el cual aumentó el  $\text{CO}_2$  atmosférico de acuerdo al escenario A del PICC (1,3% por año) (comunicación personal de B. Santer)

lenta pero progresiva de la temperatura de la superficie del mar, a menos que se haga un ajuste para estabilizar el flujo neto de calor de la superficie del océano, de modo que la temperatura de la superficie del mar se mantenga cerca de la climatologica actual. A menudo se hace también un ajuste análogo en el caudal neto de agua dulce sobre el océano para estabilizar la salinidad de la superficie. La necesidad de estas correcciones del flujo (que a menudo son comparables a las propias incorrecciones del flujo), puede estar relacionada con la falta de resolución del modelo, o puede indicar la presencia de errores sistemáticos en las parametrizaciones del flujo en los modelos de la atmósfera o del océano. Esas técnicas de corrección del flujo, aunque son útiles para estudiar la sensibilidad del clima, son menos adecuadas para simular los principales cambios del clima.

Una cuestión destacable a la que se le puede aplicar claramente la modelización es la predictibilidad del clima, es decir, hasta qué punto se pueden predecir los cambios del clima a diversas escalas temporales cuando se conoce (o se supone) el forzamiento externo. Las integraciones recientes a largo plazo de los MCG acoplados atmósfera-océano con forzamientos sin cambios (es decir, integraciones de control) han mostrado una variabilidad considerable en períodos

decenales o más largos, como se muestra en la figura 5 para el modelo del GFDL. Dicha variabilidad no forzada representa el origen de las fluctuaciones del clima o naturales o generadas internamente, de las que hay que distinguir cualquier signo de cambio climático (como se hizo para los cambios que se muestran en la figura 4). Cuando se recaliza un conjunto de simulaciones, por ejemplo desde condiciones iniciales ligeramente distintas, existe una pequeña correlación con la aparición de fluctuaciones internas del clima a escala de tiempo interanual, decenal y más largas. Esta manifestación de ruido o caos en el sistema del clima parecería que crea límites inherentes a la predictibilidad de los cambios del clima que dependen del tiempo en ausencia de cambios importantes en el forzamiento externo. Para escalas de decenios o siglos, puede que se limite más la predictibilidad del sistema acoplado, por el colapso imprevisible de la circulación termohalina del océano y la subsiguiente alteración de los mecanismos que mantienen los balances mundiales de calor y de agua.

### Actividades actuales

De las observaciones anteriores resulta claro que para progresar más son esenciales una documentación mejor y una eliminación progresiva de los errores sistemáticos, tanto de los modelos atmosféricos como de los oceánicos. Este ha sido, desde hace mucho tiempo, el propósito del PMIC (véase, por ejemplo, Houghton y Morel, 1984) y se refleja en muchos análisis cooperativos de los modelos atmosféricos y en las numerosas conferencias y estudios que ha organizado el PMIC a lo largo de años. Más recientemente, la validación de los modelos del clima y el análisis del rendimiento de los modelos han sido el centro de atención del IPCC, a cuyos trabajos e informes el PMIC ha hecho contribuciones importantes.

En concreto, el grupo de trabajo del PMIC sobre experimentación numérica (WGNE) ha tenido un papel clave en la modelización del clima, y continúa contribuyendo a mejorar los MCG atmosféricos mediante una amplia gama de experimentaciones con los modelos de predicción atmosféricos y los del clima. Recientemente, el WGNE ha terminado una comparación preliminar entre los MCG atmosféricos (Boer y col., 1991) y en la actualidad está coordinando el Proyecto de

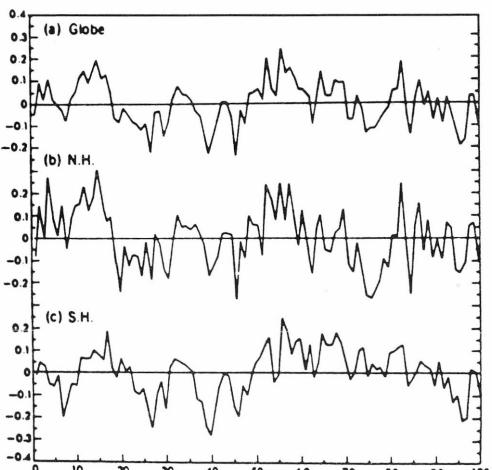


Figura 5 — La variación de la desviación de la temperatura media del aire en superficie promediada en una zona (en °C), con relación a la media de 100 años en una simulación de control realizada con el MCG acoplado atmósfera-océano del GFDL (tomado de Manabe y col., 1991)

comparación entre modelos atmosféricos (AMIP), que es la prueba y la evaluación de modelos más completa que se ha realizado. En este proyecto, todos los MCG atmosféricos están simulando el decenio 1979-1988 con las distribuciones mensuales observadas de la TSM y de los hielos marinos y con los valores normales de la constante solar y del CO<sub>2</sub> atmosférico. Los resultados de las simulaciones del AMIP permitirán comparaciones y diagnósticos amplios de los modelos, así como la validación sistemática de la capacidad de los modelos para simular tanto la climatología del decenio como los fenómenos específicos ocurridos durante ese decenio.

La cuestión clave de la predictibilidad (y su consecuencia práctica, la predicción) es el centro del programa de experimentación de los modelos acoplados que actualmente está realizando el Grupo director del PMIC sobre la modelización mundial del clima y es primordial para el programa de investigación del PMIC sobre la variabilidad del sistema acoplado atmósfera-océano y la predicción del clima, que se considera actualmente como una continuación del TOGA y el WOCE.

## Referencias

- BOER, G. J. et al., 1991: An intercomparison of the climates simulated by 14 atmospheric general circulation models. CAS/JJC Working Group on Numerical Experimentation, WCRP-58, WMO/TD No. 425, 37 pp.
- GATES, W. L., P. R. ROWNTREE and Q.-C. ZENG, 1990: Validation of climate models. In: *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment* (J. T. HOUGHTON, G. J. JENKINS AND J. J. EPHRAUMS (Eds.), Cambridge University Press, 93-130.
- HOUGHTON, J. T., and P. MOREL, 1984: The World Climate Research Programme. In: *The Global Climate* (J. T. HOUGHTON (Ed.), Cambridge University Press, 1-11.
- MANABE, S., R. J. STOUFFER, M. J. SPELMAN and K. BRYAN, 1991: Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO<sub>2</sub>. Part I—Annual mean response. *Jour. Climate*, 4, 785-818.
- PHILLIPS, N. A., 1956: The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 82, 123-164.
- WASHINGTON, W. M., and G. A. MEEHL, 1989: Climate sensitivity due to increased CO<sub>2</sub>. Experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model. *Climate Dynamics*, 4, 1-38.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1979: Proceedings of the World Climate Conference. WMO-No. 537, Geneva, 791 pp.

# FENOMENOS METEOROLOGICOS EN 1991 Y SUS CONSECUENCIAS

Por D. W. S. LIMBERT

La descripción que se da a continuación de los fenómenos meteorológicos seleccionados en 1991 se ha recopilado a partir de los informes enviados por 71 países. Este número de informes es aproximadamente la respuesta media recibida cada año. La información complementa y aclara el aspecto humano de las variaciones climáticas descritas con detalle en "El sistema climático global en 1991" (Boletín de la OMM, **41**(3)). Los informes varían en los detalles, aunque se ha realizado un intento para representar en tablas de forma sistemática los

hechos esenciales por regiones (Tabla III) para obtener algunas estadísticas comparadas sencillas pero interesantes. Los países aparecen reseñados siguiendo un criterio de proximidad geográfica de forma que queden más claras las similaridades del tiempo. Se han revisado en un contexto mundial los diferentes parámetros del tiempo tales como la temperatura y la precipitación, y sus efectos como las sequías y las inundaciones.