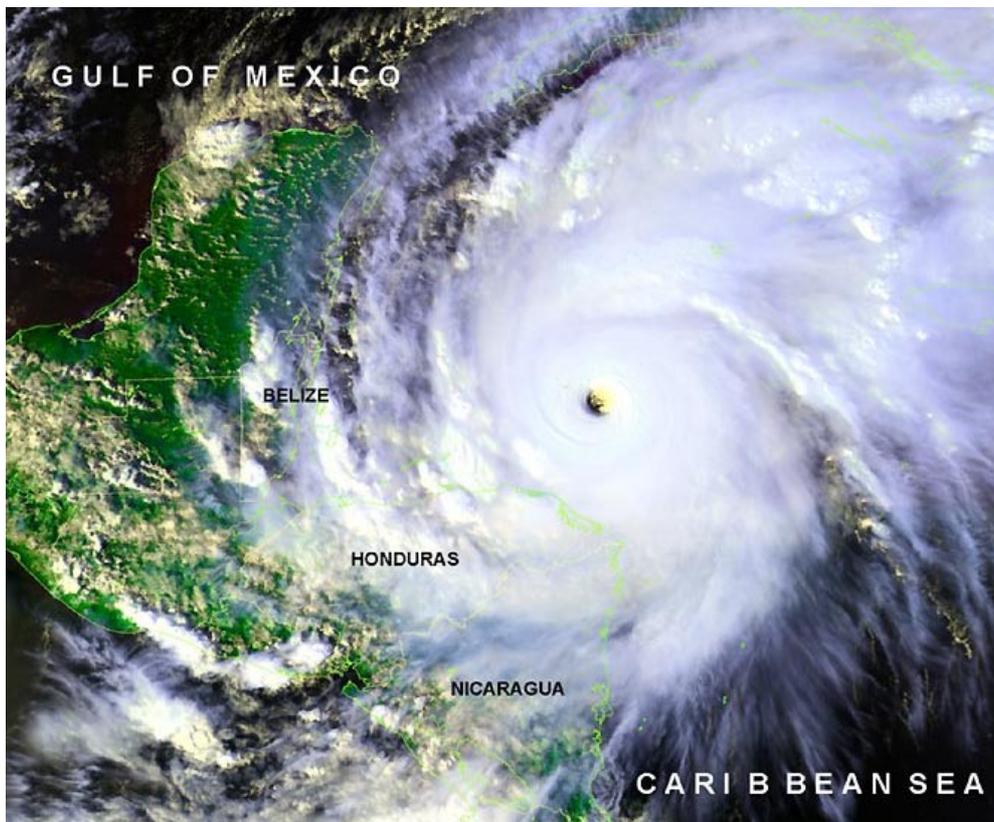


**EL CAMBIO CLIMÁTICO**  
**DESDE UNA PERSPECTIVA GEOLÓGICA**



**Alfonso Corral Marhuenda**

**Artemio Cuenca Payá**

## EL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE UNA PERSPECTIVA GEOLÓGICA

### **Alfonso Corral Marhuenda**

Sosaiba S.L.. Gabinete Técnico  
[geo@arrakis.es](mailto:geo@arrakis.es)

### **Artemio Cuenca Payá**

Laboratorio de Carreteras. Alicante.  
[artemio.cuenca@coput.m400.gva.es](mailto:artemio.cuenca@coput.m400.gva.es)

### **Introducción.**

En las dos últimas décadas se han acuñado conceptos como Cambio Climático, Calentamiento Global, Efecto Invernadero, Subida del Nivel del Mar, primero tímidamente, y después con toda la parafernalia inherente a las conferencias políticas de alto nivel. Al ciudadano de a pie le han llegado envueltos con un halo de inquietante futuro para la sociedad del bienestar, lo que ha motivado que muchos espíritus inquietos se hayan lanzado a una Cruzada para salvar el Planeta, esgrimiendo con rotundidad unos dogmas que creen firmemente demostrados y compartidos por la comunidad científica.

Con el propósito de aproximar aquellos conceptos a lo que realmente representan en el contexto de la Historia reciente de la Tierra, se han escrito las siguientes líneas.

### **Evolución de la temperatura.**

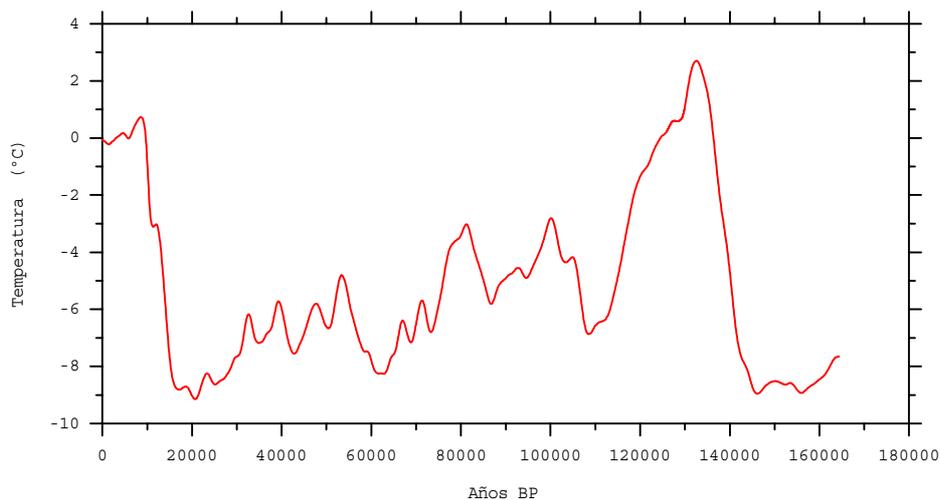
A lo largo de esa larga Historia, las placas continentales, impelidas por las corrientes del Manto terrestre, han ido desplazándose por la superficie del planeta, abriéndose para crear nueva corteza oceánica, o colisionando entre ellas y, a la vez, originando nuevas cordilleras. Una consecuencia de esos cambios geográficos es la obligatoria variación en los regímenes de circulación, tanto en la atmósfera como en los océanos, y la consiguiente incidencia en el clima global de la Tierra.

Esas serían las ondas de fondo, extendidas durante centenares de millones de años, sobre las que cabalgarían otras más cortas que actuarían como moduladoras, y que vendrían condicionadas por factores más diversos, no bien conocidos. Pueden citarse, a este respecto, los periodos glaciares ocurridos a lo largo del Pleistoceno, durante los cuales se extienden los casquetes polares hasta latitudes inferiores a 50°, y hacen descender el nivel de los mares

más de 120 metros respecto a su cota actual, válido este dato al menos para la última (Glaciación del Würm).

En cuanto a las variaciones de temperatura durante esas épocas, solo desde la década de los setenta se ha podido llegar a un conocimiento objetivo, no basado en especulaciones comparativas, sino en medidas realizadas a partir de la relación entre el isótopo pesado del Oxígeno ( $O^{18}$ ) y el normal ( $O^{16}$ ), ya que la mayor o menor presencia del primero depende de la temperatura. Este ha sido uno de los objetivos de las perforaciones realizadas en los hielos de Groenlandia y la Antártida, pues en ellos han quedado atrapados tanto el  $O^{18}$  como muestras del aire del momento de la nevada que contribuyó a cada estrato de hielo.

Uno de los registros más completos es el de la Estación Vostok, en la Antártida, con cuyos datos, recopilados en el National Geophysical Data Center (NGDC) se ha dibujado la figura 1 que contempla los primeros 160.000 años, aunque el registro llega hasta 420.000. En ella puede apreciarse la terminación de la penúltima fase glaciár (Riss), seguida de la fuerte elevación de temperatura durante el interglaciár, así como todo el desarrollo de la glaciación wurmiense hasta alcanzar su máximo hace entre 20.000 y 18.000 años. Viene a continuación un rápido ascenso térmico, con alguna fase fría intercalada (Fases del Dryas) que casi no se marca en el registro por efecto de la escala, y se llega a un máximo hace entre 7.000 y 5.000 años (Neotermal), con ligero descenso posterior.



**Figura 1**

Pasando a épocas más recientes, los registros en el hielo no pueden ser utilizados porque las capas superficiales están contaminadas con elementos actuales. Sin embargo se pueden utilizar otras metodologías, como la Palinología, la

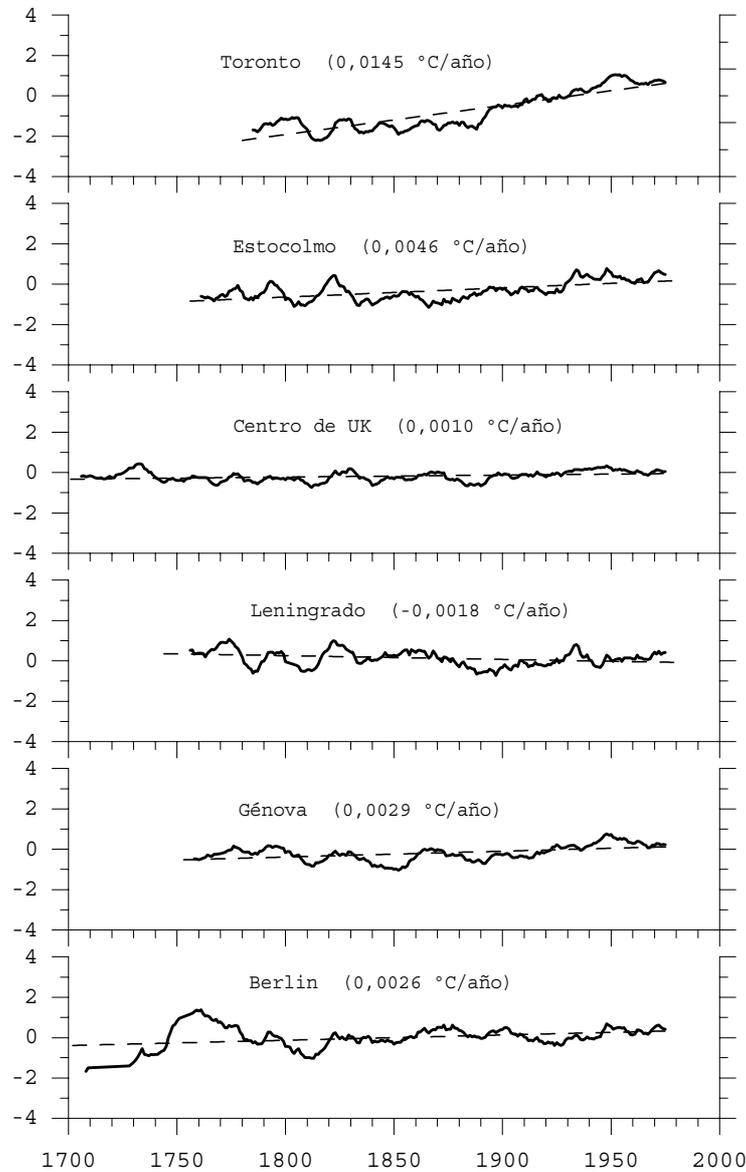
Dendrocronología, y algunas que todavía no tienen denominación específica, cual es la inversión del gradiente geotérmico. Estudios de este tipo (Williams and Wigley, 1982), con el apoyo de excavaciones arqueológicas y de referencias históricas, han permitido detectar la existencia de un periodo más cálido que el actual, cuyo inicio puede situarse entre los siglos VIII-IX y su final hacia los XI-XII, sin poder establecer una mayor precisión porque se han encontrado desfases y solapes a lo largo del Planeta, posiblemente inducidos por cambiantes regímenes de vientos y corrientes marinas. Es el denominado Pequeño Óptimo Climático (POC), durante el cual, algunos pueblos del Norte de Europa establecieron asentamientos en Islandia y Groenlandia, aunque estos últimos desaparecieron cuando, de nuevo, avanzaron los hielos desde el Norte para iniciar lo que se ha llamado Pequeña Edad del Hielo o Neoglaciario.

Hay múltiples referencias históricas que avalan ese descenso térmico a partir del siglo XIII aproximadamente, aunque su final, con el consiguiente paso a condiciones climáticas semejantes a las actuales, varía de unos lugares a otros. Atendiendo a las medidas de paleotemperaturas calculadas por inversión del gradiente geotérmico, como datos objetivos resultantes de medidas físicas, el iniciador del método (Cermak, 1971) localiza el POC en Kapuskasing (Canadá), a 50° de latitud Norte, entre los siglos VIII y XIII, seguido del Neoglaciario, entre los siglos XV y XVIII, con un rápido aumento de 2,2°C para llegar a la actual.

En otro estudio pionero (Cuenca y Walker, 1982) se aplicó una variante del método de inversión de Cermak al gradiente geotérmico de la Mina de Calumet, en Illinois, a 40° de latitud Norte, encontrando el ápice de POC en el siglo XII, y el mínimo del Neoglaciario en el XIV y parte del XV, con 3,4°C de diferencia entre ambos, seguido de un ascenso escalonado de 2,1°C hasta el siglo XVIII, en el que ya casi se llega a la temperatura actual. Numerosos estudios posteriores en sondeos de todo el mundo han confirmado la tendencia al ascenso térmico desde el siglo XV, pero con importantes variaciones locales en cuanto a velocidad de ascenso y valor absoluto del mismo.

Con esto se llega al periodo instrumental, es decir, aquel para el cual ya se dispone de medidas termométricas, aunque solamente hay una decena aproximadamente de localidades con registro suficientemente largo como para interesar a este trabajo. Con esos datos, extraídos del NGDC, se ha elaborado la figura 2, en la que se exponen las medidas instrumentales de temperatura en la media docena de ciudades que tienen registros de doscientos o más años. Los

valores de las desviaciones respecto a la media se han suavizado con una ventana móvil de 11 años para remarcar las tendencias, encontrando una al alza de cerca de medio grado por siglo, del mismo orden de magnitud de las que se obtienen por inversión del gradiente geotérmico.



**Figura 2**

Con estos ejemplos, que cubren un periodo suficientemente largo de la historia climática de la Tierra, los autores pretenden que se tome conciencia, por parte de los no especialistas, de que el Cambio Climático no es un hecho traumático que se desarrolla en el último siglo y medio, sino que es algo consubstancial a la historia del Planeta.

### **Variación reciente del nivel marino.**

Se ha indicado en el apartado anterior que el nivel de los mares se encontraba, durante el último periodo glaciario, a unos 120 metros bajo su nivel actual, cifra que algunos autores extienden hasta 160. El motivo de ese descenso no es otro que la acumulación de agua, bajo la forma de hielo y nieve, en los glaciares y casquetes polares.

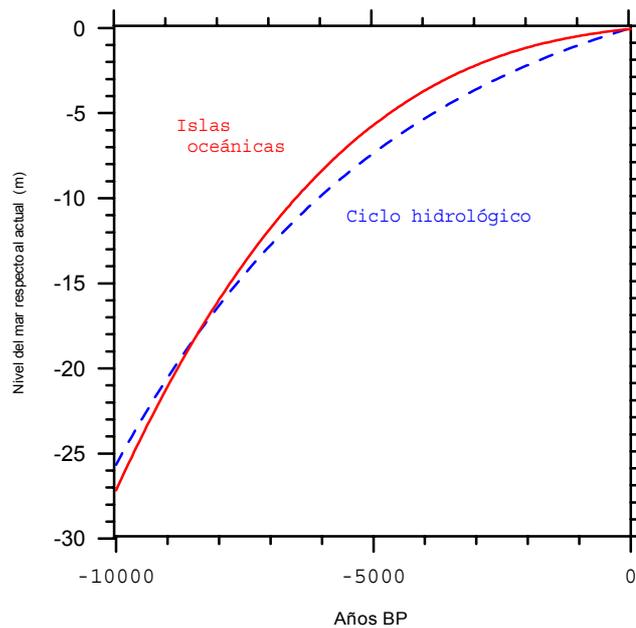
Una vez que se inició la elevación de temperaturas, la fusión de los hielos vertió grandes cantidades de agua en las cuencas marinas, por lo que el nivel fue ascendiendo, primero de forma rápida, y luego más lentamente, hasta su cota actual.

Ese ascenso ha quedado registrado bajo la forma de sedimentos litorales que, en la mayoría de los casos, se encuentran hoy sumergidos, aunque no es ese el caso general, ya que hay importantes excepciones. Una se encuentra en las costas del Norte de Europa, cuyas antiguas playas se han levantado, respecto al nivel del mar, a una velocidad relativamente rápida, por el hecho de que durante la fase glaciaria, el peso de los más de tres kilómetros de hielo que cubrían esas regiones, hizo que se hundiera la litosfera terrestre, por lo que, en un efecto de rebote, cuando desapareció la carga, a la subida del nivel del mar le acompañó una elevación de las tierras para recuperar el equilibrio isostático. En las zonas litorales más meridionales, que no fueron cubiertas por el hielo, el ascenso del mar originó el correspondiente hundimiento del fondo por el aumento del peso debido a las nuevas masas de agua, lo que llevó a complejas interacciones de equilibrios entre zonas inundadas y emergidas, difíciles de esquematizar pues en la mayoría de los casos han intervenido factores locales.

Donde sí ha quedado fielmente reflejado el ascenso del nivel marino ha sido en las islas oceánicas, lejos de la influencia de sobrecargas glaciares y de basculamientos litorales. En las últimas dos décadas son muchos los autores que han ido fechando los sedimentos sumergidos, y dentro de las lógicas variaciones locales, se puede promediar una curva como la de la figura 3, obtenida a partir de los datos recopilados por Pirazzoli (1998).

En la misma figura, y con línea discontinua, se ha representado la curva de ascenso teórico calculada a partir del Balance Global del Ciclo Hidrológico (Kazanskiy, 1985). La variación de pendiente de esta curva depende de la velocidad de ascenso en el momento actual, para la que Kazanskiy encuentra un valor de entre 1,0 y 1,5 mm/año como el que mejor ajusta los datos obtenidos en islas oceánicas.

El pequeño retardo en el nivel marino hacia el 10.000 BP puede estar relacionado con el evento frío del Dryas Reciente (~11.000 BP), mientras que la aceleración a partir del 8.000 posiblemente se deba a la rápida fusión durante el Neotermal. Es de destacar que de los estudios realizados sobre registros instrumentales de mareógrafos, extendidos al último siglo y medio, Pirazzoli (o. c., p.173) encuentra una velocidad de ascenso media de 0,9 mm/año, con una desviación típica de 0,3 mm/año, prácticamente la misma que había calculado Kazanskiy.



**Figura 3**

Es curioso que una revista periódica de divulgación citara hace pocas fechas, con énfasis alarmista, que durante el siglo XX el nivel del mar ha subido un promedio de 10 cm. Con lo anteriormente expuesto se comprueba que es precisamente lo que podía esperarse que subiera siguiendo la tendencia global tras la deglaciación. En cuanto a la alarma, cada uno es libre de cargar con la que quiera o convenga a sus intereses, y a este respecto puede ser aleccionador que en 1983, la US Environmental Protection Agency pronosticó para el año 2000 un ascenso de entre 4 y 17 cm por efecto invernadero. Lo malo de estas predicciones es que el plazo llega, y si la predicción no se cumple se suele quedar en mortificante ridículo.

## La incidencia del CO<sub>2</sub>.

Está muy extendida la opinión de que en el aumento de temperatura acaecido durante el último siglo han influido de forma decisiva, y casi exclusiva, las emisiones de ciertos gases, destacando como principal sospechoso el CO<sub>2</sub>.

De nuevo es necesario entrar en el registro geológico para comprobar que la concentración de CO<sub>2</sub>, en el pasado, ha sufrido una serie de oscilaciones que, al igual que las temperaturas, se detectan en los hielos polares gracias a las microburbujas de aire que quedaron atrapadas.

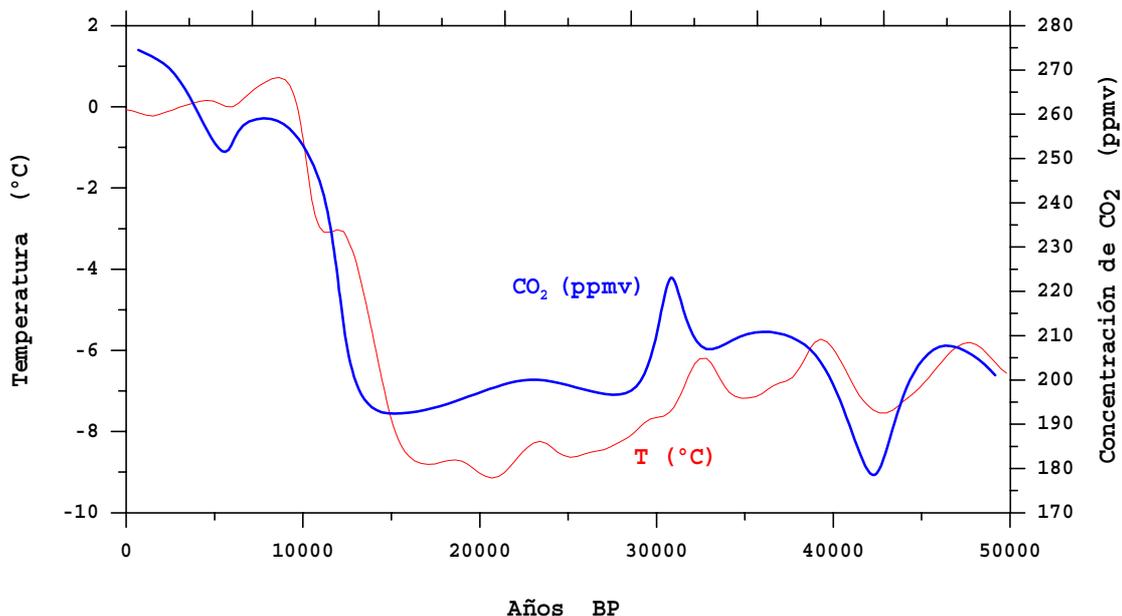


Figura 4

La figura 4 es un ejemplo de la variación durante los últimos 50.000 años, según los sondeos de la Estación Vostok. Estudios similares llevados a cabo tanto en la Antártida como en el Ártico (Taylor Dome, Camp Century, Estación Bird, etc.) confirman el descenso de CO<sub>2</sub> durante los periodos glaciares, y el rápido aumento al elevarse las temperaturas, pero tal y como pone manifiesto el gráfico, existe un cierto desfase entre el incremento térmico y el del CO<sub>2</sub>, ocurriendo este último un cierto tiempo después de aquel. Fisher et al (1999) han encontrado, para el registro de Vostok, un retraso que varía entre 200 y 1.000 años, mientras que Indermühle et al (2000) lo elevan a entre 500 y 2.000 en la muy detallada secuencia de Taylor Dome. Por otra parte, Veizer et al (2000), estudiando la composición isotópica del aragonito y la calcita de conchas de hasta 540 millones de años, indican que en los periodos glaciares

acaecidos hace 440 y 150 millones de años, la concentración de CO<sub>2</sub> aumentó, en lugar de disminuir como ocurre en los registros más modernos.

De todo esto se deduce, de una forma completamente objetiva, que el incremento de CO<sub>2</sub> no fue el causante de los aumentos de temperatura interglaciares, sino que más bien puede pensarse que fueron estos últimos los detonantes del mecanismo que elevó la concentración del gas en la atmósfera.

Cálculos recientes sobre la interacción entre atmósfera, océano, biomasa y deforestación (ej. Taylor and Orr, 2000) insisten en la complejidad del problema y en la enorme laguna que todavía existe en nuestro conocimiento del ciclo del CO<sub>2</sub> en el Planeta, por lo que, desde un punto de vista científico, los planteamientos dogmáticos carecen de fundamento.

#### **Hipótesis verosímiles sobre los cambios climáticos.**

Aunque ya veamos como normal el estar haciendo Geología Marciana (¿Se llamará Marciología?), una de las asignaturas pendientes de la Geología Terrestre es la explicación de los mecanismos que llevan a los cambios climáticos. En el siglo que ha terminado se han vertido multitud de hipótesis, pero la única que parece tener alguna consistencia es la adelantada, a principios de los años veinte, por el astrónomo yugoslavo Milutin Milankovitch que, aunque en su tiempo no era comprobable por no existir métodos fiables de datación, ahora, y gracias al cúmulo de fechas absolutas obtenidas en todos los rincones del Planeta, merced al desarrollo de los métodos isotópicos desde los años cincuenta, parece que apunta como candidata a explicar parte de las oscilaciones climáticas identificadas en el registro geológico.

El principio básico de la teoría consiste en que la Tierra no sigue una órbita regular alrededor del Sol, sino que la excentricidad varía con un periodo de unos noventa y dos mil años, lo que se traduce en una mayor o menor uniformidad anual en cuanto a radiación recibida. A esto se une que la inclinación de eje del Planeta respecto a la eclíptica oscila casi tres grados cada cuarenta mil años, y que dicho eje también posee un movimiento circular, llamado precesión, con un periodo de unos veintiséis mil años, que se reduce a veintiún mil al sumarse a la precesión de la órbita. La combinación de estos movimientos hace que, durante algunos milenios, las latitudes medias y altas del Planeta se encuentren en condiciones favorables para

recibir una alta radiación solar, con el consiguiente aumento de temperaturas, o que la radiación baje hasta unos valores que disminuyan las temperaturas lo suficiente como para que las nieves invernales, en esas latitudes medio-altas, no lleguen a fundir completamente en verano, con lo que las de un año se acumularán sobre las de los anteriores, y se entrará en un periodo frío continuado.

Para ilustrar lo anterior, se ha aplicado la Transformada de Fourier al registro completo de  $O^{18}$  de Vostok con el propósito de buscar posibles periodicidades que repitan una secuencia al cabo de un determinado número de años. El resultado es la gráfica de la figura 5, en la que se identifica un fuerte pico entre 80.000 y 100.000 años, correspondiente a la excentricidad, así como otros más pequeños, pero claros, entre 40.000 y 50.000, y hacia los 20.000-25.000.

Aparentemente, esto confirma la hipótesis de Milankovitch, pero plantea más problemas de los que resuelve, pues, y valga como ejemplo, no explica la coincidencia de periodos glaciares e interglaciares en los Hemisferios Norte y Sur, ya que, según los índices de irradiación, deberían ser alternantes. Es evidente que algo falla, pero el avance del conocimiento científico siempre ha seguido esos caminos, y es necesaria una buena dosis de paciencia para ver la luz. La hipótesis de Milankovitch parece buena, pero mejor sería decir que es la menos mala.

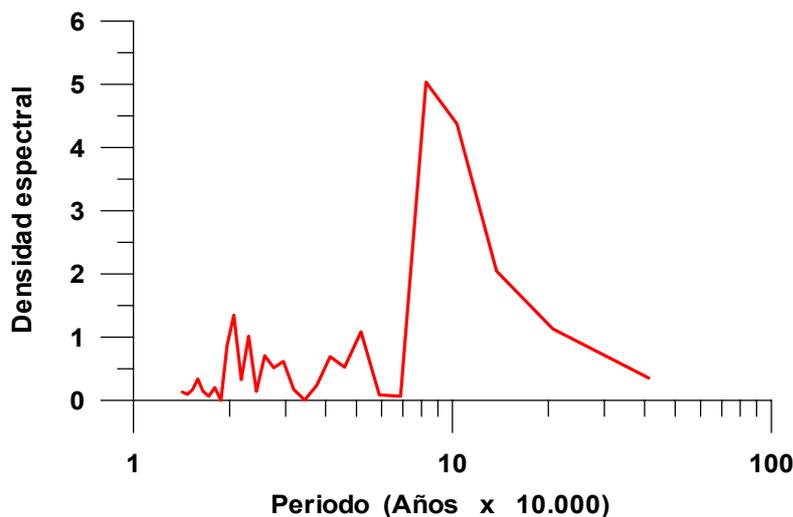


Figura 5

Este sería el telón de fondo sobre el que se dibujarían las grandes oscilaciones glaciares, pero las oscilaciones de

onda corta, como el POC o el Neoglaciario no encajan en ese sistema, y reclaman otra explicación.

A este respecto también se han lanzado diversas hipótesis, alguna tan pintoresca como que tienen su origen en la quema y tala de bosques por parte de nuestros congéneres prehistóricos, cosa que, aparte de no resistir un análisis cuantitativo, no explica las sucesivas oscilaciones del clima, salvo que aceptemos que nuestros antepasados se dedicaban durante unos cuantos milenios a destruir bosques, y después otra serie de miles de años a regenerarlos. Esto parece broma, pero ha sido seriamente planteado por algunos científicos (¿?).

La hipótesis que en estos momentos parece tener mayor número de probabilidades de aproximarnos a la verdad se fundamenta en que determinados tipos de nubes son transparentes a la radiación solar incidente, y opacas a la reflejada desde el suelo, por lo que producen el tan nombrado efecto invernadero. Pero lo verdaderamente importante ha sido el descubrimiento de que los rayos cósmicos galácticos (RCG) potencian la ionización a determinados niveles de la atmósfera, lo que propicia el desarrollo diferencial de uno u otro tipo de nubes (Rycroft et al, 2000; Bazilevskaya et al, 2000; Marsh and Svensmark, 2000). Dicho en términos muy generales, cuando la magnetosfera solar presenta una actividad elevada y frena la llegada de RCG, dominarían las nubes "invernadero", mientras que en periodos de baja actividad ocurriría lo contrario. Lockwood et al (2000) han estudiado las medidas del campo magnético solar en el entorno de la Tierra, y encuentran que ha aumentado en un 40 % desde 1964, y en un 130 % desde principios del siglo XX, mientras que los RCG han disminuido en casi un 4 % desde 1964, lo que conlleva la formación de nubes favorables al efecto invernadero. Con estos valores se llega a una estimación de que la radiación solar ha tenido un incremento relativo de 1,4 W/m<sup>2</sup> durante el último siglo, que equivale a la mitad de la variación en la transición glaciario-interglaciario, calculada en 3,0 Wm/m<sup>2</sup>.

De paso, puede indicarse que los RCG catalizan la formación de óxidos de Nitrógeno, especialmente NO, que le quita un átomo a la molécula de Ozono (O<sub>3</sub>) para convertirlo en el modesto Oxígeno (O<sub>2</sub>), y esto ocurre precisamente sobre las zonas polares, ya que los RCG son canalizados por las líneas de fuerza del campo magnético terrestre. Un espíritu mordaz preguntaría ahora si no tendremos que pedir perdón, algún día, a los sufridos CFC.

Este es el *Estado del Arte* en el momento actual. Cualquiera puede apreciar que la extensión de lo desconocido supera

muy ampliamente a la pequeña parcela de lo que, en estos momentos, parece estar suficientemente comprobado por medio de la metodología científica, motivo que obliga a ser muy prudentes a la hora de dogmatizar, ya que un error en la elección de la gestión puede hipotecar el futuro de forma mucho más grave que las peores catástrofes pronosticadas por los Salvadores del Planeta.

#### **A modo de resumen.**

Retomando los conceptos citados al principio, en la Introducción, hoy por hoy puede decirse lo siguiente:

**Cambio Climático.-** Existe realmente, pero no se trata de algo dramático acaecido en el siglo XX, sino que es uno más de los ciclos registrados a lo largo de la historia de la Tierra.

**Calentamiento Global.-** Es cierto que la temperatura en el Planeta va en aumento, pero es una tendencia que arranca del siglo XV, tras la Pequeña Edad del Hielo, repitiendo un ciclo previo que, entonces, llevó al Pequeño Óptimo Climático. Que continuemos en esa línea, o que los termómetros comiencen a bajar pasado mañana, es algo que, con la tecnología y conocimientos actuales, no se puede predecir.

**Efecto Invernadero.-** Hay inmensas lagunas en el conocimiento del ciclo geoquímico del CO<sub>2</sub>, y ese ciclo es el mejor conocido de todos los otros gases candidatos a potenciar el efecto. Las hipótesis que parten de la correlación entre concentración de CO<sub>2</sub> y aumento térmico son tan simplistas que no merecen la atención, pues aparte de lo que ya se ha indicado respecto a que siempre el incremento de temperaturas precede al del CO<sub>2</sub>, hay que incluir en la correlación decenas de nuevas y mal conocidas variables, tales como las ya citadas de procedencia extraterrestre.

**Ascenso del Nivel Marino.-** Se toma como prueba fehaciente del Calentamiento Global y del Efecto Invernadero, pero la realidad es que el nivel del mar está subiendo al ritmo normal que le corresponde después del fuerte descenso durante la última glaciación.

Para terminar, los autores piensan que el contenido de este artículo constituye el bagaje mínimo de información que debe recibir el ciudadano medio para que pueda formar su

propio criterio. Y para que ese criterio quede más completo, también es necesario indicar que la nota alarmista es la que facilita la concesión de presupuestos a muchos proyectos de investigación básica, que de otra forma irían directamente a la papelera, a la vez que sirve de excusa para achacar al Cambio Climático las catástrofes originadas por la desidia en la gestión del territorio en muchas partes del mundo.

### BIBLIOGRAFÍA

Bazilevskaya, G. A., Krainev, M. B., Makhmutov, V. S.- 2000.- Effects of cosmic rays on the Earth's environment. Journal of Atmosph. and Solar-Terrestrial Physics, 62, 1577-1586.

Cermak, V.-1971.- Underground temperature and inferred climatic temperature of the past millenium. Palaeogeof. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 10,1-19.

Cuenca, A. y Walker, M.J.-1982.- Una evaluación de las temperaturas medias seculares durante el último milenio, a partir de las desviaciones del gradiente geotérmico. Anales de la Univ. de Alicante. Historia Medieval, 1, 245-251.

Fischer, H., Wahlen, M., Smith, J., Mastroianni, D. and Deck B.-1999.- Ice core records of atmospheric CO<sub>2</sub> around the last three glacial terminations.- Science, 283, 1712-1714.

Indermühle, A., Monnin, E., Stauffer, B., Stocker, T. F., and Wahlen, M.-2000.- Atmospheric CO<sub>2</sub> concentration from 60 to 20 kyr BP from the Taylor Dome ice core, Antarctica. Geophys. Res. Letters, 27, 5, 735-738.

Kazanskiy, A. B.-1985.- A hypothesis for the sawlike pattern of world sea-level fluctuations. Quaternary Research, 24, 285-294.

Marsh, N. and Svensmark, H.-2000.- Low cloud properties influenced by Cosmic Rays.- Physical Review Letters. 85,23, 5004-5007.

Pirazzoli, P. A.-1998.- Sea level changes. The last 20.000 years. John Wilwy & Sons, 211 p.

Rycroft, M. J., Israelsson, S. and Price, C.-2000.- The global atmospheric electric circuit, solar activity and

climate change. *Journal of Atmosph. and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 1563-1576.

Taylor, J. A. and Orr, J. C.-2000.- The natural latitudinal distribution of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global and Planetary Change*, 26, 375-386.

Veizer, J., Godderis, Y. and François, L. M.-2000.- Evidence for decoupling of atmospheric CO<sub>2</sub> and global climate during the Phanerozoic eon. *Nature*, 408, 698-701.