

LA TORMENTA SOLAR PERFECTA

Meteorología del espacio y sus aplicaciones

Juan Américo González Esparza



La tormenta solar perfecta

ENES
MORELIA

10
años
(2011-2021)

Geofísica
UNAM

LANCE
Laboratorio Nacional
de Clima Espacial

Publicaciones
Fomento
Editorial

Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia
Instituto de Geofísica
Laboratorio Nacional de Clima Espacial
Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial

La tormenta solar perfecta

Meteorología del espacio y sus aplicaciones

Juan Américo González Esparza



México, 2022
Universidad Nacional Autónoma de México

*A mi Padre,
quien siempre me comparte su pasión por la física.*

ÍNDICE

8	Agradecimientos
9	Índice de acrónimos
10	Prefacio
10	La tormenta solar perfecta: cronología de un desastre global
13	Objetivos del libro
14	CAPÍTULO 1. El Sol, nuestra estrella
16	1.1. Las capas del Sol y el horno nuclear
18	1.2. Capas externas del Sol
23	1.3. El viento solar y el modelo de Parker
27	1.4. El ciclo solar
30	1.5. Las tormentas solares
35	CAPÍTULO 2. El entorno cercano de la Tierra
38	2.1. La magnetósfera, nuestro escudo magnético
40	2.2. La ionósfera, nuestro escudo atmosférico
42	2.3. Las tormentas geomagnéticas
46	CAPÍTULO 3. El clima espacial
46	3.1. El estudio del Sol y sus efectos sobre la Tierra
47	3.2. Las auroras polares
50	3.3. La vulnerabilidad de los sistemas tecnológicos
52	3.4. ¿Por qué se afectan los sistemas tecnológicos?
57	3.5. Efectos de las tormentas solares sobre la biota
58	3.6. Asunto de seguridad nacional
60	CAPÍTULO 4. El evento Carrington y otras tormentas solares
60	4.1. La tormenta solar perfecta: el evento Carrington de 1859
64	4.2. ¿Qué es una tormenta solar perfecta?
65	4.3. Tormentas solares severas en la historia reciente
69	4.4. La próxima tormenta solar perfecta
71	CAPÍTULO 5. Planes de acción. ¿Qué debemos hacer?
71	5.1. ¿Qué podemos hacer nosotros ante las tormentas solares? ¿Qué deben hacer nuestros gobiernos para protegernos?

73	5.2. El estudio del clima espacial: satélites y redes de instrumentos en tierra
76	5.3. Monitoreo de la actividad solar y servicios de clima espacial
77	5.4. Planes de acción de los gobiernos para incrementar la resiliencia de sistemas críticos
78	5.5. Grupo de expertos de clima espacial de las Naciones Unidas
79	CAPÍTULO 6. ¿Qué hacemos en México?
79	6.1. Breve historia de las ciencias espaciales en México: de los rayos cósmicos al clima espacial
80	6.2. Ley General de Protección Civil
82	6.3. Servicio de Clima Espacial Mexicano (SCiESMEX)
83	6.4. Grupo de Trabajo Clima Espacial en México
84	6.5. Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE)
86	6.6. Breve reseña de mi experiencia personal
89	Conclusiones
89	Un día después de la tormenta solar perfecta
90	¿Qué debemos hacer ante una tormenta solar?
92	Apéndice
92	Sistemas de alertamiento
93	Sistema de escalas de la NOAA
94	a) Eventos G (tormentas geomagnéticas)
99	b) Eventos S (tormentas de radiación corpuscular solar)
103	c) Eventos R (bloqueos de señales de radio)
105	Semáforo del Servicio de Clima Espacial Mexicano
110	Glosario
113	Lista de tablas y figuras
115	Bibliografía

Agradecimientos

A TODO EL EQUIPO DE TRABAJO del Laboratorio Nacional de Clima Espacial: Ernesto Aguilar, Ernesto Andrade, Pablo Villanueva, Julio Mejía, Pedro Corona, Víctor de la Luz, Luis Xavier González, Maria Sergeeva, José Juan González, Mario Rodríguez, Esmeralda Romero, Verónica Ontiveros, Oyuki Chang, Ramón Caraballo, José Valdés, Blanca Mendoza, Eduardo Pérez Tijerina.

A Horacio Cano y al Departamento de la Comunicación de la Ciencia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por haberme invitado, en mayo de 2019, a participar en un evento TEDX. La plática que impartí (<https://www.youtube.com/watch?v=ejcbkegEZv4>) fue la inspiración para escribir este libro.

A mis estudiantes, que leyeron versiones preliminares del texto.

A Julieta Piña, por la revisión de estilo.

Al Instituto de Geofísica y a la Escuela Nacional de Estudios Superiores campus Morelia de la UNAM. Al Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), por tomar el tema de clima espacial en la agenda de la gestión integral de riesgos en México. A la Agencia Espacial Mexicana (AEM), por apoyar la participación de México en el grupo de expertos de clima espacial del Subcomité Técnico-Científico de la Oficina para el Uso Pacífico del Espacio Ultraterrestre de las Naciones Unidas.

A mi familia, Tamara, Zoe e Iker, que me han acompañado durante todos estos años en el desarrollo del proyecto del estudio del clima espacial en México.

Índice de acrónimos

AEM	Agencia Espacial Mexicana
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
DSCOVR	Deep Space Climate Observatory (satélite de la NOAA)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOES	Geostationary Satellite Server (flotilla de satélites de la NOAA)
ICAO	International Civil Aviation Organization
IGF-UNAM	Instituto de Geofísica de la UNAM
ISES	International Space Environment Services
LANCE	Laboratorio Nacional de Clima Espacial
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SCIESMEX	Servicio de Clima Espacial Mexicano
SDO	Solar Dynamic Observatory (misión de la NASA)
SINAPROC	Sistema Nacional de Protección Civil
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory (misión de la NASA)
SWPC-NOAA	Space Weather Prediction Center de la NOAA
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNOOSA	United Nations Office for Outer Space Affairs
WMO	World Meteorological Organization

Prefacio

La tormenta solar perfecta: cronología de un desastre global

ME DESPIERTO Y VEO QUE APENAS ESTÁ AMANECIENDO, es septiembre, anoche llovió y hace un poco de frío. Busco mi teléfono celular en el buró de la cama, he despertado cinco minutos antes de mi hora habitual. Comienzo a navegar en internet deslizando el dedo índice de mi mano derecha sobre la pantalla y me percato poco a poco de que los portales de periódicos, las cadenas de televisión, los noticieros de radio de la mañana y las redes sociales están hablando de una *tormenta solar*.¹ En México, el Servicio de Clima Espacial informa que a las 05:35 a.m. un satélite GOES² de la NOAA³ detectó una explosión en la superficie del Sol, que es la más intensa de la cual se tiene registro en los últimos 30 años. La tormenta solar es confirmada por otras dos misiones de la NASA:⁴ el satélite SDO⁵ fotografió el sitio de la explosión en la superficie de la estrella y el satélite SOHO⁶ detectó la eyección de una gigantesca nube de material solar que se dirige hacia la Tierra a más de 3,000 kilómetros por segundo.

¹ En mayo de 2019 la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo me invitó a impartir una plática TEDx, la que sirvió de inspiración para escribir este libro (<https://youtu.be/ejcbkegEZv4>).

² Geostationary Satellite Server [Servicio de Satélites Geoestacionario por sus siglas en inglés]. Flotilla de satélites de la NOAA.

³ National Oceanic and Atmospheric Administration [Administración Nacional Oceánica y Atmosférica por sus siglas en inglés].

⁴ National Aeronautics and Space Administration [Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio por sus siglas en inglés].

⁵ Solar Dynamic Observatory [Observatorio Solar Dinámico por sus siglas en inglés] de la NASA.

⁶ Solar and Heliospheric Observatory [Observatorio Solar y Heliofísico por sus siglas en inglés] de la NASA.

La ICAO⁷ de las Naciones Unidas reacciona ante el evento y da la orden de cancelar los próximos vuelos e indica a los aviones que están en el aire que intenten aterrizar lo más pronto posible. Leo, con asombro, que en promedio hay más de 100,000 vuelos comerciales de pasajeros por día. No puedo imaginar la cantidad de aviones que han perdido comunicación con sus torres de control. En México, el Sistema Nacional de Protección Civil anuncia en medios de comunicación que se informará de la evolución del fenómeno en las próximas horas. Surge un enorme desconcierto y desinformación en redes sociales.

La gente empieza a sentir miedo por la dispersión de noticias falsas y por el desconocimiento de estos fenómenos naturales.

Los servicios de clima espacial de varios países se encuentran en estado de alerta e intercambian información y datos, es muy importante estimar la magnitud del evento y los riesgos que conlleva. Los primeros efectos de la tormenta solar son causados por la radiación del estallido de luz y tardaron tan solo ocho minutos en alcanzar nuestro planeta. Se comienzan a registrar entonces las primeras afectaciones en muchas regiones del mundo. Hay pérdidas de satélites, fallas en telecomunicaciones y errores muy grandes en los sistemas de posicionamiento global. Nunca se habían registrado tantas fallas simultáneas en estas tecnologías. Siguiendo los protocolos de situación de emergencia los servicios de clima espacial analizan los datos de sus redes de instrumentos y notifican a sus autoridades. En México, la Coordinación Nacional de Protección Civil se encontraba en estado de alerta desde hacía una semana, cuando el servicio de clima espacial notificó que una región activa del Sol, la 12,967, había empezado a producir tormentas solares muy intensas desde su aparición en el disco solar visto desde la Tierra. Ahora la Coordinación ha decretado estado de emergencia y está en sesión permanente.

Lo que más les preocupa en este momento a los especialistas es la nube de material solar que viene detrás del estallido de luz y que tardará todavía varias horas en llegar a la Tierra. No hay manera de seguir la nube en estos momentos con los instrumentos disponibles, tenemos que esperar a que se acerque a nuestro planeta. El Comité sabe que si esa nube que se aproxima a nosotros es una *tormenta solar perfecta*, esto es, si tiene las características físicas para generar el mayor daño posible, entonces las afectaciones que va a provocar serán globales y catastróficas.

⁷ International Civil Aviation Organization [Organización de Aviación Civil Internacional por sus siglas en inglés].

Diecisiete horas más tarde del primer anuncio del estallido de luz solar, a las 10:30 p.m., se reciben los datos del satélite DSCOVR⁸ de la NOAA, el cual está ubicado en el punto L1 en la línea Sol-Tierra,⁹ que confirman que, en efecto, la nube es una *tormenta solar perfecta*. Se activan entonces los protocolos para el peor escenario posible y se notifica a la presidenta. Diez minutos después, a las 10:40 p.m., la nube impacta el campo magnético de la Tierra. Pasan tan solo algunos minutos y desde varios países se comienza a observar, en los cielos nocturnos, la aparición de una gigantesca aurora polar roja, cuyos destellos empiezan a cubrir todo el lado noche del planeta. Me asomo por la ventana, volteo al cielo y compruebo maravillado y con horror que una aurora roja se observa en México. La Tierra está bajo los efectos de una tormenta geomagnética extrema y las fallas en los sistemas tecnológicos de todo el globo se incrementan.

Un par de horas después de la media noche llega la confirmación del peor escenario posible, hay reportes del colapso de las redes de energía eléctrica en muchas regiones de la Tierra. No responden los satélites, no hay internet, se colapsan las telecomunicaciones. Los errores en los sistemas de posicionamiento global son muy grandes y no se pueden usar los datos. No hay banca electrónica. No hay redes sociales. La falla de las redes eléctricas provoca que se interrumpan los suministros de agua y combustible en todas las regiones del planeta. La población está llena de desconcierto y pavor, se empiezan a reportar algunos disturbios en las calles. Hay un apagón global. La presidenta está con su gabinete en el cuarto de situaciones, se ha convocado a una reunión de crisis de seguridad nacional.

En un lapso de tan solo dieciocho horas acaba de cambiar el curso de la historia de la civilización humana. Busco mi teléfono celular para tomar una fotografía de la aurora boreal que brilla en el cielo nocturno y me doy cuenta que no tiene señal. Estoy incomunicado. No hay energía eléctrica en casa.

Esto podría cambiar nuestras vidas de manera más radical de lo que la pandemia de la COVID-19 en el 2020-2021 lo hizo.

⁸ Deep Space Climate Observatory [Observatorio Climático del Espacio Profundo por sus siglas en inglés].

⁹ El punto L1 se define como el lugar donde la fuerza de gravedad del Sol y de la Tierra se cancelan mutuamente. Este lugar es muy socorrido por las agencias espaciales para ubicar satélites de observación científica ya que permite órbitas más estables.

Objetivos del libro

¿ES ESTE UN RELATO DE CIENCIA FICCIÓN? ¿Hay razones, con fundamento científico, para preocuparnos por la amenaza de una tormenta solar sobre nuestra civilización? Esta secuencia de eventos y escenario catastrófico descrita -que bien pudiera ser el guion de una película de ciencia ficción de Hollywood o el inicio de una serie de Netflix- 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. La amenaza de una tormenta solar extrema, que afectaría la operación y confiabilidad de sistemas tecnológicos indispensables para la sociedad moderna, hacen necesario estudiar al Sol, monitorear su actividad y sus efectos en el entorno de la Tierra, así como desarrollar planes de acción de los gobiernos para incrementar la resiliencia de estos sistemas tecnológicos vulnerables. Se trata de un tema de seguridad nacional que pone en riesgo a todos los países. El fenómeno es global y demanda una colaboración internacional.

¿Qué son las tormentas solares? ¿Cómo se producen? ¿Cómo nos afectan en la Tierra? ¿Cómo es que una tormenta solar puede producir un apagón global? ¿Cuándo va a ocurrir la próxima tormenta solar perfecta? ¿Qué estamos haciendo para protegernos? Estas son algunas de las preguntas a las que responderemos en este libro.

CAPÍTULO 1

El Sol, nuestra estrella

EL SOL ES LA FUENTE DE ENERGÍA de toda vida existente sobre la Tierra. Es su estrella más cercana. De las más de cien mil millones de estrellas que existen tan solo en nuestra galaxia, a ninguna otra podemos observarla con tanto detalle y ninguna nos interesa más para nuestra supervivencia. Es un objeto fascinante, lleno de dinámica, complejidad y explosiones. Chorros de gas incandescente emergen de su superficie y se mueven con ritmos complejos, destellos que denotan explosiones y liberaciones súbitas de energía. No hay civilización en la historia de la humanidad que no le haya rendido tributo a nuestra estrella. Si el lector no ha visto imágenes de telescopios espaciales mostrando diferentes aspectos de la superficie del Sol, le encomiendo que las busque. La NASA tiene muchas fotografías y películas extraordinarias de acceso abierto en sus portales de internet.¹

En una representación imaginaria, supongamos que el Sol es una esfera con diámetro de un metro; en esta escala, el tamaño de la Tierra sería tan solo el de una canica con diámetro menor a un centímetro. Esto significa que en esta esfera solar imaginaria podrían caber más de un millón de planetas Tierra. La distancia del Sol a nuestro planeta son 150 millones de kilómetros. En nuestra representación imaginaria, la distancia del Sol a la Tierra sería de un poco más de 100 metros, algo así como una cancha de fútbol profesional. En este escenario imaginario, el Sol, con un metro de diámetro, estaría colocado en una portería, y la Tierra, con un centímetro de diámetro, en la otra. Así de enorme es la distancia que nos separa.

¹ <https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/index.html>

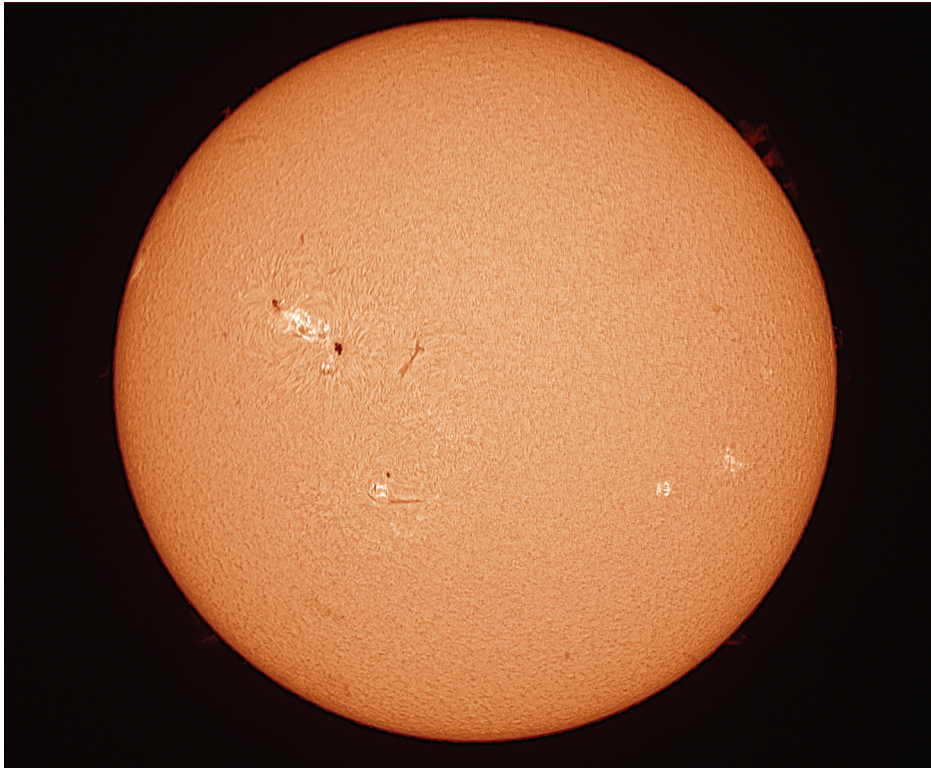


Figura 1. El Sol. Fotografía de la cromósfera solar en H-Alpha (6562.8 Å). La imagen muestra, en la parte superior del centro del disco, una mancha solar (área circulada oscura) asociada con una región activa. Cortesía del Laboratorio de Geociencias Espaciales (LACIGE) de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México.

A la distancia promedio entre el Sol y la Tierra se le conoce como Unidad Astronómica (1 UA) y es igual a 150,000,000.00 km). La luz viaja a una velocidad de 300,000 km/s. Por lo anterior, la luz que viene del Sol tarda aproximadamente ocho minutos en llegar a la Tierra (1 UA = 8 min luz).

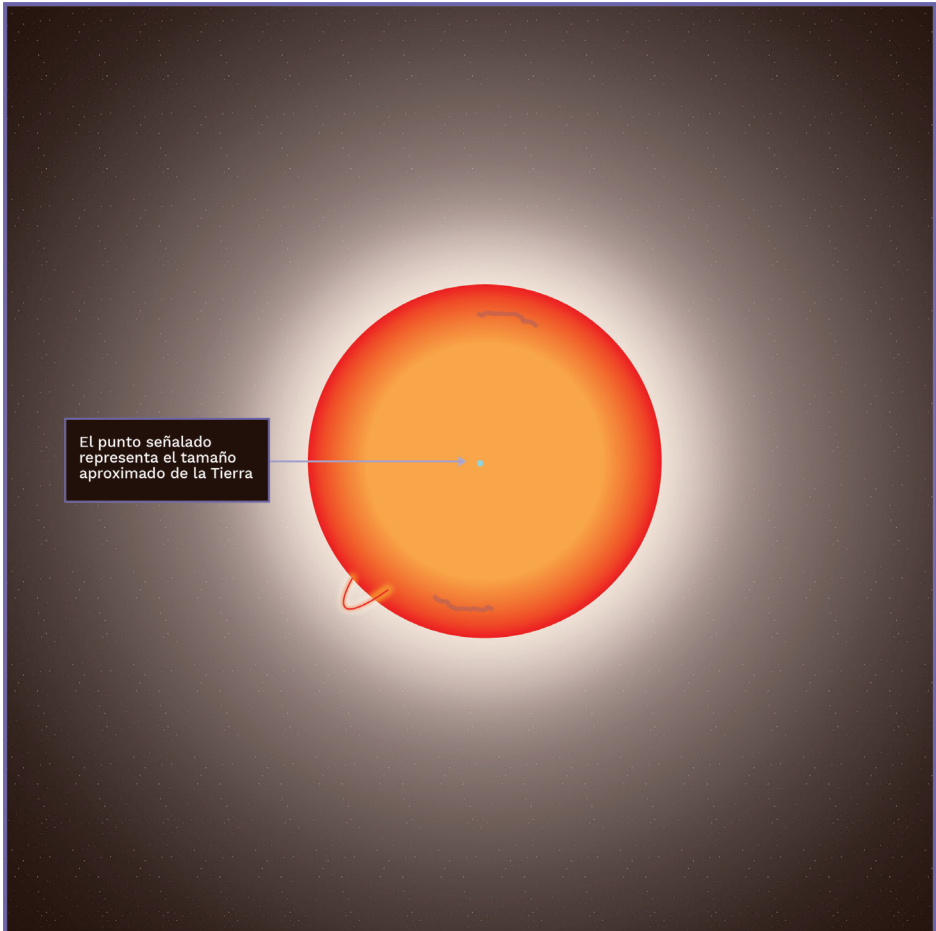


Figura 2. Representación de la escala Sol-Tierra. Sobre una imagen del disco solar se superpone un punto azul para representar el tamaño de la Tierra. Ilustración de Axel García Pineda.

1.1. Las capas del Sol y el horno nuclear

EL SOL, COMO TODAS LAS ESTRELLAS, es una inmensa bola de gas incandescente que contiene en su interior un gigantesco horno nuclear. Podemos pensar el núcleo del Sol como una máquina que, a través de reacciones nucleares, transforma materia en energía. Esta máquina nuclear hace colisionar átomos de hidrógeno (H) -el H es el elemento más sencillo de la naturaleza- para transformarlos, secuencialmente, en átomos de helio (He) -el He es el segundo elemento en la tabla periódica-. Cada segundo, esta máquina gigante transforma

564 millones de toneladas de H en 560 millones de toneladas de He, y convierte los 4 millones de toneladas restantes de material en energía pura (radiación electromagnética).² A este proceso que ocurre en el interior de todas las estrellas, y que transforma hidrógeno en helio, se le conoce como *fusión nuclear*. La fusión nuclear es el mecanismo más eficiente que conocemos en la naturaleza para generar energía.

El Sol es una estrella que se encuentra a la mitad de su vida, tiene aproximadamente 4.5 mil millones de años y le quedan otros 4.5 mil millones de años más. Su final se acercará cuando comiencen a agotarse sus reservas de hidrógeno y entre en una fase inestable de generación de energía. Las estrellas envejecen cuando consumen su hidrógeno. Una estrella joven, por ejemplo, tiene mucho hidrógeno en su interior, mientras que a una estrella vieja le queda poco. De esta manera es que cuando el Sol haya agotado sus reservas de hidrógeno y se encuentre en su etapa final, su motor nuclear se volverá inestable, el equilibrio entre la gravedad y la presión de radiación fallará y el núcleo comenzará a comprimirse elevando aún más su temperatura, lo cual provocará que la estrella se infle y aumente mucho de tamaño, rebasando incluso la órbita de Venus y acercándose posiblemente a la órbita de la Tierra. Esta súbita expansión de la estrella en su etapa final provocará que su superficie se enfríe y se convierta en lo que se conoce como *estrella gigante roja*.

Algunos millones de años después de la expansión a gigante roja, como consecuencia de su declive, nuestro Sol terminará expulsando sus capas externas, las cuales producirán una nebulosa planetaria mientras que su núcleo comenzará a decaer en un lento proceso de enfriamiento, convirtiéndose en una *estrella enana blanca*. Es claro que el final del Sol implicará también el final de la vida en la Tierra. El aumento del tamaño de nuestra estrella convirtiéndose en gigante roja y acercándose a la órbita de la Tierra, evaporará la atmósfera de nuestro planeta y provocará temperaturas insostenibles para cualquier tipo de vida. Sin embargo, no tenemos que preocuparnos ahora de ello. Falta mucho, mucho tiempo para que ocurra eso. Hay que tomar en consideración que nuestra especie, el *Homo sapiens*, tiene tan solo 100,000 años habitando el planeta, apenas un suspiro en las escalas de tiempo de las estrellas. Tenemos entonces muchos retos que

² S. Bravo, (1987) Encuentro con una estrella, (La Ciencia para Todos, núm. 38), México: Fondo de Cultura Económica.

superar en nuestro futuro inmediato, como las implicaciones del cambio climático o la autodestrucción en una guerra nuclear, antes de empezar a preocuparnos por la muerte de nuestra estrella, prevista para un futuro muy lejano de 4.5 mil millones de años.

1.2. Capas externas del Sol

EL INTERIOR DEL SOL está formado de tres capas: *núcleo*, *zona radiativa* y *zona convectiva*. La existencia de estas tres capas tiene que ver con la manera en que nuestra estrella genera su energía en el núcleo y cómo esta energía viaja lentamente hacia el exterior en forma de calor. Sorprendentemente el transporte de esta energía, que se genera en el núcleo y se propaga hasta llegar a la superficie, tarda cientos de miles de años. Las estrellas no solo tienen un horno nuclear en su interior, lo que les garantiza el mecanismo más eficiente y estable para generar energía, sino que además esta energía tarda mucho tiempo en escaparse. Por eso, las estrellas son tan estables y viven miles de millones de años. Uno de los grandes retos de la ciencia moderna es poder replicar y controlar la manera en que las estrellas generan su energía. Controlar la fusión nuclear sería la solución a todos los problemas energéticos de nuestra civilización. Sin embargo, esto es algo que todavía parece estar muy lejano. La Tabla 1 resume las capas del Sol. El núcleo es el horno nuclear que genera su energía. La capa radiativa es la región donde esa energía generada en el núcleo se propaga al exterior en forma de radiación. La zona convectiva es la última capa interior, donde la energía (calor) se propaga y emerge a la superficie a través de un movimiento convectivo.

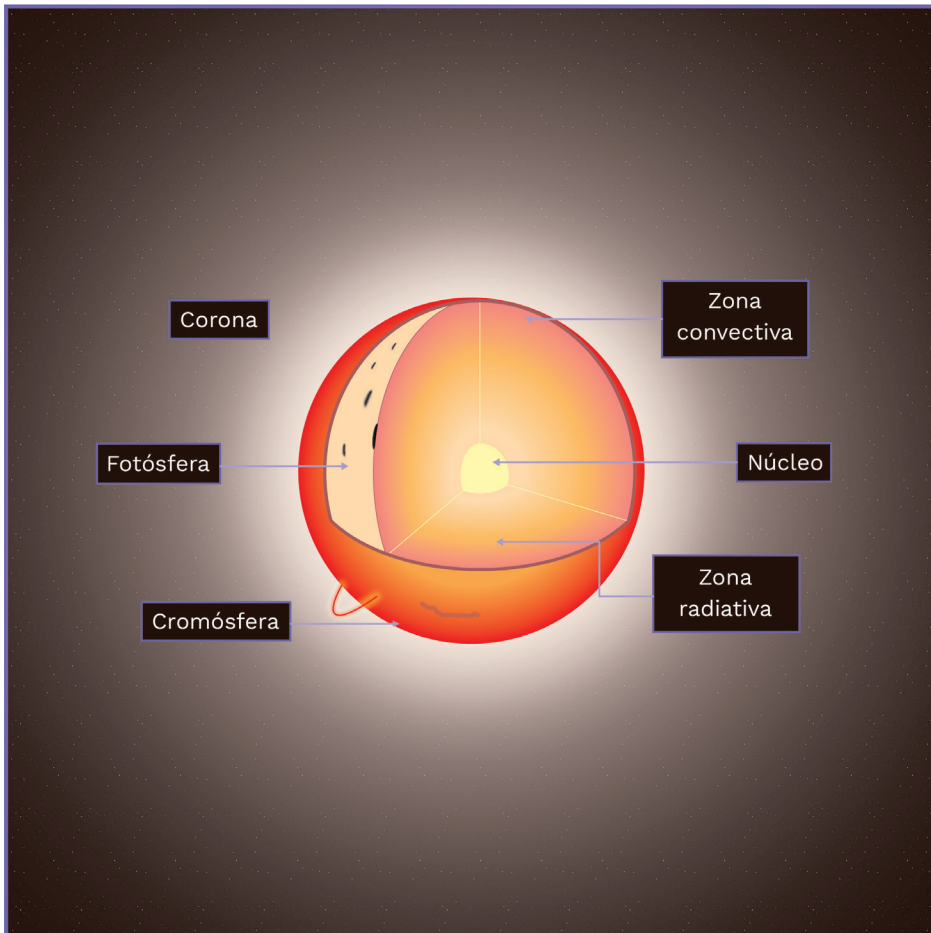


Figura 3. Capas del Sol. Representación esquemática de las tres capas interiores y tres capas exteriores del Sol. En el interior: núcleo, zona radiativa y zona convectiva. En el exterior (atmósfera solar): fotosfera, cromósfera y corona. Ilustración de Axel García Pineda.

El estudio de la luz que recibimos del Sol y de otras estrellas nos ha permitido entender muchas de sus propiedades, como son: su temperatura (las estrellas azules son más calientes que las estrellas rojas), su composición (de qué están hechas), sus movimientos (se acercan o se alejan, se expanden o se contraen), y la presencia de campos magnéticos (que cambian el entorno de la estrella). La luz visible, a la que son sensibles nuestros ojos, es parte de un fenómeno más amplio que se llama ondas electromagnéticas.³ Las ondas electromagnéticas se

³ Una onda electromagnética se caracteriza por su longitud de onda y su frecuencia. Todas las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz.

extienden a frecuencias que no podemos ver como son el infrarrojo, las microondas, las ondas de radio, o incluso las frecuencias del otro lado del espectro, las de altas energías, como son el ultravioleta y los rayos X. Nuestros ojos no pueden “mirar” en estas frecuencias, pero sí podemos fabricar instrumentos que pueden detectarlas. Por esa razón existe un gran número de diferentes tipos de telescopios en la Tierra y en el espacio, con el fin de captar diversas frecuencias y descifrar los secretos que viajan a través de la luz de las estrellas.

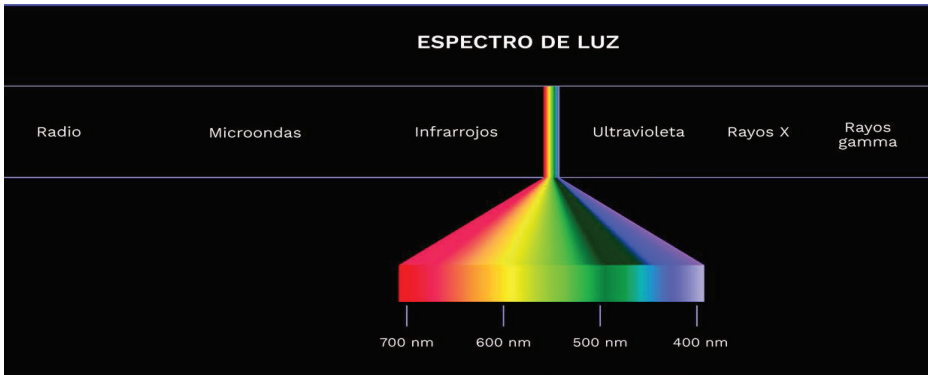


Figura 4. Representación del espectro electromagnético. La luz visible (representada por un arcoíris) en realidad ocupa una muy estrecha ventana de frecuencias (o longitudes de onda). Del lado izquierdo se encuentran las ondas con frecuencias más bajas, empezando por las ondas de radio, microondas y el infrarrojo; del lado derecho, las que tienen frecuencias más altas (ondas más energéticas), empezando por las ultravioletas y los rayos X. Ilustración de Axel García Pineda.

Estas técnicas de observación con telescopios se utilizan para estudiar la radiación electromagnética que llega de todo el universo y, desde luego, para analizar a la estrella más importante para nosotros. Existen detectores en el espacio para medir las emisiones del Sol en rayos X, telescopios solares para estudiar su luz visible en diferentes colores, y arreglos de antenas para medir sus emisiones en radio y microondas. Cada frecuencia en particular del espectro electromagnético nos indica algo sobre alguna región particular del Sol. Dependiendo de que capa del Sol se quiere estudiar o monitorear, se diseña entonces un instrumento específico para captar el tipo de radiación electromagnética principal que se emite desde esa región.

En la atmósfera del Sol hay tres capas: la *fotósfera*, la *cromósfera* y la *corona*. La fotósfera, el disco solar que vemos todos los días, tiene una temperatura de 6,000 grados centígrados. Esta capa irradia luz (ondas electromagnéticas) en todos los colores, incluyendo los tipos de luz que

no pueden captar nuestros ojos, pero su emisión principal es luz visible y tiene un máximo de intensidad alrededor del color amarillo. El 99% de la luz que recibimos del Sol en la Tierra se origina en la fotosfera. La cromósfera, por su parte, es una capa delgada encima de la fotosfera, emite luz principalmente en color rojo, ya que su zona interior es un poco más fría que la fotosfera. La cromósfera es una región fascinante que podemos observar con telescopios desde la Tierra y el espacio. En ella se aprecia claramente la compleja dinámica que existe entre los gases y los campos magnéticos en la superficie de todas las estrellas. Es una región muy dinámica donde ocurren interacciones, cambios y explosiones. Hay además un fenómeno físico que es particularmente intrigante de esta región del Sol; en una delgada capa de la parte superior ocurre un cambio súbito y el gas se calienta mucho. A este incremento en la temperatura de la cromósfera se le conoce como *región de transición*.

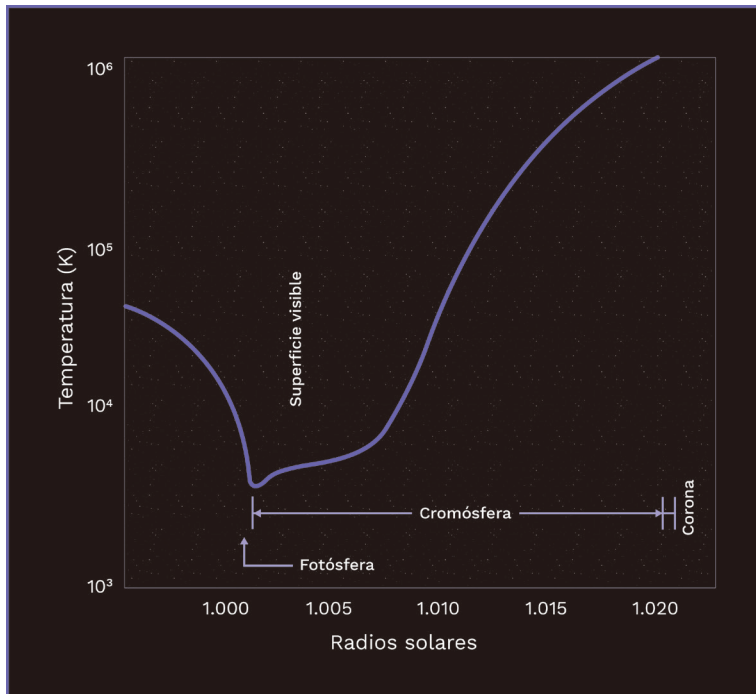


Figura 5. Perfil de temperatura y zona de transición. Las tres capas exteriores del Sol tienen propiedades físicas diferentes, en particular su temperatura. La superficie del Sol (fotosfera) tiene unos 6 mil grados centígrados; sin embargo, la corona (la capa más externa) alcanza los 2 millones de grados centígrados. Este súbito calentamiento de la cromósfera a la corona sigue siendo uno de los temas de investigación más importantes de la física solar. Ilustración de Axel García Pineda.

Cómo ocurre este calentamiento es algo que todavía no podemos entender con los modelos y las mediciones actuales. Sin embargo, el resultado es sorprendente. La corona tiene una temperatura mucho mayor que la fotosfera. Esto va en contra de lo que originalmente pudiéramos suponer ya que, si la energía de la estrella se origina en su núcleo, entonces mientras más nos alejamos de la fuente de calor, menor tendría que ser la temperatura. Esto se cumple bien si consideramos que el núcleo solar tiene una temperatura de 15 millones de grados centígrados, la frontera entre la zona radiativa y convectiva tiene una temperatura de 1.5 millones de grados, la fotosfera tiene 6 mil grados y la base de la cromósfera está alrededor de los 5 mil grados. Conforme más nos alejamos del núcleo, menor es la temperatura. Sin embargo, las observaciones indican claramente que la corona es mucho más caliente que la fotosfera y alcanza los 2 millones de grados.

Tabla.1 Capas del Sol y sus principales características

EL SOL DIÁMETRO (1,390,000 km)	
CAPAS INTERIORES	TEMPERATURA
Núcleo	15,000,000 °C
Zona radiativa	1,500,000 °C
Zona conectiva	
CAPAS EXTERIORES	TEMPERATURA
Fotosfera	6,000 °C
Cromósfera	5,000 °C
Corona	2,000,000 °C

Tabla 1. El Sol tiene tres capas interiores y tres exteriores. En el caso de las capas interiores, se muestra el valor aproximado de la temperatura en la frontera entre las dos capas subsecuentes. Fuente: elaboración del autor.



Figura 6. Imagen de la corona durante un eclipse solar el día 3 de septiembre de 2016. La corona es la capa más externa de la atmósfera solar. Su alta temperatura provoca que esta se escape continuamente del Sol formando un viento que llena todo el espacio interplanetario. Créditos: Don Sabers, Ron Royer, Miloslav Druckmüller. Cortesía de Miloslav Druckmüller. Imágenes con derechos y permiso de autor: <https://www.eclipsesolar2019.cl/corona/>

1.3. El viento solar y el modelo de Parker

LA CORONA SOLAR ES UN GAS muy caliente. Los gases, cuando se calientan, se expanden. La corona está tan caliente que comienza a inflarse y a escaparse del Sol. Tomemos en cuenta que la fuerza de gravedad es muy importante en cómo se organiza el universo. La gravedad obliga a los planetas a girar alrededor del Sol y también es la responsable de que la Tierra atrape a su atmósfera. La fuerza de gravedad obliga a los cuerpos a acercarse entre sí. Las estrellas son muy masivas y tienen fuerzas de gravedad muy grandes. Sin embargo, pese a la enorme fuerza de gravedad del Sol, nuestra estrella no es capaz de contener la expansión de su corona.

Por esa razón la atmósfera de las estrellas se expande y forma vientos que llenan el espacio. Esta expansión continua de la atmósfera solar fue algo que sorprendió de sobremanera a los astrofísicos de mediados del siglo xx. En esa época se creía que la fuerza de gravedad de las estrellas era tan grande que, como ocurre en la Tierra, debería contener las atmósferas estelares. No obstante, hubo un descubrimiento que cambió radicalmente la concepción que teníamos de nuestra estrella: su atmósfera es muy caliente, mucho más caliente que su superficie.

Eugene Parker (1927-2022), un joven astrofísico de la Universidad de Chicago, desafió la idea aceptada por la comunidad astronómica de esa época y, al preguntarse qué pasa con la atmósfera del Sol predijo, en 1958, que esta debería escapar continuamente formando una brisa que se aleja de la estrella. El modelo de Parker propuso que el medio interplanetario no está vacío, sino que en realidad está permeado por un flujo continuo de partículas que se alejan del Sol. Parker nombró a este flujo de partículas *viento solar*. La comunidad astrofísica no aceptó, en ese momento, esta idea controversial que contradecía lo que en esa época se suponía que ocurría con todas las estrellas: sus atmósferas deberían ser cuasi-estáticas (en equilibrio, sin movimiento). Pero no había tampoco mediciones en el espacio que pudieran confirmar rotundamente las predicciones de esta revolucionaria idea. La formulación de Parker coincide, sin embargo, con el inicio de la llamada *carrera espacial*, la cual había comenzado tan solo unos meses antes.

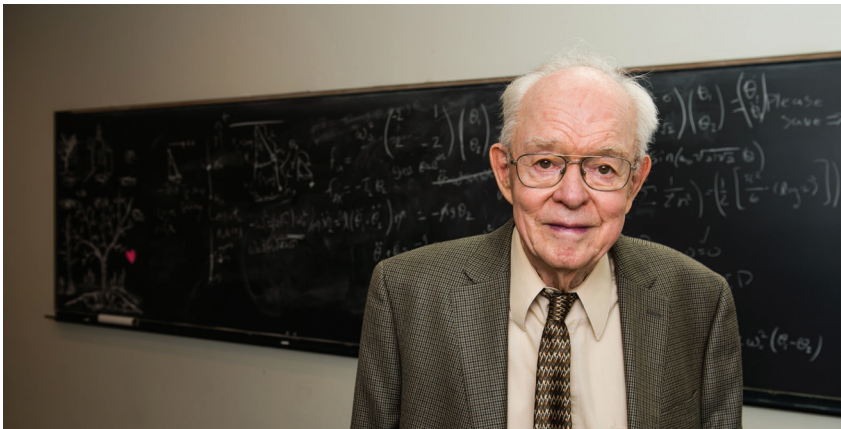


Figura 7. Eugene Parker fue un astrofísico norteamericano que en 1958 predijo la existencia del viento solar. La NASA designó con su nombre una misión espacial para estudiar el Sol, es la primera vez que la agencia designa una misión espacial en honor a un científico vivo. La Parker Solar Probe fue lanzada el 12 de agosto de 2018. Imagen: NASA/Glenn Benson tomada de: https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/20170518_parker_3024.jpeg

En el marco de la época conocida como Guerra Fría, el 1 de octubre de 1957 la entonces Unión Soviética lanzó de manera exitosa el primer satélite artificial al espacio: el Sputnik 1. Este primer lanzamiento marcó el inicio de una carrera entre las dos potencias que habían vencido a los países del eje en la Segunda Guerra Mundial: los Estados Unidos y la Unión Soviética. La carrera espacial implicaba financiamiento y apoyos extraordinarios de ambos gobiernos para desarrollar tecnologías para conquistar el espacio. La carrera espacial no solo tenía objetivos científicos, sino también fines propagandísticos y militares. Se sucedieron entonces una serie de misiones espaciales, de ambas potencias, para llegar a la Luna y a los planetas más cercanos. En 1962 los EUA lanzaron la misión Mariner 2 hacia Venus; esta nave tenía instrumentos que permitían medir partículas y campos magnéticos en el espacio. Los datos del Mariner 2, tomados en su trayecto de la Tierra a Venus, indicaron que existía un flujo continuo de partículas que se alejaban del Sol, que llenaba el espacio y que tenía velocidades parecidas a las que obtenía la teoría de Parker (400 km/s).

Los registros de la nave confirmaron entonces la existencia del viento solar, como lo había predicho Parker con su modelo teórico unos años antes. Así la idea del viento solar y la expansión continua de la atmósfera de las estrellas fue finalmente aceptada por la comunidad de astrofísicos. Y con ello nació el campo de estudio llamado física espacial. En ese momento nos dimos cuenta que en realidad la Tierra y la órbita de todos los planetas están inmersas en la atmósfera solar en expansión. El viento solar forma una gigantesca burbuja alrededor de nuestra estrella a la cual conocemos como *heliosfera*. Esa es nuestra colonia, el lugar donde vivimos dentro de este universo de plasmas estelares. Al momento de estar editando este libro ocurrió el fallecimiento de Eugene Parker el 15 de marzo del 2022. Sirvan estos párrafos como un pequeño y sentido homenaje a tan ilustre científico.

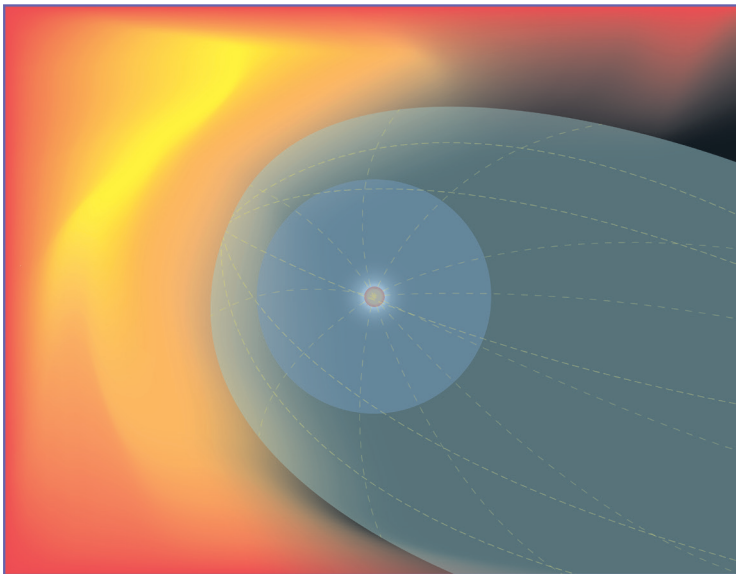


Figura 8. La heliosfera es una burbuja gigantesca que contiene a todo el sistema solar. Esta burbuja se produce por la expansión del viento solar, la cual está contenida en el exterior por la presión del viento interestelar solar. Ilustración de Axel García Pineda.

En el año 2018 se lanzó la misión Parker Solar Probe de la NASA. Esta fue la primera vez que la NASA nombra una misión en honor a un científico vivo. Esta nave tiene como objetivo acercarse como nunca antes a la atmósfera del Sol para medir y entender mejor cómo se calienta y cómo se acelera y se forma el viento solar. La trayectoria de la nave contempla 24 aproximaciones al Sol durante 7 años. Su trayectoria son elipses que se acercan sucesivamente al Sol (teniendo a la estrella en uno de sus focos) y se alejan aproximándose hasta la altura de la órbita de Venus. En su trayectoria romperá sucesivamente varios récords mundiales, tales como: el objeto fabricado por la humanidad que más se ha acercado al Sol, el que ha resistido las temperaturas más altas y el que ha viajado más rápido.

1.4. El ciclo solar

EL SOL MANIFIESTA CAMBIOS y ciclos de muy diversas maneras. Dependiendo con qué instrumento y qué frecuencia de luz observemos, notaremos cambios distintos. Es un objeto, como todas las estrellas, con una dinámica muy compleja. En la superficie del Sol (*fotósfera*) aparecen en ocasiones algunas regiones oscuras que conocemos como *manchas solares*. Estas regiones están más frías que sus alrededores y por eso dan la apariencia de ser oscuras. ¿Cómo es posible que, en medio de la superficie del Sol, conformada por un gas incandescente a 6 mil grados centígrados, puedan existir algunas “islas” oscuras de material más “frio”, a 4 mil grados centígrados? La respuesta es que las manchas son regiones con campos magnéticos muy intensos. Estos campos magnéticos inhiben el flujo de calor y permiten que subsistan estas regiones con temperaturas tan dispares. La presencia de estos campos magnéticos en la superficie del Sol también da pie a que se almacene energía y luego esta puede disiparse bruscamente en forma de explosiones. Cuando hay manchas solares en la *fotósfera* sabemos que aumenta la probabilidad de que ocurran *tormentas solares*. El Sol gira sobre sí mismo y tarda aproximadamente 27 días en completar una vuelta. Las manchas concentran campos magnéticos muy intensos que, por la rotación del Sol, se pueden tensar. Esta dinámica de las manchas solares es un mecanismo donde se almacena energía magnética que puede llegar a producir violentas explosiones.

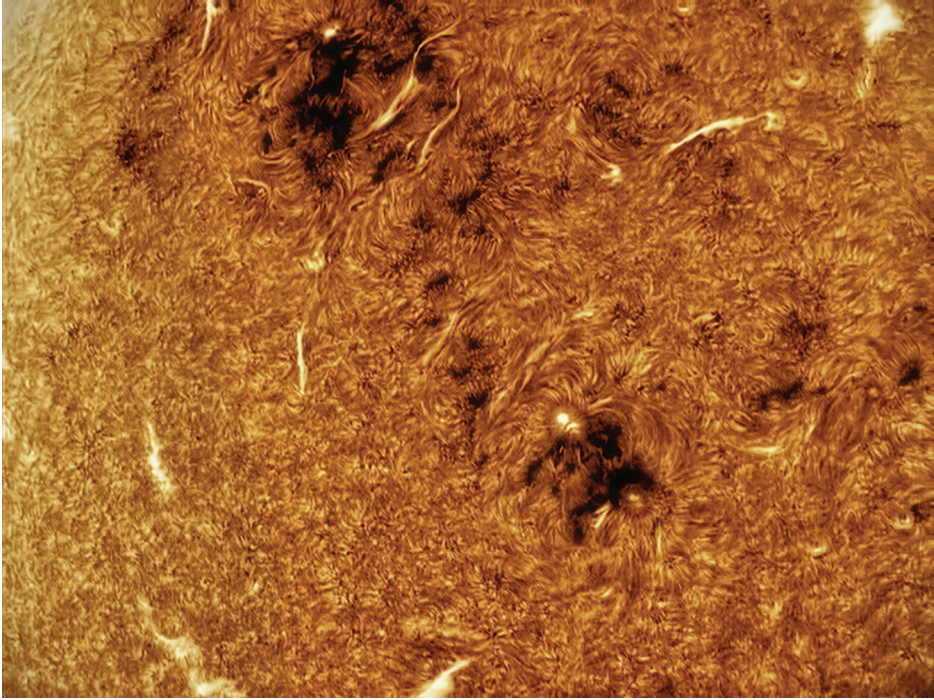


Figura 9. Fotografía de una mancha solar vista desde la cromósfera en la línea espectral H-Alpha (6562.8Å). Las zonas oscuras están relacionadas con campos magnéticos muy intensos en la superficie del Sol. Las tiras blancas son filamentos de plasma vistos desde arriba. Cortesía del Laboratorio de Geociencias Espaciales (LACIGE) de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México.

El número y tamaño de las manchas solares tiene un comportamiento cíclico. Las manchas no están ahí todo el tiempo. En ciertos momentos la superficie del Sol aparece prácticamente lisa, sin manchas, y la estrella tiene muy poca actividad, como si estuviera hibernando. A esta etapa la conocemos como el *mínimo del ciclo solar*. Sin embargo, poco a poco, con el paso de unos años, el Sol cambia y comienzan a surgir manchas y se producen explosiones en la superficie de la estrella. Este ciclo del número de manchas solares tiene una duración de aproximadamente 11 años. Al momento de escribir este libro, en el año 2020, hemos pasado el mínimo de manchas solares en diciembre de 2019, lo cual significa el inicio del nuevo ciclo solar. Durante estos intervalos de algunos años con muy pocas manchas, el Sol produce pocas tormentas. Sin embargo, en cuatro o cinco años más, para 2024-2025, alcanzaremos el siguiente máximo de actividad (ciclo solar número 25) y entonces las tormentas solares se volverán más frecuentes e intensas e, incluso, podrán ocurrir varias explosiones por día. Consecuentemente, al paso de 11 años, alrededor

del 2031, estaremos nuevamente en el siguiente mínimo, indicando el inicio del ciclo solar número 26 y estaremos, otra vez, en un periodo de hibernación solar con muy poca actividad.

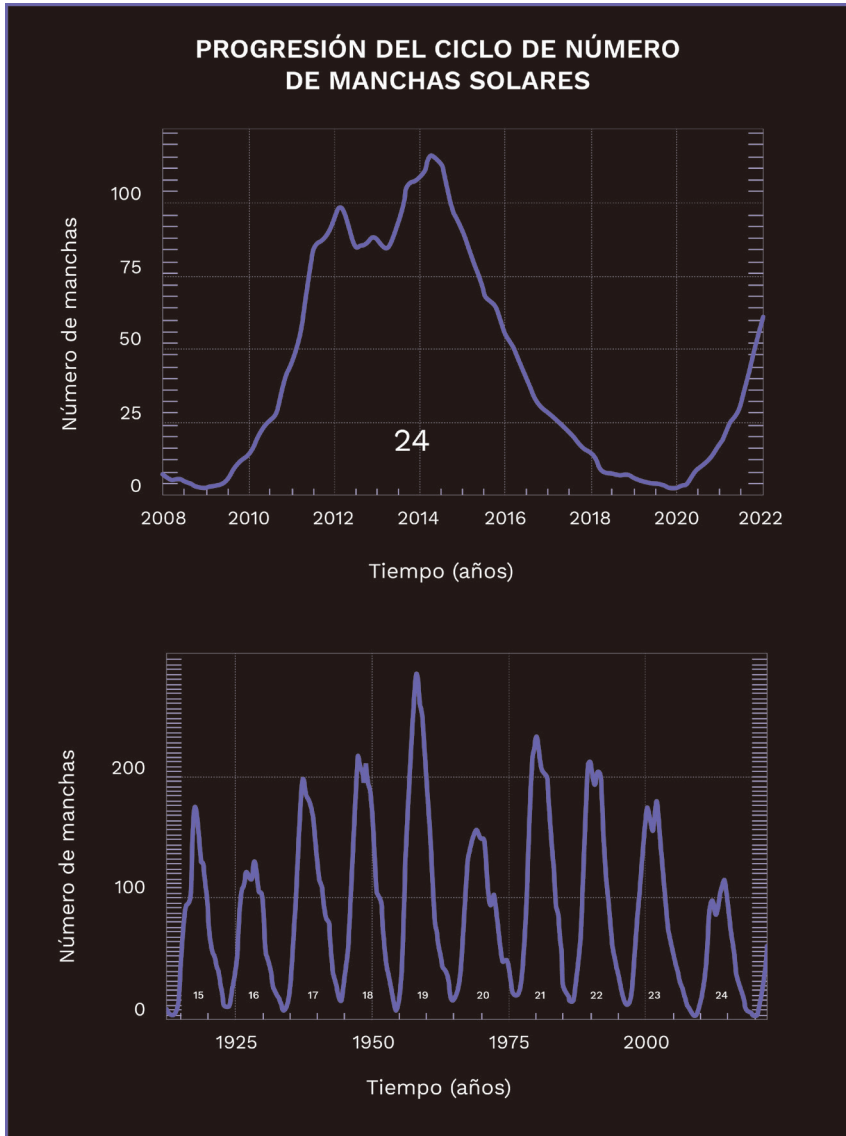


Figura 10. El ciclo solar. El conteo del número de manchas en la superficie del Sol sigue un comportamiento cíclico con un periodo de aproximadamente 11 años. Cada ciclo puede tener una intensidad (número de manchas totales) y duración distinta. El ciclo de manchas está modulado por el ciclo magnético del Sol, que dura 22 años. Ilustración de Axel García Pineda.

La ocurrencia de las tormentas solares sigue la tendencia del ciclo de manchas: cuando estamos cerca del máximo es mucho más probable que ocurran tormentas solares intensas y que puedan, inclusive, ocurrir varias por día. Es muy importante destacar que los ciclos solares varían, hay algunos con muchas manchas y mucha actividad y hay otros con números más moderados (ver figura 10). No todos los ciclos duran lo mismo, hay unos más largos de 12 años y hay otros más cortos de 10 años. Han ocurrido incluso periodos de ciclos con muy pocas manchas, como el llamado mínimo de Maunder, ocurrido en el siglo xvii (1645-1715). También han ocurrido periodos con muchas manchas, por ejemplo, durante el siglo xix (1836-1873) y el siglo xx (1936-1960). En este momento todavía no podemos predecir cómo van a evolucionar los próximos ciclos solares. Puede bajar en general la actividad del Sol en los próximos ciclos o podría volver a incrementarse. No hay que olvidar que el Sol tiene 4.5 mil millones de años y estas fluctuaciones de 11 años en realidad representan escalas temporales muy cortas para los cambios que ocurren dentro de nuestra estrella. El ciclo solar y su evolución con el tiempo están relacionados con cambios que ocurren en el interior del Sol en otras escalas temporales mucho más prolongadas. Es por ello que seguimos estudiando lo que ocurre en el interior de nuestra estrella.

1.5. Las tormentas solares

CUANDO OCURRE UNA TORMENTA SOLAR, lo primero que detectamos es un súbito destello de luz que dura tan solo algunos minutos, aproximadamente cinco. El material cerca de la explosión se calienta, se aceleran partículas en la zona de la explosión y, en ocasiones, se eyecta una gigantesca nube de material solar, la cual comienza a propagarse por el espacio. Algunas de estas nubes pueden pasar por la posición de la Tierra, esas son las que más nos preocupan.

Una tormenta solar en realidad se refiere a tres fenómenos diferentes que pueden ocurrir de manera asociada cuando se trata de eventos muy energéticos. El primero de ellos es una explosión, la cual produce un destello de luz muy intenso, con duración aproximada de cinco minutos, al que se le conoce como *fulguración* o *ráfaga solar*. La luz de las fulguraciones solares tarda solamente ocho minutos en llegar a la Tierra, es la primera señal que recibimos cuando ocurre una tormenta

solar. La luz de la fulguración contiene mucha energía. Actualmente la intensidad de la fulguración la medimos con detectores en satélites en el espacio. Estos detectores miden la cantidad de radiación que emite el Sol en rayos X y se clasifican en una escala con letras (A, B, C, M, X). Las fulguraciones más intensas son las tipo X. Entonces, cuando el Sol emite una fulguración tipo X se trata de eventos severos que pueden producir afectaciones principalmente en sistemas tecnológicos en la Tierra, como veremos más adelante.

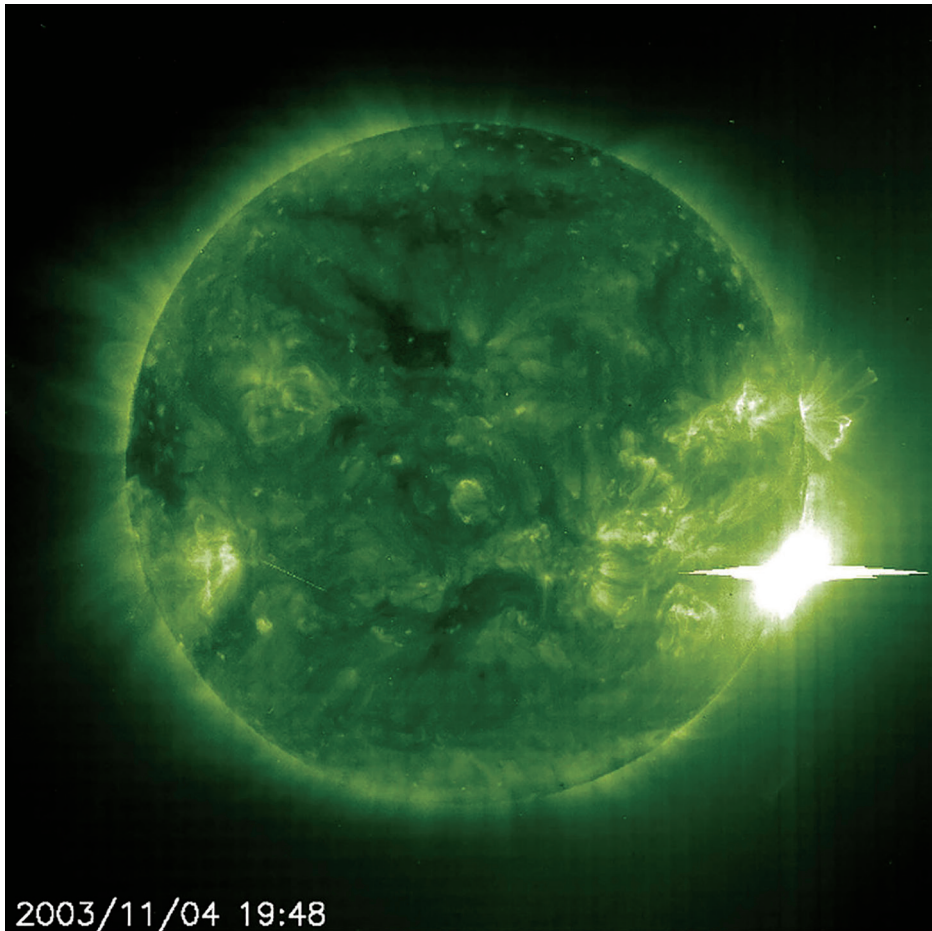


Figura 11. Imagen en rayos X (línea de 195Å) del Sol (color verde falso), que muestra las estructuras en la corona y una violenta explosión (fulguración) en el limbo oeste de la estrella. El evento se detectó el 4 de noviembre de 2003. En la imagen las estructuras más brillantes (zonas claras) están asociadas con regiones activas. Tomada de ESA & NASA/SOHO (<https://www.nasa.gov/content/goddard/what-is-a-solar-flare>).

El segundo fenómeno de actividad solar está asociado al violento calentamiento que ocurre con una fulguración solar. En la zona de la explosión se pueden acelerar partículas. Estas partículas alcanzan energías muy altas y se propagan a velocidades cercanas a la velocidad de la luz (300,000 km/s). A partir de la explosión en el Sol, las partículas tardan entre 20 minutos y 1 hora en llegar a la Tierra. A este segundo tipo de fenómenos se le conoce como *partículas energéticas solares* y pueden implicar dosis de radiación corpuscular de muy altas energías que afectan a seres vivos y componentes electrónicos. Afortunadamente, la atmósfera de la Tierra y su campo magnético nos protegen de este tipo de eventos. Sin embargo, satélites, astronautas e incluso pasajeros y tripulaciones de vuelos aéreos con trayectorias transpolares pueden estar expuestos a este tipo de amenazas.

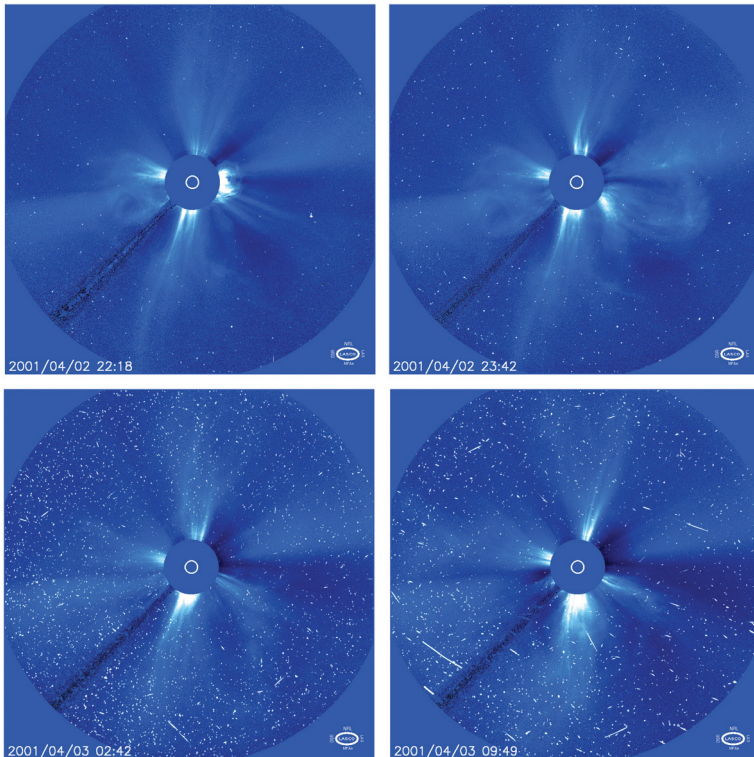


Figura 12. Secuencia de cuatro imágenes del telescopio LASCO en el satélite SOHO de la NASA, mostrando cómo emerge una eyección de masa coronal acompañada de una lluvia de partículas energéticas solares. Las partículas arriban al telescopio después de que explota la tormenta solar. En la imagen aparecen como tormenta de nieve sobre la cámara del telescopio. Tomada de ESA & NASA/SOHO <https://soho.nascom.nasa.gov/hotshots/X17/superflareseries.tif>.

El tercer tipo de fenómeno asociado con las tormentas solares son las *eyecciones de masa coronal*. La corona tiene estructuras gigantescas que forman arcos de material coronal sostenidos por campos magnéticos. Estas estructuras se pueden desestabilizar y desprenderse hacia el espacio como nubes de material y campo magnético que pueden, inclusive, alcanzar velocidades de salida de hasta 3 mil km/s. Estas estructuras se expanden conforme se alejan del Sol y adquieren tamaños monstruosos. Por ejemplo, a la altura de la órbita de nuestro planeta, su ancho radial puede alcanzar un grosor de casi la cuarta parte de la distancia entre el Sol y la Tierra. Las eyecciones de masa coronal son las que más nos preocupan por los efectos que pueden producir si pasan cerca de nuestro planeta, ya que pueden ocasionar, como veremos en los próximos capítulos, las afectaciones más severas y prolongadas en el entorno espacial de nuestro planeta. Estas nubes tardan entre uno y cuatro días en llegar a la órbita de la Tierra a partir de la explosión en la superficie del Sol.

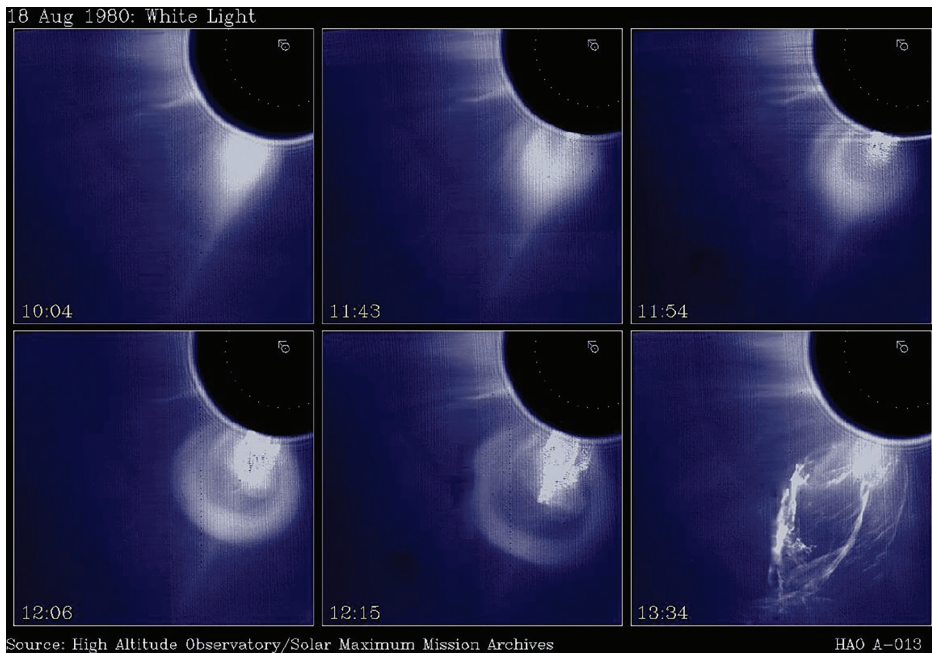


Figura 13. Secuencia de seis fotografías en luz blanca obtenidas por la sonda Solar Maximum Mission de la NASA. La secuencia muestra una eyección de masa coronal. Una estructura en forma de nube esférica emerge de un arco coronal, se expande y explota propagándose hacia el medio interplanetario. Imagen cortesía del High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado, EUA.

La frecuencia de las tormentas solares sigue aproximadamente el ciclo solar de 11 años. En el máximo del ciclo, aumenta el número y la intensidad de las tormentas y, en el mínimo, disminuye considerablemente. Sin embargo, no podemos predecir todavía cuándo van a suceder los eventos extremos, porque estos no siguen al ciclo solar. Es más, históricamente las tormentas solares más peligrosas para la Tierra no sucedieron necesariamente durante los máximos del ciclo, sino que algunas de ellas sobrevinieron durante la fase descendente. Como en el caso de los sismos, aunque no podemos saber hoy día cuándo y dónde ocurrirán terremotos de gran magnitud, lo que sí sabemos es que van a ocurrir. Con las tormentas solares extremas pasa lo mismo, no podemos predecirlas todavía, pero si sabemos que van a ocurrir.

Tabla 2. Tipos de tormenta solar y sus principales características

MANIFESTACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Fulguraciones	<p>Descripción: estallido de luz (abrillantamiento). Energías: 10^{20}-10^{25} joules.⁴ Periodicidad: de 1 a 5 por día durante el máximo del ciclo solar y menos de 1 por semana durante el mínimo del ciclo. Clasificación: por su flujo en rayos X (A, B, C, M, X), el tipo X de estas manifestaciones son las más intensas. Tiempo de arribo Sol-Tierra: 8 minutos.</p>
Eyecciones de masa coronal	<p>Descripción: desprendimiento de partículas y campo magnético de la atmósfera solar (nube de plasma) que se expande al medio interplanetario con velocidades de entre 300 y 2,500 km/s. Energías: 10^{24}-10^{27} joules. Periodicidad: de 3 a 4 por día durante el máximo del ciclo solar y 1 cada 5 días durante el mínimo. Clasificación: nubes rápidas y lentas. Tiempo de arribo Sol-Tierra: de 1 a 4 días dependiendo de su velocidad.</p>
Partículas energéticas	<p>Descripción: partículas en la atmósfera del Sol (protones, electrones y núcleos de helio) que son aceleradas a muy altas velocidades. Energías: 10^3-10^{10} eV.⁵ Periodicidad: de 1 a 2 por día durante el máximo del ciclo solar y 1 cada 7 días durante el mínimo. Clasificación: partículas con energías mayores a 10^6 eV son un riesgo para la vida en el espacio y los vuelos transpolares. Tiempo de arribo Sol-Tierra: de 15 minutos a unas horas.</p>

Tabla 2. Fuente: elaboración del autor.

⁴ Un joule es la unidad de energía en el sistema internacional, donde $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2 / \text{s}^2$.

⁵ Un eV (electrovoltio) es una unidad de energía, donde $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

CAPÍTULO 2

El entorno cercano de la Tierra

COMO VIMOS EN EL CAPÍTULO ANTERIOR, el espacio interplanetario no está vacío, el flujo del viento solar lo llena de partículas y campo magnético rebasando la órbita de todos los planetas. Afortunadamente, estas partículas del Sol no pueden penetrar en nuestra atmósfera. La Tierra tiene un escudo protector invisible, que llamamos *magnetósfera*, el cual impide el paso de estos chorros de partículas. A esta poderosa protección podemos imaginarla como el campo de fuerza que crearía la Mujer Invisible de los Cuatro Fantásticos para salvaguardarnos. Nuestro escudo magnético ha sido un factor muy importante para el desarrollo de la vida en la Tierra. Una de las razones por las cuales creemos que se pudieron haber extinguido etapas prístinas de una posible vida en Marte, es porque Marte perdió, en algún momento de su historia, el campo magnético. Como consecuencia de la ausencia de una magnetósfera, el viento solar arrastró y desvaneció la atmósfera marciana.

Un *campo magnético* puede representarse por un conjunto de líneas de fuerza magnética que llenan todo el espacio. Salen del extremo de un imán (polo positivo) y llegan al otro extremo (polo negativo), sus caminos se curvan. Estas líneas de fuerza magnética siempre son cerradas, esto significa que salen de un polo positivo y se cierran en un polo negativo. En ese sentido, las líneas magnéticas difieren de las líneas de fuerza eléctrica, ya que estas últimas sí pueden salir de un polo positivo (o negativo) y mantenerse abiertas formando direcciones rectilíneas; en cambio, las líneas de fuerza magnética son siempre cerradas. No existen los monopolos magnéticos; los imanes aparecen naturalmente en pares de signos opuestos. En el magnetismo, como en el caso de las fuerzas eléctricas, se cumple la regla de los signos: polos iguales se repelen y polos opuestos se atraen.

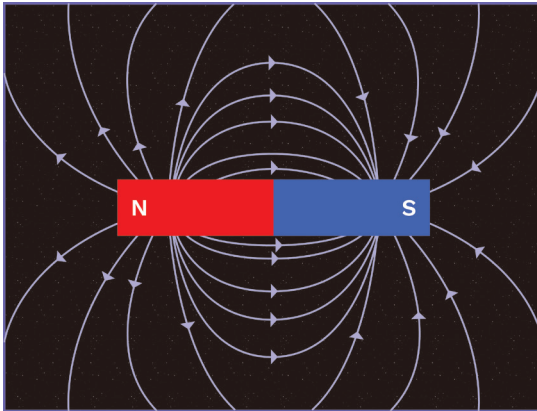


Figura 14. Líneas de campo magnético de un imán. Por razones históricas, al polo norte magnético se le asocia una polaridad positiva y al polo sur magnético una polaridad negativa. Por convención, las líneas siempre salen del polo positivo y se cierran en el polo negativo. Todas las líneas magnéticas son cerradas. Ilustración de Axel García Pineda.

En una primera aproximación, podemos considerar que el interior de la Tierra contiene una enorme “barra” de imán que está casi alineada con el eje de rotación del planeta (eje norte-sur). Sin embargo, siendo más precisos, el eje magnético está desplazado cerca de 11 grados respecto al eje geográfico. El polo sur del planeta tiene signo magnético positivo mientras que el polo norte tiene signo magnético negativo. Las líneas de campo geomagnético salen del sur y se cierran en el norte terrestre. En realidad, esta gigantesca “barra” de imán en el interior de la Tierra no existe, sino que el campo geomagnético se produce por la rotación de capas de hierro fundido (en estado líquido) en el interior del planeta.

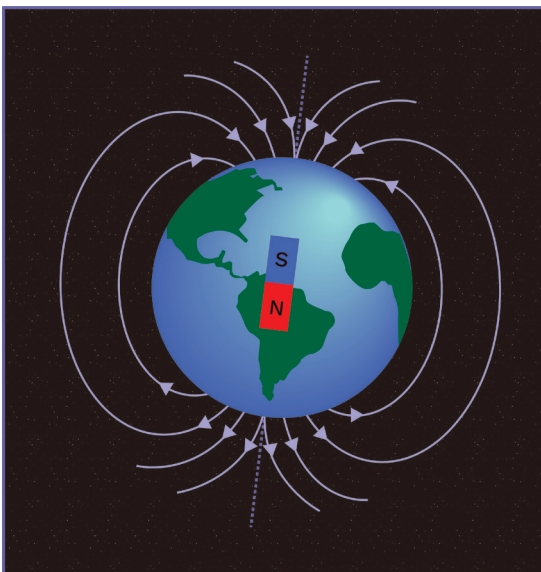


Figura 15. Representación del campo magnético de la Tierra. Podemos imaginar este campo como si existiera un gigantesco imán dentro de nuestro planeta, pero este no está alineado perfectamente con el eje de rotación. Los polos geomagnéticos no coinciden con los polos geográficos. Por razones históricas, el polo sur geográfico está asociado con una polaridad positiva (norte magnético) y el polo norte geográfico con una polaridad negativa (sur magnético). Las líneas geomagnéticas están orientadas del sur al norte. Ilustración de Axel García Pineda.

Como vamos a ver, hay una relación muy importante entre los campos magnéticos y las atmósferas de las estrellas. Los gases muy calientes, como el de la superficie del Sol, se conocen como *plasmas*. El plasma es el cuarto estado de la materia después de los sólidos, líquidos y gases. Lo que hace especial a los plasmas en la física es que tienen propiedades de gases y que, además, reaccionan a la presencia de campos electromagnéticos. Pese a que no es fácil encontrar plasmas en la Tierra, este es en realidad el estado más común de la materia en el universo. Todas las estrellas están hechas de plasmas.¹ Nosotros, en nuestro templado planeta, somos una excepción. El estado del plasma constituye más del 99% de toda la materia visible que conocemos en el universo. Por eso es que entender la física de los plasmas es fundamental para conocer al Sol, sus explosiones y cómo es que el viento solar interactúa con el entorno cercano de los planetas. En particular, la física de plasmas nos explica por qué el viento solar no puede penetrar y llegar a la atmósfera terrestre.

Una propiedad física importante es que dos plasmas asociados a campos magnéticos distintos no se mezclan. En nuestro caso, el viento solar está ligado al campo magnético de la superficie del Sol y no puede mezclarse con el plasma presente en el campo magnético de la Tierra. Es por ello que nuestro campo magnético se convierte en una *coraza* que impide a las partículas solares penetrar en nuestro entorno cercano. Esta interacción continua del viento solar con nuestro planeta podemos pensarla como una roca que se opone al flujo de un arroyo. El agua no puede penetrar la roca y se ve obligada a bordearla. Algo tiene que ocurrir entonces para que el agua del arroyo se desvíe. Al frente de la roca se produce una región turbulenta que cambia la dirección del flujo de la corriente que se movía hacia el obstáculo. En el caso de la interacción que nos ocupa, la magnetósfera es el obstáculo que se opone y desvía el flujo del viento solar.

¹ Bravo (2001).

2.1. La magnetósfera, nuestro escudo magnético

LA MAGNETÓSFERA TIENE UN LADO achatado en la dirección frente al Sol (lado día) y una cola extendida (en dirección opuesta, lado noche). Esta forma de globo asimétrico es consecuencia de la interacción del viento solar -que se expande desde el Sol con velocidades de cientos de kilómetros por segundo- y el campo magnético de la Tierra -que es un obstáculo “elástico” ante este flujo continuo de partículas-. En la analogía de la roca oponiéndose al paso de un arroyo, el viento solar no puede penetrar el escudo magnético de la Tierra y tiene que desviarse. Se forma entonces una región frontal turbulenta, que desvía el viento solar del lado día de la Tierra (región frontal), y una región opuesta del lado noche que se extiende formando una larga protuberancia (cola).

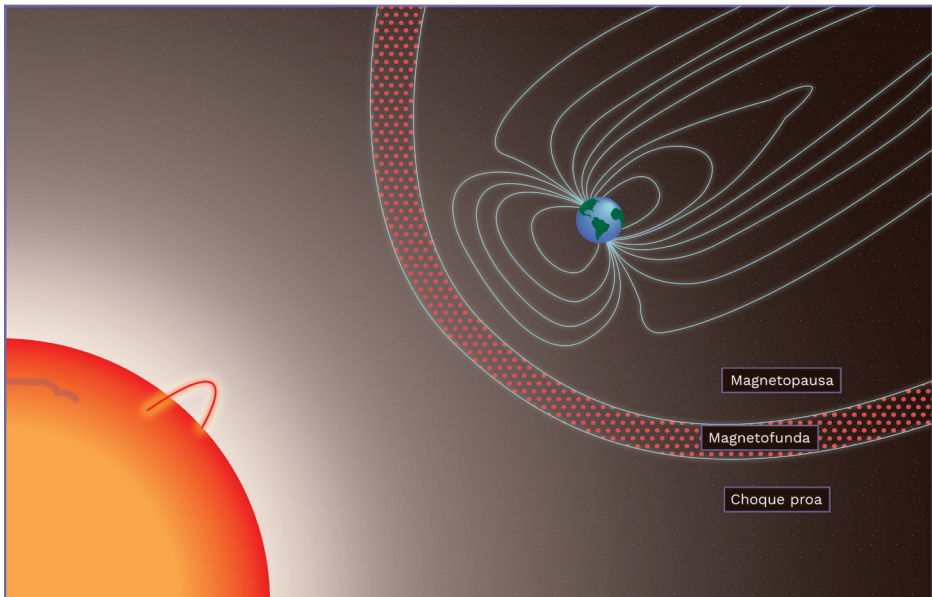


Figura 16. Representación del sistema Sol-Tierra (fuera de escala). A la izquierda de la figura, en la superficie del Sol, ocurre una tormenta solar y se produce una eyección de masa coronal. Del lado derecho se encuentra la Tierra, protegida por sus líneas de campo magnéticas que forman una coraza (magnetósfera), la cual nos protege de las partículas y campos del viento solar. Ilustración de Axel García Pineda.

La Figura 16 muestra un diagrama de la magnetósfera. En ella se pueden apreciar algunos detalles de la compleja interacción entre el plasma del viento solar y el campo magnético de la Tierra. El flujo del viento se aproxima del lado izquierdo. Se muestra la presencia de una onda de choque² al frente de la magnetósfera (*choque de proa*). Esta onda frena, calienta y desvía las partículas del viento solar, formando una región de plasma caliente y turbulento que bordea el campo magnético de la Tierra. A esta región turbulenta se le conoce como la *magnetofunda*. Como el plasma del viento solar y el campo magnético de la Tierra no se pueden mezclar, dado que son plasmas distintos con campos magnéticos diferentes, debe existir entonces una frontera bien definida que los separe. A esta frontera se le conoce como la *magnetopausa*. Al interior de la magnetopausa está el dominio del campo magnético terrestre en dos cavidades asimétricas, mientras que al exterior se encuentra el flujo de viento solar chocado y desviado. De esta manera, podemos decir que la magnetósfera es el escudo que nos protege de los efectos del viento solar, y la imaginaria y gigante barra de imán en el interior de la Tierra, que genera un campo de fuerza magnético para protegernos, nuestra Mujer Invisible.

² Una onda de choque es una perturbación compresiva muy intensa que cambia súbitamente las propiedades del medio.

2.2. La ionósfera, nuestro escudo atmosférico

COMO SABEMOS, LA TIERRA POSEE una capa gaseosa llamada *atmósfera*, gracias a la cual los seres vivos podemos respirar oxígeno. Esta capa está contenida (atrapada) por la fuerza de gravedad de nuestro planeta. Sin la acción de esta fuerza, nuestra atmósfera se perdería, se escaparía continuamente hasta desaparecer. Nuestra atmósfera es un gas que se extiende varios cientos de kilómetros de altura, contiene capas con diferentes propiedades físicas y está compuesta principalmente por nitrógeno (N_2) 78% y oxígeno (O_2) 21%. Actualmente tenemos serios problemas con nuestra atmósfera debido a la acumulación de gases de efecto invernadero que la humanidad ha producido de manera exponencial en el último siglo, principalmente bióxido de carbono (CO_2). Esta acumulación de gases invernadero está causando un calentamiento global con graves consecuencias para la vida en el planeta. Sin embargo, esa es una historia que no tiene que ver con la actividad del Sol ni con el clima espacial. El cambio climático y el calentamiento global no están relacionados con las tormentas solares, los incrementos de radiación solar en las tormentas solares tienen una influencia mucho menor en el clima del planeta comparado con otros factores atmosféricos antropogénicos.

La historia que aquí nos interesa es la que tiene que ver con la capa más importante de la atmósfera terrestre en términos de la relación Sol-Tierra, la *ionósfera*. Esta región de gas absorbe la radiación ultravioleta y los rayos X que vienen del Sol y con ello impide que este tipo de emisiones, con altas energías, lleguen a la superficie del planeta y afecten a los seres vivos. Al momento de absorber esta radiación, el gas de la capa se ioniza (por eso se llama ionósfera) y se recombina, lo cual quiere decir que se liberan sus electrones y adquiere propiedades de plasma. Esta capa comienza a partir de los 60 km de altura, aproximadamente, y se prolonga hasta alcanzar un máximo en su densidad de electrones entre los 200 y 600 km de altura. Más arriba, la densidad de electrones de la ionósfera disminuye gradualmente y se extiende hasta el final de la atmósfera en la frontera con la magnetósfera. Como la ionósfera se forma por la luz ultravioleta y los rayos X que vienen del Sol, es lógico que tenga características distintas del lado día y del lado noche. La ionización, por ejemplo, siempre va a ser mayor del lado día, cuando se recibe directamente la luz del Sol. Debido a ello, la ionósfera es una región muy dinámica que cambia constantemente de características.



Figura 17. Representación de la ionósfera y su relación con las cinco capas de la atmósfera terrestre. La ionósfera tiene propiedades físicas muy importantes: nos protege de la radiación más energética del Sol y refleja las ondas de radio. Debido a que las señales de las telecomunicaciones (antena-satélite) tienen que atravesar esta capa, si se presentan perturbaciones ionosféricas se producen pérdidas de información. Ilustración de Axel García Pineda.

La ionósfera tiene, además, una característica que la hace muy útil para las comunicaciones y aplicaciones tecnológicas. La ionósfera “refleja” las ondas de radio. Esta propiedad permite que una señal de radio producida en algún punto del planeta por una antena emisora se pueda reflejar a varias decenas de kilómetros de altura y, con ello, que la señal se propague hacia otra zona lejana del planeta. Es como si aventáramos una pelota de tenis en dirección diagonal a una pared y, al rebotar, llegara mucho más lejos. Podemos entonces utilizar la ionósfera como una pantalla reflectora para mandar señales de radio a diferentes partes de la Tierra. Así fue como, en 1901, el científico e ingeniero italiano Guglielmo Marconi logró, por primera vez, una comunicación de radio entre Inglaterra y Canadá a través del Océano Atlántico.

La propiedad de absorción de emisiones de altas energías, como luz ultravioleta y rayos X, así como su capacidad de reflejar señales de radio, hacen que la ionósfera se convierta en una segunda coraza para la Tierra. Ambas corazas, ionósfera y magnetósfera, nos protegen de emisiones que vienen del espacio exterior. Podemos pensar entonces que nuestro planeta está protegido ante los efectos del Sol por dos escudos: el

magnético (magnetósfera) y el atmosférico (ionósfera). Sin estos dos escudos, la vida no hubiera podido evolucionar en la Tierra. Sin embargo, veremos que estos escudos no son infalibles.

2.3. Las tormentas geomagnéticas

EN VARIAS PARTES DE ESTE CAPÍTULO hemos repetido que los plasmas asociados con campos magnéticos distintos no pueden mezclarse, y esto se cumple siempre hasta que, sencillamente, no se cumple. La idea de que los plasmas no se mezclan es válida hasta que se dan las condiciones necesarias para romper la resistencia a combinarse de los dos sistemas. A este proceso se le conoce como *reconexión magnética* y, como su nombre sugiere, indica el proceso físico en que dos campos magnéticos diferentes se ven obligados a recombinarse entre sí y conformar nuevas líneas de campo magnético. Las nuevas líneas de campo combinan las dos configuraciones magnéticas que inicialmente eran distintas e independientes. Vencer la resistencia de estos dos plasmas, con campos magnéticos distintos, no es fácil. A los plasmas no les gusta mezclarse, por lo que solamente lo hacen cuando son “forzados”, es decir, obligados violentamente a que interactúen. La reconexión magnética es un fenómeno explosivo que libera mucha energía y que se reproduce en todas las estrellas. Las tormentas solares ocurren, de hecho, por reconexiones magnéticas en la superficie del Sol.

La coraza magnética de la Tierra no es infalible y si se dan las condiciones, se puede “abrir” por varias horas creando una compuerta a través de la cual las partículas del viento solar penetran en la atmósfera de nuestro planeta. La llave para abrir la coraza terrestre es una reconexión entre el campo magnético del viento solar y el campo magnético de la Tierra, justo en la nariz de la magnetósfera. Es en esta región frontal donde ocurre la interacción más intensa entre los dos sistemas, donde se frena y desvía el viento solar.

La orientación del campo magnético de la Tierra tiene su polo positivo en el sur y negativo en el norte. Las líneas del campo geomagnético están orientadas en dirección sur-norte, apuntando al norte. Cuando el viento solar que se aproxima a la Tierra trae consigo un campo magnético con dirección antiparalela, esto es, orientado nortesur (apuntando al sur), entonces se pueden dar condiciones para que los dos campos magnéticos se reconecten. Si además de su orientación

antiparalela, forzamos a los dos sistemas (plasmas) a que interactúen, a través de una colisión violenta, entonces se puede producir su recombinación. La clave para que se produzca una reconexión magnética es forzar la interacción de dos plasmas con campos magnéticos antiparalelos, esa es la llave para abrir la coraza.

En nuestro caso, las condiciones necesarias para que se produzca la reconexión magnética al frente de la magnetósfera son: que ocurra una tormenta solar con una eyección de masa coronal que se mueva hacia la Tierra a más de mil kilómetros por segundo, y que además esta nube traiga consigo un campo magnético apuntando en la dirección sur. En este escenario, la nube magnética debe tener la suficiente energía cinética³ para colisionar violentamente con la magnetósfera y obligar entonces a que su campo magnético antiparalelo se reconecte con el de la Tierra.

Cuando se produce una reconexión magnética al frente de la magnetósfera, se desencadenan una serie de fenómenos físicos que se conocen como *tormenta geomagnética*. La Figura 18 muestra una secuencia que inicia con la reconexión de líneas de campo magnético en la nariz de la magnetósfera. Las líneas se recombinan y son arrastradas por el flujo del viento solar bordeando la Tierra. Las líneas de campo se desplazan atrás del planeta y como si hiciéramos un aplauso estrepitoso con las manos estiradas, las líneas se juntan atrás, se colisionan y se vuelven a reconectar en la cola de la magnetósfera.

³ La energía cinética es la energía que posee un objeto al moverse y es igual a un medio de su masa por su velocidad al cuadrado.

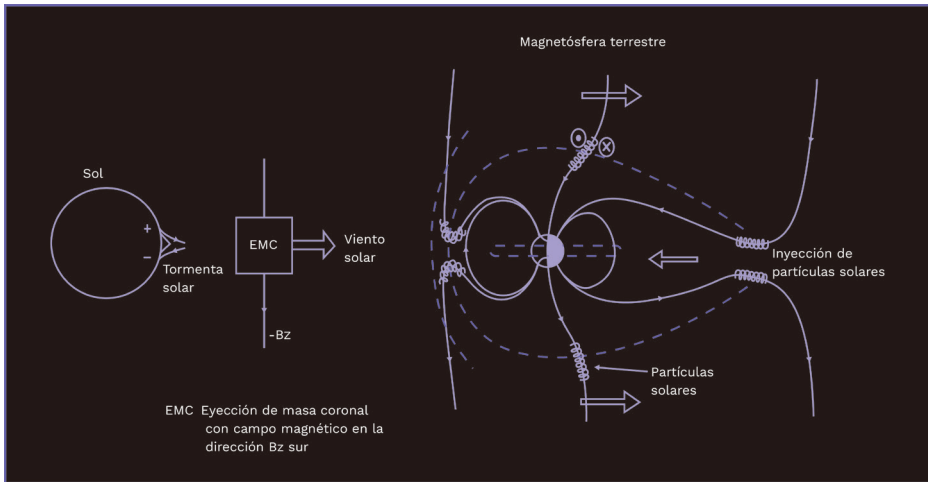


Figura 18. Secuencia de una tormenta geomagnética: A la izquierda, se produce una eyección de masa coronal (EMC) que lleva consigo líneas de campo magnético orientadas norte-sur (apuntan hacia el sur). En el centro, la EMC se propaga en el viento solar en dirección hacia la Tierra llevando consigo su campo magnético apuntando hacia el sur. A la derecha, la EMC se impacta con el campo magnético de la Tierra, el cual está orientado en la dirección sur-norte (apuntando al norte). Se produce entonces una reconexión magnética en la nariz de la magnetósfera, las líneas de la EMC se recombinan con las líneas del campo magnético. Estas líneas de campo recombinadas son arrastradas por el flujo del viento solar (por arriba y por abajo del planeta) y se mueven en dirección opuesta al Sol. Finalmente, se produce una segunda reconexión en el lado noche de la magnetósfera. Ilustración de Axel García Pineda.

Esta segunda reconexión produce una explosión que energiza a las partículas que se encuentran alrededor del punto donde ocurre el fenómeno, estas partículas se calientan y se aceleran. La reconexión abre compuertas. Por un lado, hay un paquete de partículas que sale disparado en dirección opuesta de la Tierra y se pierden en el viento solar viajando hacia la heliosfera externa, pero hay otro conjunto de partículas que se acelera en dirección hacia la Tierra. Estas partículas aprovechan la apertura de la compuerta y se mueven haciendo espirales alrededor de las líneas de campo magnético de nuestro planeta, se aproximan y se alejan alternadamente de los polos magnéticos -como rebotando-, concentrándose en ciertas regiones alrededor de la Tierra que se conocen como *anillos de corriente*. Los anillos de corriente tienen forma de donas (toroides), y están localizados alrededor del ecuador de la Tierra. Estas regiones confinan poblaciones de partículas que, en una combinación de complejos movimientos, dan vueltas alrededor de la Tierra y forman corrientes en forma de anillos, de ahí viene su nombre.

Hay un fenómeno físico consecuencia de las leyes del electromagnetismo: una corriente eléctrica induce un campo magnético. Cuando la reconexión magnética aumenta, la población de partículas en

los anillos de corriente se incrementa y esto induce un campo magnético que tiene la dirección opuesta al campo magnético de la Tierra. Durante estos momentos de perturbación por la reconexión magnética, las corrientes en los anillos se intensifican durante horas o días, se induce un campo magnético externo opuesto al de la Tierra y esto provoca que, con detectores en la superficie del planeta, midamos una disminución temporal del campo geomagnético. A este fenómeno temporal, que puede durar algunas horas o días inclusive, y que provoca la aparente disminución del campo magnético de la Tierra, se le conoce como *tormenta geomagnética*.

Una tormenta geomagnética es una perturbación global del campo geomagnético que puede medirse sobre la superficie de la Tierra. Las tormentas geomagnéticas son provocadas por agentes perturbadores externos, ocasionados por tormentas solares, que viajan por el medio interplanetario y que interactúan con la magnetósfera. Cuando ocurre una tormenta geomagnética, sabemos que nuestros escudos han sido vulnerados y que partículas solares han logrado penetrar nuestra coraza invisible. La magnetósfera ha sido transgredida y la ionósfera va a sufrir muchas perturbaciones.

CAPÍTULO 3

El clima espacial

CUANDO OCURRE UNA TORMENTA GEOMAGNÉTICA, los escudos invisibles de la Tierra son vulnerados y se desencadenan una serie de fenómenos naturales que ponen en riesgo la confiabilidad y operatividad de sistemas tecnológicos indispensables para la sociedad moderna. Es por ello que estudiar los efectos del clima espacial sobre nuestro planeta se convierte en una actividad fundamental tanto para la comunidad de científicos como para los gobiernos nacionales.

3.1. El estudio del Sol y sus efectos sobre la Tierra

EL INICIO DE LA CARRERA ESPACIAL, a finales de la década de los cincuenta, dio pie a un desarrollo exponencial de emocionantes tecnologías y transformó radicalmente nuestra vida cotidiana. Estos cambios vertiginosos nos hicieron, a la vez, dependientes de sistemas tecnológicos que no habiéramos podido soñar a principios del siglo xx. Nuestra forma de vivir se transformó irreversiblemente. De hecho, cualquier lector que haya nacido en el siglo xxi difícilmente podría concebir un mundo en el que no hayan existido siempre las redes de energía eléctrica, los satélites, el internet, los teléfonos celulares, los mapas con sistemas de posicionamiento global, las redes sociales, la banca con pagos y servicios electrónicos, los vuelos intercontinentales, etcétera. Estas tecnologías forman parte de todo lo que hacemos todos los días y se han vuelto indispensables. Vivimos en un mundo interconectado en el que, en cuestión de segundos, nos podemos enterar de lo que está pasando en cualquier parte del planeta y, más aún, podemos sentir sus efectos en cualquier rincón de la Tierra. Lo que

hemos experimentado durante la pandemia de la COVID-19 en 2020, nos ha enseñado cómo se pueden interconectar y afectar todas las regiones del planeta, vivimos en una era global. Imaginemos ahora un evento que afecta a todo el planeta en cuestión de horas, y no de meses como en el caso de la pandemia.

El estudio del Sol, su actividad y los efectos que produce en el espacio, así como su interacción con el entorno de la Tierra, se convirtieron desde un principio en una rama importante de las ciencias espaciales.¹ Siempre hemos sentido fascinación por nuestra estrella, por entender nuestro origen y la fuente de energía de todo el planeta. Sin embargo, cuando comprendimos además que las tormentas solares tienen el potencial de afectar y dañar algunas tecnologías indispensables para nuestra sociedad actual, este tema de investigación se volvió prioritario. La posibilidad de que una tormenta solar extrema pudiera ocasionar efectos catastróficos sobre algunos sistemas tecnológicos, convirtió su estudio en un tema de seguridad nacional para muchos países.

Como vimos en el capítulo anterior, las corrientes de viento solar y las perturbaciones que se propagan a través de este (eyecciones de masa coronal), pueden fisurar la coraza magnética terrestre por algunas horas o incluso días. Estamos conectados con nuestra estrella a través de su atmósfera en expansión (viento solar) y, de vez en cuando, el Sol nos manda recordatorios de su poder de injerencia en nuestro ambiente cercano. La investigación y el monitoreo de la actividad solar y sus efectos en nuestro planeta tienen por ello una importancia estratégica. El *clima espacial* o *meteorología del espacio*, se refiere al estudio y monitoreo de la actividad solar, su propagación, los efectos que provoca en el entorno de la Tierra, y sus repercusiones en sistemas tecnológicos.

3.2. Las auroras polares

UNO DE LOS FENÓMENOS MÁS EXTRAORDINARIOS que la actividad solar ocasiona sobre nuestro planeta son las *auroras polares*. Cuando estas luces nocturnas se observan en regiones de altas latitudes en el hemisferio norte se llaman *auroras boreales*; cuando se observan en el hemisferio sur, *auroras australes*.² En redes sociales se pueden buscar

¹ Otaola, Mendoza y Pérez (2003).

² El nombre proviene de Aurora, la diosa romana del amanecer. La palabra griega bóreas significa Norte, y la palabra latina auster, Sur. (2003).

videos y fotografías de este asombroso fenómeno natural: hermosos despliegues de luces en la noche que presentan una gran variedad de movimientos danzarines con formas onduladas y espigadas. Durante el día no se pueden distinguir claramente las auroras, ya que son opacadas por el resplandor de la luz diurna. Sin embargo, si está en curso una tormenta geomagnética, las aurales polares están presentes todo el tiempo.

Las aurales polares se producen por la interacción de partículas solares con nuestra atmósfera. Estas partículas logran penetrar después una reconexión magnética y se mueven orbitando las líneas del campo geomagnético. Se aproximan a los óvalos polares y colisionan con átomos o moléculas del aire produciendo destellos de luz. Podemos imaginar estas colisiones entre partículas solares y moléculas de aire como choques de canicas, que al momento de golpearse emiten estallidos de luz. Las partículas del Sol siguen un movimiento helicoidal guiadas por las líneas de campo magnético y se aglutinan en regiones en forma de donas alrededor de los polos (*óvalos aurales*). Dependiendo con qué molécula de aire colisionan, se produce un destello de luz con un color particular. Las luces pueden variar entre verde, amarillo, rojo, azul y morado. La actividad auroral puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas.

Los colores de las auroras dependen de la especie atómica (o molecular) que las partículas solares excitan y del nivel de energía que estas alcanzan. Por ejemplo, no es lo mismo que la excitación se produzca en una zona atmosférica con niveles muy altos de oxígeno, a que ocurra en otra región que tenga niveles bajos. A una altura entre 200 y 500 km, los átomos de oxígeno son responsables de los dos colores primarios de las auroras: el verde/amarillo. A una altura entre 100 y 200 km, las moléculas de nitrógeno, al que una colisión le puede desligar alguno de sus electrones de la capa más externa, producen una luz azulada. Por otra parte, las moléculas de hidrógeno son a menudo responsables de la coloración rojo/púrpura de los bordes más bajos de las auroras y de las regiones más externas curvadas.



Figura 19. Aurora boreal en Noruega. Fotografía de Cesar Cantú: <http://www.astrocolorsllc.com/>

En 1896 el científico noruego Kristian Olaf Birkeland sugirió que las auroras eran producidas por electrones de origen solar que seguían las líneas del campo magnético de la Tierra. Sin embargo, su idea no fue aceptada por la comunidad científica internacional de la época e, incluso, fue ridiculizada. En ese momento, no teníamos el conocimiento para entender cómo las partículas del Sol pudieran influir en fenómenos atmosféricos en la Tierra. Tuvieron que pasar varias décadas y, con ello, el inicio de la era espacial, para demostrar que Birkeland tenía razón.

El mecanismo físico de las auroras polares es similar al que ocurre en los tubos de las luces de gas de neón que se utilizan en los anuncios publicitarios. Esa iluminación es la que viene a nuestra mente cuando pensamos en una imagen de la ciudad de Las Vegas, la marquesina de un teatro o el anuncio llamativo de un café o restaurante. En un tubo con neón, el gas se excita por corrientes eléctricas y luego, al desexcitarse y perder su energía, emite una luz coloreada que va a depender del relleno de gas del tubo que se combina con el neón.

Las auroras están confinadas a regiones de altas latitudes en la Tierra alrededor de dos óvalos centrados en los polos magnéticos. Desde el espacio estos parecen como dos anillos luminosos, uno en el norte y otro en el sur, acomodados cerca de altas latitudes. Es por esa razón

que, en general, no podemos observar estos bellos fenómenos en los países que están localizados a bajas latitudes. Sin embargo, el tamaño de estos óvalos puede cambiar con la intensidad de la tormenta magnética. Mientras menos intensa sea la tormenta, los óvalos son más pequeños y se localizan cerca de los polos magnéticos; sin embargo, mientras más intensa sea la tormenta, los óvalos se hacen más grandes y alcanzan latitudes más bajas. En el caso de tormentas magnéticas severas, los óvalos aurorales pueden alcanzar latitudes medias y en el caso de eventos extremos –como el evento Carrington que vamos a discutir en el Capítulo 4–, los óvalos pueden inclusive alcanzar latitudes bajas y regiones ecuatoriales. Como veremos más adelante, hay registros históricos de auroras polares observadas en México en el año de 1859.

3.3. La vulnerabilidad de los sistemas tecnológicos

SI LOS EFECTOS MÁS RELEVANTES de las tormentas solares fueran solamente las auroras polares, estaríamos hablando de un fenómeno natural espectacular, pero este no tendría interés en términos de seguridad nacional. En cambio, las afectaciones que producen las tormentas solares en sistemas tecnológicos indispensables tienen un claro interés de seguridad nacional. Hay tres fenómenos asociados con las tormentas solares que causan efectos que perturban o dañan permanentemente la operación o funcionamiento de sistemas críticos: 1) las fulguraciones, estallidos de luz con flujos de radiación electromagnética de altas energías; 2) las poblaciones de partículas cercanas al punto de la explosión solar, que se calientan y aceleran (energizan) propagándose a velocidades cercanas a las de la luz; 3) las eyecciones de masa coronal, nubes que viajan por el espacio interplanetario y pueden provocar tormentas geomagnéticas si se encuentran a la Tierra en su camino. Estos tres fenómenos afectan tecnologías humanas estratégicas ocasionando:

- Daños en componentes electrónicos y celdas solares de satélites.
- Desaceleración y pérdida de órbita de satélites.
- Fallas en telecomunicaciones vía satélite.
- Interrupciones y bloqueos en radiocomunicaciones.

- Fallas en sistemas de posicionamiento global.
- Afectaciones para tripulación y pasajeros en vuelos transpolares.
- Peligro en la salud de astronautas en el espacio.
- Fallas en redes de generación y distribución de energía eléctrica.

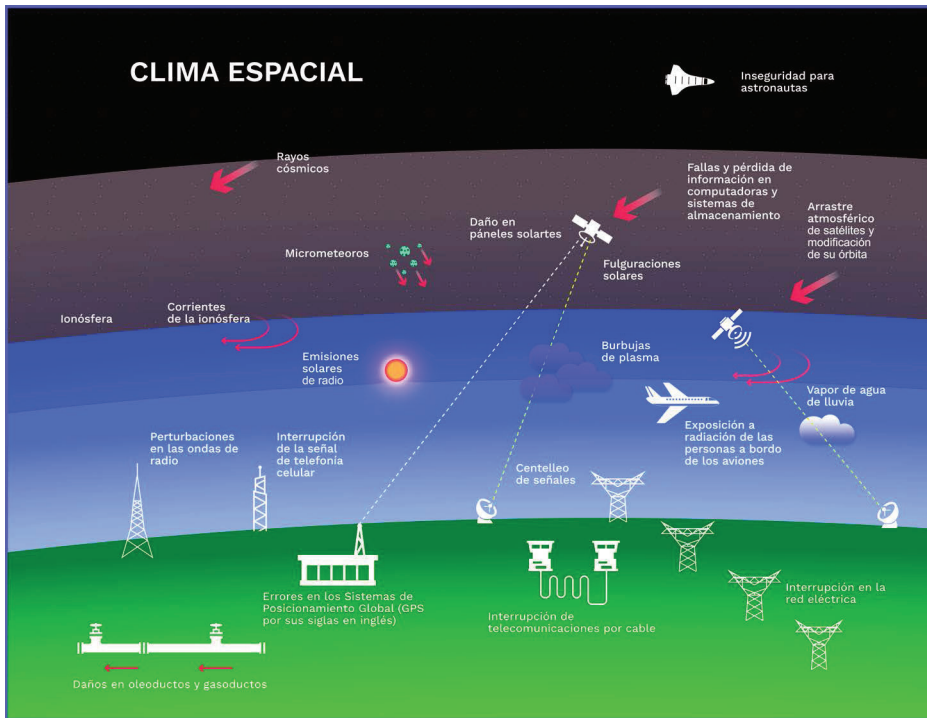


Figura 20. Infografía sobre los efectos del clima espacial en los sistemas tecnológicos indispensables. Una tormenta solar puede afectar satélites, telecomunicaciones, navegación aérea, sistemas de posicionamiento global, acelerar la corrosión de gasoductos y oleoductos, y provocar apagones en redes de generación y distribución de energía eléctrica. Ilustración de Axel García Pineda.

El riesgo ante la posibilidad de fallas en estas tecnologías puede llevar a los gobiernos a tomar decisiones de protección civil desde menores hasta catastróficas, dependiendo de la intensidad y duración del evento. Los eventos de actividad solar moderados son frecuentes y pasan prácticamente desapercibidos para la población, ocurren cientos de estos durante un ciclo solar de 11 años. Por otro lado, los eventos de actividad solar severos o extremos tienen frecuencias muy bajas – períodos de décadas o incluso siglos– y pueden pasar varios lustros sin que afecten a la Tierra.

Como en el caso de las auroras polares, los efectos del clima espacial son diferentes en cada región del planeta. Los países localizados en regiones de altas latitudes son más vulnerables, ya que estos

fenómenos son más intensos cerca de los polos magnéticos y estas regiones puede resentir incluso los eventos moderados. Como se trata de un fenómeno global que afecta a todo el planeta, es muy importante estudiar cada región y conocer sus características locales para evaluar sus riesgos. En el caso de eventos severos o extremos, los efectos son globales.

3.4. ¿Por qué se afectan los sistemas tecnológicos?

CUANDO OCURRE UNA TORMENTA solar hay un estallido de luz muy potente acompañado de partículas que se aceleran a velocidades cercanas a las de la luz. Estas dosis de altas energías de radiación lumínica y partículas pueden provocar daños –irreversibles en algunas ocasiones– en las celdas solares de satélites y en sus componentes electrónicos. Los satélites en el espacio no tienen la protección que nos brinda la atmósfera, la cual amortigua los efectos más dañinos de estas radiaciones. Hay que considerar que existen más de 3 mil satélites operativos y cerca de 8 mil objetos artificiales orbitando alrededor de la Tierra. ¿Y para qué nos sirven los satélites? Para tener internet, transmisiones de televisión, sistemas de posicionamiento global, telefonía celular, monitoreo de las condiciones atmosféricas y del estado del tiempo, para realizar estudios científicos, para conocer la hora exacta en el mercado financiero internacional, etcétera. Los satélites son indispensables para nuestra vida cotidiana.

Una tormenta geomagnética ocurre por el impacto de una eyección de masa coronal que se aproxima a nuestro planeta y se reconecta con el campo de la Tierra. Esta reconexión de campos magnéticos termina inyectando partículas solares en los anillos de corrientes (Capítulo 2). El incremento de esta corriente induce, a su vez, un nuevo campo magnético que se opone al de la Tierra. Por eso es que medimos una variación del campo magnético en los detectores en tierra. En el curso de la tormenta geomagnética, la energía de estas partículas en los anillos comienza a disiparse paulatinamente en forma de calor, y esto provoca que se caliente la atmósfera alta y consecuentemente que se expanda. Cuando la atmósfera se infla, puede alcanzar y rebasar la altura de los satélites con órbitas bajas, provocando fricción y frenando su velocidad. Esta disminución en la velocidad puede inclusive provocar

que los satélites pierdan su órbita. Los operadores de los satélites tienen que estar muy pendientes de estos efectos para poder corregir cambios de órbitas y salvar la operación y vida útil de estos aparatos. Hay cambios de órbitas que pueden volverse irreparables.

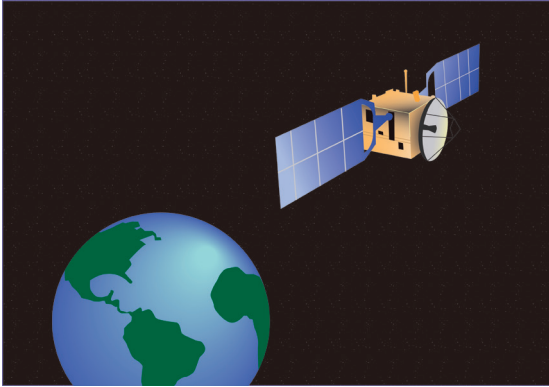


Figura 21. Uno de los primeros efectos de los eventos de clima espacial registrados por científicos y operadores son los daños en satélites. Las intensas radiaciones de luz y partículas de las explosiones solares afectan celdas y componentes. Por otra parte, cuando ocurren las tormentas magnéticas se intensifican los anillos de corriente y luego estos anillos disipan su energía calentando la atmósfera. Este calentamiento provoca que la atmósfera terrestre se expanda y pueda alcanzar la altura de los satélites de trayectorias bajas, lo cual los frena y los puede llevar, incluso, a perder su órbita. Ilustración de Axel García Pineda.

Las tormentas geomagnéticas están acompañadas también por perturbaciones en la ionósfera. Se forman burbujas de plasma y se producen irregularidades. En estos eventos las propiedades físicas de la ionósfera se ven alteradas significativamente y por lo mismo se modifica su capacidad de rebotar ondas de radio. Se producen también interferencias en todas las señales que pasan a través de esta región. Las telecomunicaciones satelitales se basan en mensajes transmitidos en forma de señales de radio que reciben y retransmiten los satélites. Cuando hay perturbaciones en la ionósfera, estas señales se corrompen, se pierde la información y esto nos impide la posibilidad de contactar diferentes regiones sobre la superficie de la Tierra. Se interrumpen las telecomunicaciones.

Estas fallas pueden ser particularmente graves en algunas bandas de radiofrecuencia, las cuales puede llegar a bloquearse completamente durante una tormenta solar. Algunas de estas bandas de comunicaciones en radio son utilizadas por servicios de rescate y emergencia, mientras que otras se utilizan para comunicación y seguimiento de aviones con las torres de control. Ha ocurrido que operaciones de rescate, por ejemplo, durante huracanes, han coincidido con momentos de alta actividad solar y estas misiones de emergencia se han vuelto más difíciles. Por otro lado, hay muchos registros de interrupciones en comunicaciones avión-tierra que fueron provocadas por actividad solar.

Los radares fueron inventados por científicos del Reino Unido durante la Segunda Guerra Mundial para hacer el seguimiento de aviones y objetos en el aire, previendo los ataques aéreos de la Alemania nazi. El 25 de febrero de 1942, una serie de intensas tormentas solares produjo interferencias en radio que bloquearon temporalmente las señales de los radares. Los británicos pensaron que los alemanes habían descubierto la manera de bloquear el funcionamiento de los radares, pero se trataba en este caso de un fenómeno natural, un evento de actividad solar. Tres décadas después, el 23 de mayo de 1967, en plena Guerra Fría, ocurrió una tormenta solar muy intensa que afectó las señales de varios radares de manera muy significativa. Una base militar de los EUA en Alaska confundió el bloqueo de la señal provocado por el estallido en el Sol con un ataque nuclear de la Unión Soviética. En ese momento estuvimos a punto de que estallara la Tercera Guerra Mundial. El protocolo militar indicaba que se tenía que responder con un ataque nuclear de respuesta de manera inmediata. Afortunadamente, un miembro del ejército a cargo del radar verificó y se dio cuenta de que la señal de interferencia había sido producida por la actividad solar y canceló el ataque de misiles. Si en ese momento el militar de los EUA no hubiera tenido conocimientos sobre el clima espacial, quizás no estaríamos aquí ahora.

Otra consecuencia de fallas en satélites y telecomunicaciones son los errores en los sistemas de posicionamiento global. Estos sistemas se basan en la recepción de señales que emiten una flotilla de satélites en órbitas alrededor de nuestro planeta. Estos satélites transmiten señales que son captadas por receptores en tierra (aparatos, teléfonos celulares, relojes inteligentes, etc.). El receptor del aparato debe recibir la señal de varios satélites, los registros de las señales se comparan y se calculan los retrasos relativos entre ellas. Procesando esta información combinada de varios satélites, se obtiene una posición y un tiempo precisos. Cuando las señales de los satélites se corrompen por perturbaciones en la ionósfera, los resultados de los cálculos de los sistemas registran errores en el posicionamiento, los cuales pueden ser desde centímetros hasta varias decenas de metros.

Por otra parte, las partículas energéticas solares, que son aceleradas y energizadas a través de reconexiones magnéticas durante las explosiones en la superficie del Sol, viajan por el espacio y pueden alcanzar la Tierra y su entorno. Si hay astronautas o cosmonautas en el espacio y no se encuentran protegidos, las dosis de radiación de estas

partículas pueden ser letales. Estas partículas no solo tienen efectos en el espacio, sino que también penetran la coraza magnética de la Tierra y siguiendo las líneas del campo geomagnético se aproximan a las regiones polares. Estas dosis de radiación corpuscular en altas latitudes, que por el efecto de amortiguamiento de la atmósfera son de menor energía a las que se reciben en el espacio, pueden afectar a tripulación y pasajeros en vuelos transpolares.

Por estos eventos de partículas y por el hecho de que también las tormentas solares afectan radares y provocan bloqueos en señales de radio (en bandas que utilizan las aerolíneas para comunicarse con los controladores de vuelo), es que la Organización de Aviación Civil Internacional [ICAO por sus siglas en inglés] de las Naciones Unidas, ha solicitado, a partir del 2019, la creación de centros globales de monitoreo de clima espacial. El objetivo de estos centros globales es, de manera similar a los que vigilan las condiciones meteorológicas, proporcionar a los operadores de los vuelos de pasajeros información sobre las condiciones actuales del clima espacial, así como un pronóstico confiable para las próximas horas. En el caso de que existieran condiciones de riesgo por actividad solar, hay protocolos internacionales para salvaguardar la seguridad de la tripulación y los pasajeros.



Figura 22. La afectación de los eventos de clima espacial que más preocupa a los gobiernos es la vulnerabilidad de las redes de generación y distribución de energía eléctrica. Una perturbación geomagnética severa (provocada por una tormenta solar) ocasiona corrientes que pueden dañar transformadores de alto voltaje. Algunos países han desarrollado estudios para valorar la vulnerabilidad de sus redes eléctricas y buscar soluciones para incrementar su resiliencia. Fotografía de Cesar Cantú: <http://www.astrocolorllc.com/>

De todas las posibles afectaciones que una tormenta solar puede provocar sobre la seguridad de la población humana, la que más nos preocupa es la vulnerabilidad de las redes de generación y distribución de energía eléctrica. Una tormenta geomagnética es una variación global del campo magnético sobre la superficie de la Tierra, que ocurre por la penetración de partículas solares en los anillos de corriente (Capítulo 2). Por las leyes de la física sabemos que cuando un campo magnético varía puede inducir corrientes eléctricas en materiales conductores. En el caso de un evento global como una tormenta geomagnética, se pueden producir corrientes inducidas geomagnéticamente [CIG]. Estas CIG provocan variaciones de voltaje en los generadores de energía eléctrica que pueden llevar a calentamientos y daños permanentes en la operación de transformadores eléctricos. Los daños en las subestaciones provocan fallas en los sistemas de generación de energía eléctrica y en caso de eventos extremos pueden provocar apagones globales.³ El 13 de marzo de 1989, en una secuencia de una tormenta solar causando una tormenta geomagnética muy intensa, se provocó un apagón total que afectó a toda la provincia de Quebec en Canadá, dejando sin energía eléctrica a más de nueve millones de personas por casi diez horas.

¿Qué pasaría si de pronto nos quedáramos sin energía eléctrica? La interrupción del suministro eléctrico tendría un efecto cascada que afectaría a todos los servicios que proporciona el gobierno y el sustento de la economía: servicios de emergencia, hospitales, operaciones bancarias, suministro de agua potable, provisión de combustibles, transportación, internet, etcétera. Aunado a todo esto, las afectaciones en la economía global provocarían daños en todos los países.

³ Royal Academy of Engineering (2013).

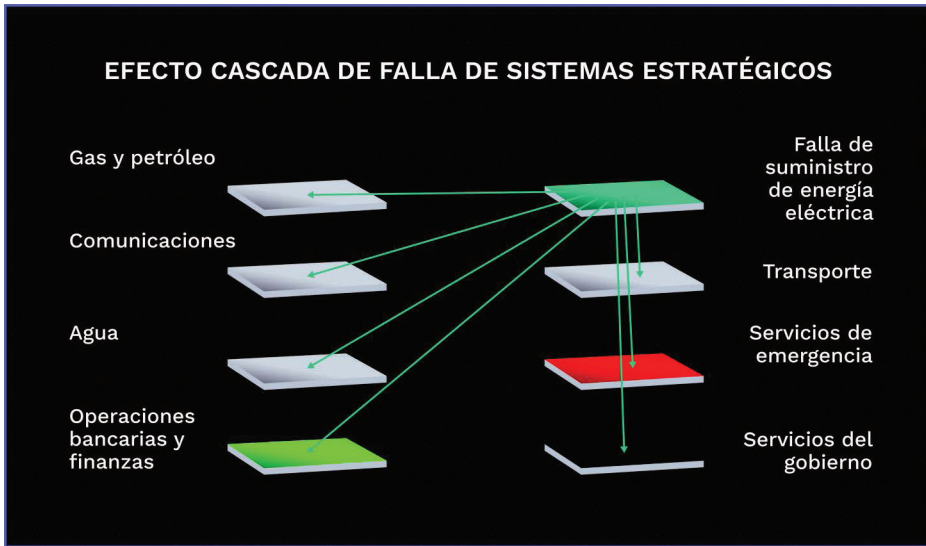


Figura 23. Diagrama de los efectos cascada que se pueden producir en un país cuando falla el suministro de energía eléctrica. Un apagón puede provocar un colapso de los servicios del gobierno, servicios de emergencia, transporte, operaciones bancarias, suministro de agua y combustibles, y comunicaciones. Ilustración de Axel García Pineda.

Es por todas estas razones que un evento extremo de actividad solar pondría en riesgo la operatividad de sistemas críticos y, en ese sentido, es un asunto que preocupa desde hace varios años a muchos gobiernos.

3.5. Efectos de las tormentas solares sobre la biota

¿QUÉ EFECTOS PRODUCE LA ACTIVIDAD SOLAR sobre los seres vivos en la Tierra? Ya hemos mencionado que cuando se produce una tormenta solar y ocasiona estallidos de radiación de altas energías (luz y partículas) pueden poner en riesgo la vida de los astronautas o afectar, en menor grado, a pasajeros y tripulación en vuelos transpolares. Afortunadamente, las capas de nuestra atmósfera nos protegen de la luz y las partículas de estas explosiones. Gracias a esta contención y atenuación atmosférica los efectos son muy menores a nivel de tierra. No hay que temer entonces alguna afectación significativa de estos eventos de radiación de altas energías en la salud de los seres vivos.

¿Qué pasa con las tormentas magnéticas? Como hemos visto, una tormenta geomagnética son variaciones del campo magnético de la Tierra provocadas por los efectos de una tormenta solar. Estas variaciones en el campo magnético afectan, por ejemplo, a las especies

migratorias, como ballenas, aves y mariposas, las cuales utilizan el campo magnético de la Tierra para orientarse mientras migran. Está documentado que varias especies migratorias pierden temporalmente su ruta cuando hay tormentas geomagnéticas: ballenas grises varadas en las costas de California, pájaros petirrojos europeos que modifican su comportamiento en presencia de perturbaciones magnéticas, entre otros. Hemos aprendido que estos eventos naturales afectan temporalmente a especies migratorias.

Pero, ¿hay efectos de las tormentas geomagnéticas en la salud de los seres vivos? ¿Puede una tormenta geomagnética intensa provocar afecciones graves en los seres humanos? Este tema ha sido investigado por la comunidad científica durante varias décadas. Hay algunos estudios estadísticos que sugieren que cuando ocurren tormentas geomagnéticas pudiera existir alguna afectación en la salud de población vulnerable (ataques al corazón, ataques epilépticos, cambios de presión, etcétera). Sin embargo, estos estudios, son muy complejos porque involucran muchas variables que no pueden ser controladas como ocurre en un experimento en un laboratorio. Los resultados estadísticos no son contundentes todavía. Es necesario entonces desarrollar más estudios estadísticos y experimentos para descubrir si realmente existe alguna correlación entre los efectos en la salud de las personas y un fenómeno natural como las tormentas solares. Lo que sí sabemos es que, si esta relación fuera evidente, ya lo habríamos descubierto. En este momento podemos decir que, en general, la comunidad científica internacional que estudia el clima espacial no considera que exista una relación directa entre tormentas geomagnéticas y efectos significativos en la salud humana. Sin embargo, es un tema de estudio abierto que sigue en investigación.

3.6. Asunto de seguridad nacional

DESDE HACE VARIOS AÑOS, algunos gobiernos han empezado a considerar un evento extremo de clima espacial como una amenaza a su seguridad nacional. Se han conformado grupos de expertos para desarrollar planes de prevención y mitigación. Aunque la probabilidad de que ocurra una tormenta solar extrema es baja, su riesgo es muy alto. El tema forma parte también de la agenda de organismos internacionales como la Oficina Para el Uso Pacífico del Espacio

Ultraterrestre de las Naciones Unidas [UNOOSA por sus siglas en inglés], la Oficina para la Reducción de Riesgos de Desastres de las Naciones Unidas [UNDRR por sus siglas en inglés], la Organización Meteorológica Mundial [WMO por sus siglas en inglés] y la ICAO. Como veremos en el Capítulo 5, los planes de acción y reacción involucran una colaboración entre científicos, gobierno y operadores responsables de los servicios vulnerables. En México también se están desarrollando acciones (ver capítulo 5 y apéndice).

CAPÍTULO 4

El evento Carrington y otras tormentas solares

4.1. La tormenta solar perfecta: el evento Carrington de 1859

LA TORMENTA SOLAR MÁS INTENSA de la cual tenemos registro en la historia reciente ocurrió en el siglo XIX. En la madrugada del 2 de septiembre de 1859, en la Ciudad de México, el director del Colegio de Minería,¹ Joaquín Velázquez de León, y sus alumnos del curso de astronomía, observaron atónitos una aurora boreal. Velázquez de León envió emocionado al día siguiente una breve nota al periódico *La Sociedad* describiendo el insólito fenómeno.² En la nota lamentaba además que no habían podido hacer mediciones magnéticas de la tormenta debido a que les habían sido suspendidos los fondos prometidos para construir el que sería, años más tarde, el Observatorio Magnético Nacional. Este hecho representó una tragedia para la historia de la ciencia en México, ya que si hoy contáramos con los datos de cómo se comportó en nuestro país la tormenta geomagnética de 1859, tendríamos información clave para entender las afectaciones de las tormentas solares extremas en nuestra región. Esto nos permitiría, sin duda, comprender mejor el fenómeno y estar mejor preparados.

Los retrasos en la instalación del Observatorio Magnético Nacional del Colegio de Minería se deben, en gran medida, a que el país se encontraba entonces en una guerra civil. Entre 1858 y 1861 tuvo lugar la Guerra de Reforma, en la que liberales y conservadores protagonizaron

¹ Actualmente el Palacio de Minería de la Universidad Nacional Autónoma de México, ubicado en el centro histórico de la Ciudad de México.

² Cuevas-Cardona y González-Esparza (2018).

constantes enfrentamientos en la lucha por el poder. Para 1859 el país se encontraba dividido en dos gobiernos centrales: en la Ciudad de México gobernaba Miguel Miramón, por parte de los conservadores; y en Veracruz, Benito Juárez, por parte de los liberales. Es notable que, a pesar de la inestabilidad política, social y económica de esa época, el Colegio de Minería continuara los esfuerzos por realizar estudios científicos.³

El Colegio de Minería se fundó en la época colonial, en el siglo XVIII, y fue, a lo largo de la historia, un modelo de institución de vanguardia en el que se unieron la investigación y la enseñanza.⁴ Después de la independencia, en 1821, las actividades productivas que sostenían la economía del país quedaron muy mermadas, entre ellas la de la minería, motivo por el cual se planteó en algún momento cerrar el Colegio.⁵ Aunque afortunadamente esto no ocurrió, el Colegio fue una de las instituciones de investigación y enseñanza que se vio más afectada por la inestabilidad política y las limitaciones económicas que caracterizaron las primeras décadas del joven país independiente.

Velázquez de León y sus alumnos nunca supieron que lo que observaron aquella madrugada de 1859 fue parte de lo que hoy conocemos como *evento Carrington*, la mayor tormenta solar registrada en la historia reciente.

La mañana del 1 de septiembre de 1859, en otras latitudes, el astrónomo británico Richard Carrington hacía su observación diaria del Sol para estudiar y dibujar la evolución de esas regiones oscuras del

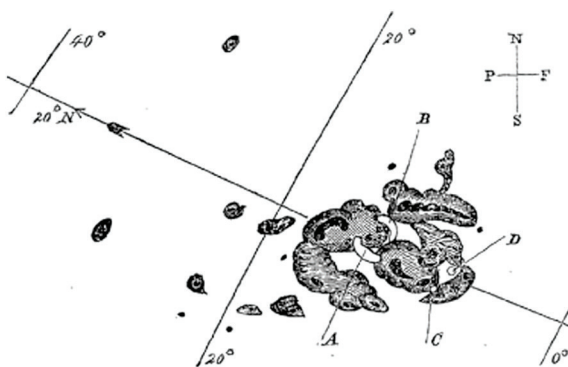


Figura 24. Dibujo de Richard Carrington de la mancha solar que produjo la tormenta del 1 de septiembre de 1859. Tomado de Carrington (1860).

³ El Observatorio Magnético Nacional se estableció hasta 1910, cuando Porfirio Díaz era presidente de México.

⁴ Chambers (1987).

⁵ Ramos y Saldaña (2000).

Sol llamadas *manchas solares*. Desde su observatorio, en los suburbios de Londres, llevaba varios meses registrando la forma y el tamaño de las manchas solares. Su telescopio estaba en el techo de una fábrica de cerveza, a la cual se dedicaba su acomodada familia, y la cual le permitió a él mismo solventar su pasión por la astronomía y tener uno de los mejores instrumentos de aquella época. Ese día, alrededor de las 11 a.m., Carrington estaba terminando su bosquejo del contorno de la mancha solar más grande que había registrado cuando ocurrió un destello de luz en la superficie del Sol que duró solo 5 minutos, aproximadamente. Sin saberlo en ese momento, Carrington acababa de observar la primera tormenta solar captada por un telescopio. Afortunadamente, este evento fue observado y reportado también por otro astrónomo, Richard Hodgson, desde otro lugar en Inglaterra. Estas dos observaciones independientes, desde sitios distintos, permitieron inferir que se había tratado, efectivamente, de un fenómeno en la superficie del Sol. Cabe decir que no se volvió repetir una observación de un evento similar sino hasta mucho tiempo después.

Luego de diecisiete horas del estallido solar captado por los dos astrónomos, en la noche del 1 y en la madrugada del 2 de septiembre de 1859, se produjo el despliegue de luces aurorales más intenso y extenso del cual se tiene registro en la historia reciente. Estas luces aurorales estaban asociadas a una tormenta geomagnética extrema. El evento duró varias horas. Se captaron auroras en muchas partes del mundo, inclusive en lugares donde no tenemos registros de que antes se hubieran detectado fenómenos similares y donde no se han vuelto a observar desde entonces. La aurora roja del evento Carrington cubrió todo el planeta. En México encontramos documentos de al menos siete sitios, en diferentes regiones del país, en donde se vio este asombroso fenómeno.⁶ La aurora boreal se observó en la Ciudad de México, Hidalgo, Querétaro, Guadalajara, Michoacán y Guanajuato. Un exalumno del Colegio de Minería, Ismael Castelazo, escribió también al periódico *La Sociedad*, desde Mineral de Zimapán, en el actual estado de Hidalgo, para informar sobre las observaciones que realizó esa noche. Señaló que quince minutos antes de las 11 p.m. del día 1 de septiembre había visto una nube negra de la que se formó un arco grande con rayos luminosos y una luz roja que iluminó toda la región norte del cielo:

⁶ González-Esparza y Cuevas-Cardona (2018).

La región norte se coloreó de carmín en una extensión de 75° a cada lado del punto Norte prolongándose más allá; pero desvanecida la luz hasta tocar los puntos de Este y Oeste. El foco de luz roja parecía fijo en el polo magnético y la mayor intensidad de la aurora se notó en el cuadrante N.O. Entre la luz roja que cubría el cielo y que había ascendido ya muy viva hasta Orión y las Pléyades trazando un arco paralelo al Ecuador que cortarían a los 70° al meridiano del lugar, se veían rayos de luz blanca que como ráfagas divergentes subían del horizonte boreal hacia el Ecuador, perdiéndose ya débiles en la parte desvanecida de la luz roja que ascendía casi imperceptible hasta el cenit.⁷

Castelazo hizo también observaciones de la tormenta geomagnética. Detectó, durante la presencia de la aurora, alteraciones en las agujas de un teodolito, un compás alemán y una brújula portátil. Así, afirmó: “estos accidentes de la aguja pudieran servir de dato a los físicos que atribuyen la aurora boreal a las corrientes magnéticas del globo”.⁸

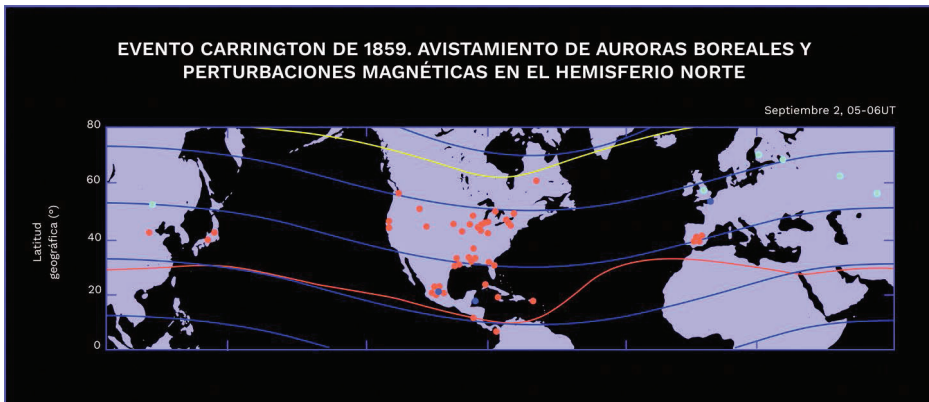


Figura 25. Diagrama de la extensión de la aurora boreal en el hemisferio norte del 1 y 2 de septiembre de 1859. La aurora iluminó de rojo el cielo nocturno y se registró en muchos lugares donde no se ha vuelto a observar un fenómeno similar desde entonces. Ilustración de Axel García Pineda. Foto NASA / Tobias Billings (https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/Aurora1-102411.html)

⁷ Castelazo (1859).

⁸ Castelazo (1859).

Aunque estamos hablando de la mayor tormenta solar que ha impactado a la Tierra en la historia reciente, en aquella época, en el siglo XIX, el impacto tecnológico se notó solamente en la alteración de las líneas del telégrafo en los lugares en los que este se encontraba más desarrollado. El 2 de septiembre se registraron, por ejemplo, alteraciones muy severas en las líneas telegráficas francesas. En *El Constitucional* de París, se publicó que a eso de las 7 a.m. de ese día, esto es, a la hora de comenzar el servicio en las estaciones, se había advertido que en los aparatos telegráficos se manifestaba la presencia de electricidad, como si las estaciones estuvieran transmitiendo una corriente no interrumpida. Las líneas estaban funcionando sin necesidad de conectarse a las baterías.⁹ Hay reportes de cortos circuitos en líneas telegráficas de algunos países, pero, en general, los daños fueron menores.

4.2. ¿Qué es una tormenta solar perfecta?

¿POR QUÉ LE LLAMAMOS AL EVENTO CARRINGTON una tormenta solar perfecta? El término de *tormenta perfecta* se refiere, en el ámbito de la protección civil, al peor escenario posible que pudiera causar un fenómeno natural; es decir, cuando el fenómeno perturbador tiene las características para generar el mayor daño posible a nivel de población e infraestructura. En términos de fenómenos naturales perturbadores, se refiere al peor escenario de un huracán, terremoto, inundación, estallido de un volcán o tormenta solar. En este último caso, nos referimos a cuando las propiedades de la fulguración (estallido de luz), la emisión de partículas de altas energías y, sobre todo, la eyección de masa coronal (nube de material solar que se impacta con el campo magnético de la Tierra), tienen las características (tamaño, velocidad y campo magnético) para provocar una perturbación extrema en el entorno espacial de la Tierra, se considera entonces el caso de una tormenta solar perfecta. Esta emisión de luz y partículas de altas energías dañaría satélites y perturbaría severamente la ionósfera, pero el mayor daño vendría algunas horas después con el impacto de la eyección de masa coronal, que causaría una tormenta geomagnética extrema. Ocurrirían auroras polares en todo el planeta. Esta tormenta geomagnética induciría corrientes eléctricas que afectarían las líneas de alta tensión y provocarían daños irreversibles en las redes de distribución y

generación de energía eléctrica. Esa es nuestra preocupación ante la posibilidad de que se repita un evento Carrington. En términos de protección civil, debemos siempre prevenirnos con base en el peor escenario posible.

Las tormentas solares están asociadas con regiones activas del Sol relacionadas con grupos de manchas solares. Cuando nuestra estrella presenta condiciones de actividad severa, las tormentas solares no suceden como eventos únicos y abruptos, sino que el grupo de manchas solares, donde se empiezan a producir las explosiones, se va haciendo gradualmente más grande y más complejo. Visto desde la Tierra, el Sol sigue su rotación de 27 días, el grupo de manchas aparece primero del lado este de la cara de la estrella y se desplaza gradualmente, día con día, acercándose poco a poco hasta apuntar en la dirección hacia donde se encuentra nuestro planeta. Muchas de esas primeras tormentas solares no nos afectan, porque se propagan hacia direcciones lejanas a la Tierra. En la región activa, encima de las manchas solares, estas explosiones pueden ocurrir varias veces por día. El grupo de manchas debe ser lo suficientemente grande y complejo para producir explosiones severas (fulguraciones tipo X).

Podemos entonces pensar que el Sol nos avisa, con algunos días de antelación, que va a incrementar la posibilidad de producir tormentas severas y que pueden apuntar en la dirección hacia donde está nuestro planeta. Por ejemplo, cuando ocurrió el evento Carrington, el Sol ya había manifestado en los días previos una actividad muy alta, inclusive se habían visto auroras boreales muy intensas en Europa y el norte de América el 28 de agosto. Esto nos indica que el Sol había producido al menos una tormenta solar severa que antecedió al evento Carrington. Esta tormenta previa había golpeado el campo magnético de la Tierra y produjo las auroras boreales del 28 de agosto, así que cuando llegó la nube del evento Carrington, el 1 de septiembre, nuestro escudo magnético ya había sido perturbado.

4.3. Tormentas solares severas en la historia reciente

AUNQUE EL EVENTO CARRINGTON ocurrió hace 160 años y esto nos pudiera parecer un intervalo de tiempo muy grande para un fenómeno natural, en realidad para el Sol, que tiene más de 4.5 mil millones de años,

⁹ González-Esparza y Cuevas-Cardona (2018).

no es nada. En comparación, sería como algo menos que un minuto para una persona que ha vivido 50 años.

Todas las estrellas presentan ciclos de actividad. Hay mediciones de estrellas similares a la nuestra que han tenido eventos mucho más intensos. En la historia reciente, después del evento Carrington, han ocurrido varias tormentas solares severas que han producido afectaciones en el entorno de nuestro planeta y han afectado sistemas tecnológicos. Conforme más avanza nuestra tecnología y el monitoreo de nuestra estrella, más sensibles y vulnerables nos hemos vuelto a este tipo de amenazas. La Tabla 3 reseña algunas de estas tormentas en la historia reciente. Los daños ocasionados por el evento Carrington fueron relativamente menores y se limitaron a interrupciones e incendios en las líneas del telégrafo en EUA y en Europa. Sin embargo, ahora sabemos que, si en estos momentos volviera a ocurrir una tormenta solar perfecta, los efectos podrían ser devastadores y globales. La razón es que la tecnología que tenía la humanidad en el siglo XIX es muy diferente a la que existe hoy en el siglo XXI.

Tabla 3. Relación histórica de tormentas solares severas en la historia reciente

AÑO	ACONTECIMIENTO
1 septiembre 1859	<i>Evento Carrington.</i> La tormenta solar más intensa de la cual se tienen registros. Una combinación de una fulguración muy intensa (X48) acompañada por una eyección de masa coronal que tardó solo 17 horas en llegar a la Tierra. Afectó las redes de telégrafos de Norteamérica y Europa, provocando cortocircuitos en los cables e incendios en algunas estaciones. Las auroras boreales fueron vistas incluso en el Caribe.
13-15 mayo 1921	La red de telégrafos al oeste de Misisipi se cayó. Además, la estación de ferrocarril de Nueva Inglaterra fue destruida por un fuego provocado por un cortocircuito.
25 febrero 1942	Interrupciones en los registros de radares ingleses en la Segunda Guerra Mundial.
23 mayo 1967	Interferencias en los sistemas de radares de la Fuerza Aérea de los EUA. Las interferencias fueron confundidas con señales de un ataque nuclear de la entonces Unión Soviética, lo cual pudo haber provocado el inicio de la Tercera Guerra Mundial.
4 agosto 1972	Una fulguración interrumpió las comunicaciones telefónicas. Este hecho motivó que la compañía AT&T rediseñara su sistema de energía.

<p>13 marzo 1989</p>	<p><i>El apagón de Quebec.</i> Una tormenta geomagnética muy intensa, generada por el impacto de una eyección de masa coronal, provocó un apagón en la ciudad de Quebec, Canadá. El apagón dejó a 9 millones de personas sin energía eléctrica durante 10 horas. También se registró la quema de transformadores en New Jersey, EUA Esta tormenta geomagnética fue un evento muy relevante porque demostró, por primera vez y de manera contundente, la vulnerabilidad de las redes de generación y distribución de energía eléctrica ante la ocurrencia de tormentas solares intensas. En ese sentido, dio una señal a la clase política y a los jefes de gobierno de varios países para comenzar a preocuparse por este tipo de fenómenos naturales.</p>
<p>14 julio 2000</p>	<p><i>Evento del Día de la Bastilla.</i> Fulguración, eyección de masa coronal y tormenta geomagnética que causó cortocircuitos en algunos satélites e interrupciones en radiocomunicaciones. Se bautizaron como eventos del Día de la Bastilla por su coincidencia con el día en que Francia conmemora el comienzo de la Revolución francesa.</p>
<p>27 octubre 2003</p>	<p><i>Las tormentas de Halloween.</i> Los eventos de Halloween de 2003 marcaron otro evento crucial. Durante esta serie de tormentas solares, de finales de octubre y principios de noviembre, ocurrieron los estallidos de luz más intensos en rayos X que han medido los satélites GOES de la NOAA (una fulguración X28.0 el 4 noviembre y una X17.2 el 28 de octubre). Estas explosiones de luz llegaron incluso a saturar las escalas de medición de sus instrumentos. Una serie de fulguraciones y eyecciones de masa coronal provocaron interrupciones en las telecomunicaciones. Se observaron auroras boreales en el sur de Texas y en países del Mediterráneo, aunado a apagones en Suecia. Se emitieron alertas a compañías de aviación para evitar vuelos transpolares. Las eyecciones de masa coronal que acompañaron a estas explosiones produjeron tormentas geomagnéticas que dañaron las redes de energía eléctrica en Sudáfrica, Australia y Nueva Zelanda.</p>
<p>5 diciembre 2006</p>	<p>Una fulguración interrumpió las telecomunicaciones satelitales y las señales de navegación de GPS por 10 minutos. La radiación de la fulguración dañó el satélite GOES 13, que detectaba las emisiones del Sol en rayos X.</p>
<p>23 julio 2012</p>	<p><i>La tormenta solar perfecta de la que nos salvamos.</i> En julio de 2012 ocurrió una explosión solar cuya nube (eyección de masa coronal) fue captada por la nave espacial STEREO de la NASA. Esta nube en el medio interplanetario tenía todas las características de una tormenta solar perfecta (tamaño, velocidad y campo magnético). Afortunadamente, la nave espacial en ese momento</p>

	estaba muy lejos de la Tierra y la nube no pasó cerca de donde se encontraba nuestro planeta. No chocó con el campo magnético de la Tierra y no se produjo ninguna reconexión. Nos salvamos.
6 septiembre 2017	<i>Los eventos de septiembre de 2017.</i> Serie de explosiones solares muy intensas ocurridas durante la fase descendente del ciclo solar 24. En México, estos eventos solares coincidieron con la presencia de un huracán en el Golfo de México y dos sismos muy intensos.

Tabla 3. Fuente: elaboración del autor.

Los eventos de septiembre de 2017: tormentas solares, sismos y huracanes

Como lo reportó el Servicio de Clima Espacial México, en septiembre de 2017 apareció una mancha solar que produjo varias explosiones muy intensas. El 6 de septiembre ocurrió una fulguración X9.3, una de las diez fulguraciones más intensas en rayos X que han captado los satélites GOES de la NOAA en los últimos 30 años. El 7 de septiembre una eyección de masa coronal, que pasa por la órbita de la Tierra, produjo una tormenta geomagnética severa. En ese momento había además tres huracanes, dos en el Caribe (“Irma” categoría 5 y “José” categoría 4) y uno azotando en las costas de Veracruz y Tamaulipas en el Golfo de México (“Katia” categoría 2). La actividad solar coincidió además con la ocurrencia de dos sismos en México (el 7 de septiembre magnitud 8.2 y el 19 de septiembre magnitud 7.1). La Figura 26 muestra la línea del tiempo de los fenómenos perturbadores que acontecieron en México. Estos fenómenos naturales son distintos y no tienen ninguna relación física directa. Se han publicado estudios estadísticos en revistas científicas que muestran que se trata de dos fenómenos naturales que no están correlacionados entre sí. No hay tampoco ningún mecanismo físico conocido que pudiera conectar un evento explosivo en la superficie de Sol (a 150 millones de km) con el movimiento de las placas tectónicas en el subsuelo del planeta. Sin embargo, en redes sociales se difundió información falsa asegurando que las tormentas solares producían terremotos en México.

Como consecuencia de esto, el Servicio Sismológico Nacional, el Servicio de Clima Espacial y el SINAPROC tuvieron que salir a los medios

para aclarar que esta información era falsa. No hay ninguna relación directa entre tormentas solares y sismos en la Tierra. Sin embargo, las coincidencias de estos fenómenos perturbadores en México estuvieron a punto de crear condiciones de un peor escenario posible en términos de protección civil. Afortunadamente, por la hora local en la cual ocurrieron, las explosiones solares solamente produjeron interferencias de telecomunicaciones en las tareas de rescate en el Caribe, pero no produjeron perturbaciones significativas en México que hubieran afectado las labores de rescate del huracán o los sismos.

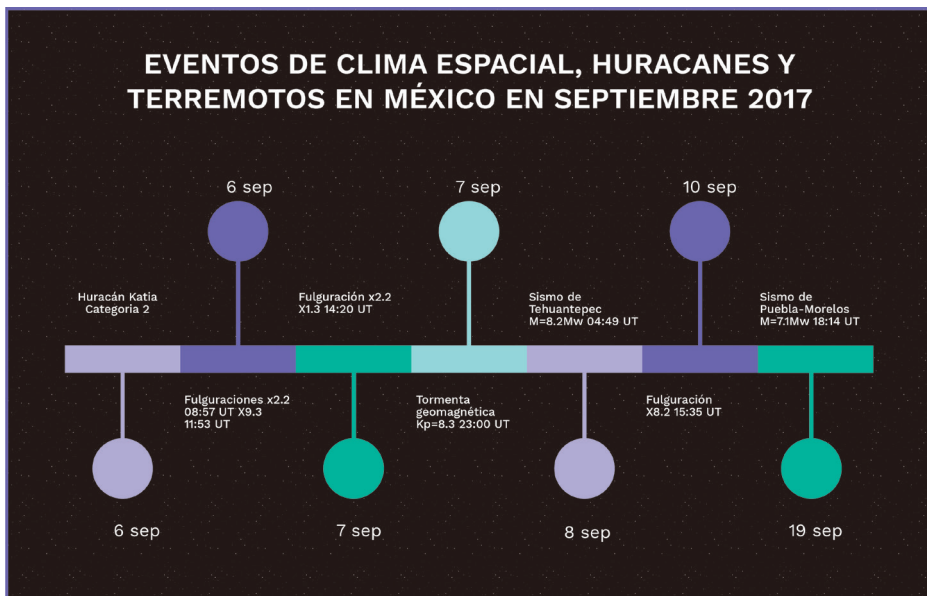


Figura 26. Línea del tiempo que muestra la secuencia de los tres fenómenos naturales perturbadores que afectaron a México en septiembre de 2017. La sucesión de eventos comenzó el 6 de septiembre con el impacto del huracán Katia en las costas de Veracruz y Tamaulipas. Le siguen las fulguraciones solares, tormenta geomagnética y dos sismos. Figura del autor. Ilustración de Axel García Pineda.

4.4. La próxima tormenta solar perfecta

EL MONITOREO DE NUESTRA ESTRELLA utilizando satélites y observatorios en tierra es relativamente reciente, tan solo tiene unas décadas que empezamos. Todavía no hemos reunido registros históricos suficientes como para poder predecir cuándo ocurrirá el próximo evento Carrington. Han pasado más de 160 años desde la tormenta solar del siglo XIX, y el próximo evento pudiera ocurrir alrededor del siguiente máximo de actividad solar (2024-2025) o pudieran pasar otros 100 años más.

4. EL EVENTO CARRINGTON Y OTRAS TORMENTAS SOLARES

No lo sabemos. Lo que sí sabemos es que va a ocurrir y debemos estar preparados.

En el capítulo 2 mencionamos que el Sol tiene un ciclo de manchas con un periodo aproximado de 11 años. Cuando el Sol tiene muchas manchas ocurren muchas tormentas solares y estas son, en general, más intensas. Sin embargo, las tormentas solares severas pueden ocurrir en cualquier fase del ciclo solar, exceptuando el mínimo, cuando no hay manchas ni regiones activas. La Figura 27 muestra un gráfico con la evolución del número de manchas solares en el tiempo, cubriendo los últimos dos ciclos solares (23 y 24), desde 1996 hasta 2020. La Figura indica con líneas verticales rojas la ocurrencia de las 10 fulguraciones solares más intensas que han captado los satélites GOES en los últimos dos ciclos solares (23 y 24). Como se puede notar, estas diez explosiones ocurrieron en momentos muy distintos del ciclo solar: en la fase ascendente, cerca del máximo y en la fase descendente. Aunque la frecuencia y la intensidad de las tormentas solares se incrementa alrededor del máximo, no necesariamente los eventos más severos ocurren en ese periodo. Solamente alrededor del mínimo de actividad solar es que nuestra estrella nos permite tomar un respiro sabiendo que es muy improbable que ocurran tormentas solares severas.

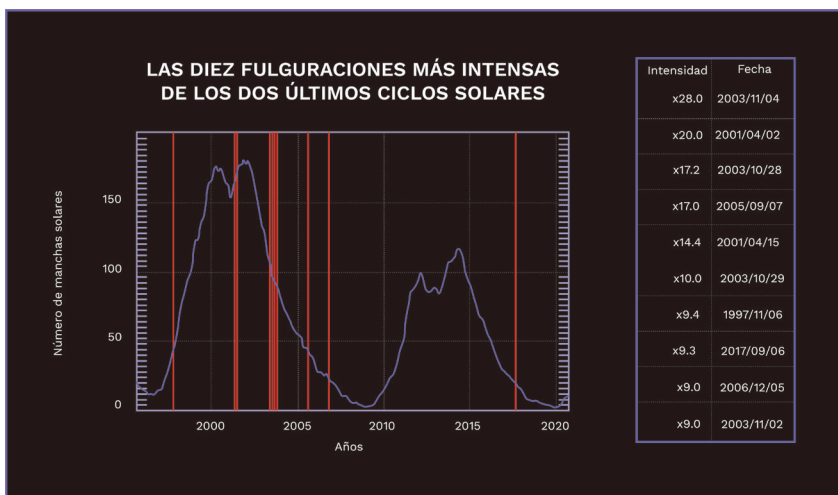


Figura 27. La figura muestra la evolución de los últimos dos ciclos del número de manchas solares (1996-2020). Podemos notar que el último ciclo solar, 24, tuvo menor intensidad que el anterior. Las líneas verticales indican el tiempo en que ocurrieron las 10 fulguraciones solares más intensas que se han detectado por los satélites GOES en los últimos dos ciclos. La gráfica muestra que los eventos intensos no necesariamente ocurren en la fase máxima del ciclo solar. Figura del autor. Ilustración por Axel García Pineda.

CAPÍTULO 5

Planes de acción ¿Qué debemos hacer?

5.1. ¿Qué podemos hacer nosotros ante las tormentas solares? ¿Qué deben hacer nuestros gobiernos para protegernos?

NOSOTROS, COMO INDIVIDUOS, no podemos hacer prácticamente nada para salvaguardar la infraestructura en riesgo ante una tormenta solar. Los efectos de una tormenta solar severa constituyen una amenaza a la seguridad nacional de todos los países. Lo que se tiene que hacer, siguiendo las mejores prácticas internacionales, es tener una política de prevención desde el Estado, lo que se conoce como *gestión integral de riesgos*. Como parte de esta gestión, los gobiernos deben:

- Financiar y promover estudios científicos del fenómeno.
- Invertir en el monitoreo y pronóstico de la actividad solar y sus efectos sobre el planeta.
- Desarrollar políticas públicas con protocolos de prevención y reacción.

Financiar y promover estudios científicos del fenómeno es fundamental. Para poder reducir nuestra vulnerabilidad ante cualquier fenómeno natural, lo primero que debemos hacer es estudiarlo utilizando la investigación científica. En nuestro caso, se necesitan instrumentos en el espacio y en la Tierra para poder medir parámetros en el Sol, el medio interplanetario y el entorno de la Tierra. Con esta información se desarrollan bases de datos y modelos físicos de la actividad solar y de sus efectos sobre nuestro planeta. Conocer mejor a nuestra estrella no solo es un objetivo importante de la ciencia, sino que, además, tiene una utilidad práctica evidente.

Una tormenta solar es un fenómeno global, el cual provoca afectaciones particulares en distintas zonas del mundo. Es necesario entonces procurar una red de instrumentos que midan estos efectos en las diferentes regiones. Cada país, en la medida de sus posibilidades, debe conocer cómo es que los eventos de clima espacial repercuten sobre su territorio. La investigación científica nos ayuda a comprender cómo se produce la actividad solar, cómo es que el Sol cambia con el ciclo solar, cómo se propagan sus perturbaciones en el medio interplanetario, cómo estas perturban al campo magnético de la Tierra y a la ionósfera, y cómo pueden afectar a los diferentes sistemas tecnológicos. Sin el conocimiento científico de este fenómeno, no podemos mejorar nuestra resiliencia; no podemos prepararnos ante algo que no conocemos.

Pero no solo basta con desarrollar estudios científicos para comprender mejor el fenómeno, debemos además vigilarlo de manera continua. Es necesario por ello invertir en el monitoreo del estado del Sol y del entorno de nuestro planeta y tener un sistema de alertamiento de actividad solar. Aquí es donde las operaciones de los servicios de clima espacial son esenciales. Es necesario que, de la misma forma en que los servicios meteorológicos vigilan las condiciones del planeta para notificar sobre la evolución de huracanes, lluvias o sequías; los servicios de meteorología del espacio proporcionen alertamientos y pronósticos de las condiciones actuales de la actividad solar y el entorno de la Tierra. La vigilancia del clima espacial es un tema de soberanía y cada país debe medir y conocer los efectos en su propio territorio. Al ser un fenómeno global, es necesario la colaboración internacional para cubrir todo el planeta.

Finalmente, resulta indispensable que todos los gobiernos desarrollen e implementen políticas públicas de prevención ante la posibilidad de un evento severo del clima espacial. No basta comprender mejor el fenómeno y monitorearlo si no sabemos cómo vamos a reaccionar cuando este ocurra. Como hemos visto, los efectos de las tormentas solares nos preocupan porque afectan la operatividad y confiabilidad de sistemas tecnológicos críticos que son indispensables en la sociedad moderna. Los responsables de estos servicios (satélites, telecomunicaciones, redes de energía eléctrica) deben tener protocolos de reacción operativos para cuando las condiciones de clima espacial cambien. El gobierno debe articular y coordinar estas acciones, para notificar y obligar a que los operadores reaccionen

e implementen las medidas de mitigación correspondientes. Estos sistemas tecnológicos no deben colapsar bajo ninguna circunstancia. Las políticas de prevención nos deben permitir, desde el gobierno, saber qué hacer antes, durante y después del evento. Una de las tareas prioritarias de cualquier Estado, es la protección de la población y la infraestructura ante desastres derivados de fenómenos naturales perturbadores.

5.2. El estudio del clima espacial: satélites y redes de instrumentos en tierra

A PARTIR DE OCTUBRE DE 1957 (inicio de la era espacial), se han lanzado muchas misiones que nos han permitido colocar instrumentos fuera de la atmósfera de la Tierra para medir las propiedades del Sol, del viento solar, de la magnetósfera y de la ionósfera. Llevamos más de seis décadas explorando estos sistemas físicos. Además de la información que ya teníamos por los telescopios en tierra, pudimos, por ejemplo, empezar a medir las emisiones solares en rayos X –las cuales no pueden llegar a la superficie gracias a la absorción de la atmósfera–, descubrimos el viento solar y cómo es que este se conecta con el campo magnético de la Tierra, y aprendimos también cómo se producen las tormentas geomagnéticas. Comprendimos la causa de las luces aurorales y las afectaciones que producen los eventos de clima espacial en sistemas tecnológicos estratégicos. La era espacial generó una revolución en la manera en cómo estudiamos a nuestra estrella y su relación con nuestro planeta. Desde la Tierra y desde el espacio estamos estudiando –y vigilando– la actividad solar y sus efectos sobre nuestro entorno.

Algunos países tienen agencias espaciales y han podido desarrollar presupuestos y tecnologías para enviar al espacio diversas misiones científicas: la NASA de los EUA, la Agencia Espacial Federal de Rusia (Roscosmos), la Agencia Espacial Europea (ESA), la Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA), la Agencia India de Investigación Espacial (ISRO), la Administración Espacial Nacional China (CNSA), etcétera. Como ocurrió durante la Guerra Fría, la investigación espacial conlleva el desarrollo de tecnologías que luego se convierten en estratégicas en el ámbito civil y militar. Sin embargo, el costo de estas investigaciones es muy alto y, por lo mismo, son muy pocos los países que pueden desarrollarlas.

Una nave espacial que tiene como objetivo el estudio del Sol y su interacción con la Tierra, lleva, por lo general, varios instrumentos para hacer observaciones en el espacio: una cámara para tomar imágenes a diferentes frecuencias (luz visible y no visible), detectores de partículas, un medidor de campo magnético, y otras mediciones. Las misiones intentan, a través de sus observaciones, obtener información para conocer mejor las características de las diferentes capas del Sol, sus cambios, y su evolución durante una tormenta solar. En el medio interplanetario nos interesa medir *in situ* el flujo de partículas del viento solar, sus propiedades (velocidad, densidad, temperatura) y campo magnético. Queremos detectar las tormentas solares cuando se propagan entre el Sol y la Tierra. Dentro del entorno de la magnetósfera, nos interesa medir las propiedades del plasma y también su campo magnético, las ondas que existen en ese medio y las formas en que se producen las reconexiones magnéticas. En la ionósfera nos interesa conocer las propiedades de esta extendida y dinámica capa de nuestra atmósfera y entender mejor sus variaciones cuando se producen eventos de clima espacial.

La complejidad del estudio de la relación Sol-Tierra, desde el punto de vista científico, es la diversidad de sistemas físicos interconectados, a lo largo de 150 millones de kilómetros, que tienen propiedades muy diferentes entre sí. Hablamos de sistemas como la superficie del Sol, la atmósfera del Sol, el viento solar, la magnetósfera y la ionósfera. Como lo escribió Carl Sagan en su libro *Cosmos* en 1980: La superficie de la Tierra es la orilla del océano cósmico. En esta orilla hemos aprendido la mayor parte de lo que sabemos. Recientemente hemos salido un poco, tal vez hasta los tobillos, y el agua parece atractiva. Una parte de nuestro ser sabe de dónde venimos. Anhelamos regresar, y podemos, porque el cosmos también está dentro de nosotros. Estamos hechos de material de estrella. Somos una forma de que el Cosmos se conozca a sí mismo.

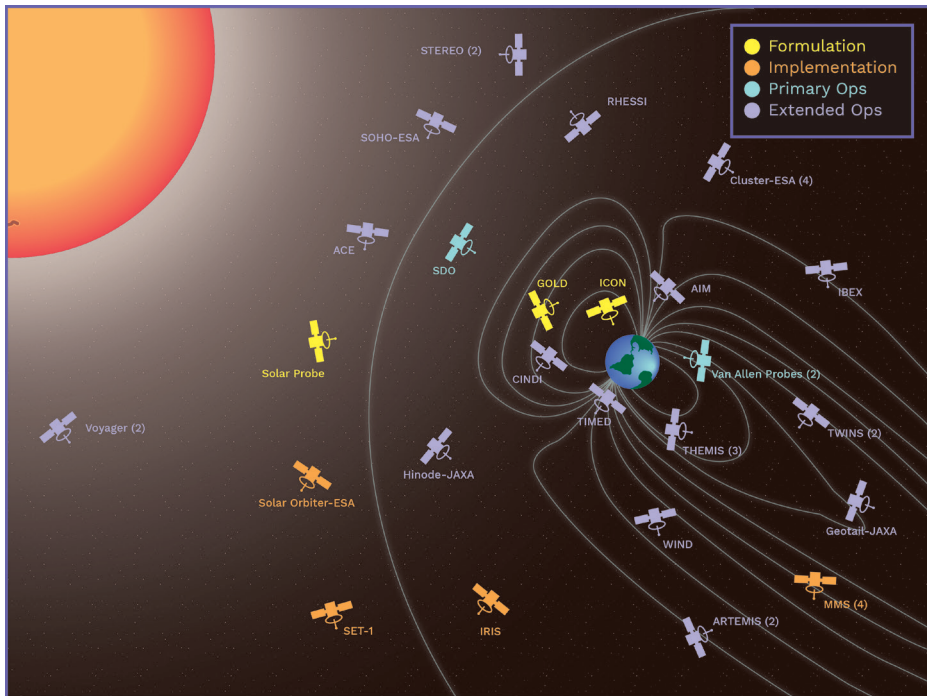


Figura 28. Infografía de algunas naves de la armada de misiones espaciales para estudiar el sistema Sol-Tierra. Ilustración de Axel García Pineda.

Así como las observaciones de satélites son muy importantes para el estudio de la relación entre el Sol y la Tierra, también lo son las observaciones terrestres. Al tratarse esta relación de un evento global, es necesario conocer las características de cómo se perturban distintas regiones del planeta cuando ocurren eventos de clima espacial. Se requiere entonces de muchas redes de mediciones locales de ionósfera, detectores de partículas energéticas y mediciones de campo magnético. En cuanto a costo y logística, los diferentes instrumentos que utilizamos para estudiar el Sol (telescopios y radiotelescopios) son más accesibles para desarrollar en tierra que ponerlos en el espacio. Por esa razón existen redes de instrumentos en diferentes partes del mundo.

Como en este caso lo que nos interesa estudiar se encuentra en dirección al Sol (lado día), se requiere una serie de instrumentos, localizados a diferentes longitudes del planeta, para poder combinarlos y tener una cobertura continua y en tiempo real que vigile a nuestra estrella (la rotación de la Tierra hace necesario pasar continuamente la estafeta de observación a la región del planeta que está del lado

día). De esta forma se complementan las observaciones que hacemos desde tierra con aquellas que hacemos desde las naves espaciales. Esta necesidad genera una oportunidad de cooperación internacional, ya que para entender y monitorear el sistema Sol-Tierra requerimos combinar observaciones de diferentes regiones. Ningún país puede hacer esto sin colaborar con otros.

5.3. Monitoreo de la actividad solar y servicios de clima espacial

EL CLIMA ESPACIAL ES UN FENÓMENO GLOBAL. En este sentido, difiere de los daños locales que provocan otros fenómenos naturales como sismos o huracanes. La Organización Meteorológica Mundial (WMO) incluyó desde hace algunos años al clima espacial como uno de sus temas de acción y desarrolla un plan para integrar la meteorología del espacio dentro de sus responsabilidades.¹ La Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) implementó desde 2019 el establecimiento de centros globales de monitoreo del clima espacial para proporcionar información a todos los vuelos comerciales.² Los pilotos, controladores de vuelo y meteorólogos aeronáuticos, deben estudiar ahora capacitación en clima espacial. Los centros regionales de los Servicios Internacionales de Meteorología Espacial [Internacional Space Environment Services, ISES], son servicios nacionales de clima espacial que monitorean y colaboran compartiendo datos e información. En 2020, el ISES contaba como miembros a los siguientes países: Argentina, Australia, Austria, Bélgica, Brasil, Corea del Sur, Canadá, China, EUA, Republica Checa, India, Indonesia, Japón, México, Noruega, Polonia, Reino Unido, Rusia, Sudáfrica, Suecia y la Agencia Espacial Europea.

¹ “Organización Meteorológica Mundial. Plan cuatrienal para las actividades relativas a la meteorología del espacio 2016 2019”, documento disponible en línea: http://www.sciesmex.unam.mx/blog/wmo-plan-cuatricenal-para-las-actividades-relativas-a-la-meteorologia-del-espacio_2016_2019/.

² <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/New-global-aviation-space-weather-network-launched.aspx>

5.4. Planes de acción de los gobiernos para incrementar la resiliencia de sistemas críticos

EN PARALELO A ESTOS ESFUERZOS INTERNACIONALES, varios gobiernos han incluido los efectos del clima espacial en sus catálogos de amenazas y han publicado estrategias para prevenir las afectaciones de estos fenómenos naturales en su operación e infraestructura. El gobierno de Gran Bretaña publicó en marzo de 2015 el documento *Análisis de riesgos nacionales*³ y en julio del mismo año su *Estrategia de clima espacial*.⁴ Por otro lado, el gobierno de los EUA publicó en octubre de 2015 su Plan de Acción⁵ y su Estrategia Nacional⁶ de clima espacial.

Posteriormente, el 13 octubre de 2016, el presidente en turno, Barack Obama, emitió un mandato presidencial para preparar a su país ante una eventual tormenta solar extrema.⁷ Esta orden ejecutiva fue ratificada y complementada en marzo de 2019, por el presidente en turno, Donald Trump.⁸

³ “National Risk Register of Civil Emergencies 2015 edition”, disponible en línea en: <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/uk-national-risk-register-of-civil-emergencies/>

⁴ “UK Space Weather Preparedness Strategy”; documento traducido al español: <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/uk-estrategia-de-clima-espacial/>; documento original en inglés: <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/uk-space-weather-preparedness-strategy/>

⁵ National Space Weather Action Plan (National Science and Technology Council, Executive Office of the President (EOP), October 2015); documento en inglés: <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/us-national-space-weather-action-plan/>; documento traducido al español: <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/us-plan-nacional-de-accion-nacional-de-clima-espacial-traduccion-espanol/>

⁶ National Space Weather Strategy (National Science and Technology Council, Executive Office of the President (EOP), October 2015); documento disponible en línea <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/us-national-space-weather-strategy/>; documento traducido al español: <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/estrategia-nacional-de-clima-espacial-del-gobierno-de-estados-unidos-traduccion-al-espanol/>

⁷ Documento disponible en línea en: <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/executive-order-coordinating-efforts-to-prepare-the-nation-for-space-weather-events/>; documento traducido al español: <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/orden-ejecutiva-coordinando-esfuerzos-para-preparar-a-la-nacion-para-eventos-de-clima-espacial/>

⁸ <https://obamawhitehouse.archives.gov/blog/2015/10/28/enhancing-national-preparedness-space-weather-events>

5.5. Grupo de expertos de clima espacial de las Naciones Unidas

DESDE HACE VARIOS AÑOS SE INICIARON colaboraciones en investigación del clima espacial auspiciadas por la Oficina para el Uso Pacífico del Espacio Ultraterrestre de las Naciones Unidas (UNOOSA).⁹ Desde este organismo mundial se han promovido iniciativas para compartir datos y observaciones que permitan desarrollar investigación y monitoreo del clima espacial de manera conjunta. Desde la ONU se están implementando acciones para coordinar colaboraciones internacionales con el objetivo de incrementar la resiliencia de nuestros sistemas tecnológicos. México y otros países de Latinoamérica, como Brasil y Argentina, participan activamente en estos esfuerzos multilaterales.

⁹ <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/space-weather.html>

CAPÍTULO 6

¿Qué hacemos en México?

6.1. Breve historia de las ciencias espaciales en México: de los rayos cósmicos al clima espacial

LA HISTORIA DE LA INVESTIGACIÓN en temas de ciencias espaciales en México se remonta a Manuel Sandoval Vallarta, un físico mexicano que se formó en EUA y Alemania y que trabajaba como profesor en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en los EUA.¹ Sandoval Vallarta mantenía una relación cercana con México, venía al país a dar cursos y empezó a alentar la formación de los primeros físicos en el país. Después de la Segunda Guerra Mundial, Sandoval Vallarta regresó a México en 1946 y continuó sus líneas de investigación en rayos cósmicos. Posteriormente, comenzó a trabajar con él Ruth Gall, una joven investigadora de origen polaco que había emigrado a México durante la guerra. Ruth Gall continuó las líneas de investigación en rayos cósmicos y en 1962 fundó el Departamento de Estudios del Espacio Exterior en el Instituto de Geofísica de la UNAM. En ese grupo se iban a formar varios académicos que hicieron sus estudios de posgrado en diferentes partes de EUA y el Reino Unido, y comenzaron nuevas líneas de investigación en México: Héctor Pérez de Tejada, Javier Otaola, Silvia Bravo, José Valdés, Román Pérez y Blanca Mendoza. A finales de la década de los ochenta, las investigaciones en rayos cósmicos se habían extendido a física solar, medio interplanetario, ionósfera y tormentas geomagnéticas, y el Departamento del Instituto de Geofísica se renombró como Ciencias Espaciales. A mediados de la década de los noventa se integró al grupo

¹ Denardini, Dasso y González-Esparza (2016).

del departamento una nueva generación de investigadores como Xóchitl Blanco, Dolores Maravilla, Alejandro Lara y el autor de este libro. El grupo de investigación de México se consolidaba y alcanzaba reconocimiento internacional por sus diversas contribuciones en las ciencias espaciales. Se sentaron entonces las bases para empezar a desarrollar nuevos proyectos de investigación y emprender el desarrollo de infraestructura científica, como la construcción del Observatorio de Centelleo Interplanetario y la modernización de los equipos detectores de rayos cósmicos. A partir de la primera década de este siglo, México tenía las bases listas para conformar un grupo de investigación en un tema emergente: el clima espacial. El grupo pertenecía además a un instituto de la UNAM que había heredado la línea de investigación de Sandoval Vallarta y se distinguía también por ser responsable de servicios nacionales como el Servicio Sismológico Nacional, el Servicio Mareográfico Nacional y el Servicio Magnético.

6.2. Ley General de Protección Civil

POR SU UBICACIÓN A BAJAS LATITUDES (alrededor de 19 grados norte y 29 grados latitud geomagnética), el territorio nacional es menos vulnerable a efectos del clima espacial comparado con otros países localizados cerca de los polos o en las regiones ecuatoriales. Sin embargo, daños registrados por eventos del clima espacial en Sudáfrica (que tiene latitudes similares a México) y el impacto de las fulguraciones solares registrado sobre la ionósfera en bajas latitudes (por ejemplo, durante las tormentas solares de Halloween en 2003), muestran la importancia de monitorear y prevenir eventos del clima espacial sobre México.² Un nuevo evento Carrington tendría consecuencias catastróficas si no nos preparamos.

Existen entonces razones muy importantes por las cuales México debe implementar el monitoreo del clima espacial en su territorio.³ Durante las últimas décadas el país ha desarrollado infraestructura crítica que es vulnerable a eventos de clima espacial: ductos de gas y petróleo, telecomunicaciones, banca electrónica, usos de sistemas de posicionamiento global, radiocomunicaciones y una extensa red de generación y transportación de energía eléctrica.

² González-Esparza et al. (2017).

³ González-Esparza et al. (2017).

Petróleos Mexicanos (Pemex) está encargado de la exploración, explotación y distribución de gas, petróleo y derivados. El país tiene 4,100 km de gasoductos para transportar 7,000 millones de pies cúbicos de gas por día.

México hace también un amplio uso de las radiocomunicaciones y, en ese sentido, tiene una gran dependencia de ellas. Según la Comisión Federal de Telecomunicaciones,⁴ el espectro electromagnético de México está repartido de la siguiente manera: entre los 30 MHz y 300 GHz existen al menos 30 aplicaciones diferentes que incluyen servicios móviles y fijos de radiocomunicación de voz y datos, navegación marítima, radio aficionados, radioastronomía, clima espacial, radio navegación aeronáutica, radiolocalización, operaciones espaciales, radiolocalización de vehículos, transmisión de radio AM y FM, sistemas GPS, sistema nacional de seguridad, transmisión digital, señales de horario, patrón de frecuencias de calibración, servicios gubernamentales por satélite, servicios de radiocomunicaciones de fuerzas armadas, internet, televisión satelital, etcétera. Y solamente entre los 30 MHz y 3 GHz se tienen registrados 62,996 operadores concentrados principalmente en el rango de 148 MHz y 173 MHz.

Por otro lado, se utilizan alrededor de 16 millones de tarjetas de crédito, hay 53.9 millones de usuarios de internet y más de 38.4 millones de usuarios de telefonía móvil (58% de ellos utilizan teléfonos inteligentes).

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), por su parte, es la dependencia encargada de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica. Su capacidad de generación de energía es de 54,374.7 mega watts con 1,081 unidades de generación de electricidad divididas en cinco regiones: noroeste (15%), norte (17%), occidente (27%), central (16%) y sureste (24%).

El 3 de junio de 2014 se publicaron en el *Diario Oficial de la Federación* las modificaciones a la Ley General de Protección Civil, las cuales incorporaron a los fenómenos astronómicos dentro de la lista de fenómenos perturbadores.⁵ Los fenómenos astronómicos –un término

⁴ "El espectro radioeléctrico en México. Estudio y acciones", IFT, documento disponible en línea: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenido/general/espectro-radioelectrico/espectro-radioelectrico-en-mexico-vp.pdf>

⁵ Al respecto, véase el decreto por el que se reforman los artículos 2 y 82 y las modificaciones al 20, de la Ley General de Protección Civil que se publicaron en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 2014. El documento se encuentra disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpc/LGPC_ref_02_03jun_14.pdf

técnico más correcto para la ley hubiera sido “fenómenos del espacio exterior”– incluyen a los fenómenos relacionados con el clima espacial y a los objetos próximos a la Tierra (NEOS por sus siglas en inglés). La ley indica que el Sistema Nacional de Protección Civil requiere del diseño de políticas públicas que ayuden a reaccionar, mitigar, responder y acrecentar la resiliencia del país frente a posibles desastres ocasionados por fenómenos astronómicos.

El estudio de la vulnerabilidad de la red eléctrica nacional ante tormentas geomagnéticas severas, la medición de los flujos de partículas energéticas y el monitoreo del estado de la ionósfera sobre el territorio nacional para determinar la confiabilidad de las telecomunicaciones, son temas de soberanía y seguridad nacional.

6.3. Servicio de Clima Espacial Mexicano (SCiESMEX)

DURANTE LOS ÚLTIMOS 50 AÑOS, el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) desarrolló gradualmente un cuerpo académico e instrumentación científica para estudiar fenómenos relacionados con el clima espacial.⁶ Este desarrollo, aunado a las modificaciones de la Ley General de Protección Civil, motivó a que un grupo de académicos propusiera al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) la creación de un servicio de clima espacial en México. El cuerpo académico del proyecto estaba compuesto por un grupo de científicos de diversas disciplinas en ciencias espaciales: Ernesto Aguilar, Ernesto Andrade, Pablo Villanueva, Pedro Corona, Víctor de la Luz, Luis Xavier González, Julio Mejía, María Sergeeva, Esmeralda Romero, José Juan González y Oyuki Chang.⁷

En octubre de 2014 se creó el Servicio de Clima Espacial México (SCiESMEX) con sede en el campus Morelia del Instituto de Geofísica de la UNAM. Los objetivos del SCiESMEX incluyen monitorear las condiciones del Sol, el medio interplanetario, la ionósfera y el entorno geomagnético para prevenir eventos de clima espacial en México, así como emitir de manera científica, técnica y eficiente alertas informativas, notificando a la sociedad mexicana, al sector público, privado y militar sobre los posibles efectos de la actividad solar sobre el territorio nacional.⁸ El

⁶ Denardini, Dasso y González-Esparza (2016a).

⁷ Denardini, Dasso y González-Esparza (2016c).

⁸ González-Esparza *et al.* (2017).

SCiESMEX representa a México en los organismos mundiales que definen las recomendaciones y políticas internacionales en clima espacial. En junio de 2015, el SCiESMEX se convirtió en un Centro Regional de Alertas del ISES, lo que significa que tiene reconocimiento internacional como una fuente de información de eventos de clima espacial.

6.4. Grupo de Trabajo Clima Espacial en México

EN OCTUBRE DE 2015, convocado por la Coordinación Nacional de Protección Civil, a través del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la Agencia Espacial Mexicana y el SCiESMEX, se creó el Grupo de Trabajo Clima Espacial en México. El grupo está desarrollando protocolos para alertar a la población y mitigar las afectaciones que pudiera ocasionar una tormenta solar sobre el país. La Figura 29 muestra la infografía de clima espacial que preparó el Sistema Nacional de Protección Civil en 2015. En este grupo participan varios sectores del gobierno federal, como la Comisión Federal de Electricidad, las telecomunicaciones y aviación, así como las Fuerzas Armadas y Protección Civil.



Figura 29. Infografía del clima espacial producida por el Sistema Nacional de Protección Civil. A partir de las modificaciones en la Ley General de Protección Civil de 2014, los efectos del clima espacial se consideran un fenómeno natural perturbador y se han iniciado acciones para incrementar la resiliencia del país ante estos fenómenos naturales. Tomada del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED): <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/330-INFOGRAFACLIMAESPACIAL.PDF>

6.5. Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE)

EN JUNIO DE 2016, CON APOYO DEL CONACYT se estableció el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE), cuyo objetivo es acrecentar y consolidar la red de instrumentos en tierra que registran diferentes aspectos de la actividad solar, el medio interplanetario, la ionósfera, el campo geomagnético y los rayos cósmicos en diferentes regiones del territorio nacional. La red de instrumentos del LANCE incluye un sitio principal en el observatorio MEXART en Coeneo, Michoacán, el cual cuenta con un radiotelescopio para rastrear

tormentas solares en el medio interplanetario, un magnetómetro para medir tormentas geomagnéticas, una ionosonda, una estación de resonancia Schumann, una estación para registrar estallidos de radio en el Sol (CALLISTO) y una estación solarimétrica del CEMISOL. La red de instrumentos del LANCE cuenta también con el observatorio de rayos cósmicos en Ciudad Universitaria, en la Ciudad de México; además del telescopio de neutrones solares en Sierra Negra, Puebla. El LANCE colabora igualmente con las redes de estaciones GPS del Instituto de Geofísica de la UNAM y ha desarrollado una red de ionosondas y magnetómetros para cuantificar las variaciones en diferentes regiones del país. La Figura 30 muestra un mapa de México y la ubicación de los instrumentos asociados a las redes del LANCE. En el apéndice se explica cómo funciona el sistema de avisos de eventos de clima espacial en México.

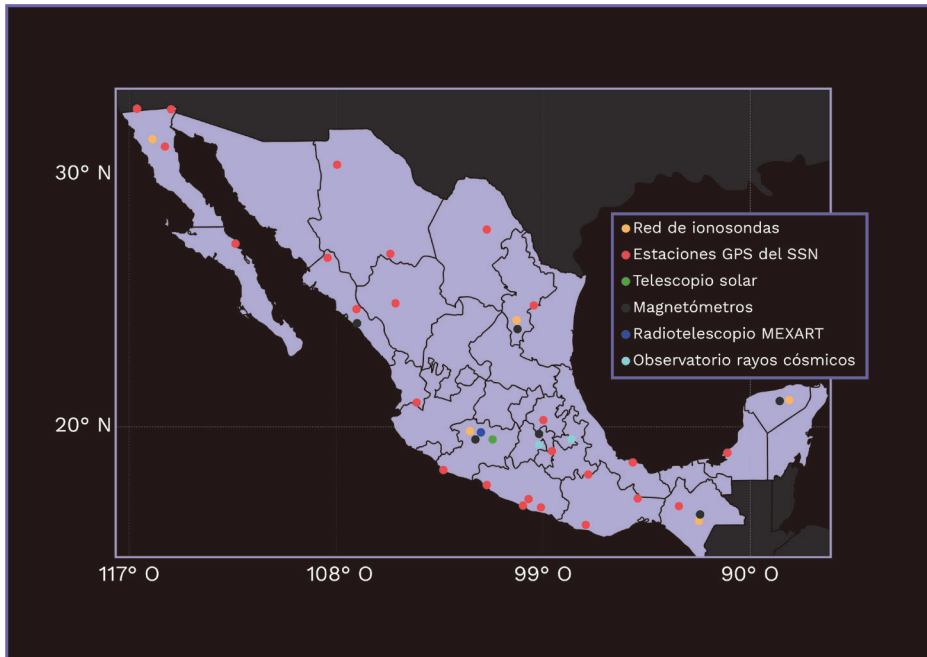


Figura 30. El Laboratorio Nacional de Clima Espacial está desarrollando una red de instrumentos para tener cobertura observacional de los efectos del clima espacial sobre el territorio nacional. Se está implementando una red de ionosondas y una red de magnetómetros. Se incluyen también al observatorio MEXART, los observatorios de rayos cósmicos y se utilizan los datos de la red de receptores GPS del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Tomada del Laboratorio Nacional de Clima Espacial, UNAM. Ilustración de Axel García Pineda.

6.6. Breve reseña de mi experiencia personal

AQUÍ QUISIERA CONTARLE BREVEMENTE A LOS LECTORES, especialmente a los jóvenes que están pensando en estudiar una carrera científica, acerca de mi experiencia personal y cómo llegué a convertirme en un investigador que estudia el clima espacial desde México.

Yo nací en la Ciudad de México en el año de 1967. Estudié la Licenciatura de Física en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Mi tesis la hice bajo la dirección de la Dra. Silvia Bravo (autora de los libros *Encuentro con una Estrella* y *Plasmas en todas partes*). Fue Silvia quien me introdujo a los misterios de la física solar y el medio interplanetario. Fue mi tutora en mi encuentro con el Sol y el darme cuenta de la íntima conexión que tenemos con nuestra estrella. Gracias también al impulso de Silvia y al buen promedio con el que había terminado mis estudios, obtuve una beca que me otorgó la UNAM para estudiar mi doctorado en el Imperial College de la Universidad de Londres.

En el doctorado hice mi investigación analizando los datos del experimento de campo magnético de la misión espacial Ulysses. La nave se había lanzado al espacio tan solo unos meses antes de mi arribo al Imperial a finales de 1991. El Ulysses se encontraba viajando en ese momento rumbo a Júpiter. La misión tenía como objetivo hacer las primeras mediciones del viento solar fuera del plano de la eclíptica (el plano imaginario donde se mueven la Tierra y los otros planetas alrededor del Sol). Al llegar la nave espacial al planeta gigante, los ingenieros de la NASA responsables de la trayectoria, aprovecharon la enorme fuerza de gravedad joviana y cambiaron la ruta de la nave espacial, para que esta saliera del plano eclíptico y se dirigiera de regreso al Sol y lograra una nueva órbita que pasara por encima de los polos sur y norte de la estrella. Fue muy emocionante formar parte del equipo científico que analizó, por primera vez, los datos que estaba enviando la nave. Descubrimos fenómenos en el viento solar que no se habían observado en las mediciones de otras misiones previas dentro del plano eclíptico. La nave espacial Ulysses fue una misión conjunta entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la NASA. Como tuve entonces la oportunidad de conocer y colaborar con los científicos de la misión que trabajaban en la NASA, al terminar mi doctorado, a principios de 1995, solicité una beca

posdoctoral al National Research Council (NRC) de los EUA, lo cual me permitió trabajar dos años en el Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA.

Me mudé entonces a los EUA y viví cerca de CALTECH en Pasadena, California, justo en la zona donde se desarrollaba (años después) la trama del famoso programa de comedia *The Big Bang Theory*. Yo creo que por eso me gustaba mucho esa serie, me recordaba a mis amigos y el tiempo que estuve viviendo en California. Por ejemplo, jugué en la liga de futbol estudiantil del CALTECH con el equipo recreacional del JPL, los “Cosmics”. Es verdad que no éramos particularmente buenos en el futbol, ni los otros equipos tampoco, pero los Cosmics estaba conformado por científicos e ingenieros que trabajaban en diferentes proyectos espaciales. Me divierto al pensar en que posiblemente alguien que no nos conociera y nos hubiera visto jugar en alguno de los partidos del fin de semana, seguramente hubiera pensado que éramos medio malos. Sin embargo, por otro lado, la riqueza del equipo radicaba en que estaba conformado por académicos realizando actividades sobresalientes.

Al terminar mi posdoc en el JPL, Silvia Bravo me escribió y me dijo que era el momento de regresar a México. La UNAM me había becado y tenía un compromiso que cumplir. Me reintegré entonces al Instituto de Geofísica en 1997 y comencé a colaborar con el equipo de investigación que estaba conformando Silvia. Ella se había planteado la construcción de un radiotelescopio para estudiar las propiedades del viento solar, similar al que se había construido en Cambridge, Reino Unido, un par de décadas antes. Se trataba de un proyecto muy ambicioso para México por cuestiones de presupuesto y también por nuestra falta de experiencia y de conocimiento técnico en varios aspectos de radiotelescopía. Sin embargo, el empuje y entusiasmo de Silvia sentó los cimientos para iniciar el proyecto y logró entusiasmar al grupo de jóvenes académicos que la acompañábamos en ese momento. Desafortunadamente, Silvia enfermó de cáncer y un par de años después de mi regreso a México falleció. Su partida nos causó mucho dolor por todo el cariño que le profesábamos, y también mucho desconcierto en cuanto al futuro del proyecto del radiotelescopio. Me vi obligado entonces a asumir responsabilidades de gestión, en cuanto a recursos y apoyos para desarrollar el radiotelescopio, que normalmente no les tocan a los científicos que están iniciando su carrera. Tardamos varios años en poder desarrollar el proyecto y finalmente, en diciembre de 2005,

6. ¿QUÉ HACEMOS EN MÉXICO?

inauguramos las instalaciones del observatorio en Coeneo, Michoacán, el cual es conocido por su nombre en inglés como Mexican Array Radio Telescope (MEXART). Eso fue el comienzo de lo que, muchos años después, terminó consolidándose como el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE) en 2016. Todo esto lo logramos formando un equipo de trabajo profesional y comprometido con el proyecto, donde jóvenes científicos son responsables de las diferentes redes de instrumentos, y donde hemos aprendido a hacer trabajo colaborativo y multidisciplinario. Estoy profundamente agradecido con todos mis colegas del LANCE.

Hay un aspecto que siempre me ha motivado y es el hecho de que en México hay muchas cosas por hacer. Desde luego que no es lo mismo, por cuestiones de infraestructura y presupuesto, ser un joven investigador trabajando en un laboratorio de la NASA, que empezar tu carrera en un laboratorio en México. Aunque han existido avances importantes en las últimas décadas en México, hay diferencias muy grandes en cuanto a la infraestructura, número de investigadores, universidades haciendo investigación, apoyos y presupuestos. La economía del conocimiento es una realidad, y los países desarrollados invierten, desde hace mucho tiempo, una enorme cantidad de sus recursos para estar en la frontera del conocimiento. Es precisamente por eso que es tan importante que los países latinoamericanos inviertan en el desarrollo de la investigación científica y formen cuadros propios. Es una cuestión de soberanía y seguridad nacional. Estoy convencido que nuestros países necesitan tener cuerpos académicos consolidados en diferentes áreas y una red de instrumentos propios que nos brinden información estratégica para la toma de decisiones. Por esa razón he impulsado desde hace varios años la consolidación de un grupo de investigación en clima espacial y la creación de un laboratorio nacional. México, como sus contrapartes latinoamericanas, necesita la formación e incorporación de más científicos e ingenieros.

Conclusiones

Un día después de la tormenta solar perfecta

EL LIBRO COMENZÓ CON UN RELATO de un evento extraordinario:

Una mañana de septiembre, una enorme explosión en el Sol provoca que, diecisiete horas más tarde, comiencen a fallar sistemas tecnológicos indispensables a lo largo de todo el planeta, que aparezca una brillante aurora roja cubriendo por completo el lado noche de la Tierra, y que, con la tormenta geomagnética en curso colapsen redes de energía eléctrica en todas las latitudes, provocando un apagón global. ¿Qué podemos hacer ante este posible escenario catastrófico?

Si esa *tormenta solar perfecta* llega a ocurrir sin que desarrollemos un plan con una gestión integral de riesgos y colaboración internacional, sin duda, los efectos de la tormenta serían devastadores para la humanidad. Podríamos imaginarnos un escenario apocalíptico, sin energía eléctrica, sin internet, sin telecomunicaciones, sin servicios del gobierno, sin combustibles, sin agua potable... La experiencia de confinamiento ante la pandemia de la COVID-19 nos llevó, en una escala global, a una situación que no imaginábamos durante muchos meses. Al igual que con la pandemia, los efectos de una tormenta solar extrema tendrían afectaciones globales, pero sus repercusiones podrían ser más graves por la interrupción, durante varios días, semanas o hasta meses, de servicios esenciales. Aunque en estos momentos la posibilidad de que ocurra otro evento tipo Carrington en los próximos cinco años es relativamente pequeña, lo que sí sabemos es que una tormenta solar perfecta va a volver a ocurrir en el futuro y que debemos prepararnos. No podemos descartar ese riesgo, aunque la probabilidad de que suceda el evento es pequeña, sus afectaciones potenciales son muy grandes. La única manera de incrementar nuestra resiliencia

ante estos fenómenos naturales perturbadores es desarrollar políticas públicas de gestión integral de riesgos que incluyan: el financiamiento de estudios científicos y monitoreo del clima espacial, un sistema de alertamiento, así como la elaboración de protocolos de reacción, del gobierno y de los responsables de los sistemas tecnológicos vulnerables, ante la ocurrencia de eventos severos. Estos protocolos de reacción, basados en estudios científicos y buena colaboración internacional, deben establecer diferentes mecanismos de mitigación para que los daños en los sistemas tecnológicos, si no pueden impedirse, sean moderados y que podamos recuperarnos, relativamente rápido, ante un evento solar severo. La eficacia de los protocolos de reacción va a depender del conocimiento que tengamos de estos fenómenos naturales, del desarrollo de resiliencias en nuestros sistemas tecnológicos vulnerables, de un buen monitoreo internacional del clima espacial y de un sistema de alertamiento. El qué va a pasar un día después de la tormenta solar perfecta, va a depender de qué medidas tomemos para enfrentar ese evento, cómo vamos a prepararnos. La peor estrategia sería no estar listos. Tenemos ante nosotros la posibilidad de escribir ese capítulo, el cual va a depender en mucho de lo que hagamos ahora.

¿Qué debemos hacer ante una tormenta solar?

ACTUALMENTE EXISTEN DIVERSAS TECNOLOGÍAS que resultan indispensables para nuestras vidas y cuya afectación por la ocurrencia de una tormenta solar extrema podría tener consecuencias desastrosas. En ese sentido, hemos querido explicar aspectos básicos del Sol, qué son sus eventos explosivos y cómo afectan el entorno de la Tierra. Revisamos también algunas tormentas solares que han ocurrido en la historia reciente y, en particular, describimos cómo fue el evento Carrington del 1 de septiembre de 1859 y cómo se observó en México. Finalmente, concluimos explicando el tipo de colaboraciones internacionales, así como las acciones que en México estamos llevando a cabo para prepararnos ante la posible ocurrencia de este tipo de eventos.

La comunidad científica, desde hace un par de décadas, ha llamado la atención de los tomadores de decisiones para que se empiecen a implementar acciones que incrementen la resiliencia de los sistemas

tecnológicos críticos. Varios gobiernos han iniciado planes y estrategias de prevención. Organismos internacionales están promoviendo colaboraciones en investigación y monitoreo. En México hemos dado los primeros pasos hacia una política pública de prevención, aunque también es cierto que hace falta dar continuidad y más apoyo a estas primeras acciones.

Algo que aprendimos durante el manejo de la crisis de los eventos de septiembre de 2017, cuando ocurrieron de manera simultánea un huracán, varias tormentas solares y dos sismos de gran intensidad en México, es que las redes sociales pueden ser un gran instrumento de información y de desinformación –como pudimos ver con la pandemia de la COVID-19 en 2020–. Desafortunadamente, es más probable que ocurra lo segundo y que veamos circular información falsa que sostenga –como ocurrió en 2017– que las tormentas solares provocan sismos, y que de lo cual se deriven angustia y pánico en mucha gente. En ese sentido, es muy importante que los gobiernos consideren en sus protocolos de reacción una estrategia de comunicación social que brinde información fidedigna y oportuna a la población durante el transcurso del evento. Por otra parte, es necesario que nosotros como sociedad civil aprendamos a buscar información en fuentes oficiales y a reconocer cuándo se trata de información falsa o de fuentes desautorizadas. Todos estamos expuestos a la información falsa, por ello es que, en este tipo de eventos, la prevención comienza por estar bien informados.

Apéndice

Sistemas de alertamiento

CUANDO OCURRE UNA TORMENTA SOLAR QUE IMPACTA A LA TIERRA, se fisuran temporalmente los escudos naturales de nuestro planeta y se perturba la magnetósfera y la ionósfera. Algunos de estos efectos perturbadores pueden durar minutos, otros horas, y en el caso de tormentas geomagnéticas severas, estos duran un par de días. ¿Cómo se comunican entre sí los científicos y los servicios de clima espacial cuando ocurre una tormenta solar? ¿Qué datos se comparten? ¿Qué decisiones se tienen que tomar?

En este apéndice vamos a explicar cómo se dan los alertamientos, qué mediciones necesitamos y qué condiciones son necesarias para caracterizar la magnitud de un evento. Posteriormente vamos a comentar cómo implementamos en México un servicio de avisos de eventos de clima espacial para el SINAPROC.

Como lo hemos mencionado antes, aunque se trata de un evento global que perturba a todo el planeta, las afectaciones de una tormenta solar son distintas en diferentes regiones de la Tierra. No son lo mismo los fenómenos que ocurren en los países nórdicos que sus contrapartes en las regiones ecuatoriales. Los efectos locales son diferentes y por eso cada región debe estudiarse y monitorearse de manera particular.

El problema radica en poder caracterizar un evento físico que se origina a 150 millones de kilómetros de la Tierra, en la superficie del Sol, que involucra enormes cantidades de energía en forma de estallido de luz, de partículas energéticas solares y de una gigantesca nube de plasma con dimensiones interplanetarias. Estas tres perturbaciones (fulguraciones, partículas y eyecciones de masa coronal) se propagan en el medio interplanetario y llegan a nuestro planeta en tiempos muy dispares. Mientras que al estallido de luz le toma tan solo ocho

minutos, las partículas energéticas necesitan entre 20 y 120 minutos y, finalmente, a la eyección de masa coronal le toma entre 1 y 4 días llegar a nosotros. Al pasar la eyección cerca de nuestro planeta, se impacta y se reconecta con el campo magnético terrestre, y se producen así complejos fenómenos físicos que afectan al campo geomagnético, la ionósfera y provocan corrientes inducidas geomagnéticamente en el interior de la Tierra. Se trata de una compleja cadena de diferentes sistemas físicos acoplados, los cuales tienen escalas y propiedades muy distintas. Se trata además de analizar los diferentes sistemas tecnológicos que son vulnerables a estos fenómenos perturbadores.

La modelación matemática del acoplamiento entre estos sistemas físicos interconectados sigue siendo un gran reto para la comunidad científica. En mi opinión, estamos todavía a varios años de distancia de poder entender mejor este tema, resolverlo y dar pronósticos altamente confiables, como aquellos que brinda hoy en día la meteorología cuando tiene que predecir si mañana va a llover o cuando va a llegar un huracán a una costa. En este momento, el problema científico del clima espacial involucra escalas muy grandes, nos faltan observaciones (desde el espacio y en la tierra), y necesitamos desarrollar más estudios de los puntos críticos de estos acoplamientos. El reto no es fácil porque se requieren pronósticos y respuestas muy precisas.

Sistema de escalas de la NOAA

LA NOAA DESARROLLÓ UN SISTEMA DE ESCALAS para determinar la magnitud de diferentes tipos de eventos de clima espacial.¹ La definición de estas escalas no ha sido nada sencilla e involucra trabajo y discusión de muchos años –que aún continúa– por parte de la comunidad académica que estudia la relación entre el Sol y la Tierra, los operadores de servicios tecnológicos y los tomadores de decisiones. A diferencia de los sismólogos, que por las características físicas del fenómeno lograron definir con un número la magnitud de un sismo, o los meteorólogos, que pueden caracterizar la magnitud de un huracán también con una escala, en el caso de una tormenta solar, ha sido extremadamente difícil lograr esa simplificación.

¹ <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>

Las escalas de la NOAA son el primer paso para caracterizar la magnitud de un evento de clima espacial. Son un código para comunicar información entre servicios de clima espacial y usuarios. Estas escalas siguen siendo muy técnicas y su mejoramiento y simplificación forma parte de lo que se conoce como la transformación de la investigación en la operación [R2O *Research to Operations* en inglés]. Los científicos de varios países, meteorólogos del espacio, ingenieros y operadores de sistemas tecnológicos, estamos trabajando juntos para mejorar estas escalas. Nos falta mucho trabajo aún.

Los avisos del sistema de la NOAA están en función de una escala de intensidad: 5 es extremo, 4 severo, 3 intenso, 2 moderado y 1 menor. Hay tres tipos de avisos (G, S, R) que dependen tanto del fenómeno que está afectando a la Tierra, como de las observaciones que tenemos actualmente disponibles. Los avisos G tienen que ver con actividad geomagnética; los S, con las partículas energéticas solares; y los R, con bloqueos de señales de ondas de radio producidos por la radiación electromagnética de las fulguraciones solares. Los países que desarrollan monitoreo y estrategias para prevenir los efectos del clima espacial sobre sus respectivos territorios han tomado como base las escalas de la NOAA y las han adaptado a su región y a sus efectos particulares.

A continuación, se muestran las tablas con las escalas que maneja la NOAA para caracterizar eventos de clima espacial que están afectando a la Tierra. Dependiendo de la categoría del evento (G, S, R), se indican los posibles efectos en sistemas tecnológicos y la frecuencia promedio de su ocurrencia durante un ciclo solar, esto es, cuántas ocasiones puede presentarse, en promedio, ese tipo de evento en un intervalo de 11 años.

a) Eventos G (tormentas geomagnéticas)

LASTORMENTAS GEOMAGNÉTICAS (G5 a G1) son alteraciones en el campo magnético de la Tierra provocadas por perturbaciones en el viento solar (eyecciones de masa coronal) que atraviesan el ambiente terrestre. Las eyecciones de masa coronal, dependiendo de su velocidad inicial, tardan entre 1 y 4 días en llegar del Sol a la Tierra. Este tipo de avisos (G) son los que más nos preocupan debido a la vulnerabilidad de las redes de energía eléctrica ante los efectos de las tormentas geomagnéticas. La categoría G del evento de clima espacial va a depender del valor del índice Kp que calcula en tiempo real el SWPC-NOAA. Este índice geomagnético

se obtiene promediando datos de campo magnético de diferentes observatorios en la Tierra y nos indica qué tan perturbado se encuentra el campo geomagnético, su máximo valor es 9 y su mínimo es 1.

**Tabla 4. Escalas del clima espacial de NOAA
Eventos G (tormentas geomagnéticas)**

Categoría	Descripción	Efectos en sistemas tecnológicos	Medida física	Frecuencia promedio
G 5	Extremo	<p>Sistemas de energía eléctrica: Los controles del voltaje y sistemas de protección pueden presentar problemas generalizados por los efectos de las corrientes inducidas geomagnéticamente. Los sistemas de redes de distribución de energía pueden sufrir colapsos parciales o totales. Los transformadores de alto voltaje pueden experimentar daños.</p> <p>Operación de tecnología en el espacio: Los satélites pueden sufrir acumulaciones de cargas en sus superficies. Los satélites pueden presentar problemas diversos de orientación, seguimiento, así como de enlace tierra/espacio-espacio/tierra.</p> <p>Otros sistemas tecnológicos: Los gasoductos (petróleo y gas) pueden experimentar corrientes geomagnéticamente inducidas que pueden alcanzar cientos de amperios y provocar corrosión, daños y fisuras. La propagación de ondas de radio de alta frecuencia (HF) podría ser imposible en algunas regiones durante uno o dos días. La navegación y posicionamiento global por satélites puede presentar fallas muy grandes durante varios días. La navegación basada en radio de baja frecuencia (LF) puede quedar inhabilitada por horas.</p>	Kp = 9*	Cerca de 4 eventos en cada ciclo solar de 11 años.

		Se puede esperar que ocurran auroras polares en regiones a bajas latitudes (hasta 40°).**		
G 4	Severo	<p>Sistemas de energía eléctrica: Los sistemas de control de voltaje pueden presentar problemas generalizados por los efectos de las corrientes geomagnéticamente inducidas. Algunos sistemas de protección de la red eléctrica pueden desactivar, por error, recursos claves de la red.</p> <p>Operación de tecnología en el espacio: Los satélites pueden sufrir acumulaciones de cargas y fallas en el seguimiento. Posiblemente se requiera realizar correcciones de trayectorias desde tierra derivadas de problemas de orientación.</p> <p>Otros sistemas tecnológicos: Los oleoductos (petróleo y gas) pueden experimentar corrientes geomagnéticamente inducidas que afecten sus medidas de protección. La propagación de ondas de radio de alta frecuencia (HF) sufre de interrupciones esporádicas. La navegación y posicionamiento global por satélite se ven degradados por horas. La navegación por radio de baja frecuencia (LF) sufre de interrupciones. Se pueden presentar auroras polares en regiones de bajas latitudes (hasta 45°). **</p>	Kp = 8*	Cerca de 100 eventos en cada ciclo solar de 11 años.
G 3	Intenso	<p>Sistemas de energía eléctrica: Los efectos de las corrientes inducidas geomagnéticamente pueden requerir correcciones de voltaje en las subestaciones de potencia. Se pueden presentar falsas alarmas en sistemas de protección.</p>	Kp = 7*	Cerca de 200 eventos en cada ciclo solar de 11 años.

		<p>Operación de tecnología en el espacio: Los satélites pueden experimentar acumulaciones de cargas en algunos componentes. Se puede incrementar el arrastre (frenado) sobre los satélites de órbita baja. Se pueden requerir correcciones de trayectorias debidas a problemas de orientación.</p> <p>Otros sistemas tecnológicos: Fallas intermitentes en la navegación y posicionamiento global por satélites. Se pueden presentar problemas en la navegación por radio de baja frecuencia (LF). La propagación de ondas de radio de alta frecuencia (HF) puede ser intermitente. Se pueden registrar auroras polares hasta regiones con latitudes de 50°. **</p>		
G 2	Moderado	<p>Sistemas de energía eléctrica: Los efectos de las corrientes inducidas geomagnéticamente pueden provocar alarmas de voltaje en sistemas de energía en regiones en altas latitudes. Las tormentas geomagnéticas de larga duración pueden derivar en daños acumulativos en transformadores de alto voltaje.</p> <p>Operación de tecnología en el espacio: Se pueden requerir, por parte del control en tierra, acciones correctivas de orientación a algunos satélites. Se pueden presentar afectaciones en las predicciones de la órbita de satélites derivadas de cambios en el arrastre.</p> <p>Otros sistemas tecnológicos: La propagación de ondas de radio de alta frecuencia (HF) puede atenuarse en regiones de altas latitudes. Se pueden registrar auroras polares hasta regiones con latitudes de 55°. **</p>	Kp = 6*	Cerca de 600 eventos en cada ciclo solar de 11 años.

G 1	Menor	<p>Sistemas de energía eléctrica: En países de altas latitudes se pueden presentar fluctuaciones débiles en la red eléctrica debido a los efectos de corrientes geomagnéticamente inducidas poco intensas.</p> <p>Operación de tecnología en el espacio: Posible impacto menor en la operación de satélites.</p> <p>Otros sistemas: Las especies de animales migratorias se desorientan por las perturbaciones magnéticas. Se pueden registrar auroras polares solamente en regiones de altas latitudes (60°). **</p>	Kp = 5*	Cerca de 1,700 eventos en cada ciclo solar de 11 años.
-----	-------	--	---------	--

Fuente: SWPC-NOAA.

* El índice geomagnético Kp es un valor promedio de cada 3 horas y se calcula a través de combinar los datos de redes de observatorios en tierra que miden el campo geomagnético. Para el sistema de avisos, el SWPC-NOAA hace el cálculo de índice Kp y en la mayoría de los casos esta estimación es una buena aproximación del valor oficial del índice Kp publicado posteriormente por el Centro de Investigaciones en Geociencias alemán (GeoForschungsZentrum).²

** Para localidades específicas en el mundo, úsese la latitud geomagnética para determinar la posibilidad de observaciones.

² <https://isd.c.gfz-potsdam.de/kp-index/>

b) Eventos S (tormentas de radiación corpuscular solar)

LA SEGUNDA TABLA DE ESCALAS DE LA NOAA corresponde a las tormentas de radiación corpuscular solar (S5-S1) o eventos de partículas energéticas solares. Estos eventos se refieren a incrementos en los niveles de radiación de partículas (protones) que se producen cuando una tormenta solar energiza partículas en la región de la explosión. Las partículas se aceleran y alcanzan velocidades relativistas (se propagan con velocidades cercanas a la velocidad de la luz). Estas partículas tardan entre 20-60 minutos en llegar del Sol a la Tierra. Las partículas energéticas solares las medimos con instrumentos en satélites y con observatorios en tierra. Este tipo de eventos nos preocupan porque afectan a astronautas (los más vulnerables), pasajeros y tripulación de vuelos aéreos transpolares, así como por los daños que producen en componentes de satélites. Este tipo de avisos (S) son particularmente importantes ahora en la planeación y desarrollo de las próximas misiones tripuladas a la Luna y a Marte.

Tabla 5. Escalas del clima espacial de NOAA
Eventos S (tormentas de radiación corpuscular solar)

Categoría	Descripción	Efectos en sistemas tecnológicos	Medida física	Frecuencia promedio
S 5	Extremo	<p>Biológicos: Amenaza inevitable de altas dosis de radiación para astronautas en actividades extra-vehiculares. La tripulación y pasajeros de vuelos aéreos comerciales de grandes alturas, a altas latitudes (vuelos transpolares), pueden estar expuestos a dosis altas de radiación. **</p> <p>Operación de satélites: Los satélites pueden quedar inoperantes. Se pueden generar daños permanentes en sus celdas solares. Efectos en sus dispositivos de memoria pueden causar pérdida de control.</p>	Flujo de partículas solares con energías mayores a 105 MeV (protones).*	Menos de 1 evento en cada ciclo solar de 11 años.

		<p>Se puede presentar ruido significativo en datos de imágenes.</p> <p>Sus localizadores de estrellas pueden ser incapaces de localizar las fuentes y provocar problemas de navegación.</p> <p>Otros sistemas: Posible suspensión completa de comunicación de alta frecuencia (HF) en regiones polares. Errores en sistemas de posicionamiento global harán que las operaciones de navegación (aérea, marítima y terrestre) sean extremadamente difíciles.</p>		
<p>S 4</p>	<p>Severo</p>	<p>Biológicos: Amenaza inevitable de altas dosis de radiación para astronautas en actividades extra-vehiculares. Tripulación y pasajeros de vuelos aéreos comerciales de grandes alturas, a altas latitudes, pueden estar expuestos a altas dosis de radiación (vuelos transpolares). **</p> <p>Operación de satélites: Se pueden presentar problemas en sus dispositivos de memoria, así como ruido en sus sistemas de imágenes. Problemas en sus localizadores de estrellas que pueden provocar problemas en sus sistemas de orientación. La eficiencia de los paneles solares de los satélites puede ser degradada.</p> <p>Otros sistemas: Puede ocurrir suspensión completa de comunicación de alta frecuencia (HF) en regiones polares. Se pueden presentar incrementos en los errores de navegación global con duración de varios días.</p>	<p>Flujo de partículas solares con energías mayores a 104 MeV (protones).*</p>	<p>Cerca de 3 eventos en cada ciclo solar de 11 años.</p>

<p>S 3</p>	<p>Intenso</p>	<p>Biológicos: Amenaza de radiación para astronautas en actividades extra-vehiculares. Tripulación y pasajeros de vuelos de grandes alturas, a altas latitudes, podrían estar expuestos a altas dosis de radiación. **</p> <p>Operación de satélites: Se pueden presentar alteraciones en componentes, ruido en sistemas de imágenes y posible reducción en la eficiencia de sus paneles solares.</p> <p>Otros sistemas: Posible degradación de la propagación de radio de alta frecuencia (HF) en regiones polares. Se pueden presentar errores en sistemas globales de posicionamiento y navegación.</p>	<p>Flujo de partículas solares con energías mayores a 103 MeV (protones).*</p>	<p>Cerca de 10 eventos en cada ciclo solar de 11 años.</p>
<p>S 2</p>	<p>Moderado</p>	<p>Biológicos: Tripulación y pasajeros de vuelos aéreos comerciales de grandes alturas, a altas latitudes, podrían estar expuestos a altas dosis de radiación. **</p> <p>Operación de satélites: Se pueden presentar alteraciones en componentes diversos.</p> <p>Otros sistemas: Efectos menores sobre la propagación de ondas de radio de alta frecuencia (HF) en regiones polares. Se pueden presentar errores en sistemas globales de posicionamiento y navegación.</p>	<p>Flujo de partículas solares con energías mayores a 102 MeV (protones).*</p>	<p>Cerca de 25 eventos en cada ciclo solar de 11 años.</p>

S 1	Menor	<p>Biológicos: Ninguno.</p> <p>Operación de satélites: Ninguno.</p> <p>Otros sistemas: Efectos menores sobre la propagación de radio de alta frecuencia (HF) en regiones polares.</p>	Flujo de partículas solares con energías mayores a 10 MeV (protones).*	Cerca de 50 eventos en cada ciclo solar de 11 años.
-----	-------	--	--	---

Fuente: SWPC-NOAA.

* Los niveles de flujo de partículas solares (protones) son promedios de 5 minutos captados por el satélite GOES de la NOAA.³ El flujo de partículas tiene estas unidades: número de partículas por segundo por ster-1 por cm⁻². Estos eventos pueden prolongarse más de un día.

** Las mediciones del flujo de partículas de alta energía (>100 MeV) son mejores indicadores de riesgo de radiación para pasajeros y tripulación de vuelo aéreos. Mujeres embarazadas son especialmente susceptibles a estos eventos.

³ <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux>

c) Eventos R (bloqueos de señales de radio)

LA ÚLTIMA TABLA DE ESCALAS DE LA NOAA tiene que ver con bloqueos de señales de ondas de radio (R5-R1). Estos bloqueos se producen por alteraciones de la ionósfera terrestre. La ionósfera se perturba por la absorción de intensos estallidos de luz provenientes de la superficie del Sol que contienen altas dosis de rayos X y UV. Estos fenómenos están asociados a la llegada de radiación lumínica de fulguraciones solares. Esta radiación tarda tan solo ocho minutos en llegar del Sol a la Tierra. Los efectos más importantes de este tipo de avisos (R) son las fallas en las telecomunicaciones.

**Tabla 6. Escalas del clima espacial de NOAA.
Eventos R (bloqueos de señales de radio)**

Categoría	Descripción	Efectos en sistemas tecnológicos	Medida física	Frecuencia promedio
R 5	Extremo	<p>Radio de alta frecuencia (HF):** Suspensión completa, por varias horas, de comunicaciones en HF en todo el lado día. Imposibilidad de contacto por ondas de radio en HF con barcos y aviones en el lado día.</p> <p>Navegación: Se presentan pérdidas de posicionamiento en el lado día, a lo largo de varias horas. Esto se debe a cortes en las señales de radio de baja frecuencia (LF) empleadas en sistemas de navegación marítima. Incremento en los errores de navegación y posicionamiento de satélites en el lado día, que se pueden extender hasta el lado noche.</p>	Fulguración solar mayor o igual a clase X17 (2x10 ⁻³).	Menos de 1 evento por ciclo solar de 11 años.
R 4	Severo	<p>Radio de alta frecuencia (HF): Suspensiones, por una o dos horas, de comunicaciones de radio en HF en la mayor parte del lado día. El contacto por radio en HF se pierde durante este periodo.</p>	Fulguración solar mayor o igual a clase X10 (10 ⁻³).	Cerca de 8 eventos en cada ciclo solar de 11 años.

		<p>Navegación: Se presentan pérdidas de las señales de navegación de baja frecuencia (LF) que derivan en incrementos en el error del posicionamiento con una duración de una a dos horas. Posibles interrupciones menores en la navegación de satélites en el lado día.</p>		
R 3	Intenso	<p>Radio de alta frecuencia (HF): Suspensiones de comunicaciones en HF y pérdida de contacto por radio en amplias áreas del lado día, durante aproximadamente una hora.</p> <p>Navegación: Degradación de las señales de navegación de baja frecuencia (LF) aproximadamente por una hora.</p>	Fulguración solar mayor o igual a clase X1 (10-4).	Cerca de 175 eventos en cada ciclo solar de 11 años.
R 2	Moderado	<p>Radio de alta frecuencia (HF): Suspensiones limitadas de comunicaciones en HF y pérdida de contacto por radio en el lado día, durante fracciones de hora.</p> <p>Navegación: Degradación de las señales de navegación de baja frecuencia (LF) durante fracciones de hora.</p>	Fulguración solar mayor o igual a clase M5 (5x10 ⁻⁵).	Cerca de 350 eventos en cada ciclo solar de 11 años.
R 1	Menor	<p>Radio de alta frecuencia (HF): Degradación en comunicaciones en HF y ocasional pérdida de contacto por radio del lado día.</p> <p>Navegación: Degradación de las señales de navegación de baja frecuencia (LF) durante breves intervalos.</p>	Fulguración solar mayor o igual a clase M1 (10-5).	Cerca de 2,000 eventos en cada ciclo solar de 11 años.

Fuente: SWPC-NOAA.

* Flujo de radiación lumínica medido por los satélites GOES en el rango de 0.1-0.8 nm (rayos X suaves) con unidades de (W·m⁻²).⁴

** Otras frecuencias podrían ser afectadas por dichas condiciones.

Fuente para las tres escalas (G, S, R) de la NOAA:

NOAA Space Weather Scales: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>

⁴ <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-flares-radio-blackouts>

La compleja descripción de las tres escalas de avisos de la NOAA (G, R, S) que discutimos arriba muestra por qué todavía no estamos satisfechos con este sistema. Las definiciones son demasiado técnicas y resultan complicadas aún para los especialistas. En nuestro caso, rebasan los objetivos de este libro de divulgación. No son prácticas ni para operadores desistemastecnológicosvulnerables, ni para responsables desistemas de protección civil y tampoco lo son para tomadores de decisiones. Se requiere entonces seguir trabajando para desarrollar un sistema de avisos con códigos más sencillos y directos que permitan generar protocolos de reacción y prevención, y que puedan ser comprendidos sin necesidad de ser expertos en las cuestiones técnicas del fenómeno. Se trata de un problema interdisciplinario que incluye a científicos, ingenieros, operadores de sistemas tecnológicos, personal de protección civil y tomadores de decisiones. El aviso debe ser claro y manejar un lenguaje ciudadano.

Semáforo del Servicio de Clima Espacial Mexicano

VARIOS PAÍSES, EN FUNCIÓN DE SUS POSIBILIDADES, están desarrollando su propia estrategia para monitorear y alertar sobre eventos de actividad solar. En el caso de México, el Servicio de Clima Espacial (SCiESMEX) está trabajando con el SINAPROC para operar un sistema de avisos que funcione mejor dadas las condiciones particulares del país. Siguiendo prácticas internacionales de protección civil, se definió un semáforo de avisos de clima espacial similar, por ejemplo, al que se utiliza para monitorear el estado del volcán Popocatepetl.⁵ El semáforo de clima espacial en México tiene 4 niveles de avisos:

⁵ http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/194_CARTELSEMFORODEALERTAVOLCNICA.PDF

Tabla 7. Código de avisos del Servicio de Clima Espacial Mexicano

Nivel del semáforo	Descripción
Rojo (extremo)	Posible evento Carrington.
Amarillo 2 (grave)	Evento de clima espacial severo con afectaciones significativas en México.
Amarillo 1 (intenso)	Evento de clima espacial de intenso a severo sin afectaciones significativas en México.
Atención (condiciones perturbadas)	Detección de condiciones de clima espacial que pudieran generar afectaciones en los siguientes 7 días.

Fuente: Laboratorio Nacional de Clima Espacial, Instituto de Geofísica, UNAM.

El rojo representa el máximo nivel, el peor escenario posible. Es importante notar que cuando el Sol presenta niveles mínimos de actividad y no hay ninguna situación de riesgo, entonces el semáforo está apagado. El semáforo opera solamente en condiciones de actividad solar que puedan significar algún riesgo para el país.

El SCiESMEX es responsable de analizar los datos de redes mundiales, incluyendo observaciones de satélites de la NOAA y la NASA, así como los índices ionosféricos y geomagnéticos globales, y combinar toda esta información planetaria con datos de las redes de instrumentos del LANCE. Las mediciones de las redes locales son estratégicas, ya que solamente teniendo esa información es posible conocer las condiciones de la región (territorio nacional). No necesariamente un evento de clima espacial con afectaciones importantes para Suecia o Noruega va a tener repercusiones similares en México, Brasil o Argentina, y viceversa. Los efectos locales son diferentes y solamente se pueden conocer si se estudian con métodos científicos.

Una de las misiones de un sistema de monitoreo de clima espacial es comparar datos globales con mediciones locales, este estudio es crítico para tener una mejor valoración técnica del evento.

Ahora bien, ¿cómo se relaciona el semáforo de avisos del SCiESMEX con las escalas de la NOAA? En el caso de México hemos establecido una metodología que combina el sistema de avisos de la NOAA, mediciones locales y el análisis de un grupo de expertos locales. Este grupo de expertos está conformado por académicos miembros del LANCE. Esta metodología ha llevado inclusive a implementar un sistema de gestión de la calidad y una certificación ISO 9001:2015 para garantizar que las

recomendaciones (en el nivel de avisos de clima espacial) del SCiESMEX al SINAPROC siguen las mejores prácticas internacionales.

Tabla 8. Sistema de colores del semáforo de avisos del Servicio de Clima Espacial Mexicano

Color de semáforo	Condiciones necesarias	Nivel y descripción
Rojo	<p>Detección de una fulguración solar con un flujo de rayos X suaves mayor o igual a la categoría X17.</p> <p>Detección <i>in situ</i> del arribo de una EMC y una onda de choque. La nube tiene las características de una tormenta solar perfecta.</p> <p>Condiciones en la magnetósfera terrestre: los índices geomagnéticos indican valores extremos: Kp=9 y Dst<=-450 nT.</p> <p>Condiciones en la ionósfera terrestre: el índice ionosférico indica valores extremos: TEC >=250 TECU.</p> <p>Posibles auroras boreales vistas en latitudes de México (menores a 35°N).</p>	<p>Grave</p> <p>Posible evento catastrófico (tipo Carrington).</p>
Amarillo 2	<p>Detección de una fulguración solar en lado día (tiempo local México) con un flujo de rayos X suaves mayor o igual a la categoría M8.</p> <p>Las mediciones <i>in situ</i> de naves espaciales en el medio interplanetario confirman que una eyección de masa coronal se dirige al entorno terrestre a menos de 0.5 UA de distancia a la Tierra.</p> <p>Condiciones en la magnetósfera terrestre: los índices geomagnéticos indican valores de severos a extremos: 8<=Kp<=9 y/o -250 nT>=Dst > -450 nT.</p> <p>Condiciones en la ionósfera terrestre, el índice ionosférico indica valores muy perturbados: TEC>350%.</p> <p>Posibles auroras boreales vistas en latitudes medias (45°N-36°N).</p>	<p>Alerta</p> <p>Evento intenso con afectaciones en México.</p>
Amarillo 1	<p>Detección de una fulguración solar (durante el lado noche, tiempo local México) con un flujo de rayos X suaves mayor o igual a la categoría M1 y menor que X17.</p> <p>Medio interplanetario: detección de eyección de masa coronal, posiblemente dirigida a la Tierra, con velocidades</p>	<p>Precaución</p> <p>Detección de evento intenso, sin afectaciones significativas en México.</p>

	<p>mayores o iguales a 1000 km/s. La velocidad de viento solar <i>in situ</i> es mayor a 800 km/s.</p> <p>Condiciones en la magnetósfera terrestre: los índices geomagnéticos indican valores de intensos a severos: $7 < Kp <= 8$ y/o $-150 \text{ nT} > Dst > -250 \text{ nT}$.</p> <p>Ionósfera terrestre: reportes de ionósfera significativamente perturbada en otras regiones del planeta.</p> <p>Posibles auroras boreales vistas en latitudes altas y medias (55°N-45°N).</p>	
No aplica	<p>Cuando las condiciones a reportar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • no se recomienda un semáforo superior o igual a Amarillo 1. • se presenta una cancelación o conclusión de evento. 	No aplica

Fuente: Laboratorio Nacional de Clima Espacial, Instituto de Geofísica, UNAM.

Las condiciones actuales del clima espacial y las observaciones de las redes de instrumentos del LANCE en México se pueden consultar en la página de internet del SCiESMEX.⁶ El sistema de avisos, en tiempo real, de eventos de clima espacial utilizando los códigos de la NOAA del SCiESMEX, se puede consultar directamente en su página de internet o en sus redes sociales.⁷ El resumen semanal de eventos de clima espacial analizado por el equipo del LANCE se publica todos los jueves en una página de internet del SCiESMEX y se difunde en sus redes sociales.⁸

Como en el caso de sus contrapartes internacionales, estos sistemas están en revisión continua para mejorarlos. Conforme México tenga mejores observaciones propias y un servicio de monitoreo consolidado, se incrementará la resiliencia del país ante estos fenómenos naturales. Debemos prepararnos para el escenario cuando el ciclo de actividad solar se incremente y así lo hagan también las probabilidades de ocurrencia de tormentas solares intensas –el próximo máximo de actividad solar se estima que será alrededor del 2024-2025–. En el caso de México, el SINAPROC es responsable de recibir el aviso del SCiESMEX y articular protocolos de alertamiento y reacción que son responsabilidad del gobierno. El SINAPROC tiene que dar aviso a

⁶ <http://www.sciesmex.unam.mx/datos/>

⁷ <http://www.sciesmex.unam.mx/avisos/> y <https://twitter.com/sciesmex/>

⁸ <http://www.sciesmex.unam.mx/blog/category/reporte-semanal-de-clima-espacial/> y <https://web.facebook.com/sciesmex/>.

las agencias responsables de la operación de los sistemas tecnológicos vulnerables a estos eventos de clima espacial, para que estas ejecuten sus propios protocolos de protección. El SINAPROC debe articular con el gobierno un plan de emergencia nacional cuando se trate de un evento severo o extremo. La mejor protección empieza por la prevención.

Glosario

- **Anillos de corriente:** región del espacio cercano del planeta, en forma de dona, que confina una población de partículas cargadas; estas partículas se mueven alrededor de las líneas de campo magnético y giran alrededor del planeta.
- **Campo magnético:** líneas de fuerza que llenan el espacio y que siempre están cerradas. Emergen de un polo magnético positivo y se cierran en un polo magnético negativo. Polos magnéticos de signo opuesto se atraen, polos del mismo signo se repelen.
- **Campo geomagnético:** líneas de campo magnético en la superficie de la Tierra que son generadas en el interior del planeta. El polo positivo está en el sur geográfico y el polo negativo en el norte geográfico.
- **Capas del Sol:** tres en el interior (núcleo, zona radiativa y zona convectiva) y tres en el exterior (fotosfera, cromósfera y corona).
- **Clima espacial:** estudio y monitoreo de la actividad solar y su influencia sobre el medio interplanetario, el entorno de la Tierra (ionósfera y campo geomagnético) y los sistemas tecnológicos.
- **Corrientes geomagnéticamente inducidas:** cuando ocurre una tormenta geomagnética, las variaciones en el campo magnético terrestre inducen corrientes eléctricas en el subsuelo de la Tierra y en materiales conductores eléctricos de grandes extensiones (conductores con longitudes de cientos de kilómetros, como gasoductos y líneas de transmisión de alta y media tensión).
- **Evento Carrington:** tormenta solar registrada el 1 de septiembre de 1859 que provocó el despliegue de auroras polares más intenso y extenso de la historia reciente.
- **Evento de partículas energéticas solares:** fenómeno de actividad solar que se refiere a la aceleración y calentamiento de partículas solares en los sitios donde ocurre una tormenta solar.

- **Eyección de masa coronal:** fenómeno de actividad solar que se refiere al desprendimiento de una gigantesca nube de material coronal y que se propaga al medio interplanetario.
- **Fulguración:** fenómeno de actividad solar que se refiere a una explosión de luz muy intensa asociado con una región activa. Se clasifican por la intensidad en su flujo de rayos X (tipos C, M, X).
- **Fusión nuclear:** fenómeno físico donde átomos ligeros se recombinan entre sí mediante colisiones muy violentas para formar átomos más pesados. Mecanismo con el cual las estrellas generan su energía.
- **Ionósfera:** región de la atmósfera terrestre que absorbe la radiación más energética del Sol y que tiene propiedades de plasma.
- **Magnetósfera:** región en el espacio cercano de la Tierra producida por la oposición del campo geomagnético al flujo del viento solar.
- **Mancha solar:** regiones ligeramente más frías y oscuras en la superficie del Sol (fotosfera), asociadas con campos magnéticos muy intensos.
- **Onda electromagnética:** perturbación de campo magnético y campo eléctrico que se propaga en forma de onda y viaja a la velocidad de la luz. Se caracteriza por longitud de onda y su frecuencia. La luz son ondas electromagnéticas.
- **Onda de choque:** perturbación en forma de discontinuidad que provoca una compresión (aumento de densidad y temperatura) de manera irreversible en el medio por el cual se propaga. Las ondas de choque se producen en explosiones muy violentas o cuando se propagan objetos, a velocidades supersónicas, a través de un medio.
- **Plasma:** estado de la materia que combina propiedades de gas y que, por su alta temperatura, es sensible también a campos electromagnéticos.
- **Punto L1:** punto de Lagrange 1; posición en la línea Sol-Tierra donde la fuerza gravitacional ejercida por la estrella y el planeta se igualan en intensidad y se cancelan mutuamente porque tienen direcciones opuestas.
- **Reconexión magnética:** fenómeno físico que tiene que ver con la recombinación de dos campos magnéticos distintos; evento explosivo que puede liberar enormes cantidades de energía.
- **Redes de energía eléctrica:** infraestructura para generar y distribuir energía eléctrica a lo largo de una región o país.

- **Región activa:** zona en la cromósfera, encima de manchas solares, donde se producen fenómenos de actividad solar.
- **Satélites artificiales:** objetos tecnológicos que son enviados a orbitar en el espacio para operar sistemas de telecomunicaciones, investigación e inteligencia; tienen aplicaciones civiles y militares.
- **Sistema de Posicionamiento Global:** tecnología que se utiliza para determinar una posición y una marca de tiempo; se basa en un receptor que recibe y procesa información (señales) emitidas por una flotilla de satélites.
- **Telecomunicaciones:** sistemas de comunicación que emplean ondas electromagnéticas (señales) entre antenas en tierra y satélites.
- **Tormenta geomagnética:** perturbación de gran escala del campo geomagnético producido por la interacción (reconexión) de una eyección de masa coronal que impacta a la magnetósfera.
- **Tormenta solar:** evento explosivo en la superficie del Sol asociado a una región activa. Puede ser una combinación de: fulguración, evento de partículas energéticas y/o eyección de masa coronal.
- **Tormenta solar perfecta:** evento explosivo en el Sol que se dirige hacia la Tierra y que tiene todas las características para generar el mayor daño posible. El evento Carrington se considera una tormenta solar perfecta.
- **Viento solar:** expansión continua de la atmósfera del Sol (partículas y campo magnético) que permea todo el espacio interplanetario.

Lista de tablas y figuras

Capítulo 1. El Sol, nuestra estrella

- 15 Figura 1. El Sol.
- 16 Figura 2. Representaciones de la escala Sol-Tierra.
- 19 Figura 3. Capas del Sol.
- 20 Figura 4. Espectro electromagnético.
- 21 Figura 5. Perfil de temperatura y zona de transición.
- 22 Tabla 1. Capas del Sol y sus principales características.
- 23 Figura 6. Corona solar.
- 24 Figura 7. Eugene Parker.
- 26 Figura 8. Heliosfera.
- 28 Figura 9. Fotografía de una mancha solar.
- 29 Figura 10. Ciclo solar.
- 31 Figura 11. Secuencia de fulguración solar en rayos X.
- 32 Figura 12. Representación de partículas energéticas.
- 33 Figura 13. Eyección de masa coronal.
- 34 Tabla 2. Tipos de tormenta solar y sus principales características.

Capítulo 2. El entorno cercano de la Tierra

- 36 Figura 14. Líneas de campo magnético.
- 36 Figura 15. Campo magnético de la Tierra.
- 38 Figura 16. Magnetósfera.
- 41 Figura 17. Ionósfera.
- 44 Figura 18. Secuencia de tormenta geomagnética.

Capítulo 3. Clima espacial

- 49 Figura 19. Aurora boreal.
- 51 Figura 20. Afectaciones de las tormentas solares en los sistemas tecnológicos.

- 53 Figura 21. Fallas en satélites.
55 Figura 22. Daños en subestación eléctrica.
57 Figura 23. Diagrama de efecto cascada de falla en energía eléctrica.

Capítulo 4. El evento Carrington y otras tormentas solares

- 61 Figura 24. Dibujo de Carrington.
63 Figura 25. Aurora boreal roja.
66 Tabla 3. Relación histórica de tormentas solares severas en la historia reciente.
69 Figura 26. Línea de tiempo de la secuencia de eventos en México.
70 Figura 27. Ciclo solar y fulguraciones más intensas.

Capítulo 5. Planes de Acción

- 75 Figura 28. Infografía de misiones espaciales.

Capítulo 6. ¿Qué hacemos en México?

- 84 Figura 29. Infografía CENAPRED.
85 Figura 30. Redes de instrumentos en México.

Apéndice. Sistemas de alertamiento

- 95 Tabla 4. Escalas del clima espacial de NOAA. Eventos G (tormentas geomagnéticas).
99 Tabla 5. Escalas del clima espacial de NOAA. Eventos S (tormentas de radiación corpuscular solar).
103 Tabla 6. Escalas del clima espacial de NOAA. Eventos R (bloqueos de señales de radio).
106 Tabla 7. Código de avisos del Servicio de Clima Espacial Mexicano.
107 Tabla 8. Sistema de colores del semáforo de avisos del Servicio de Clima Espacial Mexicano.

Bibliografía

- Aguilar E. (2014), *Servicio de clima espacial*, Cuadernos de Divulgación Científica y Tecnológica del Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación de Michoacán, cuaderno número 5, CECTI: Morelia. Consulta 1 de abril de 2020 en: <http://www.sciesmex.unam.mx/static/media/uploads/reportes/servicios-de-clima-espacial.pdf>.
- Bravo, S. (1987), *Encuentro con una estrella* (La Ciencia para Todos, núm. 38), México: Fondo de Cultura Económica.
- Bravo, S. (2001), *Plasma en todas partes* (La Ciencia para Todos, núm. 126), México: Fondo de Cultura Económica.
- 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.
- Castelazo, I. (1859), "Descripción de la aurora boreal observada en el Mineral de Zimapán en la noche del 1º y mañana del 2 de septiembre de 1859", *La Sociedad* (28/09/1859). Consultado 1 de abril de 2020 en: <http://www.hndm.unam.mx/>
- Chambers, D. W. (1987), "Period and process in colonial and national science", en Nathan Reingold y Marc Rothenberg (eds.), *Scientific colonialism: a cross cultural comparison*, Washington: Smithsonian Institution Press, pp. 297-321.
- Cuevas-Cardona, C. y J. A. González-Esparza (2018), "El evento Carrington: la tormenta solar perfecta", *¿Cómo Ves?*, No. 241, 24-27.
- Denardini, C. M., S. Dasso y J. A. González-Esparza (2016a), "Review on Space Weather in Latin America. 1. The beginning from the Space Science Research", *Advances in Space Research*, 1916–1939, DOI: 10.1016/j.asr.2016.03.012.

- Denardini, C. M., S. Dasso y J. A. González-Esparza (2016b), “Review on Space Weather in Latin America. 2. The Research Networks Ready for Space Weather”, *Advances in Space Research*, 1940–1959, DOI: 10.1016/j.asr.2016.03.013.
- Denardini, C. M., S. Dasso y J. A. González-Esparza (2016c), “Review on Space Weather in Latin America. 3. Development of Space Weather Forecasting Centers”, *Advances in Space Research*, 1960–1967, DOI: 10.1016/j.asr.2016.03.011.
- Fierro, J. y M. A. Herrera (2003), *La Familia del Sol* (La Ciencia para Todos, núm. 62), México: Fondo de Cultura Económica.
- González-Esparza, J. A. y C. Cuevas-Cardona (2018), “Observations of low-latitude red aurora in Mexico during the 1859 Carrington geomagnetic storm”, *Space Weather*, 16, 593–600. DOI: 10.1029/2017SW001789
- González-Esparza, J. A., V. de la Luz, P. Corona-Romero, J. C. Mejía-Ambroz, L. X. González, M. A. Sergeeva, E. Romero-Hernández y E. Aguilar-Rodríguez (2017), *Mexican Space Weather Service (SciESMEX)*, DOI: 10.1002/2016SW001496.
- Hodgson, R. (1860), “On a curious appearance seen in the Sun”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 20, 15–17.
- Otaola, J. A., B. Mendoza y R. Pérez (2003), *El Sol y la Tierra: Una relación tormentosa* (La Ciencia para Todos, núm. 114), México: Fondo de Cultura Económica: México.
- Ramos, M. P. y J. J. Saldaña (2000), “Del Colegio de Minería de México a la Escuela Nacional de Ingenieros”, *Quipu. Revista Latinoamericana de Historia de las Ciencias y la Tecnología*, vol. 13, núm. 1, 105-126.
- Royal Academy of Engineering (2013), *Extreme Space Weather: Impacts on Engineered Systems and Infrastructure*, Londres: Royal Academy of Engineering. Consulta 1 de abril de 2020 en: <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/spaceweather-full-report>
- Sagan, Carl. (1982), “Cosmos”, México: Planeta.

Páginas web de las instituciones que se mencionan en la obra

Agencia Espacial Mexicana

<https://www.gob.mx/aem>

Centro Nacional de Prevención de Desastres

<https://www.gob.mx/cenapred>

Deep Space Climate Observatory (DSCOVR)

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

GOES

<https://www.goes.noaa.gov>

International Civil Aviation Organization (ICAO)

<https://www.icao.int/Pages/default.aspx>

Instituto de Geofísica de la UNAM (IGF-UNAM)

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

International Space Environment Services (ISES)

<http://www.spaceweather.org>

Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE)

www.lance.unam.mx

National Aeronautics and Space Administration (NASA)

<https://www.nasa.gov>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

<https://www.noaa.gov>

Parker Solar Probe

<https://www.nasa.gov/content/goddard/parker-solar-probe>

Plática TEDx La tormenta solar perfecta <https://youtu.be/ejcbkegEZv4>

Servicio de Clima Espacial Mexicano (SCIESMEX)

www.sciesmex.unam.mx

Redes sociales

Twitter:

<https://twitter.com/sciesmex>

Facebook:

<https://web.facebook.com/sciesmex/>

Solar Dynamic Observatory (SDO)

<https://sdo.gsfc.nasa.gov>

Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC)

<https://www.gob.mx/cenapred/articulos/sabes-que-es-el-sistema-nacional-de-proteccion-civil-sinaproc>

Solar and Heliopheric Observatory

<https://sohowww.nascom.nasa.gov>

Space Weather Prediction Center-NOAA (SWPC-NOAA)

<https://www.swpc.noaa.gov>

United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA)

<https://www.unoosa.org>

Organización Meteorológica Mundial (WMO)

<https://public.wmo.int/es>

Catalogación en la publicación UNAM. Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información.

Nombres: González Esparza, Juan Américo, autor.

Título: La tormenta solar perfecta : meteorología del espacio y sus aplicaciones / Juan Américo González Esparza.

Descripción: Primera edición. | Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México, Dirección General de Publicaciones y Fomento **Editorial:** Morelia, Michoacán: Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, 2022.

Identificadores: LIBRUNAM 2172860 (impreso) | LIBRUNAM 2133845 (libro electrónico) | ISBN 9786073065221 (impreso) | ISBN 9786073065603 (libro electrónico).

Temas: Actividad solar. | Tiempo (Meteorología) -- Efecto de la actividad solar en. | Cambios climáticos -- Efecto de la actividad solar sobre.

Clasificación: LCC QB524.G65 2022 (impreso) | LCC QB524 (libro electrónico) | DDC523.7—dc2

La tormenta solar perfecta. Meteorología del espacio y sus aplicaciones, Juan Américo González Esparza.

La edición electrónica de un ejemplar (67 KB) fue preparada por el Área Editorial de la ENES Unidad Morelia.

Se utilizó en su composición los tipos WorkSans en sus variantes: Semibold (18 pts), Medium (14pts, 10pts y 8pts), Regular (10pts y 8pts) y Light (7pts).

El diseño de portada e interiores estuvo a cargo de Jimena Terrones.

Las ilustraciones las realizó Axel García Pineda.

El cuidado de la edición estuvo a cargo de Cecilia López Ridaura, Juan Benito Artigas Albarelli, Eduardo González Palacios, Mariafernanda Reyes López, Rodrigo Ocampo y Daniel Sandoval Salgado.

Primera edición electrónica en formato PDF: 15 de febrero de 2023.

D. R. © 2023. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ciudad Universitaria, alcaldía de Coyoacán, C.P. 04510. Ciudad de México.

Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial

www.libros.unam.mx

Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C. P. 58190, Morelia, Michoacán.

ISBN: 978-607-30-6560-3 (libro electrónico).

La presente publicación contó con dictámenes de expertos externos de acuerdo con las normas editoriales de la ENES Morelia, UNAM.

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales. Hecho en México.

Este libro explica al Sol, su composición (hasta donde podemos saberla) y su funcionamiento. También expone la composición de la atmósfera de la Tierra y cómo esta, cual escudo de fuerza invisible, nos protege de las emanaciones del viento solar. Lo anterior sirve para señalar la relación del Sol con la Tierra y cómo la actividad solar puede afectar, y afecta, a nuestro planeta. Todas estas páginas ayudan a entender lo que son las tormentas solares y, a continuación, explica los registros históricos que se tienen de estos fenómenos espaciales enfatizando lo importante que es la planeación en la elaboración de planes de emergencia para cuando suceda una tormenta solar perfecta (donde el perfecto, en contraposición a lo que primeramente pensamos, no es bueno sino la posibilidad más catastrófica).

La tormenta solar perfecta. Meteorología del espacio y sus aplicaciones termina señalando qué es lo que se hace y lo que falta por hacerse en México para estar prevenidos para cuando suceda este tipo de fenómeno espacial, porque lo único claro que tenemos es que, como los temblores, en algún futuro ocurrirá.

ENES
MORELIA

10
años
(2011-2021)

geofísica
UNAM

LANCÉ
Laboratorio Nacional
de Clima Espacial

Publicaciones
Fomento
Editorial

