

¿Por qué las tormentas solares han sido tan estudiadas y por qué son preocupantes?

ELIZABETH AMÉRICA FLORES FRÍAS,
FERMÍN CASTILLO MEJÍA, EDNA VÁZQUEZ
VÉLEZ Y HORACIO MARTÍNEZ VALENCIA

Elizabeth América Flores Frías es Ingeniera Química egresada de la FCQel de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEMor). Posteriormente, cursó la Maestría y Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la UAEMor. Actualmente, se encuentra haciendo su posdoctorado en el Instituto de Ciencias Físicas de Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), desarrollando síntesis de inhibidores de corrosión mediante plasma. Fermín Castillo Mejía es Físico de la UNAM y Maestro en Ciencias (Física) por la UNAM. Doctor en Ciencias (Física) en la Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil Argentina, donde trabajó en física de plasmas. Actualmente se encuentra trabajando, en el Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM (ICF-UNAM). Edna Vázquez Vélez estudió la licenciatura, maestría y doctorado en Química en la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP. Realizó un posdoctorado en el Centro Nacional de la Investigación Científica en Yves Sur-Yvette, Francia y actualmente trabaja en el Laboratorio de Espectroscopía del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM. Horacio Martínez Valencia estudió la licenciatura, maestría y doctorado en Física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Actualmente, es Investigador Titular "C" del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM y es miembro activo de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

EL SOL

Para la Tierra y sus habitantes, el Sol es una estrella única: nuestra estrella. Durante el día, el Sol hace palidecer a los otros cuerpos celestes y, debido a su brillo cegador, no nos permite mirarlo directamente. El Sol ha sido objeto de curiosidad y estudio para todas las civilizaciones.

Desde el punto de vista astronómico, el Sol es una estrella de tamaño mediano, es una bola de gas ionizado, esto es, un plasma, muy caliente de 1,390,000 kilómetros de diámetro. A comparación de otras estrellas, el Sol es "enano" y amarillo, con temperatura superficial de 5,507 °C, compuesto esencialmente por Hidrógeno (74% en masa y 92% del volumen) y Helio (24.5% en masa y 7% del volumen), a lo que se añaden pequeñas trazas de elementos como Hierro, Níquel, Oxígeno, Silicio, Azufre, Magnesio, Carbono, Neón, Calcio y Cromo. El Sol alcanzó la temperatura y densidad necesarios para producir una fusión

nuclear (se fusiona el hidrógeno para producir helio). Cada segundo, estas reacciones termonucleares que se llevan a cabo en el centro del Sol queman 600 millones de toneladas de hidrógeno para transformarlas en 596 millones de toneladas de helio. Los cuatro millones de toneladas faltantes, son convertidos en energía pura, constituyen el pago de la hipoteca de toda la vida en la Tierra. A medida que la energía emerge del centro del Sol, pasa a través de capas de gas sucesivamente más frías y menos densas y, finalmente, llega a su superficie, donde la temperatura, como ya dijimos, es de apenas unos 5,500 °C.

La acción no se detiene en la superficie del Sol. Esa amigable superficie de cara amarilla hierve como la avena y está salpicada de oscuras tormentas magnéticas (las llamadas manchas solares) que rasgan, giran y azotan el espacio con lluvias de partículas eléctricas y radiación. La aureola (corona), compuesta por delgadas y supercalientes serpentinadas de gas electrificado, y que solo es visible durante los eclipses solares, se extiende a millones de kilómetros de la superficie brillante del Sol.

A veces las cosas salen mal, aunque hasta ahora en una escala muy por debajo de los estallidos observados en el sistema estelar *Alpha Centauri*. Los astrónomos anunciaron que una llamarada masiva había estallado desde su superficie en 2019. Durante siete segundos, mientras un gran número de telescopios en la Tierra y en el espacio observaban, la pequeña estrella aumentó sus emisiones de radiación ultravioleta unas 14,000 veces, protagonizando una de las llamaradas más violentas jamás vistas por nosotros en nuestra galaxia. Esto es debido a que los campos magnéticos generados por todo ese gas electrificado y arremolinado emergen en la superficie del Sol, se retuercen y se enredan. Finalmente, se rompen y se vuelven a conectar en rizos, liberando enormes cantidades de radiación y partículas cargadas.

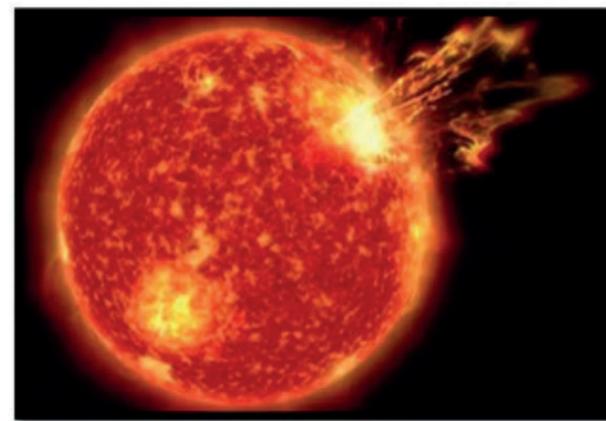


Figura 1. El Sol [2]. <https://www.perfil.com/noticias/ciencia/una-tormenta-solar-impacta-hoy-con-la-tierra-que-son-las-consecuencias.phtml>

A veces, estos destellos lanzan trozos enteros de las capas exteriores del Sol al espacio, en eventos llamados eyecciones de masa coronal. La madre de todas las tormentas solares de nuestro Sol, registradas hasta ahora ocurrió el 1 de septiembre de 1859, cuando un incidente de ese tipo impactó a la Tierra [1], provocando incendios en los sistemas de telégrafos en Europa y Norteamérica, de donde salieron chispas. Las auroras de esa noche se extendieron al sur llegando hasta Cuba y Hawái, y fueron tan brillantes que las personas eran capaces de

Tormenta Solar

leer el periódico con esa luz.

Una tormenta solar se origina debido a una explosión enorme en la superficie del Sol, lo que se conoce como erupción solar, ver figura 1. Es tan enorme esta explosión en la cual se libera de manera súbita y espontánea la energía magnética que ha ido acumulando en su atmósfera y es tanta la energía que desprende que podríamos imaginarlo equivalente a un billón de bombas de hidrógeno detonando al mismo tiempo [3].

Las tormentas solares se originan por el incremento en la densidad de plasma (el llamado cuarto estado de la materia y del cual está constituido el 98% de la materia del universo) y en la velocidad del viento solar producido por un resplandor solar o una eyección de masa coronal, y más si está orientada hacia la Tierra. Estos incrementos se traducen en un aumento de la presión del viento solar [4] sobre la frontera magnética entre el campo magnético y el viento solar (magnetósfera) produciendo una deformación en esta frontera. En el lado diurno la magnetopausa se acerca a nuestro planeta, pasando de estar situada a unos 11 radios terrestres a sólo 4-5. Al mismo tiempo, la región correspondiente a la semiesfera nocturna, se estrecha de manera muy compleja, de forma similar a lo que le su-

cede a un tubo de pasta de dientes si se le comprime por su mitad. Esto provoca que se intensifique la acción del campo magnético de la Tierra para incrementar su presión sobre el viento solar y alcanzar una nueva situación de equilibrio. Todos estos fenómenos dan lugar a lo que se le conoce como tormenta solar (geomagnética) [5], que afecta, en mayor o menor medida, a todo el planeta según sea la velocidad del viento solar. La tormenta solar produce fenómenos en la Tierra entre uno y cuatro días después de que se haya producido el suceso violento en el Sol.

Si estas explosiones son lo suficientemente grandes, lanzan enormes cantidades de partículas subatómicas al espacio y estas partículas viajan por el cosmos como un río de lava a una velocidad de entre 300 y 1,000 kilómetros por segundo por lo que tardarían aproximadamente entre 15 horas y tres días en llegar a la Tierra. A esto es a lo que se le conoce como eyección de masa coronal.

Si esta eyección de masa coronal no es lo suficientemente fuerte, el campo magnético de la Tierra nos protege completamente de estas radiaciones originadas por el Sol (como se observa en la figura 2) y solo se producirán inofensivas pero espectaculares exhibiciones de auroras. Precisamente es la magnetósfera, que es una región alrededor de nuestro planeta en la cual el campo magnético actúa como escudo protector, la que desvía el viento solar que contiene dichas partículas subatómicas cargadas de alta energía y permite la vida como la conocemos en el planeta Tierra.

Cuando estas partículas chocan con la magnetósfera lo que ésta hace es desviarlas haciéndolas fluir alrededor de la misma. Sin embargo, una parte de estas partículas logra atravesar la magnetósfera entrando en contacto con las líneas del campo magnético de la Tierra, siguiendo la trayectoria de las líneas, las cuales están conectadas a los polos. Por consiguiente, las partículas se dirigen hacia esos puntos del planeta, donde interactúan con átomos de la atmósfera, que según la excitación producida, emiten energía en diferentes colores. Es por esta razón que las auroras solo se aprecian en los polos de la Tierra [6] y son conocidas como auroras polares (polo sur, referido a la aurora austral y polo norte, referido a la aurora boreal).

Aunque parezca un poco contradictorio, la historia de una tormenta solar (geomagnética) se inicia en el Sol. Su acción sobre la Tierra se realiza a través de su campo gravitatorio, la radiación electromagnética (de la que la luz visible y el calor son las expresiones más palpables) y la emisión continua de materia de su corona, que constituye el «viento solar». Este viento es un flujo de plasma compuesto por protones, electrones y partículas alfa, extraordinariamente tenue (10 partículas/cm³ en las cercanías de la Tierra), que, en condiciones normales, se mueve a una velocidad de unos 400 km/s y arrastra consigo el campo magnético del Sol. Las características de la radia-

ción electromagnética y el viento solar emitidos por el Sol dependen estrechamente de su nivel de actividad, que tiene una componente cíclica y otra esporádica. La primera se caracteriza por seguir un periodo aproximado de 11 años que se denomina ciclo solar. El incremento de actividad se expresa por un aumento del número de manchas en su fotosfera y por la presencia de un mayor número de los fenómenos violentos que constituyen la actividad esporádica. Por ello, esta segunda componente, aunque imprevisible, tiene también un cierto carácter periódico y tiende a aumentar en las fases en las que el ciclo periódico de actividad se encuentra en su máximo.

cuales 1,918 están en órbita terrestre baja, ver figura 3.

¿Qué es un satélite y para que nos sirve un satélite?

Un satélite es un objeto natural o artificial que gira alrededor de otro más grande [8]. En el universo ocurre que asteroides o satéli-

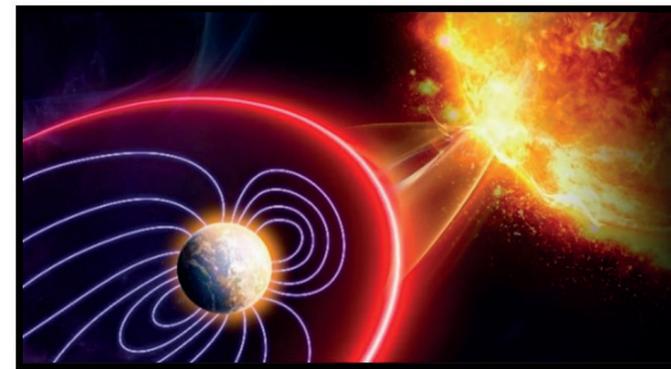


Figura 2. Ilustración de una llamarada solar impactando el campo magnético de la Tierra [7]. https://misionesonline.net/2021/10/04/tormenta-solar/?preview_id=1000000672869

Evento Carrington

El evento Carrington sucedido en 1859 quedó marcado como la mayor tormenta solar ocurrida en la Tierra de la que se tiene conocimiento. Se dice que fue tal su intensidad que se observaron auroras polares en todo el mundo. Claro está que en ese tiempo no contábamos con la tecnología de ahora y lo único que pudo inutilizar fue el telégrafo, además de que las brújulas no funcionaban correctamente, ya que ellas apuntan hacia el sur o norte magnético.

Este evento que destacó aquella época de 1859 fue ocasionado por la acción de partículas cargadas de una eyección de masa coronal, las cuales impactaron a la magnetósfera de la Tierra y, fue tan excesiva su energía que desprendió sobre ella y comprimió el campo magnético de la Tierra, ocasionando que se debilitara y perdiera fuerza. Parte de toda esa corriente de energía se filtró provocando las auroras polares, las cuales se extendieron desde latitudes altas a bajas induciendo corrientes intensas a través de los continentes, ocasionando que estas corrientes entraran en los cables conductores del telégrafo, provocando cortocircuitos porque que la corriente transportada era demasiado alta, por lo cual el calentamiento generado fue capaz de fundir e inutilizar dicho sistema de comunicación.

Si un evento igual al de Carrington aconteciera actualmente, podría afectar importantemente nuestra tecnología, pues cada satélite de los cuales dependemos para disfrutar este mundo tan tecnológico podría ser dañado. ¡En 1859 fueron los telégrafos, hoy en día serían los satélites! Nos remontaríamos a situaciones del pasado, tal vez 100 años atrás o más, aunado a los daños y sobrecargas en redes eléctricas y transformadores. Podrían ser pérdidas multimillonarias. Hoy en día existe un total de 3,372 satélites en el espacio, de los

tes como la Luna orbitan planetas o estrellas. La Luna es un satélite natural y es el único objeto natural que gira alrededor de la Tierra. Sobre la atmósfera terrestre también orbitan otros aparatos muy complejos que fueron creados por el ser humano con distinto fin. Estos son **satélites artificiales para enviar y recibir comunicaciones de uso masivo** como telefonía, televisión o Internet; para hacer pronósticos del clima o para prestar servicios educativos y de salud en zonas inaccesibles para otras tecnologías más tradicionales; e incluso algunos satélites han sido lanzados al espacio con fines militares y de investigación científica.

Actualmente vivimos una época totalmente dependiente de la tecnología. Tal vez las probabilidades de que ocurra una tormenta solar igual a la de Carrington son mínimas: «Los eventos extremos como el Evento Carrington del año 1859 tienen una probabilidad de 1 cada 100 años, pero si ocurriera ¿estaríamos preparados para tal suceso? Recordemos cuando llega a faltar o fallar el internet, ¡nos paralizamos! no concebimos un mundo sin celulares. Y mucho menos imaginar lo cruel que sería no tener acceso a la energía eléctrica ¡cuando nacimos en un mundo con energía eléctrica! no lo podemos concebir sin ella. Evidentemente no estamos preparados a utilizar métodos alternos como lo hicieron nuestros antepasados, tal vez tendríamos que encontrar otra vía tecnológica, por si ese día llegara a ocurrir y no nos tomara de sorpresa. Estaríamos obligados a vivir

temporalmente sin tecnología, sería un golpe duro y a la vez una gran lección para la humanidad, pues no todo lo podemos controlar. Hay sucesos que siempre estarán fuera del alcance de nosotros los seres humanos. A veces solemos olvidar que a pesar de que estamos formados de la misma materia del universo y que somos un minúsculo fragmento de él, somos vulnerables para contrarrestar los sucesos que se generan en el mismo y de los que solo comprendemos un porcentaje muy pequeño.

Con objeto de disminuir los efectos de las tormentas solares, se ha puesto una atención particular a la detección temprana del fenómeno. Para ello, el estudio se ha enfocado desde dos vías distintas. Por una parte, se ha planteado una línea de investigación que pretende sacar partido de la secuencia temporal de los fenómenos que conducen a la tormenta solar. Se trata, por tanto, de una línea predictiva de gran interés práctico [10]. La segunda vía se centra en los efectos en la ionosfera y se refiere a la prevención de efectos perturbadores una vez que la tormenta ionosférica se ha producido. El objetivo no es predecir la ocurrencia de una tormenta ionosférica, sino anunciar su presencia con la prontitud suficiente para que se puedan conocer los posibles fallos que la situación pueda inducir en las comunicaciones, la navegación o el posicionamiento. Las tormentas solares son procesos naturales que afectan a toda la Tierra, inducen fenómenos físicos importantes, como la aparición de auroras, el aumento de la radiación, las tormentas ionosféricas y, si son muy intensas, pueden provocar un gran impacto en muchos recursos tecnológicos que sustentan nuestra vida cotidiana. Los daños en satélites, líneas de transmisión de energía eléctrica, sistemas de navegación y ferrocarriles que una gran tormenta magnética podrían ser capaces de producir grandes pérdidas económicas y alterar el funcionamiento cotidiano de nuestra sociedad, creando diversos problemas. Es por tanto imprescindible prestar a este riesgo natural la debida atención, fomentar su estudio y transmitir a la sociedad la importancia de estar preparados para hacerle frente. Otro aspecto importante de estas tormentas solares es que también están formadas de luz

ultravioleta, lo que es importante para estimular la vida, al convertir moléculas complejas en aminoácidos y, en última instancia, en organismos unicelulares". Tal vez exista un punto óptimo en el que una tormenta solar sea lo suficiente como para ayudar a la vida, ¡pero no tanto como para destruirla!

Finalmente, como una reflexión les dejamos la frase escrita por el matemático y escritor Nassim Taleb:

"No importa la probabilidad de un evento si sus consecuencias son demasiado costosas para afrontarlas" Por eso los científicos estudian y vigilan a las tormentas solares. <https://www.nationalgeographic.es/ciencia/2019/03/las-tormentas-solares-pueden-ser-peores-si-vives-cerca-de-ciertas-rocas> <https://www.perfil.com/noticias/ciencia/una-tormenta-solar-impacta-hoy-con-la-tierra-que-son-las-consecuencias.phtml> <https://www.xlsemanal.com/conocer/ciencia/20200814/que-es-tormenta-solar-consecuencias-tierra-humanidad-infraestructuras.html> https://es.wikipedia.org/wiki/Viento_solar Buonsanto, M.J. Ionospheric storms-a review, Space Science Reviews, 1999, 88: 563-601. <https://www.merida.gob.mx/planetario/pdf/auroras.pdf> https://misionesonline.net/2021/10/04/tormenta-solar/?preview_id=1000000672869 <https://www.eleconomista.com.mx/tecnologia/que-son-los-satelites-artificiales-20200129-0066.html> <https://patriciaroi.wordpress.com/2012/12/09/nasa-advierte-tormenta-solar-2013-debemos-preocuparnos/> <https://www.interactions.org/node/12913>

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.



Figura 3. Satélites alrededor del Sol y de la Tierra, principales víctimas de una tormenta solar [9]. <https://patriciaroi.wordpress.com/2012/12/09/nasa-advierte-tormenta-solar-2013-debemos-preocuparnos/>