

RIESGOS DERIVADOS DEL  
CLIMA ESPACIAL

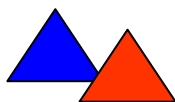
Dirección General de  
Protección Civil y Emergencias

Red Radio de Emergencia - REMER

## Riesgos derivados del clima espacial

*Red Radio  
de  
Emergencia*

Elaborado por	Revisado por	Aprobado por
Ismael Pellejero Ibáñez (28T1)		
Fecha: 18/11/2010	Fecha:	Fecha:



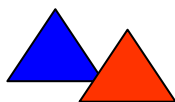
RIESGOS DERIVADOS DEL  
CLIMA ESPACIAL

Dirección General de  
Protección Civil y Emergencias

Red Radio de Emergencia - REMER

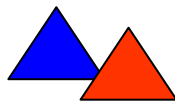
## Control de modificaciones

Edición	Descripción de la modificación	Fecha
1	Primera versión	16/11/2010
1b	Ampliación de apartados 4.1.5 y 5	18/11/2010
2	Versión para distribución	18/11/2010



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	5
2.	CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA ESPACIAL .....	7
2.1.	Fenómenos físicos y magnéticos en el Sol .....	7
2.2.	Campo magnético interplanetario (IMF) .....	13
2.3.	Viento solar .....	13
2.4.	Ciclo solar .....	15
2.5.	Campo geomagnético y magnetosfera .....	18
2.6.	Tormentas de radiación solar .....	20
2.7.	Tormentas geomagnéticas .....	23
3.	RIESGOS DERIVADOS DEL CLIMA ESPACIAL .....	28
3.1.	Riesgos para las personas .....	30
3.2.	Riesgos en los satélites artificiales .....	30
3.3.	Riesgos en sistemas de telecomunicaciones .....	33
3.4.	Riesgos en redes de transporte eléctrico y de combustible .....	39
3.5.	Eventos históricos.....	41
4.	SISTEMAS DE OBSERVACIÓN Y ALERTA TEMPRANA.....	47
4.1.	Centros de estudio, seguimiento y predicción .....	47
4.2.	Tecnología de monitorización del clima espacial .....	55
4.3.	Difusión de alertas y predicciones.....	65
5.	REFERENCIAS .....	69
6.	GLOSARIO .....	72
7.	PUNTO DE CONTACTO .....	75

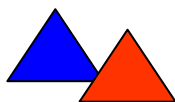


## Índice de figuras

Figura	Descripción	Página
1	Estructura y procesos de liberación de energía en el Sol	8
2	Lazo magnético solar	10
3	Prominencia solar	10
4	Llamarada solar	11
5	CME dirigida a la Tierra (Coronógrafo SOHO, 22 de octubre de 2003)	12
6	Medidor de la velocidad del viento solar (Universidad de Rice)	14
7	Evolución cíclica del número de manchas solares	16
8	Representación del campo geomagnético	19
9	Magnetosfera terrestre	20
10	Incidencia de eventos con Kp=8 y Kp=9 por mes (World Data Center for Geomagnetism)	26
11	Anomalías y fallos en satélites entre 1993 y 2007 (Northrop Grumman)	32
12	Iniciativas europeas relacionadas con el clima espacial (Rutherford Appleton Laboratory)	50
13	Misiones encargadas de la recolección de datos heliofísicos (NASA)	56
14	La tormenta del día de la Bastilla registrada por ACE/SWEPAM (NASA)	58
15	CME causante de la tormenta del día de la Bastilla, registrada por SOHO (NASA)	59
16	Prominencia solar detectada por las sondas STEREO (NASA)	60
17	Imagen combinada del Sol en tres longitudes de onda distintas (SDO/NASA)	62
18	Erupciones solares de la tormenta del día de la Bastilla, registradas por GOES (NOAA)	63
19	Monitorización de la tormenta de Halloween (NOAA)	64
20	Ejemplo de alerta geomagnética (IPS)	68

## Índice de tablas

Tabla	Descripción	Página
1	Intensidad de las erupciones solares	12
2	Cronología de los ciclos solares	17
3	Escala NOAA de tormentas de radiación solar	21
4	Índices de perturbación del campo geomagnético A y Ap	24
5	Índices de perturbación del campo geomagnético K y Kp	25
6	Escala NOAA de tormentas geomagnéticas	26
7	Posibles efectos de las erupciones solares en las distintas bandas de radio	33
8	Escala NOAA de apagones de radio	38
9	Severidad de las GIC en función de la intensidad de una tormenta geomagnética	40



## 1. INTRODUCCIÓN

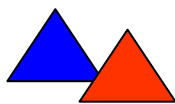
El Sol interactúa física y magnéticamente con todos los objetos del Sistema Solar, ya sean naturales o artificiales, con un nivel de actividad que sigue un ciclo de máximos y mínimos que se repiten aproximadamente cada 11 años y que da lugar a lo que en terminología inglesa se conoce como *space weather*, traducido al español como **clima espacial** y en ocasiones como meteorología espacial.

En las épocas de actividad máxima, los efectos físicos y magnéticos sobre la propia Tierra y sobre los dispositivos eléctricos y electrónicos desarrollados por el hombre, pueden tener un impacto significativo, incluso provocando serios daños. Por su probabilidad de ocurrencia y su impacto social, este tipo de eventos se clasifican científicamente como de baja frecuencia / alto impacto (LF/HC, *Low-Frequency/High-Consequence*), es decir:

- Tienen un periodo de retorno muy elevado, que no fuerza a la sociedad a disponer de planes de contingencia actualizados.
- Tienen grandes probabilidades de tener un acusado impacto social por los daños que pueden causar en sistemas tecnológicos cada vez más interdependientes.

Entre los sistemas potencialmente afectados por el clima espacial figuran la geolocalización, las telecomunicaciones, las operaciones vía satélite, el seguimiento espacial, la radionavegación, las redes eléctricas y las redes de transporte de combustible.

En la actualidad, los riesgos derivados del clima espacial son objeto de extensivos estudios en varios países del mundo, tomando en consideración el análisis de eventos pasados y su posible impacto, caso de repetirse con mayor o menor intensidad, en los actuales sistemas tecnológicos cada vez más extensos e interdependientes. Por ejemplo, en mayo de 2008 y bajo el auspicio del Panel de Estudios Espaciales del Consejo Nacional de Investigación de Estados Unidos (*NRC, National Research Council - Space Studies Board*), se celebraron una serie de conferencias para determinar el impacto socioeconómico de los eventos extremos del



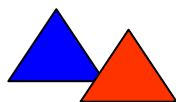
clima espacial, en las que participaron representantes gubernamentales, académicos y de la industria. Como resultado de dichas conferencias, el NRC publicó un informe titulado "*Severe Space Weather Events. Understanding Societal and Economic Impacts Workshop Report*" [1], que refleja claramente cuáles son los riesgos derivados del clima espacial y qué acciones se están tomando al respecto en los Estados Unidos.

Este mismo Panel de Estudios Espaciales también ha diseñado una estrategia a diez años (2013-2022) para identificar las prioridades científicas en las áreas de investigación y desarrollo sobre la física solar y del espacio en dicho país [2].

También en Estados Unidos, desde el año 1994 está en marcha el Programa Nacional del Clima Espacial (*National Space Weather Program, NSWP*), iniciativa puesta en marcha por varias agencias gubernamentales para acelerar el perfeccionamiento de los servicios relacionados con el clima espacial y cuyo fundamento es promover las sinergias necesarias para conseguir un activo sistema conjunto que proporcione alertas precisas, fiables y temporizadas, observaciones, especificaciones y predicciones sobre el clima espacial. Forman parte de este programa los Departamentos de Comercio, Defensa, Energía, Interior, Transporte y Asuntos Exteriores, además de la NASA y la Fundación Nacional de las Ciencias [3], lo que demuestra el especial interés que la administración norteamericana presta a los asuntos relacionados con el clima espacial.

La preocupación en Estados Unidos sobre los riesgos derivados del clima espacial ha llegado a plasmarse a nivel legislativo a través de la "*Grid Reliability and Infrastructure Defense Act*" [4], acta en la que se ponen de manifiesto las vulnerabilidades de la red de transporte eléctrico norteamericana ante eventos como pulsos electromagnéticos o tormentas geomagnéticas.

En este informe se realiza una caracterización del clima espacial, evaluando los riesgos derivados del mismo en los periodos de máxima actividad solar y describiendo los sistemas de observación y alerta temprana actualmente en servicio. Se finaliza con un apartado de referencias y un glosario.



## 2. CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA ESPACIAL

El **clima espacial** es el conjunto de fenómenos físicos y magnéticos derivados de la actividad solar y su interacción con el campo magnético terrestre o campo geomagnético.

En este apartado se describen todos los elementos y fenómenos relacionados con el clima espacial, desde el punto de vista del Sol, de la Tierra y del espacio ocupado entre ambos astros.

### 2.1. Fenómenos físicos y magnéticos en el Sol

En el interior del Sol tienen lugar procesos dinámicos de **fusión nuclear** del hidrógeno, estimándose que generan unos  $3,8 \times 10^{23}$  Watios de potencia en promedio.

El Sol está compuesto, básicamente, en un 90% por hidrógeno y en algo menos de un 10% por helio, contribuyendo al porcentaje restante elementos como carbono, oxígeno y hierro [5]. En el centro del Sol, hasta una distancia de 0,3 veces el radio solar, la temperatura es lo suficientemente elevada como para provocar la fusión de protones en los núcleos de helio. La energía liberada en estos procesos se difunde hacia el exterior del Sol en forma de **rayos X**, radiación que puede cambiar de frecuencia al atravesar los gases que rodean el núcleo.

En la fig.1 se muestra un gráfico de los diferentes procesos de transporte de energía dentro del Sol, así como de la disposición de las diferentes regiones.

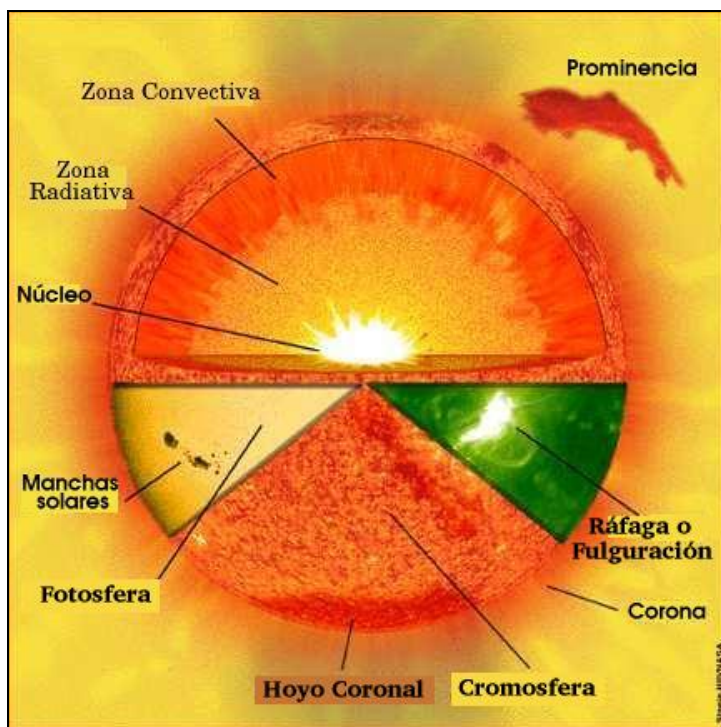
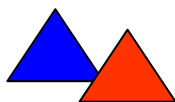


Fig.1. Estructura y procesos de liberación de energía en el Sol.

A una distancia de 0,7 veces el radio solar, la energía deja de propagarse por difusión y comienza a propagarse por convección. Los gases calientes siguen alejándose del núcleo, haciéndose menos densos y radiando la energía que transportan hacia el espacio exterior. La zona en la que se producen estos procesos de radiación se denomina **fotosfera** y forma la aparente superficie solar visible desde la Tierra.

Sobre la fotosfera existe otra capa formada por gases transparentes, llamada **cromosfera**, que solamente es visible en casos de eclipses totales o mediante el empleo de instrumentos especiales llamados **coronógrafos**, que permiten ocultar a la fotosfera. Finalmente, sobre la cromosfera existe otra capa denominada **corona solar**, que es observable en las mismas condiciones que la cromosfera. La temperatura de la corona solar hace que en la práctica esta región sea un plasma muy ionizado, comportándose como un conductor eléctrico excelente.





Como consecuencia de las corrientes eléctricas generadas en los procesos anteriormente descritos, en el Sol también se generan **campos magnéticos** de gran intensidad. Existen regiones en la que se radia aproximadamente la mitad de la energía que en el resto de la superficie solar, por efecto dichos campos magnéticos solares: cuando un campo magnético lo suficientemente fuerte emerge de la superficie solar como consecuencia de los procesos dinámicos que ocurren en su interior, la zona en la que este campo emerge puede enfriarse, pasando de unos 6.000 °C a unos 4.200 °C. A la vista, esta zona aparecerá algo más oscura que su entorno más caliente, dando la apariencia de una mancha. Las **manchas solares** pueden formarse y disiparse en periodos comprendidos entre varios días y pocas semanas y rotan con el resto de la superficie solar.

En ocasiones, se producen agrupaciones de manchas solares con campos magnéticos muy complejos que pueden dar lugar a la liberación de elevadas cantidades de energía. En este sentido, podemos distinguir cuatro tipos de fenómenos:

- Lazos magnéticos (*magnetic loops*).
- Prominencias solares (*solar prominences*).
- Erupciones o llamaradas solares (*flares*).
- Eyecciones de masa coronal (*Coronal Mass Ejections, CME*).

Los **lazos magnéticos** (fig.2) son grandes cantidades de plasma que siguen líneas del campo magnético solar que salen y entran del Sol. No tienen efectos significativos en la Tierra en lo que respecta a las radiocomunicaciones.

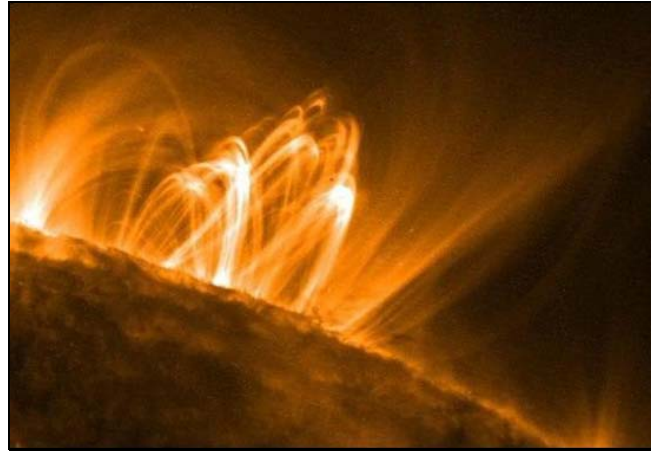


Fig.2. Lazo magnético solar.

Las **prominencias solares** (fig.3) son similares a los lazos magnéticos pero de dimensiones mucho mayores. En ocasiones, se puede producir un efecto de explosión que expande las partículas del plasma, incorporándolas al viento solar y pudiendo impactar en la magnetosfera terrestre.

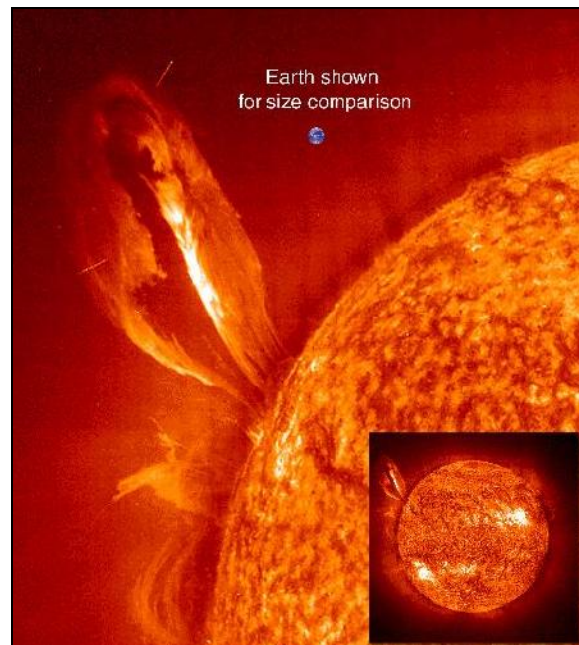
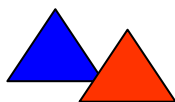


Fig.3. Prominencia solar.



Las **llamaradas o fulguraciones solares** (fig.4) son explosiones de gran intensidad que se producen en el Sol y que liberan enormes cantidades de materia y radiación. Pueden tener una duración del orden de pocos minutos a varias horas y provocan un aumento en la intensidad de radiación de Sol en los rangos del UV corto, de los rayos gamma y de los rayos C. Las llamaradas solares pueden observarse con instrumentos ópticos desde la Tierra o desde sondas espaciales y dan lugar a intensos niveles de ruido en las bandas de radio de HF.



Fig.4. Llamarada solar.

Algunas llamaradas solares liberan gran cantidad de protones que pueden alcanzar la Tierra en unos 30 minutos. Al llegar a la Tierra, comienzan a moverse siguiendo una trayectoria espiral a lo largo de las líneas del campo geomagnético, penetrando en las capas altas de la ionosfera, donde aumentan los niveles de ionización.

Finalmente, el evento de actividad solar más impresionante y que libera mayores cantidades de energía lo constituyen las **eyecciones de masa coronal** (CME, *Coronal Mass Ejections*). La atmósfera solar interna (cromosfera) puede liberar grandes llamaradas o lenguas de gas caliente y campos magnéticos que pueden observarse en la atmósfera solar exterior o corona en forma de explosiones espectaculares (fig.5). Las eyecciones de masa coronal liberan una gran cantidad de helio, electrones y partículas ionizadas, como hierro [6],

que viajan a altísimas velocidades, de hasta 3000 km/s, impactando en los planetas del Sistema Solar y en los satélites artificiales.

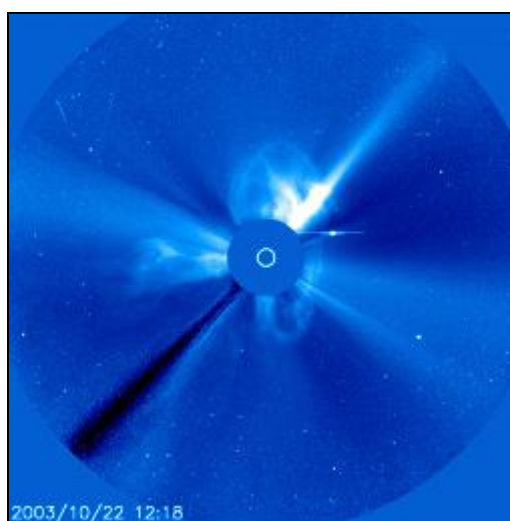
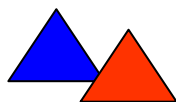


Fig.5. CME dirigida a la Tierra (Coronógrafo SOHO, 22 de octubre de 2003).

Las eyecciones de masa coronal son los fenómenos solares con mayor impacto en las radiocomunicaciones en HF, pudiendo provocar niveles de absorción muy altos en la ionosfera. Este fenómeno se conoce como "**apagón de HF**" (*HF radio blackout*).

La **intensidad de las erupciones solares** se cuantifica midiendo el flujo de potencia liberado en el rango frecuencial comprendido entre 0,1 y 0,8 nm (rayos X), según la escala que se muestra en la tabla 1.

Tamaño de la erupción	Flujo de potencia liberado en rayos X ( $W/m^2$ )
X	$< 10^{-3}$
X20	$20 \times 10^{-4}$
X10	$10 \times 10^{-4}$
X6	$6 \times 10^{-4}$
M	$< 10^{-4}$



Tamaño de la erupción	Flujo de potencia liberado en rayos X ( $W/m^2$ )
C	$< 10^{-5}$
B	$< 10^{-6}$
A	$< 10^{-7}$

Tabla 1. Intensidad de las erupciones solares.

## 2.2. Campo magnético interplanetario (IMF)

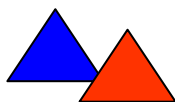
El campo magnético del Sol sigue dos tipos de líneas: cerradas, que comienzan y terminan en la propia fotosfera, y abiertas, que comienzan en el Sol y se abren hacia el espacio exterior, dando lugar al **campo magnético interplanetario (IMF)**. Debido a la rotación del Sol (una rotación cada 27 días), el IMF sigue una trayectoria helicoidal, conocida como espiral de Parker

Cuando este campo magnético llega a la Tierra, incide con un ángulo de inclinación comprendido entre unos  $45^\circ$  y unos  $90^\circ$  respecto al plano de la eclíptica.

El IMF puede perturbar al campo magnético terrestre, dando lugar a tormentas geomagnéticas que afectan a las comunicaciones en HF. Se representa como **Bt** y su intensidad se mide en Teslas (T). Este campo puede modelarse vectorialmente, denominándose **Bz** la componente perpendicular a los polos terrestres. Si la componente Bz tiene sentido opuesto al del campo magnético terrestre y es de intensidad suficiente, favorece la llegada del viento solar a la ionosfera y se produce la aparición de **auroras boreales**.

## 2.3. Viento solar

Los procesos dinámicos que se producen en el Sol pueden generar **agujeros coronales**, consistentes en células de campos magnéticos unipolares en la superficie solar, cuyas líneas de campo se extienden a lo largo de todo el sistema solar. Los agujeros coronales,



que se ven como manchas oscuras en el espectro de los rayos X, generan un **campo magnético** que arrastra a partículas cargadas eléctricamente, dando lugar al **viento solar**.

En ocasiones, tras una erupción solar se pueden producir eventos explosivos de partículas solares (SPE, *Solar Particle Events*), que liberan protones y electrones a altas velocidades, incorporándose al viento solar.

Uno de los efectos visibles del viento solar se aprecia en las colas de los cometas, que siempre están orientadas en sentido opuesto al Sol.

### 2.3.1. Velocidad del viento solar.

En situaciones de tranquilidad, la **velocidad** media del viento solar suele estar comprendida entre los 250 km/s y los 400 km/s. En casos de actividad solar moderada, se genera mayor cantidad de plasma solar y a mayores velocidades, de hasta 700 km/s. Finalmente, las eyecciones de masa coronal (CME) pueden generar un viento solar de velocidad igual o superior a los 1000 km/s.

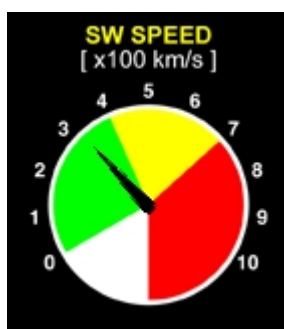
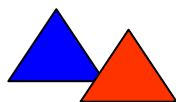


Fig.6. Medidor de la velocidad del viento solar (Universidad de Rice).

En la fig.6 se muestra un medidor de velocidad del viento solar utilizado en la Universidad Rice (EE.UU), a partir de datos obtenidos por la astronave SOHO. El medidor incluye una escala gráfica que permite asociar cada rango de velocidad a un nivel de actividad



solar: la zona verde indica tranquilidad, la amarilla actividad moderada y la roja actividad elevada (CME).

### 2.3.2. Densidad del viento solar.

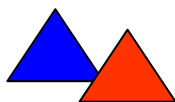
Conforme el viento solar progresa alejándose del Sol, su densidad disminuye de forma proporcional al cuadrado de la distancia al Sol. Durante eventos importantes de actividad solar, como llamaradas, prominencias solares y eyecciones de masa coronal, la densidad del viento solar aumenta y el grado de afectación a la ionosfera será mayor cuando el mismo alcance la Tierra.

## 2.4. Ciclo solar

Se ha comprobado que la actividad solar sigue periodos de **unos 11 años** de duración. Cada uno de estos periodos se denomina **ciclo solar** y puede identificarse por la polaridad magnética de las manchas solares: las manchas de un hemisferio solar determinado (Norte o Sur) tendrán la misma polaridad en el transcurso de un ciclo, mientras que las manchas del hemisferio opuesto tendrán polaridad inversa.

Cuando concluye cada ciclo de 11 años, el Sol invierte su polaridad y las manchas a su vez invierten su orientación. En los mínimos de cada ciclo solar el número de manchas solares se reduce sustancialmente, pudiendo éstas incluso desaparecer. Así mismo, disminuye el número de tormentas solares, la máxima frecuencia utilizable (MUF, *Maximum Usable Frequency*) es baja y las bandas más altas de HF tienen condiciones pobres de propagación. En las temporadas altas del ciclo solar, conocidas como **máximos solares**, la MUF es más alta y aumenta la probabilidad de aparición de tormentas solares.





Una forma de **cuantificar la actividad del Sol** en un instante determinado viene dada, por tanto, por la contabilización del **número de manchas solares** (SSN, *Sun Spot Number*), que puede realizarse a través de diversos métodos:

- Número de Wolf.
- Número de Manchas Solares Internacional (ISN, *International Sunspot Number*), compilado por el centro SIDC en Bélgica.
- Número americano relativo de manchas solares.
- Datos antiguos sobre manchas solares.
- Números de Grupos de manchas solares.

En la gráfica de la fig.7, elaborada por el Centro de Análisis de Datos de Influencias Solares de Bélgica (SIDC), se puede observar la evolución del ciclo solar a través de la contabilización del número de manchas solares, que se repite cada 11 años.

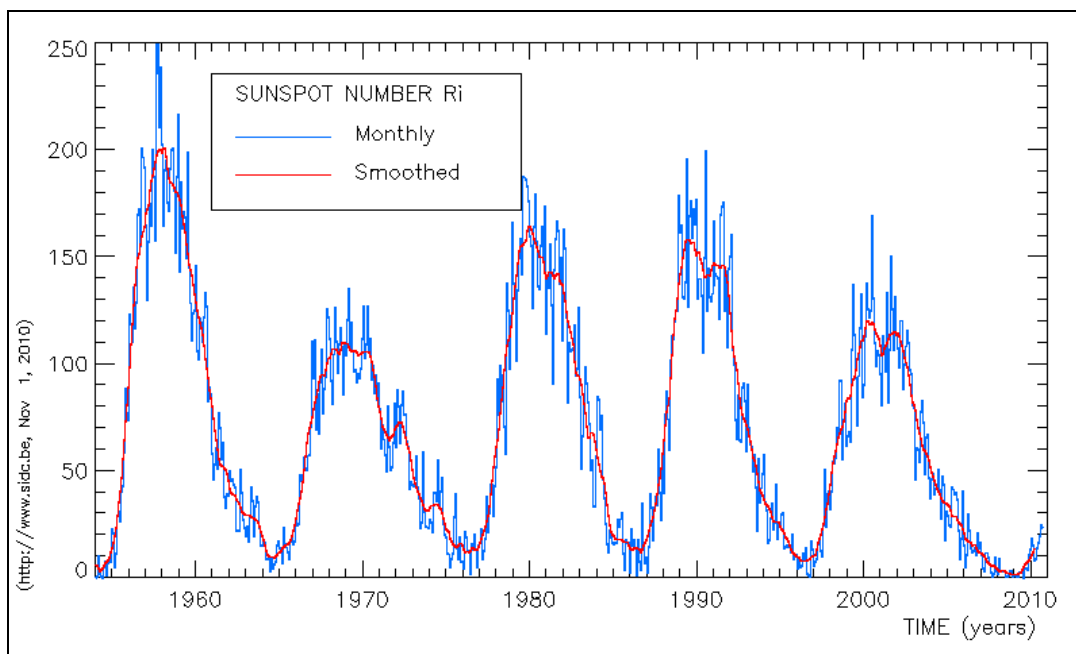
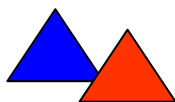


Fig.7. Evolución cíclica del número de manchas solares.

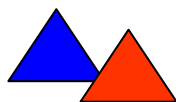




Los ciclos solares se identifican con un número correlativo desde el año 1755, en el que se comenzó a contabilizar de forma científica el número de manchas solares. En la tabla 2 se muestran las fechas de inicio y finalización de cada ciclo, así como el número máximo de manchas solares (media móvil mensual) y las fechas en las que fueron observadas [7], que se corresponden con los periodos de máximos solares.

Nº ciclo	Inicio	Finalización	Duración (años)	Nº máx. manchas solares	Fecha máximo
1	Mar 1755	Jun 1766	11,3	86,5	Sin datos
2	Jun 1766	Jun 1775	9,0	115,8	Sin datos
3	Jun 1775	Sep 1784	9,3	158,5	Sin datos
4	Sep 1784	May 1798	13,7	141,1	Sin datos
5	May 1798	Dic 1810	12,6	49,2	Sin datos
6	Dic 1810	May 1823	12,4	48,7	Sin datos
7	May 1823	Nov 1833	10,5	71,5	Sin datos
8	Nov 1833	Jul 1843	9,8	146,9	Sin datos
9	Jul 1843	Dic 1855	12,4	131,9	Sin datos
10	Dic 1855	Mar 1867	11,3	97,3	Sin datos
11	Mar 1867	Dic 1878	11,8	140,3	Sin datos
12	Dic 1878	Mar 1890	11,3	74,6	Sin datos
13	Mar 1890	Feb 1902	11,9	87,9	Ene 1894
14	Feb 1902	Ago 1913	11,5	64,2	Feb 1906
15	Ago 1913	Ago 1923	10,0	105,4	Ago 1917
16	Ago 1923	Sep 1933	10,1	78,1	Abr 1928
17	Sep 1933	Feb 1944	10,4	119,2	Abr 1937
18	Feb 1944	Abr 1954	10,2	151,8	May 1947
19	Abr 1954	Oct 1964	10,5	201,3	Mar 1958
20	Oct 1964	Jun 1976	11,7	110,6	Nov 1968
21	Jun 1976	Sep 1986	10,3	164,5	Dic 1979
22	Sep 1986	May 1996	9,7	158,5	Jul 1989
23	May 1996	Dic 2008	12,6	120,8	Mar 2000
24	Dic 2008				

Tabla.2. Cronología de los ciclos solares.



Otra forma de cuantificar la actividad del Sol es a través del **índice de flujo solar** (SFI, *Solar Flux Index*). El SFI se define como el nivel de flujo de radiación solar registrado en 2.800 MHz (banda de 10,7 cm), expresado en unidades de flujo, equivalentes a  $10^{-22}$  vatios por metro cuadrado y herzio.

El SFI tiene gran correlación con el número de manchas solares. Puede alcanzar valores de 50 en la época baja del ciclo solar y subir hasta 400 en la época alta.

#### 2.4.1. El ciclo solar 24.

El máximo solar del ciclo 24, en el que actualmente nos encontramos, está previsto entre los meses de **julio y agosto de 2012** y se estima que podría ser entre un 30% y un 40% más intenso que el máximo del ciclo 23 [8], según un modelo de dinamo de transporte de flujo que ha ofrecido buenos resultados en la predicción de los máximos en los ciclos 16-23. No obstante, otras predicciones basadas en el método de precursores del campo polar o mediante relaciones entre el número de manchas solares y la duración de los ciclos solares indican que la actividad solar será más moderada que la del ciclo 23 [9].

Considerando el retraso con el que ha comenzado el ciclo 24, en sus últimas predicciones la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera de los Estados Unidos (NOAA) retrasa la previsión del máximo del ciclo solar 24 hasta el año **2013** [10].

## 2.5. Campo geomagnético y magnetosfera

La Tierra tiene un campo magnético propio, llamado **campo geomagnético**, con una intensidad media de 40 A/m, que hace que la ionosfera se comporte como un medio anisótropo, es decir, con propiedades distintas en distintas direcciones. El origen de este campo magnético se atribuye al efecto combinado de la rotación de la Tierra y del movimiento del hierro fundido en su núcleo.

El campo geomagnético sigue unas líneas imaginarias que salen del polo Sur magnético, rodean a la Tierra y entran por el polo Norte magnético, como se muestra en la fig.8. Este campo es el responsable, por ejemplo, de que una brújula nos dé siempre la dirección del norte magnético.

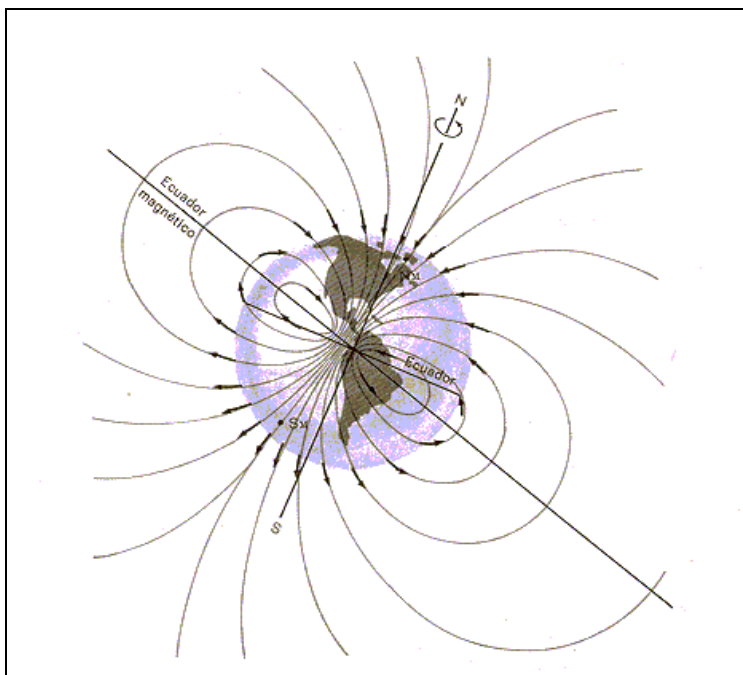


Fig.8. Representación del campo geomagnético.

El comportamiento de la ionosfera depende enormemente de las variaciones que se producen en el campo geomagnético. La región en torno a la Tierra donde se encuentra dicho campo se denomina **magnetosfera** y funciona como **escudo** ante el viento solar y el campo magnético interplanetario (IMF). La interacción entre el campo geomagnético, el viento solar y el IMF provoca que la magnetosfera tenga forma de gota, estrechándose en el sentido opuesto al Sol, como se muestra en la fig.9.

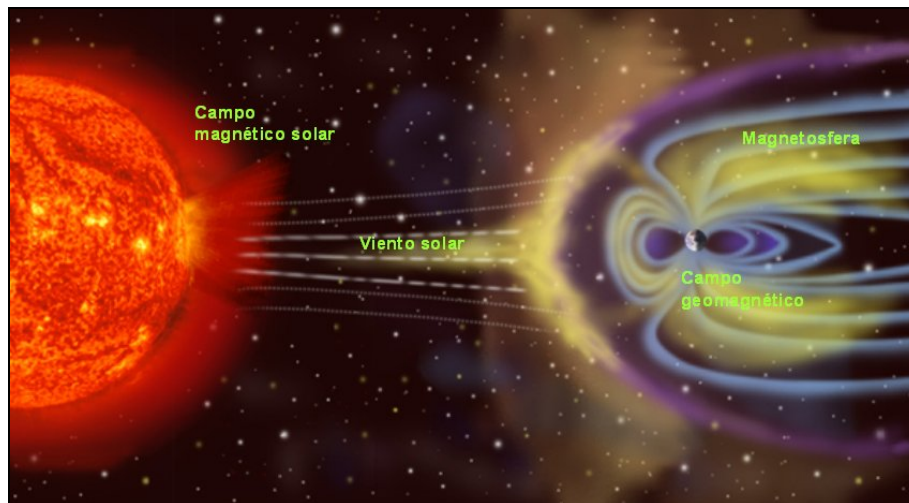


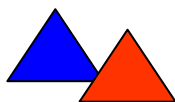
Fig.9. Magnetosfera terrestre.

El estado del campo geomagnético puede medirse con unos instrumentos denominados **magnetómetros**.

## 2.6. Tormentas de radiación solar

Una **tormenta de radiación solar**, o simplemente tormenta solar, es la perturbación de la ionosfera y de los objetos ubicados entre el Sol y la Tierra, producida por el viento solar, tras un evento de actividad solar que genera protones de energía superior a 10 MeV (a veces del orden de los GeV).

Las llamaradas solares y las eyecciones de masa coronal del Sol provocan una enorme onda de choque magnetohidrodinámica que empuja a las partículas solares energéticas (SPE, *Solar Energetic Particles*), incorporándolas al viento solar a altísimas velocidades, cercanas a la velocidad de la luz y haciendo de este modo que puedan alcanzar a la Tierra en poco tiempo [1].

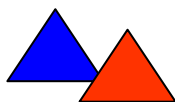


Las tormentas de radiación solar suelen tardar en llegar a la Tierra entre 15 minutos y varias horas y pueden tener una duración de varios días [11]. Provocan incrementos anómalos en la absorción de las ondas de radio de la banda de HF en las zonas polares, fenómeno conocido con el nombre de PCA (*Polar Cap Absorption*).

### 2.6.1. Escala NOAA de tormentas de radiación solar.

La NOAA ha diseñado una escala para cuantificar la intensidad y los efectos de las tormentas de radiación solar, que se muestra en la tabla 3. La escala tiene 5 posibles valores directamente relacionados con las mediciones del flujo de partículas con un nivel energético superior a 10 MeV, facilitándose además la frecuencia con la que los eventos de cada tipo pueden ocurrir dentro de un mismo ciclo solar de 11 años.

Categoría		Efectos	Parámetro físico	Frecuencia promedio
Escala	Descriptor	La duración del evento influye en la severidad de los efectos	Flujo de iones con más de 10 MeV	Nº de eventos con el nivel de flujo indicado
S5	Extrema	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Biológicos:</b> Riesgo inevitable de exposición a la radiación para astronautas en actividades extravehiculares (EVA). Los pasajeros y la tripulación de aviones volando a elevada altitud en latitudes elevadas pueden quedar expuestos a riesgos de radiación.</li><li>• <b>Operaciones de sistemas espaciales:</b> Los satélites pueden quedar inoperativos. El impacto en las memorias digitales puede causar pérdida de control. Elevados niveles de ruido en la transmisión de imágenes. Imposibilidad de localizar fuentes en los sistemas de seguimiento estelar y posibles daños permanentes en los paneles solares.</li><li>• <b>Radiocomunicaciones:</b> Posibles apagones totales en las bandas de HF, especialmente a través de las regiones polares.</li><li>• <b>Radionavegación:</b> Extremadamente difícil por errores de</li></ul>	10 <sup>5</sup>	Menos de 1 por ciclo

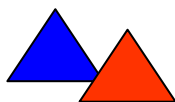


RIESGOS DERIVADOS DEL  
CLIMA ESPACIAL

Dirección General de  
Protección Civil y Emergencias

Red Radio de Emergencia - REMER

		posicionamiento.		
S4	Severa	<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Biológicos</u>: Riesgo inevitable de exposición a la radiación para astronautas en actividades extravehiculares (EVA). Los pasajeros y la tripulación de aviones volando a elevada altitud en latitudes elevadas tienen riesgo de exposición a la radiación.</li><li>• <u>Operaciones de sistemas espaciales</u>: Pueden experimentar problemas en las memorias digitales y ruido en la transmisión de imágenes. Posibles problemas de orientación en sistemas de seguimiento estelar. La eficiencia de los paneles solares puede degradarse.</li><li>• <u>Radiocomunicaciones</u>: Posibles apagones en las bandas de HF, especialmente a través de las regiones polares, durante varios días.</li><li>• <u>Radionavegación</u>: Aumento de errores en los sistemas de radionavegación, durante varios días.</li></ul>	10 <sup>4</sup>	3 por ciclo
S3	Fuerte	<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Biológicos</u>: Se recomienda a los astronautas que realizan actividades extravehiculares (EVA) que tomen medidas de protección ante el riesgo de exposición a la radiación. Los pasajeros y la tripulación de aviones volando a elevada altitud en latitudes elevadas tienen riesgo de exposición a la radiación.</li><li>• <u>Operaciones de sistemas espaciales</u>: Eventos aislados de degradación. Ruido en la transmisión de imágenes. Posibles degradaciones menores en la eficiencia de los paneles solares.</li><li>• <u>Radiocomunicaciones</u>: Posible degradación de la propagación en las bandas de HF, especialmente a través de las regiones polares.</li><li>• <u>Radionavegación</u>: Posible aumento de errores en los sistemas de radionavegación.</li></ul>	10 <sup>3</sup>	10 por ciclo
S2	Moderada	<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Biológicos</u>: Los pasajeros y la tripulación de aviones volando a elevada altitud en latitudes elevadas tienen riesgo de exposición a la radiación.</li><li>• <u>Operaciones de sistemas espaciales</u>: Eventos poco frecuentes de degradación en los sistemas.</li><li>• <u>Radiocomunicaciones</u>: Pequeños efectos en la propagación en las bandas de HF, especialmente a través de las regiones polares.</li></ul>	10 <sup>2</sup>	25 por ciclo



		<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Radionavegación</u>: Pequeño aumento en los errores de los sistemas de radionavegación, especialmente en regiones polares.</li></ul>		
S1	Menor	<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Biológicos</u>: Ninguno.</li><li>• <u>Operaciones de sistemas espaciales</u>: Ninguno.</li><li>• <u>Radiocomunicaciones</u>: Efectos menores en la propagación en las bandas de HF a través de las regiones polares.</li></ul>	10	50 por ciclo

Tabla 3. Escala NOAA de tormentas de radiación solar.

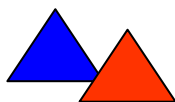
## 2.7. Tormentas geomagnéticas

Entre uno y cuatro días tras una erupción solar o una eyección de masa coronal, una nube de material solar y su campo magnético interplanetario asociado alcanzan la Tierra, saturando la ionosfera y causando una **tormenta geomagnética** que provoca modificaciones en la magnetosfera [12]. El efecto es más intenso en regiones ecuatoriales y por encima de los 10 MHz, teniendo duraciones de hasta varios días [11].

Las tormentas geomagnéticas, por tanto, son más frecuentes en periodos de elevada actividad solar, sobre todo tras eventos de eyecciones de masa coronal (CME). Las ondas de radio de determinadas frecuencias estarán sujetas a mayor absorción, hecho que puede provocar desvanecimientos rápidos y trayectos de propagación poco comunes.

Para que una eyección de masa coronal originada en el Sol provoque una tormenta geomagnética en la Tierra, deben darse tres condiciones [1]:

- La CME ha de originarse en la zona central del Sol, con una trayectoria tal que impacte en la magnetosfera terrestre.



- Ha de ser rápida, con velocidades superiores a 1000 km/s y masiva, teniendo por tanto una elevada energía cinética.
- Ha tener asociado un campo magnético interplanetario que al llegar a la Tierra sea opuesto al campo geomagnético.

El primer indicador de una tormenta geomagnética en la Tierra es un cambio brusco en la componente norte del campo geomagnético, fenómeno conocido como Inicio Repentino de Tormenta (*SSC, Storm Sudden Commencement*) y que tiene lugar casi simultáneamente en todo el planeta, con magnitudes que pueden variar localmente.

### 2.7.1. Índices de perturbación del campo geomagnético ( $A_p$ , $K_p$ ).

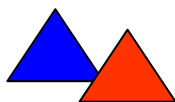
Para medir el grado de perturbación del campo geomagnético como consecuencia de su interacción con el campo magnético interplanetario y el viento solar, se utilizan unos instrumentos denominados **magnetómetros**, cuyos datos dan lugar a dos índices de perturbación denominados K y A.

El **índice geomagnético "A"** muestra la perturbación del campo geomagnético a nivel local. Puede tener los niveles y significados que se indican en la tabla 4. El **índice geomagnético planetario "A<sub>p</sub>"** se deriva a partir de las mediciones del índice geomagnético "A" realizadas por diversas estaciones repartidas por toda la Tierra. Puede tener los mismos valores y significados que el índice "A".

Valor de A o A <sub>p</sub>	Significado
$0 < A_p < 30$	Campo geomagnético tranquilo
$30 < A_p < 50$	Tormenta solar menor
$50 < A_p < 100$	Tormenta solar mayor
$A_p \geq 100$	Tormenta solar severa

Tabla.4. Índices de perturbación del campo geomagnético A y A<sub>p</sub>.





El **índice geomagnético "K"**, de tipo cuasi-logarítmico, muestra la perturbación del campo geomagnético a nivel local, tomando como referencia la curva de un día tranquilo en la estación de medición. Puede tener los niveles y significados que se muestran en la tabla 5.

Valor de K o Kp	Significado
0	Campo geomagnético inactivo
1	Campo geomagnético muy tranquilo
2	Campo geomagnético tranquilo
3	Campo geomagnético intranquilo
4	Campo geomagnético activo
5	Tormenta solar menor
6	Tormenta solar mayor
7	Tormenta solar severa
8	Tormenta solar muy severa
9	Tormenta solar extremadamente severa

Tabla 5. Índices de perturbación del campo geomagnético K y Kp.

El **índice geomagnético planetario "Kp"** se deriva a partir de las mediciones del índice geomagnético "K" realizadas por diversas estaciones repartidas por toda la Tierra. Puede tener los mismos valores y significados que el índice "K".

Los registros históricos de unas 222.000 mediciones del índice Kp realizadas entre los años 1932-2007, apuntan a que las tormentas geomagnéticas más intensas se concentran en la primavera y el otoño, como se muestra en la fig.10 [1].

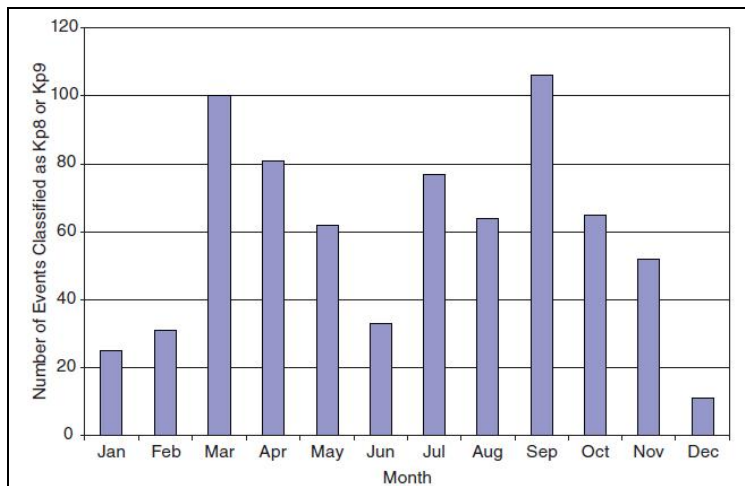
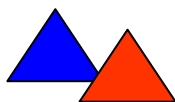
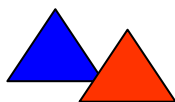


Fig.10. Incidencia de eventos con Kp=8 y Kp=9 por mes (World Data Center for Geomagnetism).

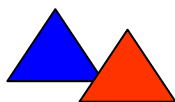
### 2.7.2. Escala NOAA de tormentas geomagnéticas.

La agencia NOAA de los Estados Unidos ha diseñado una escala para cuantificar la intensidad y los efectos de las tormentas geomagnéticas, que se muestra en la tabla 6. La escala tiene 5 posibles valores directamente relacionados con las mediciones del índice geomagnético interplanetario cada 3 horas, facilitándose además la frecuencia con la que los eventos de cada tipo pueden ocurrir dentro de un mismo ciclo solar de 11 años.

Categoría		Efectos	Parámetro físico	Frecuencia promedio
Escala	Descriptor	La duración del evento influye en la severidad de los efectos	Kp cada 3 horas	Nº de tormentas por ciclo solar
G5	Extrema	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>Transporte y distribución de electricidad</u>: Problemas con el control del voltaje y los sistemas de protección. Algunas redes de transmisión pueden colapsar (apagones) y los transformadores pueden llegar a sufrir daños.</li> <li><u>Operaciones espaciales</u>: Inducción de carga eléctrica superficial extensiva, dificultades con la orientación, problemas con los enlaces ascendente/descendente y el seguimiento de satélites.</li> </ul>	Kp = 9	4 por ciclo (4 días por ciclo)



		<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Transporte y distribución de combustibles</u>: La corriente inducida en las redes de combustibles es de cientos de Amperios.</li><li>• <u>Radiocomunicaciones</u>: En áreas extensas se bloquean las ondas de radio de alta frecuencia (HF) durante varios días.</li><li>• <u>Radionavegación</u>: La navegación por satélite se ve afectada durante un intervalo similar. La navegación mediante señales de baja frecuencia se bloquea durante horas.</li><li>• <u>Auroras</u>: Observaciones hasta 40° de latitud geomagnética.</li></ul>		
G4	Severa	<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Transporte y distribución de electricidad</u>: Posibles problemas de control del voltaje y en los sistemas de protección. Funcionamiento irregular de las redes de transmisión.</li><li>• <u>Operaciones de sistemas espaciales</u>: Posibilidad de inducción de carga eléctrica superficial. Dificultades con el seguimiento. Problemas de orientación que podrían requerir correcciones.</li><li>• <u>Transporte y distribución de combustibles</u>: Afección a las medidas preventivas sobre inducción eléctrica en las redes de distribución.</li><li>• <u>Radiocomunicaciones</u>: La propagación de las señales de radio de HF se abre sólo esporádicamente.</li><li>• <u>Radionavegación</u>: Navegación por satélite afectada durante varias horas. Afección a la navegación por señales de baja frecuencia.</li><li>• <u>Auroras</u>: Observaciones hasta 45° de latitud geomagnética.</li></ul>	Kp = 8 ~ 9	100 por ciclo (60 días por ciclo)
G3	Fuerte	<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>Transporte y distribución de electricidad</u>: Se podrían requerir acciones de control del voltaje. Falsas alarmas en los sistemas de protección. Funcionamiento irregular de la red de distribución.</li><li>• <u>Operaciones de sistemas espaciales</u>: Puede darse inducción de carga eléctrica superficial en los componentes de los satélites. Variaciones orbitales en satélites de órbita baja (LEO). Problemas de orientación que pueden requerir correcciones.</li></ul>	Kp = 7	200 por ciclo (130 días por ciclo)

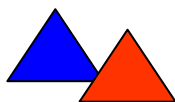


		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Radiocomunicaciones</u>: Banda de HF utilizable sólo intermitentemente.</li> <li>• <u>Radionavegación</u>: Problemas intermitentes en la navegación por satélite y por sistemas de baja frecuencia.</li> <li>• <u>Auroras</u>: Observaciones hasta 50° de latitud geomagnética.</li> </ul>		
<b>G2</b>	<b>Moderada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Transporte y distribución de electricidad</u>: Los sistemas ubicados en latitudes altas pueden experimentar alarmas de voltaje. Las tormentas de larga duración pueden causar daños en los transformadores.</li> <li>• <u>Operaciones de sistemas espaciales</u>: Pueden requerirse acciones correctoras de la orientación de los satélites por parte de los controles terrestres. Posibles afecciones a las predicciones orbitales.</li> <li>• <u>Radiocomunicaciones</u>: En latitudes altas, desvanecimientos de la propagación en las bandas de HF</li> <li>• <u>Auroras</u>: Observaciones hasta 55° de latitud geomagnética.</li> </ul>	Kp = 6	600 por ciclo (360 días por ciclo)
<b>G1</b>	<b>Menor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Transporte y distribución de electricidad</u>: Pequeñas fluctuaciones en las redes de distribución eléctrica.</li> <li>• <u>Operaciones de sistemas espaciales</u>: Posibles impactos menores en las operaciones satelitales.</li> <li>• <u>Auroras</u>: Observaciones en latitudes altas.</li> <li>• <u>Otros efectos</u>: Los animales migratorios se ven afectados por tormentas de este nivel y superiores.</li> </ul>	Kp = 5	1700 por ciclo (900 días por ciclo)

Tabla 6. Escala NOAA de tormentas geomagnéticas.

### 3. RIESGOS DERIVADOS DEL CLIMA ESPACIAL

Los riesgos derivados del clima espacial afectan tanto a las personas (en casos muy concretos) como a los sistemas eléctricos y electrónicos, particularmente a las redes de transporte eléctrico y de combustible, a los satélites y a las telecomunicaciones. En casos de actividad solar excepcional y aunque la probabilidad de ocurrencia sea relativamente baja, el clima espacial podría provocar fallos en cascada que se verían agravados por la

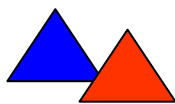


interdependencia entre sistemas. Al finalizar las tormentas, algunos sistemas volverían a funcionar por sí mismos, como las radiocomunicaciones y el GPS. No obstante, la reparación de otros sistemas podría llevar semanas o incluso meses, como es el caso de los incendios en grandes transformadores. Se estima que, de producirse en la actualidad un nivel de actividad similar al del Evento Carrington de 1859, las pérdidas totales podrían alcanzar los **3 trillones de dólares** en el primer año, es decir, 20 veces más que las provocadas por el huracán Katrina y el tiempo total de recuperación oscilaría entre 4 y 10 años [1] [13] [14].

Como efectos colaterales de los fallos generalizados del suministro eléctrico y debido a la ya mencionada interdependencia entre sistemas, podrían verse afectados el suministro de agua, los transportes públicos, los sistemas bancarios y financieros, algunos servicios gubernamentales y el almacenamiento de alimentos y medicamentos por falta de refrigeración, entre otros.

Según el NRC, la estrategia para mitigar los efectos de los riesgos derivados del clima espacial pasa por los siguientes puntos [1]:

- **Detección:** identificación de posibles eventos y difusión rápida de la alerta.
- **Defensa:** protección de la infraestructura que potencialmente puede ser afectada, ya sea directamente o retrasando o reduciendo los efectos sobre redes y sistemas.
- **Mitigación:** minimizar el posible impacto, mediante la introducción de redundancia en los sistemas, reducción de la dependencia entre sistemas y contención del problema entre sistemas interdependientes.
- **Respuesta:** preparación de actividades diseñadas para potenciar la respuesta rápida y de emergencia ante los posibles incidentes, como la realización de planes y ejercicios o la disposición de equipamiento.
- **Recuperación:** posibilitar la restauración de las actividades comerciales y gubernamentales, de forma rápida y eficiente.



### 3.1. Riesgos para las personas

Las partículas de gran nivel energético asociadas a las tormentas de radiación solar pueden ser dañinas y potencialmente mortales para los **astronautas** que, en el momento de la tormenta, estén realizando actividades extravehiculares (EVA, *Extra-Vehicular Activities*) [15].

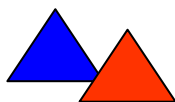
Así mismo, en el transcurso de una tormenta de radiación solar, los niveles de exposición pueden ser significativos para los pasajeros y los tripulantes de **aviones** que se encuentren en vuelo a elevadas latitudes, especialmente sobre el Polo Norte y si la componente Bz del campo magnético interplanetario está apuntando hacia el Sur, hecho que favorece la entrada en la atmósfera de las partículas de alto nivel energético procedentes del Sol.

Aunque la **investigación** sobre estos riesgos para las personas todavía se encuentra en estado embrionario, los diferentes **sistemas de alerta** existentes contemplan avisos al respecto. De hecho, en la actualidad, algunos de los mayores consumidores sobre información operativa relativa al clima espacial son las compañías aéreas que operan sobre el Polo Norte.

Algunos grupos sociales y esotéricos asocian el año 2012 con grandes eventos que podrían transformar el mundo, apoyándose en supuestas predicciones de la civilización Maya o de la propia Biblia, como el impacto en la Tierra de un asteroide o un cometa que podría provocar el fin del mundo. La posible coincidencia temporal con el máximo del ciclo solar 24 y el **impacto mediático** de este tipo de noticias hacen pensar que el clima espacial estará muy presente en los medios de comunicación de masas durante dicho periodo.

### 3.2. Riesgos en los satélites artificiales

Las partículas de gran nivel energético asociadas a las tormentas de radiación solar pueden inyectar **ruido** en los sistemas de detección de los satélites artificiales, o incluso provocar **daños físicos** a los paneles solares, a la electrónica o a las memorias de



almacenamiento. Los flujos de partículas con alto nivel energético y en ocasiones con niveles medios o bajos, pueden provocar una acumulación de carga eléctrica entre los distintos elementos que componen un satélite, sobre todo en el período de eclipse del satélite y durante la ejecución de maniobras orbitales.

Algunos electrones pueden tener el nivel energético suficiente como para atravesar las paredes de las astronaves y acumularse en materiales dieléctricos como cables coaxiales o tarjetas electrónicas, terminando por provocar importantes descargas eléctricas que pueden causar serios daños.

En lo referente a los enlaces Tierra-satélite, ya sean ascendentes o descendentes, los cambios en el gradiente de contenido total de electrones en la ionosfera provocados por las erupciones solares, pueden causar **desvanecimientos** (*fading*) y/o **centelleo** (*scintillation*) en las señales, aumentando la tasa de errores o incluso pudiendo llegar a cortar los enlaces [16]. En el caso de los sistemas de radionavegación por satélite (GPS, GLONASS, Galileo), se pueden dar casos de **degradación** en la precisión del posicionamiento de los usuarios. El riesgo es mayor en sistemas que operen por debajo de 2,6 GHz [6].

También pueden producirse **interferencias** en los sistemas vía satélite, como resultado de las ráfagas de ruido generadas en el Sol tras una erupción, si la antena parabólica de la estación de seguimiento del segmento terrestre tiene al Sol en su línea de visión directa.

Finalmente, las corrientes inducidas por las tormentas geomagnéticas en la termosfera, provocan un aumento de temperatura en dicha región, que puede **ralentizar la trayectoria** de los satélites de órbita baja (LEO, *Low Earth Orbit*).

En la fig.11 se muestra una estadística de anomalías y fallos detectados en satélites artificiales entre los años 1993 y 2007 [1].

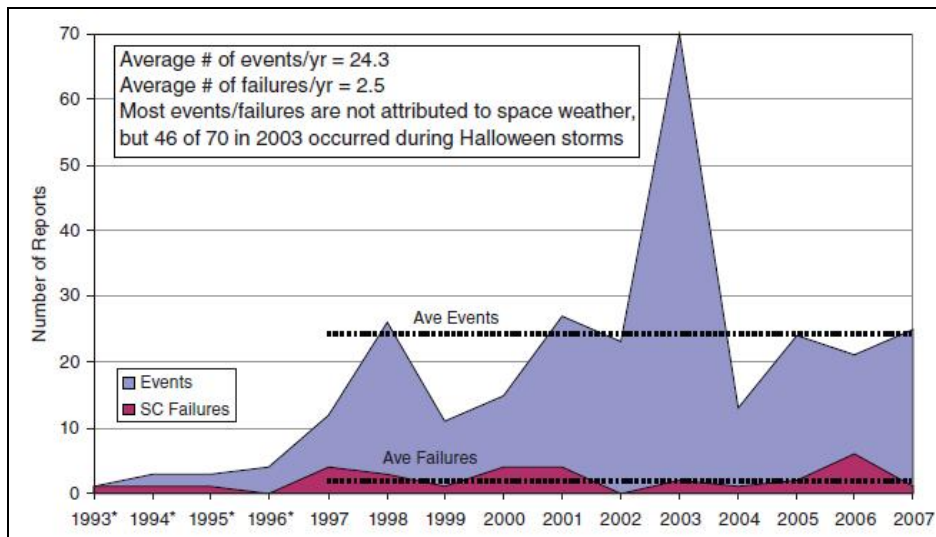


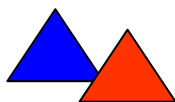
Fig.11. Anomalías y fallos en satélites entre 1993 y 2007 (Northrop Grumman).

Aunque la gran mayoría de anomalías y fallos no tienen relación con el clima espacial, el 65 % de los eventos registrados en el año 2003 se produjeron durante la Tormenta de Halloween (ver apartado 3.5).

Los riesgos para los satélites no se producen solamente en épocas de máximos solares. En la etapa final de los mínimos solares, se producen **agujeros coronales** en el Sol, de los que emana viento solar a alta velocidad, causante de un aumento de la concentración de electrones energéticos en la magnetosfera que también puede causar problemas o desconexiones de satélites, tal y como sucedió con los canadienses Anik E1 y E2 en 1994.

En cualquier momento dentro de un ciclo solar también pueden producirse **subtormentas magnéticas**: el viento solar puede transferir energía a la cola de la magnetosfera, energía que puede liberarse en episodios violentos, afectando también a los satélites al generarse descargas electrostáticas.





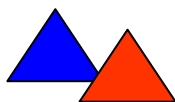
### 3.3. Riesgos en sistemas de telecomunicaciones

Las erupciones solares tienen influencia en las radiocomunicaciones de la banda de HF unos 15 minutos después de producirse. La duración de estos fenómenos oscila entre varios minutos a alrededor de una hora.

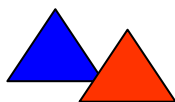
Tras una erupción solar, se aumenta sustancialmente la emisión de rayos X en el Sol. Este incremento provoca una mayor ionización en las capas bajas de la ionosfera, con las siguientes consecuencias en la banda de HF: el valor de la frecuencia crítica disminuye (y por tanto también la MUF) y la absorción aumenta, pudiendo alcanzarse valores de hasta 38 dB de atenuación extra sobre las condiciones normales.

En la tabla 7 se muestra un listado de los posibles efectos que pueden observarse en cada banda de comunicaciones por radio, recopilados de diversas fuentes [12], así como los principales usuarios que pueden verse afectados [17].

Banda	Frecuencias	Usuarios	Posibles efectos
ELF	< 3 kHz		<ul style="list-style-type: none"><li>• Tormenta geomagnética: Fluctuaciones anómalas en el nivel de señal (3-8 dB). Interferencias por reflexiones múltiples en capas E y Es de la ionosfera.</li><li>• Tormenta de radiación solar: Aumento de atenuación entre 1-4 dB/Mm.</li></ul>
VLF	3 kHz – 30 KHz	<ul style="list-style-type: none"><li>• Radionavegación.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Perturbaciones ionosféricas repentinas (SID): reflexiones ionosféricas anómalas.</li><li>• Erupción solar: Anomalías repentinas de fase. Errores en sistemas de radionavegación de hasta 10 millas náuticas.</li><li>• Tormenta geomagnética: Distorsión en fase y amplitud (atenuación) en trayectos que atraviesan los polos (PCA), especialmente de noche. Duración: varias horas en latitudes medias, hasta 10-20 días en latitudes altas y trayectos transpolares.</li><li>• Aumento de los niveles de señal sobre 16 kHz, en trayectos de zona de día.</li></ul>
LF	30 kHz –	<ul style="list-style-type: none"><li>• Radionavegación (Loran-C, Chayka).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Erupción solar: Anomalías repentinas de fase. Errores en sistemas de radionavegación de hasta 10 millas náuticas.</li></ul>



Banda	Frecuencias	Usuarios	Posibles efectos
	300 kHz		<ul style="list-style-type: none"><li>• Tormenta geomagnética: Distorsión en fase y amplitud (atenuación) en trayectos que atraviesan los polos (PCA).</li></ul>
<b>MF</b>	300 kHz – 3 MHz	<ul style="list-style-type: none"><li>• Radiodifusión.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Erupción solar: Anomalías repentinas de fase.</li><li>• Tormenta geomagnética: Distorsión en fase y amplitud (atenuación) en trayectos que atraviesan los polos (PCA).</li><li>• Mejora de la SNR en enlaces por onda de tierra, al disminuir el nivel de ruido por onda aérea, debido al incremento en la absorción.</li></ul>
<b>HF</b>	3 MHz – 30 MHz	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usos del Estado.</li><li>• Radiodifusión.</li><li>• Servicio móvil marítimo.</li><li>• Servicio móvil aeronáutico.</li><li>• Radioaficionados.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Perturbaciones ionosféricas repentinas (SID): aumento de la absorción en la capa D (<i>fading</i>) durante unos 30 minutos. Ocurrencia 2 veces/semana durante el máximo.</li><li>• Aumento de la absorción en trayectos que atraviesan los polos (PCA), hasta en 100 dB, comenzando unas horas tras la erupción y con una duración de uno a varios días.</li><li>• Tormenta geomagnética: aumento de la frecuencia crítica foF2 en el primer día. A continuación, descenso importante de la foF2 y de la MUF (hasta un 50%).</li><li>• Mejora de la SNR en enlaces por onda de tierra, al disminuir el nivel de ruido por onda aérea, debido al incremento en la absorción.</li></ul>
<b>VHF</b>	30 MHz – 300 MHz	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usos del Estado.</li><li>• Radiodifusión.</li><li>• Servicio móvil terrestre.</li><li>• Servicio móvil aeronáutico.</li><li>• Radioaficionados.</li><li>• Teléfonos analógicos sin cordón.</li><li>• Radiobúsqueda.</li><li>• Telemandos.</li><li>• Aplicaciones ICM.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Incremento en el nivel de ruido, empeoramiento de la SNR.</li></ul>
<b>UHF</b>	300 MHz – 3 GHz	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usos del Estado.</li><li>• Telefonía móvil.</li><li>• Televisión.</li><li>• Servicio móvil terrestre.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Incremento en el nivel de ruido, empeoramiento de la SNR.</li></ul>



Banda	Frecuencias	Usuarios	Posibles efectos
		<ul style="list-style-type: none"><li>• Servicio fijo.</li><li>• Teléfonos digitales sin cordón</li><li>• Radioaficionados.</li><li>• Radiobúsqueda.</li><li>• Radiolocalización.</li><li>• Aplicaciones ICM.</li></ul>	

Tabla 7. Posibles efectos de las erupciones solares en las distintas bandas de radio.

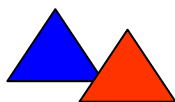
Algunas fuentes [1] también hablan de la posible afectación de las tormentas geomagnéticas a los cables submarinos, que tendrían un gran impacto en Internet y en las redes de telefonía.

La NASA también cita los siguientes sistemas de telecomunicación que pueden verse afectados por el clima espacial [18]: tecnologías basadas en microchips, telefonía móvil, relojes atómicos, radioenlaces de televisión comercial, sistemas de telefonía de larga distancia y radares.

### 3.3.1. Tormentas de ruido.

El Sol emite ondas de radio en diferentes bandas, desde las centimétricas hasta las decamétricas, ya sea la actividad solar baja o alta. Estas **emisiones de ruido** se clasifican, según su intensidad, en una escala que va de 1 a 5 [19]:

- **Tipo I:** tormentas de ruido formadas por gran número de ráfagas cortas y de reducido ancho de banda, en el rango de las ondas métricas (300-50 MHz) y de intensidad extremadamente variable. Pueden durar desde varias horas a varios días.
- **Tipo II:** emisiones de reducido ancho de banda que comienzan en las bandas métricas (300 MHz) y van cambiando lentamente (decenas de minutos) hacia el rango de las



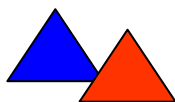
decamétricas (10 MHz). Este tipo de emisiones tienen cierta relación con llamaradas solares de gran intensidad y son indicadoras de una onda de choque que se mueve a través de la atmósfera solar.

- **Tipo III:** ráfagas de reducido ancho de banda que cambian rápidamente (segundos) desde la banda de decimétricas a la de decamétricas (500-0,5 MHz). Normamente suceden en grupos y ocasionalmente son una característica de las regiones solares activas más complejas.
- **Tipo IV:** ráfagas continuas de ruido de banda ancha, sobre todo en el rango de las ondas métricas (300-30 MHz). Estas ráfagas están asociadas a las grandes erupciones solares, comenzando entre 10 y 20 minutos tras la erupción y con una duración que puede ser de varias horas.
- **Tipo V:** ruido continuo de poca duración (algunos minutos) en el rango de las decamétricas, asociado a las emisiones de tipo III.

Durante eventos relacionados con el máximo solar, las emisiones de ruido pueden llegar a tener una duración de varios días, dando lugar a una **tormenta de ruido continuo** (CTM, *Continuum storm*), que puede afectar a las bandas de radio de longitud de onda comprendida entre los metros y los decímetros, dándose casos de particular intensidad en frecuencias en torno a 250 MHz,

En estas bandas se ubican gran parte de los sistemas de radiocomunicaciones terrestres públicos (telefonía móvil) y privados, entre los que se encuentran los dedicados a redes terrestres de corto y medio alcance relacionadas con la Protección Civil.

Desde el momento de su generación, las tormentas de ruido tardan unos 8 minutos en alcanzar a la Tierra y su duración puede ser de 1-2 días [11].



### 3.3.2. Tormentas ionosféricas.

Las tormentas geomagnéticas pueden provocar importantes perturbaciones en la **capa F** de la ionosfera terrestre, dando lugar a **tormentas ionosféricas**. Generalmente, las tormentas ionosféricas tienen dos fases [12] [6]:

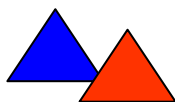
- Fase inicial o fase positiva, con un incremento en la densidad de electrones que dura unas horas.
- Fase final o fase negativa, con una disminución en la densidad de electrones, que puede durar varios días.

En latitudes bajas, generalmente sólo se observa la fase positiva. Las tormentas ionosféricas presentan grandes variaciones en función de la latitud geomagnética, la estación del año y la hora local.

En ocasiones, pueden registrarse fenómenos de gran intensidad denominados **Perturbaciones Ionosféricas Repentinas** (SID, *Sudden Ionospheric Disturbances*), provocando anomalías en la propagación de las ondas de radio: desvanecimientos en la banda de decamétricas, desplazamientos de fase, absorción del ruido cósmico y en ocasiones incluso mejoras en el nivel de las señales. Estas anomalías pueden tener una duración desde varios minutos a varias horas.

### 3.3.3. Eventos de absorción polar (PCA).

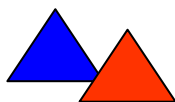
Los eventos de absorción polar (PCA) provocan un aumento significativo de la absorción en la banda de HF para trayectos radioeléctricos que atraviesen los polos. Estos fenómenos son críticos para los aviones comerciales que utilizan rutas transpolares, por ejemplo entre Norteamérica y Asia, ya que a latitudes superiores a 82° no suele existir cobertura en las comunicaciones vía satélite y han de confiar exclusivamente en la radio de HF.



### 3.3.4. Escala NOAA de apagones de radio.

La agencia NOAA de los Estados Unidos ha diseñado una escala para cuantificar la intensidad y los efectos de los apagones de radio, que se muestra en la tabla 8. La escala tiene 5 posibles valores directamente relacionados con las mediciones del flujo de rayos X procedentes del Sol, realizadas por los satélites GOES, facilitándose además la frecuencia con la que los eventos de cada tipo pueden ocurrir dentro de un mismo ciclo solar de 11 años.

Categoría		Efectos	Parámetro físico	Frecuencia promedio
Escala	Descriptor	<b>La duración del evento influye en la severidad de los efectos</b>	<b>Pico de rayos X registrado por el satélite GOES (clase y flujo)</b>	<b>Nº de eventos por ciclo solar</b>
R5	Extremo	<ul style="list-style-type: none"><li><u>Radiocomunicaciones en HF</u>: Apagón completo en la zona del día terrestre, durante varias horas. Imposibilidad de establecer enlaces en las comunicaciones aeronáuticas y marítimas en estas bandas.</li><li><u>Radionavegación</u>: Los sistemas de radionavegación aeronáuticos y marítimos de baja frecuencia se ven afectados durante varias horas en la zona del día terrestre, provocando pérdidas de posicionamiento. Aumento de errores en los sistemas de radionavegación satelitales en la zona del día terrestre, que pueden durar hasta entrada la noche.</li></ul>	X20 ( $2 \times 10^{-3}$ )	Menos de 1 por ciclo
R4	Severo	<ul style="list-style-type: none"><li><u>Radiocomunicaciones en HF</u>: Apagón en la mayor parte de la zona del día terrestre, durante una o dos horas. Imposibilidad de contactar en estas bandas durante ese tiempo.</li><li><u>Radionavegación</u>: Afecciones a los sistemas de radionavegación de baja frecuencia durante una o dos horas. Pueden producirse afecciones menores en los sistemas de radionavegación satelitales en la zona del día terrestre.</li></ul>	X10 ( $10^{-3}$ )	8 por ciclo (8 días por ciclo)



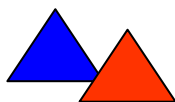
Categoría		Efectos	Parámetro físico	Frecuencia promedio
R3	Fuerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Radiocomunicaciones en HF</u>: Apagón en las comunicaciones de HF en áreas extensas. Pérdida de las comunicaciones radio en esta banda durante una hora, en la zona del día terrestre.</li> <li>• <u>Radionavegación</u>: Los sistemas de radionavegación de baja frecuencia se ven degradados durante una hora.</li> </ul>	X1 (10 <sup>-4</sup> )	175 por ciclo (140 días por ciclo)
R2	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Radiocomunicaciones en HF</u>: Apagones de radio limitados en las comunicaciones de HF en algunas zonas del día terrestre, durante decenas de minutos.</li> <li>• <u>Radionavegación</u>: Los sistemas de radionavegación de baja frecuencia se ven degradados durante decenas de minutos.</li> </ul>	M5 (5x10 <sup>-5</sup> )	350 por ciclo (300 días por ciclo)
R1	Menor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Radiocomunicaciones en HF</u>: Apagones de radio débiles en las comunicaciones de HF en algunas zonas del día terrestre. Pérdidas ocasionales del contacto radio.</li> <li>• <u>Radionavegación</u>: Los sistemas de radionavegación de baja frecuencia se ven degradados durante intervalos de corta duración.</li> </ul>	M1 (10 <sup>-5</sup> )	2000 por ciclo (950 días por ciclo)

Tabla 8. Escala NOAA de apagones de radio.

### 3.4. Riesgos en redes de transporte eléctrico y de combustible

Las tormentas geomagnéticas también pueden afectar a los sistemas de suministro eléctrico y a algunos sistemas de transporte de combustible, como oleoductos y gasoductos, sobre todo el latitudes elevadas.

Las **corrientes de inducción geomagnética** (GIC, *Geomagnetically Induced Currents*), son corrientes de muy baja frecuencia, cercanas a la corriente continua (DC), que se inducen en conductores eléctricos de gran longitud como líneas de alta tensión, oleoductos



y gasoductos, como consecuencia de una tormenta geomagnética de gran intensidad [15] [20].

En la tabla 9, se muestra una estimación de la GIC continua neutral que puede inducirse en un transformador en función de la intensidad de la tormenta geomagnética [1].

Severidad de la GIC	GIC continua neutral Inducida en el transformador (Amps)	Índice geomagnético K
Menor	5 – 14	
Moderada	15 – 29	K7
Mayor	30 – 59	K8
Severa	> 60	K9

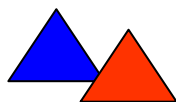
Tabla 9. Severidad de las GIC en función de la intensidad de una tormenta geomagnética.

Normalmente, las GIC se asocian a eyecciones de masa coronal (CME) o a regiones de interacción corrotativa (CIR, *Corotating Interaction Regions*). Las CIR son estructuras de plasma a gran escala y de larga duración, generadas en latitudes bajas y medias de la heliosfera por la interacción de un flujo rápido estable de viento solar con el viento solar de velocidad más baja que tiene alrededor [21].

En el caso de las **líneas de alta tensión**, las GIC incrementan el nivel de corriente existente en dichos conductores, pudiendo provocar los siguientes efectos [8]:

- Incremento de armónicos.
- Disparos innecesarios de relés.
- Caídas de tensión.
- Daños permanentes a transformadores, debido al sobrecalentamiento producido por las GIC.
- Apagón completo de sistemas eléctricos, debido a la interconexión entre diferentes redes de transporte y distribución.





Según un estudio de la Metatech Corporation, auspiciado por la Agencia Federal de Gestión de Emergencias de Estados Unidos (FEMA) y la Comisión sobre Pulsos Electromagnéticos (EMP), las tormentas geomagnéticas extremas suponen riesgos de averías de larga duración en grandes áreas de la red eléctrica norteamericana, pudiendo provocar apagones cuya solución podría extenderse durante periodos de tiempo extraordinarios, con el consiguiente impacto en cualquier otro sistema dependiente del suministro eléctrico [1]. Por ejemplo, la fabricación de un gran transformador de alta tensión para sustituir a otro averiado puede demorarse durante 12 meses o más.

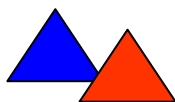
En el caso de **oleoductos y gasoductos**, las GIC pueden fluir entre la tubería y el suelo, incrementando la corrosión. Además, los voltajes asociados a las corrientes pueden afectar al sistema de protección catódico y a los sistemas de control [8].

Aunque, como ya se ha indicado, existe una mayor probabilidad de aparición de estos eventos en latitudes elevadas, en algunos países como Sudáfrica (entre  $-35^{\circ}\text{S}$  y  $-22^{\circ}\text{S}$ ) se han llegado a producir fallos en los transformadores de algunas subestaciones eléctricas [22], por lo que ha de considerarse que podrían existir **riesgos similares en España**.

### 3.5. Eventos históricos

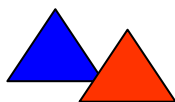
Los siguientes eventos históricos del clima espacial que tuvieron un impacto significativo, están recopilados de diversas referencias bibliográficas [1] [6] [8] [12] [23] [24] [25].

- **1859 (Evento Carrington)**: Durante los dos primeros días de septiembre, en el ciclo solar 10, se registró la que pudo ser la tormenta geomagnética más grande de la historia, originada por una eyección de masa coronal. Tras la CME, la tormenta tardó 17 horas y 40 minutos en recorrer la distancia entre el Sol y la Tierra, teniendo la componente Bz del IMF una orientación predominantemente Sur. Las auroras boreales resultantes se vieron con tal intensidad en la noche de las Montañas Rocosas que sus habitantes pensaron que estaba amaneciendo. Las auroras llegaron a verse en latitudes muy bajas, hasta el Caribe, Roma y

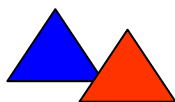


Hawaii. Las líneas telegráficas cayeron de forma generalizada en Estados Unidos y Europa, provocando incluso incendios. Las erupciones solares se venían observando desde el 28/08, siendo el astrónomo inglés Richard Carrington quien observó la más intensa al mediodía del 01/09. Se estima que la tormenta fue tres veces más poderosa que la registrada en marzo de 1989.

- **1921:** Los días 14-15/05 se registra una tormenta geomagnética que induce corrientes GIC unas 10 veces mayores a las del evento de marzo de 1989. Según un estudio de la Metatech Corporation, la repetición de una tormenta de similares características en la actualidad provocaría fallos permanentes en unos 350 transformadores eléctricos de los Estados Unidos, dejando sin suministro a más de 130 millones de personas.
- **1940:** El día 23/03 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 277$ . Seis días después se registra otra con nivel máximo  $A_p = 226$ .
- **1941:** Se registran varias tormentas geomagnéticas entre marzo y septiembre: 01/03 con nivel máximo  $A_p = 212$ ; 05/07 con  $A_p = 222$ ; 18/09 con  $A_p = 312$  (máximo histórico registrado con instrumentos).
- **1942:** una erupción solar provoca fallos en algunos radares aliados, durante la Segunda Guerra Mundial.
- **1946:** Se registran varias tormentas geomagnéticas entre febrero y septiembre: 07/02 con  $A_p = 199$ ; 24/03 con  $A_p = 195$ ; 28/03 con  $A_p = 215$ ; 26/07 con  $A_p = 212$ ; 22/09 con  $A_p = 214$ .
- **1949:** El día 12/05 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 196$ .
- **1950:** El día 19/08 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 203$ .
- **1957:** El día 02/09 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 221$ .

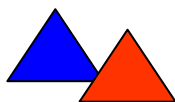


- **1958:** Se registran varias tormentas geomagnéticas entre febrero y julio: 11/02 con  $A_p = 199$ ; 08/07 con  $A_p = 216$ .
- **1959:** El día 15/07 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 252$ .
- **1960:** Se registran varias tormentas geomagnéticas entre marzo y noviembre: 31/03 con  $A_p = 251$ ; 04/10 con  $A_p = 258$ ; 12/11 con  $A_p = 293$ .
- **1967:** El día 25/05 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 241$ .
- **1972:** El día 04/08 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 223$ .
- **1982:** Se registran varias tormentas geomagnéticas entre julio y septiembre: 11/07 con  $A_p = 229$ ; 04/09 con  $A_p = 201$ .
- **1984:** una erupción solar intensa provoca fallos en las radiocomunicaciones en la banda de HF, afectando a los enlaces radio del avión presidencial norteamericano (*Air Force One*) en ruta hacia China.
- **1986:** El día 07/02 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 228$ .
- **1989:** Intensa actividad solar entre marzo y octubre: el día 13/03 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 285$ , la más intensa de los últimos 48 años, que provoca caídas de tensión (pérdida de generación de 9,45 MW sobre una carga de red de 21,35 MW) en las redes de transporte eléctrico de Quebec (Canadá), dejando sin electricidad a 6 millones de usuarios durante 9 horas, tras un fallo en cadena que tardó sólo 90 segundos en propagarse. En la red eléctrica de Estados Unidos se registraron alrededor de 200 fallos de importancia, entre ellos el de un transformador de la planta nuclear de Salem, en New Jersey, que estuvo sometido a una GIC de 80 A cuando su nivel normal de trabajo era de tan sólo 2-4 A. Fallos similares en las redes de transporte



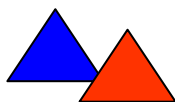
eléctrico de Suecia. La órbita de varios satélites sufrió alteraciones, causando a la NASA problemas de seguimiento con algunos de ellos durante cortos intervalos de tiempo. Fallos en satélites de radionavegación y degradación en las comunicaciones en HF. Auroras visibles en latitudes casi ecuatoriales. El día 12/08 se produce una tormenta de radiación solar con nivel  $9,2 \times 10^3$  pfu (unidades de flujo de protones). El día 16/08 se produce una erupción solar con nivel X20 en el rango de los rayos X. El día 19/10 se produce una tormenta de radiación solar con nivel  $40 \times 10^3$  pfu.

- **1991:** El día 23/03 se produce una tormenta de radiación solar con nivel  $43 \times 10^3$  pfu; Entre los días 01/06-17/06 se registran tormentas geomagnéticas con nivel máximo  $A_p = 196$ , generadas por 5 erupciones solares, que causaron la saturación de los sensores de la sonda espacial GOES.
- **1992:** El día 09/05 se registra una tormenta geomagnética con nivel máximo  $A_p = 193$ .
- **1994:** El 20/01 se observan niveles sostenidos de alta velocidad en el viento solar, que provocan el fallo del satélite canadiense Anik E1 durante 7 horas, como consecuencia de descargas eléctricas inducidas a bordo. El fallo afectó a 100 periódicos y 450 emisoras de radiodifusión canadienses, interrumpiendo además el servicio telefónico en 40 comunidades. Una hora después de la recuperación del Anik E1, el satélite Anik E2 quedó fuera de servicio, provocando el corte de servicios de datos y televisión a 1600 comunidades (100.000 usuarios). La recuperación del Anik E2 tardó 6 meses, con un coste de 120 M\$. El día 20/02 se produce una tormenta de radiación solar con nivel  $10 \times 10^3$  pfu.
- **1997:** El satélite de comunicaciones Telstar 401, valorado en 130 M\$ y perteneciente a la compañía norteamericana AT&T, pierde la telemetría y las comunicaciones a primera hora de la mañana del 11/01, como efecto de una tormenta geomagnética.
- **Julio de 2000 (Tormenta del Día de la Bastilla):** Los días 14-15/07, durante el máximo del ciclo solar 23, se producen una tormenta de radiación solar con nivel  $24 \times 10^3$  pfu (S3), que tardó 15 minutos en llegar a la Tierra, y una tormenta geomagnética con nivel máximo



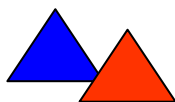
$A_p = 192$ , ambas causadas por una eyección de masa coronal. Los eventos se bautizan con el nombre de "Tormenta del Día de la Bastilla" [26].

- **Noviembre de 2000:** El día 08/11/2000 se produce una tormenta de radiación solar con nivel  $14,8 \times 10^3$  pfu.
- **Abril de 2001.** El 02/04/2001 se registra una erupción solar con nivel X20 en el rango de los rayos X, la mayor observada hasta la fecha con instrumentos electrónicos.
- **Noviembre de 2001.** El día 04/11/2001 se produce una tormenta de radiación solar con nivel  $31,7 \times 10^3$  pfu. El día 22/11/2001 se produce una nueva tormenta de radiación solar, con nivel  $18,9,7 \times 10^3$  pfu.
- **Septiembre de 2001:** El día 24/09/2001 se produce una tormenta de radiación solar con nivel  $12,9 \times 10^3$  pfu.
- **Octubre-Noviembre de 2003 (Tormenta de Halloween):** Entre los días 27/10-04/11, tres años después del máximo del ciclo solar 23, se registró nuevamente un nivel extremo de actividad en el clima espacial, alcanzándose apagones radio de nivel R4 (severo) el 28/10 a las 11:00 UTC. Un día después, se registró una tormenta de radiación solar de nivel S4 (severa), asociada a una eyección de masa coronal de nivel X17 que también provocó una tormenta geomagnética de nivel G5 (extrema), con  $A_p = 252$  e índice geomagnético  $K=9$  en latitudes medias y altas, al alcanzar la Tierra en unas 19 horas. La tormenta se mantuvo en niveles G3-G5 durante 24 horas. El satélite coreano KOMPSAT1, de órbita baja, sufrió variaciones en su órbita como consecuencia del calentamiento de la termosfera, mientras que el satélite japonés Kodama sufrió daños y tuvo que ser desconectado. Se sospecha que las tormentas también produjeron la pérdida del satélite ADEOS-2, valorado en 640 M\$. La producción eléctrica en el norte de EE.UU. y Canadá tuvo que limitarse para evitar los efectos de las GIC, algo que fue posible gracias a las alertas emitidas por el NOAA/SWPC. La tripulación de la Estación Espacial Internacional tuvo que refugiarse en el módulo de servicio, donde el nivel de protección es más alto. El



30/10 se registra otra tormenta geomagnética con nivel  $A_p = 220$ , dejando sin suministro eléctrico a 50.000 usuarios en Suecia. El 04/11 se registró una nueva erupción solar con nivel X28e en el rango de los rayos X, la mayor registrada hasta la fecha por instrumentos electrónicos de observación. Las comunicaciones aeronáuticas en HF se vieron seriamente afectadas por eventos de absorción polar (PCA) en latitudes superiores a  $57^\circ$  N. También se produjeron dificultades en las comunicaciones transatlánticas en HF. El desvío de vuelos transpolares para evitar daños por radiación a pasajeros y tripulantes tuvo un coste de entre 10 k\$ y 100 k\$. Interferencias en el sistema de radionavegación Loran-C. Fallos de GPS en latitudes altas y desconexión temporal de su sistema de apoyo a aeronaves WAAS durante 30 horas.

- **Enero de 2005:** El 17/01 se registra una llamarada solar de tipo X3.8, elevándose el nivel de ruido 80 veces en la banda de 10 cm. La tormenta de radiación solar, de nivel S3, tardó solamente 8 minutos en llegar a la Tierra, provocando apagones de radio de nivel R3. Durante cuatro días consecutivos, las rutas aéreas comerciales transpolares quedaron cerradas.
- **Diciembre de 2006:** se produce una erupción que provoca una intensa ráfaga de ruido solar, 10 veces más intensa que las registradas en los últimos 50 años. Además, se registraron atenuaciones de 1 dB en frecuencias de hasta 35 MHz en toda la zona de la Tierra orientada al Sol, debido a las emisiones solares de rayos X y rayos UV que alcanzaron la Tierra en latitudes medias y bajas. La atenuación en las zonas polares fue provocada por los protones de alto nivel energético que alcanzaron la Tierra en latitudes altas.
- **Abril de 2010:** el día 05/04, el satélite de comunicaciones Intelsat Galaxy 15 comienza a tener fallos de envío de telemetría y de recepción de comandos, teniendo que ser sustituido por el Galaxy 12. Según el Oficial Jefe de Operaciones de la compañía constructora de estos satélites, el problema pudo deberse a un incremento de la actividad solar entre los días 03-05/04.



## 4. SISTEMAS DE OBSERVACIÓN Y ALERTA TEMPRANA

Los sistemas de alerta temprana sobre eventos del clima espacial son fundamentales para la puesta en marcha de acciones preventivas en determinadas infraestructuras críticas.

Actualmente, puede afirmarse que no existe ningún sistema dedicado completamente a la monitorización del clima espacial, utilizándose medios que originalmente han sido diseñados para otros tipos de misiones científicas.

En este apartado se describen los centros de estudio, seguimiento y predicción del clima espacial más importantes que operan actualmente a nivel mundial, la tecnología de monitorización disponible y los organismos que emiten alertas al respecto.

### 4.1. Centros de estudio, seguimiento y predicción

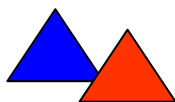
La monitorización y los estudios sobre el clima espacial han proliferado en varios países, especialmente en los últimos años. En este apartado se muestran algunos ejemplos.

#### 4.1.1. Centros en los Estados Unidos..

En los **Estados Unidos**, la observación del clima espacial y la emisión de alertas están a cargo fundamentalmente de dos agencias:

- **Centro de Predicción del Clima Espacial** de la Agencia NOAA: *Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration (SWPC/NOAA)*, orientada a usuarios civiles. Utiliza datos de varias sondas espaciales de la NASA, como la ACE (*Advanced Composition Explorer*), de la propia NOAA, como los satélites GOES y POES, magnetómetros terrestres y la red de observatorios solares de la Fuerza Aérea.





Otras fuentes de información para el centro son las sondas espaciales SOHO y STEREO. En total, para la elaboración de predicciones sobre el clima espacial, el SWPC utiliza alrededor de 1400 fuentes de la propia NOAA, la NASA, la Fuerza Aérea (USAF) y la Inspección Geológica de los Estados Unidos (USGS).

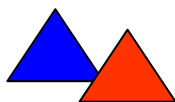
- **Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea:** *Air Force Weather Agency, United States Air Force (AFWA/USAF)*, orientada a usuarios militares. La AFWA combina datos de la NOAA con medios propios, como el Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa (DMSP, *Defense Meteorological Satellites Program*), el Programa de Apoyo a la Defensa (DSP, *Defense Support Program*), el Sistema de Predicción de Fallos de Navegación y Comunicaciones (C/NOFS, *Communications/Navigation Outage Forecast System*), la Red Solar Electro-óptica, el Sistema Digital de Sondeo Ionosférico y la red GPS.

Sitio web de AFWA: <http://www.afweather.af.mil/units/spaceweatheroperations.asp>

En el año 2005, las actividades de la NOAA relacionadas con el clima espacial se trasladaron de la Oficina de Investigación Oceánica y Atmosférica (rama de investigación) al Servicio Meteorológico Nacional (rama de operaciones), dentro de cuyo presupuesto anual se destinan entre 5-6 M\$ a las actividades relacionadas con el clima espacial [1] [27].

El **SWPC** tiene la capacidad de predecir una erupción solar de clase X con una antelación de entre 1 y 3 días y baja probabilidad de falsa alarma. No obstante, su capacidad de predecir perturbaciones ionosféricas, ya sean a corto o largo plazo, es mucho menor. Por ejemplo, tras una eyección de masa coronal, se puede avisar de la posterior tormenta geomagnética con aproximadamente una hora de antelación. Las alertas pueden ser fundamentales para poner en aviso a las compañías eléctricas y de telecomunicaciones, que de esta forma podrán posponer trabajos programados, reforzar sus turnos de trabajo, desconectar preventivamente dispositivos críticos y minimizar las transferencias entre redes adyacentes para minimizar el posible impacto de las tormentas de radiación solar y electromagnéticas.





## RIESGOS DERIVADOS DEL CLIMA ESPACIAL

**Dirección General de  
Protección Civil y Emergencias**

Red Radio de Emergencia - REMER

Las misiones encomendadas al SWPC son:

- Recopilar, analizar y evaluar los mejores datos disponibles sobre el clima espacial.
- Evaluar las necesidades existentes en dicho campo y lo que puede aportar la comunidad científica respecto a modelos, teorías y recopilación de datos en tiempo real, utilizando medios de la NASA, la ESA y la Agencia Espacial Rusa.
- Diseñar, fabricar, verificar, validar y poner en marcha nuevos productos y servicios que se ajusten a las necesidades de la comunidad de usuarios.
- Proporcionar información crítica en el momento apropiado y a las personas apropiadas, incluyendo predicciones de posibles eventos y su impacto.

Tanto la NOAA como la USAF utilizan modelos predominantemente empíricos para realizar sus predicciones.

Sitio web del SWPC/NOAA: <http://www.swpc.noaa.gov/>

Dentro de los presupuestos federales para el año fiscal 2010, la Administración de Estados Unidos dedicó 605 M\$ a la investigación heliofísica de la NASA (2,2% superior al presupuesto del 2009) y 11 M\$ para actividades de la NOAA relacionadas con el clima espacial (2,7 M\$ superior al del año anterior). Por otro lado, en el presente año 2010 la USAF ya está modernizando sus observatorios solares, adquiriendo nuevos sensores del clima espacial y desarrollando nuevos modelos físicos que permitan caracterizar el entorno Tierra-Sol, predecir el impacto en las operaciones y proteger sus recursos [28].

En los Estados Unidos se desarrollan periódicamente foros de debate sobre el clima espacial, con la participación de la industria y de instituciones gubernamentales y académicas:

- *Space Weather Enterprise Forum*. Se celebra anualmente y tiene como objetivos compartir información entre los participantes, crear conciencia situacional entre los mandos y los políticos encargados de la toma de decisiones, identificar puntos de acción para proteger infraestructuras críticas y recoger información para promover la implementación de un nuevo Plan Nacional sobre el Clima Espacial. Está organizado por el Consejo del Programa Nacional sobre Clima Espacial.
- *Space Weather Workshop*. Organizado por la NOAA, también se celebra con una periodicidad anual y tiene como objetivos unificar criterios sobre el clima espacial entre la comunidad científica y de investigación, los desarrolladores de aplicaciones, los organismos encargados de las operaciones y los usuarios finales.

#### 4.1.2. Iniciativas europeas.

En **Europa** existen iniciativas nacionales, de la Unión Europea y de la Agencia Espacial Europea [29], lo que en ocasiones provoca solapes en determinadas áreas de investigación. En la fig.12 se muestran las principales iniciativas europeas relacionadas con el clima espacial [1].

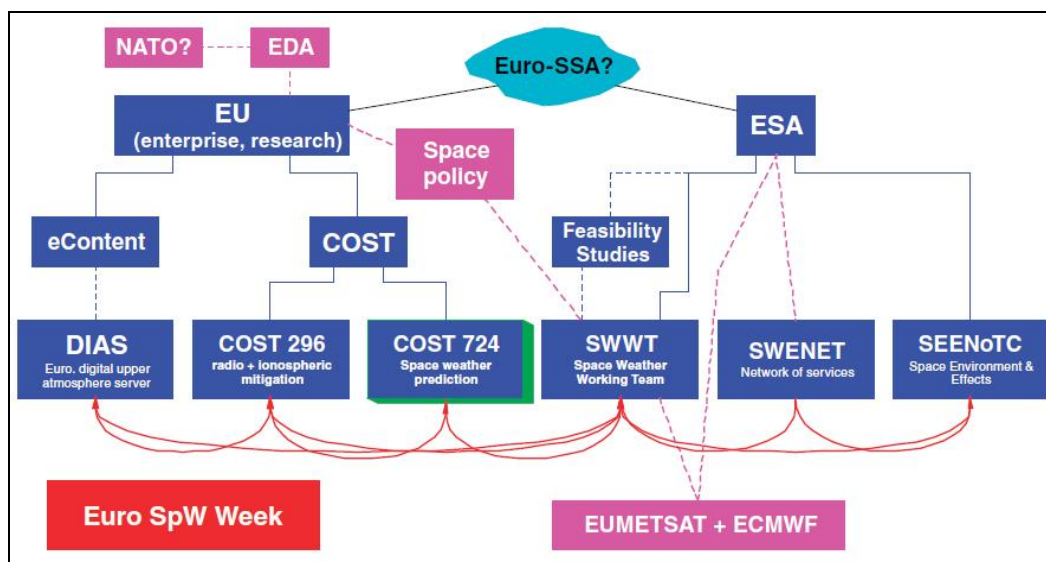
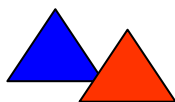


Fig.12. Iniciativas europeas relacionadas con el clima espacial (Rutherford Appleton Laboratory).



## RIESGOS DERIVADOS DEL CLIMA ESPACIAL

Dirección General de  
Protección Civil y Emergencias

Red Radio de Emergencia - REMER

Una de las iniciativas más importantes es **SWENET** (*Space Weather European Network*), o Red Europea del Clima Espacial, fundada originalmente por la ESA y a la que dicha agencia sigue apoyando como una actividad de investigación y desarrollo. La infraestructura de SWENET está operativa desde el año 2005, como un recurso centralizado de actividades relacionadas con el clima espacial, falicitando datos y servicios a los usuarios interesados.

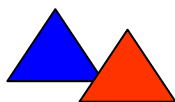
Sitio web de SWENET: <http://www.esa-spaceweather.net/swenet/>

Una de las iniciativas de SWENET es el proyecto **DIAS** (*European Digital Upper Atmosphere Server*), orientado a la explotación de datos para realizar predicciones ionosféricas y en el que participan dos instituciones españolas: el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y el Observatorio del Ebro.

También auspiciado por la ESA, el **Grupo de Trabajo sobre el Clima Espacial** (SWWT, *Space Weather Working Team*) es un foro abierto de expertos europeos científicos para el desarrollo aplicaciones orientadas al clima espacial, en el que además de la ESA también participan instituciones españolas como el INTA, la Universidad de Alcalá y la Universidad de Barcelona.

Destacar también las iniciativas **COST** (*European Cooperation in Science and Technology* o Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología), uno de los instrumentos más antiguos de cooperación entre científicos e investigadores de toda Europa. Se trata de un marco intergubernamental que posibilita la coordinación de actividades de investigación a nivel europeo con fondos nacionales. COST tiene dos iniciativas para desarrollar una red interdisciplinar de científicos europeos trabajando sobre el clima espacial:

- **COST 724**: desarrollo de las bases para la monitorización, el modelado y la predicción del clima espacial (24/11/2003-23/11/2007).
- **COST ES0803**: desarrollo de productos y servicios sobre el clima espacial en Europa. Puesto en marcha en noviembre de 2008, coincidiendo con la celebración de la Quinta



RIESGOS DERIVADOS DEL  
CLIMA ESPACIAL

Dirección General de  
Protección Civil y Emergencias

Red Radio de Emergencia - REMER

Semana Europea del Clima Espacial, es una iniciativa de 4 años con la que se pretende hacer la transición de los modelos científicos a los servicios operativos fiables [29].

Sitio web de COST ES0803: <http://www.costes0803.noa.gr/>

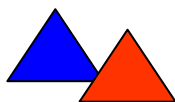
Finalmente, una de las iniciativas más recientes de la ESA es el **Programa Preparatorio de Consciencia Situacional Espacial** (SSA-PP, *Space Situational Awareness Preparatory Programme*) [30], autorizado por el Consejo Ministerial de la ESA en noviembre de 2008 y lanzado formalmente en enero de 2009. Tras un periodo inicial que durará hasta el año 2011, los servicios operativos completos quedarán implementados entre 2011-2019, conforme se vayan aprobando. Aparte de la vigilancia espacial y el seguimiento de objetos cercanos a la Tierra, este programa también se dedica a monitorizar de qué forma las condiciones del Sol, del viento solar, de la magnetosfera terrestre y de la ionosfera pueden afectar a las astronaves y a la infraestructura terrestre o poner en peligro la salud o la vida humana.

Sitio web del programa SSA-PP (ESA): <http://www.esa.int/SPECIALS/SSA/index.html>

En Europa se organiza, con una periodicidad anual, la **Semana Europea del Clima Espacial** (ESWW, *European Space Weather Week*). Se trata de un foro organizado por la ESA, el grupo COST ES0803 y otras organizaciones, con el objetivo de reunir a las diferentes comunidades que trabajan en asuntos relacionados con el clima espacial y cuyo principal foco es la implicación de los usuarios en dichas actividades.

#### 4.1.3. Iniciativas de Naciones Unidas.

En Naciones Unidas también existe concienciación sobre los asuntos relativos al clima espacial y muestra de ello es la puesta en marcha de la **Iniciativa Internacional del Clima Espacial** (ISWI, *International Space Weather Initiative*). Se trata de un programa internacional de cooperación para promover los avances en las ciencias del clima espacial mediante una combinación de despliegue de instrumentos, análisis e interpretación de datos,



RIESGOS DERIVADOS DEL  
CLIMA ESPACIAL

Dirección General de  
Protección Civil y Emergencias

Red Radio de Emergencia - REMER

construcción de modelos y comunicación de la información resultante al público en general y a estudiantes en particular. España participa en la Iniciativa ISWI a través de la Universidad de Alcalá.

Sitio web de la iniciativa ISWI (ONU): <http://www.iswi-secretariat.org/>

#### 4.1.4. *Iniciativas en otros países.*

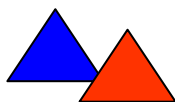
Otra importante agencia de vigilancia y predicción es **IPS Radio and Space Services**, del Gobierno de **Australia**, cuyos trabajos se centran principalmente en los sistemas radio de HF, la exploración geofísica, la protección de redes eléctricas y oleoductos y las operaciones de satélites [31]. La agencia opera una extensa red de estaciones de monitorización y observatorios en Australia y en la Antártida para recopilar información sobre el clima espacial que pueda ser útil a las operaciones de sus clientes, además de mantener un contacto permanente con agencias similares de otros países.

En **China**, existe un proyecto denominado KuaFu para la monitorización del clima espacial, que incluye el futuro lanzamiento de una sonda para monitorizar el viento solar.

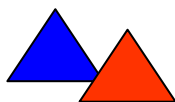
Otras organizaciones a destacar son el *Rutherford Appleton Laboratory* del **Reino Unido** y el *Solar Influences Data Center* (SIDC) de **Bélgica**.

#### 4.1.5. *Situación en España.*

En **España**, aparte de la participación en proyectos internacionales, se desarrollan al menos las siguientes actividades:



- La **Comisión Española de Geofísica y Geodesia (CEGG)** es un órgano colegiado interministerial adscrito al Ministerio de Fomento a través de la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, entre cuyos fines figuran:
  - Promover, apoyar e impulsar los trabajos, investigaciones y estudios físicos, químicos y matemáticos de la Tierra y su entorno, y definir las líneas prioritarias de acción pública en los campos de la Geodesia y la Geofísica.
  - Asesorar a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología en proyectos relativos a la Geodesia o a la Geofísica.
  - Asesorar a las Administraciones Públicas en materia de riesgos naturales asociados a fenómenos geofísicos.
  - Representar a España ante la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica y otras organizaciones similares
  
- **El Instituto Geográfico Nacional (IGN)** dispone de un Servicio de Geomagnetismo, que tiene encomendado como misión principal el estudio y medición del campo magnético terrestre. Para ello, dispone de 3 observatorios magnéticos (San Pablo de los Montes, Horta de San Joan y Güimar), 52 estaciones de repetición o seculares, puntos de mapa y valores obtenidos en vuelo en la Península Ibérica y las Islas Canarias. Sitio web: <http://www.ign.es/>
  
- **El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)** dispone de una estación de sondeo ionosférico en El Arenosillo (Huelva) y está trabajando en plataformas satelitales con instrumentación para la monitorización del clima espacial, como OPTOS, NanoSat y MicroSat. Participa además en el desarrollo de herramientas de apoyo a sistemas satélite, como SESS y SEISOP (*Space Environment Information System for Operations*).
  
- **El Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña** dispone de varios departamentos y grupos de trabajo sobre modelado de flujos de partículas interplanetarios y sobre los efectos del clima espacial en el GPS. Sitio web: <http://www.ieec.fcr.es/>



- La **Universidad de Barcelona** tiene un grupo de trabajo sobre la física solar-terrestre y el clima espacial en su Departamento de Astronomía y Meteorología. Sitio web: <http://www.am.ub.es/~blai/>
- La **Universidad de Málaga** cuenta con un grupo de estudios sobre el clima espacial, que investiga sobre eventos de partículas solares (SPE) y sobre la velocidad y trayectoria de las eyecciones de masa coronal. Sitio web: <http://spaceweather.uma.es/>
- El **Instituto Astrofísico de Canarias** realiza investigaciones sobre el Sol y el clima espacial. Sitio web: <http://www.iac.es/>
- La **Universidad de Extremadura** cuenta con investigadores sobre el clima espacial en su Facultad de Ciencias (Departamento de Física) y en su Escuela Politécnica (Departamento de Física Aplicada). Sitio web: <http://www.unex.es/>
- El **Observatorio del Ebro** dispone de un magnetómetro y una ionosonda, realizando actividades de monitorización del campo geomagnético y de la ionosfera a nivel local. Sitio web: <http://www.obsebre.es/>

En lo referente a los sistemas de información que pudieran desarrollarse para la difusión de alertas, la **Universidad Carlos III de Madrid** dispone de la experiencia de desarrollo de varias herramientas utilizadas en Protección Civil.

## 4.2. Tecnología de monitorización del clima espacial

Los sistemas de observación y detección de los eventos relacionados con el clima espacial se ubican tanto en la propia Tierra como en el espacio exterior. En la fig.13 se muestran las misiones espaciales de la NASA y otras organizaciones como la Agencia Espacial Europea, para la monitorización del clima espacial [1] [32].



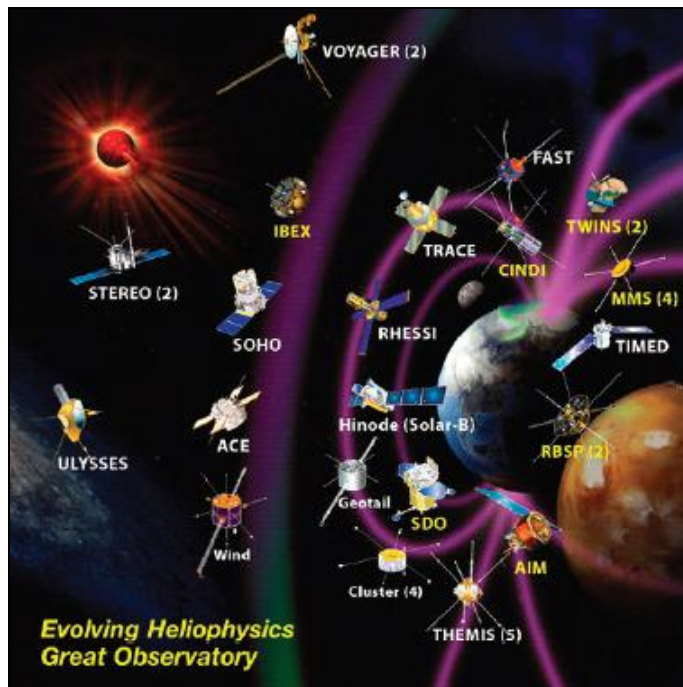


Fig.13. Misiones encargadas de la recolección de datos heliofísicos (NASA).

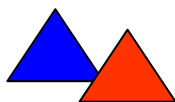
Los satélites de observación utilizan una combinación de sensores remotos y de medidores directos del viento solar. Hay que remarcar que los objetivos de las misiones de la NASA son principalmente científicos y que esta agencia no elabora datos de predicción ni de consciencia situacional (SA, *Situational Awareness*), aunque los datos recopilados por sus sondas se utilizan por otras agencias para estos fines.

En los siguientes apartados se muestra información de interés sobre algunas de las misiones más destacadas de monitorización y estudio del clima espacial.

#### 4.2.1. *Advanced Composition Explorer (ACE)*.

El satélite ACE proporciona datos a la NOAA desde su posición orbital ubicada en el punto Lagrangiano L1, entre el Sol y la Tierra, constituyendo una fuente primaria de mediciones de las partículas solares y el campo heliomagnético. ACE puede proporcionar





alertas del impacto de eyecciones de masa coronal del Sol en la Tierra con unos 45 minutos de antelación [1].

Los objetivos primarios de la misión ACE son la realización de mediciones y comparaciones de la composición de varios tipos de muestras de la materia, incluyendo la corona solar, el viento solar y otras poblaciones de partículas interplanetarias.

La misión se inició el 25 de agosto de 1997. Entre los instrumentos de interés a bordo de la astronave para el estudio del clima espacial, figuran los siguientes:

- SWEPPAM (*Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor*): Monitor de partículas alfa, electrones y protones del viento solar.
- RTWS (Real Time Solar Wind): Viento solar en tiempo real. Proporciona alertas, con una hora de antelación, sobre fenómenos anómalos

En la fig.14 se muestran los datos de viento solar recogidos por ACE/SWEPPAM entre el 8 de julio y el 8 de agosto del año 2000. Se observa perfectamente la tormenta solar del día de la Bastilla, entre los días 14-15 de julio.

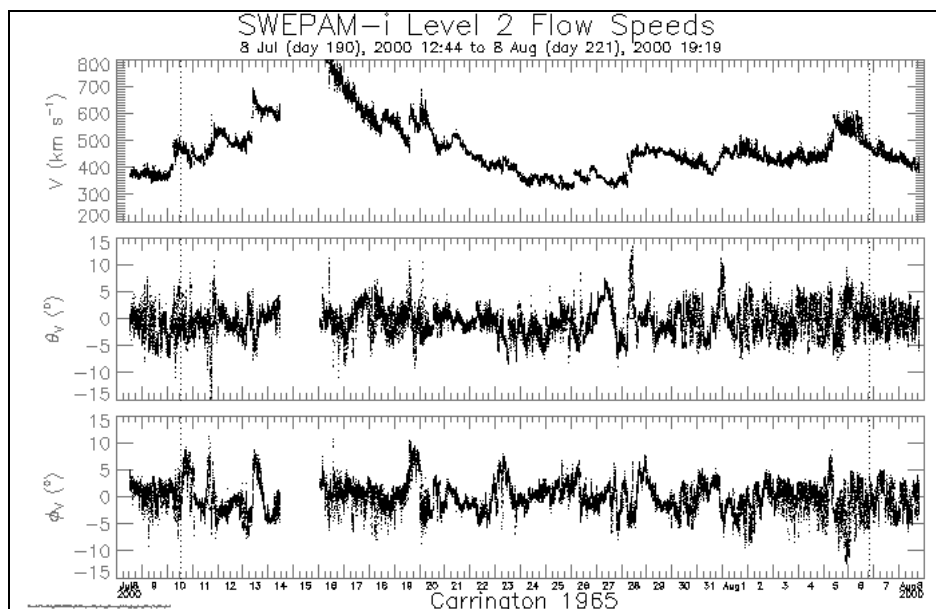


Fig.14. La tormenta del día de la Bastilla registrada por ACE/SWEPAM (NASA).

Sitio web de la misión ACE: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>

#### 4.2.2. Solar and Heliospheric Observatory (SOHO).

El Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO) es un esfuerzo cooperativo conjunto entre la ESA y la NASA, diseñado para estudiar la estructura interna del Sol, la heliosfera y los orígenes del viento solar. Lanzada en diciembre de 1995, la sonda fue ensamblada en Europa y dispone de instrumentos europeos y norteamericanos. La NASA fue la responsable del lanzamiento y actualmente se encarga de las operaciones.

La sonda cuenta con un total de doce instrumentos a bordo, entre ellos:

- EIT (*Extreme ultraviolet Imaging Telescope*): telescopio de ultravioleta extremo.
- LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph*): coronógrafo espectrométrico de gran angular.

En la fig.15 se muestra la eyección de masa coronal que provocó la tormenta solar del día de la Bastilla en el año 2000, registrada por uno de los coronógrafos de SOHO.

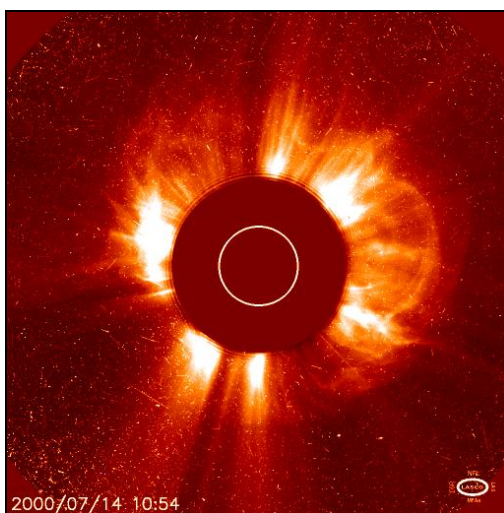


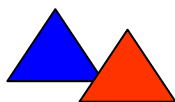
Fig.15. CME causante de la tormenta del día de la Bastilla, registrada por SOHO (NASA).

Sitio web de la misión SOHO: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

#### 4.2.3. *Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO).*

STEREO es la tercera misión del programa de sondas solares-terrestres de la NASA, lanzada en octubre de 2006 y con una duración inicial de dos años, aunque todavía en servicio. Consta de dos sondas-observatorio casi idénticas en la misma órbita que la Tierra, una por delante y otra por detrás de su trayectoria. El objetivo principal de la misión es estudiar la estructura 3D de las eyecciones de masa coronal (CME), para determinar su origen.

Los paquetes de instrumentos a bordo de las sondas son:



- SECCHI (*Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation*): dispone de una cámara de UV extremo, dos coronógrafos y una cámara heliosférica.
- SWAVES: monitor de ráfagas de ruido interplanetario en las bandas de radio.
- IMPACT (*In-situ Measurements of Particles and CME Transients*): encargada del análisis de las partículas energéticas procedentes del Sol y de su campo magnético.
- PLASTIC (*PLAsma and SupraThermal Ion Composition*), encargada de caracterizar el plasma de protones, partículas alfa e iones pesados.

En la fig.16 se muestra una prominencia solar detectada por las sondas STEREO entre el 26 y el 27 de septiembre de 2009, que tuvo una duración de 30 horas.

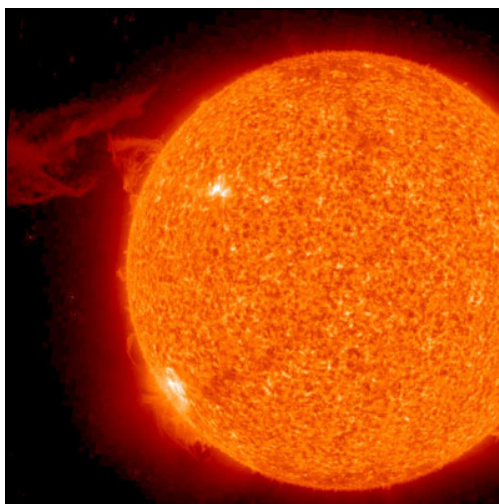
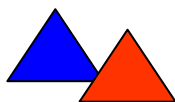


Fig.16. Prominencia solar detectada por las sondas STEREO (NASA).

Sitio web de la misión STEREO: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/stereo/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/main/index.html)



#### 4.2.4. Solar Dynamics Observatory (SDO).

El Observatorio Dinámico Solar (SDO) es la primera misión del programa de la NASA "Living With a Star", diseñado para comprender las causas de la variabilidad del Sol y su impacto en la Tierra. Valorado en 806 M\$, el SDO está diseñado para analizar la influencia del Sol en la Tierra y en el espacio cercano a la misma, estudiando la heliosfera a pequeñas escalas de espacio y tiempo y en varias longitudes de onda, de forma simultánea. Se trata de determinar cómo se genera y estructura el campo magnético solar y como la energía magnética que almacena el Sol se convierte y se libera hacia la heliosfera y el espacio exterior en forma de viento solar, partículas energéticas y variaciones en la irradiancia solar.

La SDO es la misión más reciente para el estudio del clima espacial, puesta en servicio en febrero de 2010. Lleva a bordo tres experimentos científicos:

- AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*). Obtiene imágenes de la heliosfera en varias longitudes de onda, para tratar de asociar cambios en el exterior y el interior del Sol.
- EVE (*EUV Variability Experiment*). Mide la irradiancia del Sol en el rango del UV extremo.
- HMI (*Helioseismic and Magnetic Imager*). Amplía las capacidades de la misión SOHO, con una cobertura completa de alta resolución del disco solar y nuevas capacidades de análisis del campo magnético.

En la fig.17 se muestra una imagen combinada del Sol en tres longitudes de onda distintas, que se asocian a diferentes temperaturas, tomada por el observatorio SDO.

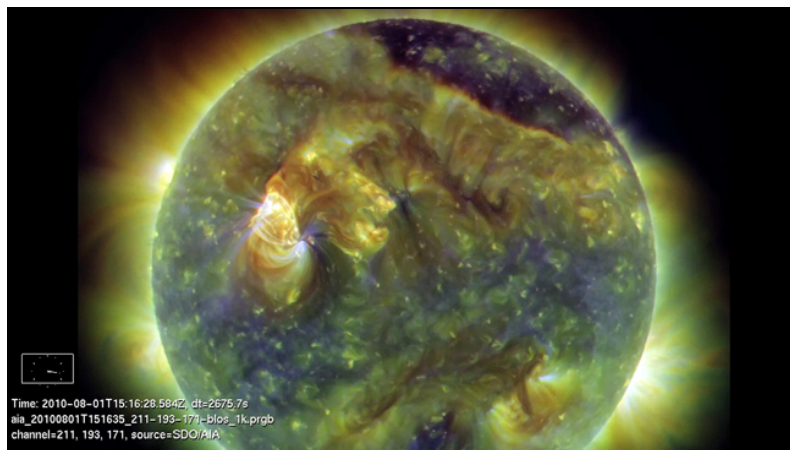


Fig.17. Imagen combinada del Sol en tres longitudes de onda distintas (SDO/NASA).

Con el Observatorio Solar Dinámico, la NASA ha adquirido la capacidad de proporcionar información de interés sobre el clima espacial con un retraso de tan sólo 15 minutos.

Sitio web de la misión SDO: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/>

#### 4.2.5. *Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES).*

Los satélites GOES dependen de la NOAA y su uso primario es la monitorización de la meteorología en la Tierra, aunque algunos de ellos también disponen de instrumentos de monitorización del clima espacial, como es el caso de los GOES-13, GOES-14 y GOES-15, que incorporan cámaras de rayos X, magnetómetros y monitores de protones y electrones energéticos, dentro del programa SXI de NOAA.

En la fig.18 se muestran las mediciones realizadas en la gama de rayos X por la sonda GOES-8, predecesora de las actualmente en servicio, durante las erupciones solares que dieron lugar a la tormenta del día de la Bastilla, en julio del año 2000.

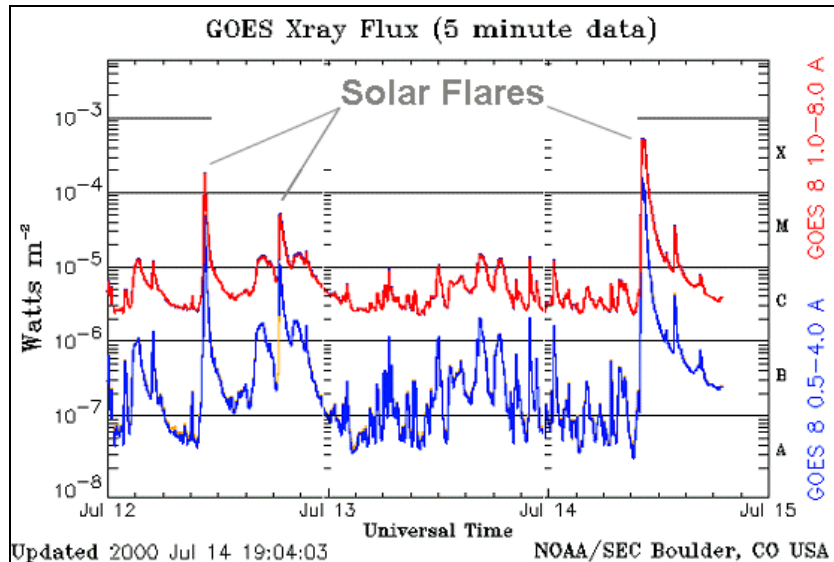


Fig.18. Erupciones solares de la tormenta del día de la Bastilla, registradas por GOES (NOAA).

Sitio web del programa GOES SXI: <http://www.swpc.noaa.gov/sxi/index.html>

#### 4.2.6. Observatorios terrestres.

Entre los observatorios terrestres que participan en la monitorización del clima espacial, figuran:

- Red Solar Electro-Óptica (**SEON**, *Solar Electro-Optical Network*) de la USAF, formada a su vez por la Red de Observación Óptica Solar (SOON, *Solar Optical Observing Network*) y la Red de Radiotelescopios Solares (RSTN, *Radio Solar Telescope Network*).
- Sistema Digital de Sondeo Ionosférico (**DISS**, *Digital Ionospheric Sounding System*) de la USAF, a reemplazar en el futuro por la red NEXION (*Next Generation Ionosonde*).



Destacar también la existencia de una red mundial de **magnetómetros** dependientes de instituciones oficiales y universitarias

#### 4.2.7. Ejemplo de seguimiento de una tormenta solar.

En la fig.19 se muestra una secuencia de imágenes tomadas el 28 de octubre de 2003 por dos sondas de la NASA y que reflejan de qué forma se monitorizaron los comienzos de la tormenta de Halloween.

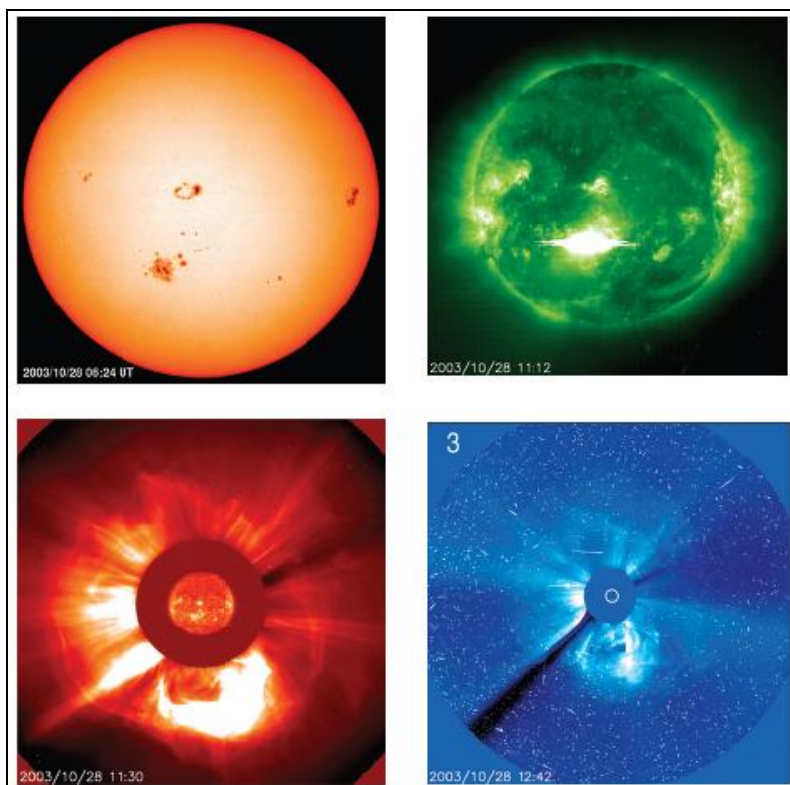
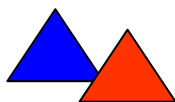


Fig.19. Monitorización de la tormenta de Halloween (NOAA).

La imagen de la parte superior izquierda muestra un Sol tranquilo pero con dos grandes manchas solares en la parte central. En la imagen superior derecha, el telescopio EIT de la sonda SOHO detecta una gran llamarada solar, originada en una de las manchas y de gran intensidad en el espectro de los rayos X. Dieciocho minutos más tarde, el coronógrafo LASCO





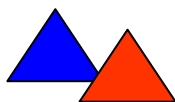
de la misma sonda detecta una gigantesca eyección de masa coronal (CME) asociada a la llamarada anterior. Una hora y media después, gran cantidad de iones y protones energéticos alcanzan la sonda, provocando un efecto de nieve en la imagen y confirmando que la tormenta solar se dirige hacia la Tierra.

### 4.3. Difusión de alertas y predicciones

Enlazar el conocimiento científico con la toma de decisiones es uno de los retos más importantes de la comunidad del clima espacial. La clave de que este enlace se produzca de forma efectiva reside en que la información proporcionada por los científicos cumpla tres condiciones [33]:

- **Notabilidad:** la información ha de ser relevante para las personas encargadas de la toma de decisiones.
- **Credibilidad:** la información ha de tener unos buenos razonamientos científicos, evidencias técnicas y argumentos.
- **Legitimidad:** la información ha de considerarse imparcial y equilibrada, procedente de una fuente fiable que se ha preocupado de adecuarla a las necesidades del usuario final.

El retraso en la presentación de las alertas y las predicciones oscila entre unos minutos y algunas horas desde el momento en el que sucede un evento de clima espacial, debido al procesamiento o incluso a la introducción de los datos en modelos numéricos. Los datos suelen estar disponibles durante las 24 horas del día y en algunos casos, los usuarios finales pueden solicitar productos bajo demanda o la recepción de los mismos a través de listas de correo electrónico [1].



El retraso en cuestión puede o no ser crítico, en función del destinatario de la alerta. Por ejemplo, un operador de transporte eléctrico de alta tensión necesita al menos 15 minutos para realizar las operaciones de protección necesarias en su red de transporte. En este caso particular, la información proporcionada por la sonda ACE, con una antelación de 45 minutos antes de que una tormenta geomagnética provocada por una eyección de masa coronal alcance la Tierra, puede ser perfectamente suficiente.

Uno de los retos científicos actuales es la reducción del tiempo con el que se emiten las alertas, mediante la mejora de los modelos numéricos empleados para calcular el impacto de los eventos del clima espacial

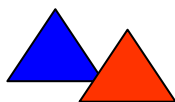
#### 4.3.1. SWPC/NOAA.

El SWPC de la NOAA ofrece gratuitamente gran cantidad de productos y servicios a la comunidad relacionada con el clima espacial, a través de varios medios:

- Sitio web: <http://www.swpc.noaa.gov/index.html>
- Servidor FTP anónimo: <http://www.swpc.noaa.gov/Data/index.html>
- Listas de correo electrónico: <https://pss.swpc.noaa.gov/>
- Difusión vía satélite (*NOAA Weather Wire*): <http://www.swpc.noaa.gov/wwire.html>

Entre los datos de mayor interés figuran:

- Difusión de alertas en tiempo real: tormentas de radiación solar, tormentas geomagnéticas, apagones de radio.
- Valores de los índices geomagnéticos Kp y Ap.
- Informes sobre eventos solares: erupciones, ruido en bandas de radio, eventos solares de protones (SPE).
- Gráficas de las mediciones realizadas por magnetómetros y medidores de partículas energéticas.
- Imágenes de Sol en distintas bandas.



- Predicciones de clima espacial para las próximas 24-72 horas. Diariamente también se ofrecen predicciones a 3 días y semanalmente, predicciones a 27 días.

Algunas de las alertas del SWPC también se difunden por radio en HF, a través de la estación **WWV** del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (NIST, *National Institute of Standards and Technology*), en 2.5, 5, 10, 15 y 20 MHz, 18 minutos después de cada hora en punto.

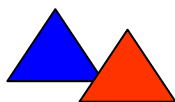
Actualmente, la NOAA coordina la generación de productos de alerta para el Centro de Operaciones de la FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) [10].

#### 4.3.2. SWENET.

La Red Europea del Clima Espacial (SWENET) ofrece servicios relacionados con predicciones del clima espacial, efectos ionosféricos, efectos de las corrientes inducidas geomagnéticamente (GIC) y efectos en astronaves y aeronaves, todos ellos a través de su sitio web en Internet: <http://www.esa-spaceweather.net/swenet/>

#### 4.3.3. Portal Europeo del Clima Espacial.

El Portal Europeo del Clima espacial es una iniciativa del grupo de trabajo COST 724, que constituye un sitio web integrado para proveer de un punto de acceso centralizado a la comunidad relacionada con el clima espacial, con el objetivo de compartir sus conocimientos y el resultado de sus investigaciones. Los servicios proporcionados por el portal incluyen el acceso a datos sobre el clima espacial (en formatos gráficos y numéricos), a una plataforma que permite realizar simulaciones con modelos numéricos y a predicciones del clima espacial y de sus efectos sobre sistemas tecnológicos. El portal está disponible en: <http://www.spaceweather.eu/en/>



#### 4.3.4. IPS Radio and Space Services.

La agencia australiana del clima espacial ofrece información en tiempo real sobre las condiciones solares (velocidad del viento solar, flujo de rayos X), las condiciones geofísicas (alertas geomagnéticas y de auroras), el estado de la propagación en la banda de HF, las condiciones ionosféricas y el contenido total de electrones en la ionosfera, entre otros servicios que se ofrecen a través de su portal: <http://www.ips.gov.au/>

En la fig.20 se muestra un ejemplo de alerta geomagnética emitida por el IPS.

### Geomagnetic Warning

**Warning** Last updated 16 Nov 2010 09:00 UT

SUBJ: IPS GEOMAGNETIC DISTURBANCE WARNING 10/15  
ISSUED AT 14/2240Z NOVEMBER 2010  
BY THE AUSTRALIAN SPACE FORECAST CENTRE.

INCREASED GEOMAGNETIC ACTIVITY EXPECTED  
DUE TO CORONAL HOLE HIGH SPEED WIND STREAM  
AND CME IMPACT.

FROM 15-16 NOVEMBER 2010

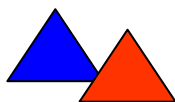
---

GEOMAGNETIC ACTIVITY FORECAST  
15 Nov: active  
16 Nov: active

Fig.20. Ejemplo de alerta geomagnética (IPS).

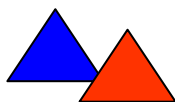
#### 4.3.5. Otras fuentes.

El autor de este informe mantiene un sitio web en el que se recopila la información de monitorización del clima espacial, difusión de alertas y predicciones, elaboradas por distintas agencias de interés. El sitio web incluye también una ayuda interactiva para interpretar los distintos parámetros y está disponible en español y en inglés: <http://www.ipellejero.es/hf/>

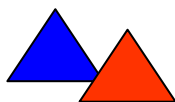


## 5. REFERENCIAS

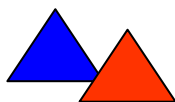
- [1]. *"Severe Space Weather Events. Understanding Societal and Economic Impacts. A workshop report"*. Space Studies Board. Division on Engineering and Physical Sciences. National Research Council of the National Academies, EE.UU., 2008.
- [2]. Presentación del Dr. Arthur Charo (Senior Program Officer, Space Studies Board, National Research Council) en el *"2010 Space Weather Enterprise Forum"*. Washington, 8 de junio de 2010.
- [3]. *"National Space Weather Program advances on several fronts"*. Gunzelman, M. y M. Babcock (2008). Space Weather Quarterly, volume 5, issue 4. American Geophysical Union.
- [4]. *"Grid Reliability and Infrastructure Defense Act"*. Report 111-493. House of Representatives, 11<sup>th</sup> Congress, 2d Session. 25 de mayo de 2010. Disponible en: [http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getdoc.cgi?dbname=111\\_cong\\_reports&docid=f:hr493.111.pdf](http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getdoc.cgi?dbname=111_cong_reports&docid=f:hr493.111.pdf)
- [5]. *"El Sol, algo más que una estrella"*. Manuel Vázquez Abeledo. 1<sup>a</sup>.Ed. Sirius, 2004.
- [6]. *"Solar and Heliospheric Origins of Space Weather Phenomena"*. Jean-Pierre Rozelot. Springer, 2006.
- [7]. SIDC-team, World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium, Monthly Report on the International Sunspot Number, online catalogue of the sunspot index: <http://www.sidc.be/sunspot-data/>, '1755-2008'
- [8]. *"The Sun and Space Weather"*. A. Halnsmeier. Springer, 2007.



- [9]. *"Forecasting Solar Cycle 24 using the relationship between cycle length and maximum sunspot number"*. Watari, S. (2009). Space Weather Quarterly, volume 6, issue 1. American Geophysical Union.
- [10]. Presentación de Vickie Nadolski (Deputy Assistant Administrator for Weather Services and Deputy Director, National Weather Service, NOAA) en el "2010 Space Weather Enterprise Forum". Washington, 8 de junio de 2010.
- [11]. Presentación del Col. Mark Zettlemoyer (Director of Weather, Headquarters, United States Air Force) en el "2010 Space Weather Enterprise Forum". Washington, 8 de junio de 2010.
- [12]. *"Space Weather & Telecommunications"*. John M. Goodman. Springer, 2005.
- [13]. *"Severe Space Weather. Social and Economic Impacts"*. James A. Phillips. NASA Science News, 21/01/2009. Disponible en Internet: [http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2009/21jan\\_severespaceweather/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2009/21jan_severespaceweather/)
- [14]. *"Preparing for the upcoming solar maximum"*. Tretkoff, E. (2009). Space Weather Quarterly, volume 6, issue 3. American Geophysical Union.
- [15]. *"Space Weather. The physics behind a slogan"*. K.Scherer, H.Fichtner, B.Heber y U.Mall. Springer, 2005.
- [16]. *"Ionospheric scintillation effects on single frequency GPS"*. R.A.Steenburgh et Al. (2008). Space Weather Quarterly, volume 5, issue 2. American Geophysical Union.
- [17]. Orden ITC/332/2010, de 12 de febrero, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias (CNAF). BOE núm 44, 19 de febrero de 2010.



- [18]. Presentación de Christopher J. Scolese (Associate Administrator, National Aeronautics and Space Administration) en el "2010 Space Weather Enterprise Forum". Washington, 8 de junio de 2010.
- [19]. "*Glossary of Solar-Terrestrial Terms*". Space Weather Prediction Center. NOAA.
- [20]. "*Geomagnetically induced currents during intense storms driven by coronal mass ejections and corotating interacting regions*". Kataoka, R. y A. Pulkkinen (2008). *J. Geophys. Res.*, 113
- [21]. "*Solar wind drivers of large scale geomagnetically induced currents during the solar cycle 23*". Huttunen, K. et Al. *Space Weather Quarterly*, volume 6, issue 1. American Geophysical Union.
- [22]. "*Improved modeling of geomagnetically induced currents in the South African power network*". Chigomezyo, M. et Al. (2009). *Space Weather Quarterly*, volume 6, issue 2. American Geophysical Union.
- [23]. "*The Great Storm: Solar Tempest of 1859 Revealed*". Robert R. Britt. Octubre 2003. [http://www.space.com/scienceastronomy/mystery\\_monday\\_031027.html](http://www.space.com/scienceastronomy/mystery_monday_031027.html)
- [24]. Presentación del Cap. Paul Stewart (Commanding Officer, Naval Research Laboratory, United States Navy) en el "2010 Space Weather Enterprise Forum". Washington, 8 de junio de 2010.
- [25]. "*Meteorología Espacial*". Sanahuja, B. (Departamento de Astronomía y Meteorología, Facultad de Física, Universidad de Barcelona). *Revista Española de Física*, vol.17, nº4 (2003).
- [26]. "*The Bastille Day Event*". Geophysical Institute. University of Alaska Fairbanks. <http://gse.gi.alaska.edu/bastilleday.html>

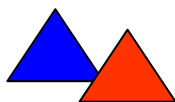


- [27]. *"Space weather in the FY 2009 U.S. federal budget request"*. Kumar, M. (2008). Space Weather Quarterly, volume 5, issue 1. American Geophysical Union.
- [28]. *"Proposed U.S. Space Weather Budget"*. Showstack, R. (2009). Space Weather Quarterly, volume 6, issue 3. American Geophysical Union.
- [29]. *"Renewed support dawns in Europe: An action to develop space weather products and services"*. Belehaki, A et Al. (2009). Space Weather Quarterly, volume 6, issue 1. American Geophysical Union.
- [30]. Presentación de Juha-Pekka Luntama (Space Situational Awareness Programme, Space Weather Manager, European Space Agency, European Space Astronomy Centre, Madrid, Spain) en el "2010 Space Weather Enterprise Forum". Washington, 8 de junio de 2010.
- [31]. *"Space weather studies in Australia"*. Wilkinson, P. (2009). Space Weather Quarterly, volume 6, issue 2. American Geophysical Union.
- [32]. *"Under the lens: Investigating the Sun's mysteries"*. Harwood, W. e I.Klotz (2008). Space Weather Quarterly, volume 5, issue 4. American Geophysical Union.
- [33]. *"Lessons from aviation: Linking space weather science to decision making"*. Fisher, G. (2009). Space Weather Quarterly, volume 6, issue 1. American Geophysical Union

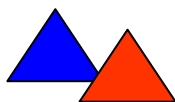
## 6. GLOSARIO

- **ACE:** *Advanced Composition Explorer*. Sonda de la NASA para la monitorización del clima espacial, ubicada en el punto lagrangiano L1.
- **AFWA:** *Air Force Weather Agency*. Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea de EE.UU.
- **CIR:** *Corotating Interaction Regions*. Regiones de interacción corrotativa en el Sol.





- **CME:** *Coronal Mass Ejection*. Eyección de masa coronal en el Sol.
- **C/NOFS:** *Communications/Navigation Outage Forecast System*. Sistema de Predicción de Fallos de Navegación y Comunicaciones de la Fuerza Aérea de EE.UU.
- **COST:** *European Cooperation in Science and Technology*. Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología.
- **CTM:** *Continuum Storm*. Tormenta de ruido continuo.
- **DC:** *Direct current*. Corriente continua.
- **DIAS:** *European Digital Upper Atmosphere Server*. Servidor europeo digital de la alta atmósfera.
- **DMSP:** *Defense Meteorological Satellites Program*. Programa de satélites meteorológicos de defensa (EE.UU.).
- **DSP:** *Defense Support Program*. Programa de Apoyo a la Defensa (EE.UU.).
- **EMP:** *Electro Magnetic Pulse*. Pulso electromagnético.
- **ESA:** *European Space Agency*. Agencia Espacial Europea.
- **ESWW:** *European Space Weather Week*. Semana europea del clima espacial.
- **EVA:** *Extra-Vehicular Activity*. Actividad extravehicular.
- **FEMA:** *Federal Emergency Management Agency*. Agencia Federal de Gestión de Emergencias de EE.UU.
- **GIC:** *Geomagnetically Induced Currents*. Corrientes inducidas geomagnéticamente.
- **GLONASS:** *Global Navigation Satellite System*. Sistema global de navegación por satélite puesto en servicio por Rusia.
- **GOES:** *Geostationary Operational Environmental Satellites*. Satélites geoestacionarios de monitorización del entorno, puestos en servicio por la NOAA.
- **GPS:** *Global Positioning System*. Sistema de posicionamiento global.
- **HF:** *High Frequency*. Banda de frecuencias de radio comprendida entre 3 MHz y 30 MHz.
- **ICM:** Aplicaciones industriales, científicas y médicas.
- **IMF:** *Interplanetary Magnetic Field*. Campo magnético interplanetario.
- **INTA:** Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
- **ISN:** *International Sunspot Number*. Número internacional de manchas solares.
- **ISWI:** *International Space Weather Initiative*. Iniciativa Internacional del Clima Espacial de Naciones Unidas.

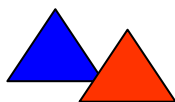


## RIESGOS DERIVADOS DEL CLIMA ESPACIAL

Dirección General de  
Protección Civil y Emergencias

Red Radio de Emergencia - REMER

- **LEO:** *Low Earth Orbit*. Satélites de órbita baja.
- **LF/HC:** *Low-Frequency/High-Consequence*. Eventos de baja frecuencia / alto impacto.
- **MUF:** *Maximum Usable Frequency*. Máxima frecuencia utilizable.
- **NASA:** *National Aeronautics and Space Administration*. Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de los EE.UU.
- **NIST:** *National Institute of Standards and Technology*. Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU.
- **NOAA:** *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera de EE.UU.
- **NRC:** *National Research Council*. Consejo Nacional de Investigación de EE.UU.
- **NSWP:** *National Space Weather Program*. Programa Nacional del Clima Espacial (EE.UU.).
- **PCA:** *Polar Cap Absorption*. Absorción de las ondas de radio en las zonas polares.
- **PFU:** *Proton Flux Unit*. Unidad de flujo de protones.
- **SDO:** *Solar Dynamics Observatory*. Sonda de la NASA para la monitorización del clima espacial, puesta en servicio en 2010.
- **SEISOP:** *Space Environment Information System for Operations*. Sistema de información sobre el entorno espacial para operaciones.
- **SFI:** *Solar Flux Index*. Índice de flujo solar.
- **SID:** *Sudden Ionospheric Disturbances*. Perturbaciones ionosféricas repentinas.
- **SIDC:** *Solar Influences Data Center*. Centro de estudios solares de Bélgica.
- **SNR:** *Signal to Noise Ratio*. Relación señal a ruido.
- **SOHO:** *Solar and Heliospheric Observatory*. Sonda para la monitorización del Sol y del clima espacial, diseñada por la NASA y la ESA.
- **SPE:** *Solar Particle Events*. Eventos de partículas solares muy energéticas.
- **SSA-PP:** *Space Situational Awareness Preparatory Programme*. Programa Preparatorio de Consciencia Situacional Espacial de la ESA.
- **SSC:** *Storm Sudden Commencement*. Inicio repentino de tormenta geomagnética.
- **SSN:** *Sun Spot Number*. Número de manchas solares.
- **STEREO:** *Solar Terrestrial Relations Observatory*. Pareja de sondas de la NASA dedicadas a la monitorización del Sol y del clima espacial.
- **SWENET:** *Space Weather European Network*. Red Europea del Clima Espacial.



RIESGOS DERIVADOS DEL  
CLIMA ESPACIAL

Dirección General de  
Protección Civil y Emergencias

Red Radio de Emergencia - REMER

- **SWPC:** *Space Weather Prediction Center*. Centro de Predicción del Clima Espacial de la agencia NOAA (EE.UU.).
- **SWWT:** *Space Weather Working Team*. Grupo de Trabajo sobre el Clima Espacial.
- **USAF:** *United States Air Force*. Fuerza Aérea de los EE.UU.
- **USGS:** *United States Geological Survey*. Inspección Geológica de los EE.UU.
- **UV:** Ultra Violeta.
- **WAAS:** *Wide Area Augmentation System*. Sistema de mejora en el posicionamiento proporcionado por el GPS, mediante correcciones diferenciales.

## 7. PUNTO DE CONTACTO

Autor del informe:

**Ismael Pellejero Ibáñez.**

Ingeniero de Telecomunicación.

Red Radio de Emergencia (REMER).

Dirección General de Protección Civil y Emergencias.

Email : ismael.pellejero@gmail.com

Teléfono : 680 405 979.