

Juan Américo González Esparza y Eduardo Pérez Tijerina

Ciencia espacial y protección civil

Los eventos de la actividad solar pueden afectar la operación y confiabilidad de los sistemas tecnológicos críticos: satélites, telecomunicaciones, sistemas de posicionamiento global, así como redes de generación y distribución de energía eléctrica. Dado que se trata de un tema de seguridad y soberanía, en 2016 se creó el Laboratorio Nacional de Clima Espacial con el objetivo de alertar, monitorear y estudiar los efectos del clima espacial en México.

Imaginemos que un día nos despertamos y en todas las cadenas de televisión, los noticiarios de radio de la mañana y las redes sociales se difunde un comunicado de prensa que anuncia, con alarma, que acaba de ocurrir una tormenta solar. En México, el Servicio de Clima Espacial informa que a las 6:35 am, hora local del centro, los satélites GOES de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA)¹ de Estados Unidos de América detectaron una enorme explosión en la superficie del Sol, la más intensa que se ha registrado en los últimos 30 años. Las observaciones fueron confirmadas por dos sondas de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA); las cámaras del satélite SDO² fotografiaron el sitio de la explosión, y el telescopio del satélite SOHO³ captó la eyección de una gigantesca nube de material solar que se dirige hacia la Tierra a más de 3 000 km por segundo.

A las 6:50 am se registran los primeros efectos de la explosión solar en diferentes regiones del mundo; se notifican las primeras pérdidas de satélites y diversas fallas en los sistemas de telecomunicaciones. Por ello, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) emite un aviso para que los vuelos se restrinjan y todos los aviones que están en el aire aterricen.

¹ Véase: <www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>.

² Véase: <sdo.gsfc.nasa.gov>.

³ Véase: <sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/c3/512/>.





El Sistema Nacional de Protección Civil en México anuncia que emitirá comunicados constantemente para informar acerca de la evolución del fenómeno. Todos los servicios de clima espacial de varios países se encuentran en estado de alerta máxima e intercambian información y datos. Siguiendo sus protocolos, notifican a sus respectivas autoridades de protección civil y a sus jefes de gobierno. Existe el temor de que la nube de material solar tenga las características precisas para generar el mayor daño posible, que se trate de una “tormenta solar perfecta”. En ese caso, los daños serían globales y catastróficos.

Diecisiete horas más tarde del primer anuncio, a las 11:30 pm, los servicios de clima espacial reciben los datos del satélite *DSCVR* de la NOAA⁴ (el cual está ubicado en la línea Sol-Tierra) y confirman el peor escenario posible: la nube tiene las características de una tormenta solar perfecta. De inmediato se activan los protocolos de emergencia. Veinte minutos después, 11:50 pm, la nube solar impacta el campo magnético de la Tierra. Se reportan *más fallas de satélites* y sistemas de telecomunicaciones, además de que todas las tecnologías que utilizan sistemas de posicionamiento global (GPS) presentan errores. Esa noche, en varios países, incluido México, se observa la aparición de una intensa aurora boreal roja. Un par de horas después de la media noche nos enteramos de la pérdida de energía eléctrica en muchas regiones de la Tierra. No hay internet. No hay banca electrónica. Se interrumpen los suministros de agua, gas y gasolina. Hay un apagón global...

Este escenario imaginario y catastrófico, que bien pudiera ser el guion de una película de Hollywood, es un tema que nos preocupa con mucha seriedad a los científicos que nos dedicamos a estudiar el Sol y sus efectos sobre nuestro planeta.

El Sol y las tormentas solares

El Sol es la principal fuente de energía para toda la vida en la Tierra. De las cien mil millones de es-

trellas que existen tan sólo en nuestra galaxia, a ninguna otra la podemos observar con tanto detalle y ninguna influye tanto sobre nuestra supervivencia.

Nuestra estrella más cercana (a 150 millones de km) es un objeto fascinante, lleno de dinámica, complejidad y belleza. Es una gigantesca bola de gas cuya superficie tiene una temperatura de 6000 K y su interior tiene un motor nuclear que genera toda su energía. El Sol gira (rotación) y tarda 27 días en completar una vuelta.

En la superficie de nuestra estrella aparecen regiones oscuras, las cuales llamamos manchas solares. Éstas concentran campos magnéticos muy intensos que, por la rotación del Sol, se pueden tensar y empujar (véase la Figura 1). La dinámica de las manchas solares provoca que se almacene energía magnética y puedan producirse explosiones.

El número y tamaño de las manchas solares tiene un comportamiento cíclico de aproximadamente 11 años; no están ahí todo el tiempo. Por ejemplo, en 2019 y 2020, la superficie del Sol ha aparecido prácticamente lisa, sin manchas, y con muy pocas explosiones. Esta etapa se conoce como el mínimo del ciclo solar. Sin embargo, en cuatro o cinco años (2024-2025), el Sol va a cambiar, comenzarán a surgir manchas y ocurrirán tormentas más frecuentes e

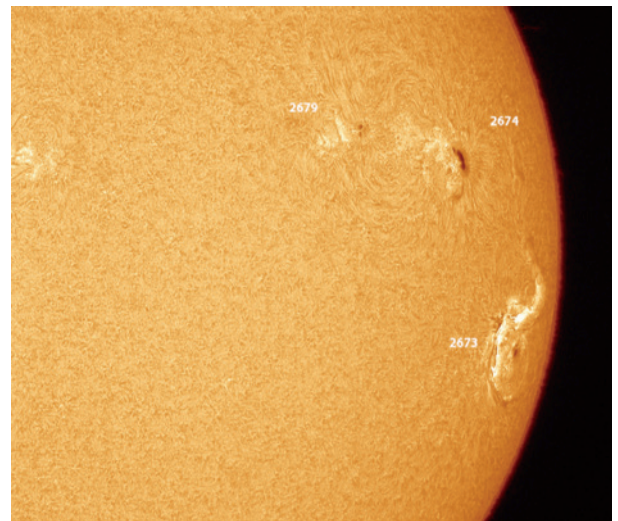


Figura 1. Imagen solar en H-Alpha, tomada el 8 de septiembre de 2017. La fotografía muestra la cromosfera solar y las regiones activas 2673, 2674, y 2679. Cortesía del Laboratorio de Ciencias Geoespaciales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores de Morelia, UNAM.

⁴ Véase: <www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>.



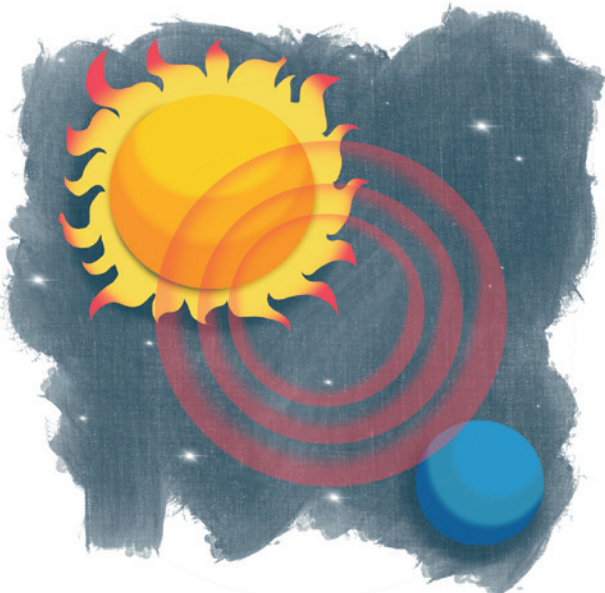
Figura 2. Imagen de una aurora boreal. Cortesía de César Cantú.

intensas; estaremos entonces en el siguiente máximo del ciclo.

Cuando ocurre una tormenta solar, hay un súbito destello de luz que dura algunos minutos, la materia que está cerca de la explosión se calienta, se aceleran las partículas y se desprende una gigantesca nube de material solar, la cual comienza a propagarse por el espacio. Algunas de estas nubes pasan por la órbita de la Tierra.

Sin embargo, nuestro planeta tiene una protección intrínseca que impide que las partículas de esas nubes de material solar penetren a la atmósfera. Esta protección se debe al campo magnético de la Tie-

rra, el cual ha sido un factor muy importante para el desarrollo de la vida. No obstante, esta coraza no es infalible, y en ocasiones las nubes solares pueden romperla por algunas horas. En ese caso, se abre una compuerta y las partículas solares entran a nuestra atmósfera. Dichas partículas producen las auroras boreales y australes (véase la Figura 2), además de que generan una serie de fenómenos físicos que afectan la operación y confiabilidad de los sistemas tecnológicos que resultan críticos para la sociedad moderna: satélites, telecomunicaciones, GPS y redes de generación y distribución de energía eléctrica. Todas estas tecnologías son vulnerables a los efectos de las tormentas solares (véase la Figura 3).



Evento Carrington

■ La Tierra ya ha sufrido, en su historia reciente, los estragos de una tormenta solar perfecta. Esto ocurrió hace 161 años y se conoce como el evento Carrington. La mañana del 1 de septiembre de 1859, el astrónomo británico Richard Carrington realizaba su observación diaria; desde hacía varias decenas de meses registraba todos los días las manchas solares y estudiaba su evolución. A las 11:00 am, mientras proyectaba sobre una hoja de papel la imagen de la superficie solar captada por su telescopio y terminaba su dibujo, ocurrió una poderosa explosión en el Sol. Carrington observó un destello de luz sobre la imagen oscura de la mancha que duró aproximada-



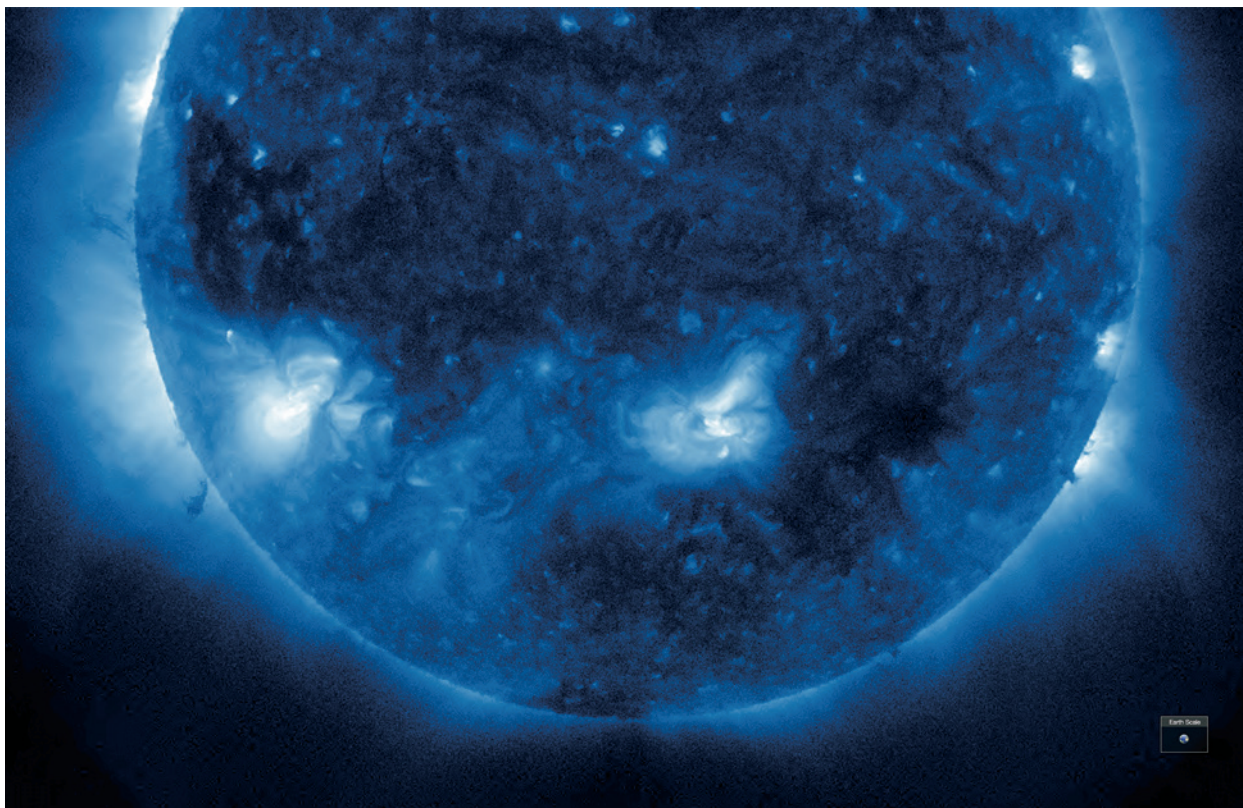
mente cinco minutos. Sin saberlo en ese momento, acababa de observar la primera tormenta solar captada por un telescopio.

Diecisiete horas después del estallido solar, en la madrugada del 2 de septiembre de 1859, se produjo el despliegue de auroras boreales más extenso del cual se tiene registro en la historia reciente. El cielo nocturno se iluminó de rojo. La aurora del evento Carrington cubrió todo el planeta; en México encontramos reportes de al menos siete sitios, en diferentes regiones del país, donde se observó este asom-

broso fenómeno natural. Es importante hacer notar que no hubo noticias de fallecimientos inusuales o cambios bruscos de temperatura. No está demostrado que las tormentas solares tengan efectos directos sobre la salud de los seres vivos. La enorme distancia entre la Tierra y el Sol, la corta duración del estallido, así como la atmósfera y el campo magnético terrestre nos protegen. Además, la razón por la cual tampoco se reportaron grandes daños o pérdidas económicas asociadas al evento Carrington es muy simple: en el siglo XIX no había satélites ni sistemas



Figura 3. Infografía "Clima espacial" del Sistema Nacional de Protección Civil.



Imágen del satélite Solar Dynamics Observatory. NASA/SDO. Tomada de: www.Helioviewer.org

de telecomunicaciones, GPS o redes de generación y transmisión de energía eléctrica. Estos desarrollos tecnológicos no se habían inventado todavía.

En otro evento muchos años más tarde, en julio de 2012, ocurrió una poderosa tormenta solar cuya nube fue captada por la nave espacial *STEREO* de la NASA. Aunque tenía las características de una tormenta solar perfecta, afortunadamente, la nave en ese momento estaba muy lejos de la Tierra y la nube no pasó cerca de nuestro planeta. ¡Nos salvamos!

■ Debemos estar preparados

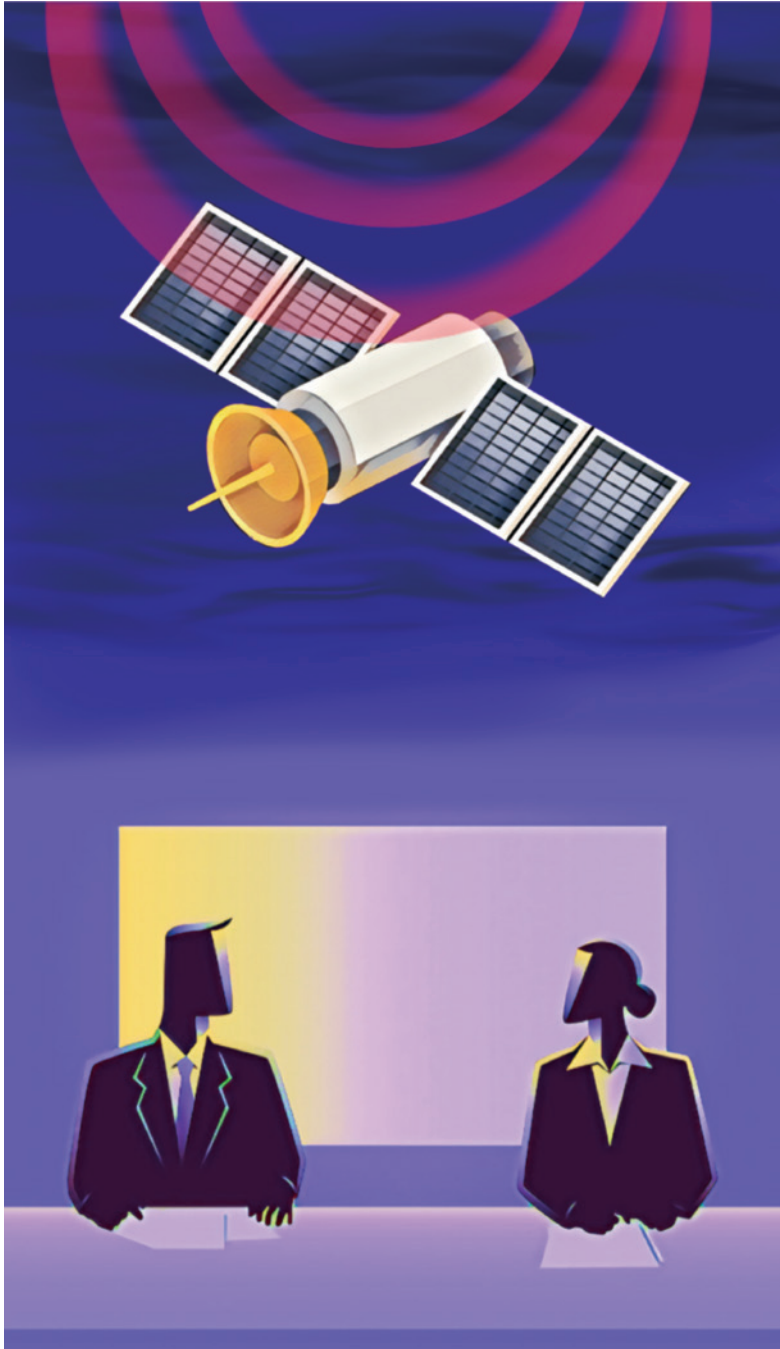
■ Los efectos de una tormenta solar severa constituyen una amenaza a la seguridad de todo el planeta. ¿Qué tienen que hacer los países ante este fenómeno natural que pone en riesgo la confiabilidad y operación de los servicios tecnológicos críticos para nuestra sociedad? Diferentes organismos en el mundo fomentan la colaboración científica internacional para el estudio y monitoreo del clima espacial. In-

cluso, varios gobiernos han empezado a desarrollar estrategias para mitigar los posibles daños a sus sistemas tecnológicos, así como protocolos internos para incrementar la resiliencia ante estos fenómenos naturales.

En México se modificó la Ley General de Protección Civil en 2014 y se incluyeron las tormentas solares entre los riesgos que pueden amenazar la seguridad nacional. Ese mismo año se creó el Servicio de Clima Espacial del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)⁵ y en 2016 se estableció el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE).⁶ En 2015 se conformó el grupo de trabajo de Clima Espacial en México, convocado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y el Instituto de Geofísica de la UNAM. El grupo trabaja con representantes

⁵ Véase: <www.sciesmex.unam.mx>.

⁶ Véase: <www.lance.unam.mx>.



de diferentes agencias para establecer un sistema de alerta y un protocolo de reacción con el objetivo de incrementar la resiliencia del país ante estos fenómenos naturales.

En el LANCE participan cinco catedráticos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) e investigadores de la UNAM y de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). El labora-

torio desarrolla diferentes investigaciones en física solar, medio interplanetario, rayos cósmicos, ionosfera y campo geomagnético.

Asimismo, el LANCE coordina y opera una red de instrumentos en tierra para medir los efectos de las tormentas solares sobre el territorio mexicano (véase la Figura 4). Estos datos son importantes en términos de soberanía y seguridad nacional, ya que indican la confiabilidad de operación de los sistemas satelitales, de telecomunicaciones y GPS; además, definen la vulnerabilidad de la red eléctrica nacional ante las tormentas magnéticas. En mayo de 2019 el LANCE certificó bajo la norma internacional ISO 9001 el servicio de alerta de clima espacial que brinda al Sistema Nacional de Protección Civil; este sistema de alerta temprana da aviso al Cenapred cuando ocurre un evento de clima espacial que puede afectar significativamente al país.

El Plan Nacional de Desarrollo (2019-2024) incluye entre sus objetivos la construcción de un país más resiliente, sostenible y seguro. México necesita desarrollar una gestión integral de riesgos que incluya, entre otras acciones, la investigación del Sol, el monitoreo de su actividad y el establecimiento de planes de prevención. El objetivo es incrementar nuestra capacidad de respuesta ante la amenaza de este fenómeno natural (véase la Figura 5). Así como en el caso de los sismos, huracanes e inundaciones, no podemos predecir cuándo va a ocurrir la próxima



Figura 4. Antena del observatorio MEXART (Mexican Array Radiotelescope) en Coeneo, Michoacán, instrumento principal del Laboratorio Nacional de Clima Espacial.



Figura 5. Discusión de un evento solar en el cuarto de situaciones del Laboratorio Nacional de Clima Espacial.

tormenta solar perfecta; puede ser en cien años o puede ocurrir dentro de cinco o seis, no lo sabemos. Lo que tenemos seguro es que va a ocurrir, y por ello debemos estar preparados.

Juan Américo González Esparza

Laboratorio Nacional de Clima Espacial, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
americo@igeofisica.unam.mx

Eduardo Pérez Tijerina

Laboratorio Nacional de Clima Espacial, Facultad de Físico-Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
eduardo.perezjt@gmail.com

Lecturas recomendadas

- Carrington, R. C. (1860), "Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 20: 13-15.
- Cuevas-Cardona, C. y J. A. González-Esparza (2018), "El evento Carrington: la tormenta solar perfecta", *¿Cómo ves?*, 241:24.
- Executive Office of the President of the United States (2019), *National Space Weather Strategy and Action Plan*. Disponible en: <www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/03/National-Space-Weather-Strategy-and-Action-Plan-2019.pdf>, consultado el 12 de mayo de 2020.
- Giegengack, R. (2015), "The Carrington coronal mass ejection of 1859", *Proceedings of the American Philosophical Society*, 159(4):421-433.
- González-Esparza, J. A. (2018), "Servicio de Clima Espacial", *Ciencia y Desarrollo*, 295:36.
- González-Esparza, J. A. et al. (2017), "Mexican Space Weather Service (SCiESMEX)", *Space Weather*, 15(1):3-11. Disponible en: <doi.org/10.1002/2016SW001496>, consultado el 12 de mayo de 2020.
- TEDx Talks (2019), "LA TORMENTA SOLAR PERFECTA | Juan Américo González Esparza | TEDxUniversidadMichoacana", *YouTube*. Disponible en: <youtu.be/ejcbkegEZv4>, consultado el 12 de mayo de 2020.