

El soplo del viento solar: Las manchas solares, los ciclos solares y la vida en la Tierra

El Sol experimenta regularmente erupciones que colman el espacio de iones energéticos. En 1859, se produjo un fenómeno solar masivo cuya magnitud superó a la de todos los demás eventos registrados y la Tierra se encontraba directamente en el trayecto de la tormenta. Horas después de la erupción, los cables de telégrafo comenzaron a lanzar chispas, los cables caídos produjeron incendios, los operadores de los equipos sufrieron descargas eléctricas al tocar las teclas de sus telégrafos y las cintas de teletipos estallaron en llamas. Transcurrido un siglo y medio, si se produjera un evento solar similar, habría algo más que cables y papeles en peligro.

Anatoly Arsentiev
Irkutsk, Rusia

David H. Hathaway
Centro de Vuelos Espaciales Marshall de la
Administración Nacional de la Aeronáutica y del
Espacio (NASA) en Huntsville, Alabama, EUA

Rodney W. Lessard
Houston, Texas, EUA

Traducción del artículo publicado en
Oilfield Review Otoño de 2013: 25, no. 3.
Copyright © 2014 Schlumberger.

Por su colaboración en la preparación de este artículo,
se agradece a Don Williamson.

1. Cliver EW: "The 1859 Space Weather Event: Then and Now," *Advances in Space Research* 38, no. 2 (2006): 119–129.
2. Boteler DH: "The Super Storms of August/September 1859 and Their Effects on the Telegraph System," *Advances in Space Research* 38, no. 2 (2006): 159–172.
3. Stephens DL, Townsend LW y Hoff JL: "Interplanetary Crew Dose Estimates for Worst Case Solar Particle Events Based on Historical Data for the Carrington Flare of 1859," *Acta Astronautica* 56, no. 9–12 (Mayo–Junio de 2005): 969–974.

Quienes trabajamos en la industria energética, dependemos del Sol para nuestro sustento. Los hidrocarburos que buscamos y producimos se generaron a partir de materia orgánica que almacenó energía antigua originada en el Sol. En un pasado no tan lejano, el Sol era un objeto reverenciado debido al control que ejercía sobre nuestras vidas. Hoy en día, gracias a su conocimiento, ha desaparecido gran parte de ese sentido de veneración, si bien no cabe duda que nuestra existencia misma se basa en una relación con la presencia, aparentemente inmutable, de la estrella brillante del sistema solar.

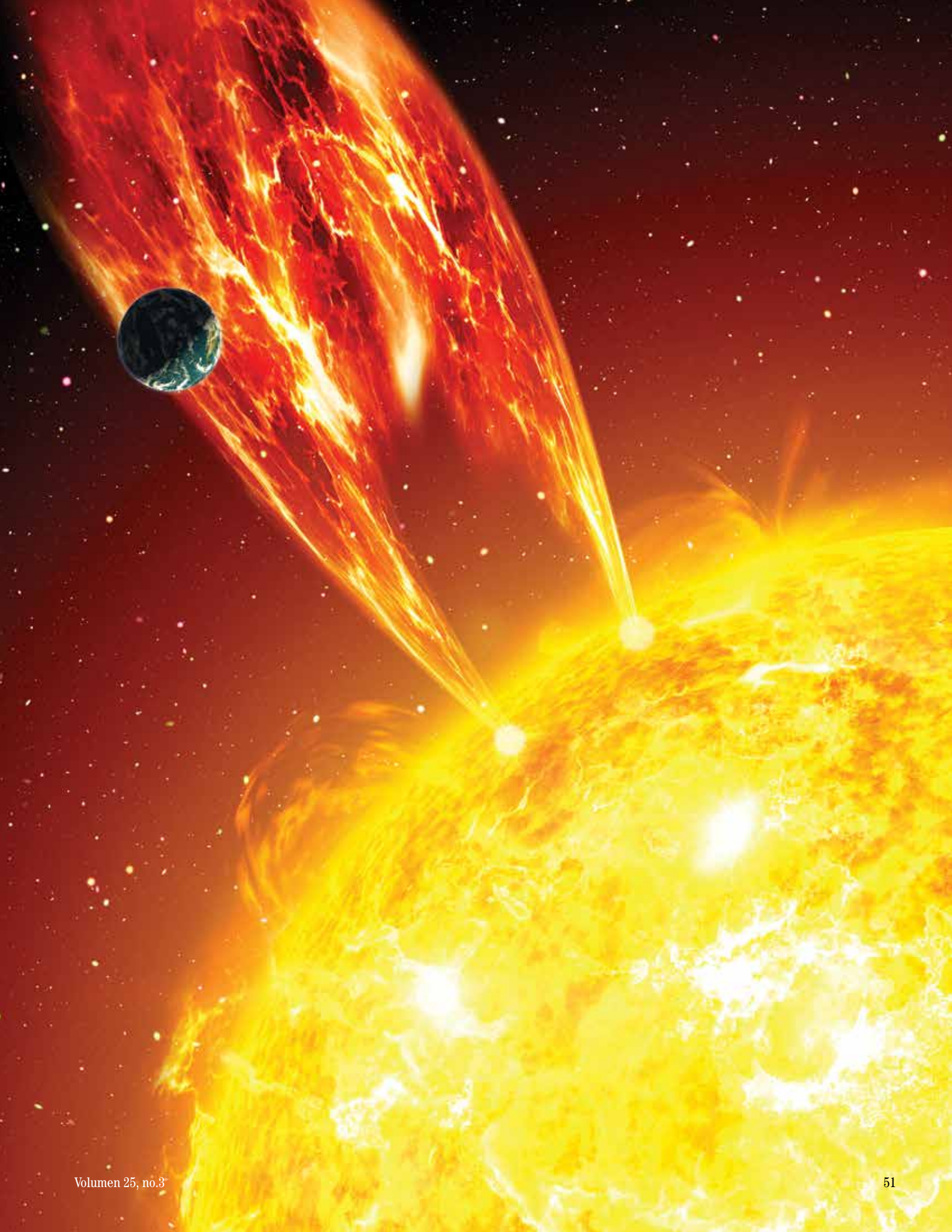
Sin embargo, ocasionalmente, la estabilidad aparente del Sol es interrumpida por las potentes manifestaciones de su dinamismo. Un ejemplo de ello es el episodio ocurrido en la mañana del 1º de septiembre de 1859. Desde su observatorio privado, el astrónomo aficionado Richard Carrington observó un enorme grupo de manchas en la superficie del Sol. Súbitamente, desde la zona de las manchas solares se produjo un destello brillante de luz blanca: una erupción solar.¹ Esta erupción particular fue precursora de una eyección de masa coronal (CME) gigante, que arrojó plasma solar al espacio interplanetario.

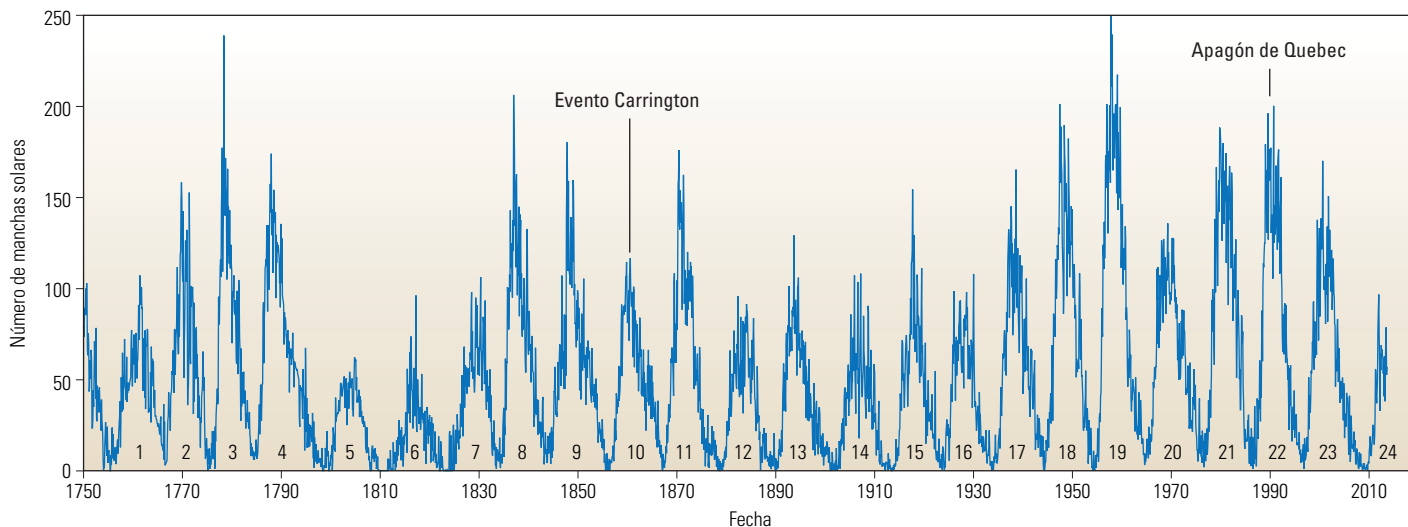
Esta nube masiva de partículas cargadas llegó a la Tierra en menos de 18 horas y en su transcurso afectó la tecnología más avanzada de la época: el telégrafo.² La interacción entre la CME y el campo magnético de la Tierra indujo corrientes eléctricas en los cables de telégrafo expuestos.

La corriente atravesó los cables y produjo el sobrecalentamiento y la caída de algunos de ellos, con la consiguiente iniciación de incendios. Los sistemas de telegrafía fueron afectados por potentes impulsos de electricidad y los operadores sufrieron descargas eléctricas. Algunos informes describieron cómo se quemaba el papel telegráfico y cómo las máquinas continuaban recibiendo información incluso cuando los telegrafistas habían desconectado las baterías que les suministraban energía. Las perturbaciones del campo magnético de la Tierra, resultado de los efectos de la CME, generaron un comportamiento errático en las agujas de las brújulas. Y esos efectos no sólo se vieron en la superficie terrestre; las auroras, que normalmente se limitan a las latitudes más altas de la Tierra, iluminaron el cielo hasta la región del Caribe.

En su mayoría, los expertos consideran que la supertormenta solar de 1859, conocida como evento Carrington, fue la tormenta solar más intensa de la que se tienen registros y que produjo un impacto directo en la Tierra. Los datos de núcleos de hielo que datan de 500 años atrás, muestran evidencias de tormentas geomagnéticas de variada intensidad, pero ninguna alcanzó la magnitud de ese episodio singular.³

La infraestructura moderna depende de una diversidad de sistemas y dispositivos interconectados, que son sensibles a las fuerzas electromagnéticas y geomagnéticas. Los científicos sienten preocupación frente a la posibilidad de que otra CME del tipo del evento Carrington, dirigida hacia





▲ Ciclos de manchas solares. Los científicos han registrado sistemáticamente el número de manchas solares y han numerado los picos de sus ciclos desde el siglo XVIII. En muchos de los ciclos recientes, el número de manchas solares se aproximó o superó las 200; el promedio del ciclo actual es de menos de 100.

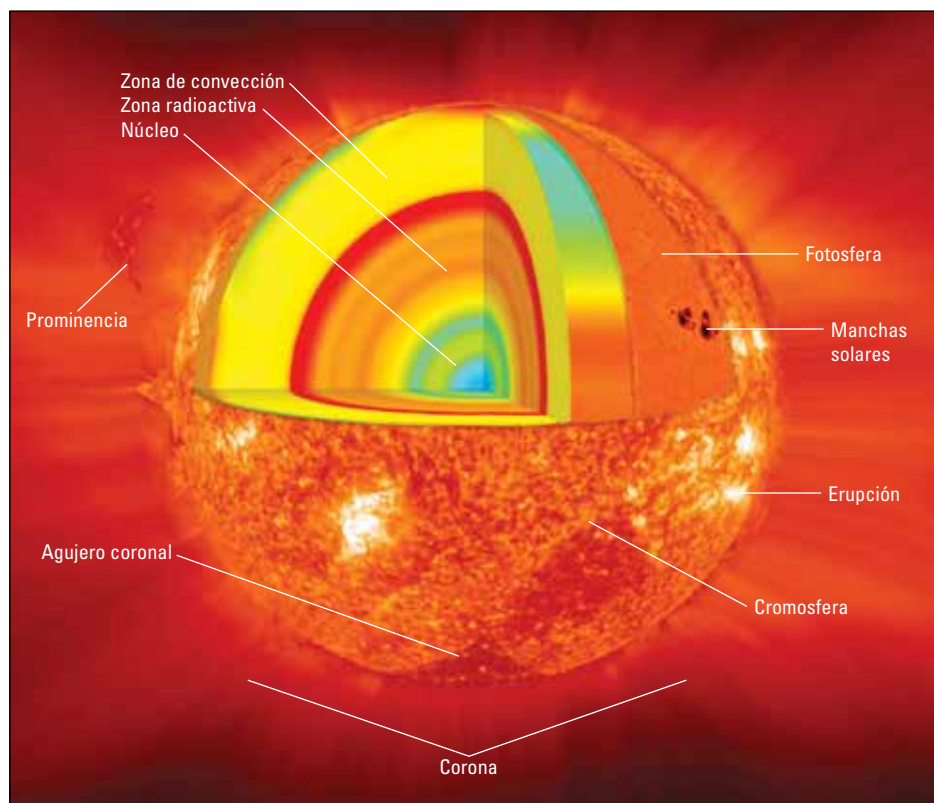
la Tierra, haga estragos, saturando los sistemas de control y las redes eléctricas, destruyendo los satélites de telecomunicaciones, alterando los sistemas de posicionamiento global (GPS) y sumergiendo

continentes enteros en la oscuridad y el caos. En 1989, una tormenta geomagnética mucho más pequeña produjo un apagón que sumió en la oscuridad la provincia de Quebec, en Canadá, y dejó

sin suministro eléctrico a muchos lugares del nordeste de EUA.

Según los científicos solares, la predicción del próximo evento Carrington, o de cualquier tormenta solar, es prácticamente imposible. Cuando se producen erupciones solares y CMEs, es difícil para los científicos determinar si la Tierra se encuentra directamente en el trayecto de este flujo de iones. En los últimos años, se ha mejorado la capacidad de emisión de alertas sobre tormentas solares potencialmente dañinas gracias al despliegue de satélites posicionados estratégicamente para monitorear la actividad del Sol.

Si bien no pueden pronosticar con exactitud cuándo se producirán las erupciones solares y las CMEs, los científicos han descubierto una correlación entre un incremento del número de manchas solares y la frecuencia y la intensidad de los eventos solares. Las manchas solares son regiones oscuras del Sol que responden a un ciclo de 11 años. Cuando el ciclo de las manchas solares alcanza un período de actividad mínima, puede que no existan manchas solares visibles, pero durante el período de máxima actividad el número de manchas solares llega a ser superior a 200. Cada ciclo ha sido numerado desde 1755, año en que los observadores comenzaron a registrar la actividad de las manchas solares de manera sistemática (arriba). El evento Carrington se produjo durante el pico del ciclo 10. El Centro de Predicción del Clima Espacial (SWPC) de la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA) de EUA predijo que el ciclo 24 alcanzará su pico en el año 2013.⁴ El Sol se ha mantenido relativamente calmo durante el ciclo 24, pero siempre existe el potencial para que desate otro evento como el de Carrington.



▲ La estructura del Sol. Las reacciones de fusión tienen lugar en el núcleo central del Sol. La atracción gravitacional produce el aceleramiento de los núcleos de hidrógeno hacia adentro, en dirección al centro del Sol, donde se fusionan y forman helio; esta reacción libera energía. La energía —en forma de fotones y otros subproductos de partículas elementales— sube a través de la zona radioactiva y la zona de convección del Sol y luego sale de la fotosfera. La corona es la atmósfera externa del Sol, una capa de plasma que rodea la cromosfera. Aquí, los rasgos que aparecen en la superficie del Sol son una prominencia, erupciones solares, manchas solares y un agujero coronal. [Ilustración, cortesía de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).]

Este artículo analiza los conceptos de ciclos solares, eventos solares, CMEs, clima espacial, monitoreo solar y los efectos potenciales de las tormentas solares en la infraestructura moderna, y además proporciona una revisión de los sistemas de advertencia actuales.

Un Sol no tan benigno

Hace unos 5 000 millones de años, una nube de polvo y gases de aproximadamente 1,6 trillones de km [1 trillón de mi] de diámetro se unió para formar nuestro sistema solar.⁵ Se cree que el origen de esa nube fue una mezcla de materiales y gases primordiales provenientes de estrellas más antiguas que explotaron en supernovas masivas.⁶ La nube se contrajo por acción de la gravedad y la atracción mutua de las partículas aceleró el colapso y formó un núcleo central denso. La rotación de la nube se aceleró con la contracción, en tanto que las fuerzas centrífugas produjeron el aplanamiento de la nube hacia sus bordes, quedando una protuberancia cerca de la zona central a partir de la cual se desarrolló el Sol.

Conforme el núcleo central del Sol continuó contrayéndose, la compresión generó calor y ese calor derretió y evaporó el polvo. Unos 10 millones de años después de que comenzara el proceso de contracción, la velocidad de contracción se redujo porque la atracción gravitatoria se equilibró con la presión de los gases calientes. El incremento de la temperatura del núcleo generó reacciones nucleares, y el calor y la presión suprimieron los electrones, quedando principalmente plasma: una mezcla de protones y electrones. La atracción gravitatoria del Sol continuó comprimiendo el plasma en su núcleo hasta que se alcanzaron densidades equivalentes a casi diez veces la densidad del plomo y calentó el plasma hasta casi 16 millones de °C [29 millones de °F], punto en el cual pueden producirse reacciones de fusión.

En la reacción de fusión del Sol, los átomos de hidrógeno se fusionan y forman helio. Durante la reacción, parte de la masa original se convierte

en calor y fotones. Los fotones irradian hacia afuera, desplazándose primero a través de la zona radioactiva, y luego de millones de colisiones llegan a la región cercana a la superficie: la zona de convección (página anterior, abajo). Desde la zona de convección, los fotones finalmente abandonan el Sol. Viajando a la velocidad de la luz, los fotones cubren los 150 millones de km [93 millones de mi] que separan la Tierra del Sol en unos ocho minutos.

Los fotones emitidos por el Sol cubren una ancha banda del espectro electromagnético; desde los rayos X de alta energía hasta las ondas de radio. La Tierra es bombardeada constantemente por esta energía, pero dado que la atmósfera la protege de la mayor parte de las emisiones, sólo algunas frecuencias específicas —principalmente las de la luz ultravioleta, la luz visible y las ondas de radio— alcanzan la superficie terrestre.

Un campo magnético autogenerado es un subproducto del reactor de fusión, la rotación y la masa de plasma en constante movimiento del Sol en la zona de convección. Las líneas del campo magnético generalmente se encuentran alineadas con el eje de rotación del Sol. El campo exhibe una naturaleza bipolar análoga a la de la Tierra, con sus polos magnéticos norte y sur. No obstante, a diferencia del campo magnético de la Tierra, el campo magnético del Sol invierte su polaridad con regularidad, en coincidencia con el punto medio del pico del ciclo de 11 años de las manchas solares.

El campo magnético rotativo del Sol genera además una lámina de corriente que se extiende desde el Sol hacia el espacio a través de miles de millones de kilómetros. Cuando se produce la inversión de la polaridad magnética —proceso que se inició en el verano de 2013 para el ciclo 24— la lámina de corriente se contrae considerablemente. La Tierra atraviesa la lámina de corriente mientras describe una órbita alrededor del Sol, generando condiciones potenciales de clima espacial tormentoso.⁷

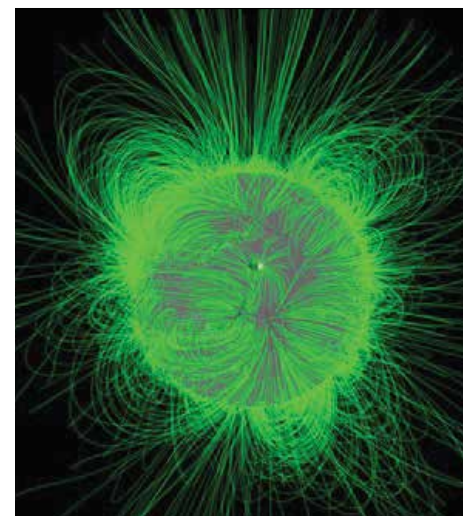
En la superficie del Sol, las líneas del campo magnético emergen y forman manchas solares. Las líneas del campo magnético pueden abarcar volúmenes muy grandes; el planeta Júpiter, cuyo diámetro es de 150 000 km [90 000 millas], podría entrar perfectamente en algunas de ellas (derecha). En la superficie, también se forman bucles coronales, siguiendo las líneas del campo magnético. Durante los picos de los ciclos de manchas solares, el número de bucles coronales se incrementa y las líneas del campo magnético a menudo se entrelazan. Este entrelazamiento produce el almacenamiento de cantidades masivas de energía que finalmente es liberada en forma de erupciones solares, CMEs

y otros fenómenos. El clima espacial es marcado por pulsos de energía provenientes de estas perturbaciones magnéticas.

El clima espacial

El clima espacial se define como el conjunto de condiciones físicas existentes en el espacio, que poseen el potencial para afectar los sistemas tecnológicos terrestres o espaciales.⁸ El clima espacial es considerablemente influenciado por la energía transportada por el viento solar desde el Sol y puede alterar las condiciones existentes en torno a la Tierra. El viento solar se compone de partículas cargadas; principalmente protones y electrones. Estas partículas son emitidas desde el Sol en todas las direcciones. La velocidad, densidad y composición del viento solar determinan los efectos asociados que se producen en la Tierra.⁹ Las tormentas geomagnéticas, las perturbaciones ionosféricas y las emisiones de las auroras son todas manifestaciones del clima espacial. Las eyecciones de masa coronal y las ondas de choque asociadas son los componentes más violentos del clima espacial y tienden a comprimir la magnetosfera terrestre y a desencadenar tormentas geomagnéticas.

La magnetosfera terrestre es una burbuja con forma de bala que protege la superficie del planeta de las radiaciones nocivas. La magnetosfera protege a la Tierra de los iones rápidos a través de la deflexión y la concentración de dichos iones en los polos norte y sur de la Tierra. Los cinturones de radiación de Van Allen atrapan las partículas cargadas que fugan a través de la magnetosfera, pro-



^ Líneas del campo magnético del Sol. Las líneas convolutas del campo magnético (verde) pueden extenderse a lo largo de una distancia de miles de kilómetros desde la superficie del Sol. (Imagen, cortesía del Estudio de Visualización Científica del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA.)

4. NOAA: Mild Solar Storm Season Predicted, "National Oceanic and Atmospheric Administration (8 de mayo de 2009), http://www.noaa.gov/stories/2009/20090508_solarstorm.html (Se accedió el 4 de septiembre de 2013).

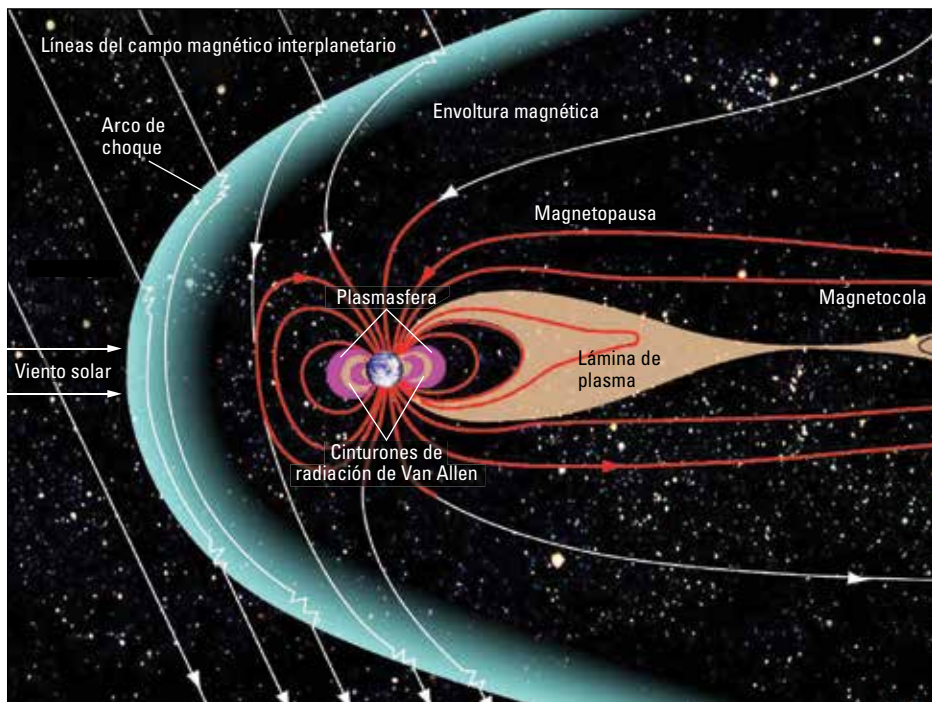
5. Friedman H: *The Astronomer's Universe: Stars, Galaxies and Cosmos*. Ciudad de Nueva York: Ballantine Books, 1991.

6. Los elementos pesados naturales que se encuentran en la Tierra, tales como el uranio y el plutonio, sólo pueden haber provenido de una reacción nuclear extremadamente violenta, tal como una supernova.

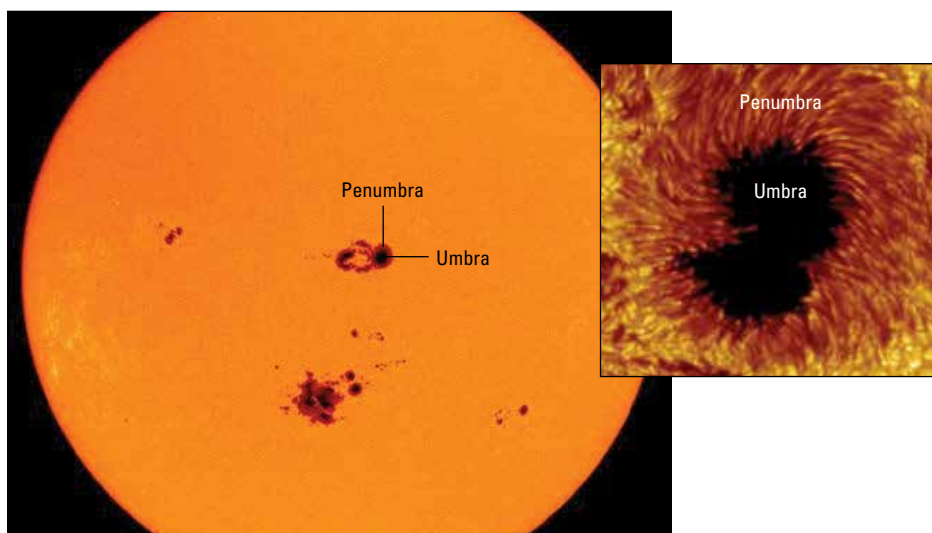
7. Phillips T: "The Sun's Magnetic Field Is About to Flip," NASA (5 de agosto de 2013), <http://www.nasa.gov/content/goddard/the-suns-magnetic-field-is-about-to-flip> (Se accedió el 28 de agosto de 2013).

8. Hansmeier A: *The Sun and Space Weather*, 2da ed. Dordrecht, Países Bajos: Springer, 2007.

9. Feldman U, Landi E y Schwadron NA: "On the Sources of Fast and Slow Solar Wind," *Journal of Geophysical Research* 110, no. A7 (Julio de 2005): A07109.1–A07109.12.



^ La magnetosfera terrestre. La magnetosfera, la región del espacio que rodea la Tierra creada por el campo magnético terrestre, es una estructura dinámica que responde a las variaciones producidas en la actividad solar y el clima espacial. El viento solar, que comprime el lado de la magnetosfera en dirección al Sol, determina su forma. En el lado de la Tierra orientado al Sol se forma una onda de choque supersónica; el arco de choque. En su mayoría, las partículas del viento solar se desaceleran en el arco de choque y son dirigidas alrededor de la Tierra en la envoltura magnética. El viento solar ejerce tracción en la magnetosfera, en el lado nocturno de la Tierra, extendiendo su longitud hasta en 1 000 radios terrestres y formando lo que se denomina magnetocola. El límite exterior del campo geomagnético confinado de la Tierra se denomina magnetopausa. Las partículas cargadas atrapadas —los cinturones de radiación de Van Allen, la plasmasfera y la lámina de plasma— residen en la magnetosfera. (Adaptado de una imagen, cortesía de Aaron Kaase del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA.)



^ Manchas solares. Regiones del Sol que parecen más oscuras que el resto del disco, las manchas solares son formadas por los campos magnéticos concentrados que se proyectan a través de los gases calientes de la fotosfera hacia la superficie del Sol. Estos campos magnéticos crean regiones más oscuras y más frías denominadas manchas solares. El centro oscuro de una mancha solar se denomina umbra y la región clara que rodea la umbra es la penumbra. Las manchas solares ocurren en grupos y con frecuencia en pares. Las dos manchas de un par poseen polaridades magnéticas opuestas. (Fotografías, cortesía de la NASA.)

tegiendo adicionalmente a la superficie terrestre frente a las radiaciones electromagnéticas nocivas. La región de la magnetosfera alejada del Sol es elongada debido a la presión del viento solar y su forma varía con las condiciones del clima espacial (izquierda).

El clima espacial posee el potencial para perturbar de manera catastrófica el ambiente próximo a la Tierra. La Organización Meteorológica Mundial (WMO), un organismo de las Naciones Unidas, creó el Equipo de Coordinación de Interprogramas sobre el Clima Espacial (ICTSW) para abordar las preocupaciones ante las perturbaciones potenciales para la vida en la Tierra, causadas por el clima espacial.¹⁰ El programa cuenta con la participación de especialistas de veinte países y siete organizaciones internacionales. En los Estados Unidos, la NOAA es responsable del monitoreo del clima terrestre y espacial. El centro SWPC de la NOAA monitorea constantemente los datos relacionados con el Sol y pronostica los eventos solares y geofísicos que pueden incidir en los satélites, los sistemas de navegación, las redes eléctricas, las redes de comunicaciones y otros sistemas tecnológicos.¹¹ Debido a la correlación entre los incrementos del número de manchas solares y las tormentas solares, los científicos se encuentran en estado de alerta máxima durante los períodos de máxima actividad solar.

Las manchas solares

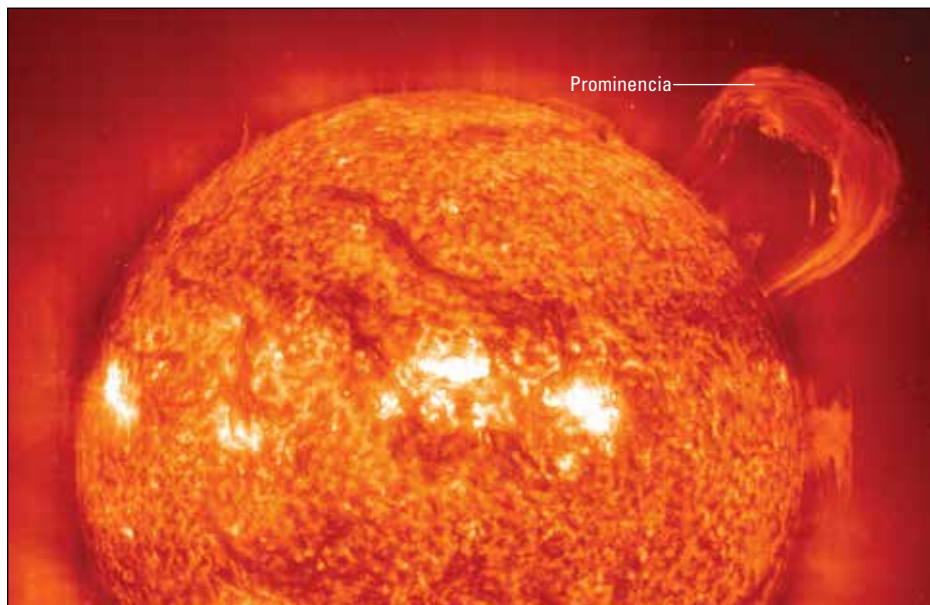
Hace aproximadamente 2 800 años, un grupo de astrónomos chinos formuló la primera observación registrada de las manchas solares.¹² La invención del telescopio, en el siglo XVII, permitió estudiar y registrar de manera más exhaustiva la cara siempre cambiante del Sol. La disponibilidad de registros confiables y sistemáticos de las manchas solares se remonta al siglo XVIII. A mediados del siglo XIX, el astrónomo alemán Samuel Heinrich Schwabe identificó por primera vez un patrón de 10 años en el ascenso y el descenso de las manchas solares: el ciclo de manchas solares. Posteriormente, el astrónomo suizo Johann Rudolf Wolf caracterizó el período de 11 años para el ciclo y desarrolló una fórmula para cuantificar la actividad de las manchas solares, el número de Wolf, que aún hoy se sigue utilizando.¹³ El ciclo no es exactamente de 11 años sino que varía entre 9 y 14 años.

Las manchas solares se forman donde las líneas concentradas de los campos magnéticos se proyectan a través de los gases calientes de la fotosfera y corresponden a regiones que son más frías que la superficie circundante. Si bien parecen más oscuras que el resto del disco solar, si fueran removidas del Sol, serían más brillantes

que cualquier otro componente del sistema solar (página anterior, abajo). La importancia de los campos magnéticos complejos para la actividad del Sol recién fue admitida en los últimos 100 años. El astrónomo norteamericano George Ellery Hale reportó por primera vez el magnetismo solar en 1908. Hale determinó la presencia de los campos magnéticos a través de la medición de los cambios producidos en la intensidad y la polarización de la luz emitida desde los átomos en la atmósfera del Sol.¹⁴ Este astrónomo y sus colegas demostraron que las manchas solares contienen campos magnéticos intensos y que todos los grupos de manchas solares de un hemisferio solar dado poseen la misma rúbrica de polaridad magnética. Además, la polaridad de las manchas solares se correlaciona con la orientación del campo magnético del Sol en un ciclo solar específico, que se invierte con cada ciclo. El hemisferio que posee una polaridad magnética norte en un período de actividad solar mínima, exhibe una polaridad magnética sur en el siguiente período de actividad solar mínima.

El tamaño de las manchas solares oscila entre 2 500 y 50 000 km [1 500 y 30 000 mi] y las mismas cubren menos del 4% del disco visible del Sol. En comparación, el diámetro de la Tierra es de unos 12 700 km [7 900 mi]. Normalmente, las manchas solares tienen una vida oscilante entre algunos días y algunas semanas, y tienden a concentrarse en dos bandas de latitud media a ambos lados del ecuador del Sol. Durante la primera parte del ciclo solar, las manchas solares se observan con más frecuencia en torno a los 25°-30° de latitud norte y sur respecto del Ecuador. Más adelante, aparecen en las latitudes de 5° a 10°. Las manchas solares rara vez ocurren en latitudes de más de 50°.

Los intensos campos magnéticos asociados con las manchas solares a menudo forman columnas arqueadas de plasma, denominadas prominencias, que aparecen por encima de las regiones de manchas solares (derecha, extremo superior). Algunas prominencias pueden colgar suspendidas por encima de la superficie solar durante varios días. Cuando estos bucles masivos de energía se entrelazan, almacenan energía que puede



^ Prominencia solar fotografiada el 23 de septiembre de 1999. El Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO) espacial captó esta imagen de una prominencia eruptiva utilizando frecuencias ultravioletas extremas. La liberación de energía desde las líneas entrelazadas de los campos magnéticos arroja plasma por encima de la superficie del Sol. [Fotografía, cortesía del consorcio EIT (Telescopio de generación de imágenes en luz ultravioleta extrema) del satélite SOHO.]

ser expulsada violentamente y lanzar material coronal fuera del Sol en forma de erupción solar o CME.

Las erupciones solares y las CMEs

La fuente de energía de las erupciones solares proviene del desgarramiento y la reconexión de las líneas de los campos magnéticos, y los campos magnéticos intensos de las regiones de las man-

chas solares activas a menudo producen erupciones solares (abajo). Estas descargas intensas y fugaces de energía constituyen los eventos más explosivos de nuestro sistema solar. Durante una erupción solar, las temperaturas se elevan hasta los 5 millones de °K y pueden arrojarse al espacio vastas cantidades de partículas y radiaciones, pero una erupción normalmente concluye al cabo de 20 minutos.



^ Erupción solar. El Observatorio de Dinámica Solar (SDO) de la NASA captó esta imagen de una erupción solar el 22 mayo de 2013. La imagen capta la luz en la longitud de onda de 13,1 nm, lo que resalta el material que se calienta hasta alcanzar temperaturas intensas durante una erupción. La coloración verde turquesa es característica de las imágenes que utilizan esta longitud de onda. (Fotografía, cortesía del satélite SDO de la NASA.)

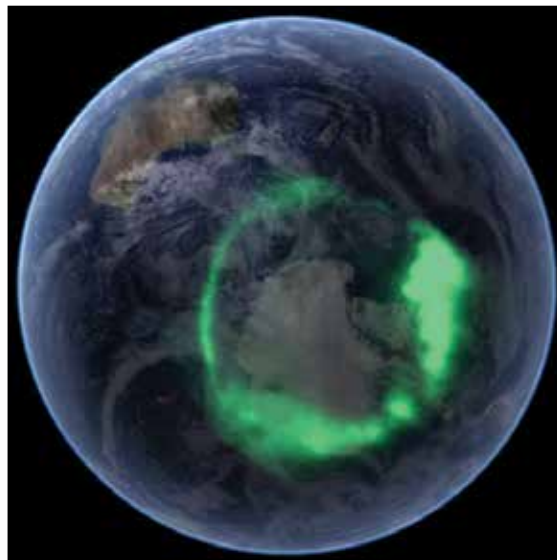
10. Para obtener más información sobre la WMO y el ICTSW, consulte: "WMO Scientific and Technical Programs," *World Meteorological Organization*, <http://www.wmo.int/pages/prog/> (Se accedió el 1° de agosto de 2013).

11. Para obtener más información sobre el SWPC, consulte: *NOAA National Weather Service Space Weather Prediction Center*, <http://www.swpc.noaa.gov/AboutUs/index.html> (Se accedió el 13 de agosto de 2013).

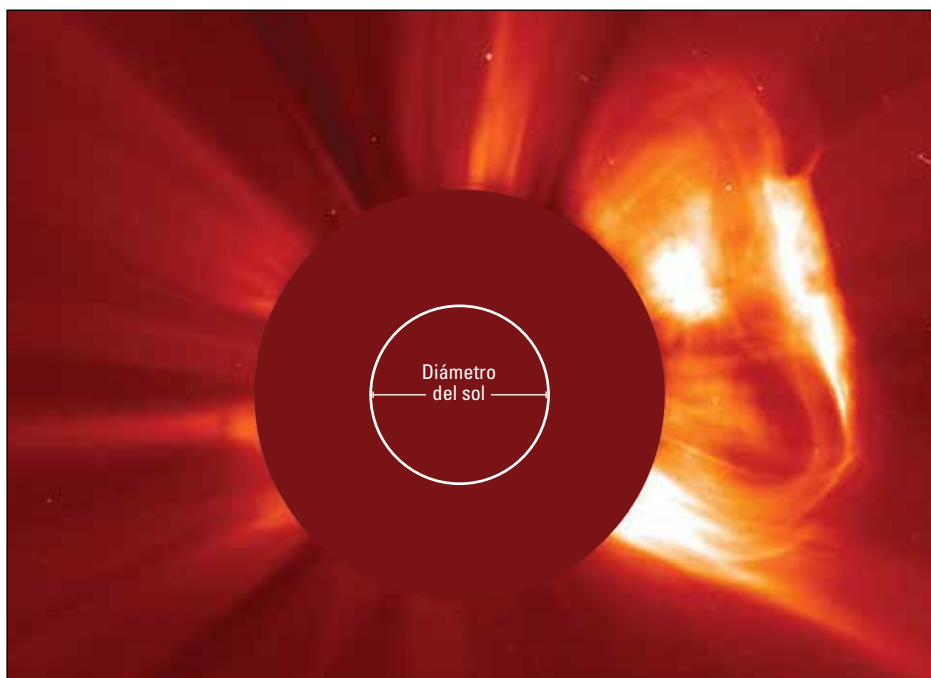
12. Clark DH y Stephenson FR: "An Interpretation of the Pre-Telescopic Sunspot Records from the Orient," *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 19, no. 4 (Diciembre de 1978): 387-410.

13. Hathaway DH: "The Solar Cycle," *Living Reviews in Solar Physics* 7 (2010): 1-65.

14. Alexander D: *The Sun*. Santa Bárbara, California, EUA: Greenwood Press, 2009.



^ Auroras en altas latitudes. Las partículas cargadas del viento solar y las tormentas geomagnéticas siguen las líneas del campo magnético de la Tierra y pueden ionizar los gases presentes en la atmósfera superior. Las moléculas de oxígeno ionizadas emiten una luz de color verde a rojo pardusco; las emisiones de nitrógeno ionizado son de color azul o rojo. La aurora borealis (*izquierda*) fue fotografiada el 25 de enero de 2012 desde la Estación Espacial Internacional de la Región del Medio Oeste de EUA. La fotografía de la aurora australis (*derecha*), captada por el satélite IMAGE de la NASA el 11 de septiembre de 2005, fue tomada cuatro días después de una erupción solar. La aurora circunda el Polo Sur y parece una cortina de luz si se observa desde el nivel del terreno. (Fotografías, cortesía de la Estación Espacial Internacional de la NASA y del Centro de Ciencias IMAGE.)

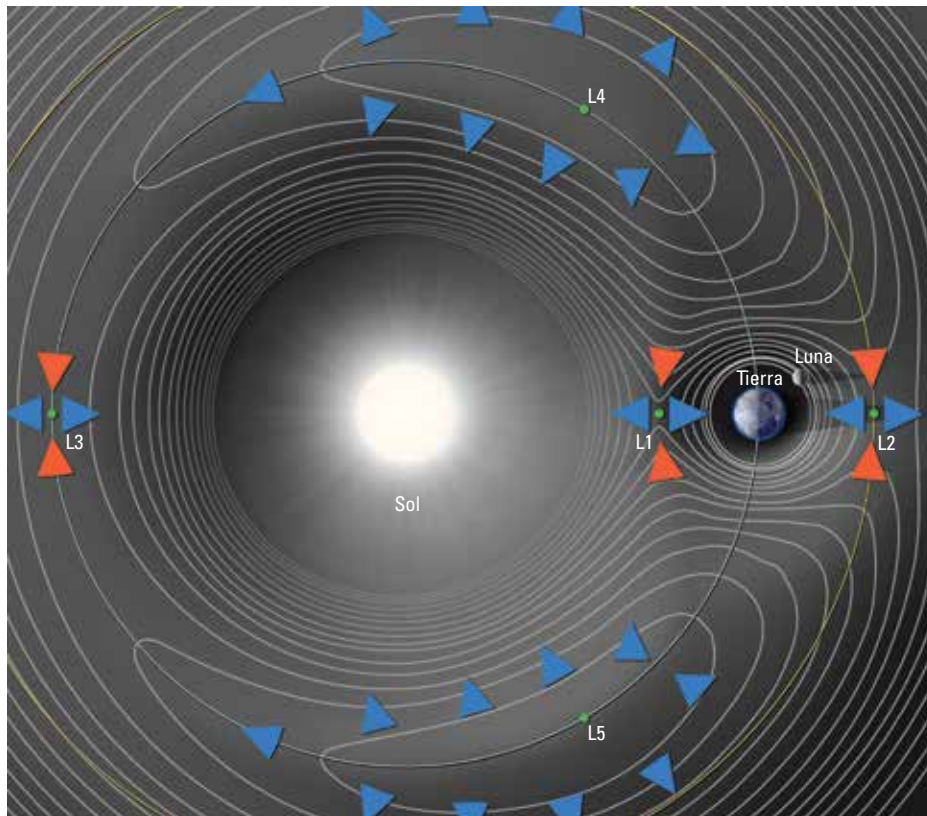


^ Imagen de una CME captada desde el espacio el 22 de octubre de 2011. El coronógrafo espectrométrico de gran ángulo (LASCO), a bordo del satélite SOHO de la NASA, captó esta imagen en la que se arroja plasma en la dirección de Marte. El Sol es oscurecido por un disco que permite que el sensor del instrumento se enfoque en las emisiones provenientes de la superficie del Sol, lo que mejora la observación de la corona mediante el bloqueo de la luz directa del Sol. El círculo blanco del disco representa el tamaño y la localización de la superficie del Sol. (Fotografía, cortesía del consorcio EIT del satélite SOHO.)

Durante el pico del ciclo de manchas solares, pueden ocurrir varias erupciones diarias. Cuando estalla una erupción solar, la radiación ultravioleta y de rayos X proveniente de la erupción viaja a la velocidad de la luz y llega a la Tierra en aproximadamente 8 minutos. Al cabo de uno o dos días, también pueden llegar a la Tierra partículas de alta energía, que producen auroras —luces en los cielos nocturnos polares— y afectan las radio- comunicaciones ([arriba](#)).¹⁵

Durante algunas erupciones solares, puede tener lugar una reacción más violenta: una eyección de masa coronal ([izquierda](#)). Cuando las líneas entrelazadas de los campos magnéticos se cruzan, su energía almacenada detona hacia afuera con una fuerza tremenda. Una CME se produce cuando la fuerza de la energía liberada arroja al espacio una masa de plasma sobrecalentada proveniente de la superficie del Sol.

Las CMEs varían en intensidad y magnitud. Una CME grande puede contener 9×10^{12} kg [20×10^{12} lbm] de materia, que puede desplazarse aceleradamente hacia el espacio con una velocidad de varios millones de kilómetros por hora. La velocidad con la que se desplaza el plasma depende de la descarga de energía original. Una CME de alta energía puede llegar a la Tierra en tan sólo 16 horas, pero el viaje de las descargas de energía más baja puede insumir varios días.



▲ Puntos de Lagrange. Los científicos han identificado cinco puntos (L1 a L5) asociados con la órbita terrestre del Sol, donde los satélites pueden mantener órbitas estables. Estas localizaciones, denominadas puntos de Lagrange (verde), se muestran aquí con las líneas de potencial gravitatorio (líneas grises) establecidas por el sistema Solar-Terrestre. Estas posiciones corresponden a regiones del espacio en las que las fuerzas gravitacionales de atracción (flechas rojas) y repulsión (flechas azules) se encuentran en equilibrio. La sonda de anisotropía de microondas Wilkinson (WMAP) se encuentra ubicada en torno a la posición L2, a una distancia de aproximadamente 1,5 millones de km [930 000 mi] de la Tierra. La nave espacial WMAP se alinea con el eje Sol-Tierra, en forma similar a una órbita geoestacionaria, pero se requieren correcciones del rumbo para mantener su posición relativa. La ilustración no se encuentra en escala. (Ilustración, cortesía del Equipo de Ciencias WMAP de la NASA.)

Con el impacto de una CME, la magnetosfera terrestre se deforma temporariamente y el campo magnético de la Tierra se distorsiona. Durante estas disrupciones, los satélites que orbitan la Tierra se exponen a la presencia de partículas ionizadas, las agujas de las brújulas pueden exhibir un comportamiento errático y en la Tierra en sí pueden inducirse corrientes eléctricas. Estos eventos —las tormentas geomagnéticas— pueden perturbar la infraestructura técnica a escala global. Debido a los riesgos asociados con las tormentas solares y las CMEs, los científicos monitorean el clima espacial en forma constante.

En un período de mínima actividad solar (mínimo solar), la ocurrencia estimada de una CME es de aproximadamente un evento cada cinco días, en tanto que durante un máximo solar, la frecuencia es de aproximadamente 3,5 por día. Si bien parecería que esto pone en peligro el planeta de manera frecuente, la probabilidad de que una CME se dirija hacia la Tierra es pequeña.

En comparación con el Sol y la extensión del sistema solar, la Tierra es diminuta; la mayoría de las tormentas solares se desencadenan inofensivamente lejos de la Tierra o sólo producen un golpe fuerte.

En cambio, las CMEs sí azotan la Tierra. El evento Carrington no es la única CME que impactó la Tierra directamente. En 1984, el Presidente de EUA Ronald Reagan viajó en el avión presidencial Air Force One, a través del Océano Pacífico, durante una tormenta solar. La tormenta afectó las radiocomunicaciones de alta frecuencia durante varias horas y concretamente dejó al avión Air Force One aislado del resto del mundo. En julio de 1989, un sector de Quebec, en Canadá, sufrió un apagón de nueve horas porque una tormenta solar sobrecargó los interruptores de circuitos de la red eléctrica. En América del Norte, se reportaron más de 200 eventos relacionados. La Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos hizo saber que si la tormenta hubiera sido

un evento tipo Carrington, los costos habrían oscilado entre USD 1 y 2 trillones en daños de infraestructura crítica y la recuperación habría requerido entre 4 y 10 años.¹⁶

El pronóstico del clima espacial

Entre las tecnologías que son sensibles a los cambios producidos por las tormentas geomagnéticas en el entorno electromagnético próximo a la Tierra se encuentran los sistemas de comunicación satelital, los sistemas de posicionamiento global (GPS), las redes de computación, las redes eléctricas y las redes de telefonía celular. La civilización se ha vuelto cada vez más dependiente de estas tecnologías, y el clima espacial posee el potencial para perturbarlas. Por consiguiente, la necesidad de contar con pronósticos precisos del clima espacial se ha vuelto imperiosa. El Centro de Predicción del Clima Espacial (SWPC) de la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA) actúa como el principal centro de alerta para los Estados Unidos y proporciona información al Servicio Internacional del Medio Ambiente Espacial (ISES). El ISES —una red de colaboración de informadores del clima espacial— monitorea el clima espacial, proporciona pronósticos y emite alertas desde los centros de alerta regionales. Mediante la utilización de un amplio arreglo de sensores terrestres y espaciales, los científicos monitorean continuamente el medio ambiente espacial para detectar aquellos eventos que podrían impactar la Tierra.

A una distancia de aproximadamente 1,6 millones de km [1 millón de mi] de la Tierra, en la dirección del Sol, un grupo de satélites de la NASA monitorea el Sol y el viento solar en el punto de Lagrange L1 (izquierda).¹⁷ En lo que es análogo a una órbita geoestacionaria, las naves espaciales permanecen en posiciones fijas con la órbita terrestre respecto del Sol. El Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO), el Explorador Avanzado de Composición (ACE) y otros activos espaciales monitorean la superficie del Sol y ras-

15. Comins NF y Kaufmann WJ: *Discovering the Universe*, 9a ed. Ciudad de Nueva York: W. H. Freeman and Company, 2012.

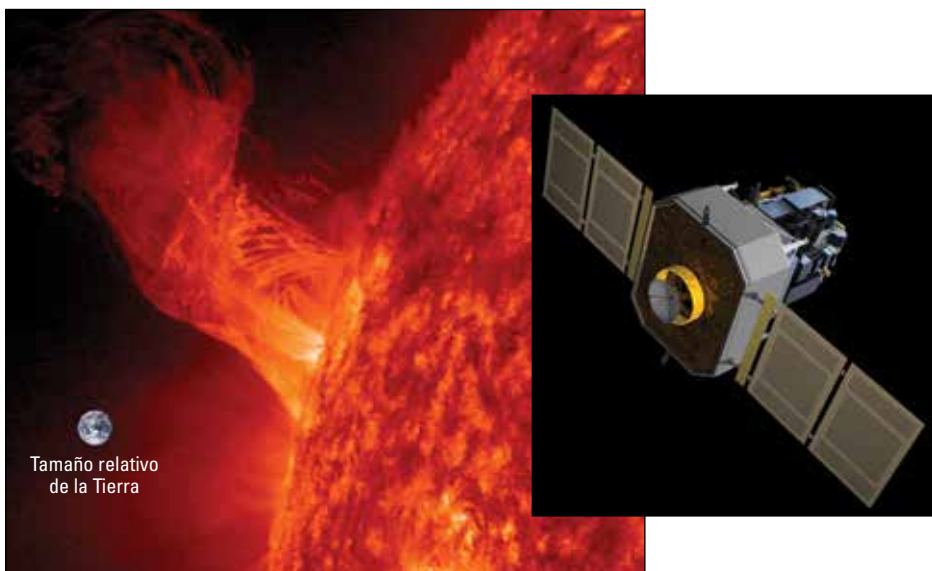
16. Consejo Nacional de Investigación de las Academias Nacionales (National Research Council of the National Academies): "Severe Space Weather Events—Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report," Washington, DC: National Academies Press, Mayo de 2008.

17. Los puntos de Lagrange, que deben su nombre al matemático italo-francés Joseph-Louis Lagrange, son las cinco posiciones en las que una masa pequeña puede mantener un patrón constante y a la vez describir una órbita alrededor de una masa más grande. El punto L1 yace en una línea directa entre la Tierra y el Sol.

Para obtener más información sobre los puntos de Lagrange, consulte: "The Lagrange Points," *National Aeronautics and Space Administration*, http://map.gsfc.nasa.gov/mission/observatory_l2.html (Se accedió el 1º de agosto de 2013).



^ El explorador avanzado de composición (ACE) de la NASA. Lanzado el 25 de agosto de 1997, el satélite ACE, un componente crucial de la flotilla de monitoreo del clima espacial de la NASA, se encuentra situado en el punto L1 de Lagrange. Desde esta posición, el satélite registra la radiación emitida desde el Sol, el sistema solar y la galaxia. Cuando las descargas de material solar se dirigen hacia la Tierra, los instrumentos transportados a bordo del satélite ACE registran el incremento del número de partículas y transmiten esta información a los científicos en la Tierra, que utilizan estos datos para alertar sobre los episodios inminentes relacionados con el clima espacial. Los alertas y las advertencias se transmiten a las organizaciones pertinentes y son anunciados en línea por el centro SWPC de la NOAA. (Ilustración, cortesía de la NASA.)



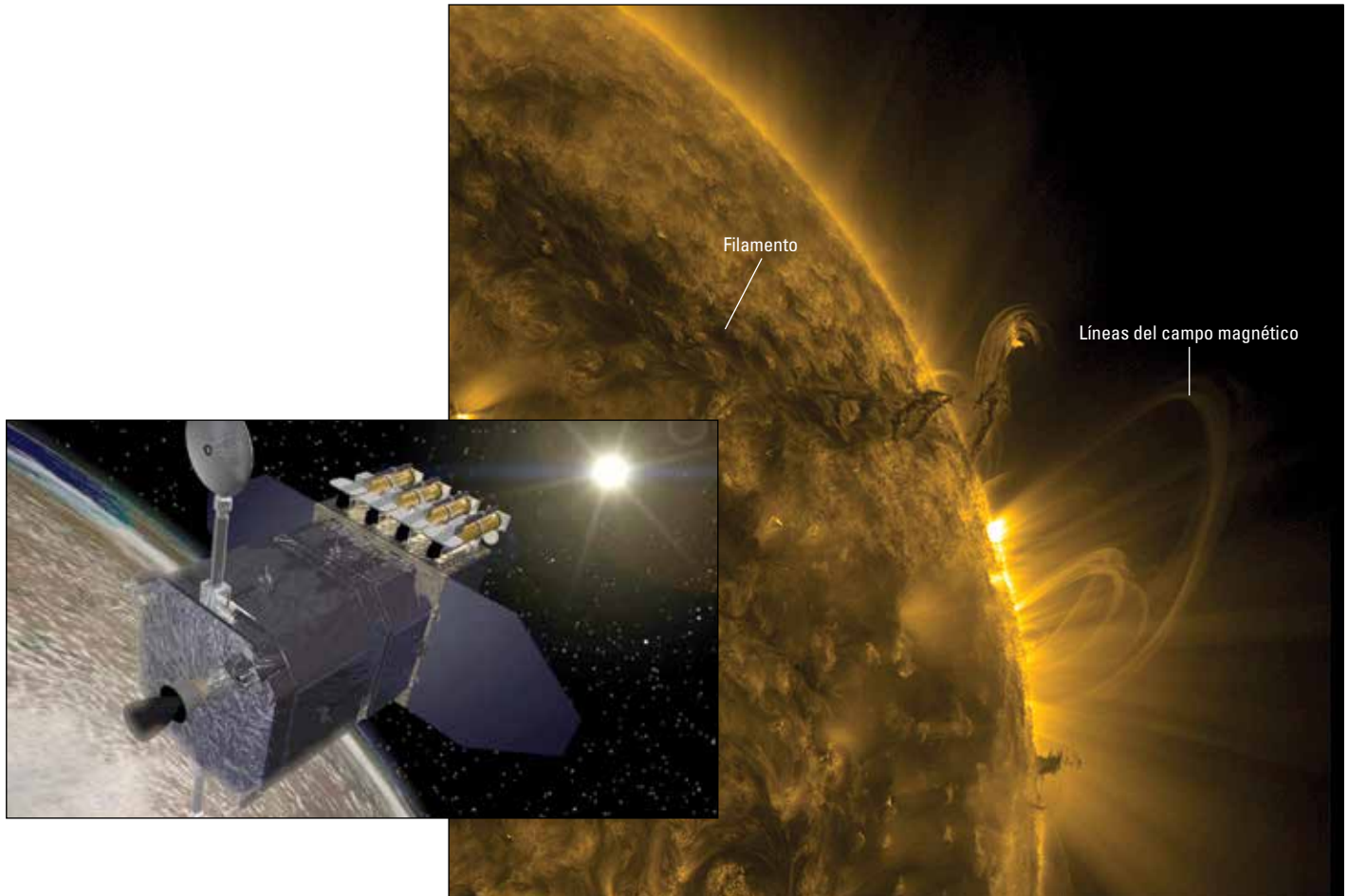
^ Monitoreo del clima espacial con el satélite SOHO. El satélite SOHO (*derecha*) fue lanzado en diciembre de 1995 y constituye un proyecto conjunto entre la Administración Espacial Europea (ESA) y la NASA para estudiar el Sol desde su núcleo profundo hasta la corona exterior y el viento solar. El satélite pesa aproximadamente 17,8 kN [2 toneladas US] y sus paneles solares se extienden a lo largo de 7,6 m [25 pies] aproximadamente. Esta erupción solar (*izquierda*), que duró cuatro horas, fue fotografiada el 31 de diciembre de 2012 con el telescopio de imágenes ultravioletas extremas (EIT) en una emisión de 30,4 nm. La mayor parte del plasma volvió a caer en la superficie del Sol. Se muestra la Tierra como parámetro de escala. (Fotografía solar, cortesía del consorcio EIT del satélite SOHO; imagen satelital, cortesía de Alex Lutkus.)

trean las CMEs desde esta posición.¹⁸ Horas antes del impacto de una CME, los satélites centinelas en el punto L1 pueden anticipar su llegada a la magnetosfera terrestre (*izquierda*). El satélite SOHO, lanzado en el año 1995, permite a los científicos monitorear el Sol en forma constante (*abajo, a la izquierda*). Este satélite es una de las herramientas de pronóstico más confiables de la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA) y proporciona a los científicos datos que los ayudan a pronosticar el clima espacial y estimar las consecuencias potenciales. El coronógrafo espectrométrico de gran ángulo (LASCO), uno de los 12 instrumentos a bordo del satélite SOHO, registra imágenes de las CMEs lanzadas desde el Sol. Mediante la utilización de los datos LASCO, el SWPC tiene dos o tres días de alerta anticipada hasta el inicio de las tormentas geomagnéticas.

El Observatorio de Dinámica Solar (SDO), desarrollado en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA en Greenbelt, Maryland, EUA, y lanzado el 11 de febrero de 2010, forma parte de una misión de la NASA de cinco años de duración para estudiar el Sol y su influencia en el clima espacial (*próxima página*).¹⁹ A bordo del satélite se transportan varios dispositivos, entre los que se encuentran el experimento de variabilidad ultravioleta extremo y el arreglo de generación de imágenes atmosféricas. La herramienta de generación de imágenes heliosísmicas y magnéticas proporciona mapas en tiempo real de los campos magnéticos de la superficie del Sol y mide su intensidad y orientación. Los cambios y la realineación de los campos magnéticos del Sol son indicaciones tempranas de posibles erupciones y resultan cruciales para la predicción del clima espacial y las tormentas geomagnéticas. Los instrumentos transportados a bordo del satélite también pueden caracterizar el interior del Sol, donde se originan los campos magnéticos. Gracias a los datos SDO, los científicos están incrementando sus conocimientos de la actividad solar y el clima espacial.

La amenaza de las tormentas geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas que perturban las actividades llevadas a cabo en la Tierra son infrecuentes, pero sus consecuencias son significativas; las tormentas solares poseen el potencial para afectar todo el planeta. Las tecnologías que definen a la sociedad moderna son susceptibles a los efectos del clima espacial. Las corrientes inducidas pueden perturbar y dañar las redes eléctricas modernas y paralizar los satélites y los sistemas de comunicación. En lo que atañe a la industria del petróleo y el gas, las tormentas geomagnéticas pueden afectar adversamente las



^ El Observatorio de Dinámica Solar (SDO). El satélite SDO (*izquierda*) fue lanzado en febrero de 2010 como parte del programa Viviendo con una Estrella de la NASA, que estudia la variabilidad solar y los impactos potenciales en la Tierra y el espacio. A través del examen de la atmósfera solar en pequeñas escalas y la captación de emisiones con muchas longitudes de onda simultáneamente, se espera que el estudio ayude a determinar cómo se genera y se estructura el campo magnético del Sol y cómo la energía magnética almacenada se convierte y se libera en la heliosfera y el espacio. Esta imagen de las líneas del campo magnético del Sol (*derecha*), captada el 4 de junio de 2013, fue obtenida con luz ultravioleta extrema y resalta las espirales brillantes de las líneas del campo magnético que se elevan en el fondo por encima de una región activa. También puede verse un filamento, que aparece como una región más oscura de la superficie del Sol. (Fotografía e imagen, cortesía del satélite SDO de la NASA.)

líneas de conducción y los sistemas de control, y generar problemas con las operaciones de prospección y geonavegación durante la perforación.

Los efectos más devastadores de las tormentas geomagnéticas provienen de las corrientes inducidas geomagnéticamente (GIC) que fluyen a través de las redes eléctricas. En el nivel más benigno, las GICs pueden producir la desconexión de los interruptores eléctricos, pero los eventos más intensos pueden destruir los transformadores y provocar la fusión de los componentes a través de extensas áreas geográficas.

Las GICs dañan los transformadores ya que generan un estado de saturación cada medio ciclo; el núcleo del transformador se satura magnéticamente en medio de ciclos alternados. Un nivel de tensión inducido por una GIC de tan sólo 1 a 2 voltios por kilómetro o una corriente de 5 amperios es suficiente para producir la saturación de los trans-

formadores en un segundo o aún menos tiempo.²⁰ Los ingenieros han medido corrientes GIC de hasta 184 amperios durante las tormentas geomagnéticas; estos niveles son muy superiores al requerido para sobrecargar las redes eléctricas.²¹ En caso de producirse un incidente GIC severo, el tiempo necesario para restaurar los equipos dañados y volver a poner en marcha grandes poblaciones podría medirse en semanas, meses o incluso años.

Cuando la nube de plasma cargada de una CME colisiona con la atmósfera terrestre, las ondas magnéticas transitorias alteran el campo magnético normalmente estable de la Tierra; los efectos pueden persistir durante varios días. Estas perturbaciones magnéticas pueden producir variaciones de tensión a través de la superficie terrestre, induciendo corrientes eléctricas entre los puntos de conexión a tierra debido a las

diferencias de potencial. Las GICs de este tipo son particularmente perjudiciales para los transformadores que se encuentran normalmente en las centrales eléctricas y en las subestaciones de distribución eléctrica.

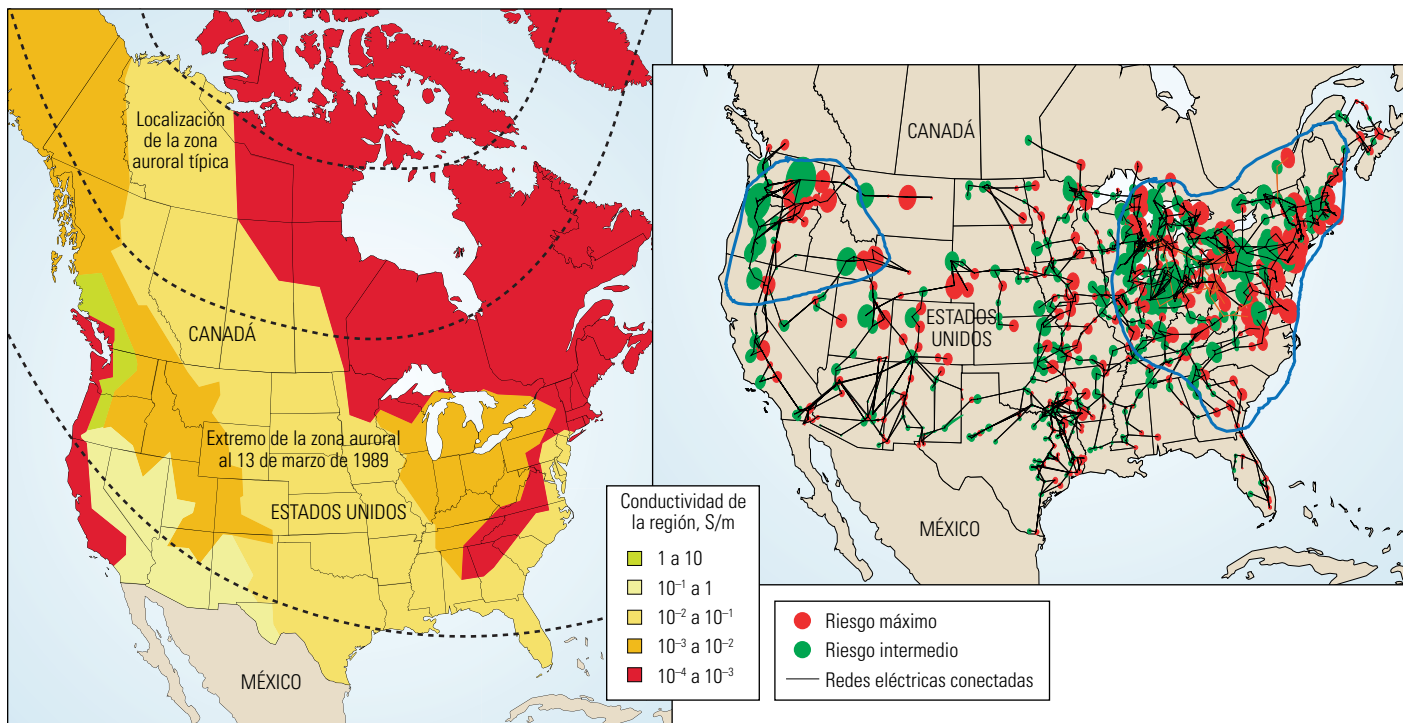
18. Para obtener más información sobre el satélite SOHO, consulte: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/> (Se accedió el 13 de agosto de 2013).

Para obtener más información sobre el satélite ACE, consulte: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/> (Se accedió el 13 de agosto de 2013).

19. Para obtener más información sobre el satélite SDO, consulte: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/> (Se accedió el 13 de agosto de 2013).

20. Para obtener más información sobre los efectos perjudiciales en las redes eléctricas, consulte: Barnes PR, Rzy DT, McConnell BW, Tesche FM y Taylor ER Jr: "Electric Utility Industry Experience with Geomagnetic Disturbances," Oak Ridge, Tennessee, EUA: Oak Ridge National Laboratory, ORNL-6665, septiembre de 1991.

21. Odenwald S: *The 23rd Cycle: Learning to Live with a Stormy Star*. New York City: Columbia University Press, 2001.



^ Susceptibilidad de los sistemas de energía eléctrica. Los sistemas de energía eléctrica de las áreas con menos conductividad del terreno (izquierda, rojo y amarillo más oscuro) son los más vulnerables a los efectos de la actividad geomagnética intensa. La alta resistencia del suelo por debajo de estas áreas facilita el flujo de corrientes inducidas geomagnéticamente (GIC) en las líneas de transmisión eléctrica. Las zonas aurorales para América del Norte son susceptibles a las GICs debido a su proximidad a las regiones polares. (Datos de la Unión Geofísica Americana y del Servicio Geológico de Canadá.) Para EUA, los científicos confeccionaron un mapa basado en los escenarios de los sistemas de energía eléctrica existentes a fin de determinar su vulnerabilidad a las tormentas geomagnéticas (derecha). Si llega a la Tierra una tormenta 10 veces más grande que la del año 1989, que afectó los sistemas de energía eléctrica de Quebec, los sistemas que correrían mayor peligro ya han sido identificados (rojo). Las líneas azules rodean los centros poblacionales más grandes que reciben los servicios de esos sistemas en riesgo. (Adaptado del Consejo Nacional de Investigación de las Academias Nacionales, referencia 16.)

Son numerosos los factores que determinan la susceptibilidad de un sistema dado de redes eléctricas a la perturbación y el daño que producen las tormentas solares. La proximidad de una red de energía eléctrica con respecto a las latitudes polares de la Tierra generalmente incrementa su riesgo de falla o mal funcionamiento. Además, los sitios localizados en regiones de baja conductividad del terreno, tales como las provincias de rocas ígneas, son más susceptibles a los efectos de las GICs (arriba).

La interconectividad de las redes de energía eléctrica puede exacerbar el potencial para la generación de problemas en gran escala. Durante la tormenta solar de julio de 1989, se reportaron numerosos episodios relacionados entre sí, entre los que pueden mencionarse la falla de un transformador en la central nuclear de Salem, en Nueva Jersey, EUA; la pérdida de 150 MW en la New York Power en el momento en que falló la red de energía eléctrica de Quebec; y la New England Power Pool, una asociación de proveedores de energía eléctrica, que perdió 1 410 MW. El servicio provisto a 96 empresas eléctricas de la región de Nueva Inglaterra de EUA quedó interrumpido antes de que las compañías de energía eléctrica pudieran incorporar otras reservas.²²

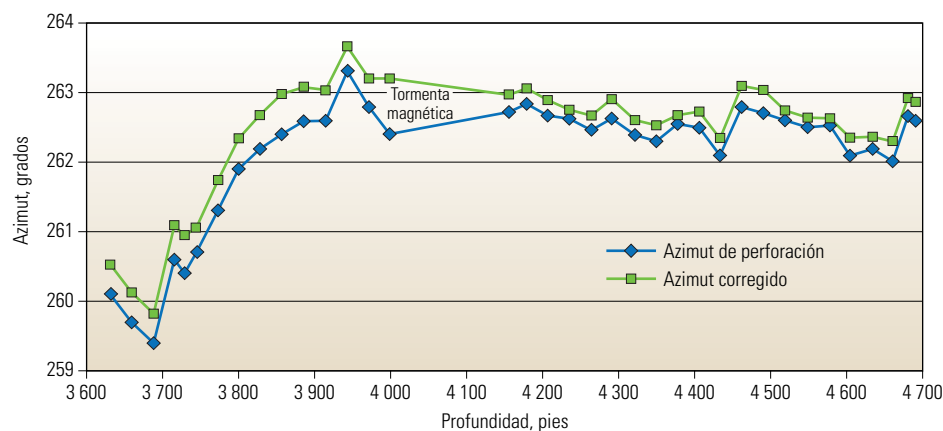
El daño provocado por las partículas energizadas emitidas desde el Sol no se limita a los sistemas terrestres. Los satélites, los vehículos de exploración del espacio y las misiones espaciales tripuladas pueden ser afectados por las emisiones solares, algunas de las cuales son demasiado débiles para ingresar en el campo magnético de la Tierra. Por ejemplo, las CMEs y las erupciones solares débiles pueden producir eventos de protones solares (SPE) que en su mayoría pasan desapercibidos en la superficie terrestre. Sin embargo, los SPEs pueden ocasionar daños significativos en los equipos localizados fuera de la capa de protección de la Tierra.

Cuando las partículas cargadas de alta energía colisionan con los satélites, los electrones generan una carga dieléctrica en las naves espaciales. Esta carga estática puede destruir los tableros de circuitos electrónicos, alterar y mezclar confusamente los datos almacenados y afectar las instrucciones de control guardadas en la memoria de las computadoras. Si bien estos efectos pueden producir la falla completa de un satélite, a menudo es posible corregir el daño con sólo reiniciar las computadoras de abord.

Si los equipos solares que suministran energía a los satélites son azotados por protones de alta energía provenientes de las SPEs y las CMEs, los átomos de silicio de la matriz de las células solares pueden cambiar de posición, lo que incrementa la resistencia interna de las células solares y reduce la producción eléctrica. Un solo evento de tipo tormenta solar puede reducir en varios años la esperanza de vida de los paneles. Si la ocurrencia de eventos con partículas de alta energía dañan los sistemas de control de altitud de los satélites utilizados para corregir su orientación y su posición, un satélite puede perder su control orbital, lo que a su vez puede producir un reingreso prematuro e imprevisto en la atmósfera terrestre.²³ Los satélites desempeñan un rol tan crucial en las comunicaciones, que una pérdida podría afectar los sistemas de televisión, la programación por cable, los servicios de radio, los datos meteorológicos, el servicio de telefonía celular, los servicios bancarios automáticos, los sistemas de líneas aéreas comerciales, los sistemas GPS y los servicios de navegación. Las pérdidas de rutina resultantes del mal funcionamiento de los satélites y de la falla prematura de los activos, provocadas por las tormentas solares, se estiman en miles de millones de dólares estadounidenses.

Es probable que las consecuencias de las tormentas solares no se limiten únicamente a daños eléctricos. La tormenta solar de julio de 1989 produjo la compresión de la magnetosfera terrestre, reduciendo su profundidad habitual de más de 54 000 km [33 500 mi] a menos de 30 000 km [18 640 mi]; es decir, el ámbito de la región geosincrónica de la Tierra donde orbitan los satélites. Cuando la atmósfera terrestre fue bombardeada por partículas energéticas y comprimida por el viento solar, la densidad de la atmósfera superior se incrementó en un factor de 5 a 10. El incremento del arrastre ejercido en los satélites de órbita terrestre baja produjo un decaimiento orbital; el Comando Espacial de la Fuerza Aérea de EUA reportó haber perdido el rastro de más de 1 300 objetos orbitales que cayeron a altitudes más bajas.²⁴ En un evento independiente, acaecido el 13 de marzo de 1989, la NOAA reportó la pérdida del satélite meteorológico GOES-7. Los problemas de circuitos, causados por una lluvia de partículas energizadas, inutilizaron la mayoría de sus sistemas. Los dispositivos de energía solar críticos del satélite GOES-7 perdieron un 50% de su eficiencia. Los ingenieros de la NASA reportaron que muchos otros satélites experimentaron fallas eléctricas que dejaron temporariamente fuera de servicio las computadoras de abordo.²⁵ La tormenta perturbó las comunicaciones en la Tierra y entre los controladores terrestres y los satélites orbitales.

Los sistemas de distribución y las líneas de conducción de petróleo y gas también son vulnerables. Si se produjera una tormenta geomagnética, los operadores podrían perder de inmediato los sis-



Las tormentas geomagnéticas y la perforación direccional. Los perforadores de pozos direccionales utilizan herramientas MWD para determinar la orientación y la posición de la barrena de perforación; estas mediciones dependen de los datos derivados de los magnetómetros y de los acelerómetros. Durante las tormentas geomagnéticas, los magnetómetros pueden arrojar lecturas erróneas. Mientras un operador perforaba un pozo en el Mar del Norte, se produjo una tormenta solar y la medición del azimut de perforación MWD (azul) se vio afectada por la tormenta geomagnética. Los ingenieros corrigieron los datos utilizando una técnica desarrollada por el Servicio Geológico Británico que efectúa ajustes por el clima espacial. Los resultados proporcionaron una localización de pozo más exacta (verde). (Adaptado de Clark y Clarke, referencia 28.)

temas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). Los operadores también deben tener en cuenta los efectos a largo plazo asociados con el incremento de los índices de corrosión de las líneas de conducción. Los sistemas de protección catódica utilizados en las líneas de conducción para minimizar la corrosión poseen un potencial negativo con respecto al terreno. Durante las tormentas solares, los eventos de tipo GIC reducen la efectividad de la protección catódica de las líneas de conducción, lo que puede incrementar los efectos corrosivos en el largo plazo.²⁶ El nivel de impacto está influenciado por las propiedades específicas de los materiales de construcción de las líneas de conducción, sus diámetros, curvas, ramificaciones, bridas aisladas y la integridad de los materiales aislantes.

Los operadores también manifiestan preocupación por el gran porcentaje de pozos de petróleo y gas modernos que son perforados direccionalmente. Los perforadores deben utilizar planes de trayectorias estrictos para controlar la posición del pozo respecto del yacimiento y evitar la colisión con pozos cercanos. Las operaciones de perforación direccional utilizan instrumentos que obtienen mediciones en tiempo real para determinar y rastrear la localización del arreglo de perforación en el subsuelo. Los magnetómetros triaxiales miden la intensidad del campo magnético de la Tierra y los acelerómetros triaxiales se utilizan para corregir los datos obtenidos con los magnetómetros en cuanto a posición, movimiento y orientación. Los girocompases —que utilizan giroscopios y la rotación de la Tierra para hallar el norte geográ-

fico— también son desplegados con cable para ejecutar levantamientos direccionales precisos.²⁷ Las perturbaciones del campo magnético terrestre causadas por las corrientes eléctricas que fluyen en la ionosfera y la magnetosfera pueden afectar estas mediciones (arriba). Las variaciones del campo magnético terrestre también pueden inducir corrientes especulares en la Tierra y los océanos. Estos campos magnéticos externos son afectados por el viento solar, el campo magnético interplanetario y el núcleo magnético de la Tierra. Los ingenieros especialistas en posicionamiento de pozos deben tener plena conciencia de las perturbaciones magnéticas y las variaciones del campo geomagnético para asegurar el posicionamiento correcto de los pozos.²⁸ (Véase “Referenciamiento geomagnético: La brújula en tiempo real para los perforadores direccionales, página 34.)

El clima terrestre también es sensible al clima espacial y a las emisiones de partículas provenientes del Sol. Si bien el Sol parece ser una fuente de energía constante, los científicos han demostrado que la producción de la energía básica del Sol varía hasta en un 0,5% en plazos cortos y en un 0,1% a lo largo del ciclo de manchas solares de 11 años de duración. Consideradas significativas por los científicos atmosféricos, estas fluctuaciones pueden afectar el clima terrestre. Las variaciones producidas en el desarrollo vegetal se han correlacionado con el ciclo de 11 años de las manchas solares y con el período magnético del Sol de 22 años de duración, como lo indican los registros de los anillos de los árboles.²⁹

22. North American Electric Reliability Corporation (Corporación de Fiabilidad Eléctrica de Norteamérica) (NERC): “Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power Systems,” Atlanta, Georgia, EUA: NERC (Febrero de 2012).

23. Odenwald, referencia 21.

24. Alexander, referencia 14.

25. Odenwald, referencia 21.

26. Grupo de Servicios Financieros de Zurich: “Solar Storms: Potential Impact on Pipelines,” <http://www.zurich.com/internet/main/SiteCollectionDocuments/insight/solar-storms-impact-on-pipelines.pdf> (Se accedió el 5 de septiembre de 2013).

27. Ekseth R y Weston J: “Wellbore Positions Obtained While Drilling by the Most Advanced Magnetic Surveying Methods May Be Less Accurate than Predicted,” artículo IADC/SPE 128217, presentado en la Conferencia y Exhibición de Perforación de las IADC/SPE, Nueva Orleans, 2 al 4 de febrero de 2010.

28. Clark TDG y Clarke E: “2001 Space Weather Services for the Offshore Drilling Industry,” presentación de pósters en *Proceedings from the ESA Space Weather Workshop: Looking Towards a Future European Space Weather Program*. Noordwijk, Países Bajos, 17 al 19 de diciembre de 2001.

29. Para conocer una investigación reciente sobre los efectos de los ciclos solares en el clima terrestre, consulte: Meehl GA, Arblaster JM, Matthes K, Sassi F y van Loon H: “Amplifying the Pacific Climate System Response to a Small 11-Year Solar Cycle Forcing,” *Science* 325, no. 5944 (Agosto de 2009): 1114–1118.

Si bien el ciclo solar se ha mantenido relativamente estable a lo largo de los últimos 300 años, en el siglo XVII, durante un período de 70 años, se observaron algunas manchas solares. Este período, denominado Mínimo de Maunder, coincidió con el de la Pequeña Edad de Hielo que tuvo lugar en Europa. Algunos científicos han teorizado acerca de que este fenómeno constituye una evidencia de la conexión climática existente entre el Sol y la Tierra (abajo).³⁰ Recientemente, algunos científicos propusieron una relación más directa entre el clima terrestre y la variabilidad solar. Por ejemplo, los vientos de la estratosfera cercanos al ecuador terrestre cambian de dirección con cada ciclo solar. Existen estudios en ejecución para determinar cómo esta inversión de la dirección del viento afecta los patrones de circulación globales, el tiempo y el clima.³¹

El próximo gran evento

Aunque infrecuentes, las tormentas geomagnéticas pueden afectar de manera severa las infraestructuras críticas de la sociedad moderna. Dado que en nuestra economía global interconectada cada vez existe una mayor dependencia de tecnologías

susceptibles, las tormentas solares poseen el potencial para hacer estragos a escala mundial. La comunidad científica está trabajando para mejorar el conocimiento de los aspectos técnicos de esta amenaza y de las vulnerabilidades asociadas en varios segmentos industriales para manejar mejor los riesgos.

La ciencia del pronóstico del clima espacial aún está dando sus primeros pasos. Los científicos no pueden pronosticar con precisión el número de manchas solares antes del inicio de un ciclo solar o predecir la actividad de las tormentas geomagnéticas, si bien algunas organizaciones están realizando intentos en este sentido. Una década atrás, antes del inicio del ciclo 24, algunos pronosticadores predijeron el máximo solar más intenso en 50 años y pronosticaron además que el ciclo podía generar tormentas geomagnéticas devastadoras.³² Pero esos pronósticos fueron erróneos.

La actividad de las manchas solares del ciclo 24 ha sido la menos intensa en más de 100 años, apenas la mitad del nivel de actividad del ciclo 23. Algunos científicos conjeturan que el Sol está ingresando en otro período de quietud similar al Mínimo de Maunder y se plantean ciertas preguntas: ¿Los efectos del clima global serán similares a los de la Pequeña Edad de Hielo acaecida durante el Mínimo de Maunder o no existe una correlación directa entre las manchas solares y el clima terrestre? ¿Es sólo la calma que precede a

la tormenta? Hasta en un ciclo solar de amplitud relativamente baja, se puede desencadenar una CME que produzca un impacto directo en el planeta Tierra.

La probabilidad de recurrencia del evento Carrington de 1859 se estima en 1 cada 500 años y la probabilidad de recurrencia de la tormenta de Quebec de 1989 se calcula en 1 cada 150 años.³³ Si bien los científicos, ingenieros y administradores de riesgos manifiestan preocupación en torno al daño potencial de otro evento del tipo Carrington, hoy cuentan con muchas más herramientas a su disposición para ayudarlos a predecir este tipo de evento y reaccionar cuando suceda. Estas herramientas permiten que la comunidad científica se mantenga alerta con respecto a la actividad del Sol y esté preparada para la acción.

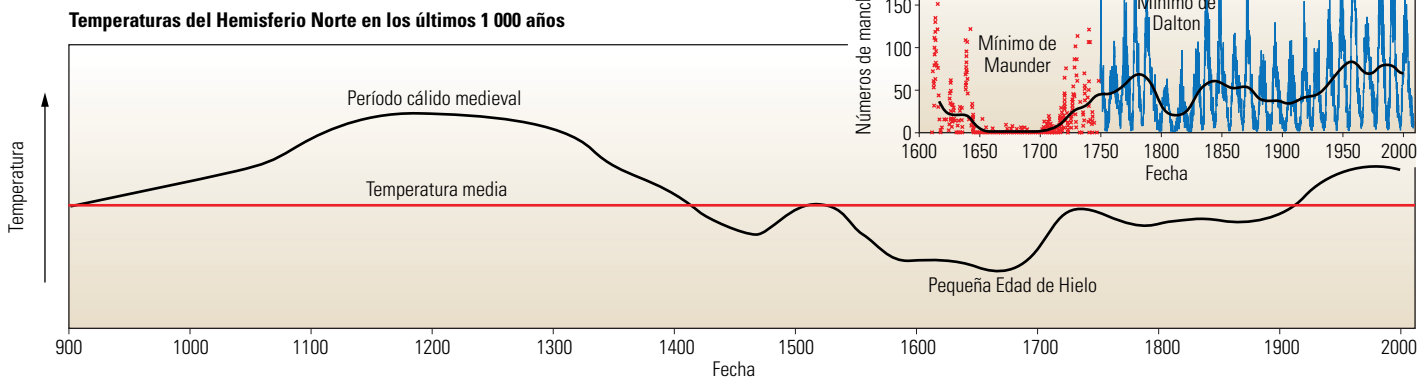
La lista de consecuencias de las tormentas solares crece en forma proporcional a nuestra dependencia de los sistemas de tecnologías electromagnéticamente sensibles. El SWPC y el ISES, que trabajan en colaboración con numerosos socios nacionales e internacionales, continúan desarrollando capacidades mejoradas de monitoreo y modelado del clima espacial. Los avances de los sistemas de adquisición de datos terrestres y satelitales, junto con el modelado y la mayor comprensión de nuestra relación entrelazada con el Sol, prometen reducir nuestro riesgo de exposición cuando la Tierra se encuentre directamente en el trayecto de la próxima gran tormenta solar. —TS

30. Weng H: "Impacts of Multi-Scale Solar Activity on Climate. Part I: Atmospheric Circulation Patterns and Climate Extremes," *Advances in Atmospheric Sciences* 29, no. 4 (Julio de 2012): 867–886.

31. Weng H: "Impacts of Multi-Scale Solar Activity on Climate. Part II: Dominant Timescales in Decadal-Centennial Climate Variability," *Advances in Atmospheric Sciences* 29, no. 4 (Julio de 2012): 887–908.

32. "Solar Storm Warning," NASA (15 de marzo de 2006), http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/10mar_stormwarning.html (Se accedió el 18 de agosto de 2013).

33. Zurich Financial Services Group (Grupo de Servicios Financieros de Zurich), referencia 26.



Los ciclos de manchas solares y el clima terrestre. Los científicos no han llegado a un consenso con respecto a los efectos de la actividad solar en el tiempo y el clima de la Tierra. No obstante, la mayoría coincide en que el Sol es la fuente de calor más importante para la Tierra, y en consecuencia, el factor de control principal del clima. Algunos científicos han tratado de establecer una correlación entre la ausencia de manchas solares durante el Mínimo de Maunder (*extremo superior*) —un período de 70 años que tuvo lugar en el siglo XVII— y la Pequeña Edad de Hielo que afectó gran parte de la Tierra, especialmente Europa (*extremo inferior*). El Mínimo de Dalton, otro período de escasas ocurrencias de manchas solares acaecido alrededor del año 1800, también coincidió con la existencia de temperaturas globales más bajas que las medias. El incremento del número promedio total de manchas solares (negro), a partir del siglo XX, parece correlacionarse con incrementos de las temperaturas globales. Si bien un examen minucioso de los datos indica que otros factores producen las variaciones de temperatura, tales como las erupciones volcánicas y los cambios en los niveles de CO₂, algunos observadores proponen la actividad solar como uno de los componentes principales de las fluctuaciones de la temperatura y el clima. La actividad del Ciclo Solar 24 es comparable con la de los ciclos registrados en el siglo XIX, más que con los del siglo XX. Dentro de un siglo, los científicos podrán mirar atrás y desacreditar o convalidar la relación causal entre las manchas solares y el cambio climático.