



DEBATES INTERNOS

LAS RELACIONES SOL TIERRA

Vicente Domingo Codoñer



CÁTEDRA
DE EMÉRITOS

de la Comunidad Valenciana



DEBATES INTERNOS

LAS RELACIONES SOL TIERRA

Vicente Domingo Codoñer

Edita: ©



ÁTEDRA
DE EMÉRITOS
de la Comunidad Valenciana

Autor:

© Vicente Domingo Codoñer

Coordinan:

Vicente López Merino
Concha Albalat Criado
Salvador Aldana Fernández
Antonio Alegre Cremades

D. L.: V-1973-2006

Maquetación e impresión:

Gráficas Antolín Martínez. s.l.
Tel. 96 391 89 84 - www.grafamar.com

LAS RELACIONES SOL TIERRA

Vicente Domingo

Grupo de Astronomía y Ciencias del Espacio

Instituto de Ciencia de los Materiales de la Universidad
de Valencia

Introducción

El Sol es una estrella variable y sus variaciones se reflejan en el entorno terrestre. El clima y la habitabilidad de la Tierra dependen del Sol. Por ello conocer el Sol y su conexión con la Tierra es una prioridad para la ciencia. En los últimos treinta años observatorios solares en el espacio se han sumado al esfuerzo realizado por los observatorios terrestres desde hace siglos. Ello ha permitido abrir ventanas al Sol anteriormente cerradas por la atmósfera terrestre, facilitando así profundizar nuestro conocimiento de las relaciones Sol-Tierra. También nuestro conocimiento de la atmósfera terrestre y la de la magnetosfera, o espacio de influencia de campo magnético terrestre se ha desarrollado mucho en un espacio de tiempo similar gracias a satélites artificiales que han surcado el espacio próximo a la Tierra, midiendo las características del mismo y de la atmósfera terrestre.

1 La actividad solar y el sistema Sol-Tierra

Cuando nos ocupamos de las relaciones Sol Tierra estamos interesados en las variaciones de nuestro entorno debidas a variaciones

del Sol, así como los mecanismos por los que las variaciones solares afectan nuestro planeta y sobre todo si y cómo podemos predecir los efectos. Para ello es necesario conocer el origen de las variaciones en el Sol así como el medio de propagación hasta la Tierra y los mecanismos por los que el sistema terrestre puede ser receptivo a los efectos del cambio.

2 El Sol y la heliosfera

El Sol es nuestra estrella, o mejor, nosotros somos parte del Sol, en el sentido de que nuestro mundo es un pequeño/mediano planeta del Sol, una de los millones de estrellas que forman nuestra galaxia.

El Sol es una masa de fluido contenida por la gravedad. La energía que emite el Sol es producida en su parte central, que se encuentra a 15,5 millones de grados, mediante la fusión de núcleos de hidrógeno en núcleos de helio. Desde este horno central del Sol hasta la fotosfera o superficie visible disminuye la densidad y disminuye la temperatura. La energía producida en el núcleo se transmite radiativamente, hasta llegar a 0,73 radios solares, por lo que se llama "zona de radiación". A partir de ahí, hasta la fotosfera, o superficie visible, la energía asciende por la convección del fluido solar, en la llamada "zona de convección". En la fotosfera el gas solar se vuelve transparente, y la radiación vuelve a ser el modo principal de propagación de la energía. La fotosfera, que se encuentra a unos 5800 grados Kelvin, es la superficie que vemos del Sol y es la fuente de la mayor parte de la radiación que recibimos del Sol (figura 1). Por encima de la fotosfera está la atmósfera caliente del Sol que se caracteriza por ser transparente a la mayor parte de la radiación electromagnética, y por su perfil térmico que pasa de unos 6000 grados a varios millones de grados. La atmósfera se continúa en el espacio por su expansión en forma de lo que se llama el viento solar, que es un gas ionizado que se extiende a por lo menos 100 veces la distancia del Sol a la Tierra formando la heliosfera, una cavidad dentro del espacio interestelar, dominada magnéticamente por el Sol.

El Sol tiene ahora unos 4600 millones de años y las reacciones nucleares que tienen lugar en su núcleo han consumido alrededor de la mitad del hidrógeno que había inicialmente. Se calcula que seguirá en su estado actual aproximadamente otros tantos años, es decir que nos encontramos en el ecuador de la vida del Sol. La energía que produce el núcleo es muy regular y la luminosidad solar ha variado menos de un 10% en los últimos 1000 millones de años. Pero la dinámica de las capas externas del Sol hace que esa energía casi estable que emite el Sol de un modo global aparezca modulada en el tiempo y en la composición de la radiación que emite, al mismo tiempo que se observan cambios estructurales en el Sol. Esta modulación se conoce como actividad solar.

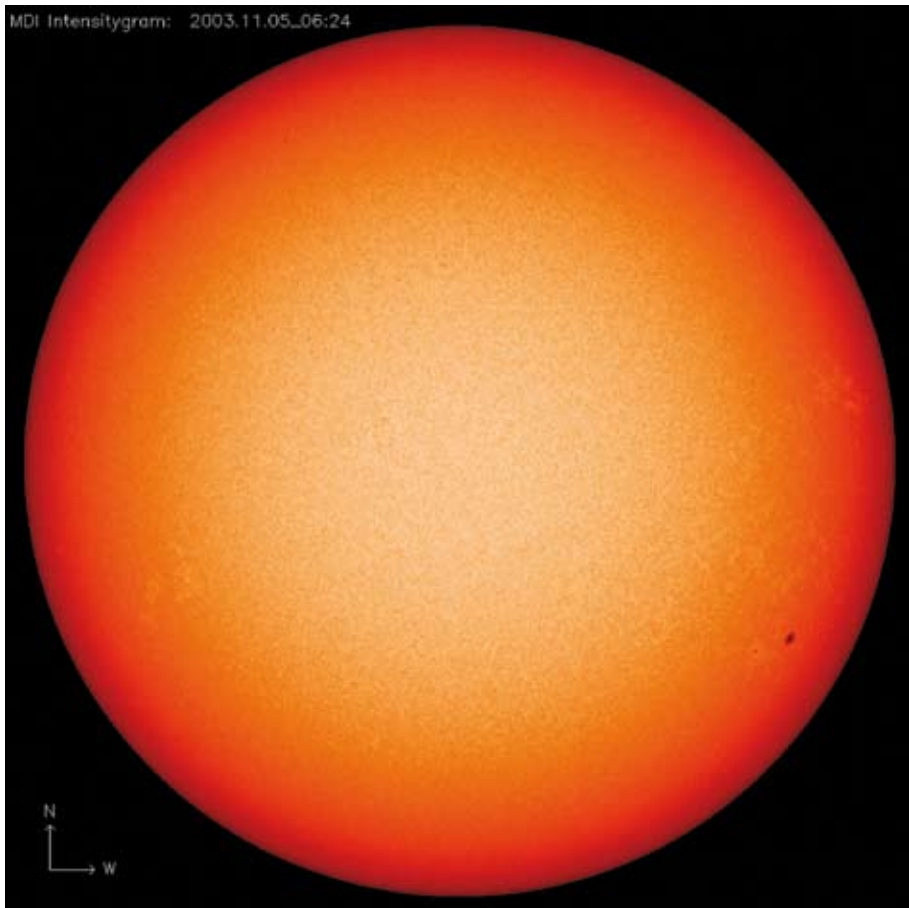


Figura 1: Imagen de la fotosfera solar, la superficie visible del Sol, en luz roja (longitud de onda 676,8 nm). La radiación que emite la fotosfera contiene la casi totalidad de la energía que mantiene la Tierra habitable (imagen de SOHO/MDI).

El Sol da una vuelta alrededor de su eje cada 27 días por lo que vemos sus detalles (por ejemplo las manchas) pasar por el disco solar de este a oeste en unos 13 días, y reaparecer al cabo de 27 días de la primera aparición. La fotosfera gira más lentamente en los polos que en el ecuador del Sol, hecho que se conoce desde hace mucho tiempo, pero la sismología solar ha permitido observar que la rotación diferencial de la fotosfera es solidaria con la rotación de la zona de convección que se encuentra debajo de ella, es decir que la zona de

convección gira a distinta velocidad en función de la latitud. Por otro lado, gracias a los estudios sismológicos del Sol, ahora sabemos que la zona de radiación se comporta como si fuera una esfera rígida girando alrededor del eje del Sol. Ello implica que hay una capa de fricción en la separación entre la zona de radiación y la zona de convección y se considera que alrededor de esta capa podría ser el lugar donde se forma y donde reside el grueso del campo magnético solar.

2.1 El campo magnético solar

La fotosfera y la atmósfera solar están atravesadas por complejos y cambiantes campos magnéticos que tienen sus raíces en la zona de convección, posiblemente generados por una combinación de la convección y la fricción entre ella y la zona de radiación. Los campos magnéticos observados en la fotosfera se extienden por la atmósfera solar y sus variaciones y la dinámica que generan dan lugar a la actividad que se observa en el Sol y que incide en el ambiente terrestre.

El estudio de la actividad del Sol se puede decir que casi coincide con el estudio del campo magnético solar.

La afloración de campos magnéticos en la superficie del Sol se detecta y mide estudiando el espectro de la luz solar, porque hay propiedades de la misma que se ven afectadas por la presencia del campo magnético. Aprovechando dichas propiedades se obtienen imágenes del Sol como las de la figura 2. Los campos magnético se conceptualizan generalmente representándolos como líneas de fuerza que van del polo negativo al positivo (polo sur al polo norte en el caso de la Tierra). En la superficie del Sol el grado de magnetización del plasma o gas ionizado se mide estudiando las propiedades de la luz que proviene del mismo. El instrumento que ha obtenido esta imagen produce información sobre la intensidad del campo magnético positiva o negativa según la línea de fuerza apunte hacia el instrumento o alejándose.

Las líneas de fuerza magnéticas que afloran en la fotosfera afectan a la conducción del calor. La energía es conducida con mayor dificultad por tubos de plasma con haces de líneas de fuerza magnéticas que por su entorno no magnético. Dependiendo del tamaño de los paquetes de líneas de fuerza, la geometría de la emergencia hace que tal emergencia produzca una mancha oscura (mancha solar) o una mancha brillante (fácula). Las manchas solares son el efecto de grandes paquetes de líneas de fuerza magnética que afloran en la fotosfera, su oscuridad relativa se debe a que la conducción de energía se ve disminuida por la presencia del campo magnético, haciendo que la temperatura de la región magnética sea menor que la de su entorno, produciendo el efecto de una oscuridad relativa en la región donde aflora el campo magnético que se ve como una mancha.

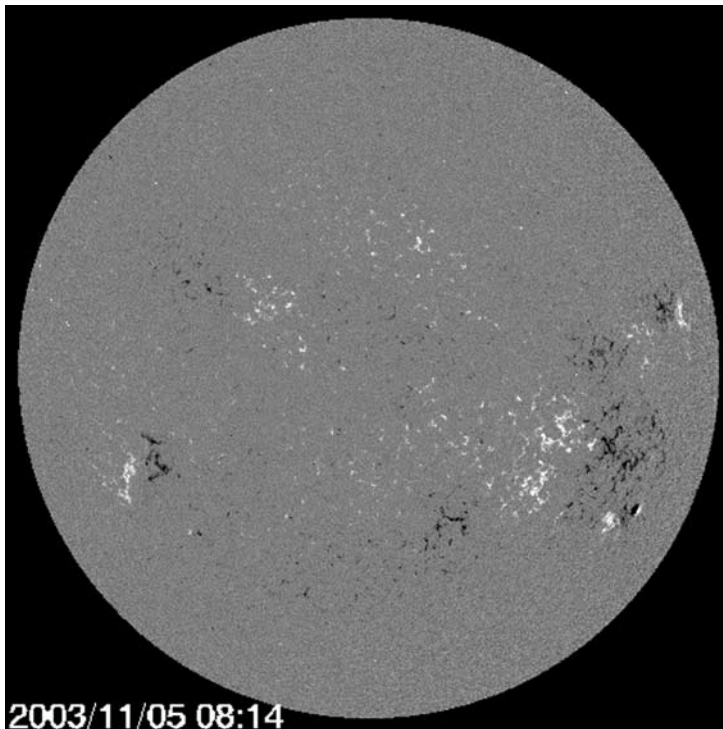


Figura 2: Mapa magnético del disco solar a la misma hora que fueron tomadas las imágenes de la figura 1, las manchas negras representan el campo magnético con el polo norte hacia nosotros y las manchas blancas alejándose de nosotros. Vemos en las grandes concentraciones la presencia de dos polos uno positivo (sur) y otro negativo (norte).(imagen de SOHO/MDI)

Desde hace trescientos años se han contado el número de manchas que se ven en el disco solar y se ha visto que tal número oscila con un período de 11 años, es decir que cada once años el Sol pasa de tener pocas manchas (mínimo de actividad solar), a veces ninguna, a tener entre 100 y 200 manchas (máximo de actividad) (figura 3) y luego vuelven a disminuir a un nuevo mínimo. La variación del número de manchas solares en los últimos 300 años es la observación paradigmática de variación de actividad en el Sol. Pero hay muchos otros fenómenos solares que ponen de manifiesto la variabilidad del Sol.

Hoy se piensa que el campo magnético solar reside en la zona de convección, posiblemente junto a la capa de separación entre la zona de radiación y la zona de convección, y que cada 11 años tiene lugar un flotamiento de las líneas de fuerza magnética que afloran en la superficie. Hasta ahora no existe una teoría probada que explique la periodicidad de 11 años en el afloramiento. El principal problema para la interpretación del magnetismo solar es que, hasta ahora no hemos podido observarlo en el interior del Sol. La heliosismología es la mayor fuente de información sobre el interior del Sol, y el rápido progreso de sus investigaciones es la mejor esperanza para la profundización en el conocimiento del origen del magnetismo en el interior del Sol.

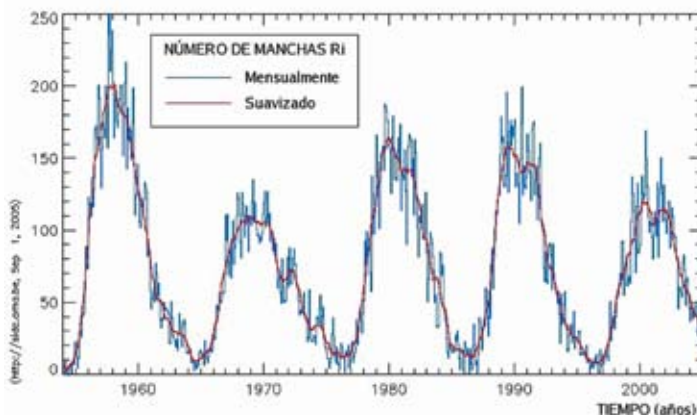


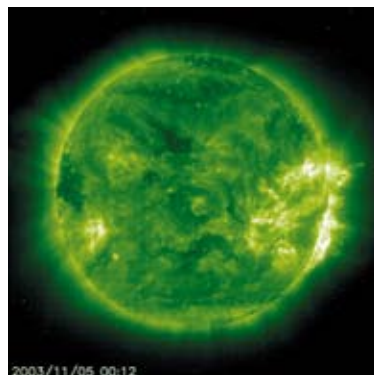
Figura 3: evolución en el tiempo del número de manchas solares observadas en el disco solar (promedios mensuales).

2.2 Actividad en la atmósfera solar

La atmósfera solar se extiende por encima de la fotosfera con una tenue densidad pero con una temperatura que crece a medida que subimos en altura desde unos 6000 grados hasta algunos millones de grados, y así como la fotosfera nos envía la luz que emite aproximadamente como si fuera un cuerpo negro a 5800 grados, principalmente en luz visible e infrarroja, los átomos de la alta atmósfera excitados por la alta temperatura emiten radiación característica en luz ultravioleta e incluso rayos X según su temperatura (figura 4). Las líneas magnéticas de fuerza que afloran en la fotosfera se extienden por la atmósfera cerrándose conectando puntos con polaridad positiva y negativa y, aplicando nuestro conocimiento de los plasmas magnetizados, es posible calcular aproximadamente la forma que tendrán las líneas magnéticas que atraviesan la atmósfera solar (Figura 5).

De vez en cuando aparece en la fotosfera una región donde el campo magnético es intenso. Las líneas de fuerza del mismo se extienden por la atmósfera solar y generalmente se cierran en forma de arcos o bucles que unen un elemento magnético de polaridad positiva con otro de polaridad negativa. A veces las líneas de fuerza no se cierran en el espacio visible de la corona y se pueden considerar abiertas al espacio. En toda la parte inferior de la atmósfera, la cromosfera, las líneas de fuerza de los pequeños campos magnéticos que surgen con la convección forman como una bóveda de muchos arcos en continuo movimiento.

Figura 4. Imagen de la atmósfera caliente del Sol, corona, obtenida al mismo tiempo que las de las figuras 1 y 2, en luz extremo ultravioleta, a 19,5 nm, emitida por el ion Fe^{+14} que es estable a 1,6 millones de grados. Comparando esta imagen con la figura 2 vemos la coincidencia de masas de materia caliente en la atmósfera solar con regiones magnéticas importantes.(imagen de SOHO/EIT)



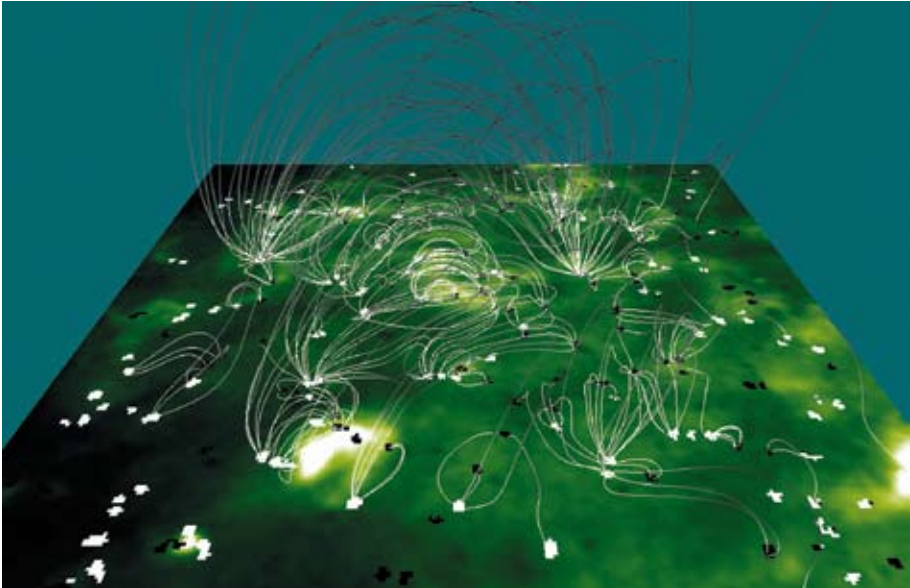


Figura 5: sobre un pedazo de un mapa magnético del Sol, con polos positivos y negativos se han representado las líneas de fuerza magnética que unen polos positivos con polos negativos en forma de bucles en la atmósfera solar.



Figura 6: Imagen de la atmósfera solar sobre una región activa en la que se ven los bucles magnéticos similares a los calculados para la figura 5, visualizados por la presencia de materia a 80000 °C que emite en luz ultravioleta.(imagen de TRACE)

Una región activa está formada de uno o varios afloramientos en la fotosfera de campo magnético de gran intensidad (manchas solares en luz visible) rodeada de campos más pequeños cuya densidad decrece hacia el exterior de la región. Esta concentración de campos magnéticos se va diluyendo a medida que pasa el tiempo. Una región activa puede durar varias rotaciones solares (meses). En la fotosfera la región es visible como manchas y fáculas o zonas brillantes. En la corona, la manifestación más característica es la presencia de arcos o bucles de material, anclados en líneas de fuerza magnéticas emergentes de la fotosfera y que están en continuo movimiento. Estos bucles son como tubos de materia sostenidos por líneas de fuerza magnéticas (Figura 6). En su movimiento de vez en cuando se llega a una situación en la que los campos magnéticos de dos de ellos relajan su energía magnética por reconexión entre ellos, la energía magnética se disipa en forma de aceleración de los iones y electrones presentes en el tubo que a su vez aumentan la temperatura de la base de los mismos, como se ve en la figura 6.

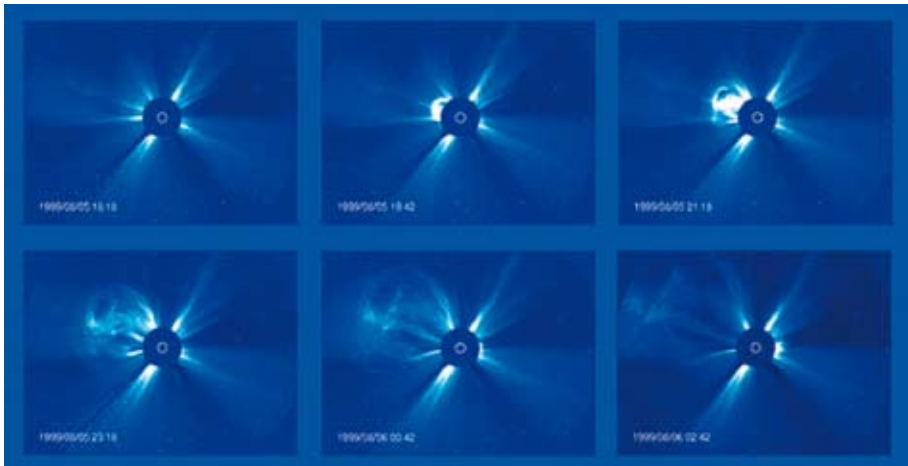


Figura 7: Eyección de masa coronal, fotografiada por un coronógrafo de SOHO, propagándose en el viento solar entre 6 y 30 radios solares (imagen de SOHO/LASCO)

Frecuentemente, la relajación de los campos magnéticos y la subsiguiente conversión de energía magnética en energía mecánica o térmica se traduce en la expulsión de una parte de la corona en lo que se llama una "eyección de masa coronal" (EMC) que se propaga

modificando el viento solar (figura 7). Cuando una EMC pasa por la Tierra desata una tormenta magnética en la misma. En ciertas configuraciones en las que la energía magnética y dinámica de varios bucles envueltos es grande, se produce una fulguración. En las fulguraciones el plasma de corona solar puede alcanzar temperaturas de varios millones de grados y emite rayos-X y rayos gamma, que cuando llegan a la Tierra interaccionan con los átomos de las capas altas de la atmósfera ionizándolos, perturbando las propiedades de la ionosfera, perturbando las comunicaciones de radio cuyas ondas son reflejadas en la ionosfera.

2.3 El viento solar y la heliosfera

La corona, la parte caliente de la atmósfera solar (entre decenas de miles y varios millones de grados) está en continua expansión, y sus gases se alejan del Sol a velocidades supersónicas, arrastrando con ellas el campo magnético que había en el punto de escape. La consecuencia es un plasma magnetizado que se conoce como viento solar. El viento solar se propaga generalmente a una velocidad de cientos de kilómetros por segundo y es muy variable, dependiendo de lo que ocurre en la corona que está en su origen.

La heliosfera es la cavidad que abre el viento solar en el espacio interestelar. El viento solar que pasa por la Tierra a una velocidad entre 300 y 1000 km/s, empuja el medio o viento interestelar creando alrededor del Sol una región dominada por el plasma solar con su campo magnético (figura 8). En esta región no entra el viento interestelar ionizado y entran con dificultad los rayos cósmicos (rayos cósmicos son los átomos ionizados, principalmente de hidrógeno, de alta energía que pueblan nuestra galaxia), la dificultad se refiere a que dependiendo de la velocidad o energía de los mismos son repelidos o no por el campo magnético del viento solar. Los de baja energía son repelidos, los de alta energía penetran más o menos según su velocidad, y todos ellos pierden parte de su energía cuando penetran. Los

rayos cósmicos que tienen suficiente energía para penetrar hasta la Tierra, son contados con detectores de partículas que han permitido observar que su intensidad es modulada por el ciclo solar de actividad. Cuando el Sol es más activo nos llegan menos rayos cósmicos. Los rayos cósmicos interactúan nuclearmente con los átomos de la atmósfera terrestre y crean algunos isótopos radioactivos.

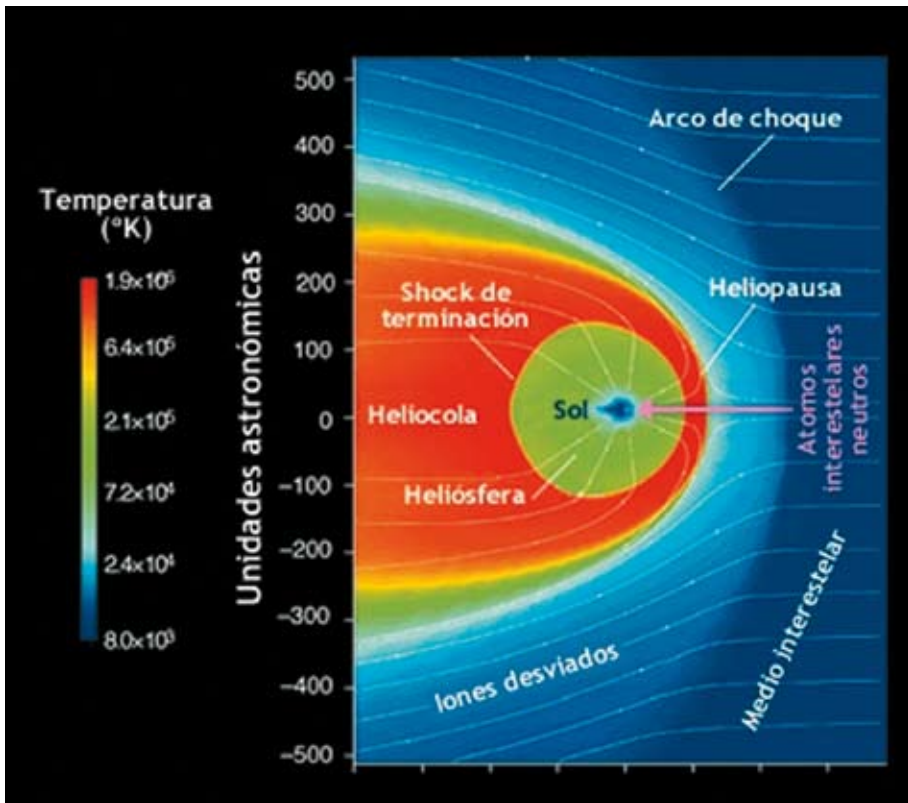


Figura 8: La heliosfera: el Sol, en el centro con los planetas, emite el viento solar, con un campo magnético embebido que empuja el medio interestelar creando una cavidad llena del plasma solar. Los rayos cósmicos galácticos que se propagan por el medio interestelar son repelidos y solo aquellos que tienen suficiente velocidad o energía alcanzan la Tierra.

En un momento dado, la cantidad de isótopo radioactivo creado es proporcional al flujo de rayos cósmicos. En consecuencia, si conocemos los isótopos creados en un determinado momento, podemos deducir el flujo de rayos cósmicos en ese momento, y hemos visto

que estos dependen de la actividad solar a través del viento solar y la heliosfera. Ocurre que los isótopos radioactivos que se forman en la atmósfera terrestre se difunden en su masa y se incorporan a los objetos que están en equilibrio con la misma. Si los objetos en cuestión quedan fijados en el tiempo y podemos obtener la cronología de los mismos podemos deducir una cronología de la actividad solar. Dos isótopos que se utilizan para determinar la actividad solar son el carbono-14 y el berilio-10, que tienen una vida media de 5730 y 1.600.000 años respectivamente. Como se puede entender por sus vidas medias cada uno se utiliza para distintos órdenes de edad. El primero se integra en los vegetales en la proporción carbono-14/ carbono-12 en la que se encuentran en la atmósfera en el momento en que tiene lugar la fotosíntesis y queda fijado cuando cesa el proceso de crecimiento de la planta. A partir de restos de vegetal, generalmente maderas, se puede estimar el flujo de rayos cósmicos y de ellos la actividad solar. El berilio-10 se estudia generalmente en muestras de hielo de glaciares donde se conoce el ritmo de estratificación, se supone que el berilio que estaba en el mar líquido quedó fijado en el momento en que el agua se solidificó.

2.4 Actividad solar y radiación electromagnética

La fotosfera, capa donde el gas que constituye el Sol pasa de opaco a transparente, es la superficie que vemos y es donde se emite la mayor parte de energía radiada por el Sol. Hemos visto que la presencia de campos magnéticos en la fotosfera cambia dramáticamente entre el tiempo cuando el Sol está tranquilo (mínimo de actividad solar) y cuando el Sol está alrededor de su máximo de actividad. Estos campos magnéticos van acompañados de efectos luminosos: manchas, cuando el campo magnético es intenso y extenso, zonas brillantes (fáculas) y puntos brillantes (figura 9). Estos efectos son los principales artífices del fenómeno de cambio de la irradiancia total del Sol (o constante solar), que como se ha podido observar en los últimos 26 años, varía al unísono con la actividad solar (figura 10).

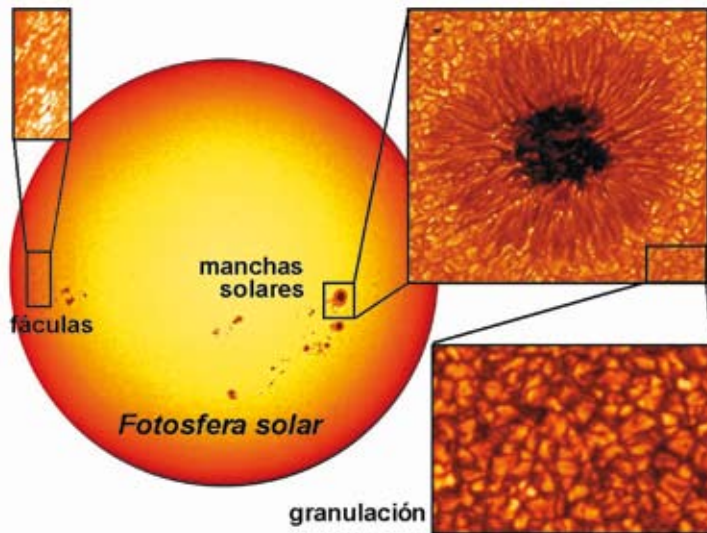


Figura 9: En las regiones activas de la fotosfera solar aparecen manchas solares oscuras cuyo número varía con un periodo de 11 años (figura 3) que van acompañadas de fáculas, que son manchas brillantes visibles cerca del limbo del Sol. Ambos fenómenos contribuyen al cambio de la intensidad radiación total solar y se ha estimado que la mayor parte de la variación representada en la figura 10 se debe al número cambiante de fáculas y manchas solares.

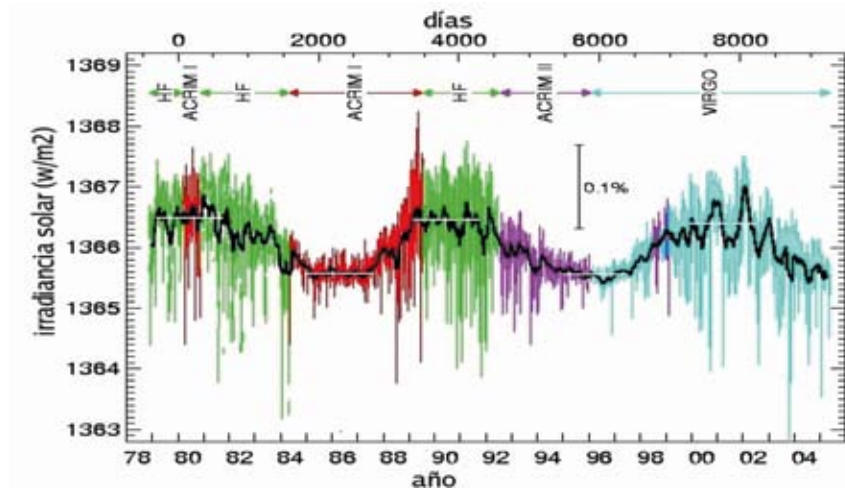


Figura 10: Variación de la irradiancia solar (conocida como constante solar) entre 1978, fecha en la que empezó a ser medida, y 2005. Los datos representados son una composición de datos obtenidos por instrumentos a bordo de varios satélites y observatorios que se ha sucedido en el tiempo. HF en el Nimbus 7, ACRIM I en el Solar Maximum Mission (SMM), y ACRIM II en el Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) de la NASA, y VIRGO en SOHO, de la ESA y la NASA. La barra en la parte alta de la figura indica el origen de los datos. (Fröhlich 2005).

Como hemos visto en la sección 2.2, los campos magnéticos se extienden por la alta atmósfera solar o corona a grandes altitudes, llevando su actividad a la misma y contribuyendo a su calentamiento. Esta atmósfera, cuya temperatura aumenta desde miles de grados en su base hasta cientos de miles y millones de grados en su parte alta, emite radiación, no en luz visible e infrarroja, como la fotosfera, sino en rayos ultravioleta y en rayos-X, y como su excitación depende de la actividad magnética, ello hace que la emisión en estas ondas cortas sea mucho mayor durante el máximo de actividad que durante el mínimo. Como esta radiación es absorbida por la atmósfera terrestre, es necesario estudiarla desde satélites artificiales con telescopios que son capaces de hacer imágenes en rayos ultravioleta y rayos-X y gamma. Estas radiaciones ionizan los átomos de la parte alta de la atmósfera terrestre, donde se encuentra la ionosfera, modificando la conductividad de la misma, con lo que se perturban las transmisiones radiofónicas de onda corta, ya que éstas se reflejan en ella.

3 La Tierra como receptora

3.1 El viento solar y la magnetosfera terrestre

El dipolo magnético terrestre o imán que constituye la Tierra está rodeado de líneas de fuerza que se extenderían hasta el infinito si se encontrase en el vacío. Pero en realidad está dentro de la heliosfera y se encuentra inmerso en el viento solar, un plasma magnetizado, al que impide entrar. El resultado es una cavidad comprimida en dirección al Sol y extendida en una larga cola en dirección opuesta. Las propiedades del viento solar son altamente variables en respuesta a las variaciones de la atmósfera solar: su densidad, temperatura, velocidad, intensidad y dirección del campo magnético solar arrastrado por el viento. Cualquier cambio en las propiedades del viento produce cambios en la magnetosfera que inducen corrientes eléctricas en el interior de la misma (figura 11).

Por ejemplo, cuando tiene lugar uno de los re-arreglos que ocurren en el campo magnético de la corona solar se producen las eyecciones de masa coronal (EMC's), que generan nubes de plasma que pueden alcanzar velocidades de propagación mucho mayores que las del viento solar por el que se propagan, induciendo grandes ondas de choque en el viento solar (figura 12).

Cuando las ondas de choque llegan a la magnetosfera, ésta es profundamente perturbada generando corrientes eléctricas en su espacio, pudiendo dañar los sistemas eléctricos de los satélites artificiales que operan en su interior: Particularmente están expuestos los satélites que operan en órbita geoestacionaria (meteorológicos, telecomunicaciones), que se encuentra en un ambiente altamente sensible a las perturbaciones de la magnetosfera. Ha habido varios casos en los que satélites operacionales (de telecomunicaciones y otros) han sido destruidos. Las perturbaciones son transmitidas a la superficie de la Tierra a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre y cuando la perturbación es muy grande puede crear grandes corrientes en sistemas eléctricos terrestres, e incluso en conducciones, dando lugar a roturas en los centros de distribución. Dada la forma del dipolo magnético terrestre, estas perturbaciones en la superficie de la Tierra son importantes a altas latitudes (Canadá, Escandinavia), porque allí es donde conectan las últimas líneas de fuerza cerradas, y las primeras abiertas. Además, las grandes EMC's producen aceleración de partículas cuando se propagan alejándose del Sol, y llegan a la Tierra acompañadas de las mismas, pudiendo penetrar hasta la atmósfera y la superficie de la Tierra en las regiones polares.

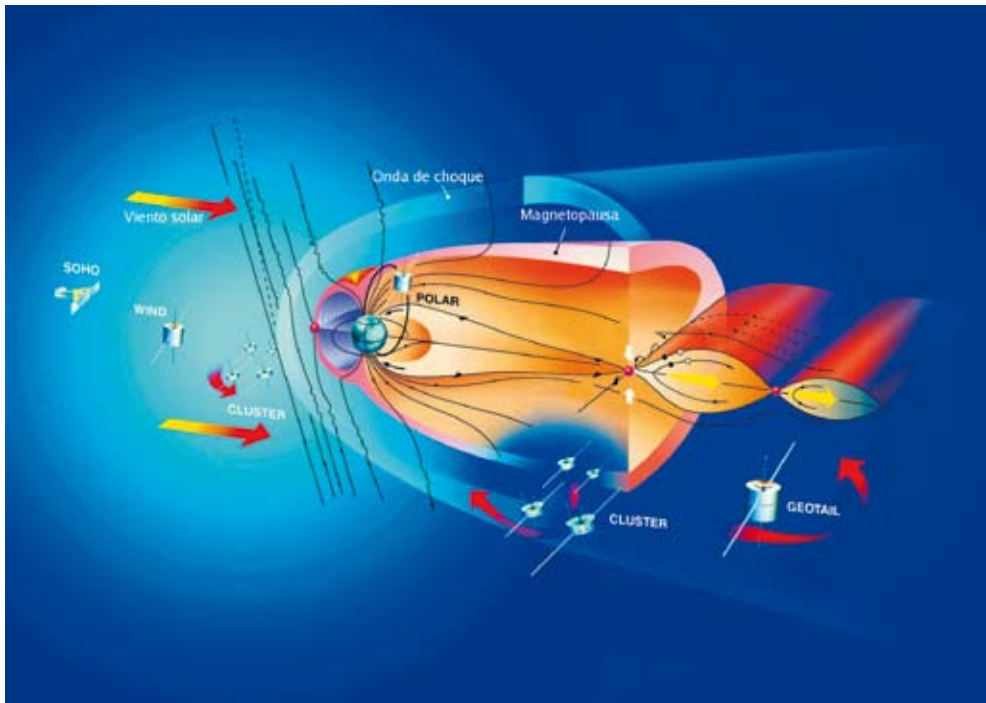


Figura 11: Diagrama mostrando la estructura de la magnetosfera terrestre: la cavidad magneto-hidrodinámica que se forma alrededor de la Tierra como consecuencia de la interacción del viento solar con el dipolo magnético terrestre. Las líneas negras muestran la estructura de las líneas de fuerza del campo magnético. Se pueden ver: el dipolo magnético terrestre, algunos rizados del mismo en la cola de la magnetosfera, así como una indicación del campo magnético solar que llega con el viento solar y que en algunos casos conecta con el campo magnético terrestre. En el diagrama aparecen también algunos de los satélites artificiales que contribuyen al estudio de la magnetosfera "in situ" (GEOTAIL, japonés, el grupo de cuatro, CLUSTER, de la Agencia Espacial Europea (ESA), y POLAR, de la NASA), WIND, de la NASA, que analiza el viento solar, y el observatorio SOHO, de la ESA y la NASA en colaboración que estudia el Sol y el viento solar.

La grandes fulguraciones, que generalmente van acompañadas de ECM's, además producen la aceleración de partículas a muy alta energía. Estas partículas cuando llegan a la Tierra penetran directamente a las regiones polares y a menores latitudes según su energía. Los satélites artificiales que se encuentran en el espacio interplanetario, o en altas órbitas como la órbita geoestacionaria, están sujetos al riesgo de que sus sistemas electrónicos sean dañados

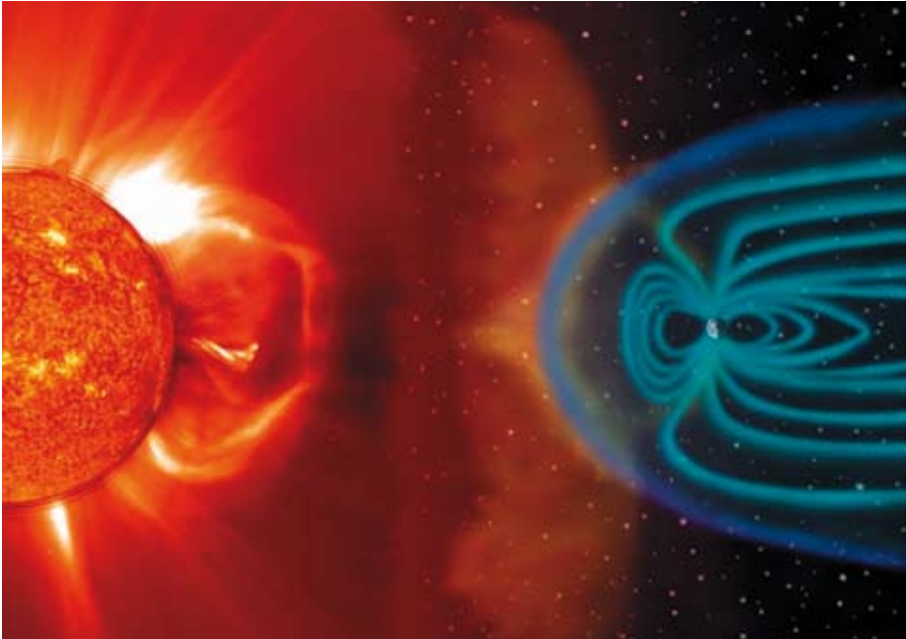


Figura 12: Montaje combinando (no a escala) la fotografía de una imagen del sol en luz extremo-ultravioleta tomada por el telescopio EIT y una eyección de masa coronal (ECM) tomada por el coronógrafo LASCO, ambos en SOHO con un diagrama de la magnetosfera terrestre para ilustrar la relación Sol-Tierra

por las partículas de alta energía, y por supuesto cualquier astronauta que se encontrase en un nave en el espacio exterior (viaje a la Luna o a Marte) podría verse severamente dañado.

Una manifestación espectacular de las perturbaciones que induce la actividad del viento solar en la magnetosfera es la aurora boreal. En los países a altas latitudes, como Canadá o Escandinavia, es frecuente ver en la noche grandes despliegues móviles de luz (figura 13). En casos de perturbaciones extremas la aurora puede verse en latitudes más bajas, incluso excepcionalmente en España. La aurora consiste en la luz emitida por átomos de la atmósfera excitados por la precipitación de electrones que se propagan a lo largo de las líneas de fuerza del dipolo magnético terrestre cuando la magnetosfera es distorsionada.



Figura 13: Aurora boreal sobre Fairbanks, Alaska.

Como hemos visto más arriba, otra consecuencia indirecta de la actividad solar es la modulación de la llegada a la Tierra de los rayos cósmicos galácticos. La galaxia en general y en particular el espacio interestelar en que está nuestro Sol está poblada de partículas cargadas, átomos ionizados, de gran energía, es decir, que viajan a grandes velocidades. Se ha observado que estas partículas que se conocen como rayos cósmicos, llegan a la Tierra en mayor cantidad cuando la actividad del Sol es menor, es decir el número de partículas que llega varía con un período de 11 años como la actividad del Sol. Se especula, hasta ahora con moderado éxito experimental, que los iones que generan los rayos cósmicos al atravesar la atmósfera podrían influir en la formación de nubes y con ello modificar las condiciones climáticas. La modulación de los rayos cósmicos es consecuencia de que los rayos, para llegar a la Tierra, han tenido que penetrar la heliosfera y propagarse desde su borde con el espacio interestelar hasta la Tierra (figura 8). Es en ese camino donde el viento solar los ha frenado en mayor o menor medida según su nivel de actividad, que está asociado con el campo magnético que lleva embebido.

3.2 Las variaciones solares y el cambio climático

La energía que llega a la Tierra por unidad de superficie, o irradiancia solar total, tradicionalmente conocida como constante solar, es la fuente básica de calentamiento de la Tierra, y por ello se puede considerar que es determinante para el clima de la Tierra. El clima de la Tierra es consecuencia del balance entre la irradiancia solar y la reflectividad y emisividad de su superficie y de su atmósfera con su efecto invernadero.

La temperatura media de la superficie terrestre ha aumentado sensiblemente, del orden de 0,7 °C durante los últimos cien años, y una buena parte del aumento ha sido durante los últimos 40 años. Desde hace varias décadas los climatólogos advierten de la emisión de gases que, acumulados en la atmósfera, producen un efecto invernadero adicional al natural de la atmósfera. Pero la climatología es una ciencia muy compleja, en continuo desarrollo, que depende del conocimiento de muchos parámetros que describan las propiedades estáticas y dinámicas de la atmósfera terrestre tales como su composición química a todos los niveles y la cobertura de nubes sobre toda la geografía de la Tierra, de las propiedades de las corrientes oceánicas, de las propiedades radiativas de la superficie de los continentes. Sólo en los últimos años empieza a haber bases de datos obtenidos por satélites y por medidas en Tierra que, utilizados por los climatólogos con modelos climáticos cada vez más sofisticados, permiten obtener resultados relativamente fiables sobre la evolución del clima. Como se puede ver en la figura 14, aunque la fuente de toda la energía es el Sol, el equilibrio térmico está condicionado por muchas otras variables.

Cuando en las investigaciones climatológicas se calcula la variación de temperatura debida a los gases antropogénicos con efecto invernadero, como el CO₂, para verificar si el resultado de sus cálculos es correcto y va a tener validez para predecir su efecto climático, es necesario saber cuál es el efecto sobre la temperatura de los agentes naturales tales como por ejemplo, la variaciones de origen solar o el

efecto de nubes volcánicas. Por ello, conocer como el Sol influye en el clima terrestre tiene interés desde dos puntos de vista, por un lado porque sería importante un día poder predecir si el comportamiento del Sol va a cambiar el clima, y por otro lado para poder tener una línea de base natural que permita decir si el cambio de clima que se observa es debido a la ingerencia humana y en que cuantía.



Figura 14: Esquema muy simple de los factores que intervienen en el balance de energía que condiciona la evolución del clima.

La medida de la constante solar o irradiancia solar total sólo se puede hacer desde el espacio, porque la absorción de la radiación por la atmósfera hace imposible determinar la radiación que llega del Sol con un error menor que 2 o 3 % si se mide desde el suelo. Por ello sólo hemos podido medir la irradiancia solar total desde que se han volado radiómetros solares en satélite, desde 1978, y vemos que varía como un 0,1-0,15 % entre el mínimo y el máximo de actividad (figura 9). La inercia del sistema térmico terrestre, constituido por la atmósfera, los océanos y la corteza de la Tierra es grande comparada con los 11 años del ciclo solar, por lo que no es de esperar que sea

observable el efecto de esta variación en el clima terrestre. Por ello es interesante el resultado publicado recientemente, de un análisis avanzado de las mencionadas medidas, que ha permitido a unos investigadores (Wilson et al. 2002) calcular que en el periodo que abarcan las medidas se observa un aumento de 0,05 % por década de la radiación total solar. Tal variación sostenida durante varias décadas sí que tendría un efecto significativo en el clima terrestre. Sin embargo, posteriormente una revisión del mencionado análisis (Fröhlich, 2005) muestra que hay un fallo en el mismo y que de hecho la irradiancia solar se ha mantenido constante dentro de un margen de error de 0,02% durante el periodo en cuestión.

Que el clima está relacionado con la actividad solar se prueba por datos históricos y por medidas indirectas. La temperatura de la Tierra se ha medido instrumentalmente desde hace varios cientos de años y se obtiene información sobre la temperatura de épocas anteriores mediante la medida de concentraciones relativas de determinados isótopos en muestras de hielo de los glaciares como el del Groenlandia hasta miles de años en el pasado. La variación de actividad del Sol se encuentra registrada en el número de manchas solares, contadas formalmente desde hace 250 años y con datos menos formales desde hace más de 1000 años. El número de auroras observadas en los países nórdicos es un complemento al recuento de manchas solares que también se extiende algunos cientos de años (la aurora es una manifestación atmosférica de actividad en la magnetosfera que siempre es disparada por actividad en el viento solar). Los rayos cósmicos, que hemos visto son rechazados en mayor número por la heliosfera cuando el Sol está activo, al penetrar la atmósfera producen isótopos radioactivos, tales como el C^{14} , y su cantidad en muestras de una época conocida nos permite conocer el nivel de actividad del Sol en esa época. La figura 15 muestra lo que conocemos de la actividad del Sol en los últimos 1000 años. Los datos acumulados indican que el clima terrestre está positivamente relacionado con la actividad solar.

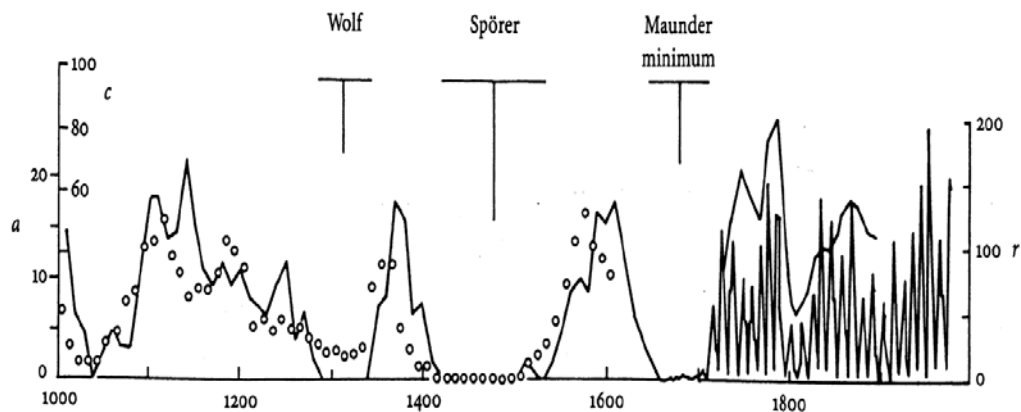


Figura 15: Actividad solar durante los últimos 1000 años deducida de varios parámetros medibles. Desde 1650 a 1950 el número de manchas solares está bien registrado (escala de la derecha, r , en número medio de manchas solares por año; entre 1650 y 1715 casi no hubo manchas solares y el ciclo de 11 años no es detectable. La línea continua desde 1000 a 1900 es una aproximación al número de manchas solares o indicativo de actividad basado en la medida de carbono 14 en anillos de árboles (c , escala a la izquierda). Los círculos son un índice del número de auroras observadas en el hemisferio norte (a , escala a la izquierda). Los períodos históricos de conocida frialdad en el ambiente están marcados por barras horizontales. En el mínimo de Maunder los datos obtenidos de los anillos de los árboles coinciden en señalar la baja actividad solar. En los períodos Wolf y Spörer hay concordancia en otros dos mínimos de actividad solar.

Quizás el período más interesante desde un punto de vista práctico es el que se refiere a nuestra época, por la implicación que tiene al tiempo de decidir si hay que tomar alguna medida respecto a la emisión de gases con efecto invernadero, particularmente el CO_2 . La figura 16 muestra como ha variado la temperatura media mundial entre 1860 y 2001. La figura 17 muestra que en el período entre el fin del siglo XIX y alrededor de 1950, la actividad solar ha crecido significativamente, y hemos visto que la actividad y la irradiancia solares están positivamente relacionadas. Por otro lado conocemos la existencia de un tremendo aumento de la proporción de gases constituyentes de la atmósfera con positivo efecto invernadero durante la misma época, que incluye la época industrial (figura 18).

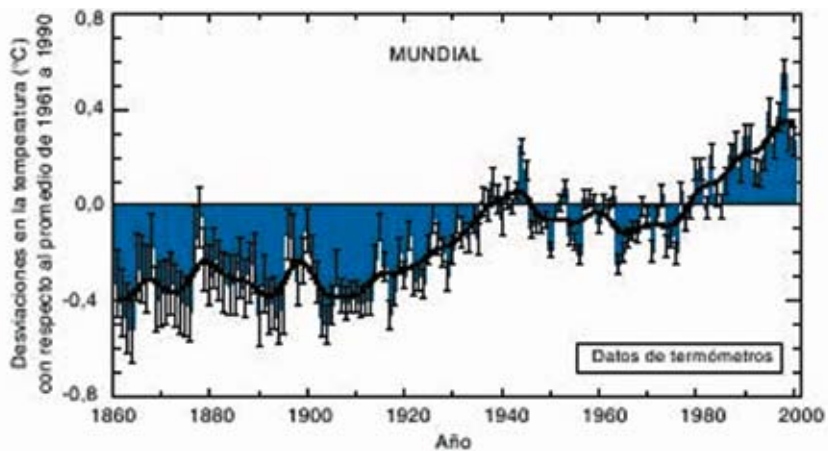


Figura 16: variación de la temperatura media mundial desde mediados del siglo XIX. La temperatura de 1960 se ha tomado como referencia (fuente: Informe del Intergubernamental Panel on Climate Change (IPCC) "Cambio climático 2001").

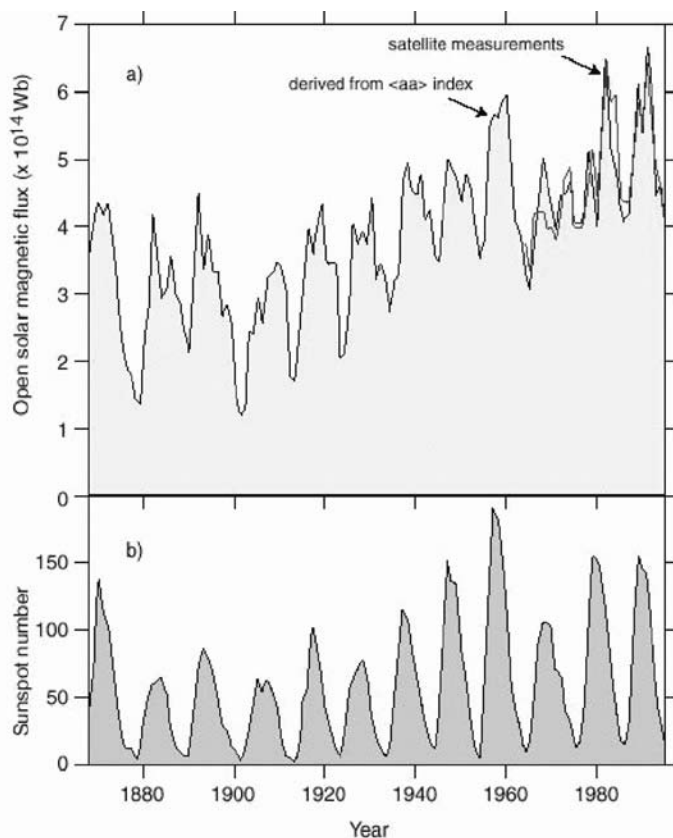


Figura 17: flujo magnético solar y manchas solares durante los últimos 150 años

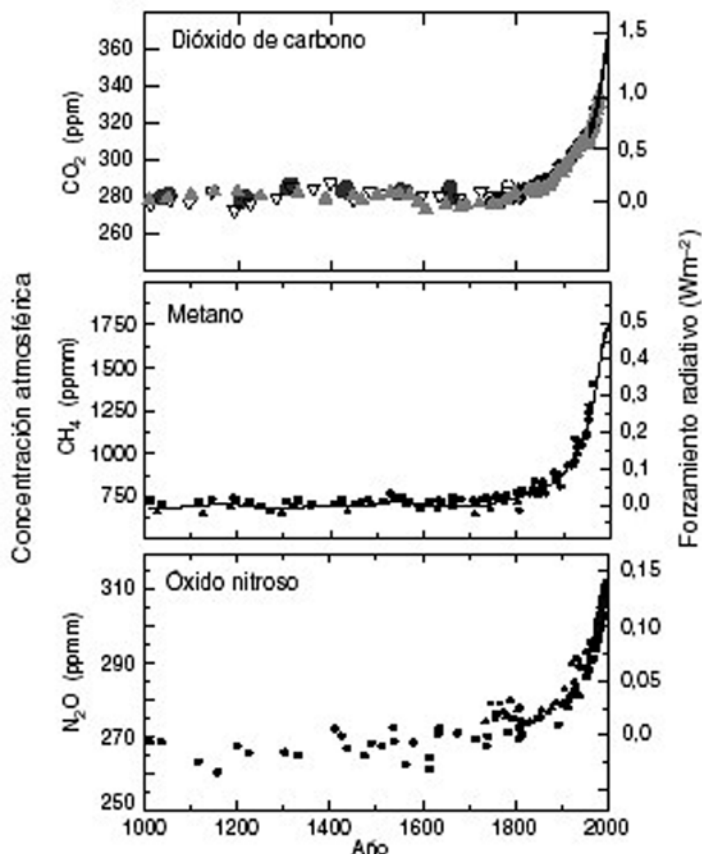


Figura 18: concentración atmosférica de gases que contribuyen al efecto invernadero, durante los últimos mil años.

La evolución del clima terrestre se estudia generalmente con modelos que consisten en una representación numérica del sistema climático sobre la base de las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de retroacción y que tienen en cuenta todas o algunas de sus propiedades conocidas. Los modelos acoplados de circulación general atmósfera/océano/hielo marino (MCGAO) permiten hacer una representación integral del sistema climático. Los modelos climáticos que cada vez son más precisos en la descripción del clima pasado y presente han tenido un desarrollo espectacular durante los últimos 30 años. Ello, en parte, es debido al desarrollo de ordenadores cada vez más potentes que han

permitido la creación de programas capaces de simular sistemas tan complejos como la atmósfera terrestre, los océanos o la superficie de la Tierra, y además, capaces de asimilar el creciente detalle de las medidas obtenidas por observaciones de todo tipo, locales y por satélite, así como la calidad de las medidas paleoclimáticas. Al mismo tiempo, los modelos han ido incorporando el creciente conocimiento de la química y dinámica de la atmósfera terrestre, de las corrientes marinas, etc.

Para entender mejor los efectos de procesos determinados se estudia el forzamiento del clima que producen al modificarlos en modelos climáticos generales o especializados. Se consideran dos tipos de forzamiento, uno, radiativo o energético, que modifica la cantidad de energía en el sistema climático, otro, no radiativo, que cambia la distribución de energía dentro del sistema pero no su energía total. Al primer tipo corresponden: el forzamiento radiativo de los gases que producen efecto invernadero, el de las nubes, el de los aerosoles o el de la radiación solar. Al segundo tipo pertenecen el forzamiento de la circulación oceánica y el de la circulación atmosférica.

Se realizan aplicaciones de los modelos climáticos para tiempos pasados, históricos e incluso geológicos y por supuesto, aplicaciones al presente y extrapolaciones al futuro, pero su validez se comprueba mejor en los últimos 50 años cuando las medidas por satélite y en la superficie de la Tierra son relativamente completas. En realidad, desde mediados del siglo XIX ya hay considerable información tomada en la superficie. Como ejemplo, es interesante el estudio del forzamiento radiativo o energético del clima en los últimos 50 años del siglo XX simulado en el modelo climático global del "Goddard Institute for Space Studies" de Nueva York (figura 19). Como factores de forzamiento se consideran:

a) una mezcla de gases con efecto invernadero, basada en datos obtenidos por diversos métodos; se incluyen el anhídrido carbónico (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nítrico (N_2O) y los clorofluocarbonos (CFCs),

b) los aerosoles estratosféricos, con datos obtenidos con satélites cuando existen y con datos diversos, generalmente obtenidos con aviones para los casos de volcanes ocurridos sin apropiada cobertura de satélites.

c) la irradiancia total solar, con datos de satélites desde 1978, y calculada a partir de índices de actividad solar bien establecidos desde el siglo XIX.

d) el ozono (O_3) estratosférico y troposférico, con datos obtenidos por satélites desde 1980 y mediante un modelo apropiado para el ozono troposférico y variaciones cíclicas anuales para el ozono estratosférico hasta 1979.

e) vapor de agua (H_2O) estratosférico, parte del cual puede considerarse como un forzamiento indirecto ya que se produce como oxidación del metano, y de difícil evaluación.

f) aerosoles troposféricos, que incluyen tales polvos como carbón y sulfato industriales, principalmente debidos al uso de carbones e hidrocarburos fósiles.

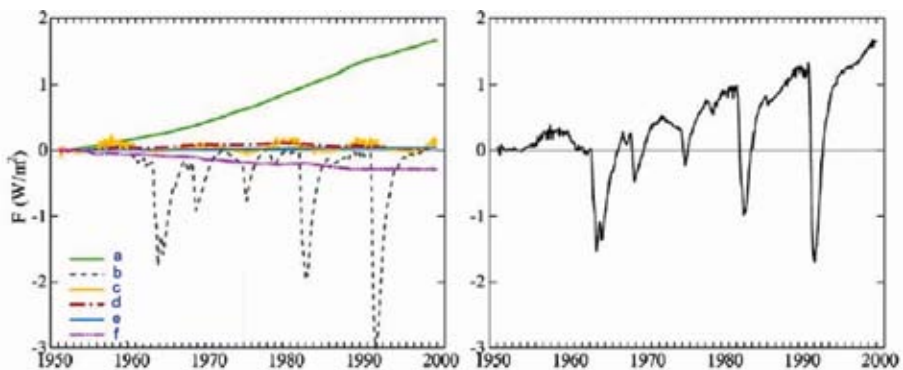


Figura 19: forzamiento climático debido a seis mecanismos radiativos entre 1950 y 2000, según el modelo global del clima del Goddard Institute for Space Studies: (1) efectos individuales en función del tiempo; a = gases con efecto invernadero, b = aerosoles estratosféricos, c = irradiancia solar, e = ozono, f = H_2O estratosférico, g = aerosoles troposféricos, (2) suma de los mismos efectos en función del tiempo. (de Hansen et al. 2002)

Vemos que entre 1950 y 2000 el modelo produce un forzamiento radiativo neto positivo de unos dos W/m^2 , y el mismo modelo muestra que el efecto térmico en la superficie es de unos $0,4^\circ\text{C}$. De la figura 19 se deduce que entre 1950 y 2000 el aumento térmico es principalmente debido a los gases con efecto invernadero. En la sección 2.4, figura 10, hemos visto que entre 1978 y 2006, la irradiancia total solar se ha mantenido constante en promedio y más arriba en esta sección hemos visto que la irradiancia solar ha debido crecer entre 1860 y 1950. Por ello es ilustrativa la comparación publicada por el "Intergubernamental Panel on Climate Change" (figura 20)

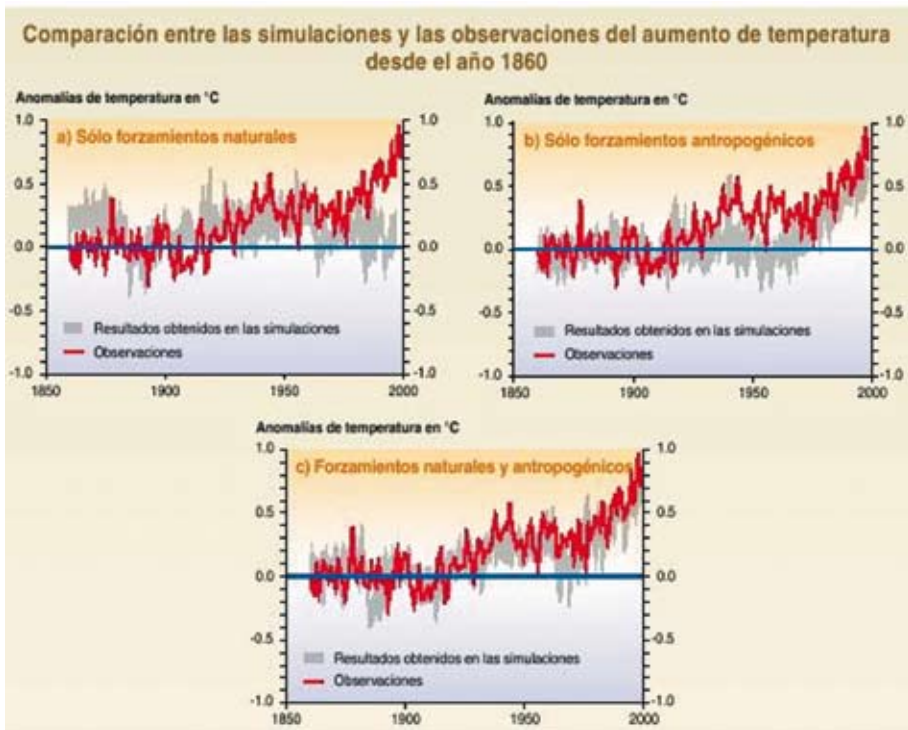


Figura 20: Teniendo en cuenta la información disponible sobre la actividad solar y la actividad volcánica en la Tierra y usando modelos recientes del clima la figura muestra: a) temperatura medida y simulación de los efectos calculados como consecuencia de los agentes naturales: variaciones del Sol y actividad volcánica. b) temperatura medida y simulación de los efectos calculados como consecuencia de la presencia de gases y aerosoles antropogénicos. c) temperatura medida y ambos efectos a) y b) combinados (fuente: Informe del Intergubernamental Panel on Climate Change (IPCC) "Cambio climático 2001").

que muestra el resultado de aplicar lo que conocemos de los efectos de las variaciones naturales (actividad solar, aerosoles volcánicos) y de los efectos de los contaminantes industriales, por separado y en conjunto, mediante uno de los últimos modelos climáticos. Vemos que la temperatura de la Tierra de los últimos años se puede explicar si tenemos en cuenta la probable contribución del Sol y la de los gases antropogénicos, pero no con sólo uno de ellos.

Se puede concluir que una parte importante del cambio climático observado en el siglo XX es debido a cambios en el Sol, pero seguramente no todo, y es casi seguro que en los últimos 50 años hemos visto un aumento de la temperatura que tiene una fuerte componente de origen antropogénico. En las últimas décadas ha habido un fuerte impulso en el conocimiento del comportamiento de Sol, gracias al progreso en la instrumentación de los observatorios terrestres y sobre todo al desarrollo de observatorios espaciales que han ampliado la banda de observaciones al salir de la atmósfera terrestre, pero todavía no tenemos las claves que nos permitan predecir cómo se va a comportar el Sol en un futuro medio. En los últimos lustros la climatología ha realizado un salto cualitativo y cuantitativo en el conocimiento del clima terrestre, gracias sobre todo a la obtención de datos con satélites que, dando vueltas en el espacio alrededor de la Tierra, han empezado a proporcionar una visión global de las propiedades radiativas de la atmósfera y de las corrientes oceánicas, así como de la superficie sólida; todo ello acompañado por el desarrollo de modelos teóricos que se han beneficiado del desarrollo de los superordenadores utilizados en meteorología. En resumen, podemos decir que gracias a los estudios en marcha del Sol, de la atmósfera terrestre y de las propiedades de los océanos y la superficie sólida de la Tierra, nos acercamos a entender el comportamiento del clima terrestre, tanto en función de los agentes naturales como de aquellos introducidos por el hombre.

De todos modos conviene ser precavidos cuando se pretende predecir cual va a ser el clima dentro de 50 años. Las medidas de

calidad suficiente solo se realizan desde hace pocos años, tanto en el espacio como desde la superficie de la Tierra. Los modelos climáticos están en continuo desarrollo, y si bien pueden describir el clima actual, con parámetros ajustados convenientemente, hay muchas lagunas en la información sobre el clima en tiempos pretéritos y muchas lagunas en el conocimiento de la ciencia de la atmósfera terrestre. Es interesante el trabajo de Willie Soon y otros que en un análisis comparativo (W. Soon et al. 2001) ponen de manifiesto la dificultad de incorporar con suficiente precisión en los modelos globales del clima muchos efectos de retroalimentación, tales como los de las nubes o las corrientes oceánicas, y concluyen que si bien es cierto que hay un efecto importante de los gases antropogénicos en el clima, el estado actual de los modelos climáticos no permite dar por seguras las predicciones catastrofistas que se enuncian frecuentemente.

4 Resumen

Hemos visto que la actividad solar incide en el ambiente terrestre de varios modos:

- Modificando el clima, evidente pero difícil de cuantificar los mecanismos. En el periodo desde el último tercio del siglo XIX hasta fines del siglo XX la temperatura media mundial ha crecido $0,7^{\circ}\text{C}$ y en este periodo una parte importante del crecimiento térmico es seguramente debido al aumento de la irradiancia solar, pero a partir de 1950 la mayor parte del aumento térmico se debe a los gases antropogénicos contribuyentes al efecto invernadero. Incluso se puede decir que desde 1978 hasta 2006 el crecimiento térmico es fundamentalmente antropogénico.
- Modificando la parte alta de la atmósfera terrestre, es decir, la termosfera y la ionosfera. El período de 11 años se manifiesta en las perturbaciones de las transmisiones de radio de onda corta que se reflejan en la ionosfera. El aumento de la temperatura de la parte alta de la atmósfera hace que la densidad aumente y se produzca un aumento del frenado de los satélites de órbita baja y se reduzca su vida en órbita.

- Induciendo cambios en el sistema magnético terrestre que se traducen en corrientes eléctricas en ciertas zonas de la magnetosfera. La órbita donde se encuentran los satélites geoestacionarios (meteorológicos, comunicaciones, etc.) se encuentra en una de tales zonas, y se han dado casos de satélites de comunicaciones cuyo sistema eléctrico ha sido dañado.
- Modificando el número de rayos cósmicos galácticos que llegan a la Tierra. La huella que dejan en la corteza terrestre nos permite investigar la historia de la actividad solar. Además hay indicios, en medidas obtenidas por satélites de observación de la Tierra, de una posible correlación entre la cobertura de nubes y el flujo de rayos cósmicos, lo que constituiría un efecto indirecto de la actividad solar en el clima de la Tierra.

NOTAS Y REFERENCIAS

- 1 La imágenes de las figuras 1, 2, 4, 5, 7 y 16 están basadas en observaciones de los instrumentos "Michelson Doppler Imager" (MDI), "Extreme Ultraviolet Telescope" (EIT), "Coronal Diagnostic Spectrometer" (CDS), and "Large Angle Spectrometric Coronagraph" (LASCO) desde el "Solar and Heliospheric Observatory" (SOHO), sonda espacial fruto de la cooperación entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
 - 2 La imagen de la figura 6, ha sido obtenida por el satélite TRACE de la NASA.
 - 3 La Organización Mundial Meteorológica (WMO) publica los informes del "Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)". El tercer informe del IPCC "Cambio climático 2001", el último comprehensivo publicado hasta 2006, es un resumen del estado de la investigación climática. El IPCC pone al día la información disponible en forma de informes parciales y mantiene un página Web, donde se pueden encontrar los últimos avances.
- C. Fröhlich. "Solar Irradiance Variability since 1978", *Memorie della Società Astronomica Italiana*, Vol. 76, 731-734 (2005)

C. Fröhlich y J. Lean, "Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms", *The Astronomy and Astrophysics Review*, Vol. 12, 273-320 (2004)

J. Hansen, M. Sato, L. Lazarenko y otros. "Climate forcing in Goddard Institute for Space Studies S12000 simulations", en *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, 4347-4385 (2002)

W. Soon, S. Baliunas, S. B. Idso, K. Y. Kondriatev y E. S. Posmentier. "Modelling climatic effects of anthropogenic carbon dioxide emissions" en *Climate Research*, Vol. 18, 259-275 (2001)

R. C. Willson y A. Mordvinov. "Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23" en *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, 1199-1202 (2003).