

La vida en la Tierra no sería posible sin la existencia del Sol, nuestra estrella más cercana. A medida que la tecnología avanza, la proximidad del Sol permite a los astrofísicos descubrir nuevos rasgos en esta estrella que no es posible observar en ninguna otra. Las observaciones más recientes muestran un Sol muy activo, no sólo con manchas y filamentos, sino también con eyecciones de masa que se alejan de la estrella a más de 1000 km s^{-1} . Lejos de la belleza de las imágenes que proporciona el Sol durante periodos de actividad, vivir bajo la influencia de una estrella activa tienen sus consecuencias para la vida diaria, ya que supone un potencial peligro para los sistemas tecnológicos.



Consuelo Cid
Universidad de Alcalá
consuelo.cid@uah.es

La actividad solar origina numerosos cambios en el espacio cuyo estudio es el objeto de una ciencia multidisciplinar denominada Meteorología Espacial que abarca desde la Heliofísica (incluyendo la Física Solar e Interplanetaria) a la Geofísica y la Aeronomía. Además de multidisciplinar, la Meteorología Espacial puede entenderse como una ciencia básica, cuyo objetivo consiste en entender la interacción entre el Sol y la Tierra, pero sin duda es una ciencia aplicada, dedicada a la predicción del denominado “tiempo espacial” con objeto de anticiparse a las alteraciones que la actividad solar produce en los sistemas tecnológicos y mitigarlas en lo posible.

UN POCO DE HISTORIA

El primer suceso de “tiempo espacial” data de 1859, cuando el astrónomo Richard Carrington notó la “ocurrencia contemporánea” entre una fulguración solar en luz blanca y la perturbación magnética observada en el observatorio de Kew (Inglaterra). Los dos días siguientes a la fulguración numerosos magnetómetros de todo el mundo quedaron fuera de rango y únicamente se conserva el registro del magnetómetro de Colaba (India) en el que se observa una perturbación de más de 1500 nT en aproximadamente una hora. Durante este periodo se registraron numerosas alteraciones en el telégrafo, la única tecnología de la época.

Con el avance de la tecnología la influencia de la actividad solar fue apareciendo en más sectores. Así, el 24 de marzo de 1940 el Sol alteró por primera vez las comunicaciones radio. Quizá el hecho de que esta alteración tuviera lugar un domingo, y por lo tanto no afectara a la actividad económica, fue la causa de que no se le diera la importancia que merecía. En mayo de 1967 una colosal emisión radio en el Sol causó interferencias entre los 0.01 y los 9.0 GHz produciendo de forma simultánea un corte en las comunicaciones radio en toda la zona iluminada del planeta Tierra. Esa fecha marca sin duda un cambio respecto a la forma de contemplar el Sol por parte del sector de las telecomunicaciones, que se extiende actualmente al posicionamiento tras el primer fallo global en el sistema GPS en diciembre de 2006.

En marzo de 1989 el sector eléctrico notaba por primera vez los efectos de la actividad solar. El fallo irreparable de un transformador de la compañía eléctrica

O LA CIENCIA DE LA INTERACCIÓN SOL-TIERRA

Hydro-Québec (Canada) dejó sin luz a miles de usuarios durante nueve horas. El fallo fue provocado por corrientes inducidas geomagnéticamente como resultado de las rápidas e intensas variaciones de campo magnético asociadas a la llegada de una eyección de masa coronal al entorno terrestre. Además del fallo eléctrico, más de mil satélites perdieron su órbita durante este suceso de meteorología espacial.

En octubre-noviembre de 2003, durante las conocidas como “tormentas de Halloween”, el fallo de varios transformadores en Sudáfrica puso en evidencia que los problemas de la actividad solar no sólo afectan a las regiones de altas latitudes. De hecho, ya en 1903 hay constancia de fallos en el telégrafo relacionados con la actividad solar afectando a España y Portugal (Ribeiro et al., 2016).

ENTRE LA CIENCIA BÁSICA Y LA APLICACIÓN

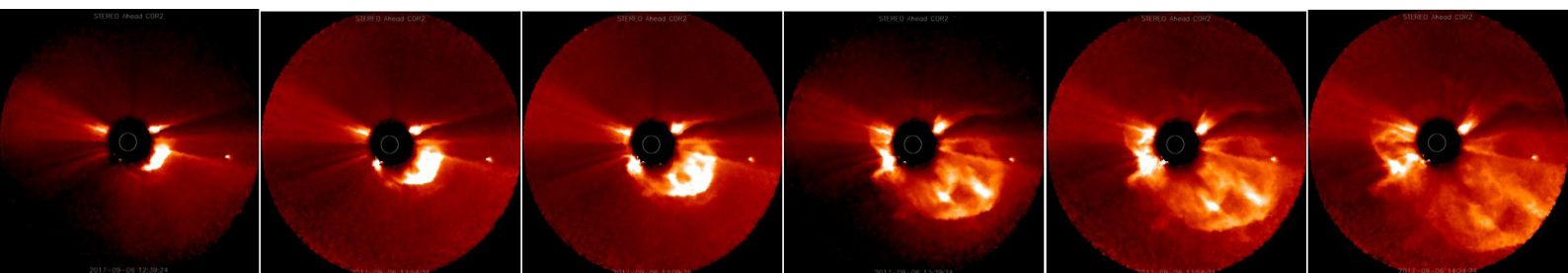
Los efectos sobre la tecnología mencionados anteriormente representan el final de una cadena que comienza en el Sol. Conocer los eslabones intermedios de la cadena durante sucesos previos no resulta sencillo, pero sí imprescindible para comprender los diferentes procesos involucrados en la interacción Sol-Tierra y, de esta forma, predecir con precisión y con la mayor antelación posible el tiempo espacial.

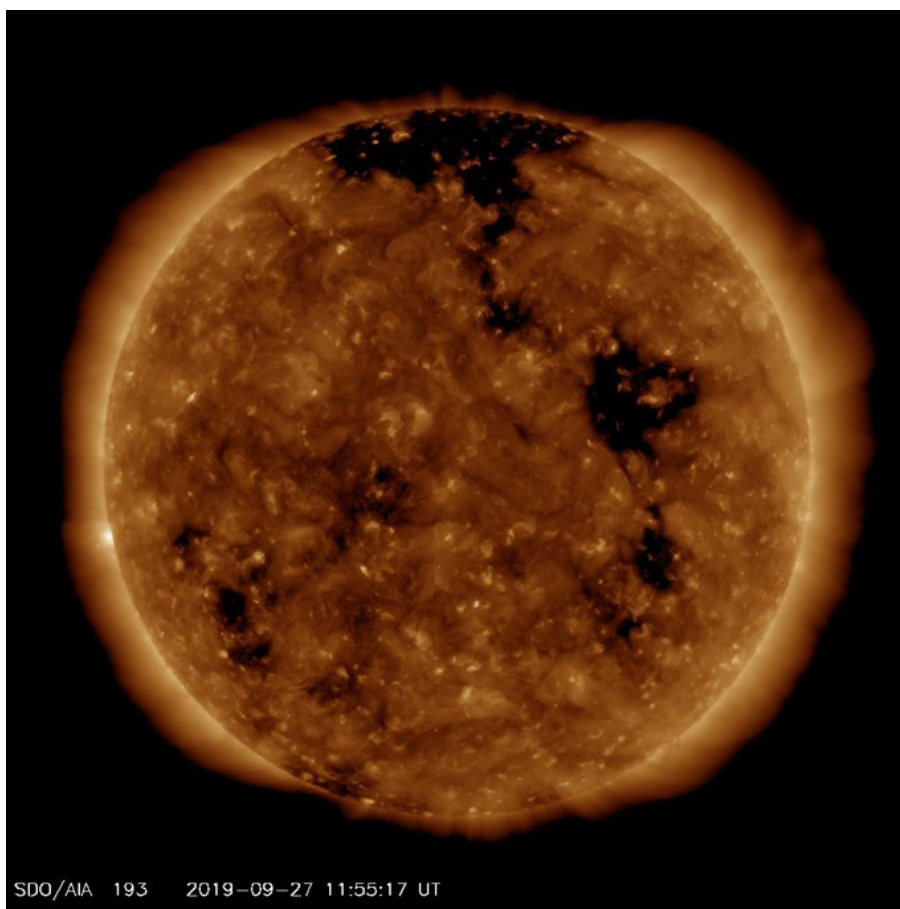
Así, la Meteorología Espacial puede plantearse como un procedimiento en el cual existe un único *input*, la actividad solar, con dos *outputs*, uno científico y otro tecnológico. Mientras el científico que estudia la interacción Sol-Tierra busca como *output* el estado del entorno terrestre, incluyendo la modificación de las

corrientes magnetosféricas, el estado de perturbación magnética (especialmente en el suelo) y diferentes parámetros que caracterizan las alteraciones de la ionosfera; el usuario final está interesado en indicadores que revelen cómo se va a ver afectada su tecnología concreta y la probabilidad de que esto suceda. La relación de estos indicadores (*outputs* tecnológicos) y las magnitudes físicas que caracterizan el entorno terrestre (*outputs* científicos) avanza lentamente y precisa de la colaboración entre científicos y usuarios finales en materia de meteorología espacial.

Respecto al único *input* del proceso, la actividad solar, encontramos tres posibles contribuciones: (1) el aumento repentino de la radiación electromagnética emitida por el Sol (o fulguración), (2) el incremento del flujo de partículas de energías relativistas (o suceso de partículas) y (3) la alteración del denominado viento solar normal, bien por una eyección de masa coronal (CME) o bien por una corriente rápida procedente de un agujero coronal. Durante los sucesos más importantes de meteorología espacial dos o tres de las contribuciones anteriores están asociadas, pero en ocasiones también suceden de forma independiente. Así, por ejemplo, una de las perturbaciones geomagnéticas mayores del ciclo solar 24, ocurrida en marzo de 2015, no estuvo relacionada con ninguna fulguración importante ni suceso de partículas, sino únicamente con una CME (Kamide and Kusano, 2015). Otro ejemplo puede encontrarse la región activa NOAA12192, que produjo una serie de fulguraciones tipo X (las de mayor intensidad) durante octubre de 2014, pero ninguna de ellas estuvo asociada a una CME.

Secuencia de imágenes del día 6 de septiembre de 2017 donde se observa una CME alejándose del Sol mientras éste se encuentra tapado por el disco de ocultación del coronógrafo COR2 a bordo de *Stereo A* (el radio de la circunferencia blanca corresponde a 1 radio solar).





El disco solar en 193 Å, observado por [AIA/SDO](#), muestra un extenso agujero coronal cercano al ecuador solar, además del agujero coronal polar claramente visible en el polo norte.

FULGURACIONES Y CMES

Cuando se produce una fulguración, el aumento de radiación solar alcanza el entorno terrestre en unos minutos, aumentando la ionización en las capas altas de la atmósfera terrestre, que modifican su altura y su absorción. La ionosfera terrestre se ve perturbada durante unos minutos (el tiempo que dura la fulguración), fundamentalmente en el lado de día, afectando a las diferentes capas en función del espectro de la radiación incidente. Así, la radiación ultravioleta y los rayos X blandos afectan a las capas más altas de la ionosfera, y por lo tanto a los sistemas de navegación por satélite (GNSS), mientras que las capas más profundas de la ionosfera sólo se ven afectadas por los rayos X duros, que alteran de esta forma la comunicación en radio.

Aunque hay diferentes modelos para predecir fulguraciones, actualmente la meteorología espacial sólo

proporciona con fiabilidad la monitorización de estos fenómenos. Para la clasificación de una fulguración se utiliza el valor del pico alcanzado por el flujo en rayos X medido en el canal 1-8 Å por los satélites GOES, considerándose relevantes aquellas fulguraciones con flujo superior a $5 \times 10^{-5} \text{ W m}^{-2}$ (o M5), pero es importante tener en cuenta que la emisión electromagnética en las distintas longitudes de onda no siempre está relacionada con la del canal 1-8 Å, por lo que se hace necesario encontrar un buen indicador que proporcione información sobre cuándo una fulguración alterará las comunicaciones o los sistemas de posicionamiento.

Las CMES son sin duda el fenómeno más peligroso del tiempo espacial desde el punto de vista de la tecnología. La perturbación del entorno terrestre debido a la llegada de una CME puede durar varios

días. No obstante, desde la observación solar del fenómeno en un coronógrafo se dispone de entre uno y tres días para determinar si la CME alcanzará el entorno terrestre y, si lo hace, cuáles serán las consecuencias. Los sucesos más peligrosos están relacionados con intensos campos magnéticos interplanetarios (>20 nT) en dirección antiparalela al dipolo terrestre y gran velocidad (> 1000 km s⁻¹) y densidad (>20 partículas cm⁻³) del viento solar. Obtener información sobre la velocidad de la CME y su campo magnético es, por lo tanto, lo más relevante de cara a la predicción.

Las imágenes obtenidas con los coronógrafos, unidas al análisis de la emisión radio emitida por el Sol, permiten realizar una primera estimación de la velocidad, pero la intensidad y dirección del campo magnético son aún parámetros difíciles de determinar a partir de la observación solar; más aún, considerando que los campos magnéticos intensos surgen en el medio interplanetario como resultado de la interacción de varias CMEs, o incluso entre una CME y la corriente procedente de un agujero coronal. En este escenario, las predicciones certeras requieren de modelos aún en desarrollo, o la combinación entre resultados de diferentes modelos y la experiencia del científico experto en la evolución de sucesos a lo largo de la cadena Sol-Tierra. En este tipo de sucesos la información sobre el medio interplanetario se convierte en un *input* adicional necesario, tanto para el análisis científico, como para aumentar la fiabilidad de las predicciones.

A la llegada al entorno terrestre del material procedente de una CME, el primer efecto es una compresión de la magnetosfera, cuya intensidad depende de la velocidad del viento solar. A continuación, las distintas corrientes magnetosféricas se ven modificadas en función de la intensidad y dirección del campo magnético y de otros parámetros del viento solar tales como su velocidad y densidad. Como consecuencia el campo magnético del entorno terrestre varía, registrándose variaciones de hasta varios cientos de nT en pocas horas (o incluso en pocos minutos) a nivel del suelo. Estas variaciones de campo magnético inducen a su vez corrientes en la ionosfera, que perturban las comunicaciones durante varios días, y en la corteza terrestre, con consecuencias en aquellas instalaciones en las que

se disponga de materiales conductores de gran longitud tales como las redes eléctricas y gasoductos. En estas instalaciones, las tomas a tierra se convierten en fuentes de alimentación de corriente continua inducida geomagnéticamente, que altera su normal funcionamiento.

EL USUARIO FINAL COMO OBJETIVO

La comunidad científica es cada vez más consciente de la importancia de considerar las perturbaciones geomagnéticas a nivel local, dado que los índices planetarios o específicos para latitudes concretas (muy utilizados en estudios de investigación científica) pierden información clave para los usuarios finales. Así, España es el primer país en disponer de un índice local para determinar, no sólo la perturbación magnética, sino también la probabilidad de que se establezcan corrientes inducidas, facilitando a los usuarios que pueden verse afectados por tiempo espacial adverso información clave para la gestión del riesgo (Cid et al., 2020).

En este escenario, el **Servicio Nacional de Meteorología Espacial (SeNMEs)** puede considerarse como un servicio con dos finalidades. Por una parte, informando del tiempo espacial a los usuarios con los productos desarrollados por diferentes instituciones españolas, y por otra como una herramienta de divulgación científica sobre la actividad solar y su influencia en nuestra vida diaria, así como sobre la relativamente nueva disciplina científica denominada Meteorología Espacial.

REFERENCIAS

- Cid, C., Guerrero, A., Saiz, E., Halford, A. J., & Kellerman, A. C. (2020). Developing the LDi and LCi geomagnetic indices, an example of application of the AULs framework. *Space Weather*, 18, e2019SW002171. doi: [10.1029/2019SW002171](https://doi.org/10.1029/2019SW002171).
- Kamide, Y., and Kusano, K. (2015), No Major Solar Flares but the Largest Geomagnetic Storm in the Present Solar Cycle, *Space Weather*, 13, 365– 367. doi:[10.1002/2015SW001213](https://doi.org/10.1002/2015SW001213).
- Ribeiro, P., Vaquero, J. M., Gallego, M. C., and Trigo, R. M. (2016), The First Documented Space Weather Event That Perturbed the Communication Networks in Iberia, *Space Weather*, 14, 464– 468, doi:[10.1002/2016SW001424](https://doi.org/10.1002/2016SW001424).