

Las tormentosas relaciones entre el Sol y la Tierra

Blanca Mendoza Ortega

EL SOL ES LA ESTRELLA MÁS CERCANA a nosotros, sostiene todos los procesos biodinámicos de la Tierra y determina las condiciones físicoquímicas de los planetas vecinos. Este papel preponderante fue reconocido desde la antigüedad y es por ello que ha sido adorado en muchas culturas. Por ejemplo, en la cultura maya el Sol se llama *Kinich-Ahau* y en la mexicana el Sol se encuentra representado en el centro del calendario azteca con el nombre de *Tonatiuh*. Otras culturas más antiguas como la egipcia también dejaron manifestaciones en petroglifos sobre la divinidad del Sol con el nombre de *Ra* o *Aton*.

El estudio del Sol en Occidente se remonta a 200 años a.c., cuando los griegos observaban la faz del Sol; sin embargo, no dejaron registros de sus estudios. Por otra parte los chinos y los coreanos si dejaron registros de fenómenos solares que observaron entre 400 a 300 a.c. Por esta razón nos tenemos que remontar al año 1610 cuando Galileo Galilei construye un telescopio, lo enfoca al Sol y entonces comienza a observar las manchas y realiza dibujos de las mismas. Unos años después, en 1625, el estudioso alemán Scheiner realizó una descripción más puntual sobre observaciones de las manchas solares.

Actualmente en el mundo existen varios observatorios astronómicos dedicados al estudio del Sol como el de Pic tu mi di, en Francia, o en Nobeyama, Japón, donde tienen arreglos de muchos radio telescopios. El Sol también se estudia a través de satélites, como por ejemplo, el Skylab (que se impactó con la Tierra), el Helios, el Soho o el Hinode, que tienen una serie de instrumentos para realizar mediciones *in situ* de todo lo que el Sol está enviando al medio interplanetario y que permiten hacer estudios mucho más precisos

de nuestra estrella. La Universidad Nacional Autónoma de México también cuenta con varios instrumentos que miden diversas emisiones solares.

Datos generales del Sol

Nombre de la estrella	Sol
Galaxia a la que pertenece	Vía Láctea
	10^{11} estrellas
Distancia del Sol a la Tierra	unidad astronómica (UA) equivalente a 215 radios solares
Radio del Sol	696 000 Km en la que cabrían 109 Tierras
Masa solar	Equivalente a 333 000 Tierras
Densidad solar	1.4 gr mientras que la Tierra tiene 5.4 gr
Temperatura superficial	5 800° C
Temperatura nuclear	1 000 000° C
Rotación del Sol	Tarda aproximadamente 25 días en rotar en su ecuador. Por ser un cuerpo gaseoso no rota de manera uniforme, es decir, es diferencial y rota más rápido en el ecuador que en los polos
Edad estimada del Sol	4.6×10^9 años y que está a la mitad de su vida
Edad de la Tierra	3.5×10^9 años
Luminosidad del Sol	10^{33} Wats
Pérdida de masa	Por viento solar, equivalente a 10^{-14} partes de su masa por año

ESTRUCTURA DE NUESTRA ESTRELLA

El Sol está formado principalmente por hidrógeno y genera su energía en el núcleo, donde se lleva a cabo la conversión de hidrógeno en helio y dando lugar a la generación de la radiación solar (ver Figura 1). Esta radiación tiene tal energía

que sólo se produce en rayos gamma (longitudes de onda muy corta y altamente energética), en su camino del núcleo a la superficie interacciona con todo el material que hay en el Sol y sale en forma de radiación visible, principalmente en el amarillo. A la radiación le lleva de unos 100 mil a un millón de años en llegar del núcleo a la superficie visible llamada Fotosfera (ver Figura 1) y de allí a la Tierra tarda únicamente 8 minutos en llegar. De manera que la luz que llega a nuestro planeta es una radiación vieja.

La radiación producida en el núcleo al viajar a través del interior hacia la superficie, se encuentra con dos tipos de zonas, la radiativa en donde la energía se transfiere por fotones y la zona convectiva, en donde las condiciones físicas y de temperatura son distintas a la de la zona anterior y ocurre una transferencia macroscópica de energía, que se lleva a

millones de grados con respecto a la Fotosfera que tiene aproximadamente seis mil grados. Aquí cabe preguntarnos ¿cómo es esto posible? La fuente de calentamiento se genera en el núcleo y todos sabemos de manera intuitiva, que al alejarnos de la fuente de calor, la temperatura desciende. Sin embargo, la respuesta aún no se tiene con certeza, pero se presume que pueda ser por un proceso de aniquilación de los campos magnéticos que se generan en la zona convectiva y emergen permeando toda la atmósfera solar.

Las manchas solares son los fenómenos solares más estudiados y por más tiempo, ya que se pueden observar a simple vista. Se encuentran en la Fotosfera, y son zonas de intensos campos magnéticos que inhiben la convección, entonces el transporte de energía no es eficiente, y por ello la mancha es menos caliente que sus alrededores. El Sol no siempre

tiene la misma cantidad de manchas ni en los mismos lugares. Si observamos la Figura 2 que contiene el número de manchas solares desde el año de 1750 hasta el 2007, podemos observar que entre un mínimo y máximo del número de manchas, existe una periodicidad promedio de once años. A esto se le conoce con el nombre de *ciclo solar*. Cuando el Sol está muy activo presenta muchas manchas y cuando se encuentra en un mínimo de actividad presenta muy pocas manchas. Actualmente el Sol se encuentra en su fase ascendente encaminándose hacia un nuevo máximo.

La corona solar, presenta una gran cantidad de fenómenos explosivos tales como las fulguraciones, las eyecciones de masa coronal que son fenómenos de gran escala, así como muchas explosiones de pequeña escala (ver Figura 3). Estos fenómenos se caracterizan por las emisiones de masa, de radiación y de partículas muy energéticas.

También de la corona sale el viento solar que es una emisión de masa no explosiva y constante, que emerge de las regiones conocidas como hoyos coronales. Acompañando a todos estos productos va también el campo magnético solar y al salir al medio interplanetario perturban a los cuerpos que los reciben.

LA RESPUESTA TERRESTRE

Nuestro planeta responde a los productos de la actividad solar que lo impactan con la llamada actividad geomagné-

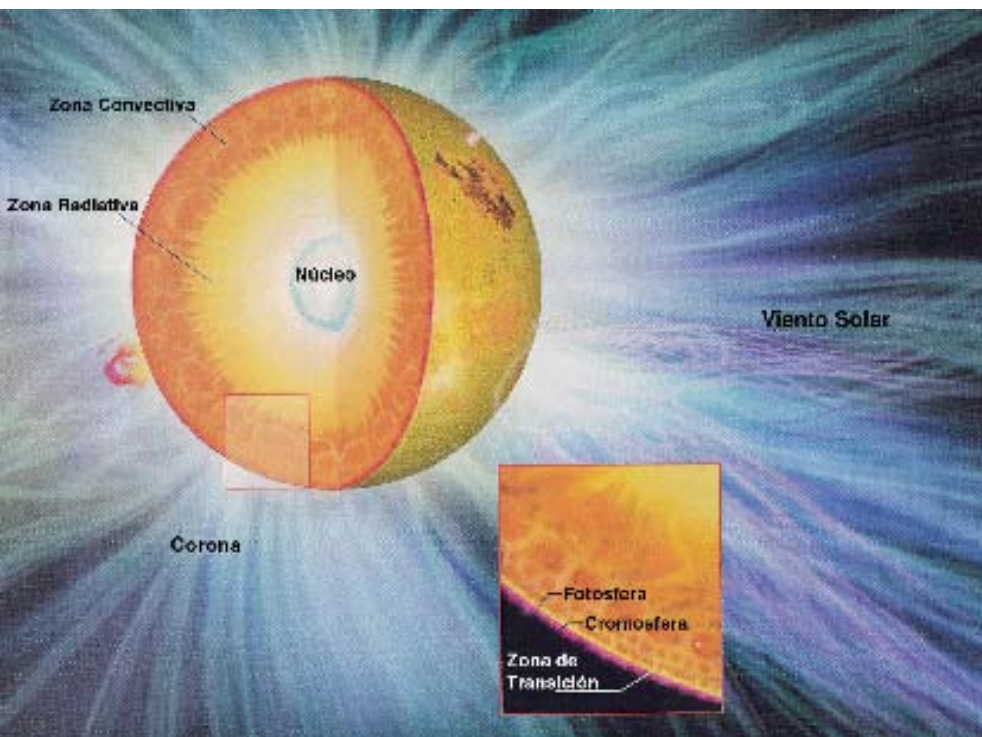


FIGURA 1. Se representan el Núcleo, la Zona Radiativa y la Convectiva. También se observan las capas atmosféricas: Fotosfera, cromosfera, Zona de Transición y Corona. La expansión continua de la corona solar se llama viento solar.

cabo mediante celdas convectivas con tamaños del orden de miles de kilómetros de altura. De hecho, la Fotosfera o primera capa visible del Sol, consiste de las cabezas de las celdas convectivas (ver Figura 1).

La atmósfera solar se compone de tres capas, según se va uno alejando del centro de la estrella: la Fotosfera, la Cromosfera, la Zona de Transición y la Corona (ver Figura 1). La corona del Sol, que es la capa más externa, emite en rayos ultravioleta (UV) y rayos X, lo que significa que la temperatura en esta zona se incrementó entre uno y dos

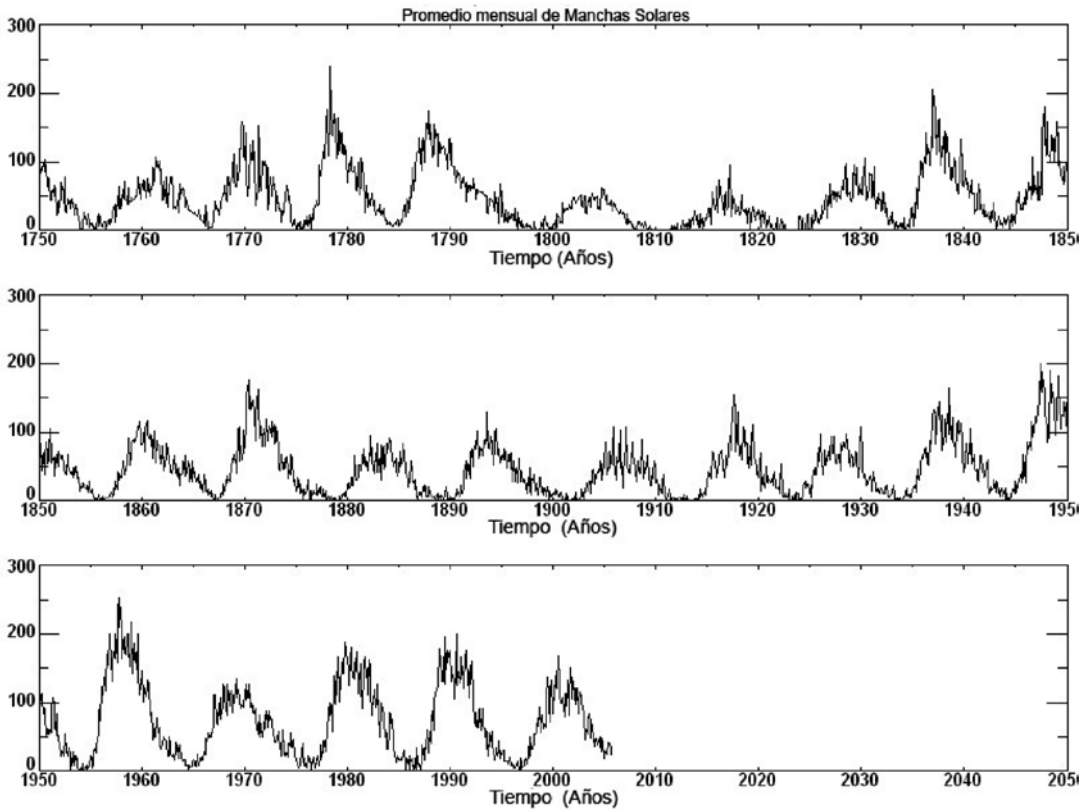


FIGURA 2. Promedios mensuales del número de manchas solares. Se observan los ciclos solares del número 1 al 23. El primer ciclo solar empezó en 1755, en 2007 inició el ciclo 24. Por convención, cada ciclo comienza en un mínimo de manchas solares y termina en el siguiente mínimo.

tica. El viento solar confina al campo magnético terrestre o campo geomagnético en una cavidad conocida como la magnetosfera. Ésta ocasionalmente se conecta con las líneas del campo magnético interplanetario, como lo muestra la Figura 4, permitiendo en ese caso la entrada de material y partículas solares al entorno terrestre, lo cual produce

cambios abruptos de la intensidad del campo magnético: las tormentas magnéticas. Las auroras (Figura 5) son otro resultado indiscutible de la interacción de la atmósfera solar con la terrestre: las partículas del viento solar interactúan con el oxígeno y el nitrógeno de la atmósfera, los cuales se excitan y al desexcitarse emiten los hermosos colores de las

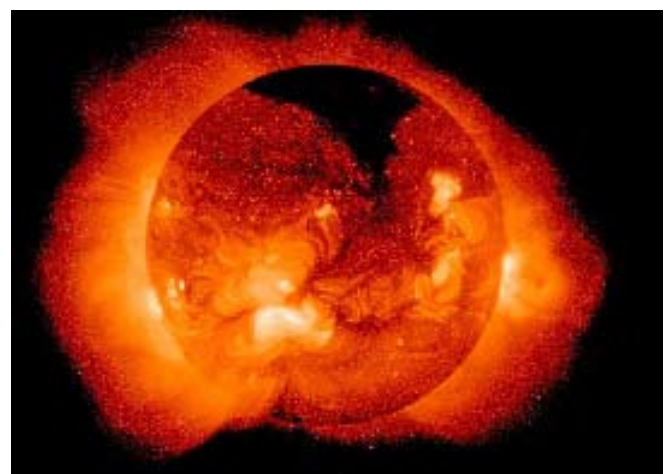
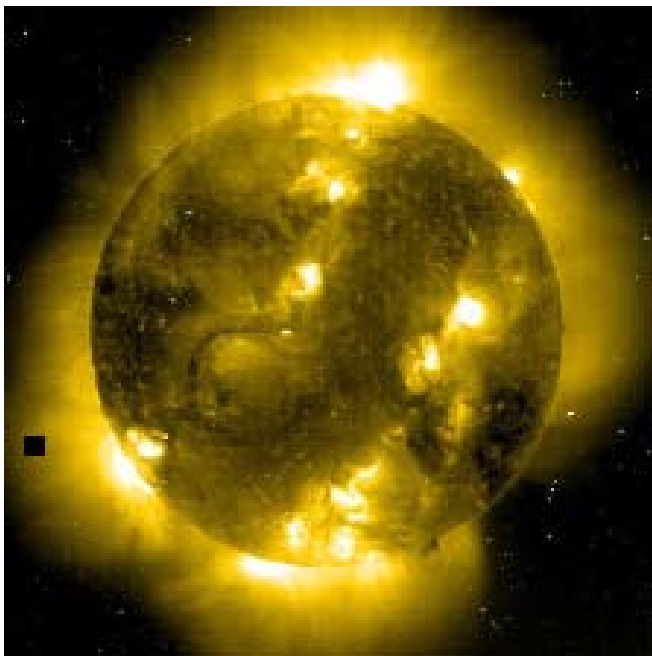


FIGURA 3. La fotografía izquierda muestra la corona solar en rayos X. Las zonas más brillantes son zonas muy activas que producen eventos explosivos. La foto superior presenta un gran hoyo coronal del cual emerge el viento solar.

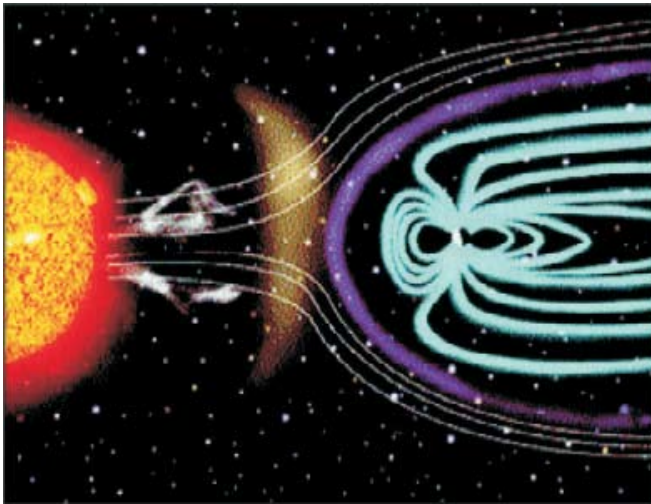


FIGURA 4. Se muestra una representación de la interacción de una eyección de masa coronal con la coraza magnética terrestre o magnetosfera. Al llegar al entorno terrestre la eyección solar posee un campo magnético que tiene una dirección opuesta al campo geomagnético, ambos campos se pueden reconectar permitiendo la entrada de masa y partículas energéticas solares.



FIGURA 5. La figura superior es una fotografía de una aurora boreal en Alaska, la de abajo es la fotografía de una aurora en Saturno.

auroras. Otros planetas como Júpiter o Saturno también presentan auroras boreales y australes ya que tienen atmósfera y campo magnético (ver Figura 5).

EL SOL Y LA TECNOLOGÍA

Las actividades humanas contemporáneas también se ven afectadas por la actividad solar. Conforme la tecnología se ha desarrollado utilizando corrientes, conductores y ondas electromagnéticas, los efectos solares se han vuelto evidentes. Durante la Segunda Guerra Mundial las radio-comunicaciones se empezaron a usar intensamente; a partir de entonces los efectos solares se reconocieron como un problema serio. Desde esa fecha, nuestra dependencia de la tecnología electrónica ha crecido enormemente, y con ello el potencial dañino del Sol. El colapso masivo del sistema hidroeléctrico de Québec en Canadá en 1989, que dio por resultado la pérdida temporal de 9 mil 450 megawatts de potencia eléctrica, marcó el momento en que no sólo la comunidad científica, sino el público en general, se preocuparon por la actividad solar. Algunos de los efectos que actualmente representan un problema son:

Las corrientes inducidas geomagnéticamente. Durante una tormenta magnética, las corrientes que fluyen en la región ionizada de nuestra atmósfera, la ionosfera, cambian rápidamente, produciendo su propio campo magnético, el cual se combina con el terrestre. Al nivel del piso también hay un cambio en el campo magnético, que induce corrientes eléctricas en cualquier conductor que esté presente. Frecuentemente no notamos estas *corrientes geomagnéticamente inducidas*. En un buen conductor, como los gasoductos, oleoductos o líneas de transmisión eléctrica, las corrientes viajan por sus paredes. Los voltajes generados producen diferencias de potencial de por ejemplo 10 volts en un kilómetro, lo cual en un oleoducto de mil kilómetros genera una enorme diferencia de potencial de 10 mil volts. Las corrientes eléctricas inducidas son más peligrosas a altas latitudes, y en áreas que están sobre grandes depósitos de roca ígnea. Debido a que las rocas ígneas tienen una baja conductividad, las corrientes inducidas viajan a través de los conductores hechos por el ser humano causando su corrosión y mal funcionamiento. Aunque las compañías eléctricas y petroleras diseñan mecanismos de protección, al construir más y mayores sistemas de potencia la vulnerabilidad se incrementa.

Las comunicaciones. Los satélites artificiales están en órbitas fuera de la mayor porción de la atmósfera terrestre, y por tanto hay poca fricción sobre ellos. Los satélites de

comunicaciones se encuentran a casi 6 radios terrestres (un radio terrestre equivale 6 mil 378 kilómetros), pero hay satélites que orbitan más bajo. Durante épocas de alta actividad solar se incrementa la radiación ultravioleta y la precipitación de partículas energéticas a la atmósfera terrestre, calentándola y expandiéndola. Entonces los satélites de órbitas más bajas están en una atmósfera más densa, lo que incrementa la fricción sobre ellos, alterando sus órbitas y causando que algunos se precipiten a tierra. Los satélites en órbitas altas se encuentran bien protegidos dentro de la magnetosfera, pero si hay un evento solar particularmente intenso, por ejemplo una eyección de masa coronal muy energética, la magnetosfera se comprime y el satélite queda fuera de su cobijo, causando que las partículas energéticas y del viento solar corraan al satélite y dañen sus componentes. Las radiotelecomunicaciones que se realizan a través de la ionosfera se ven también afectadas, al producirse allí ionización adicional debido a radiación ultravioleta y los rayos X, así como a partículas energéticas provenientes de eyecciones de masa coronal, fulguraciones solares o rayos cósmicos.

EL EFECTO DE LA ACTIVIDAD SOLAR EN EL CLIMA

Como los efectos del Sol en la atmósfera superior de nuestro planeta son notables, entonces nos podemos hacer la siguiente pregunta: ¿tendrá la actividad solar también una influencia directa sobre la capa atmosférica más baja, la troposfera, que es donde se produce el clima? Estaríamos tentados a responder afirmativamente, puesto que nadie duda de que es el Sol el que provee la energía de la troposfera poniendo en marcha complicados mecanismos para generar huracanes, tormentas, regular el ciclo hidrológico, etcétera.

Desde hace ya varios siglos se ha formulado esta pregunta y por tanto se han dado algunas propuestas. Por ejemplo, ya en 1645, Antonii Mariae Scheyreli sugirió que un incremento en las manchas solares podría estar asociado con un clima frío. Para 1801, William Herschell decía que los altos precios de trigo indicaban un clima frío y lo asociaba con la aparición de pocas manchas solares.

El clima de la Tierra es primeramente una manifestación de cómo la radiación solar es absorbida, redistribuida en el sistema atmósfera–océano y posteriormente re-radiada hacia el espacio exterior. La composición de la atmósfera incide directamente en el balance global de energía, ya que sus compo-

nentes reflejan o absorben la radiación solar proveniente del espacio, así como la radiación térmica reemitida por la superficie terrestre en diferentes formas.

La radiación solar que han medido los satélites en las últimas tres décadas tiene una variación muy pequeña a lo largo del ciclo solar: 0.1 % entre el mínimo y el máximo. Tal cambio es despreciable al ser introducido en los modelos climáticos, y por ello no se le toma en cuenta. Incluso, en los medios meteorológicos, al total de la radiación solar se le llama “constante solar”, aun cuando varía. Sin embargo, en otras épocas la variación de la radiación solar ha sido más importante, llegando a incrementarse o disminuir entre 1 y 2 %. Es bien conocido que en el siglo 17 los ríos europeos se congelaron por varias decenas de años; se calcula que la temperatura promedio global del planeta bajó un grado centígrado. Este descenso coincidió con el llamado mínimo de Maunder de la actividad solar, durante el cual el Sol no tuvo manifestaciones de actividad por 70 años, disminuyendo apreciablemente fenómenos tales como las manchas y la radiación solares.

La radiación solar que llega al tope de la atmósfera está compuesta de todas las longitudes de onda. Sin embargo, al penetrar en la atmósfera la radiación más energética, es decir con longitud de onda más corta, es absorbida por la atmósfera superior. Por tanto a la troposfera sólo llegan radiaciones en el visible, una ventana en radio y radiaciones de mayor longitud de onda. Al llegar a tierra estas radiaciones son degradadas al infrarrojo o calor. Este calor vuelve a la atmósfera pero el vapor de agua principalmente, y otros gases tales como el bióxido de carbono y el metano la atrapan. Esto produce un calentamiento de la superficie terrestre, llamado *efecto invernadero*.

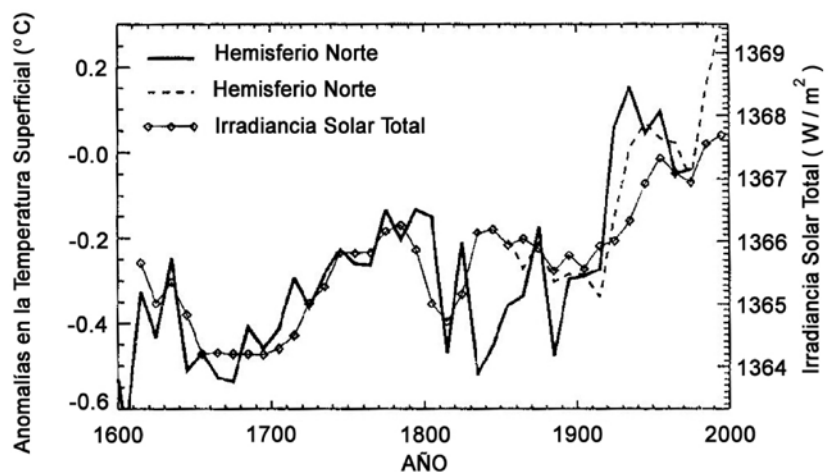


FIGURA 6. La línea continua y la punteada son dos reconstrucciones diferentes de la temperatura promedio del hemisferio norte. La línea continua con círculos es la radiación o irradiancia solar.

El efecto invernadero está íntimamente ligado con el problema del calentamiento global. La idea general sobre el fenómeno del calentamiento global es la siguiente: desde 1880 a la fecha ha habido un aumento constante del bióxido de carbono provocado por la actividad industrial y esto está provocando un efecto invernadero que conduce al calentamiento planetario. Es a este aumento de temperatura promedio observado desde principios del siglo 20 al que se le ha llamado calentamiento global y ha sido en promedio durante ese siglo de aproximadamente 0.5 °C. Se ha atribuido exclusivamente al efecto antropogénico.

En la Figura 6 se observan dos reconstrucciones de la temperatura promedio del hemisferio norte en función del tiempo del año 1600 al 2000. Estas dos gráficas de temperatura se hicieron por grupos de trabajo diferentes, quienes usaron datos que no son necesariamente de las mismas estaciones, y además tienen diferentes criterios para la calibración de los instrumentos. Además, para hacer estas series temporales de temperatura a largo plazo, se han combinado datos instrumentales o mediciones directas de temperatura, que existen sólo desde mediados del siglo 19, y mediciones de otros parámetros que son sólo indicadores indirectos de temperatura. A este tipo de series se les llama reconstrucciones, como ni los datos directos ni los indirectos de temperatura son necesariamente los mismos, el resultado es que las series tienen diferencias entre sí. También en la figura se presenta la gráfica de la radiación (irradiancia) solar. Al comparar cualquiera de las dos curvas de temperatura del hemisferio norte con la curva de la radiación solar se observan algunas cosas:

a) Entre aproximadamente 1610 y 1635 se nota un aumento de temperatura, seguido de un decremento hasta 1680. Luego un incremento notable de 1680 hasta cerca de 1800. Un nuevo decremento de temperatura se da alrededor de 1810. Se da un nuevo incremento después de 1810, entre este año y 1925 hay fluctuaciones de la temperatura y ésta vuelve a incrementarse sostenida y significativamente después de 1925.

b) El mayor incremento de temperatura de todo el periodo (1600-2000) se observa a partir de 1925. En 1970 hay una disminución y después de este año se da un incremento aún mayor. Entre 1940 y 1970 no hay incremento neto en temperatura y en cambio el bióxido de carbono acelera su aumento. La explicación que se da es que la producción industrial de aerosoles tiene un efecto de enfriamiento que compensa al efecto de invernadero.

c) De 1600 y hasta 1970 la curva de la radiación solar sigue más o menos a las curvas de temperatura. Pero ya

para 1980 es claro que la temperatura sigue en pronunciado aumento sin que la radiación solar la siga.

La conclusión a la que llegamos después de analizar la Figura 6, es que en el cambio de la temperatura terrestre, el Sol ha jugado un papel muy importante hasta la década de los 70', pero después la actividad industrial definitivamente ha venido dominando.

La radiación solar, siendo parte de la actividad solar cambia con ésta, por tanto, si el Sol disminuye o aumenta su actividad y por tanto su radiación, esto se puede reflejar en una disminución o aumento de la temperatura terrestre. No sabemos cuándo el Sol presentará periodos de mucha menor o mucha mayor actividad y por tanto de radiación, como ya lo ha hecho en el pasado, por ejemplo o durante el mínimo de Maunder.

El papel de la radiación solar en el clima todavía no se puede ver en toda su extensión, porque es muy compleja de entender y de medir. Hasta que se puedan hacer modelos de atmósfera que incluyan diversos aspectos de la actividad solar, y así comprender qué pasó en el pasado y cómo funcionará en el futuro, entonces comenzaremos a vislumbrar cuál es el verdadero efecto del Sol en el clima de la Tierra. Por lo pronto hay evidencias que nos dicen que cuando el Sol estornuda, a la Tierra le da pulmonía. •

Referencias

- 1) Mendoza, B. *Actividad Solar y Clima*, Monografías del Instituto de Geofísica, No. 8, 2006.
- 2) Ramírez, J. B. Mendoza, V. Mendoza, y J. Adem (2004), "Modeling the effect of an assumed cosmic-ray modulated global cloud cover on the terrestrial surface temperature", *J. Atm. Solar-Terrestrial Phys.* 66, 1683-1690.
- 3) Otaola, J. A., B. Mendoza, y R. Pérez (1999), *El Sol y la Tierra, una relación tormentosa*, Fondo de Cultura Económica, colección "La Ciencia para todos", vol. 114.
- 4) Revista *Ciencia*, Vol. 57 No 1, Revista de la Academia Mexicana de Ciencias, 2006.

Direcciones electrónicas de interés

<http://solarviews.com/eng/homepage.htm>

<http://www.nasa.gov/home/index.html>

http://pdsimg.jpl.nasa.gov/cgi-bin/Atlas/search.pl?INSTRUMENT_HOST_NAME=MARS_GLOBAL_SURVEYOR

<http://ssd.jpl.nasa.gov/>

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

<http://www.geofisica.unam.mx/isyp/rcosmos.htm>

<http://www.geofisica.unam.mx/isyp/osga.html>

<http://www.veso.unam.mx>

BLANCA MENDOZA ORTEGA. Es profesora e investigadora adscrita al Instituto de Geofísica de la UNAM. Correo electrónico: blanca@geofisica.unam.mx