

Mínimo de Maunder y posibles implicaciones climáticas

PILARES

El registro de manchas solares desde 1610 muestra ciclos de actividad magnética con una distribución irregular de amplitudes y con un período de alrededor de once años; estos ciclos se vieron interrumpidos durante el llamado Mínimo de Maunder, entre aproximadamente 1645 y 1715. El farmacéutico, botánico y astrónomo aficionado alemán Heinrich Schwabe (1789-1875) descubrió los ciclos de actividad mientras buscaba un hipotético nuevo planeta más cercano al Sol que

Mercurio (planeta que finalmente resultó no existir).

La actividad magnética está asociada con la emergencia de flujo magnético en la fotosfera, que da lugar a manchas solares, protuberancias, llamaradas y eyecciones de materia coronal. También las auroras son una manifestación del campo magnético solar, pues son producidas en la alta atmósfera de la Tierra por el impacto de partículas procedentes del Sol, que son aceleradas a altas velocidades en la corona mediante procesos asociados a los campos magnéticos. La actividad solar es también responsable de pequeños cambios en la irradiancia solar (la potencia recibida del Sol en forma de radiación electromagnética por unidad de área perpendicular a los rayos solares), que se cree que podrían alterar el balance energético de la atmósfera terrestre.

Los ciclos se numeran a partir del que comenzó en 1755. Actualmente estamos en el ciclo solar número 25, que comenzó en diciembre de 2019 y se espera que continúe hasta 2030. Cada ciclo suele tener entre 140 y 220 manchas (en promedio 179 manchas), pero el ciclo anterior solo tuvo 115. En los setenta años del intervalo de tiempo conocido como el Mínimo de Maunder



(1645–1715) el número de manchas se redujo notablemente (quizás no más de 50). Si queremos comprender cómo se comportaba magnéticamente el Sol antes de las primeras observaciones sistemáticas a partir de 1610 (a raíz de la invención del telescopio), tenemos que hacer uso de datos indirectos de la actividad solar, como los radioisótopos cosmogénicos carbono 14 y berilio 10, tal como analizamos en esta misma sección en el número 51 de esta revista. El análisis de una serie temporal de la actividad magnética solar que se ha reconstruido a partir de las concentraciones de los isótopos cosmogénicos carbono 14 y berilio 10 en testigos de hielo polares -serie que se remonta a más de diez mil años atrás- permite extraer tres conclusiones fundamentales: el ciclo solar ha existido durante todo este tiempo, su período siempre ha sido de alrededor de once años, y una interrupción en el número de manchas (o Gran Mínimo, tal como el Mínimo de Maunder) no es una característica aislada, sino recurrente, de la actividad magnética solar.

Cómo los rayos cósmicos producen estos isótopos cosmogénicos en la atmósfera

terrestre es un tema interesante, que fue tratado en una contribución anterior (IAA 54, 2018). La llamada Pequeña Edad de Hielo, que se extendió aproximadamente entre 1300 y 1850, puso fin al óptimo climático medieval (del siglo X al XIV). Dentro de ella hubo tres periodos especialmente fríos, el primero de los cuales comenzó en 1650 y casi coincidió temporalmente con el Mínimo de Maunder. Durante este periodo la Tierra se enfrió (aunque quizás no globalmente, sino sobre todo el hemisferio norte), los glaciares de los Alpes avanzaron y el río Támesis se congelaba regularmente en invierno.

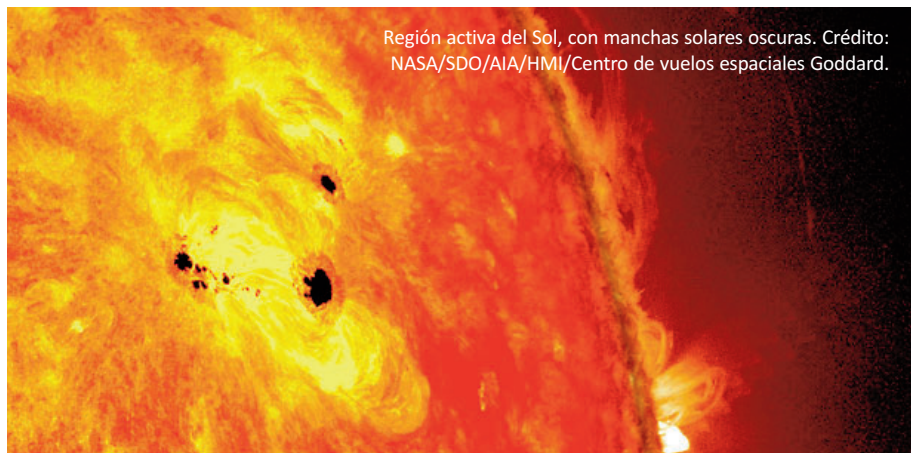
Muchos científicos creen que hay una relación de causa y efecto entre ambos fenómenos. En tal caso se plantea la pregunta de cómo una disminución de la actividad magnética solar puede influir en el clima enfriándolo. ¿Se produjo ese enfriamiento porque el Sol emitía menos energía durante el Mínimo? Hay varios posibles mecanismos, no mutuamente excluyentes, que vamos a analizar brevemente a continuación.

[1] Una posibilidad es que no haya habido ninguna relación causal entre el

enfriamiento de la atmósfera (Pequeña Edad de Hielo) y el Mínimo de Maunder. Es decir, que el enfriamiento se produjera como consecuencia de alguna otra causa y ambos fenómenos coincidieron casualmente en el tiempo. Por ejemplo, una actividad volcánica excepcionalmente elevada, que inundó la atmósfera de ceniza volcánica, la cual bloqueaba parte de la energía solar entrante, o quizás un debilitamiento de la Corriente del Golfo (hipótesis consistente con el hecho de que la Pequeña Edad de Hielo afectó sobre todo al hemisferio norte).

[2] Una segunda posible explicación es que la energía total emitida por el Sol por unidad de tiempo (su "luminosidad") disminuye un poco cuando no hay manchas. Aunque esto podría parecer una contradicción, pues las manchas bloquean la salida de parte de la luz solar allí donde se encuentran, este déficit causado por [i] el bloqueo parcial de la luz por las manchas podría ser compensado con creces por [ii] la emisión extra de las fáculas (fotosféricas) y de las *plages* y la red cromosférica. Los procesos físicos [i] y [ii] son distintos e independientes, y casi se cancelan entre sí, pero con una contribución superior de las fáculas, *plages* y red cromosférica a lo largo de un ciclo solar, de manera que una actividad magnética elevada (más manchas) significaría más emisión neta de energía por el Sol.

[3] Otra posibilidad sería que, como consecuencia de la desaparición de las manchas, hubiera una redistribución espectral de la energía solar: El Sol seguiría emitiendo la misma cantidad de energía durante un Gran Mínimo (como el de Maunder), pero con una distribución



Región activa del Sol, con manchas solares oscuras. Crédito: NASA/SDO/AIA/HMI/Centro de vuelos espaciales Goddard.

espectral diferente. Las manchas solares son oscuras porque son más frías que la fotosfera circundante, pues estas -que son concentraciones de campo magnético intenso- inhiben parcialmente el transporte de energía por convección desde capas más profundas hasta la superficie visible del Sol. Ahora bien, la actividad magnética en la cromosfera y la corona solares está directamente ligada al campo magnético de las manchas y, a mayor campo magnético, más energía se emite en longitudes de onda más cortas que el visible (rayos X y, sobre todo, radiación ultravioleta). El Sol claramente emite más energía en la parte UV del espectro cuando hay más manchas solares. La totalidad de esta radiación de longitud de onda más corta que el visible es absorbida por la atmósfera terrestre, mientras que la luz visible tiene que pagar un peaje para llegar a la superficie: aproximadamente el 30% de la radiación visible incidente es reflejada de vuelta al espacio mediante el albedo planetario.

Por lo tanto, una redistribución espectral de la energía solar implicaría que, de

facto, hay más energía para calentar la atmósfera, aún sin variar la cantidad total de energía emitida por el Sol por segundo. [4] Una última explicación (y no exenta de polémica) se basaría en el efecto de los rayos cósmicos sobre el albedo planetario a través del incremento de la nubosidad. Con un campo magnético más débil en la heliosfera y la magnetosfera, los rayos cósmicos pueden penetrar más fácilmente. La heliosfera y la magnetosfera actúan como escudos de fuerza que protegen a la Tierra de la entrada de los superenergéticos rayos cósmicos, algunos de los cuales -que son básicamente protones y núcleos de helio acelerados a velocidades próximas a la de la luz- pueden llegar a tener una energía cinética comparable a la de una pelota de tenis a 150 kilómetros por hora. Al penetrar más rayos cósmicos en la atmósfera se produce mayor ionización (además de más carbono 14), lo que favorece la formación de nubes, cuya contribución neta al albedo es incrementarlo (y, en consecuencia, enfriar la atmósfera).

INCERTIDUMBRES

Hay dos grandes incertidumbres en relación con los Grandes Mínimos. Para empezar, no sabemos a ciencia cierta por qué ocurren; no existe aún una teoría satisfactoria que los explique. Desconocemos también si la ausencia prolongada de manchas solares podría estar relacionada con cambios climáticos en el pasado. Está bien establecido que el número de manchas solares se redujo notablemente entre 1645 y 1715, época

en la que casi dejó de haber auroras boreales. Sin embargo, sigue abierto el debate sobre si hubo una relación causa-efecto entre la casi ausencia de manchas y el enfriamiento de la atmósfera terrestre. He presentado cuatro posibles explicaciones, la primera de las cuales es simplemente una coincidencia temporal de dos episodios independientes (Mínimo de Maunder y Pequeña Edad de Hielo) y las otras tres -que no son mutuamente exclu-

yentes- están relacionadas con la energía emitida por el Sol o con el efecto de apantallamiento de los rayos cósmicos por la heliosfera y la magnetosfera terrestre. Posiblemente habrá que esperar a que ocurra el próximo Gran Mínimo para poder conocer la respuesta. Estos Grandes Mínimos son un fenómeno recurrente en la historia magnética del Sol (ha habido veintiséis Grandes Mínimos en los últimos nueve mil trescientos años), aunque no se conoce ninguna periodicidad en su aparición. Algunos científicos piensan que el próximo podría comenzar dentro de unas pocas décadas.