

LAS MATEMÁTICAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Carlos M. Madrid Casado
Universidad Complutense de Madrid

1. UN ECOLOGISTA ESCÉPTICO

Este artículo estudia los fundamentos científicos y filosóficos de la teoría del cambio climático con anteojos de matemático. Antes de adentrarme en el núcleo del problema, presentaré históricamente las dos principales teorías sobre el cambio climático propuestas durante los últimos treinta años: ¿próxima glaciación o inminente calentamiento? Por un lado, tras explorar los datos climáticos de que disponemos a día de hoy, así como las múltiples controversias entre científicos a que han dado ocasión, enfriaré el calentamiento global. Por otro lado, después de analizar el clima pasado y presente de la Tierra, plantearé si resulta posible pronosticar el clima futuro. Desafortunadamente, la Teoría del Caos dará al traste con gran parte de nuestras esperanzas. Y, por último, concluiré diluyendo unas gotas de escepticismo en el ecologismo propio del siglo XXI.

Pero quisiera comenzar confesando que me considero ecologista, pero *ecologista escéptico* (como el título del polémico libro de Bjorn Lomborg). Sostengo, sinceramente, que debemos cuidar con esmero el medio ambiente, porque es el sistema en que vivimos; pero también creo que, antes de adoptar costosas políticas medioambientales (como el Protocolo de Kyoto), debemos prestar atención a todas las evidencias científicas disponibles. La política ha de estar subordinada a la ciencia, y no al revés; porque poner en práctica medidas inadecuadas puede ser, incluso, más arriesgado que no hacer nada. Nadie discute que haya que *mojarse* en la cuestión del cambio climático, pero tampoco hay que estar todo el día empapado y a punto de coger una pulmonía. Prudencia.

2. LA TEORÍA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

¿Qué es el cambio climático? ¿Hay o no hay cambio climático? En verdad, siendo precisos, el clima cambió, cambia y cambiará, porque –como ampliaré en §4– se trata de un sistema dinámico, es decir, de un sistema que evoluciona con el tiempo. Así, por ejemplo, a finales del siglo VIII, cuando Erik el Rojo condujo a los vikingos a Groenlandia (Greenland, la Tierra Verde), se encontró con una tierra llena de pastos y carente de hielo, que le incitó a fundar una próspera colonia. A principios del XV, sobrevino la Pequeña Edad del Hielo, que hizo avanzar los glaciares e impidió que los colonos vikingos sobrevivieran.

Ésta no ha sido la única fluctuación del clima en nuestra era: si nos remontamos a los primeros siglos después de Cristo, nos encontramos con un periodo de calentamiento que coincidió con la caída del Imperio Romano; o, sin ir tan atrás en el tiempo, desde mediados del XIX, cuando terminó la Pequeña Edad de Hielo, estamos en otro periodo de calentamiento, sólo interrumpido por un leve enfriamiento entre 1940 y 1975 que desató terrores apocalípticos en no pocas conciencias. A mediados de los años setenta, la gran mayoría de ecologistas hablaban de una inminente y catastrófica glaciación, como Lowell Ponte en su elogiado libro *The Cooling*. De hecho, muchos investigadores afirmaban que la actividad humana, al aumentar el dióxido de carbono presente en la atmósfera, que haría de escudo de los rayos solares, provocaría un acusado enfriamiento del clima: «Un aumento en sólo un factor de cuatro en la concentración de fondo de los aerosoles puede bastar para reducir la temperatura de superficie en 3,5° K... lo que se cree que puede bastar para desencadenar una glaciación» (Rasool & Schneider: 1971, 138-141; en *Science*).

A comienzos del siglo XXI, los ecologistas siguen hablando de cambio climático, pero el sentido de sus denuncias ha experimentado un giro de 180°. Supuestamente nos encontramos en medio de un imparable calentamiento global. Sin embargo, pese a lo extendida que está esta opinión, el

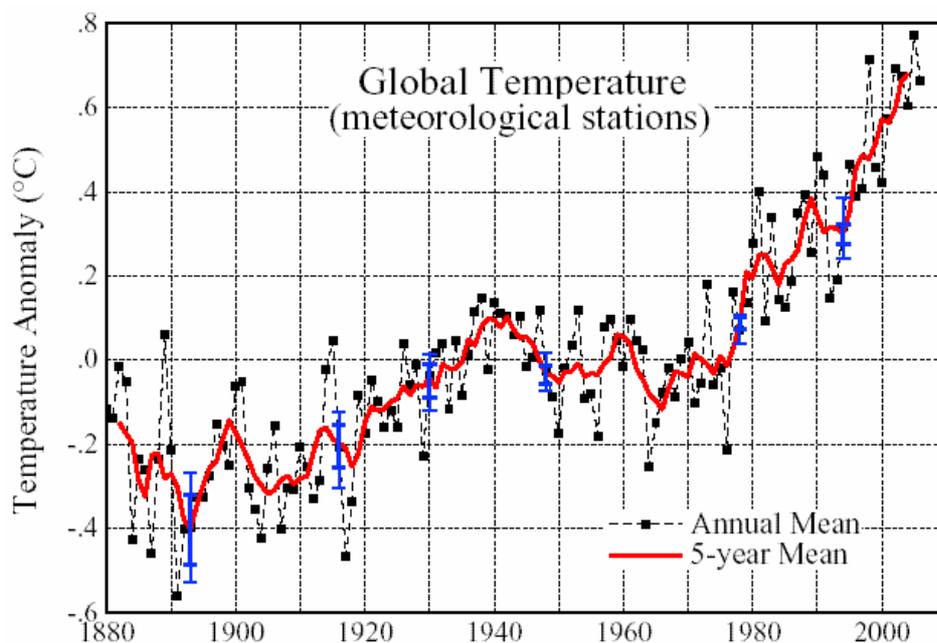
calentamiento global no pasa de ser una hipótesis: la *hipótesis* de que el incremento de los niveles de dióxido de carbono está causando una subida de la temperatura media de la atmósfera a consecuencia del llamado *efecto invernadero*. Pero los datos son cualquier cosa menos concluyentes, y así sabemos hoy que la Antártida no sólo no está deshelándose sino que está enfriándose: «Desde 1986 hasta 2000 los valles centrales de la Antártida se enfriaron por década 0,7° C... con un grave deterioro del ecosistema a causa del frío» (Doran & alea: 2002, 517-520; en *Nature*).

Entonces, ¿en qué quedamos? ¿Próxima glaciación o calentamiento global? A veces aturde lo pasajeras que llegan a ser las ideas. Dado que la primera teoría ha pasado de moda, nos centraremos en la segunda: en la *teoría* de que el aumento antropogénico del nivel de dióxido de carbono en la atmósfera está provocando una subida de la temperatura global. Primeramente, cuestionaremos el *calentamiento global*, argumentando, primero, que quizás no tenga sentido hablar de una *temperatura global* y, segundo, que su incremento -de ser real- no es tan extraordinario como lo pintan. Y, en segundo orden, vamos a poner en duda que dicho calentamiento global venga necesariamente causado por el aumento de CO₂ o lleve la firma del ser humano.

3. EL PRESENTE DEL CLIMA: ENFRIANDO EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Antes de nada, hay que decir que no hay consenso científico sobre cuánto ha sido el calentamiento global hasta la fecha. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático de la ONU (IPCC) afirma que el incremento de la temperatura global en el siglo XX está entre 0,4 y 0,8° C. Por su parte, el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA (GISS) acota dicho aumento entre 0,5 y 0,7° C, como puede comprobarse en el siguiente gráfico (nótese dos cosas: una, que las ordenadas son sólo de décimas de grado; y, dos, cómo entre 1940 y 1975 se produjo el ligero enfriamiento del planeta que hizo cundir el pánico a una nueva edad de hielo):

FIGURA 1

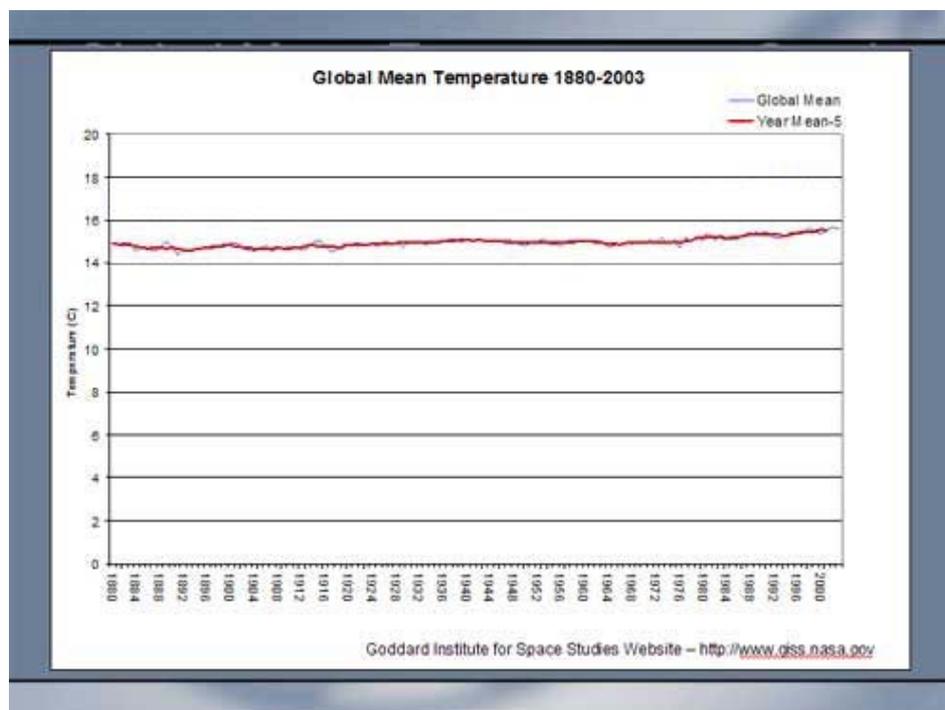


www.giss.nasa.gov

Además, el GISS precisa que la temperatura global habría aumentado hasta 0,75° C en el Hemisferio Norte y hasta 0,45° C en el Hemisferio Sur. Antes de centrarnos en el análisis de los conceptos representados en este gráfico, permítasenos enseñar este otro que muestra, a propósito, otra cara del *vertiginoso* calentamiento: los datos de la Figura 2 son exactamente los mismos de la Figura 1,

pero obsérvese cómo varía nuestra percepción del problema tras reescalar unidades (ahora, las ordenadas vienen expresadas en grados, como habitualmente):

FIGURA 2



Crichton (2005)

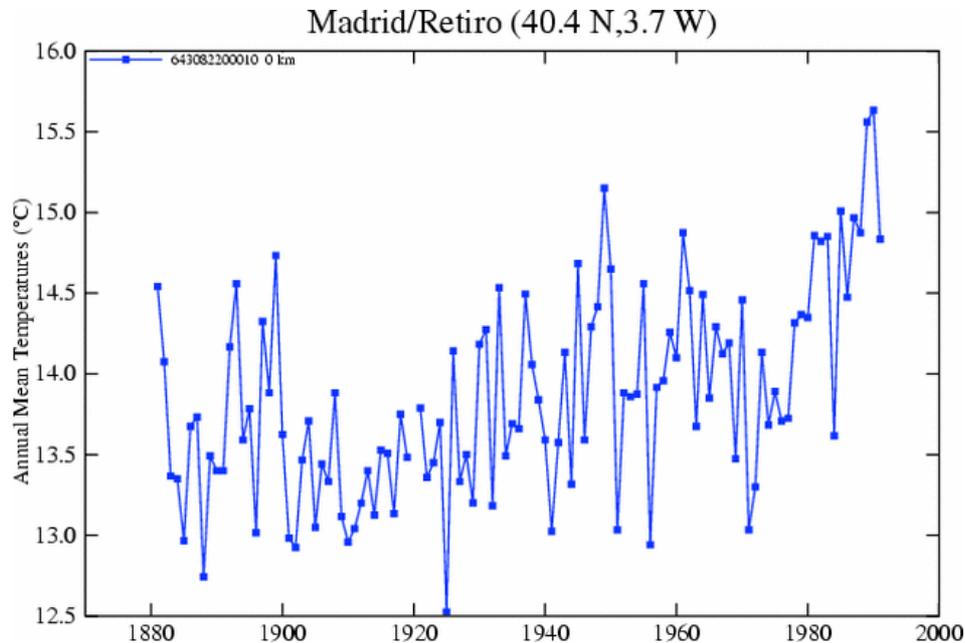
Pues bien, dando por buenos estos datos, podemos hacernos dos preguntas al respecto: a) ¿de qué estamos hablando cuando hablamos de temperatura global?; y b) ¿resulta fuera de lo común que la temperatura global haya aumentado unas décimas de grado durante el siglo XX?

Con respecto a la primera cuestión, hay que decir que la temperatura global no es -por así decir- una temperatura (no hay un relativo equilibrio termodinámico que permita calcular la temperatura del planeta con una única medición), sino un promedio de temperaturas que puede obtenerse de muy diversos modos contando con idénticos datos de partida. En efecto, y así lo ilustran Christopher Essex y Ross McKittrick (2002), en el capítulo *Theory versus Models and Metaphors* de su nada ortodoxo libro *Taken by Storm*: Un profesor de física está enseñando a sus alumnos cómo obtener promedios de la temperatura del aula de clase. En invierno, han tomado cuatro temperaturas de diversos lugares (cerca de la puerta, de la ventana, en la mesa del profesor y en los pupitres del fondo) y las mediciones han sido: 17° C, 19,9° C, 20,3° C y 22,6° C respectivamente. Cuando llega la primavera, el profesor abre la ventana dejando que una cálida brisa inunde la clase. Entonces, los cuatro termómetros marcan 20° C y el profesor pregunta a los alumnos: ¿se ha calentado o enfriado la habitación con respecto al invierno? La mitad de los alumnos calculan la media de las temperaturas usando la regla de la media aritmética, es decir, suman los cuatro registros y dividen por cuatro. La otra mitad de los alumnos deciden calcular una suerte de media geométrica: suman los cuadrados de las temperaturas, dividen por cuatro y hacen la raíz cuadrada. ¿Qué conclusión extrae cada grupo? El grupo que empleó el método lineal obtiene que la temperatura de la clase ha aumentado en 0,05° C. Por el contrario, el grupo que empleó el método cuadrático obtiene que la clase se ha enfriado en 0,05° C. Y, ¿quién tiene razón?.

Para mayor alevosía, cuando pasamos del aula al planeta, ni siquiera tenemos una red de estaciones meteorológicas temporal ni espacialmente bien distribuidas, por cuanto la gran mayoría son de reciente construcción y se encuentran en tierra, ocupando el océano las otras tres cuartas partes del

planeta. Aún más, cabe interrogarse acerca de si son fiables las temperaturas que lee cada estación meteorológica y con las que luego se elabora ese promedio ponderado denominado temperatura global. Como estamos en España, y más concretamente en Madrid, voy a fijarme en las estaciones meteorológicas más cercanas. El gráfico que mostramos a continuación representa la evolución de la temperatura en la estación meteorológica de Madrid-Retiro desde 1880 al presente:

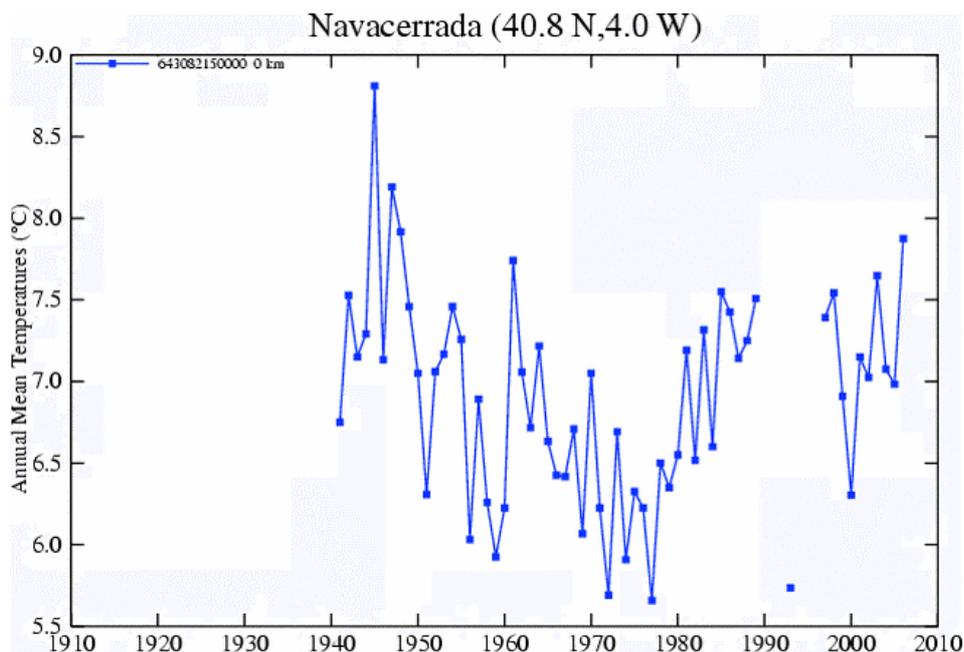
FIGURA 3



www.giss.nasa.gov

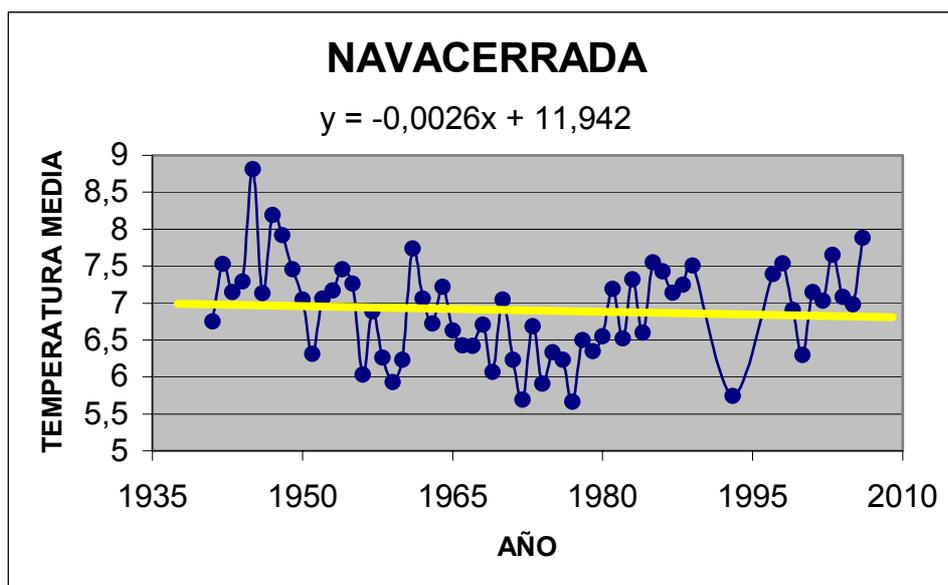
Si se mira con atención el gráfico, puede comprobarse cómo parece que, efectivamente, se ha producido un marcado aumento de la temperatura madrileña desde el despegue de Madrid allá por los años 70. Pero, ¿puede cantar victoria la teoría del calentamiento global? No, ni mucho menos; porque el incremento que observamos en el gráfico está causado, como es bien sabido, por el *efecto isla de calor* que se manifiesta en las grandes ciudades: el asfalto, los coches, las farolas... están detrás de ese significativo grado de más que capta el termómetro apostado en el madrileño Parque del Retiro. Por consiguiente, lo mejor que podemos hacer es fijarnos en alguna estación meteorológica cercana a Madrid que esté situada en un medio rural alejado de la urbe. Estos son los datos que aporta la estación climatológica de Navacerrada:

FIGURA 4



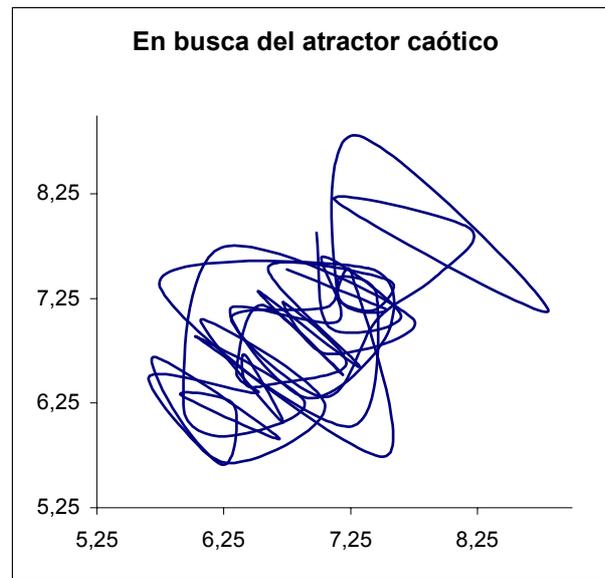
www.giss.nasa.gov

Y, sorprendentemente, constatamos que las temperaturas actuales se encuentran a los mismos niveles de las medidas a principios de los ochenta e, incluso, a principios de los cincuenta, cuando el planeta estaba superando un periodo de ligerísimo enfriamiento. Para mayor precisión, realizamos el análisis estadístico de la serie temporal consignada por la NASA de temperaturas medias anuales 1940-2007 de la estación meteorológica de Navacerrada. Si calculamos sus principales medidas estadísticas, obtenemos: Media = 6.904; Varianza = 0.409; Covarianza = -0.912; Correlación = -0.075. Si dibujamos la recta de regresión Y sobre X de la serie estadística bidimensional, comprobamos con sorpresa cómo la tendencia de la temperatura en Navacerrada a lo largo del siglo XX ha sido descender muy ligeramente:



Y si, sirviéndonos del método que idearon los matemáticos del caos David Ruelle y Floris Takens consistente en, dada una serie temporal a, b, c, d, \dots , pintar la trayectoria asociada a $(a, b), (b, c), (c, d), \dots$, buscamos la dinámica (¿caótica?) y el atractor (¿extraño?) del clima en Navacerrada,

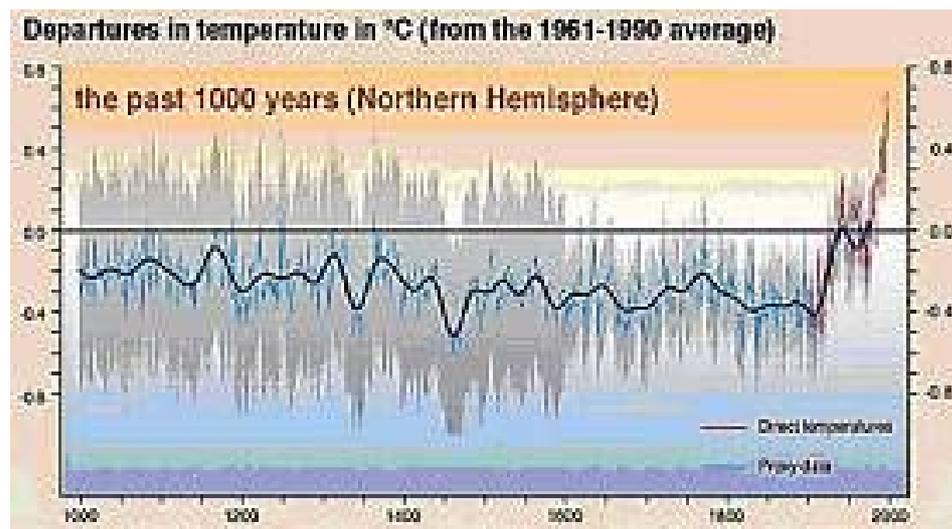
obtenemos una trayectoria cuya compleja trama podría interpretarse –más adelante– como una señal de caos:



Es más, por lo que se refiere a las estaciones meteorológicas situadas en medio rural del resto de España, más de lo mismo: pequeñísimas anomalías locales, tanto en sentido positivo como en sentido negativo.

Y esto nos lleva a la segunda cuestión que planteábamos: teniendo en cuenta el pasado climático terrestre, ¿es anormal el supuesto calentamiento en unas décimas de grado? Para responder tenemos que fijarnos en el famoso gráfico que Mann, Bradley y Hughes dieron a conocer a la opinión pública en un par de artículos publicados en *Nature* y *Geophysical Research Letters* en 1998 y 99, y que es mundialmente conocido como el *palo de hockey*:

FIGURA 5

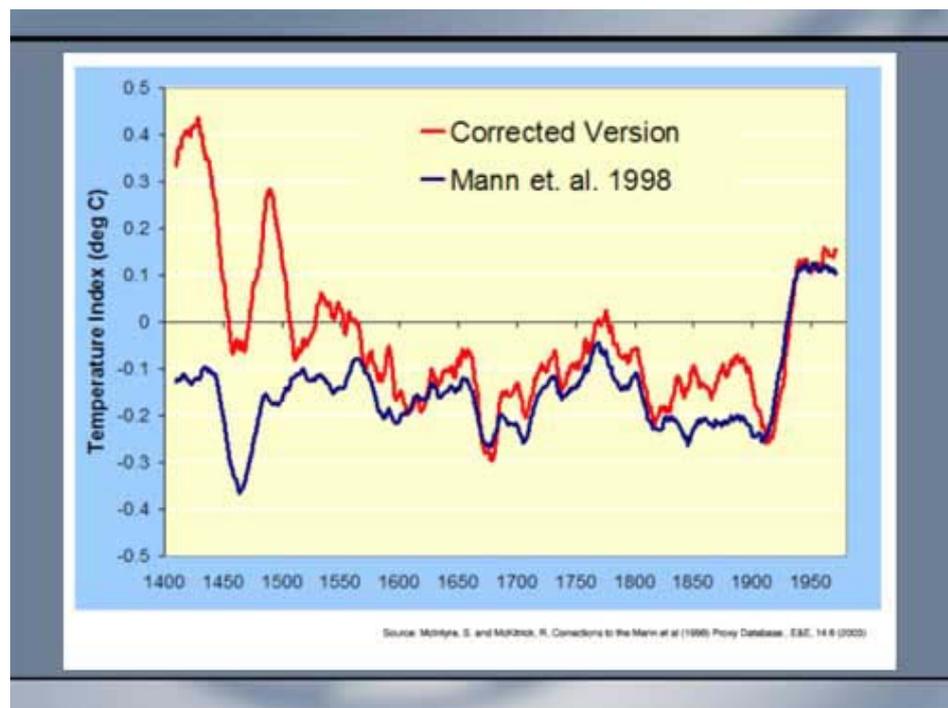


www.ipcc.ch

A la vista está que, siguiendo a Michael Mann, el hoy resulta muy distinto del ayer, y parece como si durante el último milenio no hubiese pasado nada relevante hasta el *calentón* del XX. Sin embargo, varios investigadores, como el ya citado Ross McKittrick junto a Steven McIntyre, revisaron el trabajo de Mann y encontraron múltiples errores, tanto en la toma de datos como en los cálculos

realizados con ellos. Incluso con idénticos datos, McKittrick y McIntyre (2005) obtenían resultados totalmente distintos. Aún más, estos dos investigadores canadienses descubrieron que Mann *et al* empleaban una sorprendente fórmula que, fueran cuales fueran los datos del *input*, el *output* siempre arrojaba una gráfica con forma de palo de hockey (¡!). Pero *Nature* declinó publicar su artículo y hubo que esperar a que *Energy & Environment* y *Geophysical Research Letters* corrieran el riesgo. Posteriormente, *Science* también ha dado cabida a otro artículo de denuncia similar (Von Storch, Zorita, Jones, Dimitriev, González-Rouco y Tett se han percatado de que, para rizar el rizo, Mann, Bradley y Hughes se servían de un método *ad hoc* para extrapolar las temperaturas del siglo pasado a los siglos previos). Ésta es la versión corregida del cómputo de Mann (que no deja lugar al alarmismo, pues deja entrever cómo el pasado ha estado tan caldeado como el presente):

FIGURA 6



McIntyre & McKittrick (2003, 766)

De hecho, una cantidad no despreciable de científicos se inclinan a pensar que el clima es cíclico, alternándose periodos más fríos con periodos más calientes. Para el doctor S. Fred Singer (1998), que diseñó el sistema norteamericano de satélites climáticos, el periodo de dichas oscilaciones es, aproximadamente, de unos 1500 años.

Por último, aun concediendo la existencia de un subidón térmico en el siglo XX, ¿qué parte es directamente achacable al ser humano? La teoría del cambio climático afirma que gran parte, a causa de la emisión industrial de gases con efecto invernadero. ¿Seguro? No está tan claro. Las temperaturas no siguen a los niveles de CO₂ y, de hecho, los periodos más cálidos de los últimos 2.000 años fueron el romano y el medieval, que tuvieron temperaturas más altas y menores niveles de CO₂. Actualmente, bastantes científicos dirigen su atención a otros dos factores: el factor solar (la radiación solar que el planeta recibe no es constante en el tiempo) y el factor isla de calor (el calor urbano perturba, como va visto, los registros de las estaciones meteorológicas situadas en el entorno de las grandes urbes). Admitamos que el incremento de la temperatura global durante el siglo pasado fue de hasta 0,7° C (el máximo estimado por el GISS); pues bien, si restamos la parte deducible del factor solar (y que Solanki (2002) estima en 0,25° C) y la parte deducible del factor isla de calor (y que Kalnay y Ming (2003) estiman en 0,35° C), resulta una cifra sorprendente:

$$0,7^{\circ} \text{ C} - (0,25^{\circ} \text{ C} + 0,35^{\circ} \text{ C}) = 0,1^{\circ} \text{ C}$$

Es decir, ¡sólo una décima de grado del calentamiento global sería imputable al manido efecto invernadero! De hecho, Bjorn Lomborg (2003) estima que el incremento de la irradiación solar directa durante los últimos treinta años está detrás del 40% del calentamiento observado. Hay mucha más correlación entre temperatura y partículas solares que entre temperatura y niveles de CO₂.

4. EL FUTURO DEL CLIMA: PREDICIENDO LO IMPOSIBLE

Hasta aquí el pasado y presente del clima terrestre, pero ¿qué hay del clima futuro? ¿Podemos predecirlo? El IPCC piensa que sí y profetiza un futuro poco o nada halagüeño. ¿Es realmente así? ¿Permiten los actuales modelos físico-matemáticos del clima predecir, por ejemplo, la temperatura que tendremos dentro de 100 años?

Entramos propiamente en terreno matemático. De acuerdo con Lezaun (2002 & 2006), los esfuerzos por modelar matemáticamente tiempo y clima comenzaron en los felices años 20. En aquel tiempo, los *meteorólogos sinópticos* (aquellos que se apoyan más en observaciones que en ecuaciones) se percataron de que precisaban indispensablemente de la ayuda de los *meteorólogos dinamicistas* (aquellos que emplean con más asiduidad la física y la matemática) si querían ampliar el rango de sus predicciones del tiempo o, en general, del clima. Pronto se concibió que la atmósfera, como el océano, se trataba de un sistema dinámico muy complejo, y que la idea pionera propuesta por el meteorólogo noruego Vilhelm Bjerknes de resolver el problema de la predicción climática mediante la resolución de las ecuaciones que lo describieran no iba a ser tarea fácil. El sistema global del tiempo meteorológico y del clima tenía que representarse con un sistema de ecuaciones con más de 5.000.000 de variables mezclando tres clases de ingredientes: primero, los principios físicos fundamentales (conservación de la energía, de la masa, &c.); segundo, ciertas ecuaciones matemáticas pertinentes (como las intratables ecuaciones de Navier-Stokes acerca del movimiento de fluidos); y, tercero, ciertas fórmulas inducidas empíricamente (como la fórmula de evaporación del agua en función de la humedad y de la velocidad del viento). Sin embargo, la carencia de herramientas de cómputo eficaces retrasó su desarrollo hasta la puesta en marcha de las computadoras, hacia mediados de siglo. Precisamente, John von Neumann se fijaría la meta de predecir el tiempo y el clima sirviéndose de ordenadores.¹ Entre los miembros del grupo que formó en Princeton se contaba Jule Gregory Charney, meteorólogo y climatólogo muy influyente, que acabaría liderando gran parte de la investigación puntera.

El estudio de un sistema tan complejo fue posible gracias a la metodología que Díaz (2002, 35) denomina *trilogía universal*: la *modelización matemática*, el *análisis* y la *simulación* mediante superordenadores que posibilitan acciones correctivas encaminadas a mejorar la situación, es decir, el *control*. La distinción entre Meteorología y Climatología se sustenta en la distinta escala temporal a que cada una de ellas hace referencia. La predicción meteorológica es de un par de días, a lo sumo de una o dos semanas, mientras que la predicción climática se establece dentro de un horizonte que puede rondar hasta varios siglos. Además, mientras que la primera ciencia persigue una gran exactitud en sus predicciones, la segunda es más cualitativa que cuantitativa, porque sólo busca conocer el clima, es decir, por definición, el estado promediado de la atmósfera que ha sido observado como tiempo meteorológico a lo largo de años (Díaz 2001, 67-69). En los estudios meteorológicos, la incógnita es la temperatura puntual e instantánea $T(x,t)$; pero, en los estudios climáticos, la incógnita es un promedio espacial y temporal que *teóricamente* se calcula como $u(x,t) = (1/k) \iint T(x,t) dxdt$ –otro tema es, recordemos, *prácticamente*²–. Una clase de modelos climáticos con gran valor de diagnóstico son la clase de *modelos climáticos de balance de radiación de energía*, cuyo abuelo fue S. Arrhenius a

¹ No en vano, como recoge Díaz (2001), von Neumann escribía en 1955: «Probably intervention in atmospheric and climate matters will come in a few decades, and will unfold on a scale difficult to imagine at present».

² Generalmente, ni siquiera se conoce $T(x,t)$ más que en una cantidad discreta de puntos y tiempos (estaciones meteorológicas), a partir de los cuales se interpola, y ya se calcula $u(x,t)$; pero, como va dicho, la interpolación y el promedio no tienen por qué ser unívocos (piénsese en el experimento del profesor de física y los alumnos de clase).

finales del siglo XIX y cuyos padres son M. I. Budyko y W. D. Sellers, ya en 1969. La base elemental del modelo es la ecuación diferencial:

$$\partial u/\partial t = A - E + D$$

Esta ecuación iguala la tasa de variación de la temperatura promediada con el resultado de restar, a la radiación solar absorbida A , la radiación emitida por la Tierra en calidad de cuerpo caliente E , y luego sumar la redistribución espacial D . Según como expresemos A , E y D en función de u , el modelo de balance de energías quedará cerrado de una u otra manera. De hecho, como expone Díaz (1996), este tipo de modelos pueden complicarse llegando a alcanzar el grado de sofisticación que caracteriza a los actuales *modelos de circulación global* (CGM).

Y fue en la década de los sesenta, exactamente en 1963, en EE.UU., cuando un colega de Charney, Edward Norton Lorenz, joven meteorólogo del MIT, planteó un *curioso* modelo formado por tres ecuaciones diferenciales ordinarias para describir el movimiento de un fluido bajo la acción de un gradiente térmico. Este problema es una simplificación del problema de estudiar la convección en la atmósfera, esto es, cómo se comportan el flujo de aire caliente y frío cuando lo sometemos a una diferencia térmica más o menos notable. Mientras buscaba soluciones numéricas con ayuda de una computadora, se encontró –al volver de tomar una taza de café– con que se manifestaba un dramático comportamiento inestable, caótico. Lorenz se había topado por casualidad con el fenómeno de la sensibilidad a las condiciones iniciales, que hacía de su sistema algo en la práctica impredecible. En efecto, tras establecer las propiedades básicas de su flujo determinista no periódico, Lorenz había reparado en que era altamente inestable con respecto a la más ínfima modificación. Una pequeña variación en las condiciones iniciales ocasionaba estados finales completamente diferentes. Dos estados iniciales muy similares pueden evolucionar de modos radicalmente distintos. En sus propias palabras:

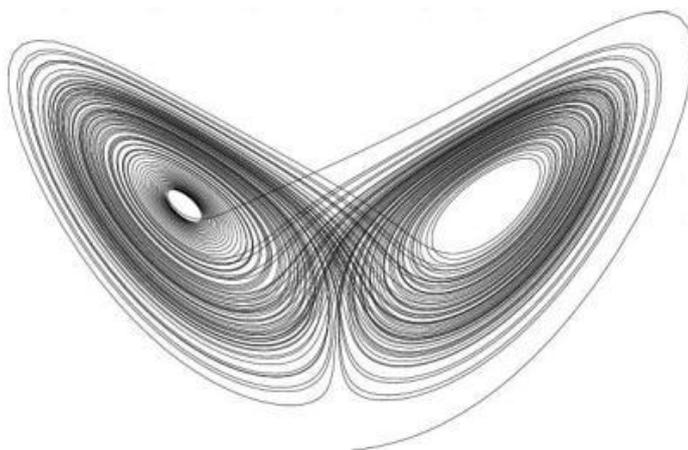
“Two states differing by imperceptible amounts may eventually evolve into two considerably different states. If, then, there is any error whatever in observing the present state –and in any real system such errors seem inevitable– an acceptable prediction of an instantaneous state in the distant future may well be impossible”. (Lorenz: 1963, 133)

Lorenz había descubierto, tomando prestada la imagen que luego forjaría, el *efecto mariposa*: el aleteo de una mariposa en Brasil puede ocasionar un tornado en Texas. Supongamos que una pequeña mariposa está posada en un árbol en una remota región del Amazonas. Mientras permanece posada, abre y cierra ocasionalmente sus alas por dos ocasiones. Podría haberlo hecho sólo una vez, pero en este caso ha batido sus alas exactamente dos veces. Como el sistema climático es un sistema caótico, que exhibe dependencia sensible a las condiciones iniciales, la diminuta variación en los remolinos de aire contiguos a la mariposa puede acabar influyendo en que haya o no haya un huracán sobre Texas varios meses después. Y a continuación añadía, en sintonía con nuestra tesis:

“When our results concerning the instability of nonperiodic flow are applied to the atmosphere, which is ostensibly nonperiodic, they indicate that prediction of the sufficiently distant future is impossible by any method, unless the present conditions are known exactly. In view of the inevitable inaccuracy and incompleteness of weather observations, precise very-long-range forecasting would seem to be non-existent”. (Lorenz: 1963, 141)

Lorenz publicó su hallazgo en una revista de meteorología, en un artículo titulado *Deterministic Nonperiodic Flow* que pasó prácticamente desapercibido. Sólo el profesor James A. Yorke de la Universidad de Maryland reconoció las repercusiones filosóficas de la investigación de Lorenz. Había nacido la Teoría del Caos.

FIGURA 7
Atractor de Lorenz: Clima y tiempo son sistemas caóticos impredecibles



El Profesor Yorke encontró el mecanismo matemático universal que subyace en múltiples sistemas con dinámica no lineal, como son el movimiento de los planetas, la turbulencia en el agua o el aire y la variación de las poblaciones de especies. De hecho, fue Yorke quien introdujo el término *caos* en la literatura científica, y el matemático norteamericano Guckenheimer el que –allá por los años 70- acuñó la expresión *dependencia sensible a las condiciones iniciales*; pero fue Lorenz el que introdujo la popular e indeleble metáfora del *efecto mariposa*.

Inmediatamente, múltiples modelos de sistemas caóticos surgieron. Si Edward Lorenz ofreció a la comunidad científica el paradigma de sistema dinámico caótico continuo, el zoólogo Robert May dio a conocer en su artículo *Simple Mathematical Models with Complicated Dynamics* publicado en *Nature* en 1976 el paradigma de sistema dinámico caótico discreto. A finales de los 70 y principios de los 80, la exploración de aplicaciones de la naciente Teoría del Caos comenzó a dar sus frutos más allá de las simulaciones en las pantallas de ordenador. Y entre los fenómenos físicos estudiados nos interesa destacar, por su conexión con la dinámica climática y su proximidad con las investigaciones meteorológicas de Lorenz, la transición a la turbulencia en los fluidos, cuyo estudio contaba con el fértil precedente que supuso el artículo *On the nature of turbulence* de David Ruelle y Floris Takens, en que proponían los atractores extraños como explicación matemática de la turbulencia. Otro sistema caótico impredecible.

Retrocediendo en el tiempo, ya en 1908, en *Ciencia y Método*, el matemático y filósofo francés Henri Poincaré había profundizado en la investigación de las raíces de esta clase de fenómenos tan inestables, en que resulta imposible predecir a largo plazo la dinámica del sistema. Las observaciones de Poincaré tomaron como base su investigación del problema de los tres cuerpos, así como el estudio de la impredecibilidad del movimiento de las moléculas de un gas y, atención, del tiempo meteorológico. De este último, Poincaré afirmaba que era inestable, que los meteorólogos lo sabían y que, a causa de ello, no podían decir dónde ni cuándo va a haber un ciclón. Y concluía:

“La prédiction devient impossible...” (Cf. Poincaré: 1963, 56.)

Y como apunta el matemático belga David Ruelle en su libro *Azar y Caos*:

“Las matemáticas de Poincaré han tenido su papel, pero sus ideas sobre predicciones meteorológicas tuvieron que ser descubiertas de forma independiente”. (Ruelle: 1995, 54)

Así es, en su precursor artículo, Lorenz se hacía eco de los trabajos sobre sistemas dinámicos de Poincaré pero desconocía sus ideas sobre caos, tiempo y clima.

Es mérito de Lorenz haber probado el comportamiento caótico, inestable e impredecible, del tiempo meteorológico y, por extensión, del clima. «Dado que incluso el modelo muy sencillo de Lorenz es caótico, y lo que es más, –arguye Smith (2001, 74)- dado que descubrimos que los regímenes caóticos están bastante extendidos en los sistemas no lineales, es razonable conjeturar que *todo* modelo preciso del comportamiento a gran escala de la atmósfera exhibirá también algún tipo de sensibilidad exponencial a las condiciones iniciales, capaz de hacer que perturbaciones del tamaño de las producidas por las alas de una mariposa determinen el desarrollo de tornados». Leemos en Lorenz (1995, 104):

“Casi todos los modelos globales se han utilizado para experimentos de predecibilidad, en los que dos o más soluciones originadas a partir de estados iniciales ligeramente diferentes se examinan para detectar la presencia de dependencia sensible... Casi sin excepción, los modelos han indicado que las pequeñas diferencias iniciales terminarán por ampliarse hasta dejar de ser pequeñas”.

Y añada, más adelante, rememorando su propio modelo:

“Dicho con terminología de hoy: se trataba del caos. Pronto caí en la cuenta de que si la atmósfera se comportaba como ese sencillo modelo, la predicción a largo plazo sería imposible”. (Lorenz: 1995, 139)

Los microerrores al fijar las condiciones iniciales del sistema climático se inflarán, pues, hasta convertirse en macroerrores de nuestras predicciones. Sin embargo, como recogen Aubin & Dahan Dalmedico (2002, 301-302), costó mucho que las ideas de Lorenz sobre la inherente impredecibilidad del clima calasen, incluso entre su colega y jefe Charney:

“Many people hoped that by adding a large number of degrees of freedom, one would stabilize the system and hence achieve long-term predictability. In 1970, Charney was still optimistic: “there is no reason why numerical methods should not be capable of predicting the life cycle of a single system”, he declared; only current models did have “fatal defects”. [...] At the meteorological level (provided Lorenz model had anything to do with the atmosphere), hopes for long-range predictions were now doomed”.

Es fundamental para poder comprender las afirmaciones que, un día sí y otro también, se hacen acerca del tema del cambio climático, darse cuenta que el clima no puede ser modelado de modo que permita predecir el tiempo que hará, no ya dentro de 100 años, sino mismamente la semana que viene. Los resultados que producen los modelos computarizados son, básicamente, escenarios o simulaciones con un importante componente profético. Es así que en el encuentro sobre *Chaos and Forecasting* organizado por la Royal Society de Gran Bretaña en 1994, múltiples científicos se dieron cita para discutir el problema de la predicción en los sistemas caóticos que aparecen en la física, la biología, la economía y la climatología. A. S. Weigend (1995, 145-146 y 157) tituló su ponencia *Paradigm Change in Prediction*, y habló de que, aun cuando las técnicas de predicción a corto plazo de series temporales estaban mejorando, había que abandonar radicalmente la idea de que podamos descubrir un algoritmo que nos capacite para predecir a largo plazo, universalmente. Por su parte, centrándose en la física atmosférica y la predicción del tiempo y del clima, T. N. Palmer *et al* (1995, 264 y 266) sostuvieron que, por ejemplo, los errores en la medición de la temperatura de superficie en el Pacífico tropical tienen un significativo impacto en la precisión de la predicción a seis meses del fenómeno de El Niño y que, por tanto, aun cuando deban tomarse en serio, los modelos sobre cambio climático no están libres de error. Es cierto que Tim Palmer (1996) tiene motivos para el optimismo en su presentación de *Predictability of Weather and Climate* como editor, ya que a los avances teóricos (nuevos conocimientos cualitativos) se están uniendo avances prácticos (mejores superordenadores), capaces de minimizar la gran complejidad y caoticidad del tiempo y del clima. Pero Matthew Collins (2002) pone los puntos sobre las íes, porque ha estudiado la predictibilidad del clima como problema

de valores iniciales y, tomando en cuenta tres clases de errores (a saber: el error debido a las imperfecciones del modelo; el error por mala medición de los datos iniciales; y el error por caos, en el sentido de que los errores infinitesimales de cómputo y medición pueden amplificarse hasta saturar el margen de predictibilidad), ha llegado a la conclusión de que puede estimarse la siguiente cota como límite superior de la predictibilidad del clima: en promedio, las anomalías de la temperatura del aire en superficie son potencialmente predecibles en escalas de tiempo de décadas sobre el Océano Atlántico Norte; pero, por contra, sobre tierra, las trayectorias del modelo divergen caóticamente y las anomalías de temperatura no son potencialmente predecibles en escalas de tiempo más allá, atención, de una estación. Sin embargo, como reflejan Ian Stewart (2007, 187-188), Gavin Schmidt (2007) o Tim Palmer (2005), en su artículo «Global warming in a nonlinear climate - Can we be sure?», para algunos científicos el caos no se daría en la predicción climática sino sólo en la predicción meteorológica, puesto que –siguiendo una distinción de Lorenz (1975), que sigue manteniendo que la predictibilidad del clima sólo está parcialmente resuelta- ésta sería parte de un *problema de valor inicial* (*predicciones de primer tipo*, en que influye el efecto mariposa al manejarse trayectorias) mientras que aquélla lo sería, a diferencia, de un *problema de contorno* (*predicciones de segundo tipo*, en que ya no influye el efecto mariposa al no manejarse trayectorias sino fronteras). Si se estudia el clima como problema de contorno en vez de como problema de valor inicial, identificando el clima no con una trayectoria sino con el atractor (Palmer: 2005, 43), la *mariposa* quedará aplastada pero, atención, como el sistema climático es no-lineal y de presumible régimen caótico, el atractor será *extraño*, poseyendo probablemente una cuenca de atracción de altísima complejidad de detalles de grano fino y grueso, con lo que no avanzamos demasiado en el dominio de la inestabilidad (por ejemplo, si el clima fuese identificable al atractor del sistema de Lorenz, significando el giro con respecto al ala derecha que llueve y el giro con respecto al ala izquierda que no llueve, sabríamos la pauta general del clima, unos días llueve y otros no, pero poco más, ya que las trayectorias meteorológicas dan vueltas a cada ala del atractor de modo aleatorio, *impredecible*). En suma, cuando el caos entra por la puerta, la predictibilidad salta por la ventana.

Cabe pensar que la comprensión de la dinámica no lineal del clima, gracias a la Teoría del Caos, hará pararse en barras y ser más prudentes a los activistas ecologistas. Sobre todo cuando se repare en la impredecibilidad que subyace al caos determinista que domina los fenómenos climáticos y que hasta llega a reconocer el propio IPCC (2001, 774):

“En la investigación y la creación de modelos climáticos, debemos reconocer que nos enfrentamos con un sistema caótico no lineal, y por tanto las predicciones a largo plazo de los estados climáticos futuros no son posibles”.

Y, sin embargo, después de todo, el IPCC no renuncia a realizar predicciones, pese a que tengan pocas probabilidades de ser exitosas y estén sobrecargadas de incertidumbre. Así, recientemente, el viernes 2 de febrero de 2007, la ONU ofreció al mundo 18 páginas de avance del IPCC 2007, informe quinquenal que aparece en mayo. Es cierto que, tras un primer vistazo, el resumen resulta mucho más moderado que el que se hizo público en 2001. Ejemplos: (i) por fin se ha rectificado el *palo de hockey* de Mann; (ii) se ha echado marcha atrás en la predicción de cuánto iba a aumentar el nivel del mar, dejando la subida de 36 en 17 pulgadas, en menos de la mitad³; y (iii) se reconoce que la Antártida no está calentándose: «Antarctic sea ice extent continues to show inter-annual variability and localized changes but no statistically significant average trends, consistent with the lack of warming reflected in atmospheric temperatures averaged across the region (...) It is *likely*⁴ that there has been significant anthropogenic warming over the past 50 years averaged over each continent except Antarctica» (www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf).

³ Compárese con la alarmante cifra que ofrecía gratuitamente el exvicepresidente de EE.UU., Al Gore, en su filme *Una verdad incómoda*, en donde llegaba a hablar de una catastrófica subida de 20 pies.

⁴ El informe aclara que se emplea el término *likely* en el sentido de un 66% de verosimilitud, es decir, que la afirmación en que se incluye tiene un 34% de posibilidades de ser falsa, un margen de error poco o nada despreciable.

5. CONCLUSIÓN: ECOLOGISMO Y CAOS MATEMÁTICO

Termino. A la luz de lo expuesto, la teoría del cambio climático en boga se nos aparece como un cúmulo de hipótesis que, en el mejor de los casos, carecen de suficiente corroboración científica, sobre todo cuando tratan con un sistema caótico tan complejo como es el clima. Si realmente el calentamiento no es *local* sino *global* y el efecto invernadero afecta al clima, aún resulta probable que lo haga secundariamente, siendo lo esencial el ciclo, que no suele tomarse bajo consideración. En esta cuestión, como en todas, la verdad es *decir la verdad*, y no manipularla o suplantarla. En especial, cuando el desarrollo de los países pobres y el sostenimiento de los países ricos dependen de ello. No podemos lastrar el desarrollo de los países más pobres con costosas políticas medioambientales que carecen de científicidad (por ejemplo, en el verano de 2004, la Academia de Ciencias de Rusia negó que hubiera base científica firme para Kyoto) y que ni siquiera los países más ricos están en condiciones de cumplir (Sala i Martín: 2007). Concluyo, pues, como empecé, reiterando un compromiso: seamos ecologistas, pero *ecologistas escépticos*, más amigos de la ciencia que de la política.

6. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS Y ELECTRÓNICAS

A) Libros y artículos consultados:

- AUBIN, David & DAHAN DALMEDICO, Amy (2002): «Writing the History of Dynamical Systems and Chaos: *Longue Durée* and Revolution, Disciplines and Cultures», *Historia Mathematica*, 29, pp. 273-339.
- CRICHTON, Michael (2005): «La predicción imposible», Discurso pronunciado el 25 de enero de 2005 en el National Press Club de Washington, EE.UU. (www.liberalismo.org/articulo/391/29/).
- COLLINS, Matthew (2002): «Climate Predictability on Interannual to Decadal Time Scales: The Initial Value Problem», *Climate Dynamics*, 19, pp. 671-692.
- DÍAZ, Jesús Ildelfonso (1996): «On the Mathematical treatment of Energy Balance Climate Models», en *The Mathematics of Models in Climatology and Environment*, ASI NATO Global Change Series, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 14-78.
- (2001): «Modelos matemáticos en Climatología: la conjetura de von Neumann», en *Les Matematiques y les seus aplicacions*, Editorial de la UPV, Valencia, pp. 67-98.
- (2002): «Modelización, análisis y control de sistemas climáticos», en *Models matemàtics en la ciència i la societat*, Fundació Caixa de Sabadell, Sabadell, pp. 35-62.
- DORAN, P. T. & alea (2002): «Antarctic Climate Cooling and Terrestrial Ecosystem Response», *Nature*, 415, pp. 517-520.
- ESSEX, Christopher & McKITRICK, Ross (2002): *Taken by Storm*, Key Porter Books, Canadá.
- KALNAY, Eugenia & MING, Cai (2003): «Impact of Urbanization and Land-Use on Climate», *Nature*, 423, pp. 528-531 (addenda en *Nature* 427, p. 102).
- LEZAUN, Mikel (2002): «Predicciones del Tiempo y Matemáticas», *Bol. Soc. Esp. Mat. Apl.*, 22, pp. 61-100.
- (2006): «Matemáticas de los fluidos. El clima y el tiempo», *Encuentros Multidisciplinares UAM*, 8/23, pp. 46-55.
- LOMBORG, Bjorn (2003): *El ecologista escéptico*, Espasa, Barcelona.
- LORENZ, Edward (1963): «Deterministic Nonperiodic Flow», *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, pp. 130-141.
- (1975): *Climate predictability. The physical basis of climate modelling*, WMO-GARP Publication.
- (1995): *La Esencia del Caos*, Debate, Madrid.
- MANN, M. E. & BRADLEY, R. S. & HUGHES, M. K. (1998): «Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries», *Nature*, 392, pp. 779-787.
- (1999): «Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations», *Geophysical Research Letters*, 26, pp. 759-762.

- MAY, Robert (1976): «Simple Mathematical Models with Complicated Dynamics», *Nature*, 261, pp. 459-467.
- McINTYRE, Steven & McKITRICK, Ross (2003): «Corrections to the Mann et al. (1998) Proxy Data Base and Northern Hemispheric Average Temperature Series», *Energy & Environment*, 14/6, pp. 751-771.
- (2005): «Hockey Sticks, principal components, and spurious significance», *Geophysical Research Letters*, 32, pp. 270-275.
- PALMER, T. N. (ed.) (1996): *Predictability of Weather and Climate*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (2005): «Global warming in a nonlinear climate - Can we be sure?», *Europhysics News*, Marzo-Abril 2005, pp.42-46.
- PALMER, T. N. & alea (1995): «Singular Vectors and the Predictability of Weather and Climate», en Tong (1995, 249-268).
- PICC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (2007): *Climate change 2007: Summary for Policymakers* (www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf).
- POINCARÉ, Henri (1908): *Science et Méthode*, Flammarion, París.
- (1963): *Ciencia y Método*, Austral, Madrid.
- PONTE, Lowell (1972): *The Cooling*, Prentice-Hall, Nueva Jersey.
- RASOOL, S. I. & SCHNEIDER, S. H. (1971): «Atmospheric Carbon Dioxide and Aerosols: Effects of Large Increases on Global Climate», *Science* (11 de julio de 1971), pp. 138-141.
- SOLANKI, S. K. (2002): «Solar variability and climate change», *Astronomy and Geophysics*, 43/5, pp. 509-513.
- STEWART, Ian (2007): *¿Juega Dios a los dados?*, Crítica Drakontos, Barcelona.
- RUELLE, David (1995): *Azar y Caos*, Alianza, Madrid.
- RUELLE, David & TAKENS, Floris (1971): «On the Nature of Turbulence», *Commun. Math. Phys.*, 20, pp. 167-192.
- SALA I MARTÍN, Xavier (2007): «Cambio Climático: No es nuestra prioridad», *La Vanguardia* (1 de mayo de 2007).
- SCHMIDT, Gavin (2007): «The Physics of Climate Modeling», *Physics Today* (Enero 2007), p.72.
- SINGER, S. Fred (1998): *Hot Talk, Cold Science: Global Warming's Unfinished Debate*, Independent Institute, California.
- SMITH, Peter (2001): *El Caos. Una explicación a la teoría*, Cambridge University Press, Madrid.
- TONG, Howell (ed.) (1995): *Chaos and Forecasting*, World Scientific, Londres.
- VON STORCH, Hans & ZORITA, Eduardo & Alea (2004): «Reconstructing Past Climate from Noisy Data», *Science*, 306, pp. 679-682.
- WEIGEND, A. S. (1995): «Paradigm Change in Prediction», en Tong (1995, 145-160).

B) Webs consultadas:

- GISS (NASA): www.giss.nasa.gov
 IPCC (ONU): www.ipcc.ch