

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la influencia del viento solar sobre las
comunicaciones por satélite y sus soluciones

Autor: Raúl García Pérez

Tutor: D. Francisco Javier Escribano Aparicio

2021

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

**Estudio de la influencia del viento solar sobre las
comunicaciones por satélite y sus soluciones**

Autor: Raúl García Pérez

Tutor: D. Francisco Javier

Escribano Aparicio

Tribunal:

Presidente: Lucas Cuadra Rodríguez

Vocal 1º: José M. Villafranca Continente

Vocal 2º: Fco. Javier Escribano Aparicio

Fecha de depósito: 01 de Octubre de 2021

*“Vivimos en una sociedad
profundamente dependiente de la
ciencia y la tecnología y en la que
nadie sabe nada de estos temas.
Ello constituye una fórmula segura
para el desastre”*

Carl Sagan

Agradecimientos

A mis padres, mi hermano y amigos. A todos los que me han apoyado siempre. Y a los profesores que se esforzaron porque sus alumnos entiéramos los conceptos fundamentales de las telecomunicaciones razonando y sin mecanizar una pila de problemas tipo. Ellos nos transmitieron la pasión por esta rama del conocimiento.

Resumen

Para la realización de este proyecto sobre la influencia del viento solar en las comunicaciones por satélite y sus posibles soluciones, inicialmente se ha hecho un estudio acerca del evento físico adverso, y nos hemos centrado en los principales procesos que emiten radiación a la Tierra:

- Eyección de masa coronal
- Corrientes de viento solar rápido

Este estudio preliminar da con las claves para después analizar cómo ha influenciado a la tecnología a lo largo de la historia, y cuáles son los principales problemas a los que nos enfrentamos en caso de que la Tierra se viera involucrada en los efectos de una gran tormenta solar. Por último, se han analizado soluciones dadas por la comunidad científica, para evitar o minimizar los efectos de una posible catástrofe tecnológica, diseñando la protección del satélite en sí, e intentando interferir lo menos posible en el servicio dado. Además, se mencionan las posibles aplicaciones que podría tener el diseño de estas soluciones en la industria espacial.

Palabras clave:

Eyección de masa coronal

Viento Solar

Magnetosfera

Ionosfera

Partículas energéticas solares

Órbita baja terrestre

Sistema global de navegación por satélite

Sistema de posicionamiento global

Abstract

To carry out this project on the influence of the solar wind on satellite communications and its possible solutions, a study has been made about the adverse physical event, and we have focused on the main processes that emit radiation to the Earth:

- Coronal mass ejections
- Rapid solar wind currents

This preliminary study gives the keys to later analyze how it has influenced technology throughout history, and selections are the main ones that we face in case the Earth were involved in the effects of a great solar storm. Finally, solutions given by the scientific community have been analyzed to avoid or minimize the effects of a possible technological catastrophe, designing the protection of the satellite itself, and trying to interfere as little as possible in the given service. In addition, the possible applications that the design of these solutions could have in the space industry are mentioned.

Keywords:

Coronal Mass Ejection

Solar Wind

Magnetosphere

Ionosphere

Solar Energetic Particles

Low Earth Orbit

Global Positioning System

Global Navigation Satellite System

Índice general

Resumen	1
Abstract	3
Índice general	5
Índice de figuras	7
Índice de tablas	10
Índice de ecuaciones	11
Lista de acrónimos.....	12
Capítulo 1: Introducción	13
Capítulo 2: Entorno Espacial	17
2.1 Viento Solar	17
2.2 Magnetosfera.....	20
2.3 Campo magnético solar.	25
Capítulo 3: Estudio de la problemática.	36
3.1 Alteración S/N a HF en la ionosfera.	37
3.2 Dañado de paneles solares.	41
3.3 Descargas por acumulación electrostática interna y superficial	44

3.4 Corrupción del software y las memorias a bordo del satélite.....	50
3.5 Desviación de la órbita en satélites LEO.	51
Capítulo 4: Estrategias de mitigación y análisis de soluciones.	57
4.1 Estrategia de monitorización del clima espacial.	59
4.2. Estrategia de mitigación de los efectos en el diseño del propio satélite.	79
Capítulo 5: Conclusiones	83
Bibliografía	86

Índice de figuras

Figura 1. 1: Resumen del clima espacial [1].	15
Figura 2. 1: Forma y dirección de las líneas de campo de la magnetosfera a) líneas "abiertas" b) líneas cerradas.	21
Figura 2. 2: Imagen tomada por la NASA del arco de choque de la estrella R-Hydrae	22
Figura 2. 3: Ilustración de la magnetosfera terrestre, indicando las partes más relevantes.	22
Figura 2. 4: simulación de la interacción entre el campo magnético terrestre y el viento solar. La magnetosfera se comprime en la parte que afronta el Sol, y se extiende en el lado nocturno.	23
Figura 2. 5: líneas de campo de un dipolo magnético sin distorsionar.	24
Figura 2. 6: Manchas solares.	26
Figura 2. 7: diagrama de mariposa de Maunder [7].	26
Figura 2. 8: capturado el 26 de enero de 2012 por los coronógrafos C2 y C3 de LASCO a bordo del Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO) de la ESA / NASA.	29
Figura 2. 9: Traza del magnetómetro del observatorio de Greenwich. La parte superior indica la fuerza horizontal, y la parte inferior la declinación. Las flechas rojas indican el crochet magnético, o efecto de la erupción solar sobre el campo magnético terrestre [11].	33
Figura 2. 10: Parámetros asumidos de viento solar, y comparación entre el Dst modelado en el estudio, y el registrado por el magnetómetro de Bombay [11].	33
Figura 2. 11: índice Dst durante las tormentas de Halloween de 2003, en un periodo de 30 días [11].	34
Figura 2. 12: Descrito en orden descendente, intensidad de la erupción solar en W/m^2 , fuerza horizontal, fuerza vertical y declinación durante el (a) 28 de octubre de 2003, y el (b) 4 de noviembre de 2003 [11].	34
Figura 3. 1: Representación de los efectos ionosféricos en señales satelitales [17].	38
Figura 3. 2: Comparación de la relación portadora/ruido, entre un satélite que presenta centelleo (azul) y otro que no (verde) [17].	39

Figura 3. 3: variación del índice Dst y Kp para los dos días de tormenta [18].....	40
Figura 3. 4: montaje del ensayo en la investigación del CNEA [19].....	42
Figura 3. 5: degradación de la curva I/V [19].....	42
Figura 3. 6: Respuesta espectral medida y simulada de una celda, antes y después de la irradiación [19].	43
Figura 3. 7: (gráficas 1-8) Ejemplo de cuatro eventos de corrientes de viento solar rápido observados durante septiembre de 2003 [2]......	47
Figura 3. 8: procesos caracterizados por los índices previamente descritos. Los más destacables son la corriente de anillo opuesta a la corriente de la magnetopausa que debilitan el campo magnético terrestre, el electrochorro auroral y la localización de la zona por donde más partículas penetran hacia la Tierra, generalmente los polos.	49
Figura 3. 9: índice Dst para las tormentas citadas [22].	52
Figura 3. 10: Dst y efecto de arrastre durante la tormenta de Halloween 2003 en los satélites CHAMP (arriba) y GRACE (abajo). Valores reales medidos por los satélites (columna izquierda), y valores simulados por el modelo JB2008 (columna derecha). Efecto de arrastre producido en condiciones normales (línea rosa), y producido durante la tormenta (línea azul) [22].	53
Figura 3. 11: Predicción JB2008 del arrastre orbital producido en los satélites CHAMP y GRACE para los eventos históricos seleccionados en el estudio [22].	55
Figura 4. 1: Compendio de imágenes tomadas de la iniciativa Space Weather de la ESA. a) Vídeo con la previsión de EMCs y viento solar. b) Manchas solares las últimas 24 horas. c) Estado de la magnetosfera. d) TEC en función de la latitud, en la zona cercana al polo norte [25].	60
Figura 4. 2: Datos con menos de una hora de demora, sobre el TEC en Europa, proporcionados por la iniciativa “Space Weather” de la ESA, haciendo uso del IMPC. Es posible descargar los datos en formato de tabla numérica [24].	62
Figura 4. 3: Monitorización del valor del índice S4, proporcionado por la interfaz web del IMPC [25].	65
Figura 4. 4: Densidad atmosférica neutra a nivel global, el 19 de septiembre de 2018 a 200km de altitud [24].	67
Figura 4. 5: Interfaz de monitorización del SWPC [31].	70
Figura 4. 6: Posición orbital L1.	71
Figura 4. 7: Representación artística del satélite SOHO [34].	73
Figura 4. 8: Interfaz de página web de la NASA donde se pueden consultar las últimas imágenes tomadas por el satélite SOHO [34].	74
Figura 4. 9: Uno de los dos satélites idénticos STEREO [35].	75

Figura 4. 10: órbitas de las sondas STEREO [35]76

Figura 4. 11: Partículas SEP observadas por coronógrafo de las sondas STEREO, en la cara oculta del sol.....78

Índice de tablas

Tabla 1: Clasificación de erupciones solares [12].....	30
Tabla 2: Parámetros solares de las erupciones solares del 3 de noviembre de 2015 [18].....	40
Tabla 3: Características generales de las celdas de referencia [19].	43

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Distancia Chapman-Ferraro en función de R_p : radio del cuerpo. B_{spf} : campo magnético en la superficie del ecuador y V_{vs} : velocidad del viento solar. (unidades SI) [5]	20
Ecuación 2: velocidad de grupo de una señal GPS en función del estado de la ionosfera.....	37
Ecuación 3: n_e = número de electrones; q = carga; ϵ = permeabilidad eléctrica del medio; m_e = masa del electrón. Dicha pulsación suele estar en torno a los $2\pi(1 - 10 \text{ MHz}) \text{ rad/s}$	37
Ecuación 4: velocidad de fase de una señal GPS en función del estado de la ionosfera.....	37

Lista de acrónimos

ACE	<i>Advanced Composition Explorer</i>
AE	<i>Auroral Ejection Index</i>
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica de Buenos Aires.
DST	<i>Disturbance Storm Index</i>
EMC	Eyección de Masa Coronal
ESA	<i>European Space Agency</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
H	<i>Horizontal Strength Index</i>
IMPC	<i>Ionosphere Monitoring and Prediction Center</i>
ISS	<i>International Space Station</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
SEP	<i>Solar Energetic Particles</i>
SEU	<i>Single Event Upset</i>
SOHO	<i>Solar and Heliospheric Observatory</i>
STEREO	<i>Solar Terrestrial Relations Observatory</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>

Capítulo 1

Introducción

La incertidumbre del clima espacial puede suponer un riesgo para la tecnología actual, este trabajo se centrará en estudiar la importancia de conocer tal riesgo y saber sobreponernos a ello en las comunicaciones por satélite. Principalmente por el difícil acceso a éstas en caso de avería y el advenimiento de enormes constelaciones de satélites en las próximas décadas.

El Sol, radia energía mediante un conjunto de procesos: ráfagas de viento solar rápido, erupciones solares, eyecciones de masa coronal, rayos-X/gamma/ultravioleta y partículas solares energéticas SEP [Figura 1. 1]. Dichos procesos son conocidos por la comunidad científica y han sido objeto de estudio entre otras cosas, por las tormentas geomagnéticas que causan en la Tierra.

Los astrónomos británicos Richard C. Carrington y Richard Hodgson observaron zonas especialmente brillantes en el Sol durante la mañana del dos de septiembre de 1859. Sin saberlo, iban a ser testigos del mayor evento climático espacial registrado de la historia, el llamado Evento Carrington. Durante la tormenta geomagnética generada, se incendió la rudimentaria red de telecomunicaciones del momento, que sólo conocía el telégrafo, varios operarios resultaron heridos por descargas eléctricas, y supuso una gran pérdida económica entonces, cuando la tecnología no era prácticamente omnipresente como en la actualidad.

Estos fenómenos forman parte del transcurso vital de las estrellas, y numerosas tormentas solares han seguido aconteciendo a lo largo de la historia con mayor o menor impacto sobre la tecnología contemporánea. En Halloween de 2003, otra tormenta a priori menos intensa que el Evento Carrington, acabó generando

disfuncionalidades en el 10% de los satélites operativos en ese momento.

Renombrados científicos como Daniel N. Baker o Nicky Fox ya han advertido acerca de esta situación y los problemas derivados de ella, como la descarga electrostática en los componentes de los satélites debido a las partículas cargadas emitidas por el sol, la posible perturbación de órbita de los satélites debido al cambio de densidad de la atmósfera que conlleva el viento solar, o a que los paneles solares de los satélites pueden hacer de “vela” de este viento solar, desviando la órbita.

Las comunicaciones por satélite son fundamentales para nuestro día a día en la actualidad, nos aportan tecnologías tan útiles como el GPS, imágenes meteorológicas, aplicaciones militares, servicios de acceso a internet de banda ancha entre otros. Pero, además, esta tecnología está en constante avance, recientemente grandes compañías tecnológicas como SpaceX, Amazon y Facebook, han anunciado el despliegue inminente de megaconstelaciones: decenas de millares de satélites, para dar cobertura a internet de alta velocidad en cualquier parte del mundo. Este avance tecnológico será revolucionario en las redes inalámbricas, y supondrá un gran beneficio y comodidad para las generaciones venideras. A lo largo de este proyecto, nos centraremos en cómo asumir el menor riesgo posible frente a una posible inhabilitación en masa de satélites, en caso de que se diese una situación de clima espacial adverso.

Para ello, se hará hincapié en la parte espacial de las comunicaciones por satélite, y se deberá conocer cuáles son las partes más vulnerables de ésta para poder protegerla sin aumentar en demasía los costes de producción, de tal forma que sea conveniente.

Teniendo en cuenta el incremento exponencial mencionado de la tecnología satelital, y teniendo la certeza de que eventos de la magnitud Carrington, ocurren aproximadamente 1 vez cada 150 años, se puede concluir que la prevención frente a una tormenta solar en la tecnología satelital presente y futura puede suponer un gran avance para el mantenimiento y desarrollo de la misma.

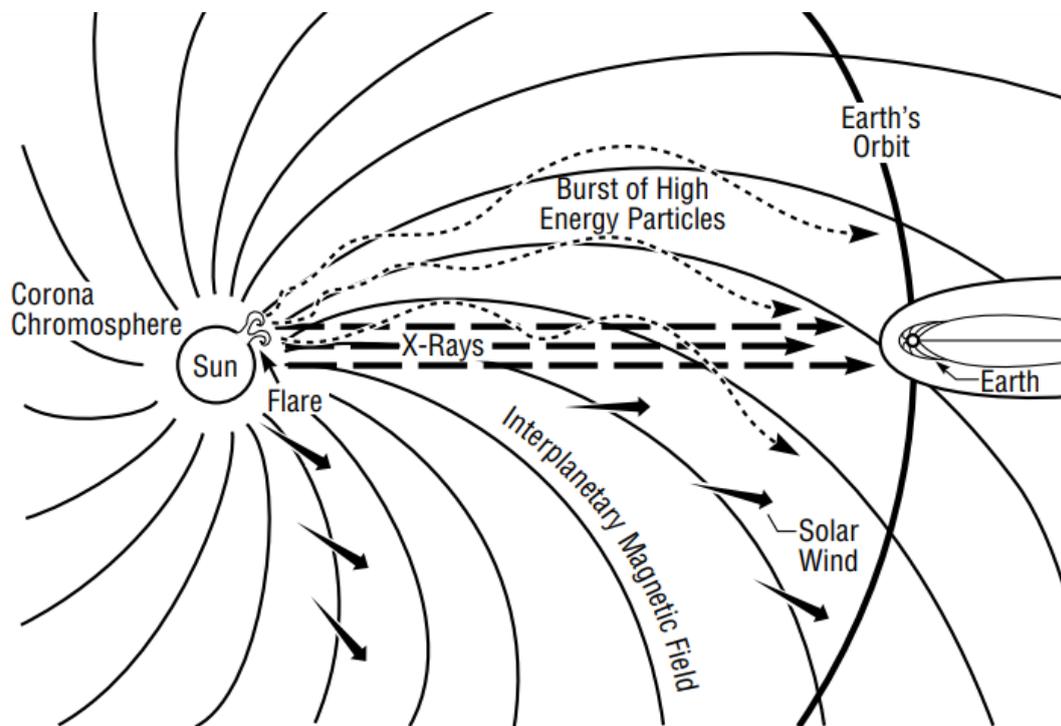


Figura 1. 1: resumen del clima espacial [1].

Para la realización de este proyecto sobre la influencia del viento solar en las comunicaciones por satélite y sus posibles soluciones se ha procedido la siguiente manera:

Inicialmente se ha hecho un recorrido histórico a cerca del evento físico que se tratará, donde se responderá a las siguientes preguntas: ¿Qué es el viento solar? ¿Cuáles fueron los primeros registros? ¿Por qué puede ser un problema? ¿Cómo interfiere con los dispositivos electrónicos? ¿Qué es la magnetosfera, y cómo es de importante para la Tierra? En definitiva, un repaso del contexto en el que se va a desempeñar el proyecto.

Posteriormente, se verá en profundidad cómo este fenómeno estelar, descrito previamente, interacciona con la tecnología satelital actual, y de qué forma: cambio de órbitas por cambios de densidad en la atmósfera y por el “arrastre” del viento solar, riesgo de descargas en componentes electrónicos, pérdida de calidad de servicio en el transcurso del evento solar, etc.

Por último, se detallarán soluciones que ha dado la comunidad científica hasta ahora para evitar o minimizar los efectos de una posible catástrofe tecnológica. Además, se mencionarán las posibles aplicaciones que podría tener el diseño de estas soluciones en la industria espacial, finalizando con una conclusión.

Capítulo 2

Entorno Espacial

2.1 Viento Solar

“La sonda solar se dirige a una región del espacio que nunca antes se había explorado. A uno le gustaría tener algunas medidas más detalladas de lo que está sucediendo en el viento solar, seguro que aguarda sorpresas.”

Eugene Parker

El viento solar es un descubrimiento relativamente moderno. Pese a que diferentes científicos a lo largo del siglo XIX y XX sugirieron la existencia de un evento de estas características sin llegar a describirlo de forma certera, fue el astrofísico Eugene Parker sobre quien recaería dicho honor. Eugene Parker teorizó en una de sus publicaciones de 1958, cómo la corona del sol eyectaba parte de la su atmósfera más superficial a su entorno en flujos de ráfagas de muy alta velocidad. Fue en aquella publicación llamada *“Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields”* donde acuñó el término *“viento solar”*.

2.1.1 ¿Qué es el viento solar?

Para hablar de viento solar, primero hay que hacer un pequeño análisis del sol. El sol se compone al igual que la Tierra, por varias capas. Citadas de más internas a más externas son: núcleo, zona radiante, zona convectiva, fotosfera, cromosfera y corona. Estas tres últimas son las que delimitan la atmósfera solar, y por tanto las que serán de interés, ya que es de allí de donde procede el viento solar.

El sol, en esencia, es una bola compuesta principalmente de hidrógeno y helio, a tan alta temperatura que sus átomos han perdido la estructura electromagnética de equilibrio y por tanto están ionizados: se trata de lo que comúnmente se denomina plasma, el cuarto estado de la materia. El material del plasma, debido a que presenta carga eléctrica, interactúa con campos eléctricos y magnéticos y se comporta de manera muy diferente a un gas neutro. Aspecto clave, para entender cómo se genera una eyección de masa coronal (EMC).

El viento solar por tanto son protones, electrones y partículas alpha (núcleos de helio), que provienen de la capa más externa del sol (Corona), las cuales, al contener tanta energía, escapan del campo gravitacional del sol y se esparcen por el espacio hasta el fin de la heliosfera, más allá de la órbita de Plutón. Es un flujo que varía según la zona del sol, pero que es constante en el tiempo y llega a todos los planetas del sistema solar, incluida la Tierra.

Esta radiación procedente del sol, a unos 450 km/s en promedio [86], imposibilitaría no sólo la tecnología, sino la vida en cualquier planeta, pero por suerte contamos con el campo magnético natural de la Tierra, el cual desvía estas partículas procedentes del sol debido a la Fuerza Lorentz.

2.1.2 ¿Cuál es el problema?

El problema está en que según nos alejamos de la atmósfera terrestre, menos efectivo es este campo magnético en la protección frente a las partículas con carga eléctrica. Estas partículas están cargadas con en torno a 5.7 eV [1] y existe un evento solar adverso llamado corrientes de viento solar rápido, las cuales emanan de los agujeros coronales del sol, y que pueden ser especialmente peligrosos en caso de que el campo magnético de nuestro planeta esté orientado hacia el sur, ya que esta situación desemboca en un flujo de electrones relativistas en los cinturones de radiación de la Tierra durante períodos de varios días. En el estudio analizado en el capítulo 3, se simula un evento realista de una tormenta espacial que produce un flujo de electrones de alta energía (>2MeV) durante 5 días, y concluye en que la protección y el apantallamiento utilizado actualmente de 2.5mm de espesor de aluminio, no sería suficiente para hacer frente a una tormenta de tal duración [2].

2.1.3 Velocidad del viento solar

El viento solar puede ser de dos tipos: rápido y lento. La diferencia entre ellos, a pesar de lo que pueda indicar el nombre, no es tan sólo su velocidad, sino también su proveniencia.

El viento solar lento, tiene una velocidad aproximada de entre 300 y 500 km/s y una temperatura menor al rápido. Proviene de la zona ecuatorial del sol, lo que indicaría que se produce en el momento de menor actividad solar, pero realmente se produce de forma constante en todas las latitudes del Sol, y en todos sus periodos de actividad.

El viento solar rápido tiene una velocidad aproximada de 750 km/s, y su temperatura de 8 millones de grados centígrados, es unas 8 veces mayor que la del lento, además, proviene de los agujeros coronales, que son regiones de plasma relativamente frío y menos denso en la corona solar donde el campo magnético del Sol se extiende hacia el espacio interplanetario como un campo abierto, en comparación con el campo magnético cerrado habitual de la corona que se arquea entre regiones de polaridad magnética opuesta, el campo magnético abierto de un agujero coronal permite que el viento solar escape al espacio a una velocidad mucho más rápida. Esto da como resultado una disminución de la temperatura y la densidad del plasma en el sitio de un agujero coronal, así como una mayor velocidad en el viento solar promedio medido en el espacio interplanetario.

El viento solar supone una enorme pérdida de masa al Sol, las partículas arrastradas por este en promedio son 1.3×10^{36} partículas por segundo, esto significa que la pérdida es de entre 1.3 a 1.9 millones de toneladas por segundo. Sin embargo, para el Sol, esta gran pérdida de masa durante toda su vida estelar, originada por el viento solar, sólo supone un 0.01% de su masa total [3].

2.2 Magnetosfera

“Aparentemente, algo sucede en el Sol. Envía ráfagas de gases, los reservorios sobre nuestra tierra tiemblan como un cuenco de gelatina, y la radiación gotea en los extremos y hace exhibiciones de auroras en los polos.”

James Van Allen

Durante los años 40, Walter M. Elsasser teorizó en un modelo físico sobre la posibilidad de que el ya conocido campo magnético de la Tierra, fuese inducido por un efecto dinamo de la rotación de la misma respecto a su núcleo de hierro. Pero no fue hasta 1958, que se lanzaría el satélite de observación Explorer I, a través del cual se descubrió el cinturón de Van Allen. Ese mismo año, se descubriría la existencia de la magnetosfera a través del satélite Explorer III [4].

2.2.1 ¿Qué es la magnetosfera?

La magnetosfera es uno de los principales aliados a la hora de salvar a la tecnología de la radiación solar adversa. Se trata de una región espacial alrededor de un cuerpo astronómico, en el que las partículas con carga eléctrica procedentes del viento solar se ven desviadas por el campo magnético de dicho cuerpo hacia los polos, creando auroras boreales. En este caso, la magnetosfera de la Tierra será el objetivo de estudio, ya que es donde se encuentran los satélites a proteger [5].

El radio a partir del cual la magnetosfera puede hacer frente al viento solar, se denomina distancia de Chapman-Ferraro, y tiene la siguiente expresión:

$$R_{CF} = R_P \left(\frac{B_{spf}^2}{\mu_0 \rho V_{VS}^2} \right)^{1/6}$$

Ecuación 1: distancia Chapman-Ferraro en función de R_P : radio del cuerpo. B_{spf} : campo magnético en la superficie del ecuador y V_{VS} : velocidad del viento solar. (unidades SI) [5].

Afortunadamente, en el caso de la Tierra, la distancia de Chapman-Ferraro es bastante mayor al de su radio. Esta distancia, como se puede apreciar en la fórmula, disminuye cuadráticamente con la velocidad del viento solar, por tanto, lo ideal sería que las órbitas de los satélites estuvieran siempre por debajo de esa distancia incluso para los casos de corrientes de viento solar rápido y de eyecciones de masa coronal que generan tormentas magnéticas y la deformen. Al no depender de nosotros, y ser prácticamente imposible en ciertos casos, lo ideal, sobre todo para las grandes constelaciones futuras, sería que se posicionaran en las órbitas que lleguen a estar dentro de la magnetopausa.

Las zonas más destacables de la magnetosfera para este proyecto [Figura 2. 3]:

- Arco de choque: límite entre la magnetosfera y el ambiente espacial.
- Magnetopausa: área de la magnetosfera en la que la presión del campo magnético planetario se equilibra con la presión del viento solar.
- Cola magnética: zona en la que la magnetosfera se deforma a raíz del viento solar, mucho más allá del cuerpo astronómico que la posee.

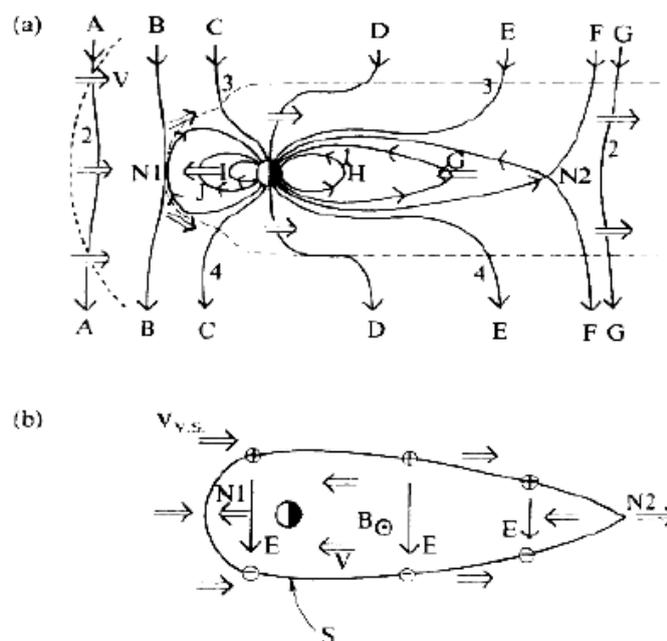


Figura 2. 1: forma y dirección de las líneas de campo de la magnetosfera a) líneas "abiertas" b) líneas cerradas [5].

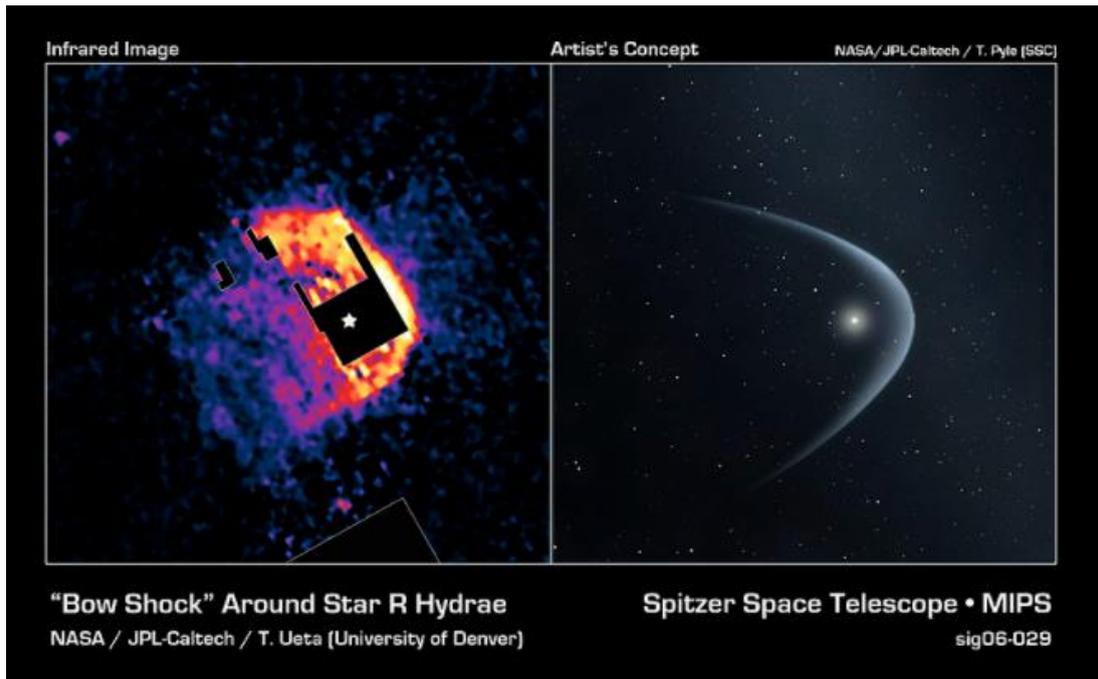


Figura 2. 2: imagen tomada por la NASA del arco de choque de la estrella R-Hydrae (<https://www.spitzer.caltech.edu/image/sig06-029-red-giant-plunging-through-space>)

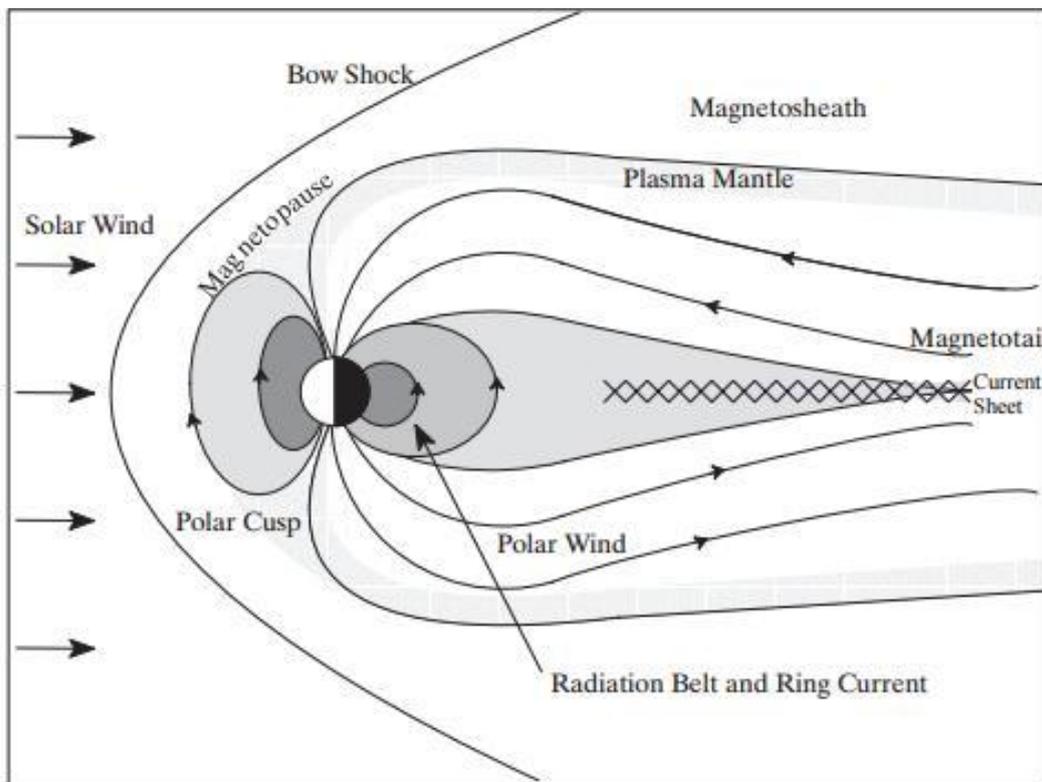


Figura 2. 3: ilustración de la magnetosfera terrestre, indicando las partes más relevantes. (https://ingenieroandreotti.blogspot.com/2017_04_08_archive.html)

Por último, mencionar ciertos aspectos relevantes del campo magnético terrestre, el cual se asemeja a un dipolo gigante inclinado 15 grados respecto a la perpendicular con la dirección del viento solar. La intensidad del campo varía en función de la zona geográfica, siendo de mayor intensidad en los polos, y de menor en el ecuador. Varía entre aproximadamente 25000 y 65000 nT (0,25-0,65 Gauss) [6]. Para tener una referencia cotidiana, un imán corriente de nevera es aproximadamente de 153 a 400 veces más intenso que el campo geomagnético.

En la Figura 2. 4 se simula la interacción de la magnetosfera con el viento solar y se aprecia la deformación de las líneas de campo en comparación con las de un dipolo sin alterar en la Figura 2. 5. Cuanto mayor sea la tormenta magnética, más deformación y más problemática podría ser para la tecnología espacial, lo cual se tratará más adelante. Dichas tormentas, se dan cuando la presión de los plasmas contenidos en la magnetosfera es lo suficientemente elevada como para modificar el campo terrestre de forma abrupta.

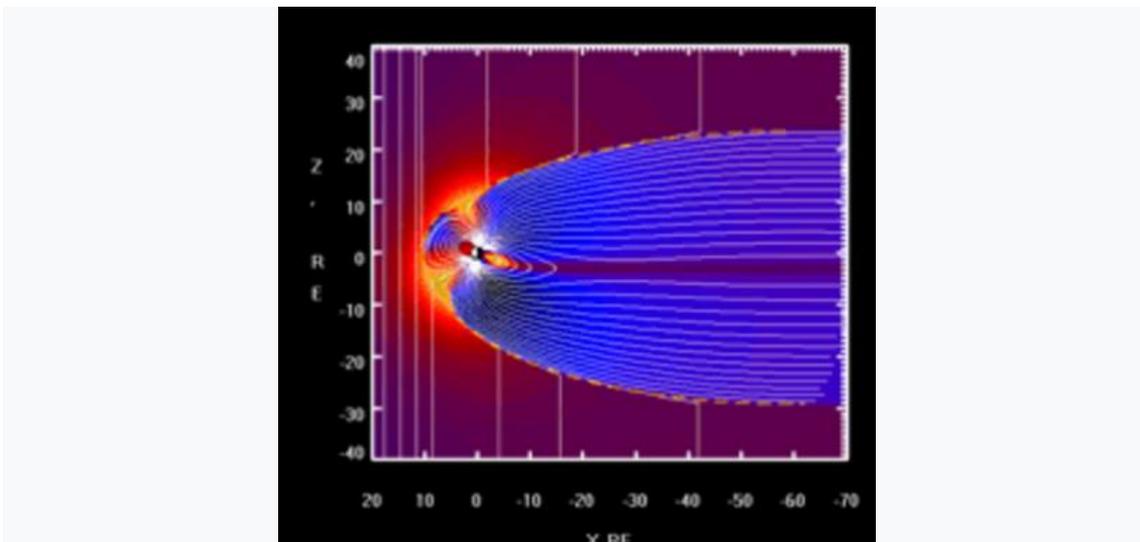


Figura 2. 4: simulación de la interacción entre el campo magnético terrestre y el viento solar. La magnetosfera se comprime en la parte que afronta el Sol, y se extiende en el lado nocturno.
(https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico_terrestre#/media/Archivo:Animati3.gif)

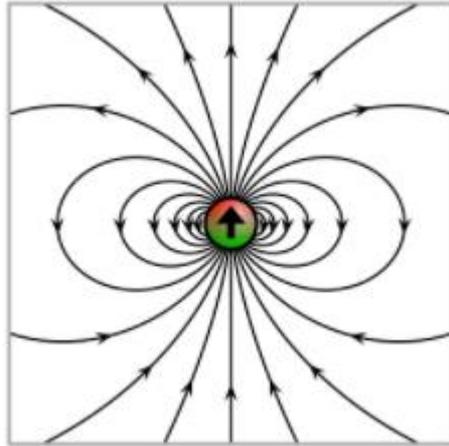


Figura 2. 5: Líneas de campo de un dipolo magnético sin distorsionar.
(https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_dipole)

El ya mencionado viento solar, es el responsable de dar esa forma que vemos en la simulación a la magnetosfera. Ya hemos visto como el viento solar fluctúa en cuanto a cantidad de flujo, velocidad y densidad. El cambio de estas variables incide directamente sobre el campo magnético de nuestro planeta.

Todos los tipos de radiaciones que recibimos desde el sol: radiación ionizante como rayos gamma o radiación ultravioleta entre otras, pueden variar entre 2 y 3 órdenes de magnitud, lo que repercute directamente sobre la onda de choque haciéndola fluctuar en distancias de varios diámetros terrestres, perdiendo masa atmosférica en el proceso [1]. De esta forma, se acaban exponiendo los satélites geoestacionarios a los efectos del viento solar directo.

La forma en la que se pierde masa atmosférica es atrapando gas en “burbujas” de campo magnético, las cuales acaban siendo desprendidas por el viento solar. Las tormentas magnéticas más adversas y en las que estos efectos descritos se verían magnificados, son las causadas por los EMC, de los cuales se hablará próximamente.

2.3 Campo magnético solar.

“Parece que después del transcurso de un cierto número de años, la aparición del Sol se repite con respecto al número y tamaño de las manchas.”

Christian Horrebow

El campo magnético del sol nos da las claves sobre cómo se generan los climas adversos que ponen en riesgo a la tecnología espacial. Investigadores lo han llegado a modelar con varios cuadripolos y multipolos pero no será necesario conocerlo de forma tan precisa para este proyecto, ya que el campo magnético solar es de suma complejidad.

Que sea tan complejo, se debe principalmente a su rotación diferencial. El Sol no es un cuerpo rígido y, por tanto, las distintas capas de este rotan a velocidades angulares diferentes. Además, al igual que pasa en la Tierra, el ecuador alcanza mayor velocidad que los polos. Estas variaciones de velocidad en el plasma ionizado del que se compone el sol resultan en un campo magnético inducido¹ sumamente complejo y muy distorsionado con respecto a un dipolo, en el que se observan bucles en las líneas de campo y varianzas temporales en estas de forma constante. En él, se encuentran distintas intensidades de campo según la zona, produciendo “manchas” en la percepción que tenemos de su imagen. A mayor campo en una de sus regiones, mayor será la velocidad del viento solar que emita.

2.3.1 Manchas solares.

Las manchas solares son las zonas donde se producen campos magnéticos de alta intensidad en los que se acumula mucha energía magnética Figura 2. 6.

¹ Campo magnético inducido por movimiento de cargas (Ley de Ampere-Maxwell): $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Estas manchas solares aparecen en los polos en el “mínimo solar”, y se van acercando al ecuador según el ciclo se acerca al “máximo solar”, la cantidad de ellas nos revela los ciclos solares. Son de gran utilidad para este proyecto, ya que gracias a estas observaciones sabemos cuándo hay mayor o menor actividad solar, y por tanto también nos indica cuando deberíamos estar más atentos a posibles tormentas.

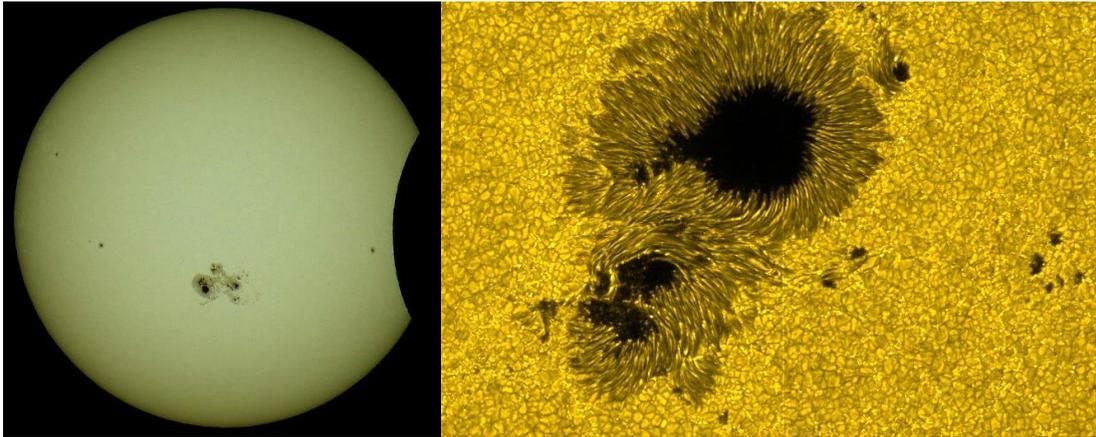


Figura 2. 6: manchas solares. (http://www.nasa.gov/mission_pages/solar-b/solar_022.html)

El diagrama de mariposa de Maunder en la Figura 2. 7 es una representación desarrollada por la NASA que muestra las latitudes donde se encuentran las manchas solares a lo largo de los años, estas no suelen alejarse más de 35° respecto al ecuador.

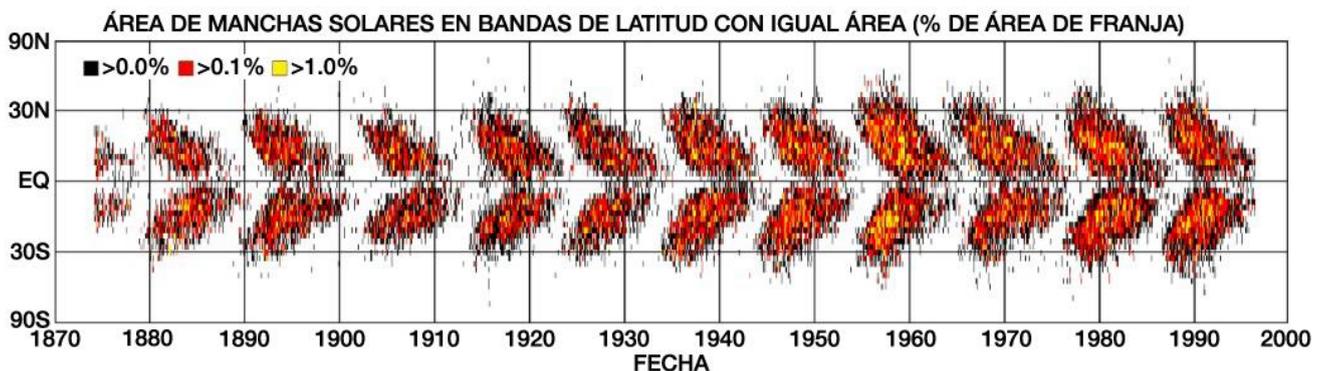


Figura 2. 7: diagrama de mariposa de Maunder [7].

Se puede observar cómo al inicio del ciclo las manchas son menores en número, pero aparecen en latitudes más elevadas. Sin embargo, en las fases finales del ciclo cuando la actividad solar es más intensa, aparecen más cantidad de manchas, aunque en latitudes más bajas.

2.3.2 Ciclo solar.

El número de manchas solares que muestra la estrella que orbitamos, sigue un patrón cíclico de máxima y mínima actividad solar. Este ciclo dura 11 años y está directamente relacionado con su inversión de campo magnético, el cual se produce cada 22 años. A pesar de que la característica más llamativa sobre este ciclo son las manchas solares ya descritas, en lo referente al sol, sus ciclos son la mejor descripción que poseemos sobre su comportamiento, y la mejor pista de prevención que tenemos actualmente [8].

La actividad solar como las ráfagas de viento solar rápido o las EMC, son más frecuentes durante el máximo solar, menos frecuentes durante el mínimo solar, y la actividad geomagnética y por tanto las tormentas geomagnéticas también se ven influenciadas por este ciclo. Próximamente se detallará cómo afectan estas tormentas solares al servicio que ofrecen los satélites.

2.3.3 Reconexión magnética.

La reconexión magnética es un proceso físico por el cual las líneas de campos opuestos de uno o distintos cuerpos astronómicos se reordenan, y la energía magnética se convierte en energía térmica o cinética. Este proceso tiene lugar principalmente en plasmas muy conductores, por ello, son la causa de las erupciones solares, y por tanto, también de las EMC, entre otros eventos que suceden en la atmósfera solar. Como ya hemos mencionado anteriormente, las manchas solares acumulan energía magnética durante períodos de muchas horas, llegando a ser un proceso incluso de días. La reconexión magnética libera esa energía en forma de erupciones solares en cuestión de minutos produciendo erupciones solares.

Actualmente disponemos de evidencia científica de este proceso mediante observación directa, con imágenes recopiladas por el telescopio suborbital *High Resolution Coronal Imager*, diseñado para capturar imágenes de alta resolución de la corona solar [9].

2.3.4 Eyección de masa coronal

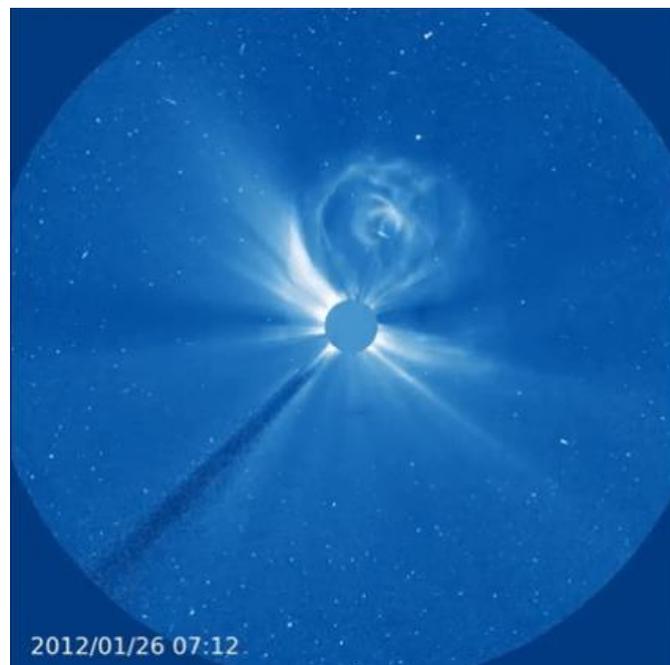
En el campo magnético solar, eventualmente se generan zonas con un campo magnético muy intenso, con gran cantidad de líneas de campo “enrolladas” que atrapan un enorme número de cargas que va a llevar consigo. Es en estos casos cuando tras una erupción solar, se produce el arrastre de masa de la corona hacia el exterior produciendo una EMC. Las EMCs, liberan grandes cantidades de plasma magnetizado y radiación electromagnética al espacio, que pueden abarcar tan sólo la corona o ir a los confines del sistema solar, impactando entre otros planetas, a la Tierra. Las EMCs dirigidas a la Tierra son la principal causa de las tormentas magnéticas severas, este tipo de eventos se han observado mediante coronógrafos, diseñados para estudiar la atmósfera solar, de los que se obtienen capturas como la representada en la Figura 2.8.

En caso de que se extiendan por el Sistema Solar, se denominan EMCs interplanetarias, y la velocidad inicial según sale de la corona solar suele ser distinta a la del viento solar, la EMC y el viento solar se acaban influenciando junto con el campo magnético interplanetario, acelerándose en caso de que porte menor velocidad que el viento solar, o decelerándose si ocurre al contrario, llegando a la Tierra con una velocidad promedio de 489 km/s [10].

Cuando la Tierra es alcanzada por una EMC interplanetaria, la onda de choque que se forma en la magnetosfera por la masa que impacta, provoca una deformación en esta, comprimiéndola en el lado diurno y extendiendo la cola magnética del lado nocturno. Produciendo así, de nuevo reconexión magnética de las líneas del campo magnético terrestre del lado diurno, al nocturno, liberando grandes cantidades de energía en forma de radiación electromagnética y partículas cargadas eléctricamente, que se dirigen a la atmósfera terrestre desde los polos. El impacto

de una EMC aumenta la cantidad de partículas en la corriente del anillo ionosférico. Este anillo, es una corriente de iones que fluye hacia el oeste, compuesta principalmente por protones, en el plano ecuatorial a una distancia de entre 3 a 5 radios terrestres, que genera un campo magnético opuesto al de la Tierra, debilitándolo. Este conjunto de procesos están caracterizados a partir de los índices descritos en el apartado de viento solar (Dst, AE, Kp, Flujos de electrones/protones, etc.) Son precisamente este conjunto de procesos los que generan las auroras boreales y los que pueden impedir las transmisiones radio, y causar daños en satélites de forma masiva y duradera, e incluso podría resultar en cortes de energía.

A pesar de que estas EMCs se producen tres veces al día en promedio en los máximos solares, y una vez cada cinco días en los mínimos 86, la probabilidad de que llegue a alcanzar a la Tierra es mucho menor, pero no despreciable ni mucho menos. De hecho, es un evento prácticamente inevitable en el tiempo. En el siguiente apartado se estudiarán los registros históricos a cerca de este tipo de eventos, y sus características.



*Figura 2. 8: capturado el 26 de enero de 2012 por los coronógrafos C2 y C3 de LASCO a bordo del Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO) de la ESA / NASA.
(https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/10/New_view_of_2012_solar_activity_gif)*

2.3.5 ¿Por qué es tan peligroso para la tecnología espacial un EMC, existen registros reales que confirmen este peligro?

A lo largo de la historia, han acontecido varias EMCs que han impactado sobre la Tierra con mayores o menores consecuencias sobre la tecnología contemporánea, para este apartado nos vamos a centrar en dos de estas eyecciones en concreto: el evento Carrington, y el Halloween de 2003. El primer registro de una erupción solar coincide con la primera de las 2 EMCs mencionadas, y ha sido el mayor evento meteorológico espacial registrado en la historia, sólo comparable por algunas otras EMCs como la del 1921, 1989 o 2003 [11]. Para poder ser comparadas, se les asigna una clasificación según los W/m^2 de rayos X que lleguen de la erupción solar a la Tierra, la clasificación se define de la siguiente manera:

Clase	W/m^2 en Ångströms ² de 1 a 8
A	$W/m^2 < 10^{-7}$
B	$10^{-7} < W/m^2 < 10^{-6}$
C	$10^{-6} < W/m^2 < 10^{-5}$
M	$10^{-5} < W/m^2 < 10^{-4}$
X	$W/m^2 > 10^{-4}$

Tabla 1: clasificación de erupciones solares [12].

Cada categoría se divide en una escala logarítmica de 1 a 9, es decir, en cada letra se asocia un número del 1 al 9, A1-9, B1-9, C1-9 y así sucesivamente, excepto en el caso de las X, que no tienen límite de numeración. Las erupciones X son las causantes de las EMCs que causaron las tormentas que vamos a describir a continuación, y las que son capaces de producir apagones radio de alta frecuencia entre otros efectos.

² Ångströms: Unidad de longitud utilizada para medir longitudes de onda. De 1 a 8 Ångströms, es el equivalente a decir, de 0,1 a 0,8 nm de longitud de onda. (Parte del espectro de rayos-X)

Por último, antes de analizar los hechos históricos, es interesante describir las frecuencias más afectadas por las erupciones clase X, así como saber por qué se producen estos apagones. Los apagones son el resultado de un aumento de la densidad de SEP en la ionosfera inferior durante una erupción solar, que causa un gran aumento en la cantidad de energía que pierden las ondas de radio cuando pasa a través de esta capa. Este proceso evita que las ondas de radio alcancen capas mucho más altas, donde estas señales de radio normalmente se refractan y vuelven a la Tierra [12].

Las frecuencias más afectadas, son de 3 a 300 MHz, y pueden llegar a ser frecuencias mucho más elevadas dependiendo de la clase de erupción, lo que interfiere con las señales satélite como veremos más adelante en el Capítulo 2 [12].

El evento Carrington:

El 2 de septiembre de 1859, los astrónomos aficionados Richard Christopher Carrington y Richard Hodgson, fueron testigos de una erupción solar y recopilaron de forma independiente informes del aumento del brillo de la corona solar [13].

Debido a que al día siguiente a las observaciones de Carrington-Hodgson, se produjo un efecto geomagnético datado en el registro del magnetómetro del Observatorio Kew, por el físico escocés B.Stewart, Carrington sospechó una relación entre ambos sucesos. Dichos efectos sospechados por Carrington fueron recopilados y publicados por el matemático estadounidense Elias Loomis, quien respaldó las Observaciones de Carrington-Hodgson y Stewart [14].

Las características de la tormenta geomagnética provocada por este evento fueron atroces para la precoz tecnología electrónica-eléctrica del momento. Los registros que se preservan desde entonces, y los artículos que han revisado dichos registros, concluyen en la revisión de los aspectos más relevantes de una EMC:

- Tiempo de tránsito entre el Sol y la Tierra.
- Intensidad de la tormenta geomagnética.
- Extensión auroral de baja latitud.

- Magnitud de las erupciones solares.

A partir de la Figura 2. 9, tomada en la época mediante un magnetómetro y otros registros de distintos magnetómetros ubicados en diferentes partes del mundo. Los científicos Edward W. Cliver y William F. Dietrich realizan una comparación con otros eventos climáticos adversos en un estudio, que revisa el evento Carrington y nos acerca a una buena estimación de las características principales de la EMC y la tormenta que desencadenó tal evento [11].

- El tiempo de tránsito fue de aproximadamente 17 horas y media, un tiempo mucho menor del habitual que suele ser de días, lo que nos muestra nuestro tiempo de preparación.
- La tormenta geomagnética o “crochet magnético³” tenía unas características de 1600 nT de componente horizontal, con un mínimo Dst de -1760 nT (3 veces más grave que la siguiente tormenta más intensa en 1989). Las grandes tormentas con Dst <-250 nT ocurren en promedio una vez al año. Los eventos con Dst <-500 nT ocurren aproximadamente cada 50 años (1859, 1921 y 1989).
- Con los registros de los que disponemos, es muy difíciles estimar la magnitud de la erupción, pero se estima que entraría en la categoría (~X45) siendo esta de $\sim 10(45) \times 10^{-4} W m^{-2}$ [11].
- Las auroras boreales llegaron a ser vistas desde latitudes como las de la ciudad de San Francisco o Nueva York entre otras, por lo que las consecuencias tecnológicas hoy en día abarcarían toda esa latitud. Los registros indican que su intensidad llegó a ser tal, que se podía ver en la noche a causa de la luminosidad de las auroras boreales.

³ Crochet magnético: perturbación del campo magnético terrestre por radiación solar.

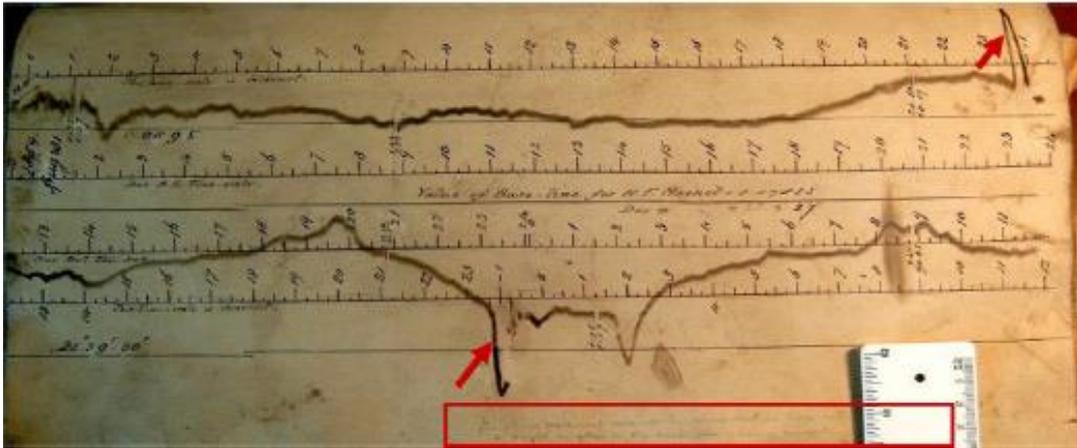


Figura 2. 9: traza del magnetómetro del observatorio de Greenwich. La parte superior indica la fuerza horizontal, y la parte inferior la declinación. Las flechas rojas indican el crochet magnético, o efecto de la erupción solar sobre el campo magnético terrestre [11].

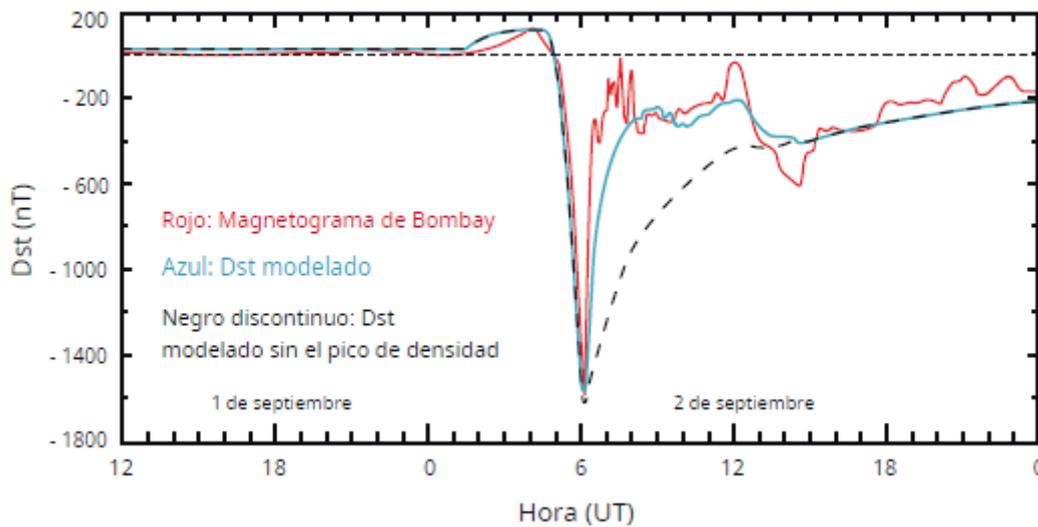


Figura 2. 10: parámetros asumidos de viento solar, y comparación entre el Dst modelado en el estudio, y el registrado por el magnetómetro de Bombay [11].

Para hacernos a la idea de la magnitud de este evento en lo que a pérdidas tecnológicas se refiere, la tormenta fue la causa de una interrupción significativa en los servicios telegráficos. Durante las auroras, el papel e incluso la madera de las instalaciones de los telégrafos se incendiaron. Se informó por cable del incendio de una estación telefónica en Suecia, e incluso uno de esos incendios destruyó la estación del ferrocarril Central de *New England* provocando una pérdida de 6000\$ de la época. Trabajadores de los telégrafos sufrieron descargas debido a la diferencia de potencial que se produjo en la red, e incluso alguno de estos telégrafos funcionaban sin ser conectados a alimentación, entre otras muchas consecuencias [11].

Halloween del 2003:

Esta sucesión de tormentas solares aconteció desde la segunda quincena de octubre, hasta principios de noviembre del año 2003. Es la tormenta solar más intensa registrada por el satélite ambiental operacional geostacionario (G.O.E.S.) y es de características similares al evento Carrington, aunque en principio, de menor magnitud pese a que no se puede afirmar con contundencia, ya que no se dispone de datos tan certeros de estas tormentas como del Evento Carrington.

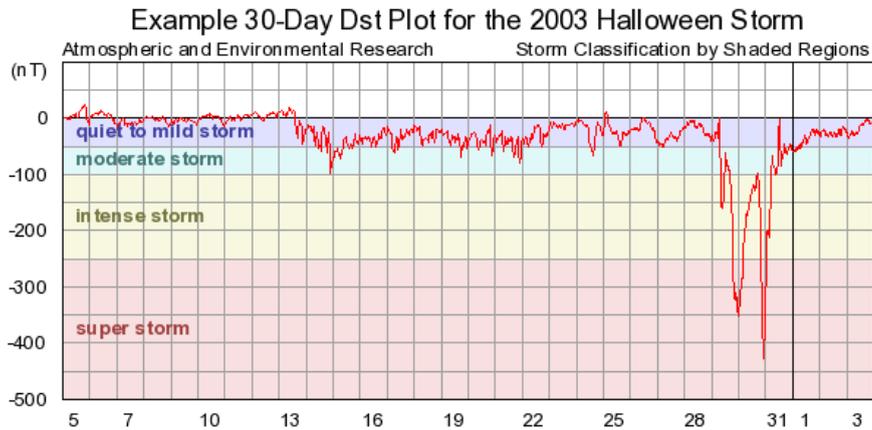


Figura 2. 11: índice Dst durante las tormentas de Halloween de 2003, en un periodo de 30 días [11].

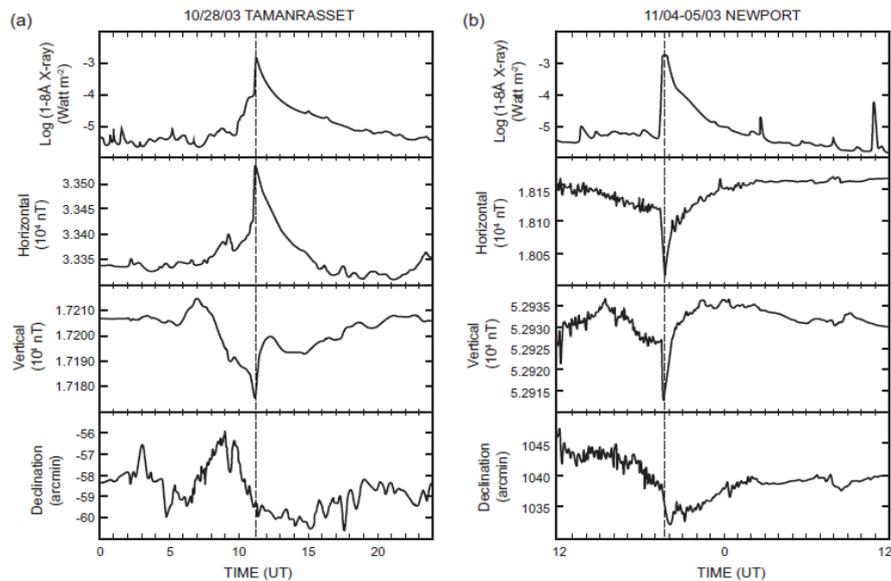


Figura 2. 12: descrito en orden descendente, intensidad de la erupción solar en W/m^2 , fuerza horizontal, fuerza vertical y declinación durante el (a) 28 de octubre de 2003, y el (b) 4 de noviembre de 2003 [11].

De sus características, cabe destacar que está clasificada entre X25-X45 y saturó el G.O.E.S por su intensidad. Su índice Dst llegó a los -428 nT [15] durante la fase más intensa, alrededor del 30 de octubre, como se puede apreciar en la . En la **Error! Reference source not found.** del estudio de los científicos Edward y William ya mencionados [11], se hace una comparación entre las características principales de las tormentas el día (a) 28 de octubre del 2003, con las del día (b) 4 de noviembre del 2003. En ambas podemos ver índices muy elevados que se contemplan dentro de los parámetros de una “supertormenta”. Como consecuencias más destacables: los sistemas por satélite se vieron afectados, los aviones no pudieron circular en ciertas altitudes y latitudes, un corte de energía en Suecia y disfuncionalidades en el 10% de la flota de satélites del momento [16].

Por mencionar algunas de esas disfuncionalidades, el sistema G.O.E.S quedó saturado y fuera de servicio por un lapso de tiempo. El satélite SOHO falló temporalmente, y el ACE fue dañado. Recordemos que estos satélites, son satélites diseñados para la expedición climática espacial, y no comerciales como los que se pondrán en órbita formando parte de constelaciones en las próximas décadas [16].

Este es el entorno espacial en el que nos encontramos y las condiciones iniciales que debemos tener en cuenta a la hora de llevar a cabo un estudio más profundo de cómo afecta el entorno al servicio por satélite. Teniendo en cuenta las características de nuestro entorno y siendo conscientes de cómo se producen estos eventos adversos, podemos estudiar de una forma más amplia y focalizada, de dónde vienen los problemas derivados. Sólo así podremos analizar las soluciones dadas hasta ahora, y diseñarlas en un futuro. Como diría Sun Tzu en *El arte de la guerra*: “Conoce al enemigo y a ti mismo, y saldrás vencedor en mil batallas.”

Capítulo 3

Estudio de la problemática.

“Vivimos en una sociedad profundamente dependiente de la ciencia y la tecnología y en la que nadie sabe nada de estos temas.

Ello constituye una fórmula segura para el desastre.”

Carl Sagan

A lo largo de este capítulo se estudiará con detalle la influencia del entorno espacial en la tecnología satelital. Los problemas a desarrollar serán todos en el marco de una etapa de acumulación de erupciones solares desencadenantes de una tormenta geomagnética por los procesos descritos en el capítulo anterior. Los problemas más relevantes son:

- La alteración de la relación señal-ruido en comunicaciones transionosféricas de alta frecuencia, a causa del centelleo ionosférico en altas altitudes.
- Dañado de paneles solares.
- Descargas por acumulación electrostática interna y superficial.
- Corrupción del software y las memorias a bordo del satélite.
- Desviación de órbita en satélites LEO.

3.1 Alteración S/N a HF en la ionosfera.

Ciertas erupciones solares, producen ráfagas de ruido de banda ancha de entre 10 MHz a 10 GHz, que afectan a los receptores de GNSS. La ionosfera cambia en función del clima espacial, albergando más o menos carga en el plasma del que se compone, que altera las ondas de radio en tránsito de tres maneras posibles [17]:

1º Disminuye la velocidad de grupo generando retardos instrumentales que afectan tanto a las mediciones de código como de portadora, generando errores de posicionamiento. Se define mediante la relación:

$$v_g = c \sqrt{\frac{1 - \omega_{pe}^2}{\omega^2}} \text{ [m/s]}$$

*Ecuación 2:
velocidad de grupo de una señal GPS en función del estado de la ionosfera*

Donde ω_{pe} es la pulsación de plasma, la cual varía en función del clima espacial y es definida por la siguiente expresión:

$$\omega_{pe} = \sqrt{n_e q^2 / \epsilon m_e} \text{ [rad/s]}$$

*Ecuación 3:
 n_e = número de electrones; q = carga; ϵ = permeabilidad eléctrica del medio; m_e = masa del electrón.
Dicha pulsación suele estar en torno a los $2\pi(1 - 10 \text{ MHz})$ rad/s*

2º Aumenta la velocidad de fase mediante la relación:

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \omega_{pe}^2 / \omega^2}} \text{ [m/s]}$$

*Ecuación 4:
velocidad de fase de una señal GPS en función del estado de la ionosfera*

3º Degradación multitrayecto: se produce dispersión de la señal GNSS en las irregularidades del plasma con longitudes próximas a la zona de Fresnel.

Los errores de posicionamiento son producidos por las irregularidades que se dan en la ionosfera a causa del viento solar. Dichas irregularidades de densidad generan refracciones que provocan que la señal llegue al receptor por muchos trayectos a la vez, y por tanto con distintas fases, así como desvanecimientos ocasionados por la absorción de la capa D. Al solaparse varias señales idénticas con distintas fases por los distintos recorridos, estas se suman constructiva o destructivamente de forma aleatoria, produciendo centelleos de amplitud en la señal, que degradan la relación señal a ruido S/N. En la Figura 3. 1 se puede observar que esta degradación de la relación S/N supone una pérdida de seguimiento por intervalos de tiempo.

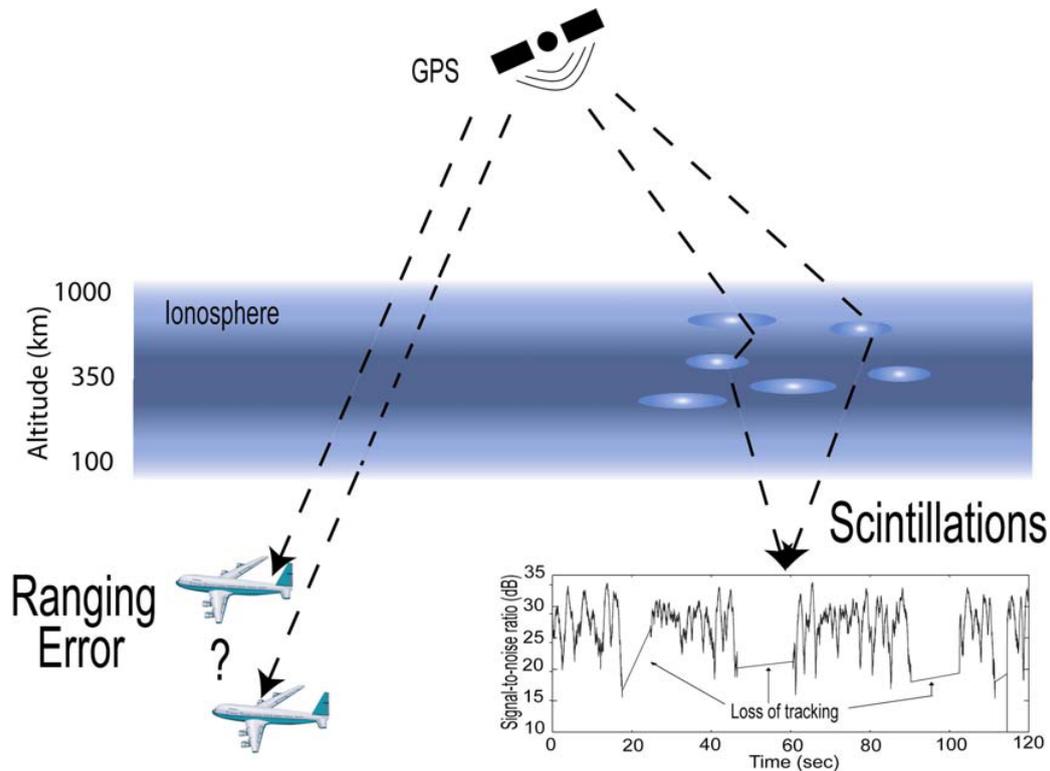


Figura 3. 1: representación de los efectos ionosféricos en señales satelitales [17].

Este proceso de degradación de la relación S/N que produce problemas de posicionamiento en el GPS, están directamente relacionados con el TEC, el número de electrones en un volumen con una sección transversal de un metro cuadrado y una longitud igual a la ruta de la señal entre el satélite y el receptor. No nos centraremos mucho en cómo se calcula la cantidad TEC, pero será un parámetro que nos será de gran utilidad para determinar el estado de la ionosfera, cómo de críticos serán los retardos de grupo y fase, y para caracterizar también el centelleo de amplitud de las señales. Al degradar la S/N, también se degrada la relación portadora/ruido C/N, como se aprecia en la Figura 3. 2.

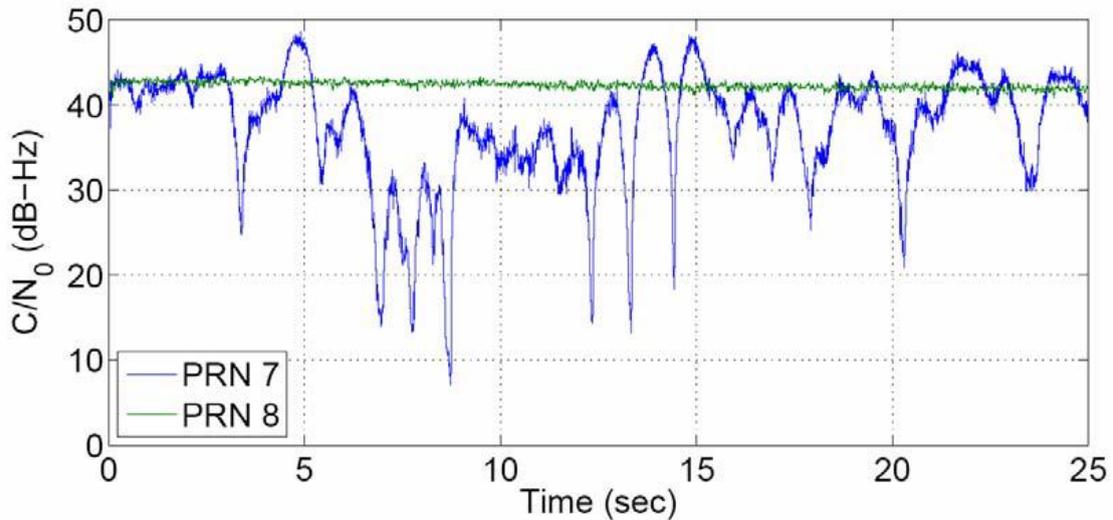


Figura 3. 2: comparación de la relación portadora/ruido, entre un satélite que presenta centelleo (azul) y otro que no (verde) [17].

Este problema en concreto puede llegar a darse sin necesidad de que la tormenta solar sea muy intensa. Para mencionar un caso real, un estudio [18] selecciona dos periodos de tormenta del ciclo solar veinticuatro, que transcurrieron en noviembre de 2015, y utilizan entre otros índices el TEC para caracterizar las tormentas. En el desarrollo de este estudio muestran los efectos que tuvieron dos erupciones solares de categoría C5 y M3 sobre el tráfico aéreo, al distorsionar la señal GNSS en la zona norte de Europa, afectando también en los aterrizajes debido a que se perdió también la señal radar.

Para estudiar el impacto de la tormenta solar en latitudes medias-altas, en el artículo se analizan los datos GNSS en las coordenadas geográficas: 60,59° N, 17,25° E Maartsbo, Suecia, y en la estación EUREF más cercana a Estocolmo, donde sucedió el incidente. La tormenta solar interfirió con los sistemas de radar de control del tráfico aéreo, lo que provocó retrasos en varios vuelos de entrada y salida a varios aeropuertos de Suecia durante aproximadamente 3 horas [18].

Este caso supuso una seria amenaza para los receptores GNSS en la Tierra, y para la industria de la aviación en este caso concreto, a pesar de que la erupción solar no fue extrema. Se pueden observar los datos de la erupción solar en la Tabla 2 y de la tormenta geomagnética en la Figura 3. 3 durante los días 3 y 4 de noviembre de 2015:

Día	Parámetros Solares			
	Viento solar	Erupción solar	Nº manchas	B total
03/11/2015				
~07:50h	684.4 km/s	C5, C5	94	5.1 nT
~18:30h	570.4 km/s	C1, M3	95	7.1 nT

Tabla 2: parámetros solares de las erupciones solares del 3 de noviembre de 2015 [18].

Las erupciones solares se produjeron en las horas de la Tabla 2, y perturbó el campo magnético de la Tierra al día siguiente, la tormenta perjudicó las instalaciones de radar y causó un apagón de radio.

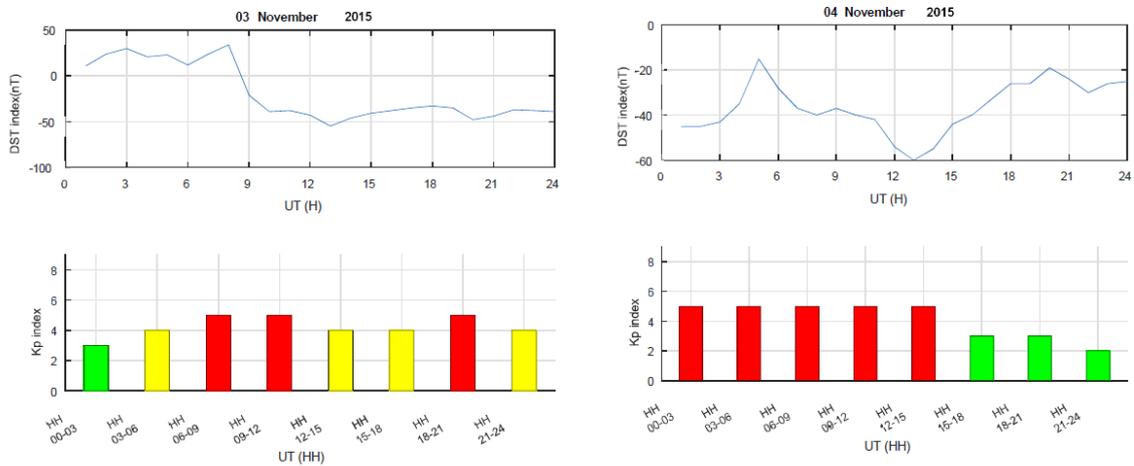


Figura 3. 3: variación del índice Dst y Kp para los dos días de tormenta [18].

Como conclusión para este tipo de problema, podemos afirmar que incluso las tormentas solares menores, si son prolongadas pueden ser un serio problema para la tecnología satelital de la que disponemos, concretamente para la tecnología GNSS, en la que tanta confianza depositamos, haciéndola cargo de sistemas críticos como el aterrizaje de aviones, o la navegación autónoma de distintos medios de transporte. Por lo que aumentar la monitorización de la ionosfera y prevención de riesgos, podría ser de ayuda en una industria en la que la precisión cada vez es más exigida.

3.2 Dañado de paneles solares.

Las celdas solares compuestas por silicio de las que se hace uso en los satélites, son la fuente de alimentación eléctrica de estos, y están expuestos a grandes flujos de partículas SEP cargadas provenientes del clima espacial, especialmente cuando se ha producido una EMC o ráfaga de viento solar rápido. Dichas partículas, suelen ser electrones y protones que quedan atrapadas en los cinturones de Van Allen terrestres, y en su trayecto a velocidades supersónicas, impactan sobre la superficie de estos dispositivos introduciendo defectos en los materiales que, en consecuencia, deterioran su funcionamiento electrónico.

La energía cinética que porten determinará la profundidad de la penetración en el dispositivo fotovoltaico, y el daño permanente, se producirá a causa del desplazamiento de los átomos de la red fotovoltaica producido por las partículas incidentes. Estos átomos desplazados, son los primeros átomos que la partícula incidente se encuentra en el objetivo, denominados PKA (Primary-Knock-on-Atom), y en función de la energía recibida por la partícula desplazadora, pueden a su vez desplazar otros átomos de su alrededor produciendo un efecto cascada que provoque aún más daños. Los daños que pueden causar los flujos de partículas incidentes son:

- Acortamiento de vida útil.
- Degradación de la transferencia de carga entre los dispositivos.
- Degradación de la movilidad de los paneles.
- Degradación de la eficiencia espectral

Los ensayos realizados para estimar el daño por radiación que se han simulado en laboratorios bajo condiciones controladas permiten estimar la resistencia de los paneles solares al bombardeo de partículas de estas características, con diversas energías, y nos permiten predecir el comportamiento de los paneles a lo largo de su vida útil [19].

Se analizó la degradación de las características eléctricas de las celdas durante la irradiación con protones de entre 8 y 10 MeV mediante aceleradores de partículas de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Buenos Aires (CNEA). Los resultados obtenidos, fueron una menor eficiencia espectral, una menor vida útil y una peor relación I/V. En las Figura 3. 4, Figura 3. 5 y Figura 3. 6 se observa el montaje que se llevó a cabo para simular la radiación de partículas de alta energía sobre los paneles solares, y los daños causados en cuanto a relación I/V y eficiencia espectral respectivamente, comparados con celdas que no habían sido expuestas a radiación de partículas SEP. Para obtener esos mismos daños con irradiación de electrones de 2.6 MeV, debe radiarse con una fluencia 2800 veces mayor que con protones de 10 MeV [19].

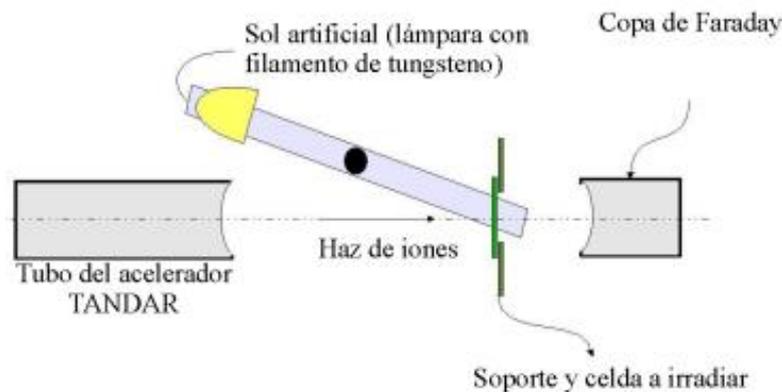


Figura 3. 4: montaje del ensayo en la investigación del CNEA [19].

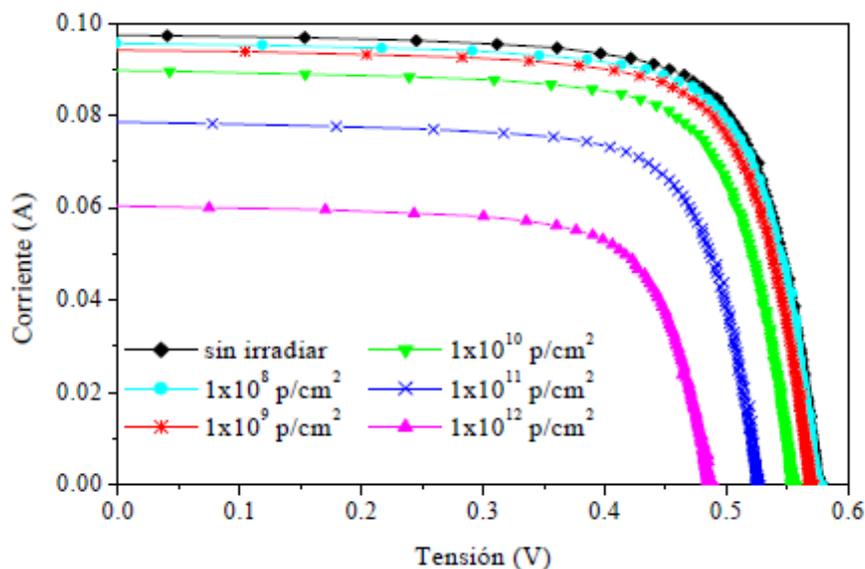


Figura 3. 5: degradación de la curva I/V [19].

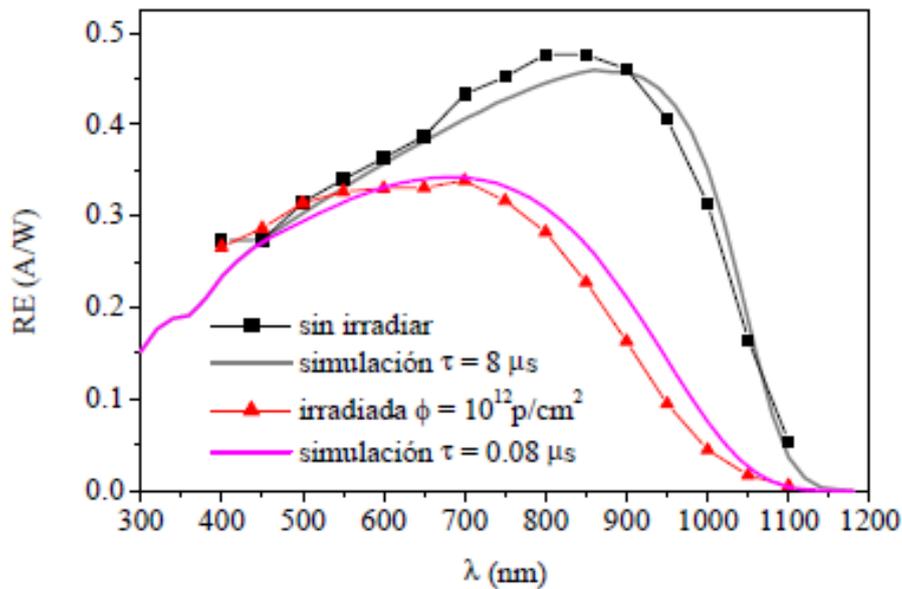


Figura 3. 6: respuesta espectral medida y simulada de una celda, antes y después de la irradiación [19].

Celda Solar			
Area de la celda	Base	Resistividad	Dopaje
800 mm ²	Silicio tipo P	$\rho = 1 \Omega \text{ cm}$,	NA = $1,5 \times 10^{16}$ cm ⁻³

Tabla 3: características generales de las celdas de referencia [19].

Estos flujos son los propios de una erupción solar de clasificación X dentro de la magnetosfera terrestre, es una buena estimación de la vida útil en condiciones de adversidad moderada, ya que estos flujos durante una tormenta solar pueden tener duraciones de varios días. Pero en caso de que un evento de la categoría Carrington o mayor llegase a impactar sobre los satélites, podemos imaginarnos que teniendo como referencia estos resultados, las consecuencias para los que recibiesen un impacto directo en el lado diurno serían mucho mayores.

Además, la radiación por partículas de alta energía no es la única forma en la que la radiación daña los paneles solares. Aunque en menor medida, las dosis de radiación ionizante a las que son sometidos también los dañan en un proceso acumulativo. Las dosis de radiación ionizante generan formación de pares de electrones y huecos, que producen cambios en el voltaje umbral (aumento de resistividad), y corrientes de fuga [20].

3.3 Descargas por acumulación electrostática interna y superficial

El flujo de partículas energéticas es constante en el tiempo debido a que el viento solar en sí también lo es, pero cuando se produce una ráfaga de viento solar rápido o una eyección de masa coronal que llega a la Tierra por los procesos descritos con anterioridad, los satélites se ven sometidos a flujos de electrones y protones, que más allá de incrustarse en los paneles y dañar componentes por mecánica, son capaces de almacenarse en los dispositivos dieléctricos y generar un campo eléctrico tal, que provoque una descarga eléctrica sobre los dispositivos más vulnerables del satélite, comprometiendo el software o las memorias del sistema, acabando con su funcionalidad.

Un flujo de electrones relativistas de alta energía (>2 MeV) lo suficientemente prolongado y denso, puede atravesar la carcasa de las naves espaciales provocando la situación de carga electrostática que queremos evitar. La carga de satélites es uno de los riesgos más importantes para los satélites en órbita, principalmente por los reportes y la cantidad de satélites afectados por este proceso, ya que, a corto plazo suele ser el caso de indisponibilidad más común [2].

Este tipo de sucesos son menos catastróficos, pero más probables que una EMC, y de hecho, se han dado en la historia recientemente. En Halloween de 2003, a parte del consecutivo de varias EMCs, corrientes de viento solar rápido se produjeron provocando una acumulación de carga electrostática que desencadenó anomalías en el funcionamiento de alrededor del 10% de la flota satelital del momento [3]. Si un evento así, estimado en una probabilidad de 1 cada 150 años, sucediera actualmente, resultaría en una inmensa pérdida material y económica.

Estudios recientes han simulado desde un punto de vista realista un escenario hipotético en el que se construye un evento de corriente de viento solar rápido de cinco días de duración. Para calcular el flujo máximo de electrones, se usa un modelo

físico y estima un flujo máximo mayor a 2 MeV para una órbita geoestacionaria [2] y se ha llegado a la conclusión de que se necesitarían aproximadamente 2,5 mm de blindaje de aluminio para reducir la corriente de carga interna por debajo de las pautas recomendadas por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), mucho más de lo que se utiliza actualmente. Por lo tanto, deberíamos esperar que muchos satélites reportaran anomalías de descargas electrostáticas durante un evento de este tipo, con una gran probabilidad de interrupción del servicio y pérdida total del satélite.

Como muestra real, en la Figura 3. 7, se exponen cuatro eventos de corrientes de viento solar rápido durante septiembre de 2003 analizados en el estudio mencionado anteriormente. No son eventos de alta intensidad, pero nos sirven para hacernos una idea de sus propiedades y efectos en caso de que así fuese. Son 8 gráficas en las que se muestra en orden descendente:

- Gráfica 1: velocidad del viento solar medida por la nave espacial *Advanced Composition Explorer* (en rojo), e intensidad de la magnetosfera en nanoteslas en posición orbital baja L1 (en negro).
- Gráfica 2: flujo de electrones de alta energía que sobrepasaban los 2MeV a lo largo de las corrientes de viento solar rápido medidos por el *Geostacionary Operational Environmental Satellite* GOES en órbita geoestacionaria.
- Gráfica 3: recuento de electrones > 800keV medidos por el detector de partículas T90 P6 [2].
- Gráfica 4: flujo de electrones > 300 keV medidos por el detector de partículas T90 E3 [2].

- Gráfica 5: flujo de electrones >100 keV medidos por el detector de partículas T90 E2 [2].
- Gráfica 6: flujo de electrones >30 keV medidos por el detector de partículas T90 E1 [2].
- Gráfica 7: *Disturbance Storm Time* (en negro) y presión dinámica⁴ del viento solar (en rojo). El Dst es un índice estándar muy utilizado para caracterizar la intensidad de las tormentas geomagnéticas, que mide la disminución en la componente horizontal del campo magnético terrestre cerca del ecuador magnético debido a aumentos en la corriente del anillo magnetosférico⁵. Dicha corriente de anillo es causada por las partículas del viento solar, que generan un campo magnético opuesto al de la Tierra, al que debilita.
- Gráfica 8: (AE): índice de electrochorro auroral⁶, diseñado para proporcionar una medida cuantitativa global de la actividad magnética de la zona auroral producida por corrientes ionosféricas, y (Kp): índice local cuasi logarítmico del rango de 3 horas en la actividad magnética en relación con una curva supuesta de días tranquilos para un solo sitio de observatorio geomagnético, también mide la componente horizontal del campo magnético terrestre, y por tanto si hay tormenta geomagnética o no, su intensidad va del 0 al 9, asumiendo que a partir de 5 se considera tormenta magnética.

⁴ Presión dinámica: en mecánica de fluidos, es una cantidad que depende de la densidad del fluido y su velocidad al impactar sobre una superficie perpendicular a su movimiento. Se define mediante la ecuación: $q = \frac{1}{2} \rho v^2$, siendo q la presión dinámica, ρ la densidad del fluido, y v su velocidad.

⁵ Corriente del anillo magnetosférico: corriente de cargas atrapadas en la magnetosfera, provenientes del viento solar que debilitan el campo terrestre representado en la Figura 3. 8.

⁶ Electrochorro auroral: corrientes eléctricas que viajan a través de la ionosfera, cerca de los polos, representado en la Figura 3. 8.

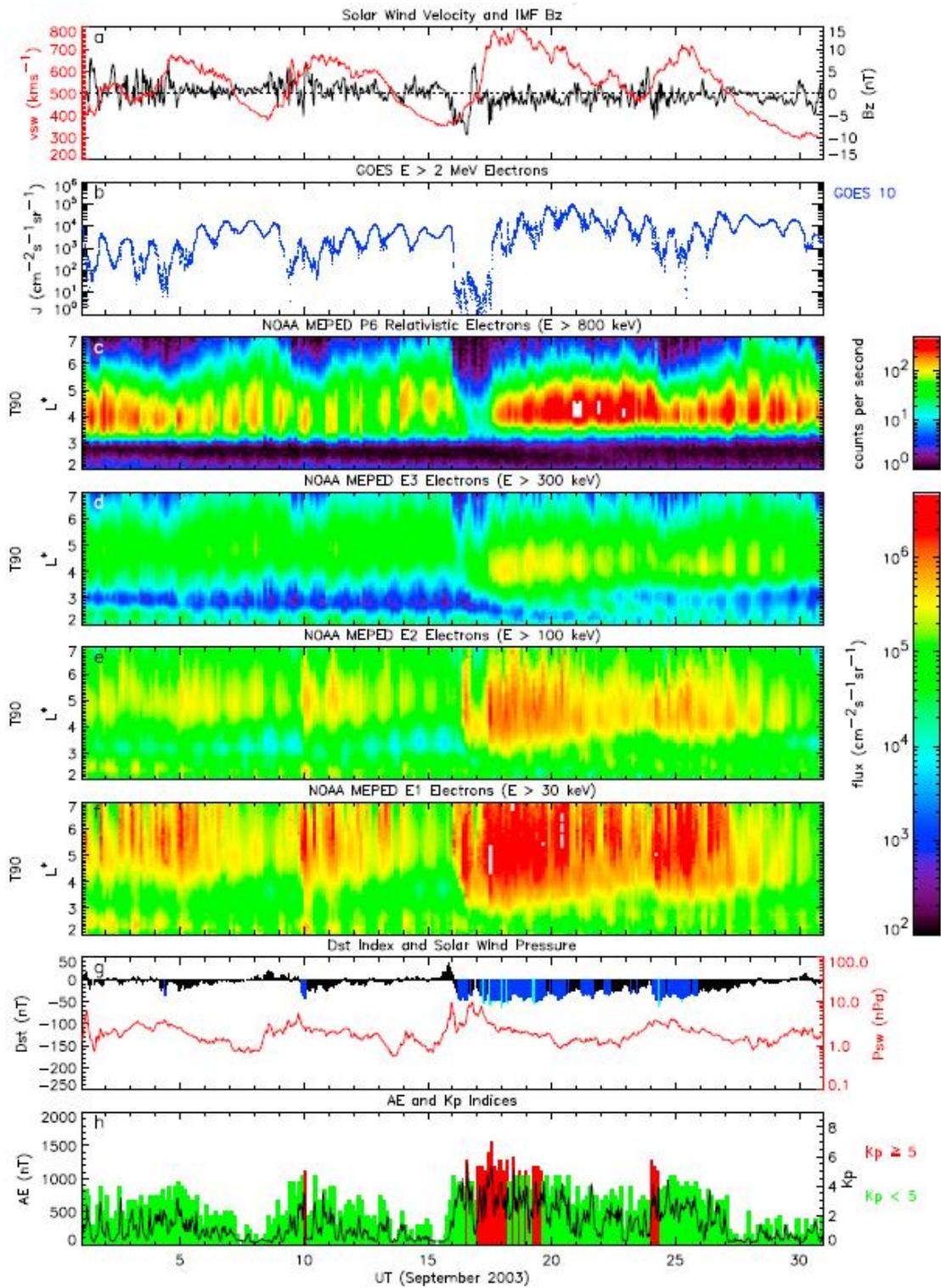


Figura 3. 7: (gráficas 1-8) ejemplo de cuatro eventos de corrientes de viento solar rápido observados durante septiembre de 2003 [2].

Los datos muestran que el flujo de electrones es mayor con L entre 5 y 4 (órbita terrestre media) pero también se eleva en la órbita geosíncrona L = 6, lo que revelaría las órbitas de los satélites más vulnerables a este tipo de eventos, y donde más cuidado habría que tener a la hora de llevarlos a ese lugar del espacio. Normalmente, cada evento duró unos pocos días, y el evento más largo comenzó el 17 de septiembre de 2003, el cual duró 6 días. Durante cada evento hubo en general un aumento en el flujo de electrones mayor a 2MeV, magnitud medida por GOES.

Durante las rápidas corrientes de viento solar, el índice Dst (Gráfica 7) no cayó mucho más allá de los -50nT, lo que indica que se no dieron tormentas magnéticas de gran relevancia, y el índice AE (Gráfica 8), el cual es una medida de la intensidad de los sistemas de corrientes aurorales junto con el índice Kp, aumenta durante los eventos, lo que indica que se trata de periodos de perturbación geomagnética, aunque en mucha menor medida en comparación con un EMC severa [2].

Lo más desvelador de este estudio, y lo más relevante en cuanto al análisis del viento solar, es saber determinar qué alturas de órbita y latitudes son las más vulnerables a una posible carga electrostática, ya que son las orbitas sometidas a mayor flujo de partículas cargadas provenientes de ráfagas de viento solar rápido. Las soluciones a este problema se tratarán más adelante.

Pero no sólo es problemática la carga electrostática de los componentes internos del satélite, sino también la carga superficial de este. Es decir, pueden darse descargas electrostáticas sin que el flujo de electrones al que es sometido el satélite sea de partículas de alta energía, con que el tiempo de duración sea el suficiente como para cargar la superficie del satélite sin llegar a penetrarlo, ya puede suponer un peligro para la integridad del servicio satelital.

Como conclusión, el viento solar es una propiedad natural del sol constante en el tiempo, pero con ráfagas de mayor intensidad que podrían llegar a ser un problema, y de hecho ya lo han sido. Cómo de severas puedan llegar a ser y cada cuánto, es realmente una incógnita, ya que sólo tenemos registros fiables de este tipo de sucesos desde hace aproximadamente 150 años. De hecho, el aumento de flujo de

electrones por parte del viento solar sigue siendo objeto de debate a día de hoy. Sólo el tiempo y el estudio nos darán datos reveladores para conocer realmente este tipo de acontecimientos, y sólo así podremos saber de manera certera cómo de peligrosos son para la tecnología en la Tierra.

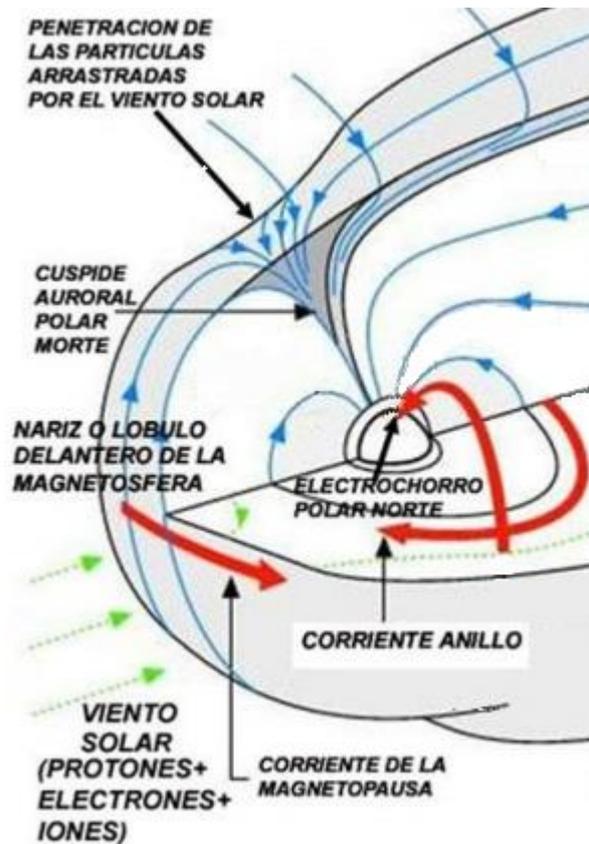


Figura 3. 8: procesos caracterizados por los índices previamente descritos. Los más destacables son la corriente de anillo opuesta a la corriente de la magnetopausa que debilitan el campo magnético terrestre, el electrochorro auroral y la localización de la zona por donde más partículas penetran hacia la Tierra, generalmente los polos. (<http://www.conexion-sol-tierra.com/files/TRABAJOS/LA%20ACTIVIDAD%20DEL%20CAMPO%20MAGNETICO%20TERRESTRE%20.pdf>)

3.4 Corrupción del software y las memorias a bordo del satélite.

Es bien sabido, que los componentes de las computadoras están compuestos por microchips. La magnitud de los transistores que albergan pueden llegar a ser de nanómetros, y por tanto, el impacto de una sola partícula incidente puede ser catastrófico para la integridad del sistema. Estos incidentes son los denominados *Single Event Upset* (SEU), en los que una sola partícula ionizada, golpea un nodo sensible en un dispositivo microelectrónico, como por ejemplo un microprocesador, memoria de semiconductor o transistores de alimentación, resultando en fallos en operaciones lógicas que pueden comprometer al sistema en su totalidad.

El mayor peligro que alberga este problema es que, para que esto llegue a suceder, no es necesario un clima espacial especialmente adverso, sino más bien que las tormentas producidas sean prolongadas, y los satélites se encuentren siendo alcanzados por una cantidad suficiente de partículas, que aumente la probabilidad de un SEU. Realmente, ya que partículas energéticas que atraviesan el recubrimiento de los satélites llegan de forma constante a la atmósfera terrestre, estos sucesos podrían darse en cualquier momento, aunque con mayor o menor probabilidad en función del clima espacial [21].

3.5 Desviación de la órbita en satélites LEO.

Los fenómenos meteorológicos espaciales han sido reconocidos por la comunidad científica como un gran peligro potencial para *la Low Earth Orbit*⁷ (LEO), entre muchas otras amenazas. Cuando la Tierra es alcanzada por una tormenta solar, la atmósfera terrestre se calienta y su densidad cambia al expandirse. Este proceso genera unas fuerzas de arrastre principalmente sobre los satélites LEO, interfiriendo directamente sobre operaciones del sistema de control del satélite, como predicciones y seguimiento orbital y diversas maniobras que pueden suponer una amenaza en cuanto a la reentrada no controlada a la Tierra de uno de estos satélites.

Como ya sabemos, las grandes tormentas solares con un índice Dst menor a -250 nT, son improbables, pero no imposibles. Desde la era espacial iniciada en 1957, sólo se han producido 7 tormentas solares por debajo de estas condiciones Dst, y por tanto, nuestro conocimiento empírico a cerca de los cambios de densidad en la termosfera debido a este tipo de eventos es realmente escaso. Pero como era de esperar, los registros confirman que, a mayor intensidad y sobre todo, duración de la tormenta solar, mayor arrastre se produce sobre los satélites.

Para dar valor empírico a este apartado, a lo largo del mismo, utilizaremos como referencia el ya mencionado evento climático de Halloween de 2003⁸, puesto que ha sido el más intenso del que tenemos datos relativamente certeros, con un índice Dst mínimo <-422 nT aproximadamente, y que sucedió recientemente. Nos ayudaremos de los datos de la atmósfera terrestre recopilados por los satélites de monitorización atmosférica CHAMP y GRACE procesados por los científicos D.M. Oliveira, E. Zesta, H. Hayakawa y A. Bhaskar [22].

⁷ Órbita LEO: Órbita terrestre baja, se denomina así a las órbitas con altitudes de entre 200 y 2000 km.

⁸ Índices y caracterización del evento especificado en el apartado 2.3 del Capítulo 2. (Figura 2.11 y Figura 2.12).

De dichos satélites, se hará uso de las mediciones de sus respectivos acelerómetros de alta precisión, y se estimaran los arrastres durante 4 tormentas históricas a través de un modelo empírico llamado JB2008, que utiliza los índices de la tormenta magnética para caracterizar la atmósfera terrestre durante el transcurso de estas. Nos facilitará los datos ya interpretados de la contribución de la actividad magnética en este proceso de calentamiento atmosférico, y nos servirá como referencia para saber estimar el arrastre satelital durante las cuatro tormentas de las que no tenemos observaciones, sin entrar en los cálculos. Las tormentas seleccionadas para la recreación de dicho modelo son los eventos de marzo de 1989, mayo de 1921, septiembre de 1909 y octubre de 1903. Cuyos índices Dst están reflejados en la Figura 3. 9.

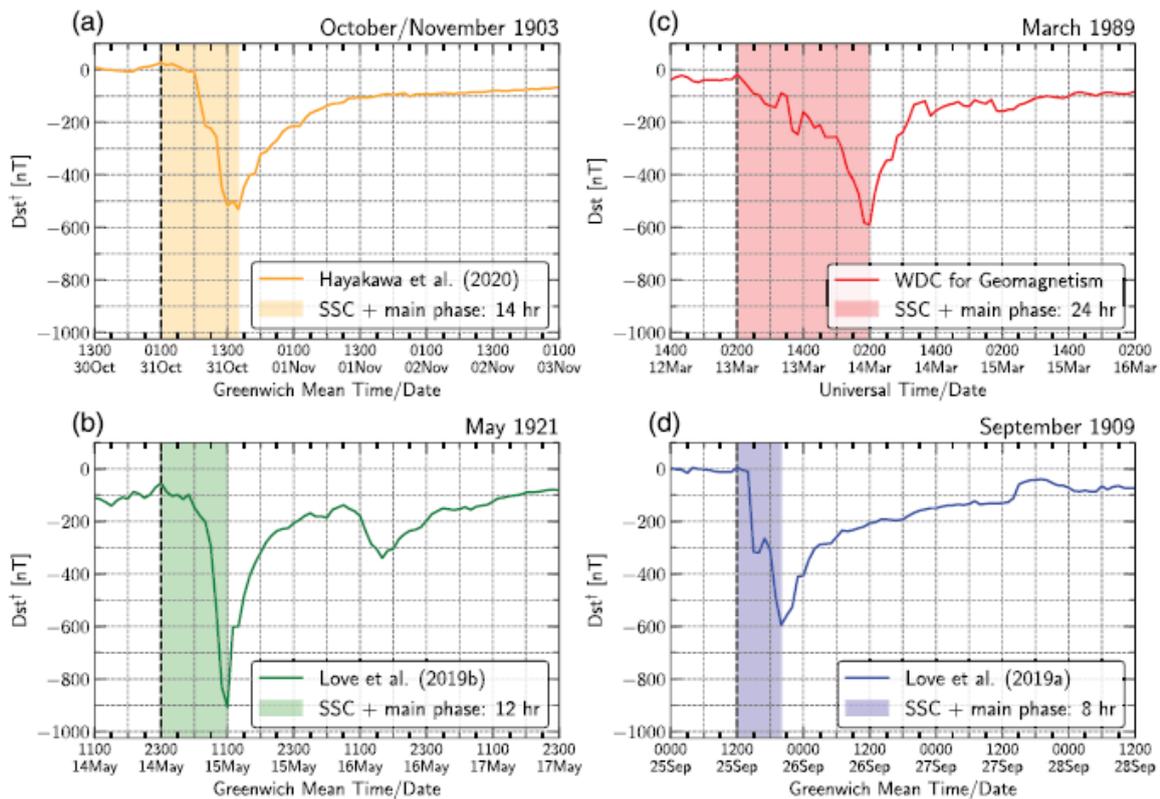


Figura 3. 9: índice Dst para las tormentas citadas [22].

Como anotación, pese a que el evento Carrington ha sido el evento climático espacial más extremo, con una componente horizontal >1600 nT, y un mínimo Dst <-1769 nT, no nos servirá como referencia en este caso, por los nulos registros que relacionan densidad termosférica e intensidad de la tormenta de la época.

3.5.1 Efecto de arrastre durante la tormenta de Halloween de 2003:

Afortunadamente, sí se poseen datos reales y no simulados sobre el efecto de arrastre que se produjo en los satélites GRACE y CHAMP durante la tormenta magnética de Halloween de 2003. En la Figura 3. 10, se puede observar una comparación del efecto de arrastre en condiciones normales, frente al resultado durante la tormenta. También se hace una comparación entre los datos experimentales y simulados por el modelo empírico atmosférico JB2008, y demuestra ser bastante fiable con respecto a la realidad, al menos en lo que a esta tormenta respecta.

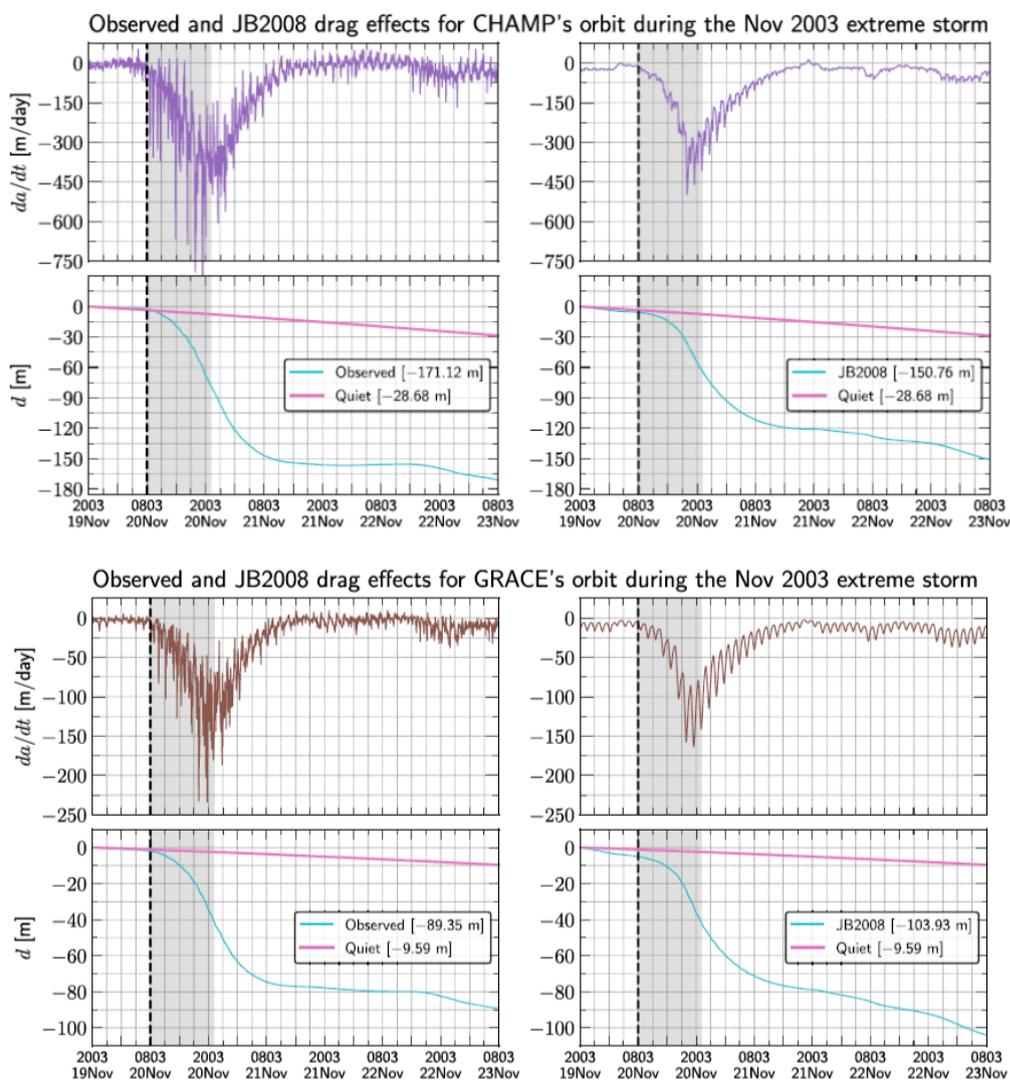
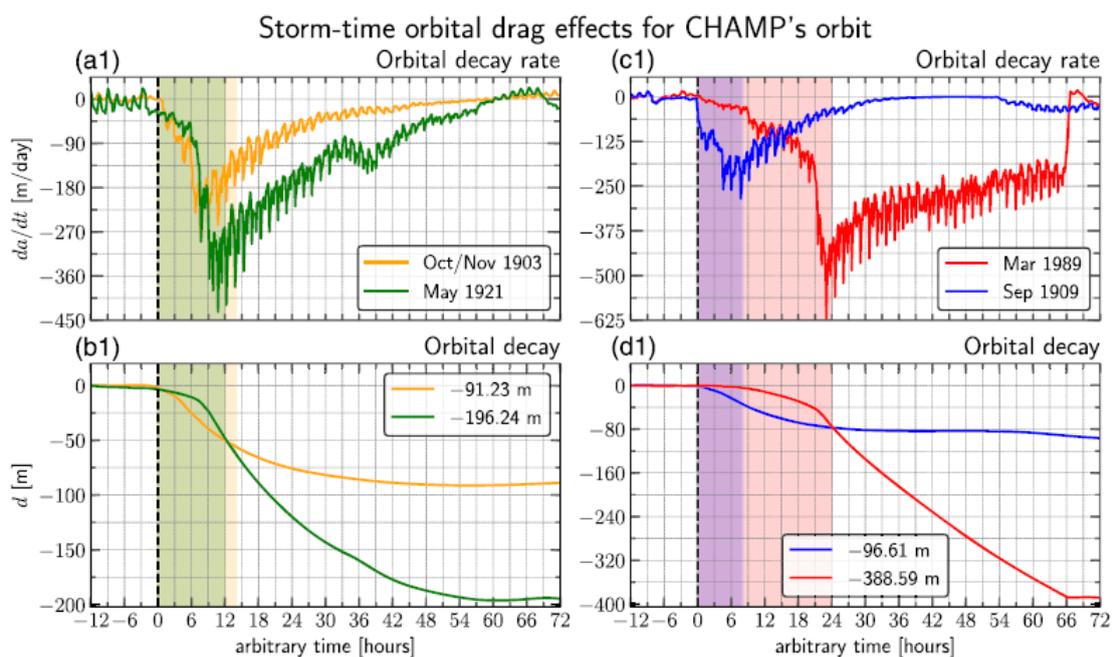


Figura 3. 10: Dst y efecto de arrastre durante la tormenta de Halloween 2003 en los satélites CHAMP (arriba) y GRACE (abajo). Valores reales medidos por los satélites (columna izquierda), y valores simulados por el modelo JB2008 (columna derecha). Efecto de arrastre producido en condiciones normales (línea rosa), y producido durante la tormenta (línea azul) [22].

Las gráficas muestran cómo para el tiempo de tormenta (zona sombreada) que fue de 13 horas aproximadamente, y también durante el tiempo de recuperación del campo magnético terrestre, el efecto de arrastre y por tanto, la desviación de la órbita hacia la Tierra, fue mucho mayor que el estimado por la densidad atmosférica de fondo en condiciones normales, llegando a ser arrastrado 89.35 metros en vez de 9.59 metros en el caso del satélite GRACE, y 171.12 metros en vez de 28.68 metros en el caso del satélite CHAMP.

3.5.2 Efecto de arrastre estimado por las tormentas seleccionadas:

Para las cuatro tormentas seleccionadas, no existen registros medidos sobre los efectos de arrastre en los satélites CHAMP y GRACE, pero haremos uso de los datos interpretados en las simulaciones del modelo JB2008, para hacernos una idea de cómo fueron dichos efecto en el transcurso de estas. Cabe destacar que, para este problema en particular, es especialmente decisivo la duración de la perturbación magnética. Por ello, pese a que puedan alcanzarse un valor mínimo Dst menos agresivo a priori, en algunas ocasiones las tormentas fueron sucesiones de EMCs que incrementaron mucho el tiempo de tormenta y de recuperación del campo magnético terrestre. Por consecuencia, no se puede hacer una relación directa entre valor Dst mínimo y efecto de arrastre [22].



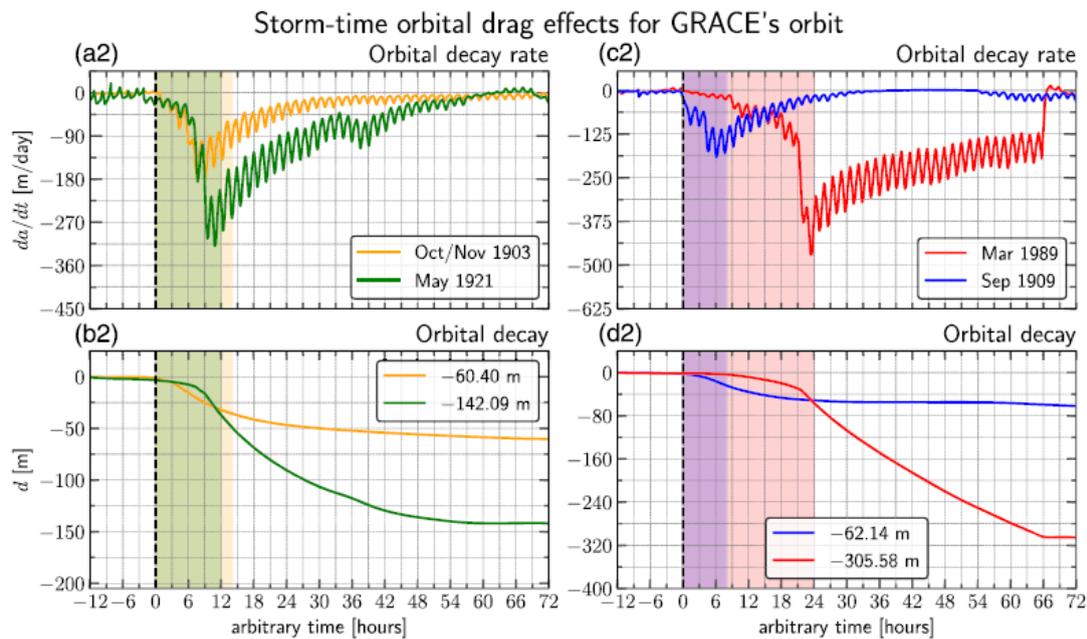


Figura 3. 11: Predicción JB2008 del arrastre orbital producido en los satélites CHAMP y GRACE para los eventos históricos seleccionados en el estudio [22].

De las cuatro tormentas seleccionadas, sólo se tienen datos satelitales del evento de 1989, y durante este, la cantidad de satélites perdidos en órbita LEO se incrementó de forma drástica durante los periodos de máxima intensidad, a causa de los errores producidos por el calentamiento de los sistemas de rastreo.

En la Figura 3. 11, análoga a la gráfica estimada en la Figura 3. 10, se estima el efecto de arrastre para cada una de las tormentas seleccionadas mediante el modelo de atmósfera empírico JB2008. Para el evento que se estima mayor arrastre, es el de marzo de 1989, el arrastre está estimado en 305.58 metros en el caso del satélite GRACE y de 388.59 en el caso del satélite CHAMP.

En conclusión, los datos mostrados nos indican que los predictores de arrastre orbital, deberían estar al tanto del efecto que tiene sobre la atmósfera terrestre el impacto de varias EMCs consecutivas durante un elevado periodo de tiempo, tal y como se produce en los máximos solares [22].

El proyecto Starlink de la empresa SpaceX, una megaconstelación de aproximadamente 12.000 satélites aprobados por la Comisión Federal de Comunicaciones en 2019, que dominarán la órbita LEO por debajo de altitudes de 600 km, con una distribución latitudinal de 0,005-0,01 objetos por metro cuadrado, deberían estar especialmente alertados de estas desviaciones de órbita, ya no para evitar la reentrada de satélites no controlada, sino una colisión entre ellos que podría acabar con la tecnología satelital al completo si se produjera un efecto en cadena.

El modelo al que hemos hecho referencia en este apartado, JB2008, ha sido efectuado a partir un número realmente escaso de tormentas, por tanto, aunque podemos garantizar que las simulaciones dan con predicciones relativamente fiables, no son lo suficientemente precisas como será necesario en el despliegue de estas megaconstelaciones. Para ello, la monitorización de estos eventos es imprescindible, sólo adquiriendo cada vez más registros de tormentas solares podremos saber el efecto de estas sobre los satélites, y podremos realizar modelos atmosféricos cada vez más precisos, que nos permitan predecir con exactitud las variaciones de órbita evitando una catástrofe espacial.

Capítulo 4

Estrategias de mitigación y análisis de soluciones.

“Los problemas que tienes hoy, no pueden ser resueltos pensando de la misma manera que cuando los creaste.”

Albert Einstein

Los problemas desarrollados con anterioridad son conocidos por la comunidad científica y se sabe que el impacto que podría tener sobre la economía, ya que, no sólo están involucradas las comunicaciones por satélite, sino también el sistema de administración de red eléctrica a la ciudadanía y la pérdida de servicios que eso conllevaría: suministros acuíferos, pérdida de productos perecederos etc.

Por ello, este capítulo tendrá como pilares básicos el análisis de dos estrategias para mitigar los efectos del clima espacial sobre la tecnología satelital [23]:

- La estrategia de mitigación de efectos mediante la monitorización del clima espacial.
- La estrategia de mitigación de los efectos mediante la fabricación de satélites más robustos frente al clima espacial.

Estas opciones, idealmente no deberían ser una disyuntiva, para que realmente estemos preparados para un posible evento adverso, ambas tienen que converger en un plan de acción común, pero la realidad, es que actualmente se está apostando mucho más por la estrategia de monitorización climática, y el abaratamiento de costes en el desarrollo y lanzamiento del satélite, por ello, en la memoria se ha centrado más la atención sobre dicha estrategia. En la actualidad, la disyuntiva entre

las dos opciones es un debate abierto. Hay consenso en la necesidad de una gran capacidad para producir predicciones y advertencias sobre los fenómenos meteorológicos espaciales, pero hay debate en la prioridad de las estrategias a seguir. Las observaciones son útiles, en la medida en que se es capaz de convertir en información de calidad en el desarrollo de modelos físicos que mejoren las predicciones de las que se dispone. La certeza de los modelos empíricos desarrollados para tal fin, es puesta en duda por la parte del sector que apuesta por que la atención no deba centrarse primero en la predicción, sino en la mitigación, en la construcción de infraestructura reforzada que provoque que el satélite sea capaz de continuar las operaciones sin interrupciones durante la exposición directa de eventos climáticos espaciales severos.

En el caso de las predicciones, también existe el debate sobre qué predicciones serían las más útiles, y de qué características. En principio, el principal objetivo de la industria espacial sería tener la capacidad de estar alertados como mínimo, con 24 horas de antelación, y poder recibir predicciones de las franjas temporales de baja probabilidad de evento adverso.

Sea cual sea el camino correcto a tomar, la cantidad de recursos requeridos para poder ofrecer pronósticos de calidad o satélites de gran resistencia al ambiente espacial es muy alta, y para tales avances, será necesaria la comprensión básica de los procesos solares que acaban con la tecnología. Por tanto, pese a que haya discrepancias entre las medidas a tomar, lo que es seguro, es que es necesaria la investigación espacial y el estudio de los procesos solares e interplanetarios [23].

4.1 Estrategia de monitorización del clima espacial.

Para esta estrategia en particular, los sistemas de alerta temprana sobre eventos espaciales son fundamentales. A lo largo de este apartado, se describen las principales instituciones a nivel global que se dedican a esta función, y los dispositivos de monitorización de los que disponen para ello. Además, se mencionarán también los organismos que emiten alertas al respecto y se han preocupado por las consecuencias del clima espacial, iniciando planes de acción.

4.1.1 Iniciativas y centros europeos [24]:

A nivel europeo, la Agencia Espacial Europea (ESA) sostiene varias iniciativas relacionados con la investigación del clima espacial. Una de las iniciativas más relevantes, es la Red Europea del Clima Espacial, SWENET por sus siglas en inglés *Space Weather European Network*. Dicha iniciativa, iniciada en 2005, facilitaba datos y servicios sobre el clima espacial a las entidades que lo necesiten. Hoy en día la interfaz que absorbió la función de esta iniciativa se denomina *Space Weather*, donde se hizo la transición en 2015. Todos los datos contenidos en el archivo SWENET se han transferido al nuevo portal *Space Weather*, y muchos de los participantes del proyecto piloto original continúan proporcionando datos a través de esta nueva interfaz.

A través de los datos que nos brinda esta iniciativa, cualquier usuario interesado en paliar los problemas que puedan surgir en el día a día debido al clima espacial, tiene la capacidad de consultar los datos de monitorización de *Space Weather* de la ESA, y hacer uso de esos datos en sus sistemas para su protección. Los datos de monitorización del clima espacial son inmensos, y su retransmisión puede ser de 24 horas a 5 minutos de retardo, pero nos brinda una infinidad de datos sobre el estado del clima espacial en las últimas 24 horas. En la Figura 1, se ha adjuntado un captura de ejemplo que nos informa 24 horas después de la observación, del estado de las

EMCs, pero los datos de monitorización que ofrecen, van mucho más allá de los mostrados.

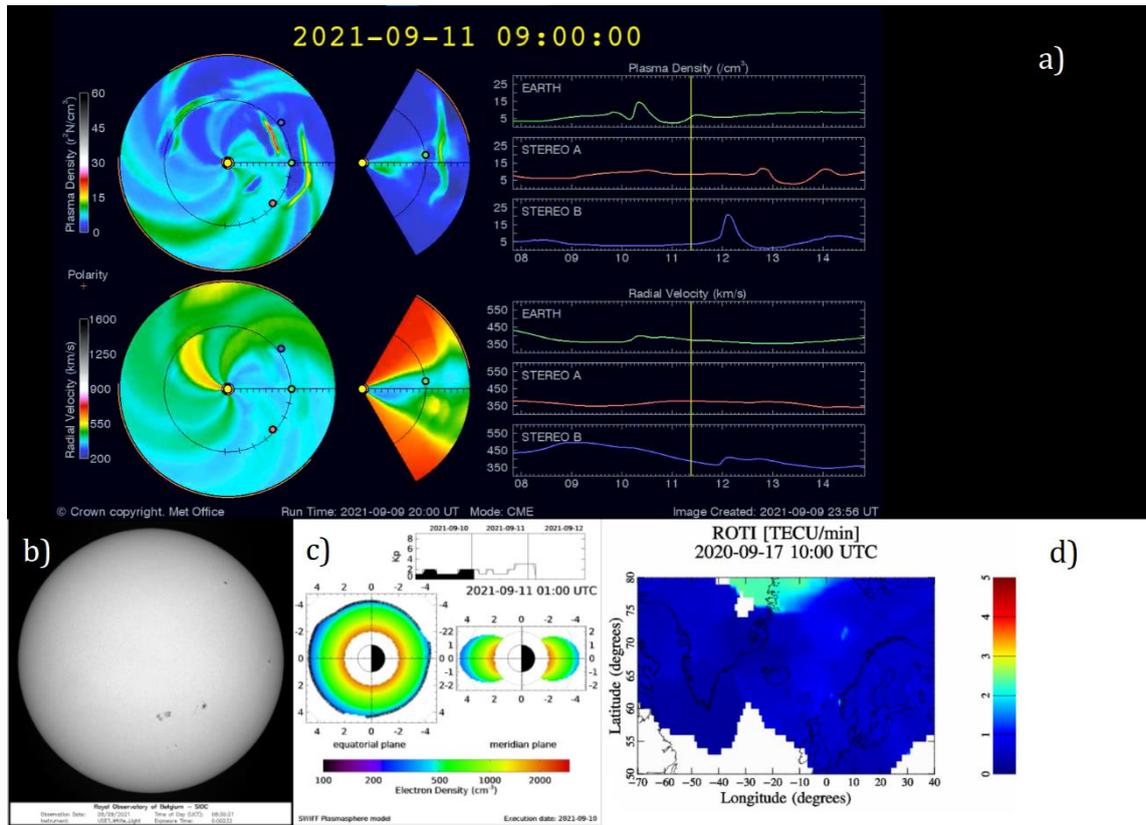


Figura 4. 1: compendio de imágenes tomadas de la iniciativa Space Weather de la ESA. a) Vídeo con la previsión de EMCs y viento solar. b) Manchas solares las últimas 24 horas. c) Estado de la magnetosfera. d) TEC en función de la latitud, en la zona cercana al polo norte [25].

Para este proyecto, y en concreto en este capítulo, nos hemos centrado en los servicios que esta iniciativa en desarrollo ofrece para mitigar los efectos adversos comentados en el capítulo anterior, sobre las telecomunicaciones satelitales. Los servicios ofrecidos son [24]:

- 1) Servicios de enlace de radio transionosférico:
 - Mapas TEC, casi a tiempo real.
 - Mapas de pronóstico TEC
 - Evaluación de calidad de la corrección ionosférica.
 - Mapas de centelleo ionosférico, casi a tiempo real
 - Monitorización y pronóstico de perturbaciones ionosféricas.

- 2) Servicios de seguimiento y vigilancia espacial:
 - Estimaciones atmosféricas para cálculos de arrastre atmosférico.
 - Archivo de índices geomagnéticos y solares, para el cálculo de la resistencia atmosférica.
 - Pronóstico de índices geomagnéticos y solares para el cálculo de la resistencia atmosférica.
 - *Nowcast* del retardo de grupo de las señales transionosféricas.

Tanto para los servicios de enlace de radio ionosférico, como para los servicios de seguimiento y vigilancia espacial,, se hace uso de corporaciones tecnológicas como el Centro de Predicción y Monitorización de Ionosfera (IMPC⁹) proporcionado por el centro aeroespacial Alemán, el monitor de ionosfera en tiempo real (RTIM) proporcionado por la Autoridad Cartográfica de Noriega (NMA), el servicio Europeo de Ionosondas (EIS), proporcionado por el Observatorio Nacional de Atenas (NOA), Monitorización de centelleo ionosférico (ISM) desarrollado por el *Collecte Localization Satellites* (CLS) e IEEA, el propio servicio de monitorización de la ionosfera de la ESA, el Riómetro Borówiec, proporcionado por el Centro de Investigación Espacial de la Academia de Ciencias de Polonia (SRC), la Estación Espacial internacional (ISS), e incluso la propia Universidad de Alcalá (UAH) en algunos casos. Por último destacar que todas las aplicaciones y servicios que vemos a continuación, están todavía en desarrollo, pese a que se pueden observar resultados actuales [24].

1) Servicios de enlace de radio transionosférico:

Los servicios de enlace de radio transionosférico, se enfocan en las soluciones que puede aportar a la tecnología la monitorización de la ionosfera, los servicios ofrecidos son válidos para cualquier señal que viaje a través de la ionosfera como su propio nombre indica, pero está enfocado por norma general a la tecnología de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) como GPS, GLONASS y

⁹ El IMPC, con su combinación especial de conocimientos científicos y gestión de datos, contribuye a la concienciación y la mitigación de los impactos ionosféricos en nuestra tecnología.

GALILEO, debido a que estas cada vez requieren de más precisión en el posicionamiento de los usuarios que hacen uso de este tipo de tecnología. Es de gran utilidad, ya que se trata de nuestra principal herramienta actualmente para hacer frente a uno de los problemas previamente descritos: la pérdida de seguimiento en sistemas GNSS, y el deterioro de la señal satélite en la propia transmisión, y en el receptor. La monitorización y pronóstico se basa en:

Mapas TEC a casi tiempo real, y pronóstico:

Proporciona monitorización geográfica europea, a no más de cinco minutos después de la observación del contenido total de electrones en la atmósfera (TEC) para esa región. Para ello, esta herramienta se apoya en variables como el número de manchas solares, y la densidad de flujo solar entre otros, ya que estos tienen una relación proporcional con el nivel de ionización de la ionosfera. El servicio se implementa mediante la combinación de los activos IMPC y EIS fundamentalmente [17].

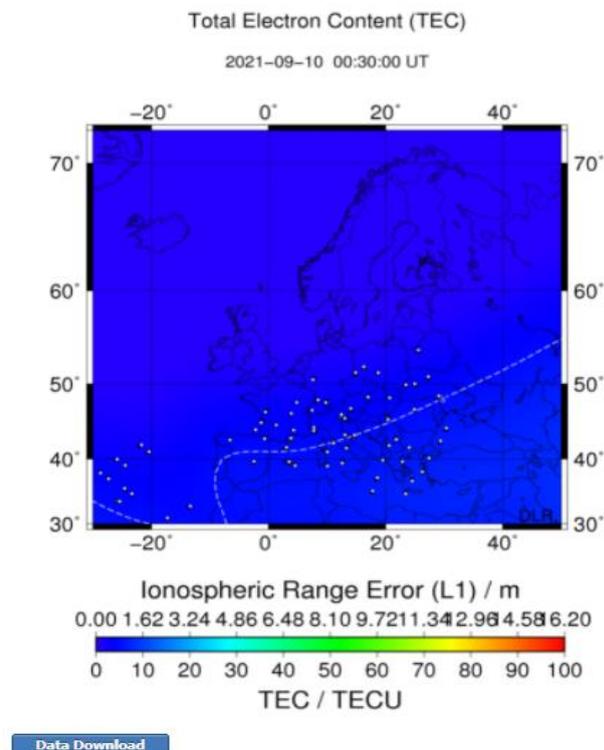


Figura 4. 2: datos con menos de una hora de demora, sobre el TEC en Europa, proporcionados por la iniciativa "Space Weather" de la ESA, haciendo uso del IMPC. Es posible descargar los datos en formato de tabla numérica [24].

Con una interfaz parecida, y en función de la base de datos de la monitorización geográfica anterior, esta misma iniciativa pronostica el TEC para la siguiente hora.

Evaluación de la calidad de corrección ionosférica, y pronóstico de perturbaciones ionosféricas [24]:

Proporciona datos sobre la viabilidad de aplicar correcciones a la señal GNSS debido a la degradación que efectúa la ionosfera cuando se está dando un evento climático adverso, Sin entrar en cálculos, este juicio se efectúa a partir de variables como el tipo de señal que vaya a requerir cada tipo de usuario: Los usuarios GNSS requerirán señales, mono o multifrecuencia, con mayor o menor precisión de posicionamiento, y utilizando o no integridad¹⁰. A partir de estos parámetros generales, se podrá establecer un juicio posterior. El servicio se implementa mediante la combinación de los activos: IMPC, RTIM, EIS e ISM entre otros.

Diversas aplicaciones diseñadas por los usuarios requieren de estos servicios para estimar la ionosfera. Esta estimación es más o menos precisa en función de las características físicas que posea la ionosfera en ese momento, como ya es conocido, la precisión es degradada durante las condiciones de perturbación ionosférica previamente mencionadas, como tormentas magnéticas o centelleos [17].

La evaluación de la calidad de corrección ionosférica, proporciona a las aplicaciones que lo demanden, parametrización de la ionosfera y alarmas en tiempo real para indicar el nivel de degradación de los modelos de corrección ionosférica con respecto al estado real de la ionosfera [24].

¹⁰ Integridad: procesado de la señal que asegura a partir de cierto umbral de degradación, la reconstrucción de la señal original para así evitar la pérdida de información. No tiene por qué ser requerido por todas las aplicaciones tecnológicas, a veces prima más la rapidez de la información, que la calidad.

Mapas de centelleo ionosférico a casi tiempo real, y pronóstico [24]:

Como describimos en el anterior capítulo, la señal GNSS puede sufrir desvanecimientos y fluctuaciones rápidas en fase y amplitud, a causa de las irregularidades en la densidad del plasma que se encuentra en la ionosfera, produciendo el denominado centelleo radio, que puede interrumpir la transmisión de la señal, ocasionando pérdidas de seguimiento y errores en las estimaciones de distancia. Para aplicaciones que pretendan evitar dichos problemas, o intentar solucionarlos, es esencial disponer de los índices que caracterizan la ionosfera, típicamente el índice S4¹¹. A tal efecto, los receptores GNSS de alta velocidad en Europa proporcionan la información necesaria de amplitud y fase específica del enlace receptor-satélite [17].

Este servicio ofrecido por la ESA, proporciona los datos necesarios para que una aplicación pueda paliar en mayor o menor medida estos efectos, poniendo al alcance de la tecnología datos de centelleo radio a casi tiempo real, con 5 minutos de demora, e índices solares y geomagnéticos aplicables para proyectos de modelos de pronóstico.

Los activos sobre los que recae la responsabilidad de este servicio son fundamentalmente: IMPC y RTIM. En la Figura 4. 3, se adjunta una captura de la interfaz que utiliza el IMPC para mostrar algunos de los datos previamente mencionados.

¹¹Índice S4: Estándar para caracterizar la perturbación ionosférica, muy utilizado en señales GNSS. Es definido a partir de la relación entre la desviación típica de la amplitud de la señal, y su amplitud media.

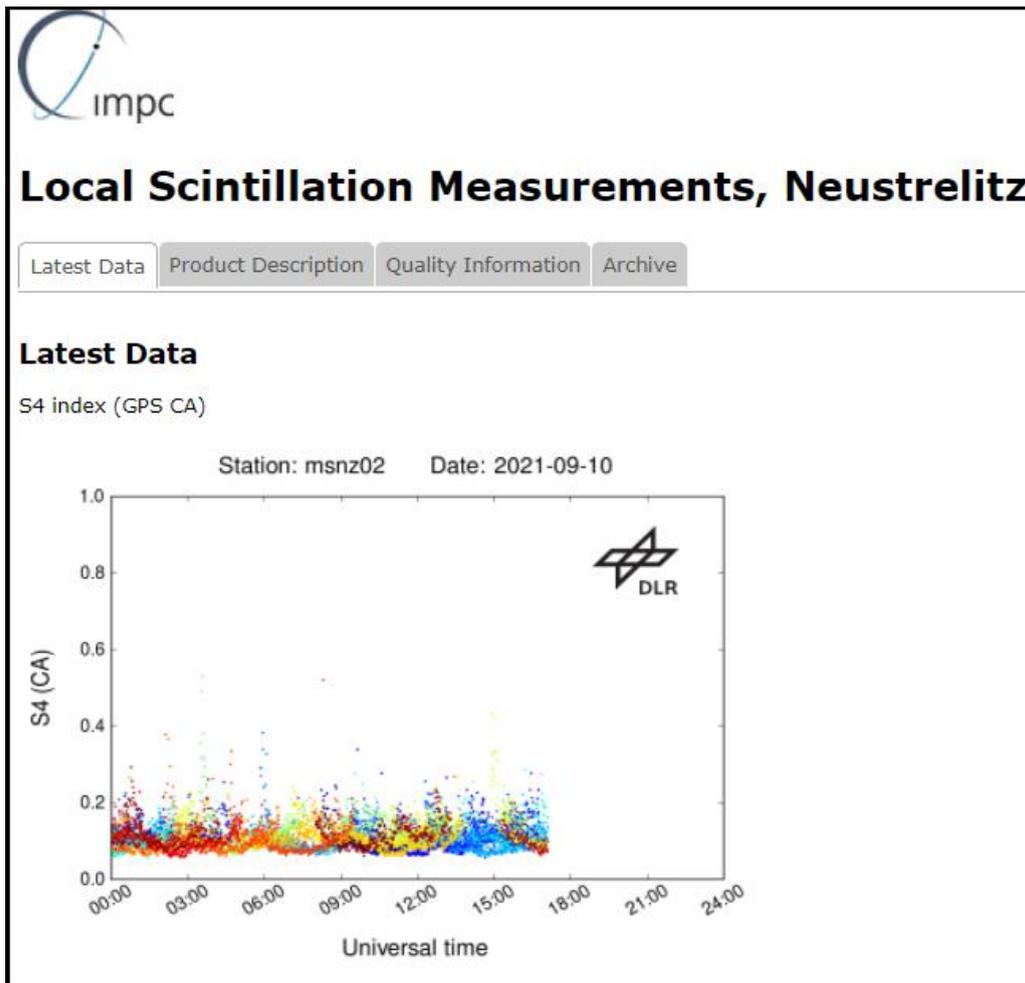


Figura 4. 3: Monitorización del valor del índice S4, proporcionado por la interfaz web del IMPC [25].

A parte de monitorizar, la iniciativa pretende hacer un pronóstico de corto alcance. Actualmente la herramienta que pronostica este centelleo está en una etapa de desarrollo que no permite hacer uso de sus servicios, pero se pretende proporcionar al usuario una estimación del estado de la ionosfera, prediciendo riesgos de perturbación, vigilancia y detección de fenómenos ionosféricos, así como detectar tormentas geomagnéticas y poder definir aspectos de esta como la propagación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia, normalmente señales GNSS, a través de una ionosfera perturbada por un canal de densidad de electrones gaussianos, y las trayectorias de los rayos a través de la ionosfera [25].

2) Servicios de seguimiento y vigilancia espacial [24]:

Los servicios de seguimiento y vigilancia espacial están enfocados a paliar el problema de arrastre atmosférico sobre los satélites. Por tanto, este tipo de servicio está enfocado en la monitorización y pronóstico de la termosfera, que es la responsable de producir dicho arrastre al expandirse en el momento en el que se calienta, alcanzando altitudes mayores. De esta manera, los satélites se encuentran en un entorno más denso de lo previsto, que ofrece mayor resistencia a la trayectoria orbital, perdiendo energía en el proceso que acaba en una pérdida de altitud.

Sabiendo el estado de la atmósfera, es más fácil saber la pérdida de altitud que fuese a suponer al satélite que se quiera proteger, facilitando la gestión del sistema de control de órbita del mismo. La monitorización y pronóstico se basa en:

Estimaciones atmosféricas para el cálculo de la resistencia aerodinámica:

El objetivo de este servicio, como su propio nombre indica, es estimar la densidad termosférica en altitudes de entre 120 a 1500km, es decir, en una franja de las altitudes de las que se compone la órbita LEO. Posteriormente, los datos de la estimación se facilitan al usuario que solicite el servicio, y podrán ser utilizados a partir de un modelo empírico de densidad atmosférica, que determine el cálculo de la fuerza de arrastre que experimentaría la nave espacial en aquella latitud en la que se encontrase, y así poder respaldar la determinación y predicción de las órbitas de los satélites [24] [22] [26].

Algunos de los datos que son ofrecidos, es la estimación termosférica para las latitudes dadas durante el año anterior a la solicitud del servicio, el pronóstico a corto plazo de la densidad atmosférica y datos ambientales. Los gradientes representados de densidad neutra, son obtenidos a partir de un modelo semi-empírico denominado

DTM2013, el cual hace uso de los índices del clima espacial solares y terrestres a la par que de calentamiento termosférico. En la Figura 4. 4 se observa un ejemplo del tipo de gráfica a la que se podría acceder, proporcionada por UK Met Office [27].

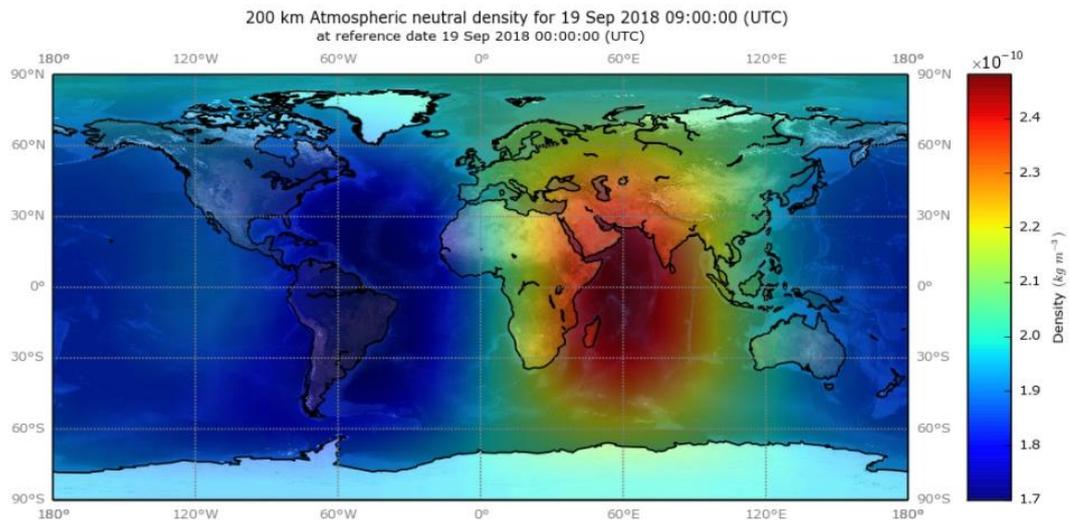


Figura 4. 4: densidad atmosférica neutra a nivel global, el 19 de septiembre de 2018 a 200km de altitud [24].

El servicio se implementa mediante la combinación de una gran cantidad de activos, pero para este servicio en particular, cabe destacar la colaboración de la propia Universidad de Alcalá.

Archivo de índices geomagnéticos y solares, para el cálculo de arrastre:

Se trata de un archivo en una extensa base de datos, que hace función de registro de los índices climáticos espaciales que puedan ser relevantes para el estado de la atmósfera, y por tanto también para el cálculo de resistencia atmosférica a la aerodinámica del satélite.

Son los índices estándar que se han visto con anterioridad a lo largo de este proyecto, y otros índices solares de diferentes índoles en los que no nos adentraremos en esta memoria, pero que en definitiva, son de utilidad para el cálculo de órbitas [24].

Previsión de índices geomagnéticos y solares para el cálculo de la resistencia:

La previsión de índices geomagnéticos y solares, proporciona un pronóstico a corto plazo de los índices geomagnéticos para estar al tanto de la pérdida de altitud de los satélites no sólo cuando esta se da, sino también cuando se vaya a dar. De esta forma, idealmente, no sólo podremos corregir los cambios de órbita, sino que los podremos prevenir.

La estimación se elabora a partir de los índices de actividad solar del archivo del apartado anterior, y en función de los registros del número de manchas solares, la intensidad de los diferentes espectros de la luz solar, y de la medición de índices magnéticos terrestres.

Los activos más significativos para este servicio: Universidad de Alcalá, ISS, IRF entre muchos otros [24].

Como reflexión final, la ESA ha hecho mucho por estimular las actividades meteorológicas espaciales. En particular, ha proporcionado la financiación para proyectos como el que acabamos de analizar sobre servicios meteorológicos espaciales. Estos están teniendo un gran éxito y han desempeñado un papel fundamental en la construcción de la actual comunidad europea de meteorología espacial. Habiendo desarrollado nuevos servicios, necesita convertirlos en un organismo operativo como lo ha hecho anteriormente al construir un sistema de meteorología espacial para Europa, ahora EUMETSAT 88 Este programa europeo propuesto sobre la conciencia de la situación espacial, que incluye el clima espacial como elemento principal, puede proporcionar un camino hacia ese lugar, especialmente, si según lo planeado, se construye mediante la federación de los servicios europeos existentes.

4.1.2 Iniciativas y centros estadounidenses:

En Estados Unidos, la observación y monitorización del clima espacial, así como de sus consecuencias sobre la tecnología y atmósfera terrestre, cuenta a cargo fundamentalmente de dos entidades [29]:

- *Space Weather Prediction Center (SWPC) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*: Centro de Predicción del Clima Espacial de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica.
- *Air Force Weather Agency (AFWA), United States Air Force (USAF)*: Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea de Estados Unidos.

Dichas agencias, al igual que las europeas, tienen como objetivo principal la toma de decisiones de prevención, en función del conocimiento del clima espacial. El intercambio de información, y el retardo en la presentación de las alarmas, se encuentra en un margen entre minutos y varias horas, debido principalmente al procesamiento de datos según modelos empíricos o semi-empíricos. Destacar, que nos centraremos solo en la primera de las dos agencias, por ser de uso civil y poseer una mejor accesibilidad para la comunidad científica en general, ya que la otra agencia está vinculada al ejército, y por tanto, es mucho más cerrada.

El objetivo de las alarmas es una conexión entre el clima espacial y la toma de decisiones, que debe cumplir: notabilidad, credibilidad y legitimidad, es decir, constituir información relevante para los responsables de la toma de decisiones, información contrastada y coherente, e información objetiva, respectivamente [30] [23].

Durante los períodos de tormentas severas, estos productos se distribuyen tanto por acceso web a través de internet, como por contacto directo con clientes de alta prioridad. Que las alarmas posean esas características, y que sean lo más inmediatas posible, es actualmente uno de los retos científicos en el sector espacial.

Centro de Predicción del Clima Espacial (SWPC) de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA).

El centro de predicción del clima espacial, SWPC, es capaz de predecir el advenimiento de una eyección de masa coronal solar causada por una erupción de tipo X con una antelación de 1 a 3 días de forma certera, lo que es de gran ayuda para la gestión de un plan de acción futuro en caso de que ocurriera un evento de este tipo, sin embargo, para la predicción ionosférica no cuenta con tanta fiabilidad ni previsión, por lo que los problemas GNSS ya mencionados, en lo que a este centro respecta, siguen siendo una vulnerabilidad [29].

La NOAA está orientada a usos civiles, y de hecho, en su página web expuesta en la Figura 4. 5 [31] se aclaran conceptos, variables climáticas y tiene algunos datos de monitorización. Este centro de la administración es apoyado por la NASA, y hace uso de varias sondas y satélites de investigación espacial como: el *Geostacionary Operational Enviromental Satellite* (GOES), las sondas *Advanced Composition Explorer* (ACE) y *Solar Heliospheric Observatory* (SOHO) o la misión *Solar Stelar Relations Observatory* (STEREO). Los activos citados son también los responsables de gran parte de los datos que se han obtenido para esta memoria.

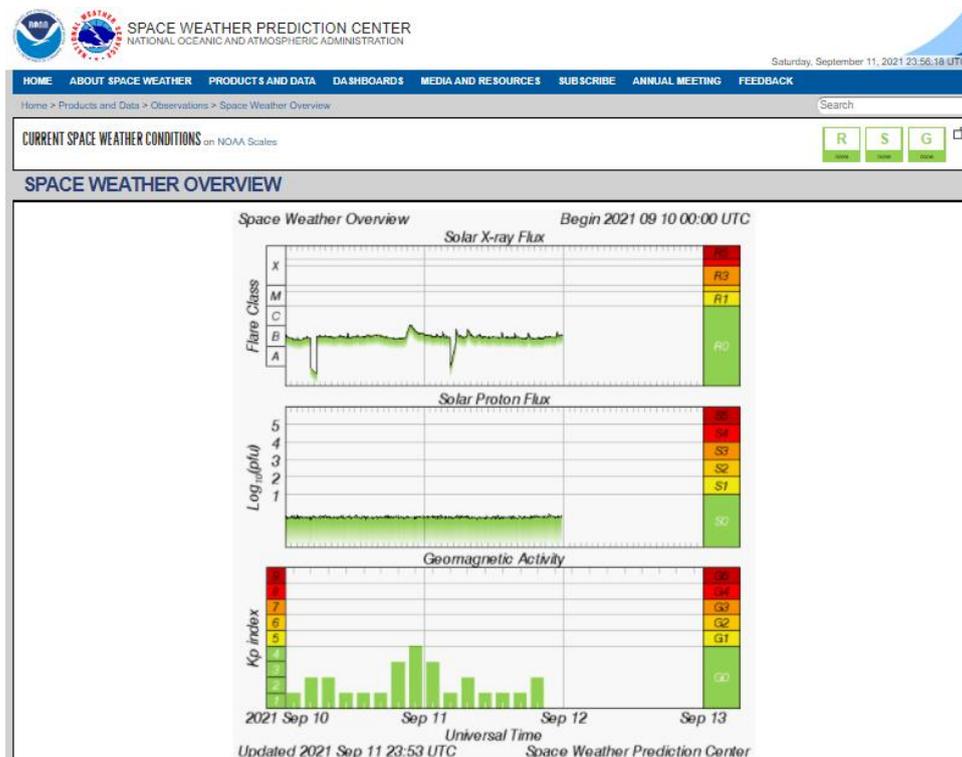


Figura 4. 5: interfaz de monitorización del SWPC [31].

El SPWC no sólo ha sido diseñado para monitorizar el clima espacial, sino que, al igual que las investigaciones que llevan a cabo los centros europeos, este tiene como propósito la evaluación de necesidades frente a un evento solar, proponer iniciativas e impulsar proyectos para poner en marcha nuevos servicios que cubran la necesidad de los usuarios, el diseño de productos que mejoren la robustez en el proceso de fabricación de los satélites, y proporcionar la información crítica, tanto de monitorización como de pronóstico, de la manera más inminente posible, a las instituciones más adecuadas para su uso.

Se ha procedido a realizar un breve análisis de los rasgos generales de los satélites de investigación con los que cuenta el centro, su utilidad, funcionalidades y algunos de sus hallazgos, ya que los servicios que pretende ofrecer son bastante parecidos a los europeos detallados en el anterior apartado.

Advanced Composition Explorer (ACE):

Esta sonda, a la que se le atribuye el mismo nombre que la misión, fue lanzada el 25 de agosto de 1997, entrando en una órbita cercana al punto lagrangiano L1, a 1.5 millones de kilómetros de la Tierra, y se prevé que contenga la propulsión necesaria como para mantenerse en esa órbita hasta el 2024 [32].

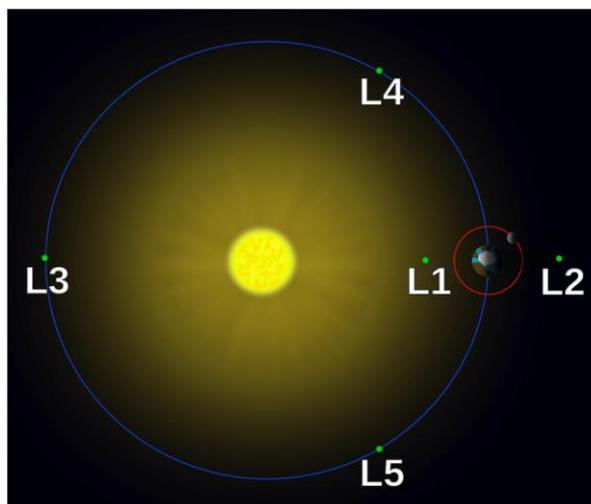


Figura 4. 6: posición orbital L1. (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lagrange_points2.svg)

Se trata de una misión de exploración solar, que trata de comprender la naturaleza de las partículas energéticas SEP, provenientes del viento solar, el entorno interplanetario y los procesos de interacción con el sistema solar. La NOAA hace uso de sus datos a tiempo casi real, para establecer los pronósticos con mayor certeza y advertir de las tormentas solares.

Esta misión fue lanzada con los objetivos de conocer la composición elemental de la materia radiada por el sol, el origen de los elementos y el proceso que experimentaban en el tránsito por el sistema solar, la formación de la corona solar, la aceleración del viento solar, y la aceleración y transporte de partículas en la naturaleza.

Asimismo, la sonda está dotada de una extensísima instrumentación que permite la realización de gran cantidad de experimentos espaciales: el instrumento más relevante para esta memoria es el *Real Time Solar Wind* (RTWA), que proporciona alertas sobre fenómenos anómalos del clima espacial, lo que permite a la sonda, avisar de la llegada de una EMC con 45 minutos de antelación [32].

Gracias a esta misión, en concreto, se ha sido capaz de entender mejor el tipo de partículas que provienen del viento solar, y clasificarlas según la energía que posean.

Solar and Heliospheric Observatory (SOHO):

El observatorio solar y heliosférico (SOHO) se lanzó el 2 de diciembre de 1995, en posición lagrangiana L1, para estudiar el Sol. Aunque se trata de un proyecto conjunto entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la NASA, esta última fue la responsable del lanzamiento y actualmente se encarga de las operaciones. El NOAA a través de la NASA, hace uso de los datos de este observatorio, que continúa operando después de más de 25 años en el espacio, y que se espera que su misión finalice en el 2022 [33].

El satélite SOHO representado en la Figura 4. 7, monitoriza el espacio con una amplia instrumentación: entre las más interesantes en lo que a este proyecto se refiere son el coronógrafo y espectrómetro *Large Angle and Spectrometric Coronagraph* (LASCO), que nos permite observar erupciones solares, y el *Extreme ultraviolet Imaging Telescope*, a través del cual se estudia la radiación ultravioleta y sus consecuencias sobre la atmósfera.

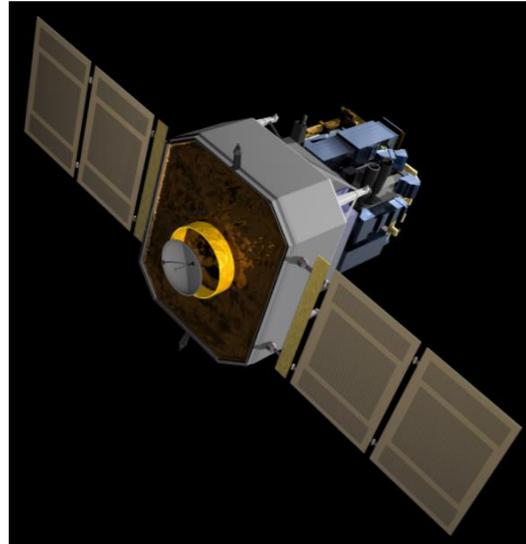


Figura 4. 7: representación artística del satélite SOHO [34].

Esta nave espacial, se comunica con la Tierra a través de un régimen binario de 200 kbit/s, mediante la Red de Espacio Profundo de la NASA. Las imágenes y datos que transmite son utilizados para la predicción y pronóstico del clima espacial, así como para investigar la estructura interna solar, la heliosfera y la proveniencia del viento solar [33].

Gran cantidad de las imágenes y vídeos tomados por el satélite se pueden consultar en la página web oficial de la NASA, donde se muestran archivos de manchas solares, capturas de los coronógrafos a bordo del satélite, imágenes de cometas y sus trayectorias, animaciones del clima espacial, erupciones solares e incluso fotografías del propio satélite durante las etapas de desarrollo, y en el cohete espacial durante el lanzamiento. En la Figura 4. 8 se muestra la interfaz a través de la cual se accede a los mencionados archivos.

SOHO
SOLAR AND HELIOSPHERIC OBSERVATORY

home | about | gallery | data/archive | operations | publications | newsroom | classroom | community

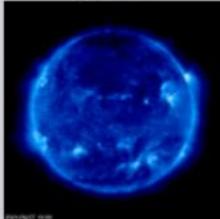
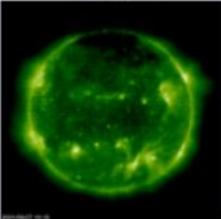
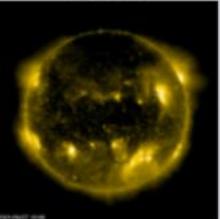
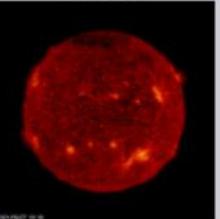
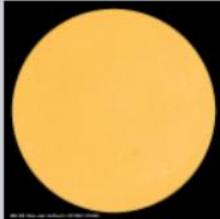
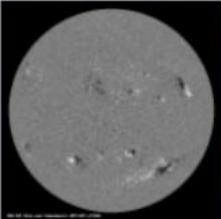
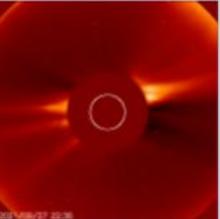
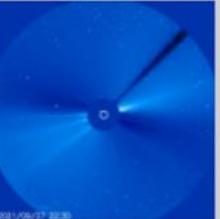
DATA/ARCHIVE

ARCHIVE
 Science Archive At GSFC
 Science Archive At ESAC

REAL TIME IMAGES
 The Sun Now
 SOHO Movie Theater
 MPEG Movies
 GIF Movies
 About These Images

The Very Latest SOHO Images

About these images

EIT 171  More 512x512	EIT 195  More 512x512	EIT 284  More 512x512	EIT 304  More 512x512
SDO/HMI Continuum  More 512x512	SDO/HMI Magnetogram  More 512x512	LASCO C2  More 512x512	LASCO C3  More 512x512

Bigger versions of this page in a new window:

Gallery

SPACECRAFT



Figura 4. 8: Interfaz de página web de la NASA donde se pueden consultar las últimas imágenes tomadas por el satélite SOHO [34].

Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO):

La misión STEREO consiste en el lanzamiento de dos sondas A y B prácticamente idénticas, lanzadas el 26 de octubre de 2006, que fueron alojadas en órbita heliocéntrica en un proceso que abarcó hasta el 15 de diciembre de ese mismo año [35].

Los satélites STEREO presentan la estructura de la Figura 4. 9, y se trata de una misión liderada por la NASA, además, es la tercera misión del programa de sondas solares que diseñó la agencia aeroespacial.

Reino Unido se prestó a dotar los sistemas de cámaras y aparatos especializados en la obtención de imágenes solares, y la misión contó con la contribución del laboratorio de Física Aplicada de la Universidad de Johns Hopkins de Maryland.



Figura 4. 9: Uno de los dos satélites idénticos STEREO [35].

Como se aprecia en la Figura 4. 10, la sonda STEREO-A sigue una órbita heliocéntrica un poco más cercana al sol que la de la Tierra, y por tanto tiene una velocidad angular mayor que la defasa de la órbita terrestre adelantándose, es decir, da una vuelta al Sol un poco más rápido que la Tierra. Por el contrario, la sonda STEREO-B, sigue una órbita heliocéntrica un poco más lejana, lo que le hace tener una velocidad angular menor con respecto a la Tierra, que la defasa de la órbita terrestre atrasándose. Desde un punto de vista relativo a la Tierra, pareciera que las sondas rodean en círculos al sol, cruzándose entre ellas y volviendo a la Tierra. Este diseño nos permite realizar observaciones 3D procesando las imágenes obtenidas de ambas sondas mediante paralaje, al igual que lo hacen nuestros ojos [35].

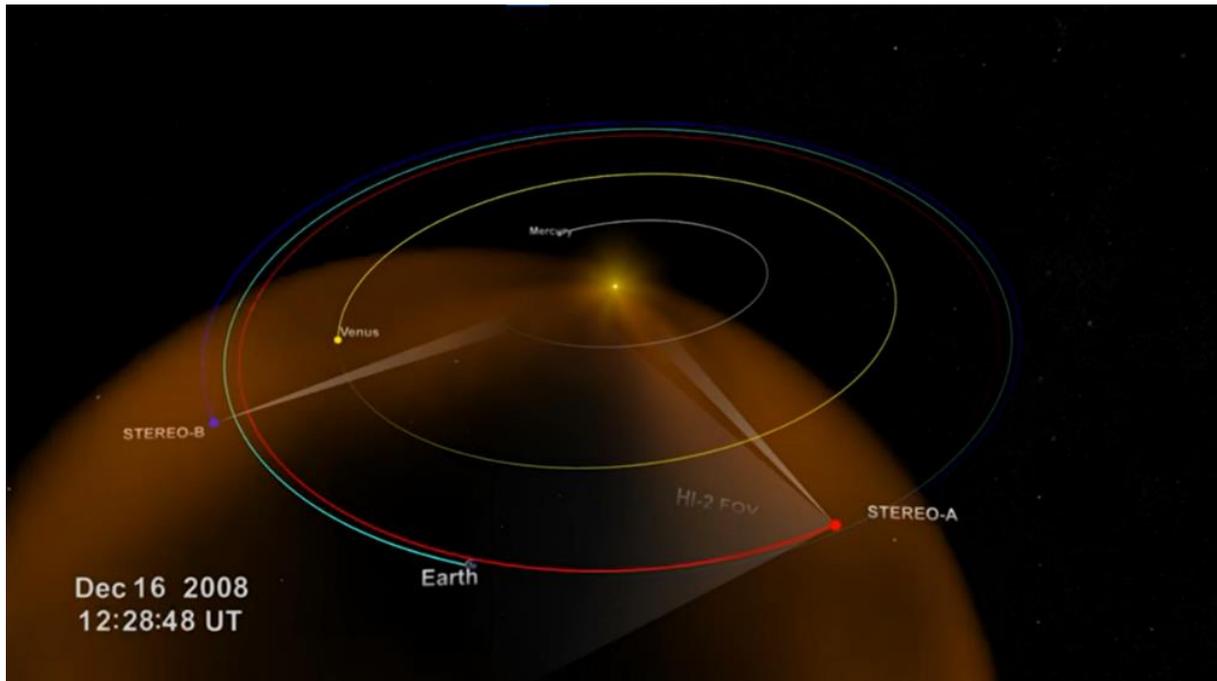


Figura 4. 10: órbitas de las sondas STEREO [35].

Los paquetes de instrumentos más relevantes a bordo que poseen las sondas de este proyecto son [29]:

- *Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation* (SECCHI): hace uso de una cámara de UV extremo, dos coronógrafos y una cámara heliosférica.
- *STEREO Waves* (SWAVES): monitor de ráfagas de ruido interplanetario en las bandas de radio.
- *In-situ Measurements of Particles and CME Transients* (IMPACT): analiza partículas energéticas SEP procedentes del viento solar.
- *Plasma and SupraThermal Ion Composition* (PLASTIC): caracteriza el plasma de protones, partículas alfa e iones pesados.

Estas dos naves espaciales están dando dos puntos de vista del sol en lugar de uno. Eso es realmente importante, porque las estructuras que observamos en el sol, ubicadas en el viento solar, son en realidad objetos

tridimensionales. Para comprender realmente lo que estamos viendo, tenemos que mirarlos desde más de un punto de vista. Los objetivos principales de la misión STEREO son [36]:

1) Descubrir la anatomía de una CME:

Podemos ver desde la distancia la gran escala de estas tormentas filtrándose a través del sistema solar, pero además, gracias a esta misión podemos detectar en varios lugares a lo largo del sistema solar la perturbación real a medida que pasa.

Mediante la sonda, podemos tomar muestras del viento solar, ver cómo es, tomar muestras de la CME, y al juntar todos esos datos de detección remota, se obtiene una imagen realmente buena y compleja de las eyecciones de masa coronal, que realmente no se puede obtener de una sola nave espacial.

2) Mapeo de todo el sol:

STEREO nos permitió ver el sol desde diferentes ángulos de forma simultánea por primera vez. Al observar el sol, se aprecian regiones brillantes, regiones activas, ahí es donde están sucediendo las erupciones solares y las eyecciones de masa coronal

Esta misión al estar “rodeando” constantemente al sol, nos permite ver distintos ángulos simultáneamente a lo largo del tiempo. Este mecanismo nos permite mapear el sol y ver la actividad real de zonas en las que, de otra manera, solo podríamos tener indicios de que algo está sucediendo, pero realmente no se podría observar sin STEREO.

3) Ver tormentas en el otro lado del sol:

Sin poder observar esta parte del sol, se podría haber sabido que algo había sucedido, pero no se habría entendido su magnitud, en el caso en que sólo se

disponga de los datos desde el punto de vista de la Tierra. En la Figura 4. 11 se muestra la captura de uno de los descubrimientos de los que formó parte esta misión, donde se observan pequeños puntos brillantes por toda la imagen, esos puntos representan las llamadas partículas energéticas solares SEP, partículas aceleradas casi a la velocidad de la luz, de las que se ha hablado a lo largo de esta memoria. Como se vio, están relacionadas con eyecciones de masa coronal y con otro tipo de actividad solar: las ráfagas de viento solar rápido. La razón por la que se tuvo constancia de estas características del viento solar, fue principalmente por enviar una nave espacial de investigación en el lado opuesto del sol al que ve la Tierra. Al poner todos estos puntos de vista diferentes sobre el sol y el clima espacial, se ha podido comprender nuestra estrella mucho mejor.

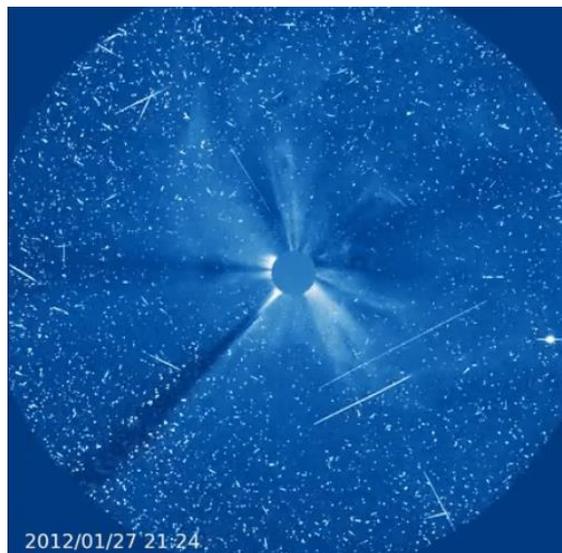


Figura 4. 11: Ejemplo de las partículas SEP, uno de los descubrimientos en el que participó la misión STEREO. (https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/10/New_view_of_2012_solar_activity_gif).

El 1 de octubre de 2014, las operaciones de la misión de la NASA perdieron la comunicación con una de las naves espaciales, STEREO-B. Actualmente se está invirtiendo mucho esfuerzo en su recuperación, ya que, aunque STEREO-A sigue siendo funcional y de utilidad, el sistema pierde su característica diferencial [37].

Como anotación final, muchas de las misiones mencionadas son también utilizadas por las entidades europeas, pero nos hemos centrado en la función estadounidense para este apartado en concreto.

4.2. Estrategia de mitigación de los efectos en el diseño del propio satélite.

Los satélites inevitablemente trabajan en un entorno de hostilidad extrema, lo que es una condición inherente al espacio. Las condiciones prácticamente de vacío, las bajas y altas temperaturas a soportar y las grandes dosis de radiación a las que son expuestos estos dispositivos en condiciones espaciales normales los convierten en instrumentos que deben someterse a muchas condiciones de robustez y garantías de seguridad para que cumplan con una vida útil, de manera que inversión puesta en ellos pueda ser recuperada en forma de beneficio económico, o conocimiento científico.

Los requisitos que debe cumplir un sistema espacial, como podría ser un satélite, se recogen con gran detalle y rigurosidad en la norma europea para equipos espaciales y electrónicos “ECSS-E-ST-20C” y los sistemas de energía eléctrica para naves espaciales no tripuladas “AIAA-S-122-2007” [38].

Los requisitos y pruebas de calidad y validación previas al lanzamiento dependen de la construcción, diseño y carga útil del satélite, y se focalizan en la revisión y cumplimiento de la normativa que ampare la región en la que se produzca el lanzamiento. Generalmente, los focos de revisión para un satélite son: los paneles solares, las antenas, las baterías, las conexiones eléctricas-electrónicas, mediciones de centro de gravedad y masa, la transmisión de información desde el satélite a la estación terrestre, y las celdas de combustible [38].

Los dispositivos son sometidos en laboratorios de testeo a las vibraciones del lanzamiento, radiación ionizante, haces de partículas energéticas y simulaciones del entorno espacial cotidiano.

Por lo general, las pruebas de validación para el cumplimiento de la normativa no suelen simular escenarios como el del evento Carrington, o la tormenta de

Halloween de 2003, más bien se estima la radiación a la que serán expuestos en condiciones habituales con ciertos márgenes, y se estima, entre otras cosas, el espesor del aluminio de revestimiento. Por ejemplo, para órbitas LEO con 7 años de vida útil, la dosis de ionización total esperada (TID) es de alrededor de 25 krad¹² para 2 mm de espesor de aluminio, donde el ciclo de activación solar no afecta demasiado el valor TID. Para órbitas GEO con 15 años de vida útil, la dosis de ionización total esperada (TID) en el peor de los casos es de alrededor de 45 krad para un grosor de aluminio de 5 mm, donde el ciclo de activación solar puede afectar gravemente el valor TID [38].

En previos estudios tratados en esta memoria, que tienen en cuenta el flujo de partículas relativistas de alta energía (>2MeV), se estima que el revestimiento de aluminio debería ser, al menos, de 2.5mm mayor al usado de forma habitual, esa es una de las primeras soluciones que cabe aplicar: aumentar el apantallamiento y el revestimiento de aluminio en grosor, junto con la utilización de tecnologías lógicas-computacionales más robustas [39].

Aunque se están observando mejoras desde el punto de vista de los efectos descritos en los satélites modernos de última generación, existe un debate en la industria comercial de servicios satelitales, que se mueve entre asumir los costes de una fabricación mucho más cara para hacer frente a este tipo de eventos, o hacer satélites algo menos robustos, pero con un proceso de fabricación y lanzamiento más económico, que, mediante la estrategia de monitorización del clima espacial previamente mencionada, permita prescindir de unos medios de resistencia al evento, sólo necesario entonces para los satélites de monitorización e investigación científica [23].

Para la mitigación de las consecuencias sobre la tecnología, Daniel N. Baker augura que las empresas harán uso de innovaciones tecnológicas sobre la electrónica de los dispositivos que los haga sobreponerse a las tormentas solares, endureciendo el diseño. Comenta que el mercado cuenta con algunas tecnologías potenciales en

¹² Rad: unidad de dosis de radiación absorbida. 1 rad = 0.01 J / kg. No confundir con radian, el cual tiene la misma abreviación.

desarrollo, aunque muchas de ellas están en las primeras etapas incluso actualmente, por lo que no hay mucha información pública [23].

De todas formas, existen avances y propuestas para mitigar la vulnerabilidad de los satélites frente a eventos climáticos realmente adversos no sólo en el diseño físico y material del satélite, sino también en el diseño de modulación y transmisión del sistema de transmisión.

Una de las soluciones que ofreció Daniel N. Baker en su libro "*Severe space weather events – understanding societal and economic impacts: a workshop report*" [23], y que de hecho se ha llevado a cabo con el tiempo, es la implementación de códigos en las señales GPS, como el implementado en la señal L5, el cual se mencionará a continuación.

Para el caso americano, la tecnología GPS cuenta con señales de distintas características según el destinatario y la modernidad de los satélites que las transmiten, es un tema muy amplio del que se va a mencionar su utilidad para afrontar el problema climático espacial, y las características generales de la comunicación digital que se emplea.

La señal L5, es una señal que proporciona robustez a las comunicaciones por satélite, y está orientada a evitar interferencias. Se encuentra en una banda protegida a nivel global, y es una señal en la que se introduce redundancia y con la que cuentan varios satélites geosíncronos, es una potente herramienta para evitar los problemas derivados del cambio de densidad ionosférico. L5 cuenta con la transmisión de dos códigos de ruido pseudoaleatorio modulados: código I5 y Q5. El código I5 es una señal modulada en cuadratura por desplazamiento de fase, *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK), y el código Q5 es una señal modulada en amplitud, también en *cuadratura Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), tienen una longitud promedio de palabra de 10.230 bits, y se transmiten a 10.23 MHz [23].

La señal L1 es la más antigua de GPS, es de uso civil y utiliza una modulación de ensanchamiento espectral, con utilización de códigos: *Code Division Modulation*

(CDM).

Ambas señales L5 y L1 en conjunto, permiten a los receptores GPS corregir errores inducidos por la variación de densidad ionosférica.

La tecnología en proceso va por esta línea para el problema ionosférico en concreto, y qué tan exitoso pueda llegar a ser este procesado de la señal es aún desconocido [23]. Por lo tanto, podemos concluir, que queda mucho trabajo por hacer para estar seguros frente al clima espacial severo, y que es una industria en desarrollo que, sin duda, producirá resultados aplicables a otros ámbitos del conocimiento.

Capítulo 5

Conclusiones

A lo largo de esta memoria, se ha detallado un problema vigente en la tecnología actual, y se ha profundizado en los procesos físicos que provocan las anomalías en el funcionamiento tecnológico, así como en las soluciones que se están llevando a cabo en la tecnología satelital. Se ha tratado de recopilar toda la información sobre el tema expuesto, a forma de advertencia, y se ha construido un marco general y de unión de la problemática que supone el clima espacial, ya que el clima espacial es una cuestión de la que no se trata, y que a menudo es desconocido. Además, el clima espacial está muy dividido entre la investigación científica espacial, y la tecnología comercial, a lo largo de esta memoria se ha tratado de acercar ambas posiciones y exponer las propuestas más destacables en el sector.

Los servicios que brindan los satélites nos ofrecen cantidad de facilidades en el día a día. Actualmente, el constante contacto con los *smartphones* ha provocado que estos sean nuestros sistemas de radionavegación particulares, y que podamos estar ubicados casi en cualquier sitio, y en cualquier medio de transporte. Cada vez que alguien utiliza servicios GNSS, consume TV por satélite, internet, o telefonía global, está haciendo uso de la enorme flota de más de 2000 satélites activos que nos facilitan la forma de vivir, y que se va a ver multiplicada en el futuro inmediato.

Poner dispositivos de alto rendimiento computacional que den servicio de forma global en órbita hubiese sido impensable hace unos años, y si analizas profundamente la invención, parece tecnología futurista incluso en la actualidad.

Esta tecnología, tan preciada y útil, producto de la guerra fría, corre peligro, y durante este trabajo se ha analizado de qué maneras en concreto.

Conocemos la amenaza, su probabilidad, y vamos camino de conocer cada vez mejor los procesos por los que se da. En esta memoria se ha dejado registro de los proyectos que se están llevando a cabo para proteger una tecnología que va a experimentar un crecimiento enorme en las próximas décadas, sobre todo en el servicio de internet de banda ancha.

Sólo si realmente iniciamos proyectos para consolidar las herramientas de protección necesario en los próximos años, seremos capaces de tener un futuro prometedor, con todos los servicios actuales, y los que están por venir.

Desde aquí, animamos a las instituciones tecnológicas a que sigan por el camino de la prevención, e inviertan en una investigación, que no sólo podría salvar parte de la tecnología de la que disponemos, sino también toparse con hallazgos que tengan múltiples aplicaciones en el futuro espacial que está por venir, e incluso en la salud de aquellos que en un futuro acaben en misiones espaciales, que estimamos que serán cada vez mayor en número.

Ya hemos visto que dicha inversión está enfocada en revestimiento en la fabricación de los dispositivos, y la caracterización de la climatología, con una monitorización precisa de eventos extremos, se podrán tomar decisiones que realmente sean compensatorias en la relación coste-beneficio, y se podrá proteger con más precisión y contundencia los sistemas críticos.

Además, es un campo del conocimiento en el que ingeniería y ciencia tiene que trabajar mano a mano, para ello, será necesario derribar las barreras culturales y sistémicas que impiden que los ingenieros y científicos trabajen juntos, para establecer prioridades y desarrollar soluciones.

Y, por último, debe ser un tema de consenso global, el entorno espacial es parte de las propiedades de nuestro planeta, cuidar nuestro espacio orbital es primordial y deberían emprenderse acciones de forma consensuada con la proposición de metas a cumplir como en el caso del acuerdo de París, respecto al cambio climático.

Bibliografía

[1] J. Geiss, G. Gloeckler, R. Von Steiger, "Origin of the solar wind from composition data". *Space Science Reviews*. 72 (1-2): 60, doi: 10.1007/BF00768753. ISSN 0038-6308, 1995.

[2] R. B. Horne, M. W. Phillips, S. A. Glauert, N. P. Meredith, A. D. P. Hands, K. Ryden, & W. Li, "Realistic Worst Case for Severe Space Weather Event Driven by a Fast Solar Wind Stream," *Space Weather*, pp. 1202-1215, 2018.

[3] R. B. Horne, S. A. Glauert, N. P. Meredith, D. Boscher, V. Maget, D. Heynderickx, & D. Pitchford, "Space weather impacts on satellites and forecasting the Earth's electron radiation belts with SPACECAST," *Space Weather*, vol. 11, pp. 169-186, 2013.

[4] Página web: https://www.nasa.gov/mission_pages/explorer/explorer-overview.html -Última visita: 29/07/2021

[5] M. Blanc, R. Kallenbach, N.V. Erkaev, "Solar System Magnetospheres," *Space Science Reviews*. 116 (1-2): 227-300, doi: 10.1007/s11214-005-1958-y, 2005.

[6] Página web: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml#What are the magnetic elements> - Última visita: 30/07/2021

[7] Página web: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif> - Última visita: 10/08/2021

[8] Página web: <https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle> - Última visita: 10/08/2021

[9] V. S. Titov, G. Hornig, "Theory of magnetic connectivity in the solar corona," *Journal of Geophysical research*, vol. 107, NO. A8, 1164, doi: 10.1029 / 2001ja000278, 2002.

[10] P. K. Manoharan, "Evolution of coronal mass ejections in the inner heliosphere: a study using white-light and scintillation images," *Solar Physics* 235: 345-368, doi: 10.1007/s11207-006-0100-y, 2006.

[11] E. W. Cliver & W. F. Dietrich, "The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity," *J. Space Weather Space Clim*, vol. 3, A31, pp. 1-14, doi: 10.1051/swsc/2013053, 2013.

[12] Página web:

<https://www.spaceweatherlive.com/es/ayuda/que-son-las-erupciones-solares.html> - Última visita 10/08/2021 – Última visita: 12/08/2021

[13] J. L. Green, S. Boardsen, S. Odenwald, J. Humble, K. A. Pazamickas, "Eyewitness reports of the great auroral storm of 1859," *ScienceDirect*. doi: 10.1016/j.asr.2005.12.021, 2006.

[14] Enlace a descarga de artículo:

<https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uva.x001679510&view=1up&seq=9> -
Última visita: 13/08/2021

[15] Página web:

<https://www.aer.com/science-research/space/space-weather/space-weather-index/> - Última visita: 10/08/2021

[16] Página web:

https://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/halloween_storms.html -
Última visita: 10/08/2021

[17] P. M. Kitnert Jr, "A Beginner's Guide to Space Weather and GPS", *Lectnre notes, Updated February*, vol. 21, 2008.

[18] I. Gulati, S. Dlay, R. Tiwari, M. Johnston, "Impact of Solar Flares on HF Radio Communication at High Latitude", *International Conference on Automation, Computational and Technology Management (ICACTM) Amity University, IEEE*, 2019.

[19] J.A.Sabato, "Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización," vol 1, pp 128-156, 2003.

[20] M. Xapsos, "Modeling the Space Radiation Environment," *IEEE NSREC Short Course Session I*, 2006.

[21] D. Binder, E. C. Smith, A. B. Holman, "Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays". *IEEE Transactions on Nuclear Science*. Vol.NS-22, No. 6 (6): 2675–2680. doi: 10.1109/TNS.1975.4328188, 1975.

[22] D. M. Oliveira, E. Zesta, H. Hayakawa, A. Bhaskar, "Estimating Satellite Orbital Drag During Historical Magnetic Superstorms," *Space Weather*, doi: 10.1029/2020SW002472, 2020.

[23] Baker D, Balstad R, Bodeau JM, Cameron E, Fennell J. "Severe space weather events – understanding societal and economic impacts: a workshop report." *Washington, D.C.: National Academies Press; 2008*

[24] Página web:

<https://cutt.ly/FET34KB>

Última visita: 10/09/2021

[25] Página web:

<https://esc->

[sso.dlr.de/Ionospheric Perturbations/Local Scintillation Measurements/msnz02/](https://esc-sso.dlr.de/Ionospheric_Perturbations/Local_Scintillation_Measurements/msnz02/)

Última visita: 01/09/2021

[26] D. R. Jackson, S. Bruinsma, S. Negrin, C. Stolle, C. J. Budd, et al, "The Space Weather Atmosphere Models and Indices (SWAMI) project: Overview and first results," *Journal of space weather and space climate*. vol. 10, pp. 2-21. 2020.

[27] Bruinsma S. "The DTM-2013 thermosphere model." *J. Space Weather Space Clim.*, 5, A1, doi: 10.1051/swsc/2015001, 2015.

[28] Página web:

<https://www.eumetsat.int/>

Última visita: 01/09/2021

[29] Dirección General de Protección Civil y Emergencias, "Red Radio de Emergencia – REMER" 2010.

[30] G. Fisher, "Lessons from aviation: Linking space weather science to decision making," *Space Weather Quarterly*, volume 6, issue 1. American Geophysical Union 2009

[31] Página web:

<https://www.swpc.noaa.gov/communities/space-weather-enthusiasts>

Última visita: 10/09/2021

[32] "The NOAA Real Time Solar Wind (RTSW) System using ACE data," *Space Science Reviews* 86: 633–648, doi: 10.1023/A:1005044300738, 1998.

[33] Página web:

<https://www.nasa.gov/image-feature/3000th-comet-spotted-by-solar-and-heliospheric-observatory-soho> - Última visita: 10/09/2021

[34] Página web:

<https://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>

Última visita: 10/09/2021

[35] NASA "STEREO - Solar TERrestrial RELations Observatory" NP-2005-8-712-GSFC. Retrieved August 22, 2016.

[36] Página web:

https://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/mission/index.html

Última visita: 08/09/2021

[37] Página web:

<https://www.businessinsider.com/stereo-b-spacecraft-rescue-mission-2016-8>

Última visita: 08/09/2021

[38] European Space Agency for the members of ECSS "ESA Requirements and Standards Division ESTEC," P.O. Box 299,2200, AG Noordwijk The Netherlands,2019

[39] M. Harmandali, F. E. Karagöz, H. Özkaya, I. Baylakoglu, E. Akkus, "Application of Reliability Engineering Methodology in Next Generation Satellite Power System Design, Manufacturing, and Testing," *Tübitak, Space Technologies Research Institute (Uzay)*, Ankara, Turkey, 2013.

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



Universidad
de Alcalá