

CLIMA Y CONSTANTE SOLAR VARIABLE

Adolfo Marroquín Santoña
Doctor en Física - Meteorólogo del Estado
Miembro de la Comisión Científica de la RSEEAP

El sol es prácticamente la única fuente de energía externa al planeta tierra, por lo que la vida y todos los procesos dinámicos que tienen lugar en torno a ella, dependen directa o indirectamente de esa energía. En concreto la circulación general atmosférica, causante de la meteorología del día a día, se basa fundamentalmente en la energía solar. Una de las muchas definiciones que podríamos establecer para el clima es la de ser la integral de la meteorología, extendida a períodos de tiempo "suficientemente" largos, con lo que esta integral y por tanto el clima depende de muchos factores, pero sobre todo del flujo de energía solar. Para medir la cantidad de energía que, procedente del sol, alcanza la parte superior de nuestra atmósfera se utiliza la llamada constante solar, ahora bien, los datos satelitales nos indican que "la constante solar" (S) es de hecho variable. La irradiancia solar disminuyó desde el máximo de manchas solares de 1979 al mínimo de 1986, aumentando después al acercarse al siguiente ciclo de manchas solares de 11 años, y disminuyendo nuevamente en la fase descendente.

Las variaciones en la irradiancia solar son generalmente cíclicas con tiempos comprendido entre los 27 días del periodo de la rotación solar, pasando por los 11 y los 22 años de los periodos de actividad solar, hasta los ciclos muy largos de cientos a miles de años de duración. Los periodos más importantes de variabilidad de la irradiancia solar son los siguientes:

* Período de 27 días de la rotación solar: Éste es uno de los periodos más significativos de la variabilidad de la irradiancia solar, sin embargo la amplitud de esta variación normalmente es mucho menor del 0.1% y hay muy poca evidencia de respuestas atmosféricas a los cambios que tienen lugar a estas escalas temporales.

* Ciclo solar de 11 años: Es el periodo más notable y se le conoce como el "Ciclo Solar". Este ciclo se ha observado en registros de manchas solares datados desde hace 2000 años en China. Muchos de los cambios observados en el clima están correlacionados con el período de 11 años del ciclo solar. Se ha encontrado que las trayectorias de las borrascas a través de los océanos cambian de latitud con las fases cambiantes del ciclo solar. Estos cambios en las trayectorias de las borrascas podrían estar relacionados, y seguramente lo están, con algunos fenómenos del tipo de sequías y temporales que muestran periodicidades en torno a valores del orden de esos 11 años en algunas regiones del mundo. Hay que reconocer sin embargo que no hemos podido encontrar esa periodicidad en nuestros datos de las "series largas" españolas, al menos no a un nivel significativo desde el punto de vista estadístico.

* Ciclos de 88 años, de 124 años y de más de 300 años: El sol tiene muchas periodicidades enmascaradas, que aparecen, más o menos remarcadas, en archivos de datos procedentes de núcleos de hielo y de anillos de los árboles que pueden encontrarse datados desde más de mil años atrás. Estos períodos forman parte de investigaciones aun en marcha, pero parece que la confluencia de estos ciclos ha dado lugar a cambios climáticos. El ejemplo más reciente de esto ocurrió en el siglo XVII, en el que el sol permaneció varias décadas prácticamente sin manchas solares. Este periodo de mínimo solar es el conocido como mínimo de Maunder, y los cambios

climáticos asociados con este periodo incluyen el frío severo sobre Europa, con nevadas en pleno verano. Recientemente se ha manejado la hipótesis de que una buena parte, entre el 10 y el 40 por ciento, del aumento en la temperatura de la Tierra durante los últimos 100 años (calentamiento global) podría ser debido a un aumento en la irradiancia solar asociado con la superposición de varias de las oscilaciones solares de largo período.

* Ciclos de 23.000, 42.000 y 100.000 años: En periodos largos de tiempo (miles de años) la órbita de la tierra alrededor del sol cambia debido a muchos factores, incluido el "tirón gravitatorio" de otros planetas. Estos cambios en la órbita cambiarán también la cantidad y distribución de radiación solar que la tierra recibe. Estas variaciones causan los mayores cambios en el clima dando lugar a largos periodos de bajas temperaturas, periodos de glaciación llamados "Edad de Hielo". Estos periodos están, bastante bien documentados, al menos en el Hemisferio Norte, donde su ocurrencia se ha detectado regularmente durante millones de años, encontrándose que existe un buen acuerdo entre las variaciones en la órbita de la Tierra alrededor del sol y las eras glaciares.

Variaciones de la constante solar durante el ciclo de 11 años de las manchas solares y efectos climáticos

El IPCC (Panel internacional de expertos para el estudio del cambio climático) ha sostenido que la variación de la constante solar (S) es menor del 0.1% y que no tiene un impacto en el clima que pueda ser comparado con el efecto invernadero [15]. Admitiendo, en principio, la validez de esa afirmación, quedan sin embargo algunas dudas por aclarar, por ejemplo no está aún claro si ese 0.1% que se cita en las publicaciones se refiere a la amplitud absoluta de la variación sinusoidal de la constante solar, o al cambio del mínimo al máximo, o del máximo al mínimo, referidos a un período concreto [5, 8, 10].

En la **Figura 1**, basada en C. Fröhlich [5], se muestra esta idea. Los datos en la parte superior de la figura, designados por "N-7", representan las medidas hechas por el NIMBUS-7. La curva suavizada muestra la media móvil para 81 días, correspondiente al intervalo de tres rotaciones solares de 27 días. El eje de ordenadas mide el valor de la constante solar S , en W/m^2 . El segmento de referencia en medio de Figura 1 indica, a escala, el rango del 0.1% del valor medio de la constante solar. Cuando esta escala se toma para medir la variación en la curva suavizada desde el máximo de manchas solares de 1979 al mínimo en 1986, el resultado es aproximadamente igual a - 0.22%, es decir más del doble del 0.1% que maneja el IPCC. Ahora bien, desde luego no es una práctica común (ni recomendable) para evaluar la variación total de una magnitud utilizar la referencia a su valor en un instante dado o a un pequeño período de tiempo, pero el propio IPCC procede también así al referir el incremento en la temperatura global al mínimo al final del siglo XIX y no a la media de la temperatura a largo plazo.

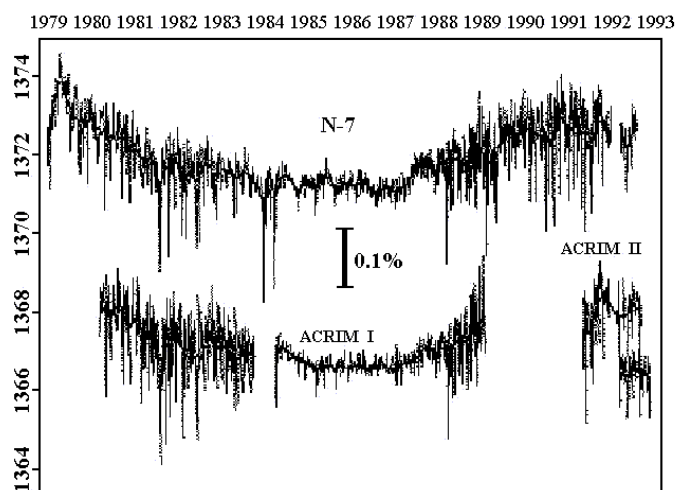


Figura 1

De acuerdo con las medidas efectuadas desde satélites, el valor medio de la constante solar es el de $S = 1367 \text{ W/m}^2$, cuyo 0.22% nos da una cantidad de 3 W/m^2 . Este resultado también puede comprobarse en la Figura 1, con un máximo en la curva suavizada de valor 1374.2 W/m^2 y un mínimo en dicha curva de 1371.2 W/m^2 . De esta energía, un 30 % no es absorbida por la atmósfera, sino reflejada, y además hay que tener en cuenta que la parte de la tierra irradiada por el sol constituye sólo un cuarto de la superficie a la que esta energía térmica tiene que ser distribuida. Por tanto, de dispone sólo de 239 W/m^2 para calentar la atmósfera, de forma que la variación de 3 W/m^2 tiene un efecto climático de sólo 0.53 W/m^2 . La estimación de la influencia de esa variación sobre la temperatura global depende del modelo de circulación general utilizado, obteniéndose un valor entre 0.3° y 1.4°C/W/m^2 , es decir un valor medio de 0.85°C/W/m^2 , con lo que el efecto climático de los 0.53 W/m^2 sobre la temperatura sería de 0.45°C .

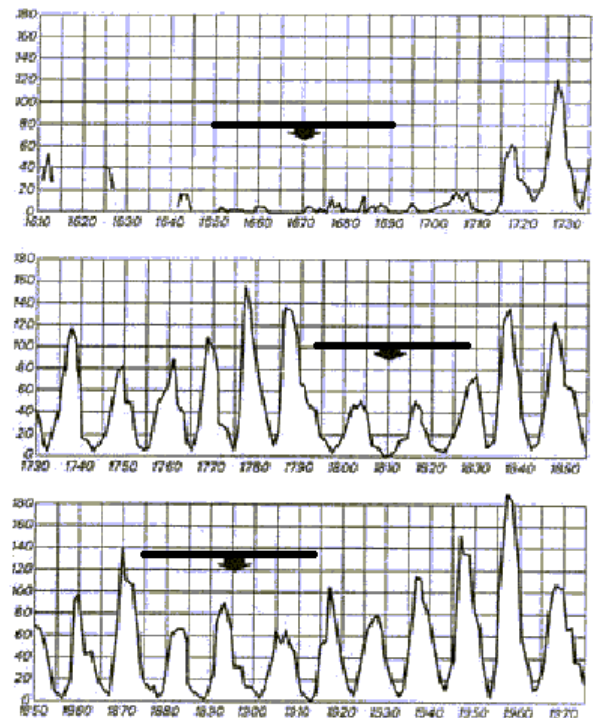


Figura 2

Una variación en la temperatura global de 0.45°C en el curso de siete años, de 1979 a 1986, entre los que se ha encontrado la variación del 0.22%, es decir de los citados 3 W/m^2 , no puede ser considerada despreciable. De hecho, el aumento de temperatura observado durante las últimos cientos de años es de 0.4°C , puesto que al valor de 0.5°C , citado frecuentemente en la literatura, hay que sustraerle una cantidad del orden de 0.1°C , debido al calentamiento urbano de los puntos de observación [10]. La observación de datos del clima a lo largo del ciclo de manchas solares de 11 años, indica que el efecto de las variaciones de la irradiancia sobre la atmósfera es reforzado por procesos de retroalimentación positivos o por resonancia estocástica. Esta forma de resonancia está relacionada con la interacción de fenómenos aleatorios y estímulos periódicos. El ruido puede mejorar la respuesta para pequeñas señales periódicas o cuasiperiódicas, para las que pequeñas variaciones en las entradas de señal pueden producir fluctuaciones grandes [13, 18]. Este efecto es más fuerte en sistemas no lineales con un nivel alto de ruido, es decir precisamente del tipo de la atmósfera terrestre.

Ciclo de Gleissberg de la actividad solar y cambio climático

Tratándose del clima, siete años son un intervalo muy corto. Un posible efecto climático provocado por las variaciones de irradiancia totales se hace tanto más evidente cuando más dura su impacto. La teoría de Milankovitch en su forma moderna señala que un cambio de 0.1% actuando durante un largo intervalo de tiempo puede dar lugar a una edad de hielo [11]. Así que es de esperar que el ciclo de Gleissberg de 90 años de actividad de las manchas solares que modula la intensidad del ciclo del 11 años posea un potencial considerable para acumular un incremento de irradiancia, o para inducir una disminución del nivel de la densidad de flujo radiante, en particular dado que el ciclo de Gleissberg puede alcanzar una duración de 120 años [12]. La **Figura 2**, debida a J. A. Eddy [2] muestra las

grandes variaciones en el número de manchas solares a lo largo de los sucesivos ciclos de 11 años. Trazando la curva envolvente de estos valores aparecen los mínimos del ciclo de Gleissberg alrededor de los años 1670 (mínimo de Maunder), 1810, y 1895, marcados en la figura por los trazos y flechas negras.

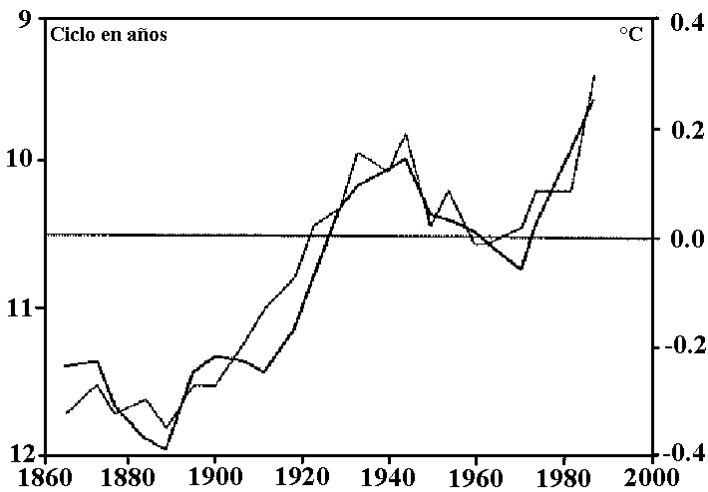


Figura 3

duración del ciclo de las manchas solares (escala del eje izquierdo) entre los años 1865 a 1985.

Cada uno de estos mínimos de las manchas solares seculares coincidieron con períodos de clima frío en el Hemisferio Norte. Cuanto más profunda fue la caída del nivel de actividad solar, tanto mayor fue la bajada de las temperaturas.

En la **Figura 3**, debida a E. Friis-Christensen y K. Lassen [4] esta conexión se hace evidente. La línea más gruesa muestra las desviaciones respecto al valor medio de la temperatura en superficie del Hemisferio Norte (escala del eje a la derecha), mientras la línea delgada representa la

Cuando las observaciones satelitales establecieron que la constante solar es variable, se desarrollaron modelos fenomenológicos de regresión para evaluar las variaciones de la irradiancia en décadas y siglos pasados. El modelo desarrollado por D. V. Hoyt y K. H. Schatten [10], cuyos resultados se muestran en la **Figura 4**, se basa en datos relacionados con los cambios seculares en el transporte convectivo de energía o las velocidades convectivas en el interior del sol. Los datos incluyen también la duración del ciclo solar, la razón de la rotación ecuatorial solar, y la estructura de las manchas solares. Este modelo de irradiancia solar tiene sólo dos parámetros: la amplitud de las variaciones del ciclo de 11 años y el ciclo de Gleissberg. La curva gruesa en la Figura 4 muestra la irradiancia en W/m^2 , medida sobre el eje de la izquierda, dada por la salida del modelo. La curva de puntos representa la media anual suavizada de las variaciones de la temperatura en el Hemisferio Norte (escala de la derecha en $^{\circ}C$), de acuerdo con los datos de B. S. Groveman y H. E. Landsberg [6] para 1700-1879, y desde 1880 en adelante con los de J. E. Hansen y S. Lebedeff [7]. Las dos curvas muestran evidentemente una marcada correlación que apunta a una fuerte dependencia entre la actividad solar y el clima.

Dado que las variaciones en el valor de la constante solar no se han comenzado a medir directamente, mediante satélites, hasta 1978, es importante el hecho de que las observaciones radiométricas de estrellas del tipo del sol hayan mostrado variaciones en su irradiancia del orden del 0.6% [14]. Las variaciones de este orden en la actividad del sol podrían explicar anomalías del clima como la "Pequeña edad de hielo". Esto puede indicarnos

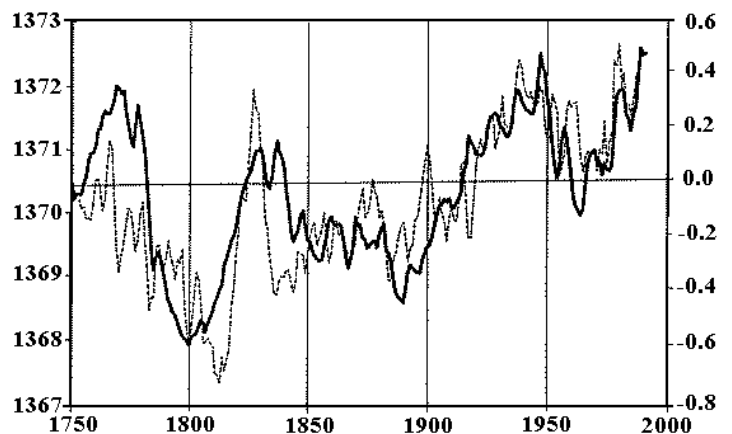


Figura 4

que el sol tiene un potencial de variación de su irradiancia mucho mayor que el que se le está suponiendo. Las observaciones del satélite desde 1978 cubren sólo una pequeña parte del rango de variabilidad del sol. Por otra parte, S. Baliunas y W. Soon [1] han encontrado además que los ciclos cortos estelares producen alteraciones de irradiancia mayores que los ciclos largos.

Variaciones en la radiación ultravioleta del sol y modelos climáticos

Los cambios en la radiación ultravioleta del sol son mucho mayores que en el rango de radiación visible. El rango ultravioleta del espectro queda entre las longitudes de onda de 0,1 nm (nm = nanometro = 10^{-9} m) y 3,8 nm. Las longitudes de onda por debajo de 1,5 nm constituyen el ultravioleta extremo (UVE). La variación en la radiación entre los extremos del ciclo de manchas solares de 11 años alcanza valores del orden del 35% en el UVE [19], del 20% en 1,5 nm [3], y alrededor del 7% en 2,5 nm [9,16]. Para las longitudes de onda mayores de 2,5 nm, la variación alcanza todavía el 2% [3]. En el momento de erupciones solares energéticas, la radiación UV aumenta hasta en un 16%. En los máximos de las manchas solares, la radiación UVE produce un incremento de la temperatura de la ionosfera del orden del 300% respecto al mínimo [3]. Todavía más importante es el hecho de que la radiación UV por debajo de los 2,9 nm es absorbida prácticamente en su totalidad por el ozono en la estratosfera, dando lugar a un aumento de la temperatura a ese nivel con retroalimentación positiva.

Finalmente, dejemos constancia de que parece claro que las variaciones en la radiación solar influyen en el clima terrestre, pero no son el único camino que el sol utiliza para influir en el clima.

**Badajoz, octubre 2000
A.M.S.**

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Baliunas, S. y Soon, W.: Are variations in the length of the activity cycle related to changes in brightness in solar-type stars? *Astrophys. J.* 450 (1995), 896.
- [2] Eddy, J. A.: A new sun. The solar results from skylab. Washington, D. C., NASA, 1979, 12.
- [3] Foukal, P. V.: The variable sun. *Scient. American*, Februar 1990, 39.
- [4] Friis-Christensen, E. y Lassen, K.: Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate. *Science* 254 (1991), 698.
- [5] Fröhlich, C.: Variations in total solar irradiance. In: B. Frenzel, Hsg.: Solar output and climate during the Holocene. StuttgartJena-New York, Gustav Fischer Verlag, 1995, 125, 126, 127.
- [6] Groveman, B. S. y Landsberg, H. E.: Simulated northern hemisphere temperature departures 1579-1880. *Geophysical Research Letters*, 6 (1979), 767.
- [7] Hansen, J. E. y Lebedeff, S.: Global surface air temperatures. Update through 1987. *Geophysical Research Letters* 15 (1988), 323.
- [8] Hansen, J. E., Lacis, A. A., y Ruedy, R. A.: Comparison of solar and other influences on long-term climate. In: K. H. Schatten and A. Arking, Hsg.: Climate impact of solar variability. Greenbelt, NASA, 1990, 142.

- [9] Hood, L. L. y Jirikowic, J. L.: A mechanism involving solar ultraviolet variations for modulating the interannual climatology of the middle atmosphere. In: K. H. Schatten and A. Arking, Hsg.: Climate impact of solar variability. Greenbelt, NASA, 1990, 165.
- [10] Hoyt, D. V. y Schatten, K. H.: The role of the sun in climate change. New York-Oxford, Oxford University Press, 1997, 61, 70, 86, 184, 188, 194, 214.
- [11] Labitzke, K, y van Loon, H.: Sonnenflecken & Wetter. Gibt es doch einen Zusammenhang? Die Geowissenschaften 8 (1990), 1.
- [12] Landscheidt, T.: Long-range forecast of sunspot cycles. In: Simon, P. A., Heckman, G. & Shea, M. A.: Solar-terrestrial predictions. Proceedings of a workshop at Meudon, 18.-22. Juni 1984. Boulder, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1986, 53-55.
- [13] Moss, F. y Wiesenfeld, K.: The benefits of background noise. Scient. American, August 1995, 66.
- [14] Nesme-Ribes, E., Baliunas, S. L. y Sokoloff, D.: The stellar dynamo. Scient. American August 1996, 51-52.
- [15] Robock, A: Solar, volcanic, and anthropogenic influences on climate for the past 500 years. Klimakonferenz "Klimaveränderungen - Ursachen & Auswirkungen", 10. -11. November in Bonn.
- [16] Schlesinger, B. M., Cebula, R. P., Heath, D.F., DeLand, M. T y Hudson, R. D.: Ten years of solar change as monitored by SBUV and SBUV2. In: K. H. Schatten & A. Arking, Hsg.: Climate impact of solar variability. Greenbelt, NASA, 1990, 341.
- [17] Tinsley, B. A.: Do effects of global atmospheric electricity on clouds cause climatic changes? EOS, 19. August 1997, 341, 344, 349.
- [18] Wiesenfeld, K.: An introduction to stochastic resonance. In: J. R. Buchler & H. E. Kandrup: Stochastic processes in astrophysics. New York, New York Academy of Sciences, 1993, 13.
- [19] Wolff, C. L. y Hoegy, W. R.: Solar irradiance observed from PVO and inferred solar rotation. In: K. H. Schatten & A. Arking, Hsg.: Climate impact of solar variability. Greenbelt, NASA, 1990, 58.