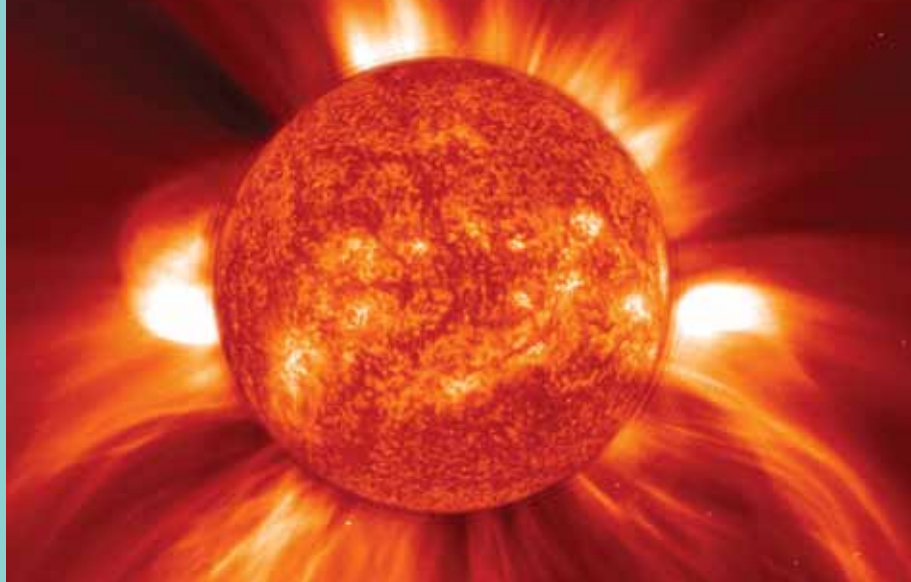
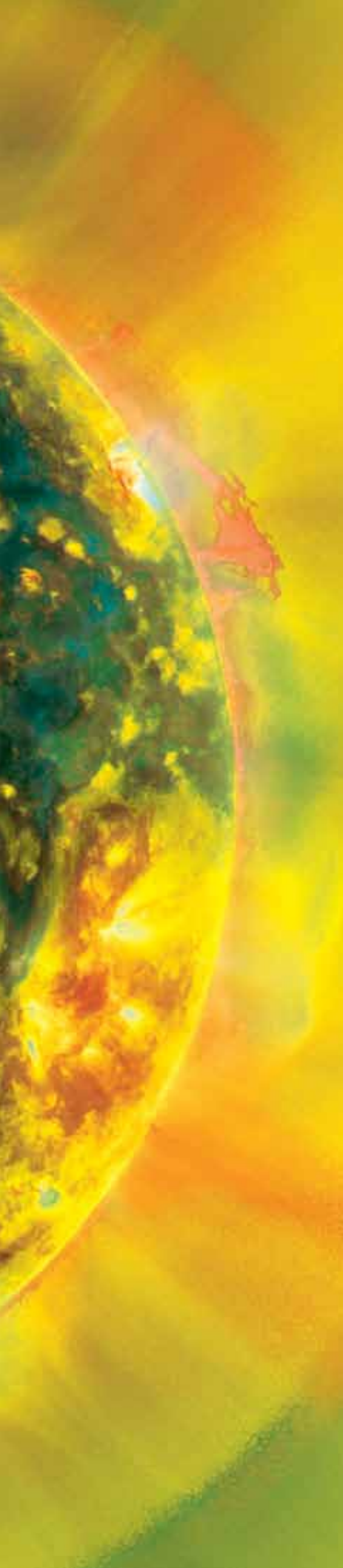




# EL PODER DEL SOL

Alberto Flandes

Imagen: SOHO/ESA/NASA



**El término “clima espacial” se usa para describir las condiciones del entorno inmediato a la Tierra. Estrictamente, el clima espacial es un termómetro de la actividad del Sol y de sus efectos en nuestro planeta y sus alrededores.**

**El Sol es** una estrella enana de *sólo* 700 000 kilómetros de radio que está a la mitad de su vida y cuya edad se calcula en unos 4 500 millones de años. También es una estrella amarilla que con el paso del tiempo se volverá roja y crecerá hasta convertirse en una gigante que después se enfriará y se compactará hasta volverse una enana blanca. Finalmente, el Sol es un gigantesco horno nuclear que produce grandes cantidades de energía que lo mantienen activo y en equilibrio.

Ya hace un par de siglos que sabemos que el Sol es una estrella común y que no ocupa ningún lugar privilegiado en el Universo, pero es nuestra estrella y para nosotros es vital. La vida en la Tierra depende de ella. Todos los organismos terrestres hemos evolucionado en función de las condiciones que el Sol y el ambiente terrestre han determinado.

La mayor parte de la energía que produce el Sol es luz visible —es decir, la luz que captan nuestros ojos y nos permite ver—, pero el Sol produce energía que abarca todo el espectro electromagnético, desde la radiación menos energética, compuesta por las ondas de radio, el infrarrojo y la luz visible, hasta la más energética, compuesta por la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Sin embargo, la radiación solar es sólo una fracción de la energía total que emite el Sol, porque

nuestra estrella expulsa también grandes cantidades de materia que inundan todo el Sistema Solar. Este conjunto de energía y materia solar impone las condiciones del entorno inmediato de la Tierra y tienen efectos en la atmósfera y en la superficie.

#### **La esfera de plasma**

En el interior de las estrellas compiten dos fuerzas. Una es la gravedad, que tiende a comprimirlas, y otra es la presión debida a la energía que producen. Esta presión actúa hacia afuera y tiende a expandirlas. Mientras la estrella genere suficiente presión interna, se mantendrá en equilibrio. En el transcurso de la vida de una estrella hay momentos en que esta presión cambia. En cada episodio la estrella alcanza un nuevo estado de equilibrio que la convierte en un nuevo tipo de estrella: una enana blanca, una estrella de neutrones o incluso un hoyo negro, dependiendo de su masa inicial. Si no hay suficiente masa que genere la gravedad necesaria para contrarrestar la presión interna, la estrella tenderá a inflarse y en algunos casos explotará. Podemos decir que en una estrella saludable como el Sol hay un equilibrio entre estas dos fuerzas.

Las condiciones extremas de temperatura y presión del Sol hacen que el

material del que está hecho se encuentre en un estado conocido como plasma. Los plasmas son fluidos parecidos a los gases, excepto que sus átomos están cargados eléctricamente por haber perdido uno o más de sus electrones. Nos referimos a

## FÍSICA SOLAR

A los filósofos naturales europeos de antes del siglo XVII el concepto de “física solar” les hubiera parecido absurdo: el Sol era un cuerpo celeste inmutable, y lo que no cambia nunca no tiene física. Pero en las primeras décadas de ese siglo Galileo Galilei y otras personas observaron manchas oscuras en la cara del Sol. Galileo trazó dibujos muy detallados que mostraban que las manchas se movían como si el Sol estuviera girando. Desde entonces tenemos un registro continuo de las manchas solares y sus variaciones.

Al poco tiempo de descubiertas las manchas, el Sol se quedó prácticamente limpio de toda mácula durante varios decenios sin que nadie supiera por qué. Muchos años después, cuando los climatólogos descubrieron cómo determinar indirectamente las temperaturas del pasado, se reveló que las décadas immaculadas del Sol habían coincidido con el período más crudo de un enfriamiento global de cinco siglos que hoy se conoce como la Pequeña Glaciación (aproximadamente 1350-1850). La conexión aún no está clara.

En 1826 un boticario convertido en astrónomo de nombre Heinrich Schwabe se puso a buscar un hipotético planeta más cercano al Sol que Mercurio, al que se había llamado Vulcano. Para eso Schwabe estuvo observando el Sol durante 17 años en busca de la silueta de Vulcano, pero lo único que vio fue manchas solares, de las que hizo un registro detallado para no confundirlas con el anhelado planeta. Nunca lo encontró, pero en cambio sí descubrió que el número de manchas solares cambia cíclicamente en periodos de aproximadamente 10 años (hoy se estima más bien en 11). Al poco tiempo, el astrónomo angloirlandés Edward Sabine anunció que el ciclo de las manchas solares coincidía exactamente con otro ciclo recién descubierto en la actividad del campo magnético terrestre. Con el descubrimiento del ciclo solar y de la conexión con el campo magnético terrestre se establecieron los cimientos de lo que más tarde sería el estudio del clima espacial.

—S.R.

estos átomos como *iones*. Los plasmas, así pues, son una colección de iones y electrones que se mueven colectivamente, pero de una manera peculiar, porque el movimiento de estas partículas cargadas produce corrientes eléctricas y estas corrientes producen a su vez campos magnéticos.

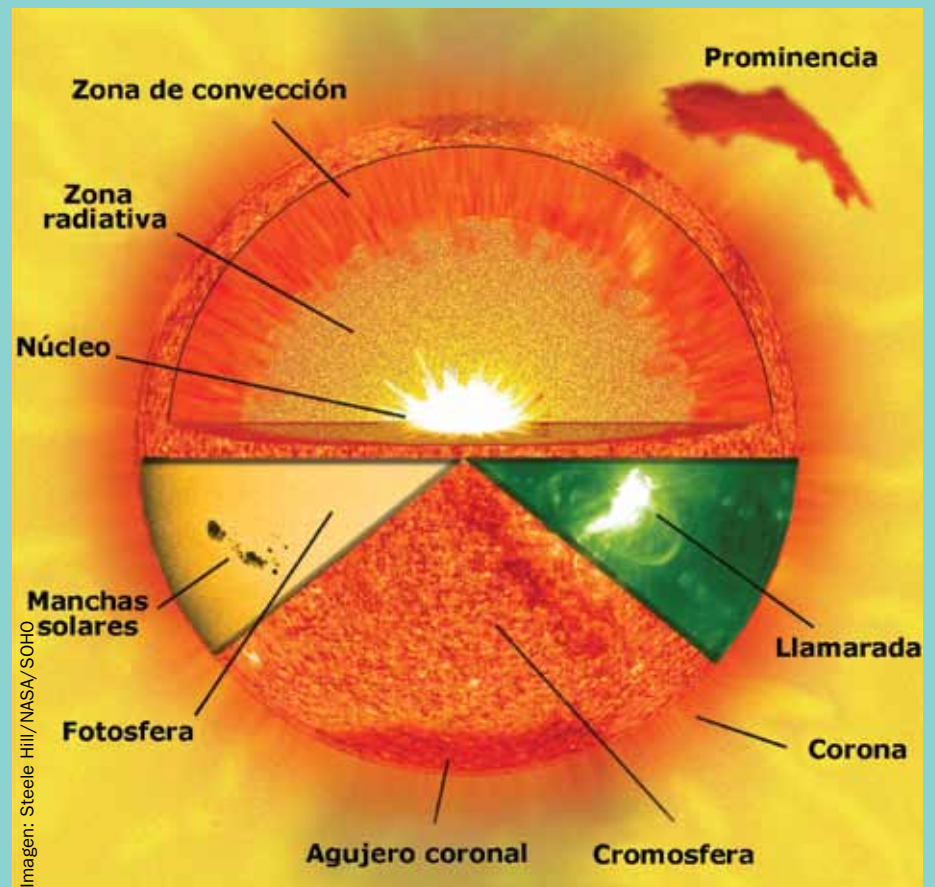
En la Tierra pueden generarse plasmas de forma natural sólo en situaciones muy especiales y por breves instantes, como en las tormentas eléctricas o en algunas erupciones volcánicas muy intensas. Parece paradójico que mientras en la Tierra los plasmas son una forma exótica de materia, la mayor parte de la materia que vemos en el Universo —quizás más del 95%— esté en ese estado. Las exhalaciones del Sol llenan el Sistema Solar de un plasma muy tenue que llamamos medio interplanetario. Más allá, en los espacios que median entre las estrellas, hay un plasma que puede ser 1 000 veces menos denso que el medio interplanetario y que se conoce como medio interestelar.

En cuanto a escalas aún mayores, también se cree que el plasma reina en el medio intergaláctico.

## El Sol se expande

Cuando observamos el Sol desde la Tierra, lo que vemos es una de sus capas externas conocida como fotosfera (esfera de luz) por su gran brillo. La fotosfera no es sólida, pero es densa y opaca y no deja pasar la luz del interior, de modo que, para efectos prácticos, se define como la superficie del Sol. Las capas más exteriores y tenues se consideran, por tanto, como su atmósfera. Estas capas pueden verse a simple vista durante los eclipses, cuando la Luna obstruye la fotosfera.

La atmósfera solar se puede dividir en dos capas principales que están separadas por una región de transición. Entre la fotosfera y la región de transición está la llamada esfera de color, o cromosfera, por sus tintes rojizos. Por encima de la región de transición está la corona solar. En los años 60, con las primeras naves que se



El interior del Sol se compone de tres grandes áreas: el núcleo, la zona radiativa y la zona de convección. Las manchas solares se observan en la superficie solar o fotosfera. Arriba de esta capa se encuentra la cromosfera, donde se originan las llamaradas. La última capa, donde se observan las eyecciones, se denomina corona solar.

adentraron en el medio interplanetario, se descubrió que la corona solar se expande a gran velocidad y que el medio interplanetario no es más que una extensión de la corona.

En la corona solar se observa un flujo ininterrumpido de partículas rápidas que el Sol expulsa en todas direcciones. Lo llamamos viento solar. Paradójicamente, a medida que se aleja del Sol, el viento solar se calienta: de los miles de grados en regiones cercanas a la fotosfera hasta los millones de grados lejos del Sol. Se cree que el intenso y complejo campo magnético solar es una de las causas de este calentamiento extremo.

El campo magnético juega un papel muy importante en muchos de los procesos fundamentales del Sol. No es posible desligarlo de la materia solar y, estrictamente, donde haya plasma solar, estará presente el campo. Así pues, el campo se extiende por todo el medio interplanetario transportado por el viento solar.

La estrecha relación que existe entre el plasma solar y el campo magnético hace que el viento solar se comporte de forma compleja: en las zonas ecuatoriales del Sol, la atmósfera se expande más lentamente y cerca de los polos lo hace más rápido. Esto produce dos frentes de viento, uno rápido y uno lento, que en algún momento se encuentran. Debido

a la rotación del Sol, el viento solar y el campo magnético se tuercen al alejarse, y donde el viento rápido alcanza al lento se generan olas de plasma comprimido que se extienden y crecen como brazos espirales desde el Sol. Algunos comparan estas formas con las ondulaciones en la falda de una bailarina que gira.

### Los signos vitales del Sol

En la superficie del Sol se pueden ver burbujas, explosiones y chorros de plasma, cuya frecuencia e intensidad aumenta y disminuye de forma cíclica. En promedio, el Sol pasa por un periodo de tranquilidad seguido de uno de agitación en ciclos de 11 años. Durante las etapas de máxima actividad el viento solar se vuelve más turbulento y el Sol genera más radiación energética. Después de cada periodo de quietud, la fotosfera empieza a llenarse de manchas, lo que indica que su actividad se intensifica. Las manchas solares pueden durar unas horas o varios días. Cada mancha es una región relativamente más fría que sus alrededores donde el campo magnético solar se intensifica y distorsiona. Al intensificarse la actividad, el campo revienta y da lugar a enormes arcos de plasma que a veces escupen partículas súper veloces acompañadas de rayos X o gama. Otras veces, el Sol expulsa grandes burbujas de plasma que se propagan por

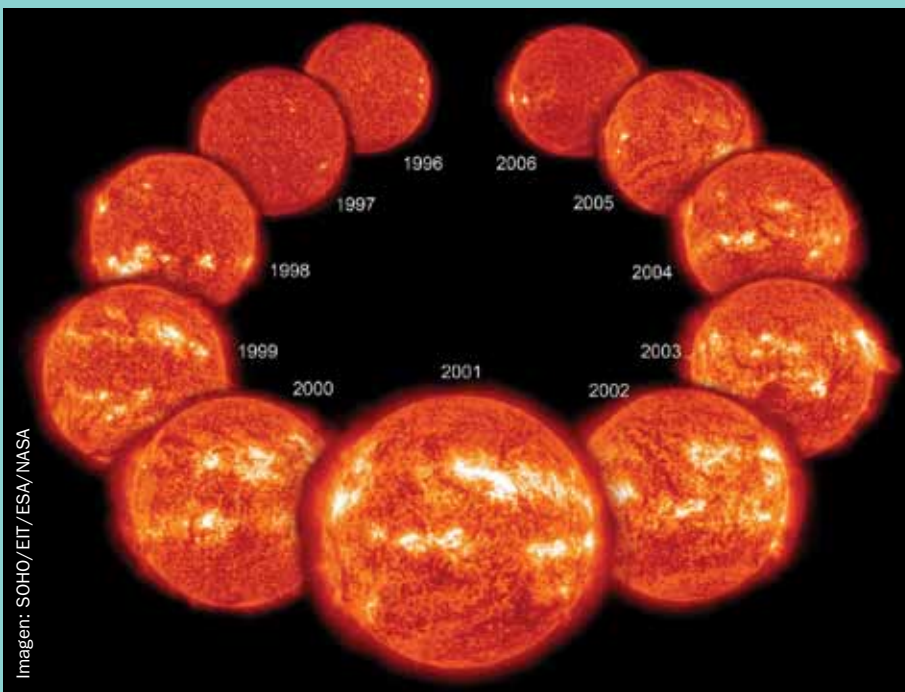
el medio interplanetario a velocidades de hasta 1 000 kilómetros por segundo. Estas burbujas se conocen como *eyecciones de masa coronal* (EMC). Las EMC más rápidas pueden recorrer los 150 millones de kilómetros que nos separan del Sol en un par de días.

### Las partículas solares y la Tierra

Nuestro planeta cuenta con una protección natural contra los embates del viento solar: su propio campo magnético. El campo terrestre forma una región magnetizada alrededor de planeta como una estela tridimensional de un barco que surcara un mar de plasma. La región donde domina el campo terrestre se llama *magnetosfera* e impide que lleguen a la superficie de la Tierra la mayor parte de las partículas del viento solar. Mientras más energía tenga una partícula de viento solar, más difícil será que el campo terrestre la desvíe y más fácil será que penetre la magnetosfera.

Cuando el Sol está muy activo son más frecuentes los encuentros entre los chorros rápidos de viento solar y los lentos, y también se producen EMC más grandes e intensas. El mar de plasma del medio interplanetario se vuelve turbulento y hay más partículas con energías suficientes para penetrar el escudo magnético de la Tierra. El resultado es una tormenta geomagnética.

Podríamos comparar la forma del campo terrestre con una mandarina sin cáscara. Las líneas de campo que usamos para visualizarlo forman los gajos de la mandarina. Estas líneas nacen en el polo norte magnético y convergen en el polo sur magnético. El campo magnético terrestre está invertido y el polo sur magnético casi coincide con el polo norte geográfico. Las partículas con carga eléctrica como las que provienen del Sol y que lograron penetrar la magnetosfera se mueven a lo largo de las líneas de campo hacia los polos magnéticos. La mayoría no tienen energía suficiente para alcanzar la superficie del planeta y quedan atrapadas, rebotando entre los polos a diferentes distancias de la Tierra en regiones conocidas como cinturones de radiación. Las partículas con más energía sí pueden alcanzar los polos y chocar con la atmósfera. El conjunto de choques produce una cascada de luz que enciende



Once años de actividad solar; se observa una progresión de condiciones mínimas a máximas a mínimas.



Una prominencia solar eruptiva registrada el 30 de marzo de 2010 (la imagen de la Tierra está sobrepuesta para dar la escala).

el cielo polar en espectaculares cortinas de color, conocidas como auroras (véase ¿Cómo ves?, Núm. 175).

### El clima espacial

Con toda la energía y partículas que emite el Sol cabe preguntarse si en la Tierra podría haber efectos dañinos, al menos durante los periodos de mayor actividad. En los últimos años se ha acuñado el término *clima espacial* para describir las condiciones energéticas y electromagnéticas del espacio cercano a la Tierra. Así como las condiciones de temperatura, presión y humedad del aire determinan el estado del tiempo en la atmósfera, el clima espacial depende de la intensidad de la radiación electromagnética solar dentro y fuera de la atmósfera, así como de la temperatura, densidad, velocidad e intensidad de campo magnético del medio interplanetario y del plasma magnetosférico; todo esto lo podemos medir. El polvo interplanetario y los cuerpos sólidos presentes en la vecindad de la Tierra complementan la descripción del clima espacial.

Cerca de 50% de la radiación electromagnética emitida por el Sol es luz visible, alrededor de 40% es radiación infrarroja y ondas de radio, y casi 10% es luz ultravioleta (el resto son cantidades pequeñas de rayos X y rayos gama). La Tierra sólo recibe una fracción minúscula de toda esta energía —alrededor de 1400 watts por metro cuadrado— debido a lo pequeña

que es en comparación con el Sol y a la gran distancia que la separa de él. De esta energía, cerca de un 30% se refleja en la atmósfera y poco más del 20% es absorbida por ésta. La atmósfera absorbe alrededor del 70% de la radiación ultravioleta. Esta radiación, prácticamente la más energética que nos llega del Sol, ioniza los átomos de la capa superior de la atmósfera. Así, la atmósfera se divide en una capa superior ionizada de unos 800 kilómetros de grosor, o *ionosfera*, que es la frontera con el espacio exterior, y una capa atmosférica inferior que va de la superficie a unos 80 kilómetros de altura.

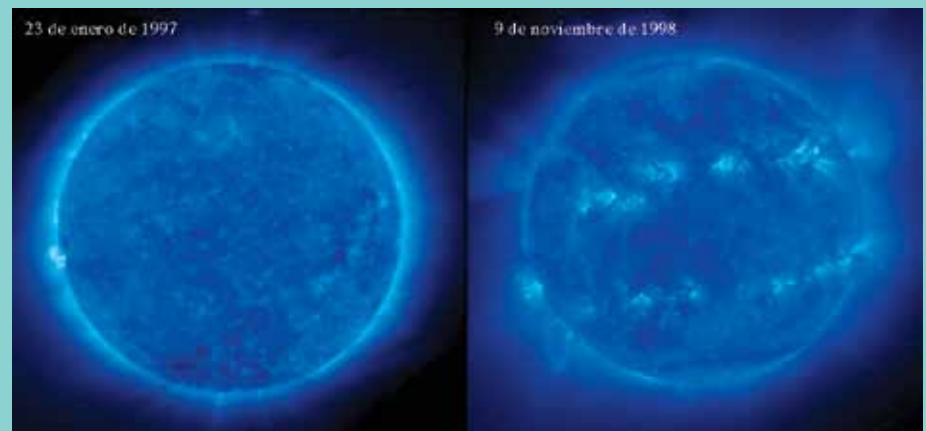
### Repercusiones

Un aspecto importante del clima espacial es la fracción de radiación ultravioleta que penetra en la atmósfera. Los rayos ultra-

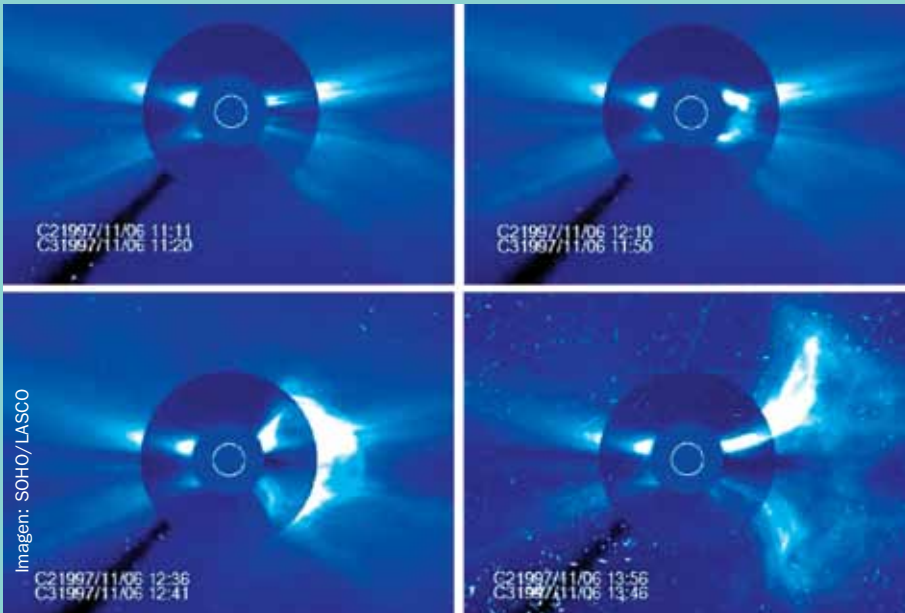
violeta son dañinos para la piel. El efecto nocivo depende del tiempo de exposición y de la energía de la radiación. Los efectos pueden ir desde quemaduras, hasta daños a las fibras de colágeno, proteína que da soporte a la piel. Esto puede producir arrugas prematuras. En casos extremos, pero no raros, la radiación puede alcanzar el núcleo de las células y dañar su ADN, lo que es potencialmente cancerígeno.

Los efectos del Sol varían según la latitud y la altitud a la que nos encontremos, y también con la época del año y la hora del día. Mientras más cerca del ecuador estemos, más verticalmente inciden los rayos solares y más radiación recibe cada metro cuadrado de superficie. En general, hay más peligro de daños por radiación ultravioleta en regiones ecuatoriales y a bajas altitudes. Pero mientras más cerca de los polos estemos (mayor latitud), más partículas energéticas solares y rayos cósmicos llegan a la superficie.

El clima espacial es muy importante para los astronautas. Las naves espaciales desde el proyecto Apolo hasta la Estación Espacial Internacional fueron diseñadas para brindar la máxima protección posible a sus tripulantes. Pero la protección es relativa. Aún dentro de la Estación Espacial, que está en órbita a unos 400 kilómetros de altura, relativamente cerca de la superficie de la Tierra y dentro de su campo magnético, en caso del embate de CME intensas, los astronautas deben refugiarse en áreas especiales que cuentan con escudos reforzados, pues las partículas que penetran la magnetosfera atraviesan fácilmente la nave y los cuerpos de los astronautas, causándoles serios daños con sólo unos minutos de exposición.



Diferencias de actividad solar.

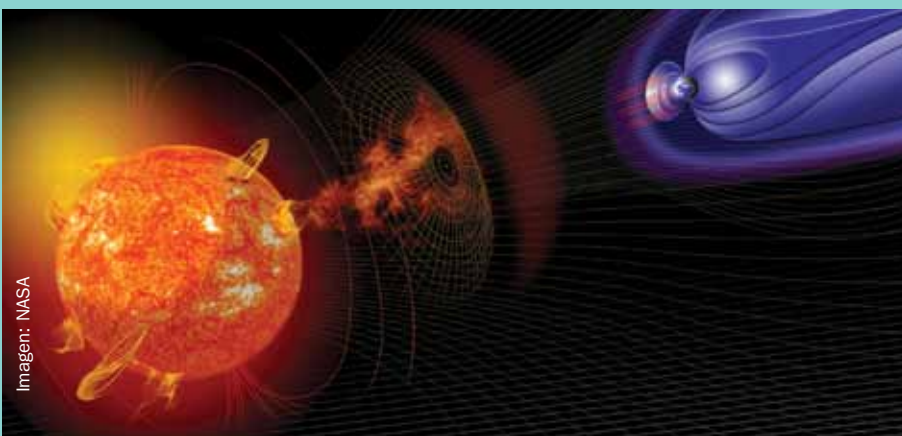


Eyecciones de masa coronal registradas el 6 de noviembre de 1997.

Los efectos del clima espacial en el clima terrestre son también de especial interés. Los rasgos generales de nuestro clima —como las estaciones— se deben básicamente a la cantidad de energía que recibimos del Sol y cómo se distribuye ésta a lo largo del año sobre la superficie y atmósfera del planeta. Esto lo determina la inclinación del eje de rotación terrestre, que varía relativamente con respecto al Sol a lo largo del año, y por la distancia variable entre la Tierra y el Sol. Las variaciones importantes en la actividad solar pueden tener efectos en el clima terrestre. Un caso emblemático es el llamado Mínimo de Maunder, que fue un periodo entre los años 1645 y 1715 durante el cual casi no hubo manchas solares y que coincidió con un periodo más frío de lo normal en Europa y el norte de América. Se cree que esta baja actividad

solar dio lugar a lo que se ha llamado Pequeña glaciación.

Sabemos que una ionosfera perturbada puede afectar las comunicaciones con ondas de radio porque éstas dependen del rebote de las ondas en esa capa para alcanzar distancias más largas que de otra forma serían imposibles por la curvatura de la Tierra. Actualmente las telecomunicaciones, la navegación, el monitoreo terrestre y atmosférico dependen en gran parte de los satélites artificiales que se mueven —la mayoría— dentro de la ionosfera (entre los 160 y 36 000 kilómetros de altura aproximadamente). Su vida útil y desempeño están determinados por el clima espacial. Por ejemplo, un satélite que está expuesto a la radiación energética, a los embates de las partículas solares y a los impactos de partículas de polvo espacial tendrá un desgaste acelerado. La



La energía y las partículas que emite el Sol repercuten en el espacio cercano a la Tierra.

### Más información

- [www.climaespacial.net](http://www.climaespacial.net)
- [www.swpc.noaa.gov/primer/primer\\_in\\_spanish.html](http://www.swpc.noaa.gov/primer/primer_in_spanish.html)
- [www.spaceweathercenter.org/sp/education/06/06.html](http://www.spaceweathercenter.org/sp/education/06/06.html)

radiación puede producir en los cuerpos de los satélites cargas estáticas y corrientes eléctricas que pueden dañar su electrónica. Aun si un satélite funciona correctamente, la transmisión de sus señales también puede ser modificada en su camino hacia la tierra por una tormenta geomagnética. En tierra las comunicaciones se deterioran y hasta se interrumpen.

Alrededor de 4 000 satélites artificiales se han lanzado al espacio desde el satélite soviético *Sputnik* en 1958. Existen actualmente más de 250 satélites activos de cerca de 40 países (incluido México). Poco menos de 200 de éstos son de comunicaciones, navegación y militares. Una gran parte de los restantes está dedicado al monitoreo del clima, lo que incluye no sólo el monitoreo de la atmósfera, sino también de los océanos y de la superficie de Tierra. La minoría está dedicado a la exploración del Sistema Solar; algunos se encuentran en órbitas cercanas, como los telescopios Hubble, Chandra y Wise, otros orbitan planetas como la nave Cassini en Saturno. El grupo de satélites dedicados sólo al monitoreo y estudio del Sol y el viento solar es pequeño y éstos se mueven junto con la Tierra alrededor del Sol, aunque a una distancia de la Tierra de un millón y medio de kilómetros. Las naves Stereo, ACE, WIND y SOHO son de las más activas y cuentan con instrumentos para medir las propiedades del viento solar. Algunas como SOHO cuentan con cámaras y han obtenido imágenes muy espectaculares y detalladas del Sol.

El interés en el clima espacial va más allá de lo puramente científico y se invierten considerables sumas para este fin, porque se sabe que tiene un gran impacto en nuestro planeta, en nuestra actividad y en nuestros cuerpos. Entender el clima espacial significa estar atentos a la actividad del Sol. 🌑

Alberto Flandes es investigador del grupo de Ciencias Espaciales del Instituto de Geofísica de la UNAM. Se dedica al estudio de la física planetaria del medio interplanetario.