

Las crecientes amenazas del clima espacial sobre el sistema terrestre

P. Alexander

El espacio exterior tiene una influencia sobre nuestras vidas considerablemente superior a lo que se suponía hasta hace algunos lustros. El responsable esencial de esto es el Sol, no sólo a través del envío de la necesaria energía sino también por medio de emisiones que infligen perturbaciones y peligros. No obstante, la idea de que algo proveniente del cosmos puede ocasionar la súbita detención o el funcionamiento riesgoso de un sistema técnico está fuera del pensamiento diario. Resulta más obvio suponer que un incendio en una estación transformadora de electricidad o un accidente ferroviario fueron ocasionados por un fatal desperfecto, que imaginar la presencia de una invisible e inaudible tormenta espacial. La realidad es que el espacio alrededor de la Tierra incuba fantasmas que pueden llegar a afectar seriamente la tecnología, más allá de que actualmente existe una gran confianza y creciente dependencia respecto a ella. Algunos problemas ya se manifestaban hace más de un siglo, pero no se reconocían sus causas o ni siquiera se era consciente de ellos, mientras que otros inconvenientes son novedosos por aparecer en artefactos de desarrollo reciente. Existen además evidencias de importantes consecuencias del entorno espacial sobre la salud humana y el clima terrestre. ¿Qué riesgos nos pueden estar acechando en el período de agitación solar en el que estamos inmersos actualmente?

(El 17 de Marzo del año 20 D.C.) el centro del Sol estaba negro. Esto desagradó a (Wang) Mang (en Chang-An, China), quien emitió el siguiente edicto: "Recientemente se ha visto una sombra en el Sol. Yin está forzando a Yan. Un vapor negro (en el Sol) es una anomalía." La gente se alarmó por el presagio.

Han-shu, Biografía de Wang Mang

Dinastía Xin, Reinado Dihuang, Emperador Wang Mang

¿ Qué es el clima espacial ?

El estado en el que se encuentran el Sol, la heliosfera¹ y la parte superior de nuestra atmósfera con su entorno, con especial énfasis en las condiciones que puedan afectar a nuestro planeta, determinan el clima espacial². Nuestra estrella es el protagonista principal. Este tema puede afectar el funcionamiento de sistemas técnicos en el espacio exterior y en la Tierra, producir riesgos sobre la salud humana y alterar el clima terrestre. El clima espacial es por lo tanto mucho más que las impresionantes e inofensivas auroras.

A pesar de que al Sol lo vemos siempre igual, su realidad dista de ser plácida, constante y uniforme pues tiene un comportamiento variable a lo largo del tiempo. Nuestro mundo es sensible a la cambiante actividad del principal protagonista del clima espacial. Llegaremos probablemente alrededor de fines del año 2000 a la cumbre de un nuevo máximo de la actividad solar. Si vamos a intentar entender las relaciones entre la actividad de nuestro astro y sus efectos en el sistema terrestre, debemos tratar también de tener una clara comprensión de los procesos climáticos en el espacio. Un producto final de sumo interés de este proceso de investigación será la posibilidad de poder emitir alertas tempranas sobre los correspondientes peligros. Diversos proyectos científicos que intentan estudiar fenómenos climáticos espaciales se están desarrollando actualmente. El nivel de comprensión presente no permite aún contestar muchos de los interrogantes, pero está claro que cada vez resulta más esencial, casi imprescindible, conocer mejor el comportamiento del Sol, su entorno y el medio espacial cercano a nuestro planeta para pronosticar ciertos fenómenos y prevenir o al menos reducir a un mínimo posible algunas consecuencias indeseadas.

La comprensión del clima espacial requiere el conocimiento de ciertos conceptos. Estos están expuestos someramente en el primer capítulo. La sección siguiente describe los efectos y potenciales peligros del clima espacial sobre nuestro mundo tecnológico, la salud humana y el clima terrestre (estos tres no son independientes entre si). El tercer capítulo se refiere al camino que aun deben recorrer los investigadores para que se pueda llegar a predecir certeramente la ocurrencia de fenómenos espaciales y sus probables efectos en el sistema terrestre. La última sección resume la importancia que va adquiriendo el mayor conocimiento de este asunto para nuestra sociedad, en particular las potenciales medidas de prevención que pueden ser tomadas.

¹ Todo el espacio hasta donde llega la influencia del Sol

² En castellano se suele emplear la denominación *clima espacial* para la expresión del inglés *space weather*, ya que la traducción *tiempo espacial* se prestaría a confusión.

Los factores determinantes del clima espacial

El clima espacial depende fundamentalmente del Sol, que es una fuente de radiación³ de ondas electromagnéticas⁴ y de partículas atómicas. Estas últimas viajan como viento solar (un permanente flujo de materia, esencialmente partículas cargadas, expulsado desde el Sol) y como rayos cósmicos (núcleos atómicos o electrones que surcan el espacio a velocidades cercanas a la de la luz). Estas partículas de alta energía también pueden provenir de otras zonas de nuestra galaxia o de más allá inclusive. Además tienen cierto rol la capa más externa de nuestra atmósfera y la zona adyacente, respectivamente la ionosfera y la magnetosfera. Esto está sintetizado en la Figura 1.

El Sol

La radiación electromagnética viaja a la velocidad de la luz (300.000 km/seg) y por lo tanto atraviesa los 150.000.000 km del Sol a la Tierra en sólo 8 minutos. Los rayos cósmicos solares pueden alcanzar velocidades de hasta 100.000 km/seg y por ello arriban a la Tierra en algunas decenas de minutos o unas pocas horas. Las partículas del viento solar en cambio viajan a unos 400 km/seg y demoran por lo tanto unos 4 días en llegar a nuestro planeta, lo cual es útil para la predicción del clima espacial porque a diferencia de los casos anteriores otorga suficiente tiempo para tomar precauciones ante arribos peligrosos. El contenido energético del viento solar y de los rayos cósmicos es muy inferior al de la radiación electromagnética, pero no es de descartar que puedan estar afectando al sistema terrestre a través de procesos altamente no lineales. Dentro del viento solar, las eyecciones de masa coronal (Figura 2) constituyen un fenómeno de singular importancia para la meteorología espacial, puesto que consisten en la expulsión de gran cantidad de materia hacia afuera del Sol y su velocidad puede alcanzar los 2000 km/seg. Estos eventos contienen partículas atómicas cargadas de altas velocidades, que pueden producir grandes corrientes eléctricas y diferencias de voltaje. Esto constituye un serio peligro para los satélites, particularmente los que se encuentran en el espacio exterior. Hay épocas de gran actividad solar en las que puede haber un promedio 3 de estos eventos cada 24 horas, aunque sólo llega 1 cada 5 días a la Tierra (el resto se pierde en otras partes del espacio).

El Sol presenta pequeñas manchas oscuras que a veces pueden verse a simple vista. Las mismas fueron ya no sólo observadas sino también registradas en China al menos desde el siglo II A.C.. La cosmología aristoteliana dominante en Occidente, por la cual el cielo debía ser

³ El término radiación se refiere a una variedad de fenómenos físicos cuya principal característica es el transporte de energía, ya sea a través de partículas o de ondas.

⁴ Las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz sin la necesidad de un medio material que las sostenga y en orden creciente de frecuencias reciben el nombre de radio, infrarrojo, visible, ultravioleta, X y γ .

perfecto e inalterable, permite explicar la pobre cantidad de estas observaciones que existen allí antes del siglo XVII. Galileo ayudó a demoler los argumentos de un Sol perfecto y también su invención del telescopio permitió un mejor seguimiento de las manchas. Además quedó casi ciego, ya que sólo cuando el Sol se encuentra cerca del horizonte o tras un manto de nubes o neblina o proyectando la imagen sobre una superficie se pueden evitar severos efectos sobre la vista. En la Figura 3 se ha representado el índice de manchas solares (depende de la cantidad y el tamaño de las mismas) a lo largo del tiempo, proviniendo los datos previos a 1700 de una gran diversidad de observadores (el dibujo de la Figura 4 es uno de varios realizados por Galileo) y los posteriores son del Sunspot Index Data Center. Puede verse que el índice de manchas no varía en forma arbitraria. El comportamiento se repite aproximadamente cada 11 años, asignándosele a los picos y valles el nombre de máximo y mínimo (de actividad) solar. Se aguarda el tope del presente ciclo para fines del año 2000, que aparentemente será inferior a los dos anteriores. Actualmente se sabe que la variación de las manchas es el indicador más obvio del estado de humor de nuestro astro, ya que la cantidad de erupciones, la intensidad de la radiación de nuestra estrella, el comportamiento del viento solar y otros aspectos también dependen de este ciclo.

Los rayos cósmicos galácticos

Estos elementos tienen una importancia secundaria en la determinación del clima espacial. Su origen está en nuestra galaxia (aunque probablemente también vienen de más allá). Curiosamente su auge sucede durante un mínimo de actividad solar, ya que por las condiciones ambientales más calmas pueden ingresar más fácilmente a la heliosfera. No obstante la cantidad menor de rayos cósmicos galácticos frente a los de origen solar, aquéllos tienen cierta relevancia debido a su elevada velocidad, ergo energía (los de origen solar pueden adquirir similar importancia unas pocas veces cada 11 años). Son peligrosos por el alto nivel de penetración que pueden tener en diversos materiales y constituyen por lo tanto un serio riesgo para las vidas de cualquier misión espacial tripulada. Además, al ingresar los rayos cósmicos galácticos a nuestra atmósfera colisionan con los constituyentes de la misma y generan una cascada de nuevas partículas que pueden llegar a la superficie terrestre. Pasajeros de aviones, computadoras y trenes pueden quedar expuestos a los efectos de estos rayos cósmicos secundarios.

La ionosfera y la magnetosfera

Entre los 60 y los 1000 km por encima de la superficie terrestre se encuentra la capa superior de nuestra atmósfera, la ionosfera, que contiene una gran cantidad de cargas positivas y negativas. Esta zona tiene una gran relevancia para los sistemas de comunicación por radio, ya que dependiendo de las frecuencias de las ondas las mismas pueden ser reflejadas, refractadas o transmitidas en forma inalterada allí. En condiciones de clima espacial tormentoso hay características de la ionosfera que se ven modificadas y ello puede ocasionar la alteración de la propagación de las ondas de radio. Más arriba de esta capa se encuentra la magnetosfera, una zona netamente dominada por el campo geomagnético⁵, que puede llegar a extenderse hasta 50.000 y 5.000.000 de km respectivamente del lado diurno y nocturno de la Tierra (Figura 5). Esta capa funciona como un escudo protector contra partículas cargadas para lo que se encuentre debajo de su manto. En general, el nivel de toda la radiación crece significativamente durante cualquier tipo de erupción solar pero afortunadamente los elementos de peligro no pueden traspasar incólumes diversas barreras terrestres (por ejemplo los rayos ultravioletas son atenuados en la famosa capa de ozono). Se sospecha que las más grandes eyecciones de masa coronal desatan las tormentas magnéticas (término acuñado por Alexander von Humboldt en 1805 al notar cómo se agitaba la aguja de su brújula), que consisten en una importante perturbación al campo geomagnético. Estos fenómenos terrestres se producen aproximadamente 1 vez por mes en las épocas más agitadas del Sol. La colisión del envío solar con la magnetosfera puede obligar a ésta a replegarse en el lado diurno, dejando a algunos satélites momentáneamente expuestos al peligro de las partículas cargadas de alta energía. Cuando la velocidad del viento solar es suficientemente elevada, las partículas cargadas logran cierta penetración en el campo magnetosférico y siguen las líneas del mismo. Como la configuración es más abierta en los polos (ver Figura 5), “el precio de admisión” es más bajo a altas latitudes y por eso las auroras sólo aparecen en esas regiones. Esas partículas solares también producen corrientes de variable intensidad en la ionosfera y magnetosfera. A la vez, estas corrientes crean un campo magnético variable, que en particular induce corrientes y diferencias de voltaje⁶ entre diferentes puntos (ley de inducción de Faraday) en la Tierra. En general las corrientes eléctricas geomagnéticamente inducidas pueden ser elevadas y producir daños en cualquier estructura eléctricamente conductora (habitualmente metal) que esté conectando dos puntos diseñados para hallarse conectados al mismo voltaje de referencia (tierra), pero que se ven sometidos en realidad a una significativa diferencia por el fenómeno de inducción. También aparecen

⁵ Todo el entorno de nuestro planeta está permeado por un campo magnético, como si hubiera una gran barra imantada en su eje de rotación.

⁶ Una diferencia de voltaje (también denominada tensión) implica la existencia de una corriente eléctrica, que puede ser muy elevada cuando se establece en materiales muy conductores como los metales.

problemas en la prospección geomagnética de recursos naturales, ya que se pueden malinterpretar las señales de una búsqueda de depósitos subterráneos. Las zonas que se encuentran a muy altas latitudes como Canadá y Escandinavia se ven favorecidas por la contemplación de las auroras pero están condenadas a padecer todos esos incidentes.

Los perjuicios sobre el sistema terrestre

Peligros para la tecnología

El hombre no supo reconocer ni imaginó durante mucho tiempo las causas espaciales detrás de muy diversas alteraciones del sistema terrestre. Esto se debe en gran parte a que los efectos pueden involucrar a componentes aislados dentro de un sistema, por lo que no siempre son claramente visibles (por ejemplo en el aislamiento eléctrico de cables internos) o a que ocasionan un daño a largo plazo (como ser efectos en la salud). Eso hizo que muchas veces quedara enmascarada la razón primaria y que las sospechas fueran dirigidas hacia otras causas aparentemente más obvias. Probablemente fue el astrónomo William Herschel en un artículo de 1801 sobre el efecto de la variación de las manchas solares en el régimen de lluvias el primero en relacionar las variaciones en nuestra estrella con consecuencias concretas sobre el sistema terrestre. Esta suposición de una conexión del Sol con el clima terrestre precedió a la revelación de la existencia del ciclo solar de 11 años en una publicación del farmacéutico (y astrónomo amateur) Heinrich Schwabe en 1844. William Ellis del Royal Greenwich Observatory efectuó quizás el primer pronóstico de los efectos de las tormentas espaciales en 1879, al vincular las manchas con las perturbaciones geomagnéticas y anticipando entonces que en el próximo máximo solar la telegrafía se encontraría al igual que en casos anteriores en problemas, lo cual fue corroborado en 1881. El telégrafo es uno de los más antiguos sistemas extensos hechos por el hombre, que además involucró materiales eléctricamente conductores y por ello fue quizás el primer elemento tecnológico afectado por el clima espacial.

Electrónica. Los componentes electrónicos se han vuelto una parte esencial y omnipresente de nuestra vida diaria. Los mismos se han ido miniaturizando progresivamente por décadas y operan cada vez con voltajes y corrientes eléctricas menores. Una consecuencia es que el “ruido electrónico” de cierta intensidad puede llegar a causar errores en las corridas de programas por medio de alteraciones espontáneas y sin causa aparente de bits almacenados (de 0 a 1 o viceversa). Entonces llega a suceder que un mismo programa corrido dos veces con los mismos parámetros de entrada genera dos resultados finales distintos. En general estos efectos no alteran el funcionamiento de una computadora a nivel de chip, ya que el sistema puede hacer una verificación y darse de baja antes de que un bit incorrecto sea utilizado. Estos errores

pueden ser ocasionados en la Tierra por las cascadas generadas por rayos cósmicos galácticos, ya que las partículas que contienen las mismas pueden partir los átomos de los semiconductores de los que constan los componentes integrados y eso puede producir un desparramo de electrones que afecta al sistema electrónico. Investigaciones de IBM en chips de memoria RAM estática han concluido que estos inconvenientes ocurren 13 veces más seguido a 3100 m que al nivel del mar, algo totalmente consistente con el hecho de que el chubasco de rayos cósmicos se va atenuando a medida que va descendiendo en la parte más baja de la atmósfera. La frecuencia de errores también debe incrementarse con la latitud puesto que el blindaje magnético terrestre respecto a las partículas cargadas presenta su máxima y mínima defensa respectivamente en el ecuador y los polos. Los microchips de la electrónica de a bordo de los aviones modernos también operan con pequeñas corrientes y voltajes y están por lo tanto sometidos a los mismos efectos. Se han observado incrementos de la ocurrencia de errores en algunos componentes que pueden llegar a multiplicarse por 15 a una altura de vuelo de 9 km respecto al nivel del mar. Los rayos cósmicos han tenido también un impacto negativo en equipo ferroviario. Cuando el tren alemán de alta velocidad InterCity Express entró en servicio a comienzos de la década del '90, inmediatamente se percibieron pérdidas de potencia del sistema de locomoción. En relación a esto se descubrieron componentes electrónicos destruidos por cortocircuitos. Esto ocurría en forma irregular, aunque nunca cuando el tren circulaba por túneles (resultaban una buena protección para los semiconductores contra la lluvia de radiación cósmica).

Satélites. Para una gran diversidad de funciones, los satélites permanecen habitualmente largos períodos en el espacio, por lo que no es improbable que se crucen en su trayectoria partículas cargadas de alta energía, que pueden llegar a atravesar sin problemas capas de hasta 4 cm de aluminio. Se puede producir la acumulación o liberación repentina de cargas en componentes o efectos en la electrónica ya descritos en el párrafo anterior, que ocasionan el daño y la destrucción de elementos o comandos fantasma. Las tormentas geomagnéticas pueden conducir a una pérdida de orientación. Los satélites de órbitas bajas también pueden empezar a perder altura, reingresar a la atmósfera e incendiarse o impactar la superficie de nuestro planeta. Esto se debe a que durante las tormentas espaciales la atmósfera se expande debido al aumento de energía ingresada, lo cual empieza a producir fricción sobre la nave. Los satélites que circundan la Tierra por mucho tiempo deben poseer mecanismos de eyección a órbitas más elevadas para compensar estas pérdidas. La radiación ultravioleta se hace sentir en especial en el largo plazo, ya que lleva a un envejecimiento prematuro de sistemas electrónicos, celdas solares y material estructural.

Redes eléctricas. Una tormenta magnética puede producir diferencias de voltaje entre transformadores de alta tensión conectados al mismo voltaje de referencia (tierra). Entonces una

corriente eléctrica inducida fluye entre los mismos a lo largo de las líneas conectando a ambos. Los transformadores pueden llegar eventualmente a saturarse y entonces aparecen alteraciones a las frecuencias de 50 o 60 Hz, ocasionando un mal funcionamiento de reguladores en elementos de protección de los consumidores. Además, se reduce la capacidad de transmisión del sistema, cae la tensión de las líneas, se pueden producir fallas y eventualmente un apagón total. En el peor caso puede suceder también un recalentamiento e incendio de los transformadores de alta tensión por una corriente muy elevada respecto al rango de operación diseñado para los mismos.

Corrosión. Los oleoductos y gasoductos tienen una tendencia a corroerse, sobre todo en puntos de la superficie donde una corriente eléctrica (por ejemplo geomagnéticamente inducida) puede fluir desde el metal hacia el terreno circundante. Tienen una capa aislante para evitar este proceso, pero suele añadirse una medida de protección adicional que requiere del mantenimiento permanente de la tensión de los mismos a un valor de -1 volt respecto al terreno. No obstante, las tormentas magnéticas pueden llegar a inducir voltajes en estos tubos que hagan que se sobrepase significativamente esta pequeña diferencia y la protección contra corrosión se torna inefectiva, puesto que estos caños son excelentes conductores eléctricos que se extienden por cientos o miles de kilómetros. No queda claro aún hasta donde se debe responsabilizar a las tormentas magnéticas de estos efectos, pero si resulta obvio que a altas latitudes los oleoductos y gasoductos están más expuestos a los mismos. Esto llevó a la realización de numerosos estudios de efectos geomagnéticos en la década del '70 en relación a la construcción del oleoducto de Trans-Alaska (Figura 6). Inclusive la corrosión que experimentan los grandes puentes metálicos y las torres de alta tensión puede ser atribuida en parte a este fenómeno.

Telecomunicaciones. En el caso de los cables modernos de fibra óptica pueden aparecer problemas puesto que contienen elementos metálicos, ya sea para proveer corriente a los amplificadores, como para refuerzo o cobertura. La longitud de cables de comunicaciones que atraviesan aguas profundas hace que pueden llegar a inducirse fluctuaciones de incluso algunos miles de volts en líneas transoceánicas y transmarítimas durante tormentas magnéticas. Los problemas no sólo aparecen en sistemas de telecomunicaciones que usan cables sino también en aquéllos que usan ondas de radio que pasan o se reflejan en la ionosfera, puesto que la misma se ve muy perturbada durante algunos eventos. Esto incluye a los sistemas de posicionamiento global (para determinar la precisa ubicación de algo en la Tierra) y a los sistemas de navegación.

Señales ferroviarias. Las corrientes eléctricas inducidas en forma geomagnética pueden estorbar el tráfico ferroviario al perturbar el sistema de señalización. Durante Julio de 1982 se detectaron en Suecia fluctuaciones de voltaje inducidas desde el espacio que llevaron a fallas. Este tema no ha sido muy estudiado aun.

Se presenta a continuación una cronología de algunos problemas tecnológicos destacados en asociación al clima espacial. Puede verse que la mayoría de estos hechos ocurrieron en épocas próximas a un máximo solar (ver Figura 3):

- Cuando la telegrafía estaba en sus albores, todo el cablerío de Gran Bretaña se tornó inestable durante dos tormentas geomagnéticas en 1847 y 1859. Gracias a la “energía gratis” algunos telegrafistas no necesitaron baterías para enviar mensajes pero otros estuvieron cerca de la electrocución o tenían líneas inoperables.
- El 24 de Marzo de 1940 en el noreste de los EEUU y el este de Canadá una gran tormenta geomagnética ocasionó notables fluctuaciones en el voltaje de línea y dejó ocasionalmente fuera de servicio el suministro de electricidad.
- El 9 y 10 de Febrero de 1958 el cable de comunicación transatlántica en el hemisferio norte padeció las consecuencias de una tormenta geomagnética severa, a raíz de lo cual las señales fueron distorsionadas hacia una elevada vociferación o un suave susurro, dependiendo de la dirección del voltaje inducido respecto al voltaje de operación.
- En 1979 tras 6 años de uso el Skylab se despedazó sobre el Océano Indico y Australia por no haberse previsto adecuadamente los incrementos de la fricción atmosférica durante los lapsos de alta actividad solar.
- El 13 de Marzo de 1989 una tormenta geomagnética llevó los transformadores del sistema de suministro eléctrico de Hydro Québec a la saturación, ocasionando frecuencias espúreas (diferentes a los 60 Hz) y fluctuaciones de voltaje. En sólo 90 segundos el sistema colapsó y se produjo en el este de Canadá un corte de 9 horas. La tormenta también ocasionó que algunos sistemas automáticos como portones de garaje funcionaran por si solos.
- El 4 de Junio de 1989 una potente explosión demolió parte de las vías del tren transiberiano en Ural, sumiendo 2 trenes en llamas con centenares de víctimas fatales. La deflagración habría sido iniciada por ambas formaciones a partir de una pérdida originada por la corrosión en un cercano gasoducto de antigua tecnología y sin modernas salvaguardas.
- Los satélites de comunicaciones canadienses ANIK E1 y E2 de Telesat respectivamente el 20 y 21/01/1994 perdieron temporariamente el control orbital. Esto se debió a los efectos de electrones de alta energía que penetraron profundamente en la electrónica e indujeron grandes voltajes entre componentes, ocasionando descargas eléctricas entre los mismos con la consecuente afectación de equipo. Finalizaron abruptamente transmisiones de televisión en Canadá y EEUU, se cortaron conversaciones telefónicas y

se alteró el control de tráfico aéreo por lo que debieron aterrizar algunos aviones. Esto mereció algunos titulares (ver Figura 7).

- El satélite Telstar 401 al servicio de AT&T quedó fuera de servicio el 11/01/1997 con sólo 3 años de antigüedad por las inclemencias del clima espacial originadas en una eyección de masa coronal. Este hecho redujo considerablemente el servicio de satélites Skynet, que consistía de tres naves usadas para transmitir programas de televisión.
- El 19 de Mayo de 1998 un sistema de control del satélite de comunicaciones Galaxy IV de la corporación PanamSat quedó fuera de servicio, lo cual interrumpió en EEUU casi un día completo el servicio de radiomensajes de hasta un 90 % de los usuarios, algunas transmisiones de noticias y el funcionamiento de las máquinas de tarjetas de crédito en ciertos comercios. Al analizar las condiciones ambientales de la magnetosfera previas al incidente se encontraron contundentes evidencias de flujos elevados de electrones de muy alta energía durante las dos semanas precedentes. Eso probablemente condujo a la acumulación de excesiva carga en algún componente y una posterior descarga dañina.
- Se sospecha que un serio accidente de trenes con 19 muertos en Enero de 2000 en Noruega pudo deberse a un cambio fatal de la señal ferroviaria a vía libre ocasionado por la elevada actividad solar.

Riesgos para la salud humana

Los pasajeros y la tripulación de un avión están directamente expuestos a los rayos cósmicos secundarios producidos en la atmósfera terrestre. Por lo antes expresado, la altura y la latitud de un vuelo y el material exterior de un avión tienen una influencia decisiva en la radiación recibida. Esta alcanza su máximo valor a unos 18 km sobre el nivel del mar, no demasiado lejos de la altura de crucero de los vuelos, que es de unos 10 km para los convencionales y de 15 km para los supersónicos, estando estos últimos por lo tanto sometidos a una irradiación más alta. No existen aún estudios sobre la variación de los efectos a lo largo del ciclo de actividad solar pero se conocen algunos resultados preocupantes. Debido al efecto de la latitud, los vuelos sobre Europa están expuestos a intensidades tres veces superiores a los realizados cerca del Ecuador. Además, volar en el Concorde puede implicar estar sometido a dosis del doble que a una altura de vuelo convencional, con valores que pueden llegar a exceder el tope permitido en las regulaciones laborales de protección radiológica. Durante el anterior máximo solar los detectores de radiación que llevan estos aviones dieron un par de veces alerta amarilla, que si hubiera pasado a roja hubiese obligado a los pilotos a sumergirse inmediatamente a menores altitudes, bajo la protección de una atmósfera más densa. Se han detectado además niveles de

consideración de núcleos atómicos de elementos pesados (por ejemplo hierro) en vuelos convencionales y más aún en supersónicos. Debe tenerse presente que los efectos que estos elementos ocasionan en la materia con la que colisionan aumentan en forma proporcional a su masa, por lo que deben estudiarse las consecuencias de esta radiación en la gente. Aquellas personas que toman un vuelo a altas latitudes para ganar horas de vuelo por el acortamiento de la distancia recorrida debieran saber que por otro lado pueden estar perdiendo salud, debido a la mayor facilidad de penetración en la atmósfera que tienen los rayos cósmicos galácticos allí. En particular, no existen aparentemente estudios en lo que al vuelo transpolar Buenos Aires-Auckland concierne. Las ventanas de las cabinas de los pilotos ponen a la tripulación de mando en un grado mayor de indefensión que los pasajeros parapetados por un entorno metálico. Un estudio efectuado en Islandia a pilotos aeronáuticos halla que la incidencia de cáncer de piel sobre los mismos es un 25 % superior respecto a quienes no ejercen esa profesión. Obviamente los astronautas no deben efectuar caminatas espaciales cuando la radiación en el medio es muy elevada por la ocurrencia de un evento solar de importancia.

Hay animales migratorios como aves y ballenas que usan el campo magnético para asistirse durante su traslado de miles de km y que pueden desorientarse por grandes tormentas geomagnéticas. En un cierto intento de extender estos hechos, algunos investigadores han buscado y encontrado en humanos correlaciones entre actividad solar e infartos o ataques cerebrales, aunque no mucho más significativas que las que obtuvieron quienes han intentado infructuosamente (al menos por ahora) hacerse ricos a través de algún posible vínculo estadístico entre el comportamiento de nuestra estrella y la bolsa de valores.

Consecuencias en el clima terrestre

La vinculación entre clima espacial y clima terrestre es un asunto muy poco claro aún, que despierta controversias. Algunos hechos pueden revelar pistas para estudiar esta incógnita:

- Existen relámpagos que desde la parte superior de las nubes de tormenta suben e impactan la ionosfera, estableciendo una conexión eléctrica en la atmósfera entre la capa responsable de la meteorología terrestre y la más elevada.
- El incremento de la radiación ultravioleta durante el máximo solar y el ingreso en la atmósfera de partículas de alta energía durante tormentas espaciales son procesos que indirectamente contribuyen a incrementar la concentración de ozono, lo cual afecta la estructura térmica de la atmósfera.
- Los rayos cósmicos de muy alta energía penetran profundamente hasta las alturas de las nubes (unos pocos km), ionizando partículas atmosféricas que pueden aumentar la formación de aquéllas. Se ha detectado efectivamente cierto aumento de la

cobertura global de nubes durante mínimos solares (el flujo de rayos cósmicos galácticos aumenta cuando la actividad solar disminuye).

- Existen evidencias de un gran aumento de la actividad solar en el siglo XII y gran parte del XIII que coincidió con el clima apacible de esa época y por el contrario hubo épocas de muy baja actividad solar entre el fin y el comienzo de los siglos XV y XVI y también de los siglos XVII y XVIII, que fueron correspondidas con la existencia de inviernos muy severos (el arte es uno de los testimonios de esto, ver Figura 8).
- El denominado calentamiento global del planeta consta de un incremento de 0.5 °C en el promedio de la superficie terrestre durante el presente siglo. Algunos investigadores sostienen que la emisión de gases de efecto invernadero no es el único villano y que hasta la mitad de ese incremento debe ser atribuido a la tendencia creciente de la actividad solar media durante el mismo período (ver Figura 3).
- Están quienes sostienen que el desarrollo de los fenómenos El Niño y La Niña guarda relación con el comportamiento solar. Hasta el día de hoy no está claramente establecido qué es lo que dispara esos hechos y su ocurrencia algo irregular en el tiempo.

Establecer cómo se producen detalladamente los procesos, la identificación de eslabones físico-químicos intermedios entre causas espaciales y efectos climáticos terrestres, su secuencia y relevancia, es un gran desafío a la investigación científica en este momento, ya que no se ha avanzado mucho más allá del terreno de las conjeturas.

Meteorología espacial

El interés concreto en la posibilidad de predecir la actividad solar y los efectos en el sistema terrestre comenzaron durante la segunda guerra mundial con el uso decisivo de las radiocomunicaciones, el radar y la detección magnética submarina, al notarse su sensibilidad al comportamiento de nuestra estrella. Con el transcurso del tiempo se fue advirtiendo que las complejidades involucradas convertían a ese objetivo en una tarea extremadamente difícil. Podría decirse que el estado actual del tema se halla en el nivel en el cual se encontraba la meteorología atmosférica hace 5 décadas. La diferencia es que en ese entonces la predicción incorrecta y la respuesta inadecuada a una tormenta atmosférica no podían producir las consecuencias económicas y de seguridad que se pueden atribuir hoy a eventuales pronósticos espaciales inapropiados. A veces se intenta hacer predicciones sólo para una parte de toda la secuencia, por ejemplo limitándose a pronosticar una tormenta geomagnética sin hacer

aseveraciones sobre las corrientes que podrían ser inducidas en una red eléctrica. Uno de los procedimientos habituales para perfeccionar futuras predicciones espaciales consiste en efectuar el análisis de eventos individuales mientras suceden o luego de ocurridos, particularmente desde el punto de vista de la propagación y el efecto. Por ejemplo se sigue la secuencia de un evento desde el Sol hasta la ionosfera. Primero se observa desde la Tierra y el espacio una eyección de masa coronal que parte del Sol y que la misma se acerca a nuestro planeta a cierta velocidad. Unos pocos días después se la verá colisionar con la magnetosfera terrestre. A continuación aparecen auroras en gran parte del hemisferio norte y diversos satélites pueden medir que en unas pocas horas la cantidad de electrones en algunos sectores de la ionosfera de altas latitudes llegó a multiplicarse. Esto ayuda a comprender los complejos procesos físicos involucrados y la cadena de los mismos aunque las relaciones entre causa y efecto no son siempre claras y directas.

Tras varios años de este tipo de estudios, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) ha establecido una escala para indicar la intensidad del clima espacial, que en una especie de escala de Richter (terremotos) también relaciona los eventos con los probables efectos (en sistemas tecnológicos y biológicos). Los tres tipos básicos de meteoros y sus consecuencias más dramáticas son las siguientes:

Tormentas geomagnéticas (importantes perturbaciones en el campo geomagnético ocasionadas por ráfagas del viento solar que se aproxima a la Tierra)	Daños en redes de electricidad, satélites y oleoductos e interrupciones en radiocomunicaciones
Tormentas de radiación solar (niveles elevados de radiación que suceden cuando se incrementa el número de partículas energéticas)	Daños en satélites, interrupciones en radiocomunicaciones en zonas polares y riesgos de salud en vuelos a altas latitudes
Apagones de radio (significativas perturbaciones en la ionosfera causadas por gran emisión de rayos X desde el Sol)	Interrupciones en radiocomunicaciones

En cada una de estas tres categorías la escala va decreciendo en intensidad de 1 a 5 (extremo, severo, fuerte, moderado, menor). Estas definiciones están respectivamente basadas en valores físicos mensurables: la actividad geomagnética global, el flujo de partículas y la intensidad de rayos X solares. Todo esto se halla basado en el comportamiento del Sol debido al rol secundario de los rayos cósmicos galácticos.

La predicción del clima espacial podrá llegar a ser precisa cuando se puedan combinar en forma efectiva herramientas integradoras de observaciones y modelos del Sol, la heliosfera, la magnetosfera y la ionosfera. Por ejemplo para obtener una aplicación práctica de predicción de corrientes inducidas en sistemas tecnológicos sería conveniente contar con más observaciones del Sol y la Tierra, pero sucede además que las computadoras aún no permiten realizar simulaciones del sistema magnetosfera – ionosfera con suficiente velocidad. Estos intentos de pronosticación se aplican a la prevención de consecuencias de corto plazo sobre la tecnología y la salud. Las consecuencias sobre el clima terrestre parecen actuar en general en un lapso más prolongado y existe aquí una trama aún más compleja de comprender.

Relación del clima espacial con la sociedad

El clima espacial es una fuente adicional de problemas entre varios que atraviesan nuestra vida diaria en cuanto a salud, ambiente, seguridad y confort. Nuestra civilización ha sido consciente de diversos riesgos de fenómenos naturales terrestres pero sólo recientemente descubrió consecuencias concretas de esta arista de origen extraterrestre. En este momento NOAA publica pronósticos (www.spaceweather.com) acerca de la probabilidad de ocurrencia de diversos fenómenos hasta con 48 horas de anticipación.

Actualmente funcionan más de 200 satélites tan sólo de comunicaciones, de los cuales la mitad tiene un valor superior a los U\$ 200.000.000. La protección contra radiación de los mismos puede ser aumentada en forma limitada por el aumento de peso (o sea costo) que implicaría. Diversos incidentes muestran nuestra dependencia respecto a la tecnología espacial y la fragilidad que puede llegar a tener el sistema de comunicaciones: teléfonos, televisión, radio, transacciones bancarias, autorizaciones de tarjetas de crédito, diarios, etc. muchas veces penden de la potencial vulnerabilidad de un solo satélite en alguna parte de una cadena. También puede decirse que hay mucho por hacer en cuanto a la investigación, seguimiento y minimización de la exposición a la radiación en vuelos aéreos. Este tema presenta un flanco más accesible a la reducción de riesgos puesto que pronósticos espaciales prematuros y precisos podrían permitir la elección circunstancial de rutas más seguras (a menores latitudes o alturas), tal como sucede actualmente con fenómenos meteorológicos atmosféricos. En particular, el personal de vuelo debe ser protegido de una excesiva exposición a radiación. Resulta además esencial poder llegar a elaborar predicciones espaciales confiables por razones de seguridad y de economía. La advertencia prematura de un evento podría llevar a tomar medidas costosas para compañías eléctricas como reducir la carga del sistema o desconectar algunas partes del mismo, pero que resultarán más beneficiosas aún si son correctas. Debe tenerse presente también la expansión

que han tenido las redes de los sistemas eléctricos y electrónicos desde el máximo solar anterior hace 11 años. En general se puede decir que el número de sistemas sujeto a fallas se ha incrementado considerablemente. Otra cuestión delicada es la dilucidación de las causas reales del calentamiento global, puesto que se estarán beneficiando o perjudicando intereses industriales de acuerdo a la mayor responsabilidad que se le asigne a la emisión de gases o al comportamiento del Sol.

Por todo lo anterior será cada vez más importante que en el futuro se puedan desentrañar diversas incógnitas y que se desarrollen sistemas de advertencia prematuros y precisos de actividad solar extraordinaria y tormentas espaciales. Es necesario también resolver problemas de costos - beneficios (o reducción de perjuicios) y tal como ha sucedido con las medidas de reducción de gases CFC por el problema del ozono, es incumbencia del sistema científico proveer información y hacer las advertencias que correspondan y es responsabilidad del sistema político implementar las medidas que atenúen los riesgos correspondientes.

Algunas referencias de interés

Boteler, D.H., Pirjola, R., Nevanlinna, H., The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface, *Adv. Space Res.*, **22**, 17, 1998.

Galileo Galilei, *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti*, Accademia dei Lincei, Roma, 1613.

Herschel, W., Observations tending to investigate the nature of the Sun, in order to find the causes or symptoms of its variable emission of light and heat, with remarks on the use that may possibly be drawn from solar observations, *Philos. Trans. R. Soc. London*, **91**, 265, 1801.

Hoyt, D.V., Schatten, K.H., *The role of the Sun in climate change*, Oxford University Press, Oxford, 1997.

Joselyn, J.A., The impact of solar flares and magnetic storms on humans, *Eos*, **73**, 81, 1992.

Schwabe, H., Solar observations during 1843, *Astron. Nachr.*, **21**, 233, 1843.

Nota: las imágenes aquí empleadas son de acceso libre en internet, salvo las figuras 1 y 3 que son de realización propia.

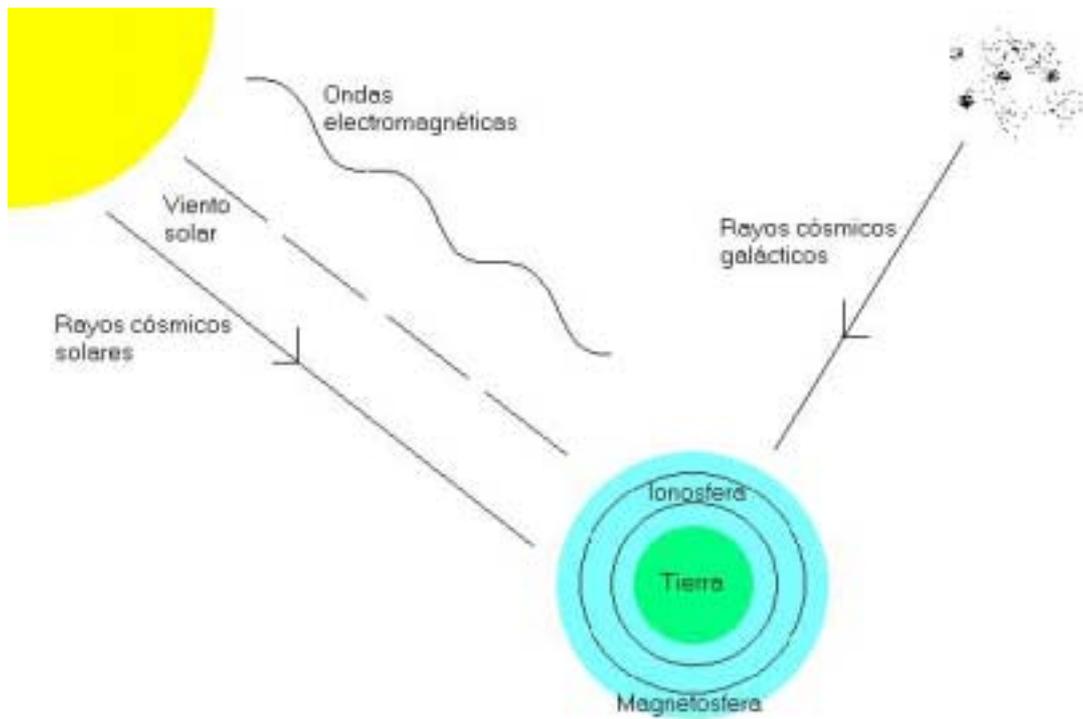


Figura 1. Los componentes del clima espacial (tamaños y distancias están fuera de escala).

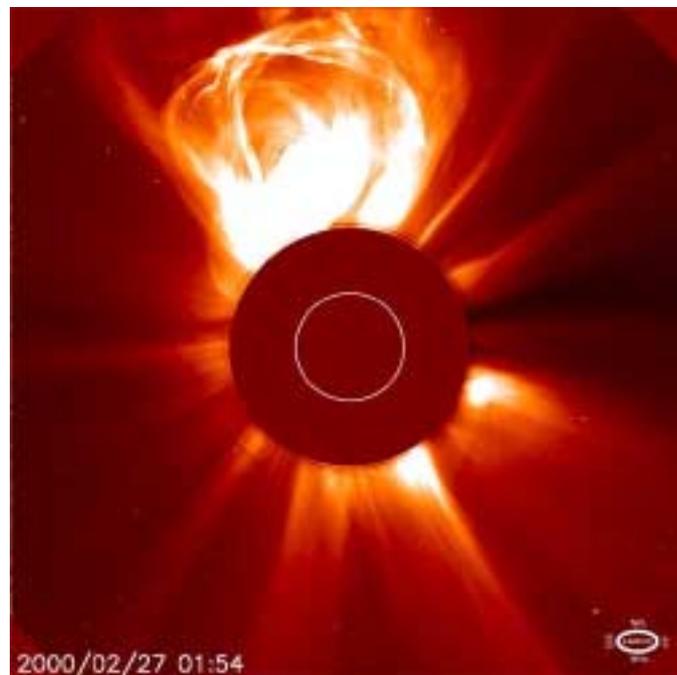


Figura 2. En la parte superior se observa una eyección de masa coronal fotografiada desde la nave SOHO el 27 de Febrero del 2000. El disco central bloquea la luz directa del Sol para una mejor visualización del evento y el círculo blanco en el mismo representa el tamaño del Sol.

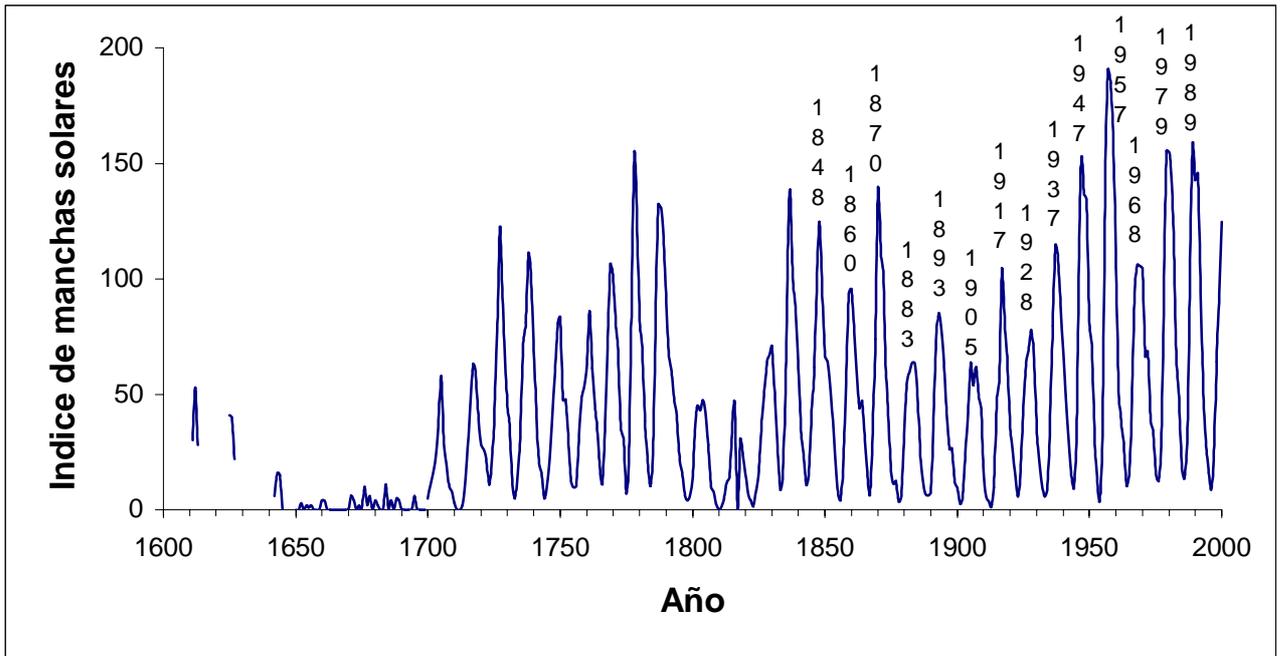


Figura 3. Evolución del índice de manchas desde el comienzo de los registros metódicos de las mismas. Existen períodos de ausencia de datos. El valor para el año 2000 corresponde a Enero-Septiembre. Se han indicado los máximos de los últimos 150 años. Nótese el lapso de muy baja actividad solar entre 1640 y 1710 (denominado Mínimo de Maunder).

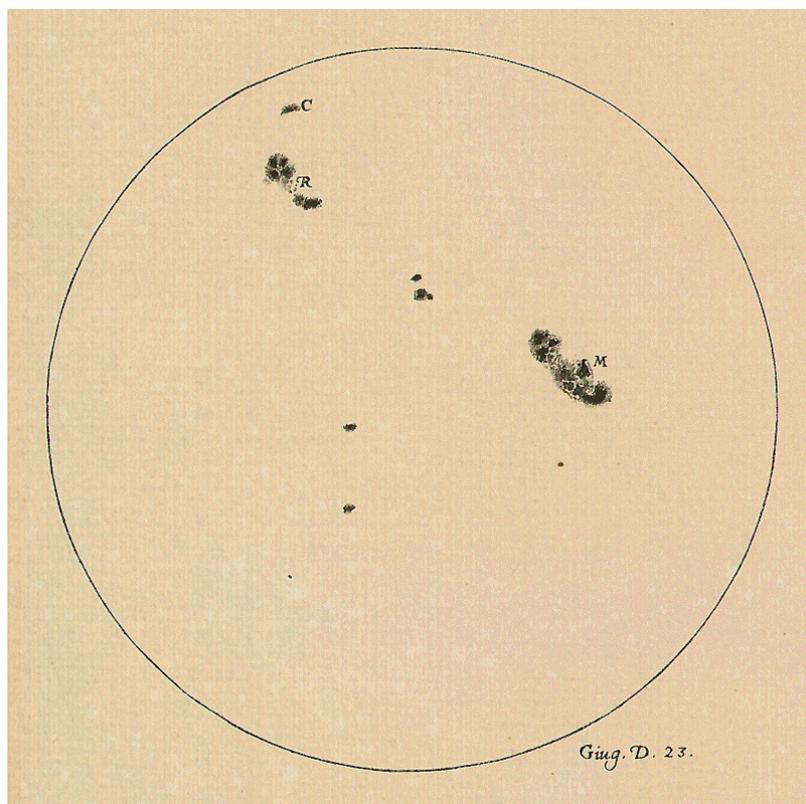


Figura 4. Uno de los dibujos de manchas solares realizados por Galileo en 1612.

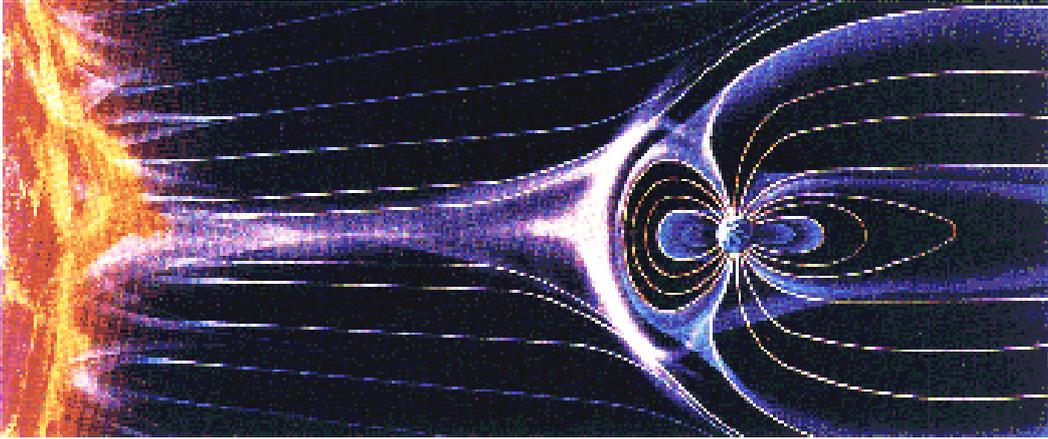


Figura 5. Una visión artística de una erupción solar y la protección que brinda a la Tierra la magnetosfera.



Figura 6. Oleoducto de Trans-Alaska iluminado por la aurora.



Figura 7. Titulares de los diarios tras el incidente de los satélites Anik.



Figura 8. Aert van der Neer (holandés, 1603-1677): *Deportes en un río congelado*, 1660, Metropolitan Museum of Art, Nueva York.