

Artículo Nº 12/2026

METEOROLOGÍA ESPACIAL: LA NUEVA DIMENSIÓN DEL AMBIENTE OPERACIONAL AERONÁUTICO

PRIMERA PARTE



Por Juan Carlos Sepúlveda Suárez, Encargado de Desarrollo Espacial de la empresa DTS SpA. Investigador Asociado al CEEA.

13 de agosto de 2026. 10 minutos de Lectura

Resumen Ejecutivo

La meteorología espacial, fenómeno natural caracterizado por variaciones en las condiciones del Sol y sus efectos sobre los sistemas terrestres, representa un riesgo creciente para la aviación civil y militar moderna. A diferencia de otros peligros meteorológicos convencionales, la meteorología espacial ocurre en la interfaz sol-tierra y afecta simultáneamente múltiples sistemas críticos de navegación, comunicaciones y seguridad de las aeronaves. Este artículo examina las características fundamentales de este fenómeno, los eventos de relevancia histórica, sus impactos potenciales en las operaciones aéreas y las medidas de mitigación que deben implementarse. Particular énfasis se otorga al contexto sudamericano y chileno, donde las operaciones a altas latitudes (particularmente en rutas polares y antárticas) presentan mayor vulnerabilidad a estos eventos.

Palabras clave: Meteorología espacial, aviación, tormenta solar, GNSS, comunicaciones HF, mitigación de riesgos.

Introducción

La aviación moderna depende de forma crítica de sistemas tecnológicos altamente sofisticados para la navegación, comunicaciones, vigilancia y control del tráfico aéreo. Estos sistemas, basados fundamentalmente en microelectrónica miniaturizada, satélites de comunicaciones y navegación global, han revolucionado la seguridad y eficiencia de las operaciones aéreas. Sin embargo, esta dependencia tecnológica ha generado una vulnerabilidad emergente: la susceptibilidad a los efectos de la meteorología espacial.

A diferencia de las tormentas atmosféricas que pueden observarse, pronosticarse y evitarse mediante cambios de ruta, los eventos de meteorología espacial se propagan a la velocidad del viento solar y afectan simultáneamente amplias regiones geográficas. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha reconocido este riesgo y, desde 2018, ha establecido requisitos para que los servicios meteorológicos espaciales sean parte de la información de briefing para operadores y tripulaciones de vuelo.

El presente análisis aborda la meteorología espacial desde una perspectiva de seguridad operacional aeronáutica, considerando tanto los fundamentos físicos del fenómeno como sus implicaciones para la aviación comercial y militar. Particular atención se otorga a las vulnerabilidades específicas de las operaciones en latitudes altas, zona de relevancia estratégica para América del Sur.

Características Fundamentales de la Meteorología Espacial

Definición y Origen

La meteorología espacial, según la definición de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos, corresponde a "las condiciones del Sol, el viento solar, la magnetosfera, la ionosfera y la termosfera que pueden influir en el desempeño y confiabilidad de sistemas tecnológicos espaciales y terrestres, y pueden poner en peligro la vida humana o la salud" (NOAA, 2024).

A diferencia de la meteorología atmosférica convencional, que opera en la tropósfera terrestre, la meteorología espacial se origina en el Sol y su interacción con el campo magnético terrestre. El Sol emite constantemente radiación electromagnética y flujos de partículas cargadas conocidos como viento solar. Durante períodos de actividad solar intensa, esta emisión aumenta significativamente, generando fenómenos que afectan directamente a la Tierra a través del espacio interplanetario.

El Ciclo Solar

El comportamiento del Sol sigue un patrón cíclico bien documentado de aproximadamente 11 años de duración. Este ciclo solar se caracteriza por variaciones en la cantidad de manchas solares visibles en la superficie solar, siendo el punto de mínima actividad denominado "mínimo solar" y el de máxima actividad "máximo solar".

Durante el mínimo solar, se registran pocos o ningún evento significativo de meteorología espacial. Conforme el ciclo avanza hacia el máximo solar, la frecuencia de tormentas solares aumenta considerablemente. Estadísticamente, aproximadamente 8 años de cada ciclo de 11 años presentan riesgo de eventos significativos. Los registros indican que durante un ciclo solar típico ocurren alrededor de diez eventos significativos de tormentas solares, aunque la mayoría no afectan directamente a la Tierra.

Actualmente nos encontramos en el ciclo N° 25 desde que se registra la actividad solar, teniendo como máximo solar el periodo 2025-2026.

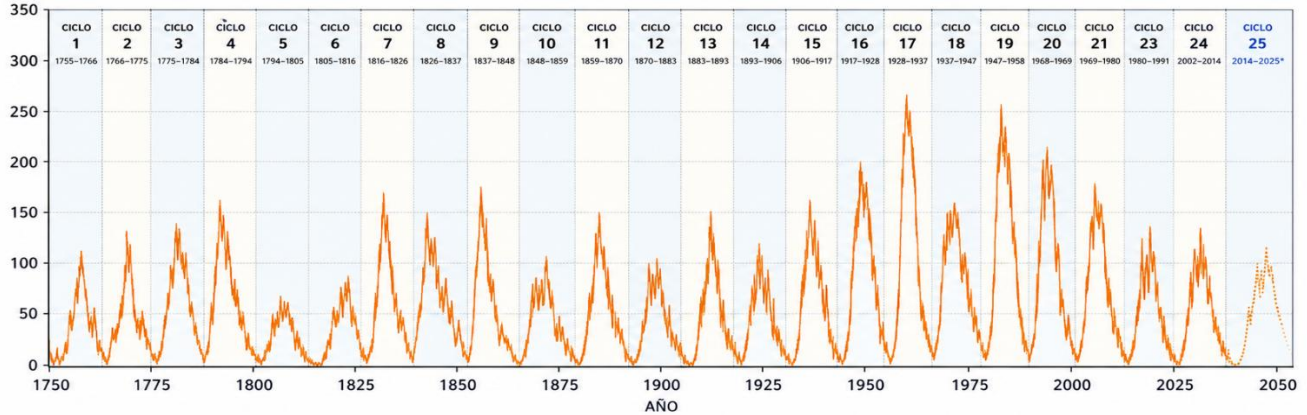
25 CICLOS SOLARES REGISTRADOS

Cantidad de manchas solares (sunspots) a lo largo del tiempo



El ciclo solar es un período de actividad magnética del Sol que dura en promedio 11 años. Se manifiesta en la aparición de manchas solares (sunspots) en su superficie.

CANTIDAD DE MANCHAS SOLARES (SUNSPOTS)



Fuente: World Data Center – SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels (Actualizado: mayo 2025)

* El Ciclo Solar 25 está en curso. Los datos corresponden hasta mayo de 2025 y pueden actualizarse.

Fig.1: Estadística de los ciclos solares registrados a la fecha (elaboración propia con ayuda de la IA)

Fenómenos Solares Principales

Los eventos de meteorología espacial se clasifican en tres categorías principales:

FENÓMENO	EFFECTO
Fulguraciones o llamaradas Solares (Solar Flares)	Erupciones repentinas de radiación electromagnética intensa, principalmente en los rangos de rayos X y ultravioleta extremo. Estas fulguraciones ocurren cuando se libera bruscamente la energía magnética acumulada en la atmósfera solar. La radiación viaja a la velocidad de la luz, llegando a la Tierra en aproximadamente 8 minutos.
Eyecciones de Masa Coronal (Coronal Mass Ejections - CME)	Inyecciones explosivas de plasma magnetizado hacia el espacio interplanetario. A diferencia de las fulguraciones, las CME son fenómenos físicos que transportan materia solar. Según los registros históricos, viajan a velocidades que van desde los 100 hasta los 3.000 kilómetros por segundo. Una CME dirigida hacia la Tierra puede llegar entre pocas horas y varios días después de su eyección en el Sol.
Tormentas de Radiación Solar (Solar Radiation Storms)	Flujos de partículas de alta energía, principalmente protones y electrones, que viajan desde el Sol hacia la Tierra a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Estas partículas pueden llegar a la Tierra entre 10 a 15 minutos después de detectada la fulguración asociada.

Tabla 1: Fenómenos solares y sus efectos



Fig.2: Esquema de interacción entre la actividad solar y el campo magnético terrestre (elaboración propia con ayuda de la IA)

Clasificación de los efectos solares en el planeta

Los distintos fenómenos solares han sido estudiados por diferentes organizaciones a nivel global, como por ejemplo la Agencia Nacional de Oceanografía y atmósfera de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés), el cual realiza estudios de diferentes ámbitos de la dinámica del planeta, tales como huracanes, tsunamis, clima atmosférico, clima solar, entre otros; categorizando sus efectos a objeto tener una escala de afectación y estimar su impacto en las distintas actividades humanas.

En este contexto, la NOAA posee un Centro de Predicción de Clima espacial (SWPC, por sus siglas en inglés), el cual ha clasificado 03 tipos actividades solares, o tormentas, las cuales poseen una escala similar a la de los huracanes (de 1 a 5). Asimismo, ha generado un índice de medición de estado planetario denominado Kp Index, el cual representa en una escala de 1 al 9 el estado geomagnético del planeta, en el cual, de una escala de superior a 4, se considera que la actividad solar tendrá un nivel de impacto sobre distintas actividades humanas.

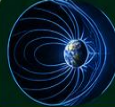
 TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS Alteraciones del campo magnético de la Tierra causadas principalmente por CME.			 TORMENTAS DE RADIACIÓN SOLAR Aumentos en el flujo de partículas energéticas (protones y electrones) que pueden afectar satélites, astronautas y sistemas de comunicación.			 TORMENTAS SOLARES (RADIO BLACKOUTS) Interrupciones en las comunicaciones de radio causadas por fulguraciones solares (rayos X).		
NIVEL	ESCALA NOAA	DESCRIPCIÓN DEL IMPACTO	NIVEL	ESCALA NOAA	DESCRIPCIÓN DEL IMPACTO	NIVEL	ESCALA NOAA	DESCRIPCIÓN DEL IMPACTO
G5	EXTREMA	Daños generalizados o colapso de redes eléctricas. Problemas en sistemas de navegación y comunicaciones por satélite a escala global. Auroras visibles hasta en latitudes muy bajas (ej. Florida y el norte de India).	S5	EXTREMA	Riesgo extremo para astronautas y pasajeros en vuelos polares. Fallos profundos en electrónica de satélites. Pérdida de comunicaciones de radio de alta frecuencia (HF) durante horas a días.	R5	EXTREMA	Pérdida total de comunicaciones HF en el lado diurno de la Tierra. Interrupciones en señales GPS.
G4	SEVERA	Posibles cortes de energía regionales. Interrupciones en comunicaciones satelitales y sistemas de navegación. Auroras visibles en latitudes bajas (ej. norte de EE. UU. y Europa central).	S4	SEVERA	Riesgo importante para astronautas y pasajeros en vuelos polares. Fallos en satélites y degradación de comunicaciones HF a escala global durante horas.	R4	SEVERA	Pérdida de comunicaciones HF en gran parte del lado diurno de la Tierra. Interrupciones en señales GPS.
G3	FUERTE	Problemas en sistemas eléctricos. Interrupciones en navegación por satélite. Auroras visibles en latitudes medias (ej. norte de EE. UU. y Europa).	S3	FUERTE	Riesgo moderado para astronautas y pasajeros en vuelos polares. Interrupciones en comunicaciones HF en regiones polares durante horas.	R3	FUERTE	Interrupciones en comunicaciones HF en regiones polares y ocasiones en latitudes más bajas. Degradación en señales GPS.
G2	MODERADA	Fluctuaciones en redes eléctricas. Impactos menores en navegación por satélite. Auroras visibles en latitudes altas.	S2	MODERADA	Bajo riesgo para astronautas. Interrupciones menores en comunicaciones HF en regiones polares.	R2	MODERADA	Interrupciones en comunicaciones HF en regiones polares. Degradación en señales GPS.
G1	MENOR	Pequeñas fluctuaciones en sistemas de energía y navegación. Auroras visibles cerca de los polos.	S1	MENOR	Efectos menores en sistemas de comunicación y satélites.	R1	MENOR	Pequeñas interrupciones en comunicaciones HF en regiones polares.
G0	NINGUNA	Actividad geomagnética en niveles normales. Sin impactos esperados.	S0	NINGUNA	Actividad de radiación en niveles normales. Sin impactos esperados.	R0	NINGUNA	No se esperan apagones de radio. Actividad solar en niveles normales.
Escala usada: G-Scale (G1 a G5) Basada en el índice Kp (escala 0-9)			Escala usada: S-Scale (S1 a S5) Basada en el flujo de protones >10 MeV medido por GOES			Escala usada: R-Scale (R1 a R5) Basada en la intensidad de rayos X en la banda de 1-8 Å (W/m²)		

Fig.3: Categorización de la actividad solar según SWPC del NOAA (elaboración propia con ayuda de la IA)

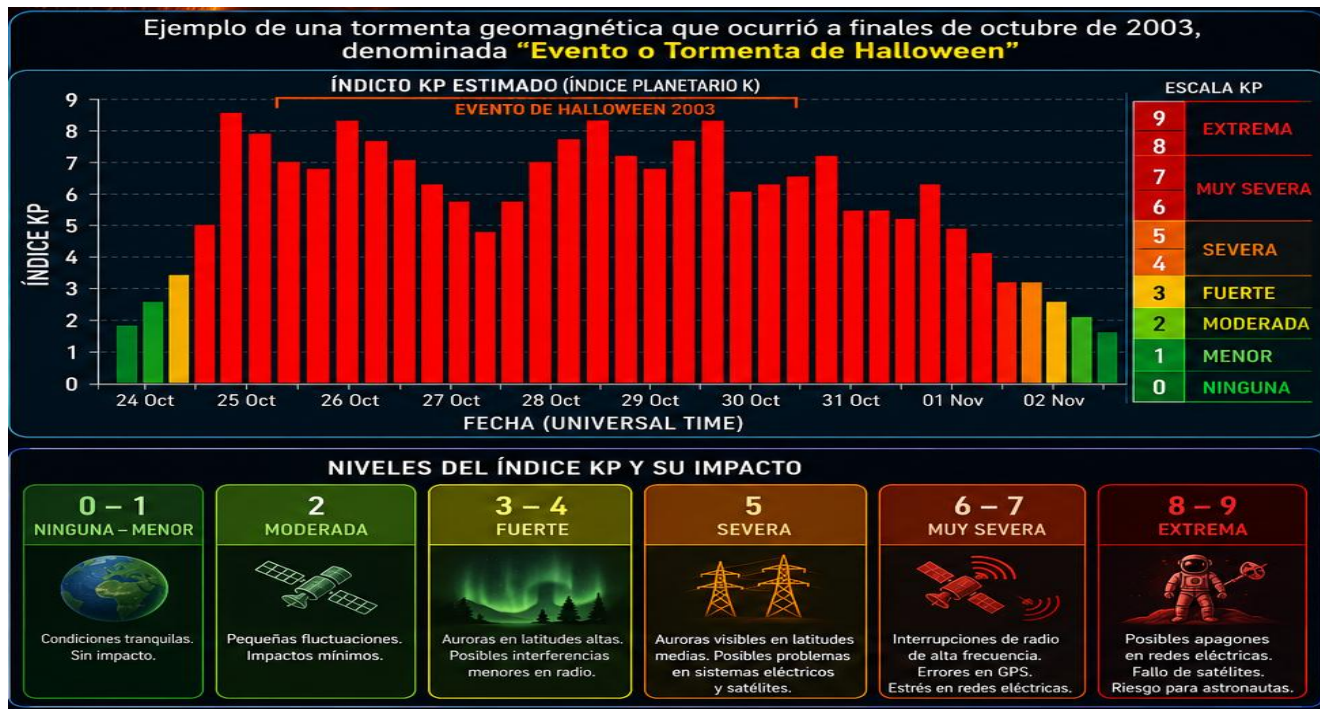


Fig.4: Representación del Kp Index usando de referencia el Evento de Halloween 2003 (elaboración propia con ayuda de la IA).

Impactos en el planeta y la tecnología

La magnetosfera terrestre, región del espacio donde predomina el campo magnético terrestre, proporciona una protección parcial contra las partículas solares. Sin embargo, durante eventos intensos, esta protección se ve comprometida, desencadenándose diversos efectos, tales como:

ÁMBITOS	EFEECTO
Inducción de Corrientes	Las tormentas geomagnéticas inducen corrientes eléctricas en sistemas de larga extensión, particularmente en líneas de transmisión de energía eléctrica, pudiendo producir interrupciones en la generación, distribución y suministro eléctrico.
Comunicaciones inalámbricas (ondas de radio)	La radiación solar ioniza intensamente las capas ionosféricas, alterando sus características eléctricas, afectando las comunicaciones por radiofrecuencia (RF), limitando su alcance o afectando el contenido (datos).
Equipos electrónicos	La radiación solar impacta directamente en los componentes y circuitos electrónicos, causando fallos temporales o permanentes afectando, mayoritariamente, a sistemas espaciales y aeronaves (aviónica).
Auroras (borealis y australis)	Eventos de luminiscencia en zonas extremas debido a la interacción de la radiación solar con las capas superiores de la atmósfera.
Navegación y geolocalización	La radiación solar afecta los servicios GNSS y de ayudas a la navegación, causando intermitencias, alteración de la información o indisponibilidad total de estos servicios, impactando directamente en los servicios aeronáuticos.

Tabla 2: Impacto de la radiación solar en el planeta

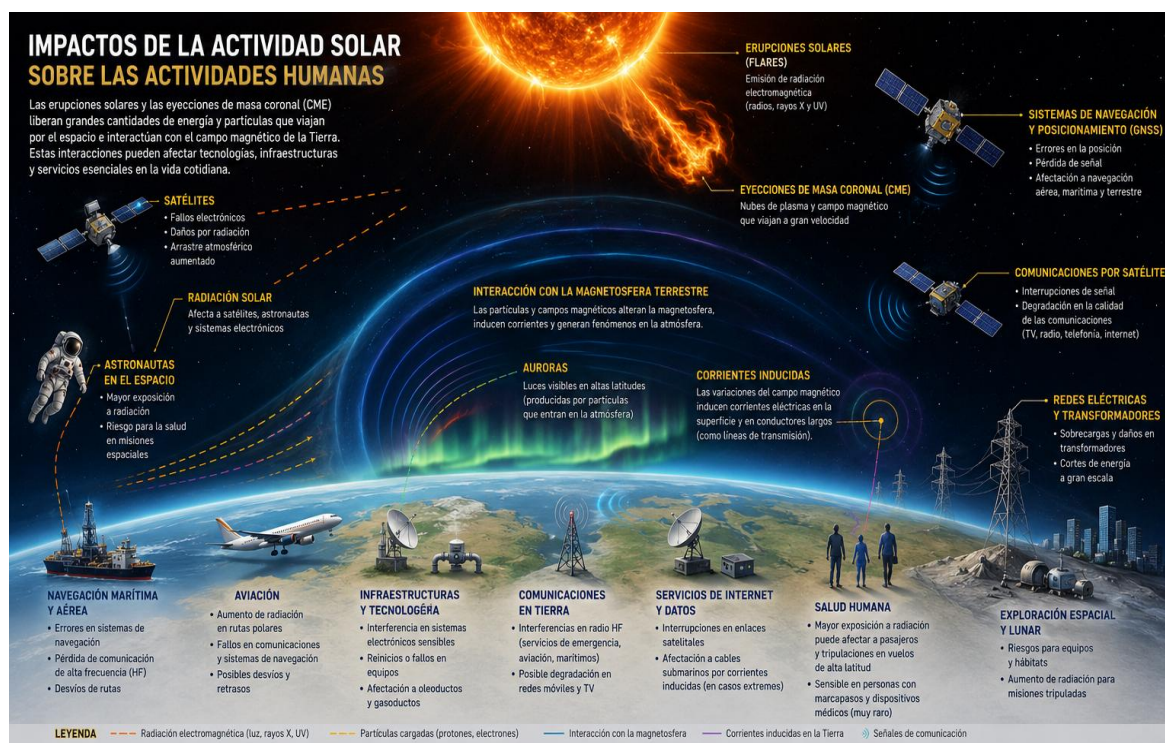


Fig.5: Esquema de impactos de la actividad solar sobre las actividades humanas (elaboración propia con ayuda de la IA)

Eventos Históricos de Relevancia

Históricamente, la actividad solar ha incidido y afectado al planeta Tierra y a la humanidad; sin embargo, solo a partir de mediados del siglo XVIII se ha estudiado y registrado esta actividad, situación que ha permitido generar estadísticas y pronósticos respecto a eventos que puedan tener un efecto relevante en las actividades humanas.

Es de esta forma que, desde el monitoreo formal de la actividad solar, se ha logrado documentar, científica y periódicamente, eventos de relevancias que tienen la potencialidad de afectar, o han incidido, en la actividad aeronáutica o espacial, tales como los siguientes:



Fig.6: Eventos solares de relevancia histórica registrados por la humanidad (elaboración propia)

Derivado del esquema anterior, es posible destacar los siguientes eventos, los cuales han incidido directamente en el quehacer humano y que tuvieron connotación en medios académicos y periodísticos, constituyendo precedentes de importancia para el ámbito aeronáutico:

El Evento de Carrington (1859)

El 1-2 de septiembre de 1859, se registró la tormenta solar más importante documentada en la historia moderna. El astrónomo británico Richard Carrington observó directamente el evento, registrando una gran fulguración seguida, tras aproximadamente 17 horas, por efectos severos en toda la Tierra.

Esta tormenta causó auroras visibles en latitudes donde normalmente no se observan, incluso en Hawái. Los sistemas telegráficos mundiales sufrieron avería generalizada, con operadores reportando capacidad de recibir mensajes incluso con sus sistemas de energía desconectados. El evento de Carrington sirve actualmente como referencia de "caso extremo razonable" para el análisis de riesgos en meteorología espacial.

Estimaciones recientes sugieren que una tormenta de magnitud similar hoy causaría interrupciones globales masivas a sistemas de energía eléctrica, telecomunicaciones y transporte, del cual la aviación constituiría un componente crítico afectado; generando un impacto social y económico que a la fecha no ha podido ser completamente dimensionado.

El Apagón de Quebec (1989)

En marzo de 1989, la tercera tormenta geomagnética más intensa registrada impactó la Tierra. En menos de un minuto, corrientes inducidas en las líneas de transmisión causaron que los sistemas de protección automática desconectarán sectores de la red eléctrica de Quebec, Canadá. Un efecto en cascada resultó en el colapso total de la red regional, dejando en oscuridad a seis millones de personas durante nueve horas.

Este evento demostró que infraestructura crítica moderna, a pesar de su sofisticación, puede ser vulnerada por fenómenos de meteorología espacial. Particularmente relevante fue que los equipos de respaldo también resultaron afectados, complicando significativamente las labores de recuperación.

Las Tormentas de Halloween (2003)

Entre octubre y noviembre de 2003, durante la fase decreciente de un ciclo solar, ocurrió una serie de eventos solares intensos asociados a un complejo grupo de manchas solares. Estos eventos generaron tormentas geomagnéticas que causaron:

- Interrupciones en sistemas de comunicaciones de alta frecuencia
- Anomalías en 47 satélites diferentes, incluyendo dos satélites Inmarsat de uso comercial
- Erosión del Sistema de Aumentación de Área Amplia (WAAS) de la FAA, haciéndolo inoperable para aproximaciones de precisión durante períodos de 11 a 15 horas
- Pérdida temporal de servicio GPS en múltiples ubicaciones

La Tormenta Solar de 2006

En diciembre de 2006, durante un período de actividad solar baja, la Tierra fue expuesta al mayor estallido de radiación solar registrado por instrumentos modernos. Este fue el primer evento documentado donde un estallido de radio afectó directamente la recepción GPS. En algunos casos, se reportó pérdida de bloqueo GPS durante aproximadamente 30 minutos, con algunas aeronaves reportando temporalmente la pérdida de su enlace de navegación satelital.

El Evento Solar Aeronáutico Sueco de 2015



Fig.7: Portadas de medios de comunicación sobre el evento solar de 2015 y su impacto en la aeronáutica

El 4 de noviembre de 2015, un intenso evento solar causó interferencia extensiva a los radares de control del tráfico aéreo en Europa. Los ecos falsos generados en sistemas de radares en Bélgica, Estonia y Suecia fueron particularmente severos en el sur de Suecia, donde causaron el cierre de los sistemas de control del tráfico aéreo durante varias horas, perturbando significativamente las operaciones aéreas en el espacio aéreo sueco.

El evento de Starlink de 2022

Uno de los eventos solares de impacto mediático y de variados análisis académicos se relaciona a la situación que la empresa Starlink sufrió el 4 de febrero de 2022, momento en el cual lanzó 49 satélites de la constelación de telecomunicaciones, en circunstancias que una tormenta geomagnética nivel G2 se encontraba arribando al planeta. Lo anterior, significó un incremento en la actividad atmosférica superior y aumento de partículas altamente cargadas que causaron la pérdida de 40 de los 49 satélites lanzados.

Este evento no solamente destaca por el número de satélites afectados, sino que por los procesos de planificación de la misión y no considerar la meteorología espacial como un factor limitante. En efecto, producto de retrasos y la necesidad operacional de mantener una agenda de lanzamientos, los planificadores de Starlink decidieron no incluir en el proceso de toma de decisiones la alerta emitida por el SWPC del NOAA respecto a la actividad solar, contexto que terminó afectando la agenda global de puesta en órbita de la citada constelación.

Este evento ha sido incluido en diversos cursos, seminarios y syllabus de diferentes áreas de especialización, a modo de estudio y de rescate de lecciones aprendidas en donde, obviar factores o variables en la planificación de operaciones, puede llevar al fracaso de una misión o actividad.

La teoría del Cisne Negro y la actividad solar

En abril de 2007, el escritor y filósofo Nassim Nicholas Taleb publicó su obra “El Cisne Negro: Un Impacto Altamente Improbable”, en el cual explora como raros e impredecibles eventos pueden poseer impactos masivos y “catastróficos” en la humanidad, incluyendo un análisis del cómo se han tratado de explicar históricamente. Esta publicación y sus posteriores ediciones han sido utilizadas por diferentes académicos, historiadores y entidades gubernamentales; para prospectar escenarios no predecibles o negativos.

Desde este contexto, diversos estudios de la actividad solar, en especial los llevados a cabo por la investigadora Fusa Miyake, han evidenciado la existencia de eventos extremos de actividad solar, detectado en los anillos de crecimiento de árboles petrificados en diversas zonas del planeta (mayoritariamente Rusia, Alaska y Groenlandia), los cuales presentan alteraciones vinculadas a episodios elevados de radiación solar medidos a través de la técnica del Carbono-14, los cuales se escapan de los actuales estándares de medición y predicción.

En la actualidad, de ocurrir algún evento similar, denominados “Eventos Miyake” en honor a la investigadora, podría implicar consecuencias catastróficas y no parametrizadas a la fecha, configurando el escenario de un Cisne Negro sobre los desarrollos tecnológicos humanos, en especial los relacionados a la tecnología espacial, aeronáutica y de telecomunicaciones; los cuales podrían colapsar, dejar de operar o, en el peor escenario, quedar inservibles electrónicamente.

Hasta la fecha se han evidenciado 6 eventos en los últimos 15.000 años aproximadamente, en función de los hallazgos científicos, contexto que impide determinar su patrón de ocurrencia, intensidad y grados reales de afectación; pero que, de ocurrir, el impacto sería global e impredecible.

LA TEORÍA DEL CISNE NEGRO Y LA ACTIVIDAD SOLAR

Cuando lo impredecible se vuelve inevitable:
¿estamos preparados?

“ Los cisnes negros son acontecimientos que se salen de lo esperado, tienen un gran impacto y, a posteriori, tendemos a buscarles una explicación. ”
– Nassim Nicholas Taleb



EL CISNE NEGRO

Un Impacto Altamente Improbable

Publicado en abril de 2007

Nassim Nicholas Taleb plantea que existen eventos raros, impredecibles y de enorme impacto, que están fuera del ámbito de las expectativas y de los modelos tradicionales.

No los vemos venir, pero cambian el mundo cuando ocurren.

¿QUÉ ES UN CISNE NEGRO?



RARO E IMPREDECIBLE

Está fuera del rango de lo esperado; no es posible predecirlo con los modelos actuales.



IMPACTO EXTREMO

Sus consecuencias son masivas, profundas y muchas veces catastróficas.



EXPLICACIÓN A POSTERIORI

Después del evento, creamos racionalizaciones que hacen parecer que era explicable.



TRANSFORMA SISTEMAS

Puede alterar de forma permanente sociedades, economías, tecnologías y formas de vida.

LA ACTIVIDAD SOLAR EXTREMA: UN CISNE NEGRO NATURAL

¿QUÉ DICE LA EVIDENCIA CIENTÍFICA?

Estudios liderados por la investigadora Fusa Miyake han identificado en anillos de crecimiento de árboles petrificados (Rusia, Alaska y Groenlandia) alteraciones químicas asociadas a picos extraordinarios de radiación solar, muy superiores a los registrados en la era espacial.



Fusa Miyake
Investigadora en
geoquímica ambiental
Universidad de Nagoya



EVENTOS MIYAKE: LA MEMORIA DEL SOL

Hasta la fecha se han identificado 6 eventos extremos en los últimos ~15.000 años. No sabemos cuándo ocurrirán de nuevo ni con qué intensidad.

6 EVENTOS EXTREMOS IDENTIFICADOS



¿QUÉ ES UN EVENTO MIYAKE?

Es un episodio extremo de actividad solar que libera cantidades masivas de radiación y partículas energéticas, muy superiores a cualquier evento registrado desde que existen mediciones modernas (siglo XX).



Fig.8: La teoría del cisne negro y su relación con la actividad solar (elaboración propia con ayuda de la IA)