

## Revisiones

### Clima y cambio climático

**Antonio Ruiz de Elvira**

**Departamento de Física, Universidad de Alcalá.**

*El clima del planeta Tierra se puede definir como la sucesión temporal de las distintas distribuciones espaciales de la temperatura del aire y la lluvia sobre su superficie. La historia del ser humano ha discursado durante este último millón de años. Desde entonces el clima ha variado lentamente. Hoy hablamos de cambio climático. El ser humano ha producido una situación climática en los 100 años pasados bastante distinta de la situación en la que ha vivido en los últimos 10.000 años. Si no deja de emitir gases manta, en los siglos venideros se acentuará esta situación que, en la Península Ibérica, implicará mayores temperaturas y precipitaciones más espaciadas y convulsivas. ¿Como responderá la sociedad humana a este nuevo escenario? Es un reto para el planeta en el que interviene, como factor predominante hoy, la especie humana. En este artículo el autor revisa el concepto del cambio climático y sus causas y proporciona una relación actualizada de referencias bibliográficas sobre esta temática*

El sistema climático está formado por los subsistemas Atmósfera, Océanos, Hielo y Biosfera. Aunque la energía nuclear presenta problemas para su uso en la Tierra, la energía para el movimiento de las partículas que forman los subsistemas climáticos, para el crecimiento de la vegetación y el metabolismo de los seres vivos la proporciona casi en su totalidad un reactor nuclear en modo de fusión que denominamos Sol. Una pequeña parte proviene de las reacciones nucleares que ocurren constantemente en el interior del planeta y que producen los movimientos tectónicos.

La temperatura media global (TMG) del planeta es el promedio anual del promedio de las temperaturas del aire en la superficie de cada punto de la esfera terrestre. La TMG ha oscilado en un intervalo de unos 10 grados a lo largo de la historia del planeta. Como cualquier cuerpo físico, el planeta emite constantemente radiación, cuya longitud de onda depende de la temperatura de su superficie. La radiación emitida desde la superficie de la Tierra está en el intervalo del infrarrojo, que puede ser absorbida por algunos de los gases traza de la atmósfera.

Es sabido que la presencia en la atmósfera del planeta de los gases traza anhídrido carbónico, metano y vapor de agua, implica, por un efecto similar al del de las mantas de lana, un aumento de la temperatura del aire en la parte baja de la atmósfera. Una manta de lana retiene, durante un intervalo de tiempo, entre ella y el cuerpo, parte del calor que

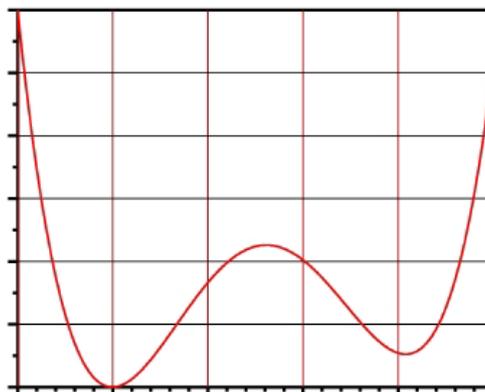


**Figura 1.** La Tierra radia la energía recibida hacia el espacio. Algunas moléculas de gases manta absorben parte de esa radiación que un tiempo después vuelven a irradiar, en parte hace el espacio, pero también en parte hacia la tierra. Dibujo del autor.

éste emite al metabolizar los alimentos. Los gases traza retienen, durante un intervalo de tiempo, entre la superficie de la Tierra y la estratosfera, parte de la energía que esa superficie emite hacia el espacio exterior constantemente (**Figura 1**).

Para una misma TMG en distintas etapas geológicas, la temperatura del aire depende de la distribución espacial de las tierras emergidas, los océanos y la circulación del agua en ellos y de la concentración de gases traza en la parte baja de la atmósfera. La distribución espacio-temporal de la temperatura del aire en el último millón de años ha sido el resultado de la presencia de un océano ártico sin islas, y de la presencia de otros tres océanos, el Atlántico, el Índico-Pacífico y el océano austral. La situación del océano ártico, rodeado de tierra, es equivalente a la de un amplificador no lineal, con dos estados metastables, según una curva del tipo de la **Figura 2**. Las fluctuaciones naturales de concentración de anhídrido carbónico y las oscilaciones de los parámetros orbitales del planeta han sido amplificadas por el sistema de corrientes oceánicas y la secuencia de zonas heladas y deshielos en la región circumpolar ártica.

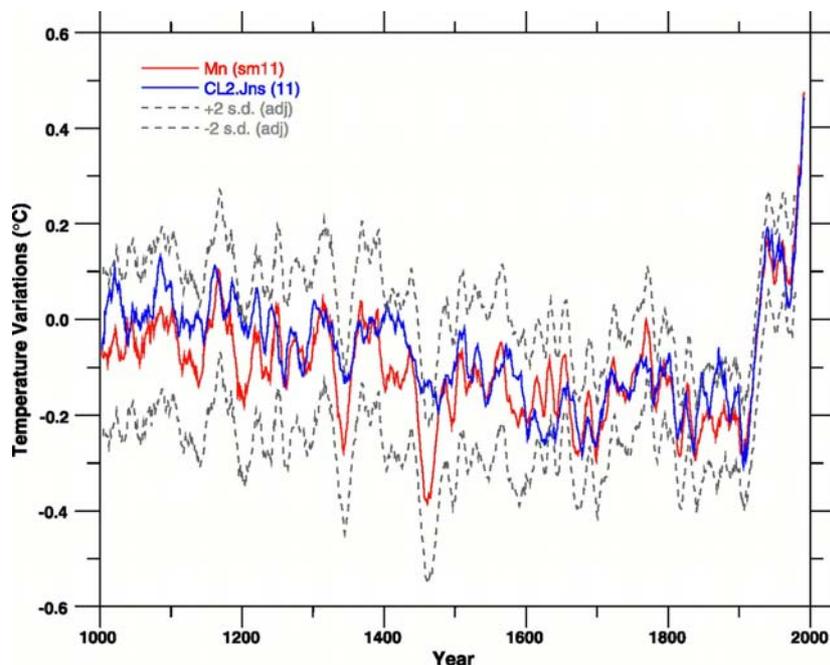
Esquema de la función potencial hielo - no hielo



**Figura 2.** Una curva típica de energía potencial en un sistema con dos estados metastables: Es sistema puede pasar de uno a otro estado de forma rápida y permanecer en cada uno de esos estados durante largo tiempo. Dibujo del autor.

La historia del ser humano ha discurrido durante este último millón de años, y es probable que muchos de los cambios sociales que adivinamos en los registros tengan que ver con las secuencias de glaciaciones, deshielos y periodos interglaciales. Es interesante constatar que el último periodo glacial acabó unos 8000 años antes de la era cristiana. Las leyendas acerca de diluvios quizá tengan algo que ver con esto, y recordemos que una nueva forma de vida social de la especie humana empezó también por aquellas fechas.

Desde entonces el clima ha variado lentamente. Así, en la época romana Siria y el norte de África eran el granero del Mediterráneo. Hoy hablamos de cambio climático. Como el clima es una secuencia temporal, es difícil entender lo que queremos decir por "cambio climático". El clima está cambiando constantemente. Sin embargo lo que estamos detectando en los últimos 100 años es un ritmo de cambio mucho más rápido que los que corresponden a la secuencia temporal registrada para etapas históricas anteriores a la presente, y en un sentido muy distinto (**Figura 3**). En particular, el contenido energético de los océanos está aumentando de manera notable, y debemos tener en cuenta su enorme inercia térmica (**Figura 4**).



**Figura 3.** Curvas de la evolución de la TGM en los últimos mil años, derivada de fuentes históricas, de registros de anillos de crecimiento de árboles y corales, de birbujas de aire en los hielos antárticos y de Groenlandia. Tomada de Crowley, T.J. (2000). La curva roja está derivada de Mann et al (1999) y la azul de Crowley y Lowery (2000).

No podemos experimentar con el planeta Tierra como experimentamos en nuestros laboratorios, pero podemos simular el clima de la Tierra. El movimiento de los fluidos sigue unas ecuaciones conocidas desde hace 150 años. De la misma manera, las ecuaciones que rigen los intercambios de radiación son conocidas desde hace muchos años. Dadas unas condiciones iniciales (las de hoy, por ejemplo, o las de hace 100 años), de temperatura del aire y del agua, velocidad del viento y de las corrientes marinas, extensión del hielo, cubierta vegetal, y composición química del aire, es posible escribir una serie de programas de ordenador, que a partir de esos datos iniciales produzcan los datos correspondientes a los tiempos subsiguientes al del comienzo.

Una ecuación diferencial es una aproximación a la realidad, y en ésta la variación del tiempo no tiende nunca a cero. Una ecuación diferencial del tipo:

$$df/dt = G$$

quiere decir realmente que:

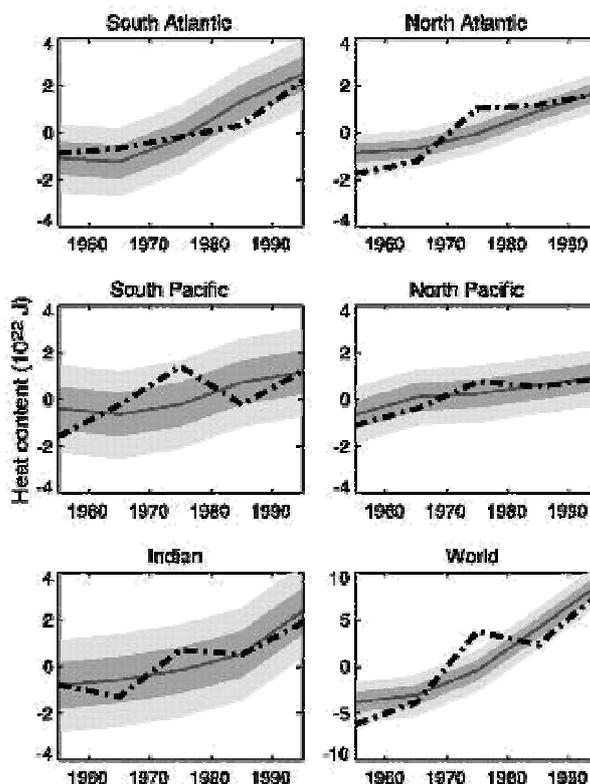
$$f(t+t') = f(t) + t' \times G$$

de manera que, a partir de unas condiciones iniciales para el tiempo  $t$ , podemos conocer los valores de la(s) función(es) en un tiempo posterior  $t'$ , siempre que  $t'$  sea relativamente pequeño.

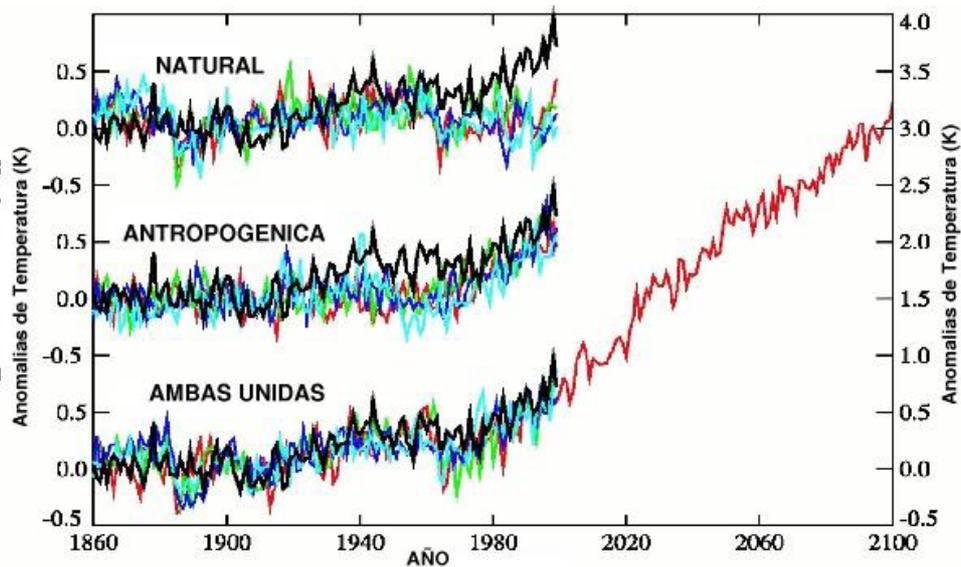
Estas operaciones se denominan modelos matemáticos de integración por diferencias finitas. Los modelos de las ecuaciones diferenciales no lineales de los cinco sistemas acoplados: aire (como elemento mecano-termodinámico), aire (como conjunto de gases que interaccionan con la radiación electromagnética), agua, hielo y biosfera, producen la evolución temporal de las distribuciones espaciales de temperatura y precipitación -el clima- como funciones del tiempo y del espacio.

El clima del futuro próximo que producen los modelos se suele resumir o indicar mediante la TMG. Hace más de 100 años que Svante Arrhenius calculó, con papel y lápiz, esa evolución bajo el supuesto de que se duplicase la concentración de anhídrido carbónico en la atmósfera. Empleó un año de trabajo y obtuvo como resultado un incremento de la temperatura de 5 °C. Hoy día los modelos de clima emplean los ordenadores más potentes de que se dispone en el mundo. Los códigos para la absorción y emisión de radiación por las moléculas de los gases traza se han mejorado considerablemente desde la época de Arrhenius. Los modelos se ejecutan de manera que se acoplan las evoluciones de la atmósfera, los océano, hielo y biosfera. Los resultados de los modelos que corresponden a una subida gradual de la concentración de anhídrido carbónico hasta una concentración final doble de la existente en 1880 indican una subida de temperaturas de 3,5 °C.

Se han realizado simulaciones con diez modelos que programan los acoplos entre los subsistemas referidos de maneras diferentes, siguiendo esquemas de integración también diferentes y con distribuciones espaciales de las variables climáticas en el tiempo de comienzo de la integración diferentes entre los distintos modelos y diferentes para las distintas integraciones de cada uno de los modelos. Los resultados de todas esas integraciones son distintos en sus detalles espaciales, difiriendo en las secuencias temporales exactas. Pero todos ellos producen el mismo grado de calentamiento medio de la tierra, la misma subida de la TMG (**Figura 5**).



**Figura 4.** Datos sobre el incremento de energía almacenada en los océanos durante los últimos 50 años. La curva de puntos está trazada a partir de datos observados, la línea continua es un promedio de 5 realizaciones diferentes del mismo modelo de clima. Las bandas indican una y dos desviaciones estándar en el conjunto de las 5 realizaciones. Tomada de Barnett et al. (2001).



**Figura 5.** Línea negra: datos de observaciones de la TMG, referidas como variaciones a partir de la media de la TMG entre 1881 y 1920. Líneas de colores: diversas realizaciones de un modelo acoplado atmósfera-océano, incluyendo las emisiones de gases manta (Antropogénico), sin incluirlas, pero incluyendo las variaciones de la intensidad de radiación solar y las variaciones orbitales (Natural), e incluyendo ambas variaciones y extrapolando para los próximos 100 años (Ambos forzamientos).

Aceptemos, pues, que la TMG va a subir unos 4 °C en unos 200 años, desde 1900 a 2100, y que esto es debido al aumento de concentración de gases manta en la atmósfera. ¿Plantea esto algún problema para la sociedad humana? La vida sobre la Tierra continuará. Continuará incluso si un cataclismo destruye plantas y animales y deja solo virus. Pero a los humanos realmente lo que nos interesa es nuestra sociedad, nuestra especie. El ser humano se ha adaptado a toda clase de secuencias temporales de temperatura y precipitación, y vive tanto en los trópicos como en los desiertos calientes y en los desiertos de hielo. Por lo tanto es posible suponer que una subida de la TMG de 4 °C no impedirá la continuación de la existencia de la especie humana. Pero la pregunta no es tanto la continuación de la especie, sino cómo se va a adaptar la especie a las nuevas condiciones. Basta recordar que uno de los problemas más importantes de la humanidad han sido las migraciones masivas, y que estas pueden exagerarse cuando la disponibilidad de agua dulce cambia en el tiempo en las distintas regiones del planeta.

La TMG es un promedio espacial de las temperaturas del planeta. La superficie del planeta va a recibir una cantidad algo mas alta de energía en estos próximos 100 años de la que recibía hace 200 años. La superficie del trópico es esencialmente agua. Al recibir más energía el agua se evapora, manteniendo su temperatura. Sin embargo el hielo a menos de 30 °C bajo cero aumenta su temperatura desde esos -30 °C hasta 0 °C sin fundirse. Al hacer el promedio para calcular la TMG hay muchos más puntos correspondientes a los trópicos que a los polos porque la superficie de una esfera es mayor entre el Ecuador y los 30° de latitud que entre los 60° de latitud y cada polo. Puesto que la temperatura en el Ecuador no va a aumentar casi nada, los aumentos serán hacia las zonas polares, y allí la subida de temperatura será mucho mayor que esos 4 °C de la TMG.

El sistema de lluvias en las zonas templadas del hemisferio norte depende de la posición latitudinal de la corriente en chorro. La corriente en chorro es una corriente muy intensa de aire que circula en el límite entre la troposfera y la estratosfera, a unos 11 km de altura. Se establece en la zona de mayor gradiente latitudinal de temperatura. Como la temperatura de los trópicos es muy constante, la posición del chorro depende esencialmente de la temperatura del polo. Un polo más frío y más extendido hacia el sur produce una posición sureña de un chorro intenso, que implica lluvias constantes, y un polo más caliente y limitado a latitudes norteñas produce un chorro norteño y débil, con meandros intensos pero ocasionales.

La primera consecuencia del aumento de la TMG será un desplazamiento del sistema de lluvias de las latitudes templadas hacia los polos. Para la Península Ibérica, el resultado del cambio climático es preocupante. La Península Ibérica está en una posición lo suficientemente sureña como para que el chorro produzca lluvias solo durante una parte del año, con etapas de sequía frecuentes. Un desplazamiento hacia el norte de la posición del chorro de unos 1000 kilómetros produciría un aumento notable de las etapas de sequía, puntuadas por episodios intermitentes de lluvias torrenciales.

¿Qué otras consecuencias tendrá el cambio climático? Una de ellas ya la estamos constatando: la desaparición de los glaciares. Los glaciares han disminuido su extensión en todo el globo. Para poner un ejemplo, el glaciar del Monte Perdido en los Pirineos tenía una extensión de 300 Ha hacia 1880 y de unas 3 Ha en el año 2000. Una disminución de los depósitos de nieve en invierno implica que las reservas de agua para el verano sean exclusivamente las de los embalses. Una temperatura más alta, aún siendo de un par de grados, implica una evapotranspiración mayor de suelos y plantas.

En las regiones caribeñas una subida de temperaturas presenta otros riesgos. Una subida de la TMG implicará una mayor humedad relativa del aire. Los huracanes y tifones se amplifican, una vez formados, por condensación del vapor de agua en las columnas ascendentes de aire en el núcleo del huracán. Mayor cantidad de vapor de agua significa huracanes más intensos y mayor oportunidad para el mantenimiento de los que se vayan formando. Adicionalmente, otra de las condiciones para los huracanes es que los vientos en las capas altas de la atmósfera (el chorro) sean débiles o inexistentes en las zonas de huracanes, lo cual también se cumplirá en una situación de cambio climático.

## Lecturas recomendadas

Allen, M., Raper, S., Mitchell, J. 2001. Uncertainty in the IPCC's third assessment report. *Science* 293: 430-433.

Barnett, T.P. 1999. Comparison of near-surface air temperatures variability in 11 coupled global climate models. *Journal of Climate* 12,2: 511-518.

Barnett, T.P., Pierce, D.W., Schnur, R. 2001. Detection of Anthropogenic Climate Change in the World's Oceans. *Science* 291: 270-274.

Bengtsson, L. 2001. Hurricane trends. *Science* 293: 440-441.

Clark, P.U., Alley, R.B., Pollard, D. 1999. Northern Hemisphere Ice-Sheet Influences on Global Climate Change. *Science* 286: 1104-1111.

- Corti,S., Molteni,F., Palmer,T.N. 1999. Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes. *Nature* 398: 799-802.
- Couzin,J. 1999. Landscape changes make regional climate run hot and cold. *Science* 283: 317-319.
- Crowley,T.J. 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289: 270-277.
- Crowley,T.J. and Lowery,T.S. 2000. *Ambio* 29: 51.
- Grassl, H. 2000. Status and improvements of coupled general circulation models. *Science* 288: 1991-1997.
- Groetzner,A., Latif,M., Timmermann,A., Voss,R. 1999. Interannual to decadal predictability in a coupled ocean-atmosphere general circulation model. *Journal of Climate* 12,8: 2607-2624.
- Hulme, M., Barrow, E., Arnell, N.W., Harrison, P. A., Johns, T. C., Downing, T.E.- 1999. Relative impacts of human induced climate change and natural climate variability. *Nature* 397: 688-691.
- Li,Z. 1999. Ensemble atmospheric GCM simulation of climate interannual variability from 1979 to 1994. *Journal of Climate* 12,4: 986-1001.
- Mann, M.E., Bradley,R.S., Hughes, M.K. 1999. *Geophy. Res. Lett.* 26:759.
- Pittock, A.B. 1999. Climate change: The question of significance. *Nature* 397: 657-658.
- Reilly,J., Stone,P.H., Forest, C.E., Webster,M.D., Jacoby,H.D., Prinn, R.G. 2001. Uncertainty and climate change assessments. *Science* 293: 430-433.
- Ruiz de Elvira, A. *Quemando el futuro: Clima y cambio climático*. Editorial Novola, Madrid, Noviembre 2001.
- Schneider, S. 2001. What is 'dangerous' climate change. *Nature* 411: 17-19.
- Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones,G.S., Allen, M.R., Mitchell, J.B.F., Jenkins,G.J. 2000, External control of 20<sup>th</sup> Century Temperature by natural and antropogenic forcings. *Science*, 290: 2133-2137.
- Vorosmarty,C.J., Green,P., Salisbury,J., Lammers,R.B. 2000. Global water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science* 289: 284-288.
- Wigley, T.M.L., Raper,S.C.B. 2001. Interpretation of high projections for global mean warming. *Science* 293: 451-454.
- Zwiers,F.W., Weaver,A.J. 2000. The causes of 20th century climate change. *Science* 290: 2081-2083.