

Estudio de las

TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

*y evaluación de su impacto
en el ámbito de las tecnologías
e infraestructuras en España
y Portugal*

Por **MIGUEL HERRAIZ SARACHAGA**. Doctor en Ciencias Físicas. Catedrático de Física de la Tierra en el Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I, Universidad Complutense. **GRACIA RODRÍGUEZ CADEROT**. Doctora en Ciencias Físicas, Profesora Titular en el Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I, Sección Departamental de Astronomía y Geodesia en la Facultad de Matemáticas, Universidad Complutense. **MARTA RODRÍGUEZ BOUZA**. Licenciada en Ciencias Físicas, Máster en Geofísica y Meteorología. Estudiante de Doctorado. **IZARRA RODRÍGUEZ BILBAO**. Licenciada en Ciencias Físicas, Máster en Geofísica y Meteorología. Estudiante de Doctorado. **FRANCISCO SÁNCHEZ DULCET**. Licenciado en Ciencias Físicas, Máster en Geofísica y Meteorología. Oficial del Ejército de Tierra y Diplomado en Geodesia. Colaborador Honorífico de la Universidad Complutense. **BEATRIZ MORENO MONGE**. Doctora en Ciencias Matemáticas. Investigadora TIC para el Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes (Ci3). **IRIA BLANCO CID**. Licenciada en Ciencias Físicas, Máster en Geofísica y Meteorología. Estudiante de Doctorado. **BENITO A. DE LA MORENA CARRETERO**. Doctor en Ciencias Físicas. Jefe de la Estación de Sondeos Atmosféricos del INTA en El Arenosillo, Huelva. **JOAQUÍN ESCAYO MENÉNDEZ**. Graduado en Física, Estudiante del Máster en Meteorología y Geofísica.



Este artículo describe el fenómeno de las tormentas geomagnéticas y sus efectos en los recursos tecnológicos y presenta pautas de actuación que pueden permitir a las empresas, instituciones oficiales y servicios públicos más vulnerables ante este fenómeno adoptar medidas de urgencia destinadas a evitar o reducir los daños. El problema es estudiado en su contexto más amplio: la Meteorología Espacial (*Space Weather*). De esta manera se puede alcanzar una mejor comprensión de los diferentes fenómenos físicos relacionados con las tormentas y facilitar la explicación de este fenómeno a los agentes sociales y al público en general.

Las tormentas geomagnéticas, también llamadas «tormentas magnéticas», son perturbaciones del campo magnético de la Tierra, de alcance global, originadas por un incremento de la presión que el viento solar ejerce sobre él⁽¹⁾. Algunas tormentas geomagnéticas afectan intensamente a la ionosfera terrestre provocando «tormentas ionosféricas», fenómenos que, por su influencia sobre los sistemas globales de navegación y posicionamiento por satélite (GNSS), reciben particular atención en este artículo. Como se explicará enseguida, las tormentas geomagnéticas tienen su origen en procesos energéticos violentos que ocurren en el Sol y reciben el nombre genérico de «tormentas solares». Hablaremos, por tanto, de tres tipos diferentes de tormentas: solares, geomagnéticas e ionosféricas. Los tres están estrechamente relacionados entre sí, pero conviene diferenciarlos adecuadamente.

La mayor parte de las tormentas geomagnéticas son de pequeña magnitud y

Latinstock

no causan grandes daños. En el hemisferio norte se manifiestan mediante auroras boreales visibles en zonas de muy alta latitud, como Islandia, Groenlandia o norte de Noruega, Suecia y Finlandia. En el hemisferio sur se produce un fenómeno similar que constituye las «auroras australes». Sin embargo, también se producen frecuentes tormentas intensas, como las que analizamos en este artículo, que, además de las auroras, pueden producir grandes daños. La agencia estadounidense NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) estima que en un ciclo solar de 11 años puede haber cuatro tormentas geomagnéticas «extremas», 100 «severas» y 200 «fuertes», lo que indica que se trata de un fenómeno natural frecuente.

La primera señal de la importancia de las tormentas geomagnéticas muy intensas se produjo los días 1 y 2 de septiembre de 1859, cuando tuvo lugar una gigantesca erupción solar que originó la tormenta geomagnética más importante registrada hasta nuestros días. Este suceso se conoce como «evento de Ca-



El «apagón de Quebec» de marzo de 1989 dejó a 5 millones de personas sin electricidad durante 9 horas y causó daños en transformadores por valor de 12 millones de dólares

rrington» en honor del astrónomo inglés que observó la fulguración solar y la relacionó con la tormenta magnética registrada en la Tierra^{[2][3]}. La tormenta produjo auroras que fueron claramente visibles en la península Ibérica e, incluso, en latitudes próximas a 20°^[4]. Además, dañó los sistemas de telegrafía de la época, produciendo, en muchos casos, el incendio de los equipos^[5]. Fue la primera vez que un fenómeno de este tipo afectaba a un recurso tecnológico, y

este hecho se considera hoy como una llamada de atención sobre la influencia que una tormenta de esas características puede tener en nuestra sociedad, totalmente dependiente de la tecnología.

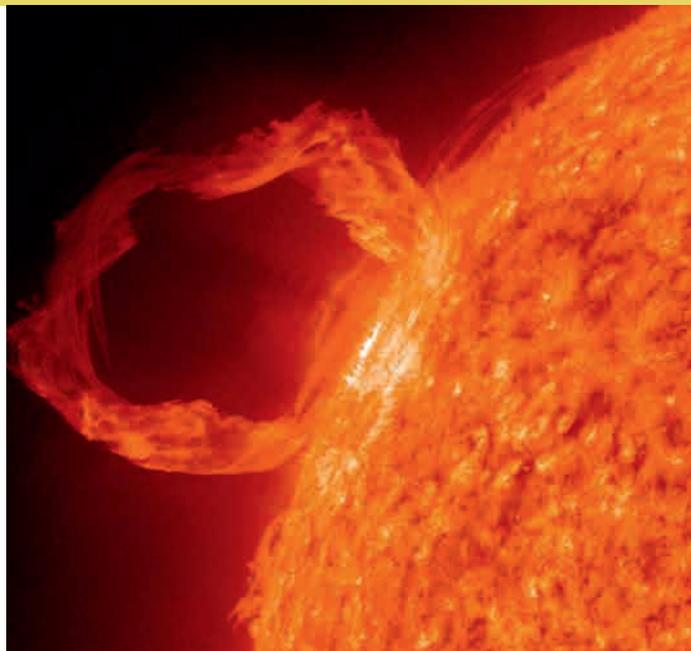
La importancia de los efectos de una gran tormenta geomagnética puede entreverse recordando que los recursos más directamente perjudicados serían los satélites, las redes distribuidoras de electricidad, los sistemas de conducción de gas y petróleo, y el transporte por avión y ferrocarril. Los efectos sobre los satélites pueden originar una cadena de consecuencias sobre los sistemas de posicionamiento, navegación y comunicaciones, produciendo el colapso de recursos tan diferentes como el tráfico aéreo y marítimo, los sistemas de seguridad y vigilancia y las operaciones bancarias. A su vez, los campos eléctricos que se generan por las variaciones de campo magnético durante una tormenta geomagnética son capaces de inducir corrientes eléctricas en los sistemas conductores (cables eléctricos, conducciones metálicas, terrenos, etc.). Estas corrientes, llamadas genéricamente GICs (*Geomagnetically Induced Currents*), son muy peligrosas para las conducciones metálicas subterráneas, como tuberías de petróleo o gasoductos, y para los sistemas eléctricos. El deterioro de los sis-



Las tormentas geomagnéticas se manifiestan en el hemisferio norte mediante auroras boreales en zonas de muy alta latitud; en el hemisferio sur, a través de auroras australes.

Meteorología Espacial, una nueva disciplina

Las tormentas geomagnéticas son una manifestación de la Meteorología Espacial (*Space Weather*), un nuevo campo de estudio iniciado en la década de los 90 del siglo pasado que estudia las condiciones del Sol y el viento solar, la magnetosfera, la ionosfera y la termosfera, que pueden influir en el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas tecnológicos, tanto espaciales como terrestres, y que, incluso, pueden poner en peligro la salud humana. A grandes rasgos, los estudios que comprende la meteorología espacial abarcan tres ámbitos: el Sol y su atmósfera (como origen de la energía), el espacio interplanetario (como medio de propagación) y la magnetosfera, la ionosfera y la superficie terrestre (como regiones afectadas). La adquisición de un mejor conocimiento de la meteorología espacial y el diseño de sistemas de alerta temprana son puntos clave para mitigar los riesgos asociados a las tormentas geomagnéticas.



temas de distribución eléctrica de alta tensión, particularmente en los grandes transformadores, puede producir extensos y largos apagones, con el consiguiente perjuicio para millones de habitantes en las zonas afectadas al dañar servicios básicos (regulación del tráfico, sistemas de transporte, depuración de aguas) e instalaciones críticas: hospitales, parques de bomberos, centrales nucleares. El «apagón de Quebec» originado por la tormenta magnética de marzo de 1989 es una buena prueba de que estos riesgos existen. Este apagón dejó a 5 millones de personas sin electricidad durante nueve horas, causó daños en transformadores en Estados Unidos y Canadá por valor de 12 millones de dólares y obligó a dar de baja y reparar dos equipos de estas características en el Reino Unido. Además, afectó seriamente a numerosos satélites. Se calcula que hubo unos 1.600 sobre los que se perdió temporalmente el control de la órbita^[6].

La probabilidad de que ocurra una tormenta semejante al «evento de Carrington»

es un tema de intenso debate. Recientemente, Riley^[7] ha estimado en un 12% la probabilidad de que un evento de esta categoría suceda en los próximos 10 años, pero este valor parece exagerado para muchos científicos. En 2013, Kataoka^[8] rebajó esta probabilidad al 4-6%, estimación que todavía sigue siendo elevada. La realización de valoraciones fiables resulta muy difícil debido al conocimiento incompleto de algunos de los procesos físicos implicados y a la ausencia de series de datos suficientemente extensas y fiables, pero todos los estudios subrayan la realidad de este peligro natural.

Si una tormenta magnética de la misma magnitud que la de Carrington sucediera hoy, las consecuencias serían inimaginables, ya que la dependencia de la tecnología ha aumentado exponencialmente desde 1859. Las estimaciones predicen para Estados Unidos grandes efectos en cascada, de varios años de duración y con una pérdida de miles de millones de dólares. Por ejemplo, Odenwald y Green (2007) han estimado en 30.000 millo-

nes de dólares las pérdidas que una tormenta similar a la de Carrington podría producir actualmente en los satélites situados en órbita geostacionaria^[9]. El impacto puede ser tan grande que diversos países intensamente industrializados como Estados Unidos y el Reino Unido han incluido esta amenaza en la lista de riesgos naturales y han adoptado iniciativas sobre el tema. Podemos citar, entre otros casos, las recomendaciones publicadas por instituciones como el FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) y la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) en EE.UU., y el *National Risk Register (NRR) of Civil Emergencies* en el Reino Unido. Esta inquietud también se ha hecho presente en Organismos Internacionales como la OCDE (Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo), que en 2011 publicó el informe *Geomagnetic Storms*.

En España, la respuesta social ante este problema es todavía muy limitada, aunque la Dirección General de Protección Civil ha organizado en 2011, 2012 y

2013 jornadas técnicas dedicadas a presentar el problema a las instituciones y empresas que pueden verse más intensamente afectadas. Por su carácter práctico y su oportunidad, cabe destacar una iniciativa de la Junta de Extremadura, que en marzo de 2011 editó un *Decálogo de buenas prácticas. Tormenta solar severa, cómo prevenir*. En el ámbito legislativo, a propuesta del Grupo Socialista e impulsada por iniciativas ciudadanas, el Congreso de los Diputados aprobó el 27 de marzo de 2012 una Proposición No de Ley sobre este tema. En el campo científico, las tormentas magnéticas están siendo estudiadas desde distintos enfoques en varias universidades (sobre todo Complutense de Madrid, de Alcalá de Henares y Politécnica de Cataluña) y en organismos como el Observatorio del Ebro, el Instituto Geográfico Nacional y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

El marco del problema

Aunque parezca un poco contradictorio, la historia de una tormenta geomagnética se inicia en el Sol. Su acción sobre la Tierra se realiza a través de su campo gravitatorio, la radiación electromagnética (de la que la luz visible y el calor son las expresiones más palpables) y la emisión continua de materia de su corona, que constituye el «viento solar». Este viento es un flujo de plasma compuesto por protones, electrones y partículas alfa, extraordinariamente tenue (10 partículas/cm³ en las cercanías de la Tierra), que, en condiciones normales, se mueve a una velocidad de unos 400 km/s y arrastra consigo el campo magnético del Sol. Las características de la radiación electromagnética y el



viento solar emitidos por el Sol dependen estrechamente de su nivel de actividad, que tiene una componente cíclica y otra esporádica. La primera se caracteriza por seguir un periodo aproximado de 11 años que se denomina ciclo solar. El incremento de actividad se expresa por un aumento del número de manchas en su fotosfera y por la presencia de un mayor número de los fenómenos violentos que constituyen la actividad esporádica. Por ello, esta segunda componente, aunque imprevisible, tiene también un cierto carácter periódico y tiende a aumentar en las fases en las que el ciclo periódico de actividad se encuentra en su máximo.

Las manchas solares reciben este nombre porque son zonas de la superficie visible del Sol, la fotosfera, que aparecen oscuras, ya que su temperatura, unos 4.500 K, es inferior a la del entorno, próxima a 6.000 K. El número de manchas solares se mide con el «número de Wolf»,

un indicador muy utilizado para evaluar la actividad solar y del que la serie de mediciones fiables se extiende hasta 1848. El campo magnético cerca de las manchas solares adquiere grandes valores y constituye una fuente de energía que se manifiesta violentamente en forma de gigantescas erupciones conocidas como fulguraciones solares. Esto hace que las zonas con manchas se consideren «regiones activas» del Sol. Las fulguraciones, junto con las eyecciones de masa coronal (CME, *Coronal Mass Ejection*) que se relacionan es-

trechamente con ellas, y los agujeros coronales –regiones oscuras en las que el campo magnético presenta zonas abiertas–, arrojan cantidades inmensas de masa de la corona del Sol al medio interplanetario, modificando la velocidad y densidad del viento solar.

Por su parte, las fulguraciones solares se catalogan en función del flujo de potencia de rayos X liberado, que se mide en W/m². Se consideran cinco grupos principales, que se nombran con las letras A, B, C, M y X, y dentro de cada uno de ellos existen nueve grados en los que cada uno indica doble flujo que el anterior. Las clases M y X indican fenómenos que pueden provocar efectos relevantes en el espacio próximo a la Tierra. Por ejemplo, las tres fulguraciones solares más importantes de los días 13 y 14 de mayo de 2013 fueron generadas por la misma región activa (núcleo de manchas solares AR 11748) y alcanzaron unos valores de X1.7, X2.8 y X3.2.

Los fenómenos violentos en el Sol llegan a la Tierra en forma de radiación electromagnética unos ocho minutos después de producirse, y en forma de partículas y perturbaciones del campo magnético interplanetario entre varias horas y unos pocos días más tarde

Los ciclos de actividad solar se numeran sucesivamente por iniciativa de Wolf (1816-1893), quien asignó el número 1 al periodo 1755-1766. En este artículo prestamos atención al Ciclo 23, que se extendió desde, aproximadamente, mayo de 1996 hasta diciembre de 2007, y al Ciclo 24 en el que nos encontramos actualmente.

Los fenómenos violentos en el Sol llegan a la Tierra en forma de radiación electromagnética unos ocho minutos después de producirse el suceso y en forma de partículas y perturbaciones del campo magnético interplanetario arrastrados por el viento solar entre varias horas y unos pocos días después. Esto quiere decir que los fenómenos en el Sol han tenido lugar ocho minutos antes de su observación desde la Tierra, pero queda un periodo de varias horas hasta que las perturbaciones generadas por estos fenómenos solares afecten a la Tierra y puedan producir una tormenta geomagnética. Por tanto, existe la posibilidad de predecir la aparición de una tor-

menta geomagnética y de adoptar medidas preventivas ante ella.

La emisión del viento solar es continua y su interacción con el campo magnético de la Tierra da lugar a la formación de una superficie de equilibrio, la «magnetopausa», que protege la cavidad conocida como «magnetosfera» (fig 1). Esta región del espacio en la que el campo magnético de la Tierra ejerce influencias, de alguna manera, nuestro hogar en el sistema planetario. La magnetosfera nos protege de la acción del viento solar y de los rayos cósmicos y permite la existencia de la vida.

Formación y medida de las tormentas geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas se originan por el incremento en la densidad de plasma y en la velocidad del viento solar producido por una fulguración solar o una eyección de masa coronal orienta-

da hacia la Tierra. Estos incrementos se traducen en un aumento de la presión del viento solar sobre la magnetopausa y en la deformación de la magnetosfera^[11]. En el lado diurno la magnetopausa se acerca a nuestro planeta en la dirección Tierra-Sol, pasando de estar situada a unos 11 radios terrestres a sólo 4-5. Al mismo tiempo, la región correspondiente a la semiesfera nocturna se estrecha de manera muy compleja, de formas similar a lo que sucede a un tubo de pasta de dientes si se le comprime por su mitad. Ello provoca que se intensifique la acción del campo magnético de la Tierra para incrementar su presión sobre el viento solar y alcanzar una nueva situación de equilibrio. Todos estos fenómenos dan lugar a la tormenta geomagnética, que afecta, en mayor o menor medida, a todo el planeta. Según sea la velocidad del viento solar perturbado, su aparición tiene lugar entre uno y cuatro días después de que se haya producido el suceso violento en el Sol.

Es muy importante subrayar que no todas las eyecciones de masa coronal producen tormentas geomagnéticas en la Tierra. Para que esto suceda deben cumplirse, en general, tres condiciones: (1) que la tormenta solar sea suficientemente energética, alcanzando la clase X o valores elevados de la clase M; (2) que la eyección de masa coronal esté dirigida hacia la Tierra, lo que requiere que la región activa donde se encuentran las manchas solares en las que se inicia el proceso esté situada en la cara visible y alejada de los limbos; y (3) que la componente Bz del campo magnético interplanetario arrastrado por el viento solar sea negativa, de forma que se puedan unir las líneas de este campo con las de la Tierra (fenómeno de reconexión). Recientemente se ha puesto de relieve que las fluctuaciones del campo magnético interplanetario antes de su encuentro con la magnetopausa juegan

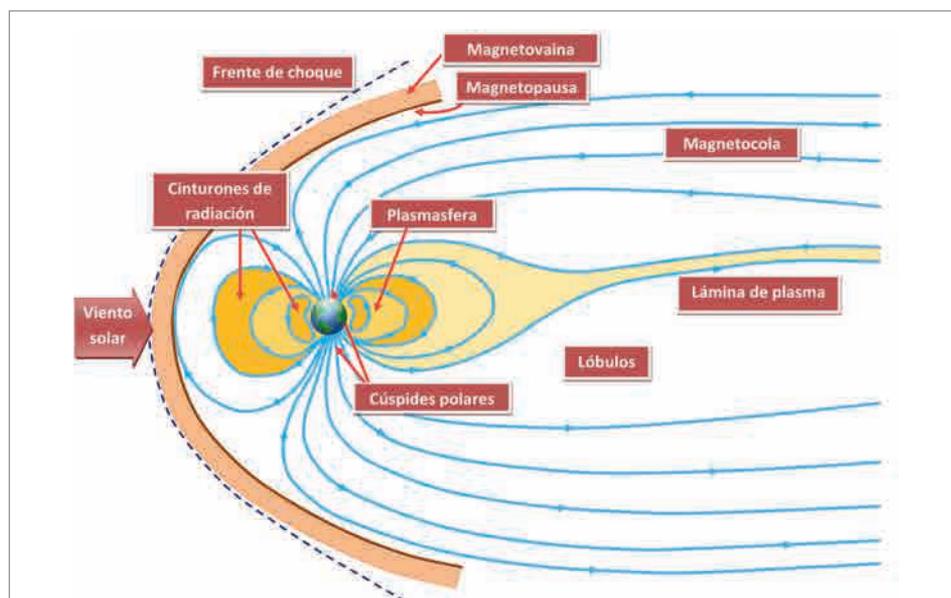


Figura 1. Estructura de la magnetosfera en equilibrio con el viento solar^[8]. En condiciones normales, la magnetopausa se sitúa a 11 radios terrestres en el sentido Tierra-Sol (a la izquierda de la imagen) y se extiende más de 80 radios terrestres en el sentido opuesto (adaptado de Cerrato *et al.*, 2012).

un papel importante, todavía no bien conocido, para que la perturbación del viento solar produzca una tormenta geomagnética.

Las condiciones señaladas explican que un incremento de actividad solar no vaya acompañado necesariamente por un incremento de tormentas geomagnéticas. Por ejemplo, las fulguraciones de los días 13-14 de mayo de 2013 citadas anteriormente no generaron tormentas geomagnéticas significativas, ya que ninguna de las eyecciones producidas estaba suficientemente orientada hacia la Tierra.

Una tormenta geomagnética se puede dividir en tres fases ^[12] (fig. 2):

- **Fase inicial.** Se caracteriza por un aumento en la densidad de líneas de campo debido al incremento de la presión del viento solar. Esto hace que el valor de la componente horizontal del campo magnético terrestre, H, aumente entre 30 y 50 nanoteslas (nT) su valor inicial antes de la tormenta. Esta variación puede durar una o dos horas, aunque en muchas tormentas no aparece.
- **Fase principal.** En ella tiene lugar una inyección de plasma energizado en el anillo de corriente ecuatorial que provoca su aumento. Ocurre de dos a diez horas después del comienzo de la tormenta y puede durar varias horas. Se caracteriza por una brusca disminución de H.
- **Fase de recuperación.** Es la etapa de regreso a la situación de equilibrio inicial. Puede durar días.

El tamaño de las tormentas geomagnéticas se mide mediante índices geomagnéticos, de los cuales los más utilizados son el índice Dst (*Disturbance Storm Time*) y los «índices trihorarios». El índice Dst es un índice de actividad magnética obtenido con una red de cuatro observatorios geomagnéticos situados cerca del ecuador magnético

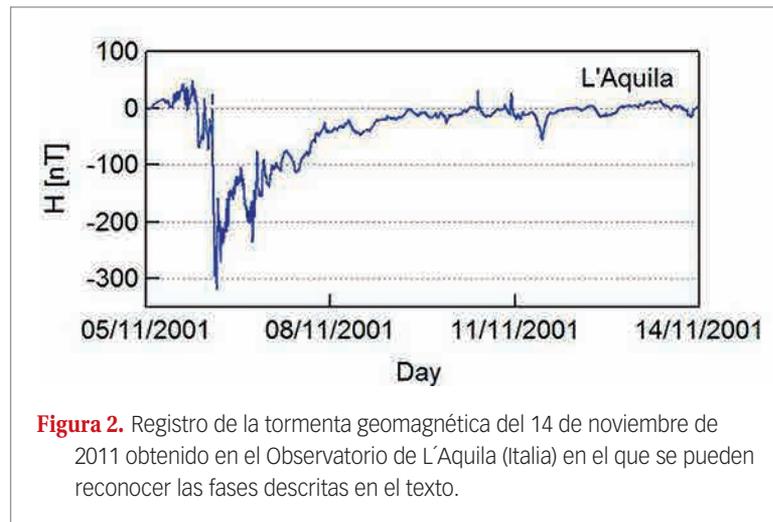


Figura 2. Registro de la tormenta geomagnética del 14 de noviembre de 2011 obtenido en el Observatorio de L'Aquila (Italia) en el que se pueden reconocer las fases descritas en el texto.

y distribuidos a lo largo del perímetro terrestre. Este índice da una medida de la variación del campo magnético debida al anillo de corriente ecuatorial y se calcula a partir de la media de los valores de la componente horizontal del campo magnético. El valor de Dst es estadísticamente cero en los días considerados tranquilos por los organismos internacionales. Durante una tormenta geomagnética su valor desciende en unas horas desde cero hasta su valor mínimo y comienza a recuperarse lentamente hasta alcanzar el valor inicial próximo a cero. Utilizando este índice las tormentas se pueden clasificar en las categorías señaladas en la tabla 1. La tabla 2 enumera las tormentas geomagnéticas ocurridas en el Ciclo 24 hasta diciembre de 2013, con su correspondiente valor de Dst. Para valorar mejor su tamaño se puede tener en cuenta que al «evento de Carrington» y a la tormenta de Quebec se les han atribuido valores de Dst iguales a -850 nT ^[13] y -640 nT ^[14], respectivamente.

Los índices trihorarios son indicadores del nivel de actividad geomagnética que tienen una resolución de tres horas, por lo que proporcionan ocho valores diarios. El principal es el índice K, introducido por Bartels en 1938 y que permi-

Tabla 1. Clasificación de las tormentas magnéticas en función del valor del índice Dst.

Categoría	Valor Dst (nT)
Débiles	$-30 \geq Dst > -50$
Moderadas	$-50 \geq Dst > -100$
Intensas	$-100 \geq Dst$

te evaluar de forma cuantitativa una perturbación magnética vinculada a la emisión corpuscular del Sol. La serie de datos se extendió después hasta 1932. Para calcular K se utilizan los magnetogramas, registros diarios del campo magnético obtenidos en los observatorios geomagnéticos. En el magnetograma se toman las componentes H y D (declinación) y se eliminan las variaciones magnéticas debidas al Sol en condiciones tranquilas y a la Luna. Después se divide el magnetograma en ocho intervalos de tres horas, se mide la amplitud de variación de H y D y el valor mayor proporciona el índice K. La escala de K varía de 0 a 9 y depende de la latitud, ya que la perturbación será mayor cuanto más cerca esté el observatorio de las zonas aurales.

El índice Kp es un indicador de alcance planetario derivado del parámetro K. Se obtiene como el valor medio de

Tabla 2. Tormentas ocurridas en el Ciclo 24 hasta diciembre de 2013

Nº.	Fecha	Dst	Nº.	Fecha	Dst	Nº.	Fecha	Dst
1	28/02/2008	-52	24	09/09	-69	47	18/01/2013	-57
2	09/03	-86	25	17/09	-70	48	26/01	-53
3	27/03	-56	26	26/09	-101	49	01/03	-52
4	04/09	-51	27	25/10	-132	50	17/03	-132
5	11/10	-54	28	25/01/2012	-75	51	21/03	-64
6	22/07/2009	-79	29	15/02	-62	52	29/03	-59
7	15/02/2010	-58	30	19/02	-54	53	24/04	-52
8	06/04	-81	31	07/03	-78	54	01/05	-76
9	12/04	-51	32	09/03	-129	55	19/05	-56
10	02/05	-66	33	12/03	-51	56	25/05	-55
11	29/05	-85	34	15/03	-80	57	01/06	-119
12	04/08	-67	35	28/03	-53	58	07/06	-71
13	05/05	-61	36	05/04	-56	59	29/06	-98
14	11/10	-80	37	24/04	-104	60	06/07	-79
15	28/12	-50	38	17/06	-86	61	14/07	-72
16	04/02/2011	-59	39	09/07	-69	62	27/08	-54
17	01/03	-81	40	15/07	-133	63	02/10	-67
18	11/03	-83	41	03/09	-78	64	09/10	-65
19	06/04	-65	42	01/10	-133	65	31/10	-52
20	12/04	-51	43	09/10	-111	66	07/11	-54
21	28/05	-91	44	13/10	-91	67	09/11	-81
22	05/07	-50	45	01/11	-74	68	08/12	-66
23	06/08	-107	46	14/11	-109			

los índices K normalizados de 13 observatorios situados entre los 44° y 60° de latitud, norte o sur. Este índice se relaciona estadísticamente con el estado energético de la magnetosfera y con el tamaño de las tormentas magnéticas dado por la NOAA, que se representa con la letra G y abarca cinco niveles (Tabla 3).

Algunas agencias internacionales inician los avisos de tormenta geomagnética cuando el índice Kp alcanza el valor 4.

Tabla 3. Clasificación de las tormentas geomagnéticas por la NOAA en función del valor del índice Kp.

Categoría	Valor de Kp	Escala NOAA
Extrema	9	G 5
Severa	8	G 4
Fuerte	7	G 3
Moderada	6	G 2
Menor	5	G 1

Metodología para el estudio de las tormentas geomagnéticas: aplicación al análisis de la tormenta del 24-25 de octubre de 2011 y su impacto en la península Ibérica

Con la finalidad de presentar con más claridad los diferentes procesos que dan lugar a una tormenta geomagnética, así como sus efectos sobre la Tierra y en particular sobre la península Ibérica, se realiza a continuación un seguimiento detallado de la tormenta que tuvo lugar los días 24-25 de octubre de 2011. Se ha elegido esta tormenta porque fue intensa (Dst = -132 nT), existen numerosos datos que facilitan su estudio y tuvo una notable influencia en el sistema de actualización EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), un recurso

tecnológico muy importante para mejorar el funcionamiento de los sistemas de navegación GPS (*Global Positioning Service*) y GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) en Europa y África. Algunos efectos importantes de esta tormenta en el entorno terrestre han sido estudiados por Blanch *et al*^[15].

La metodología que hemos utilizado estudia sucesivamente los fenómenos en el Sol, el camino del viento solar hacia la Tierra, su interacción con el campo magnético del planeta que origina la aparición de la tormenta geomagnética, la influencia que ésta ejerce sobre la ionosfera terrestre y el efecto sobre Egnos y la seguridad del tráfico aéreo.

Inicio del fenómeno en el Sol

El proceso se inició el 22 de octubre de 2011, cuando tuvo lugar una erupción solar de magnitud M1 que alcanzó su

máximo en torno a las 11:10 UT. Esta erupción provocó una gran eyección de masa coronal que perturbó las condiciones del viento solar. La figura 3, tomada por el equipo LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph*) a bordo del satélite SOHO (*Solar Heliospheric Observatory*), pone de relieve la magnitud del fenómeno. SOHO se sitúa en el punto L1 de Lagrange, región localizada entre el Sol y la Tierra donde las atracciones gravitatorias de ambos cuerpos se equilibran, por lo que las órbitas situadas en la zona alcanzan una mayor estabilidad gravitatoria. Esta zona dista 1.500.000 kilómetros de la Tierra.

Camino de la CME hacia la Tierra

La figura 4 muestra la predicción de la evolución en el espacio de la CME generada por la erupción solar. Para ello se ha utilizado el modelo WSA-Enlilcone de la NOAA. Como se puede observar en la figura de la izquierda, la CME, marcada en rojo, se dirige claramente hacia Marte, representado con un círculo rojo situado en la parte superior derecha, y no parece que vaya a impactar en Tierra, representada por el círculo amarillo. En el panel central se aprecia cómo seis horas

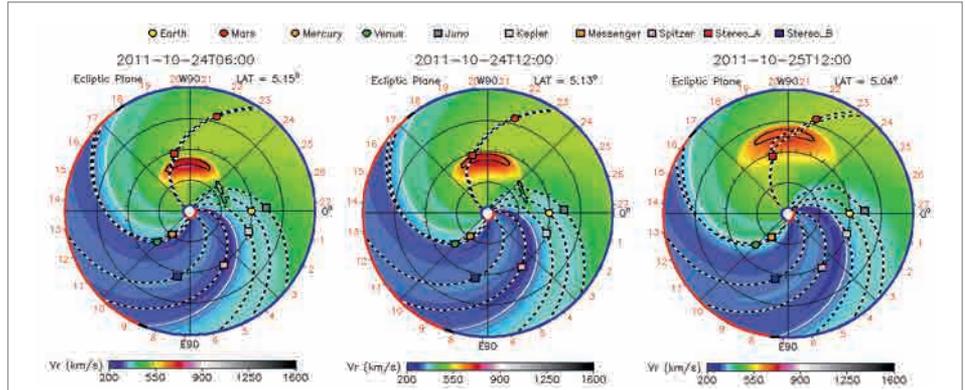


Figura 4. Predicción de la evolución de la CME generada el 24 de octubre, 2011. Adaptado de <http://www.swpc.noaa.gov/wsa-enlil/>

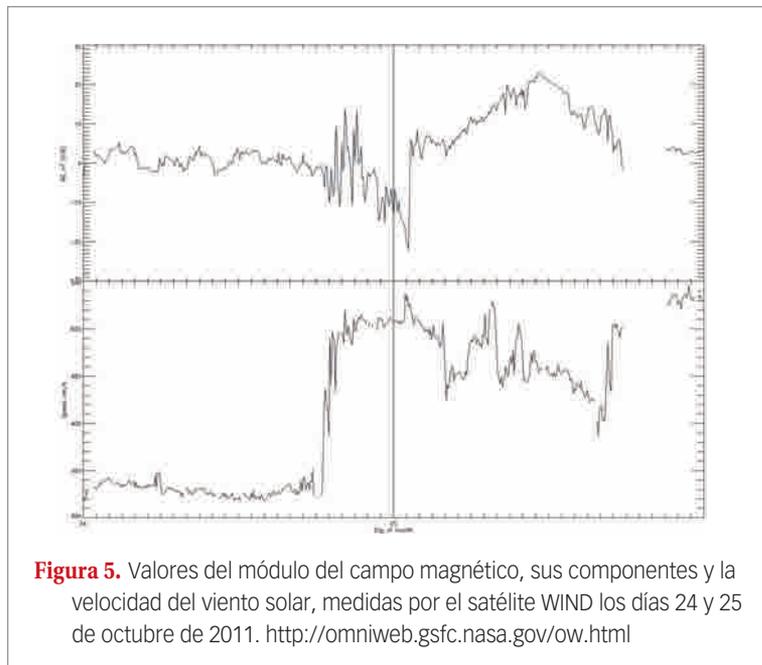


Figura 5. Valores del módulo del campo magnético, sus componentes y la velocidad del viento solar, medidas por el satélite WIND los días 24 y 25 de octubre de 2011. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>

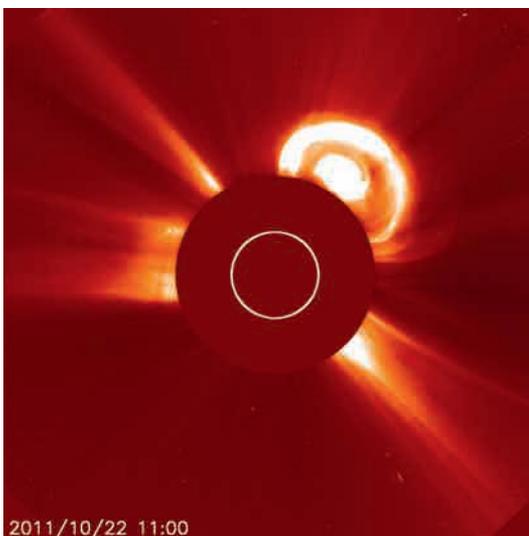


Figura 3. CME observada por el satélite SOHO. <http://sohowww.nascom.nasa.gov/spaceweather/>

más tarde alcanzaría Stereo A (pequeño cuadrado rojo), observatorio situado en una órbita alrededor del Sol, que junto con su gemelo Stereo B permite observarlo desde dos posiciones opuestas de una misma órbita y así analizar mejor la estructura y evolución de las tormentas solares. La predicción indica cómo finalmente (panel derecho) la CME acabaría impactando ligeramente la Tierra.

Durante la tarde del 24 de octubre (18:00 UT), el satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*), situado también en el punto L1 de Lagrange, detectó un incremento en el viento solar de 350 km/s a 550 km/s, que indicaba la llegada del impacto de la CME y anunciaba la posibili-

dad de una tormenta geomagnética (fig.5). Además, la componente Bz del campo magnético se orientó hacia el sur, satisfaciendo así una de las condiciones necesarias para la aparición de una tormenta geomagnética señaladas anteriormente. El satélite permite conocer las características del viento solar unos 40 minutos antes de que llegue a la Tierra. De esta manera se dispone de un tiempo muy valioso para tomar medidas que atenúen el impacto de una tormenta geomagnética.

En su viaje hacia la Tierra y ya a sólo 35.800 kilómetros de su superficie, la perturbación impacta sobre los satélites geoestacionarios GOES 13 (longitud 75°) y 14 (longitud 135°), que también

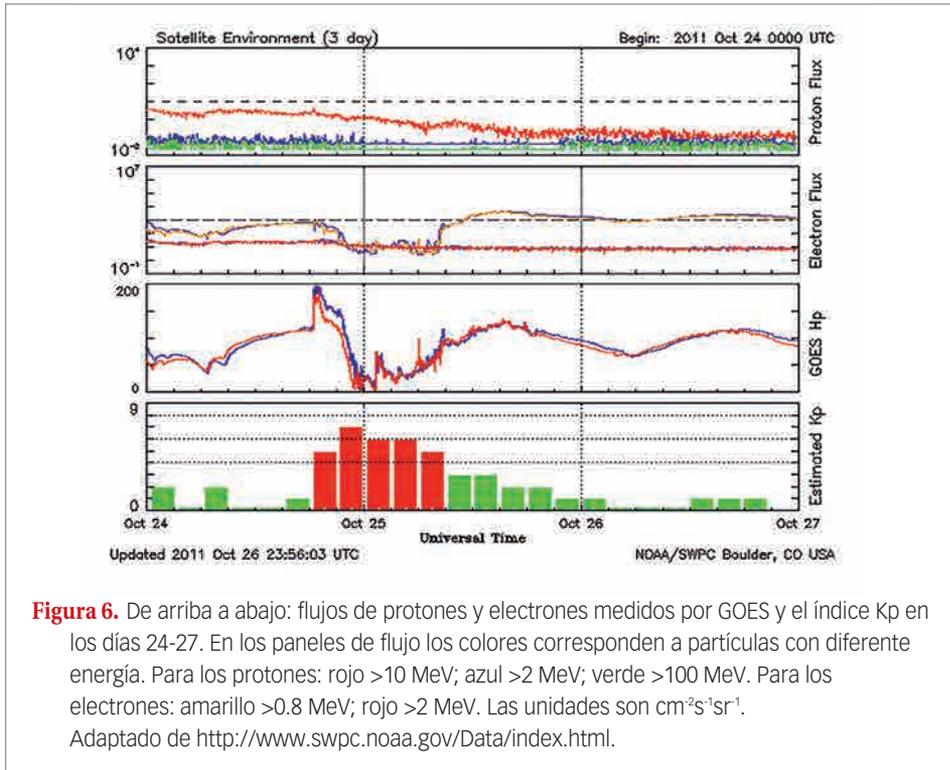


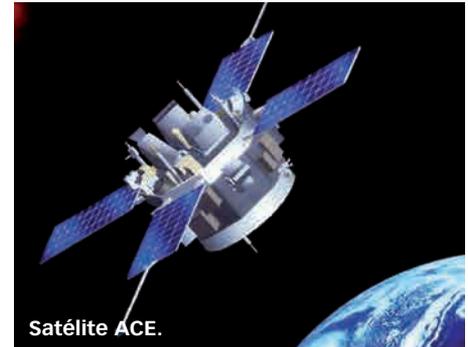
Figura 6. De arriba a abajo: flujos de protones y electrones medidos por GOES y el índice Kp en los días 24-27. En los paneles de flujo los colores corresponden a partículas con diferente energía. Para los protones: rojo >10 MeV; azul >2 MeV; verde >100 MeV. Para los electrones: amarillo >0.8 MeV; rojo >2 MeV. Las unidades son $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Adaptado de <http://www.swpc.noaa.gov/Data/index.html>.

pueden evaluar las características del viento solar. La figura 6 representa el registro de los valores del flujo de protones y electrones los días 24-27 de octubre de 2011 registrados por GOES-13. En el flujo de electrones es fácilmente reconocible el cambio causado por la perturbación a partir de las 18 horas del día 24, que se prolonga hasta las 9 horas del 25. La fuerte compresión del campo magnético de la Tierra durante el impacto permite al viento solar penetrar fuerte-

mente en la magnetosfera entre las 19:06 UT y las 19:11 UT y expone los satélites geostacionarios a la acción del plasma del viento solar.

! Llegada del viento solar a la Tierra. Registro de la tormenta en la península Ibérica

La llegada del viento solar perturba a la Tierra genera una tormenta geomagnética que se registra en los observatorios, afecta a la ionosfera e introduce



A las 18 horas (Tiempo Universal) del 24 de octubre de 2011, el satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*) detectó un incremento en el viento solar que anunciaba la posibilidad de que se originase una tormenta magnética en la Tierra unos 40 minutos más tarde

errores en el posicionamiento satelital. La figura 7 muestra los magnetogramas correspondientes a los días 24 y 25 de octubre obtenidos en el observatorio de San Pablo de los Montes (Toledo). En ellos puede apreciarse que la tormenta geomagnética se inicia en la tarde del día 24 y se mantiene, al menos, durante todo el

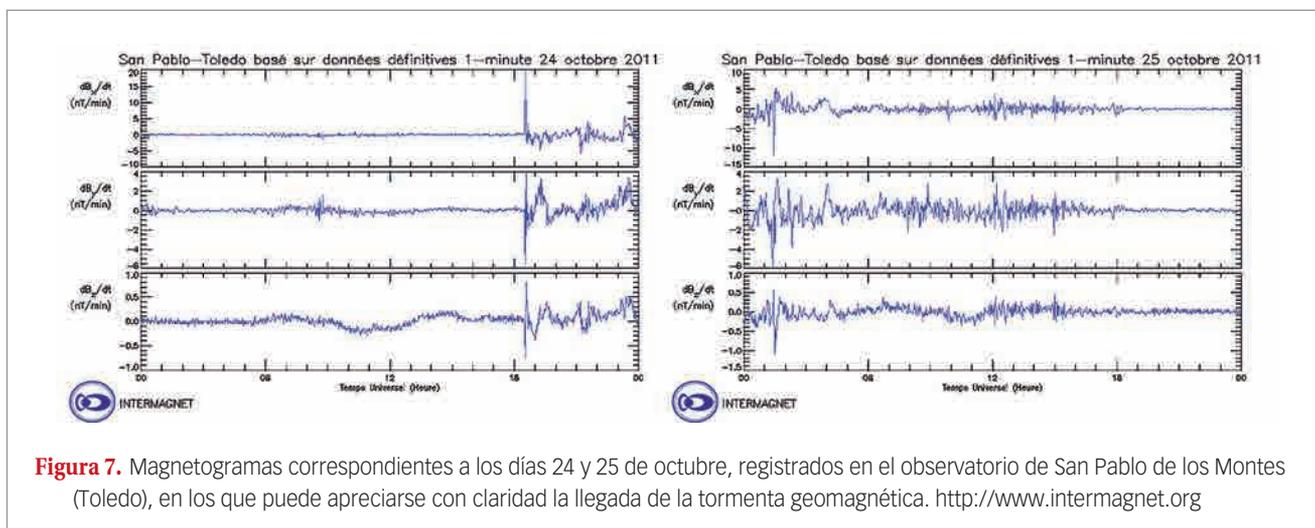


Figura 7. Magnetogramas correspondientes a los días 24 y 25 de octubre, registrados en el observatorio de San Pablo de los Montes (Toledo), en los que puede apreciarse con claridad la llegada de la tormenta geomagnética. <http://www.intermagnet.org>

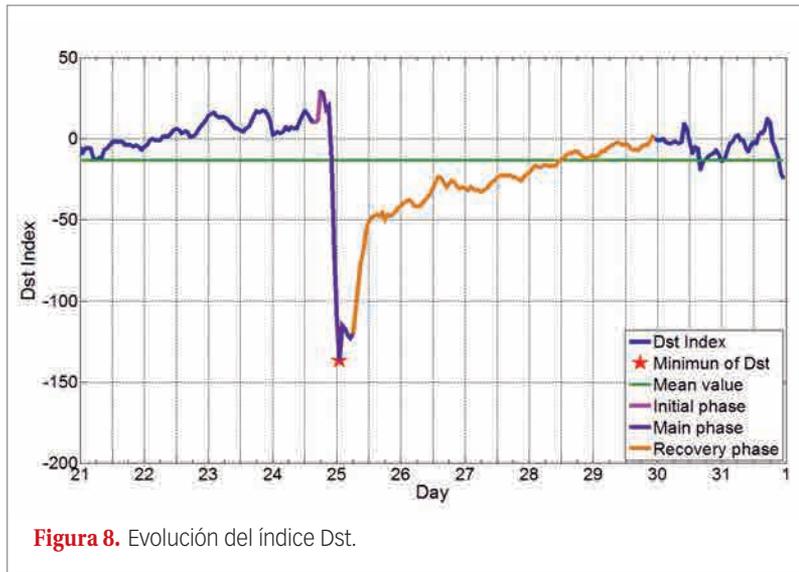


Figura 8. Evolución del índice Dst.

día 25. La figura 8, que muestra la evolución del índice Dst, pone de manifiesto que la fase inicial de la tormenta geomagnética se desarrolla entre las 15 y las 18 horas, la principal se prolonga hasta las 10 horas del día 25 y la de recuperación se extiende hasta las 23 horas del 29.

Impacto en la ionosfera sobre la península Ibérica

El impacto sobre la ionosfera (parte conductora de la atmósfera que se extiende de 60 a 2.000 kilómetros de altura) recibe particular importancia por la fuerte influencia que esta región ejerce sobre la transmisión de las ondas electromagnéticas y, por tanto, sobre las comunicaciones vía satélite ^[16]. Cuando este impacto provoca una notable variación en las características de la ionosfera se dice que ha dado lugar a una «tormenta ionosférica». Si la modificación supone un incremento en la densidad electrónica (número de electrones por unidad de volumen) de la ionosfera se habla de «tormenta ionosférica positiva». Si, por el contrario, el efecto es una disminución de la densidad se trata de una «tormenta negativa» ^[17]. En ambos casos se pueden generar importantes perturbaciones en los sistemas GNSS y en las comunicaciones.

Muchos de los centros especializados en el estudio de la meteorología espacial emiten un mensaje de alerta de tormenta geomagnética uno o dos días antes de que ésta se produzca

Este impacto ha sido estudiado de dos formas diferentes. En primer lugar se han analizado los ionogramas (registros de la ionosfera obtenidos mediante sondeos con ondas de alta frecuencia) de los días 23, 24 y 25 de octubre obtenidos en el Observatorio del Ebro y en la Estación de Sondeos Atmosféricos del Centro de Experimentación de El Arenosillo (Cedeja) del INTA, en Huelva. Los resultados (la figura 9 muestra los correspondientes a El Arenosillo) ponen de manifiesto un ligero aumento de la frecuencia crítica de la capa F2, foF2 y un significativo incremento de la altura de su concentración electrónica máxima, hmF2. El aumento de foF2 es coherente con el incremento de densidad que se pondrá de manifiesto en el análisis del contenido de electrones, ya que la frecuencia del plasma es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad electrónica. Por su parte, el incremento de altura es un fenómeno característico en las tormentas geomagnéticas cuando producen una tormenta ionosférica positiva.

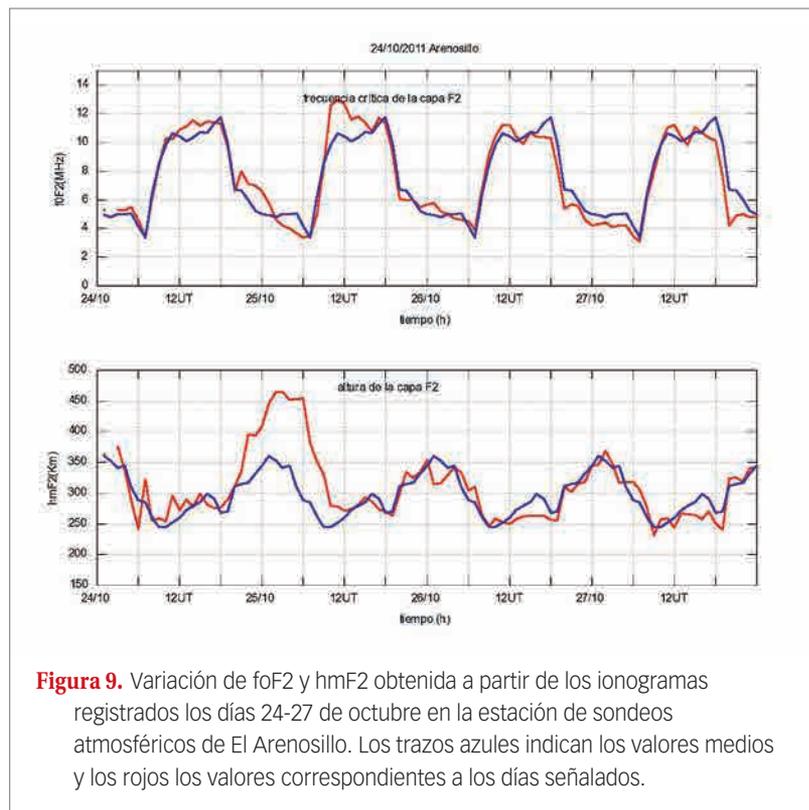


Figura 9. Variación de foF2 y hmF2 obtenida a partir de los ionogramas registrados los días 24-27 de octubre en la estación de sondeos atmosféricos de El Arenosillo. Los trazos azules indican los valores medios y los rojos los valores correspondientes a los días señalados.

una fase positiva de la tormenta ionosférica cuando la diferencia del vTEC respecto al valor medio es superior a los 10 TECus o el vTECrel supera el 50%. Por el contrario, se considera que existe una fase negativa de la tormenta ionosférica cuando la diferencia del vTEC respecto al valor medio es inferior a los -10 TECus o el vTECrel inferior a -50%. La figura 11 representa los resultados obtenidos para una selección de las estaciones distribuidas en función de la latitud. Los valores obtenidos permiten afirmar con claridad que, sobre la península Ibérica, la tormenta geomagnética ha generado una tormenta ionosférica. Además, existe una fase positiva de la tormenta ionosférica

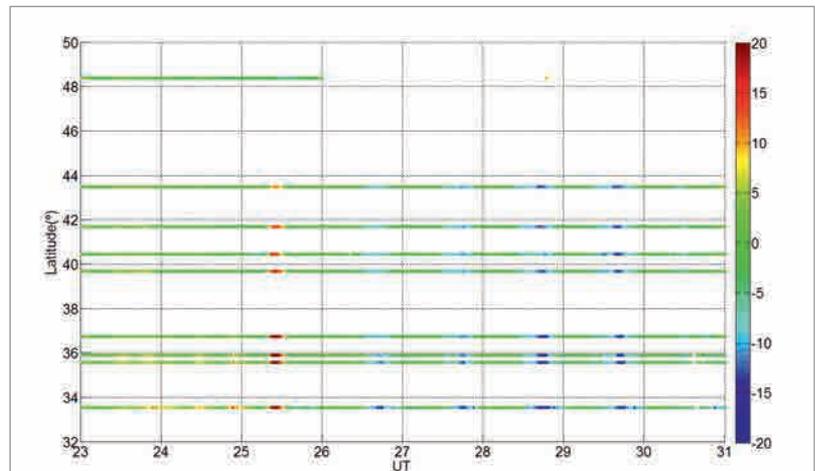


Figura 11. Diferencia de vTEC respecto al valor medio mensual para las estaciones BRST, CANT, ARDU, MADR, SONS, MALA, CEU1, TETN e IFR1 de la Figura 17 distribuidas en función de la latitud de norte a sur. La gama de colores expresa los resultados en TECus.

Tormentas geomagnéticas y ferrocarriles

Las tormentas geomagnéticas también pueden afectar al sistema ferroviario. La primera mención sobre este tipo de efectos aparece en el *New York Times* del 16 de mayo de 1921, en una noticia que vincula el fallo generalizado del sistema de señalización y control del New York Central Railroad y su posterior incendio con la ocurrencia de una tormenta geomagnética que produjo auroras visibles en la zona de Nueva York ^[1]. Posteriormente se han achacado a las tormentas geomagnéticas fallos en los sistemas de señalización ocurridos en Suecia durante la tormenta geomagnética del 13-14 de julio de 1982 ^[2] y en Rusia en numerosas ocasiones coincidentes con tormentas geomagnéticas. La explicación puede encontrarse en la aparición de voltajes imprevistos, creados por las corrientes eléctricas inducidas por las variaciones del campo magnético (GICs) generadas por la tormenta. Estos voltajes podían afectar el funcionamiento del sistema de señalización alterando la activación de indicaciones de vía libre y vía ocupada ^[3,4,5].

Parece conveniente prestar atención a este tipo de fenómenos si se considera la propuesta de trenes de alta velocidad (donde las medidas de seguridad deben ser mucho más exigentes) para zonas de alta latitud geográfica como el norte de Rusia, Suecia, Noruega o Finlandia.



- [1] Odenwald, S. Newspaper reporting of space weather: End of a golden age. *Space Weather*, 2007, (5) S11005. doi:10.1029/2007SW000344.
- [2] Wik, M; Pirjola, R; Lundstedt, H; Viljanen, A; Wintoft, P; Pulkkinen, A. Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects on geomagnetically induced currents on Swedish technical systems. *Annales Geophysicae*, 2009, (27) 1775-1787.
- [3] Eroshenko, EA; Belov, AV; Boteler, D; Gaidash, SP; Lobkov, SL; Pirjola, R; Trichtchenko, L. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia. *Adv. Space Res.*, 2010, (46) 1102-1110. doi:10.1016/j.asr.2010.05.017.
- [4] Kasinskii, V; Ptitsyna, NG; Lyahov, NN; Tyasto, MI; Lucci, N. Effect of Geomagnetic Disturbances on the Operation of Railroad Automated Mechanisms and Telemechanics. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2007, (47) 676-680. doi:10.1134/S0016793207050179.
- [5] Ptitsyna, NG; Kasinskii, VV; Villaresi, G; Lyahov, NN; Dorman, LI; Lucci, N. Geomagnetic effects on mid-latitude railways: A statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the East-Siberian Railway. *Advances in Space Research*, 2008, (42) 1510-1514. doi:10.1016/j.asr.2007.10.015.

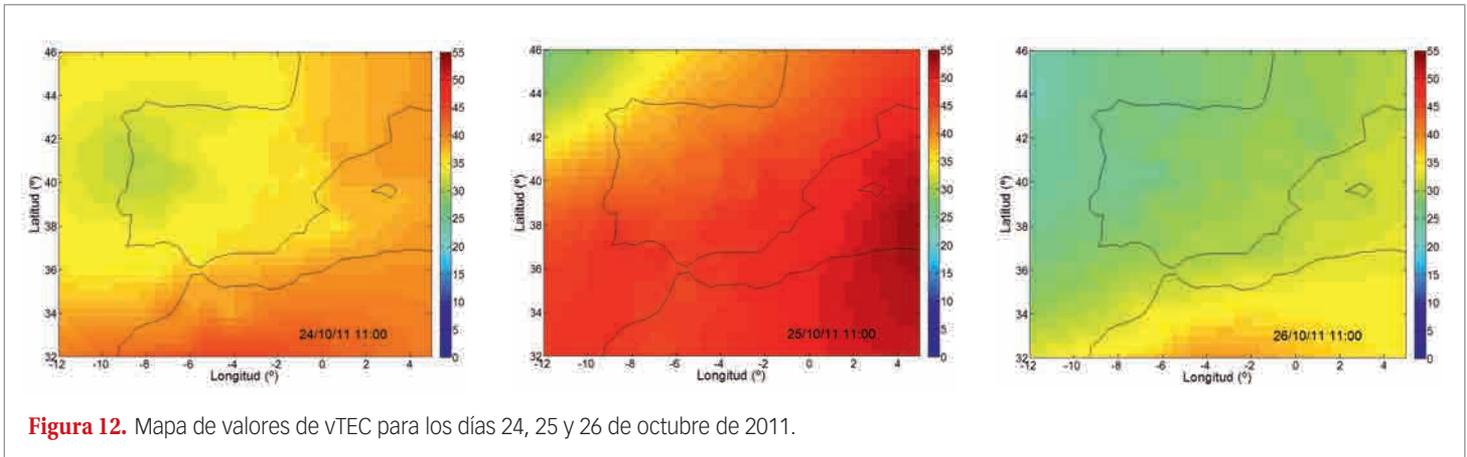


Figura 12. Mapa de valores de vTEC para los días 24, 25 y 26 de octubre de 2011.

correspondiente a la fase inicial de la tormenta geomagnética que es apreciable solo en las latitudes más bajas, y otra con el mismo signo, entre la fase principal y el inicio de la fase de recuperación de la tormenta geomagnética. También aparece una serie de cuatro fases negativas de la tormenta ionosférica durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética. En las dos fases positivas se observa una fuerte dependencia del valor de la variación máxima con la latitud. Este efecto también se da en la duración de estas fases, aunque la diferencia es menos significativa. En las fases negativas el efecto latitudinal es menos destacable.

Para profundizar en el análisis de la perturbación sobre la península Ibérica se ha realizado también un estudio de la evolución temporal de los valores de TEC asociados al IPP. Se conoce con este nombre al punto en el que la señal satélite-receptor intersecta con la ionosfera, que se supone concentrada a una altura de 350 kilómetros. Los mapas de IPP son mapas regionales o globales que representan los valores de TEC en estos puntos. Para obtenerlos, se calcula primero el vTEC en los IPP donde tenemos información. Este cálculo se ha realizado cada minuto en los días analizados para las estaciones de la península Ibérica y con cinco satélites de media para cada época. De estos datos se han seleccionado los de mayor interés para este análisis y, a partir de ellos, se han dibujado los mapas mediante una inter-

polación con el método Kriging utilizando un mado de $0,4^\circ \times 0,4^\circ$. Para escoger el mado se hicieron varios ensayos, obteniéndose los resultados óptimos con la distancia mencionada. La figura 12 representa los mapas correspondientes a las 11 horas de los días 24, 25 y 26, hora en las que la variación de vTEC alcanza valores importantes. En ellos se observa con claridad el aumento de vTEC que se produce en la tormenta ionosférica.

■ Efectos en el posicionamiento y los servicios con EGNOS

El efecto tecnológico de mayor interés producido por esta tormenta fue la

perturbación introducida en el funcionamiento de EGNOS, sistema desarrollado para mejorar las prestaciones de GLONASS, GPS y Galileo en Europa y África. Este efecto se concretó en la degradación del Servicio APV-1 (*Approach with Vertical Guidance*), que asegura una exactitud en la posición determinada con señales GNSS de 16 metros en el plano horizontal y de 20 metros en la dirección vertical. Incluye dos tipos de información clave: HPL-VPL (*Horizontal and Vertical Protection Levels*) y HAL-VAL (*Horizontal and Vertical Alert Limits*).

La figura 13 muestra el nivel de confianza correspondiente al día 23 de oc-

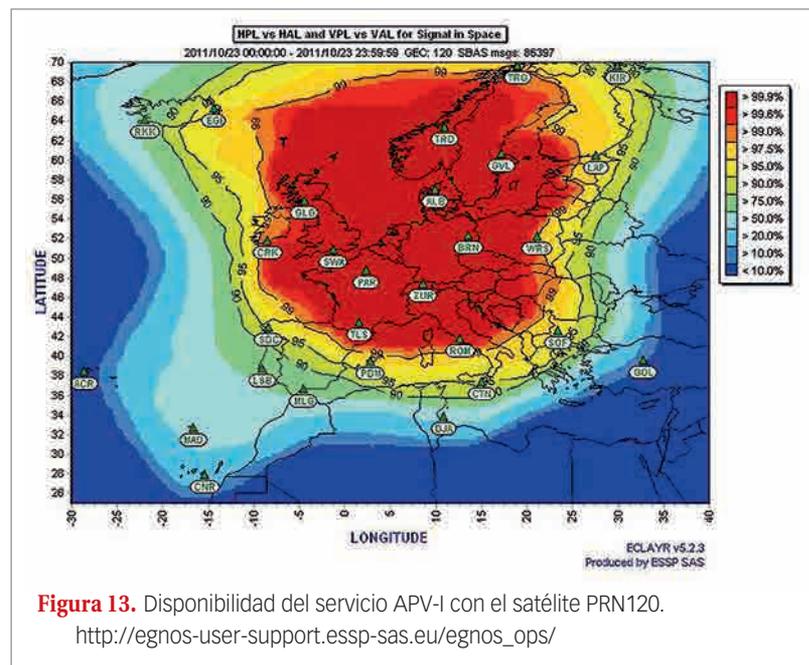


Figura 13. Disponibilidad del servicio APV-1 con el satélite PRN120.
http://egnos-user-support.essp-sas.eu/egnos_ops/

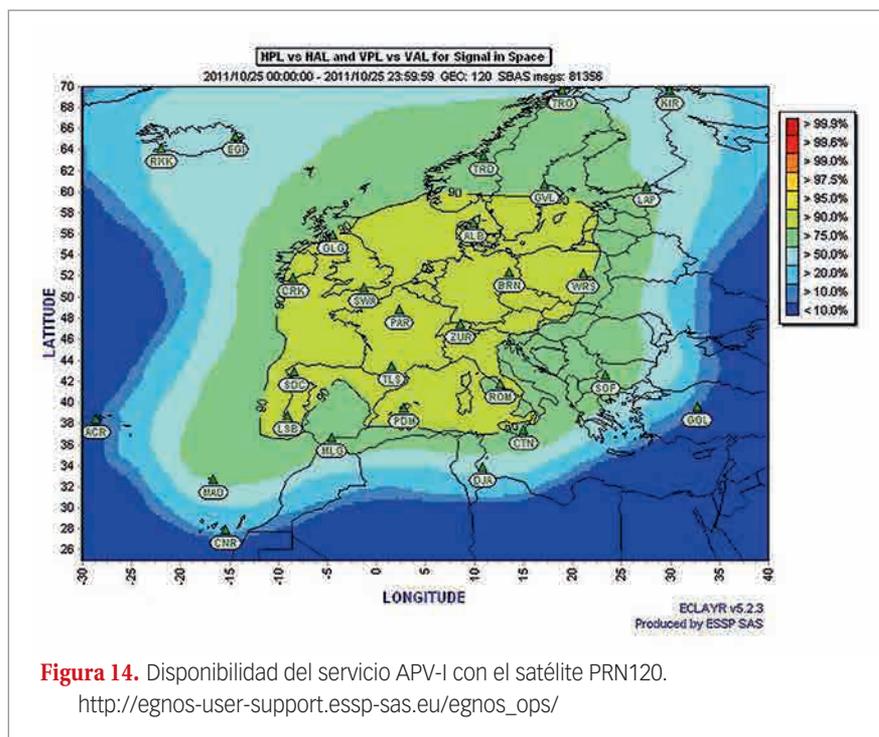


Figura 14. Disponibilidad del servicio APV-I con el satélite PRN120.
http://egnos-user-support.essp-sas.eu/egnos_ops/

tubre con el que el HPL y VPL se encuentran dentro de los límites de alarma (HAL, VAL) para el satélite EGNOS PRN120. Puede observarse un nivel del 99% en casi toda Europa y superior al 75% sobre la península Ibérica. Por efecto de la tormenta, esta región se reduce el día 24 y desaparece por completo el 25 (fig. 14). Los días 26 y 27 se recuperan los niveles de confianza previos a la fase principal de la tormenta, lo que confirma el efecto de la tormenta geomagnética.

Diseño de un protocolo de alerta

Con objeto de disminuir los efectos de las tormentas geomagnéticas, se ha prestado una atención particular a la detección temprana del fenómeno. Para ello, el estudio se ha enfocado desde dos vías distintas. Por una parte, se ha planteado una línea de investigación que pretende sacar partido de la secuencia temporal de los fenómenos que conducen a

la tormenta geomagnética, la cual se ha descrito cuidadosamente para el caso de la tormenta del 24-25 de octubre de 2011. Esta es la orientación que siguen los centros especializados en el estudio de la Meteorología Espacial, muchos de los cuales emiten un mensaje de alerta de tormenta uno o dos días antes de que ésta se produzca^[18]. Se trata, por tanto, de una línea predictiva de gran interés práctico. La segunda vía se centra en los efectos en la ionosfera y se refiere a la prevención de efectos perturbadores una vez que la tormenta ionosférica se ha producido. El objetivo no es predecir la ocurrencia de una tormenta ionosférica, sino anunciar su presencia con la prontitud suficiente para que se puedan conocer los fallos que la situación pue-

de estar induciendo en las comunicaciones, la navegación o el posicionamiento.

Para ello se ha desarrollado el Sistema de Información Rápida de Perturbaciones Ionosféricas para la península Ibérica y el sur de Europa que se describe a continuación. Este sistema se activa de manera manual al recibir una alerta de alguno de los centros mencionados anteriormente. En un futuro próximo se implementará para que sea un proceso automático. Una vez activado, el sistema se mantiene en funcionamiento durante 10 días para asegurar el estudio de todo el periodo perturbado. El programa realiza automáticamente las siguientes operaciones:

- Descarga los RINEX y los archivos de navegación de las 16 estaciones GNSS seleccionadas (fig. 15) para el día de la posible alerta y cada uno de los 10 días anteriores.
- Procesa los archivos con el método explicado anteriormente para obtener el vTEC en cada época, para cada día y estación.
- Calcula el valor del vTEC medio de los 10 días previos y el vTECrel. Estos datos se almacenan en formato gráfico para su posterior revisión. Se aplica un filtrado en los valores del vTECrel para evitar datos erróneos que activen el sistema de aviso sin que exista perturbación. Este filtrado consiste en la eliminación de las épocas en las que el vTECrel sufre cambios bruscos en épocas contiguas.
- Contrasta el valor del vTECrel con el valor umbral ($\pm 50\%$) y en caso de su-

El objetivo del sistema desarrollado no es predecir la ocurrencia de una tormenta ionosférica, sino anunciar su presencia con la prontitud suficiente para que se puedan conocer los fallos que la situación puede estar induciendo en las comunicaciones, la navegación o el posicionamiento

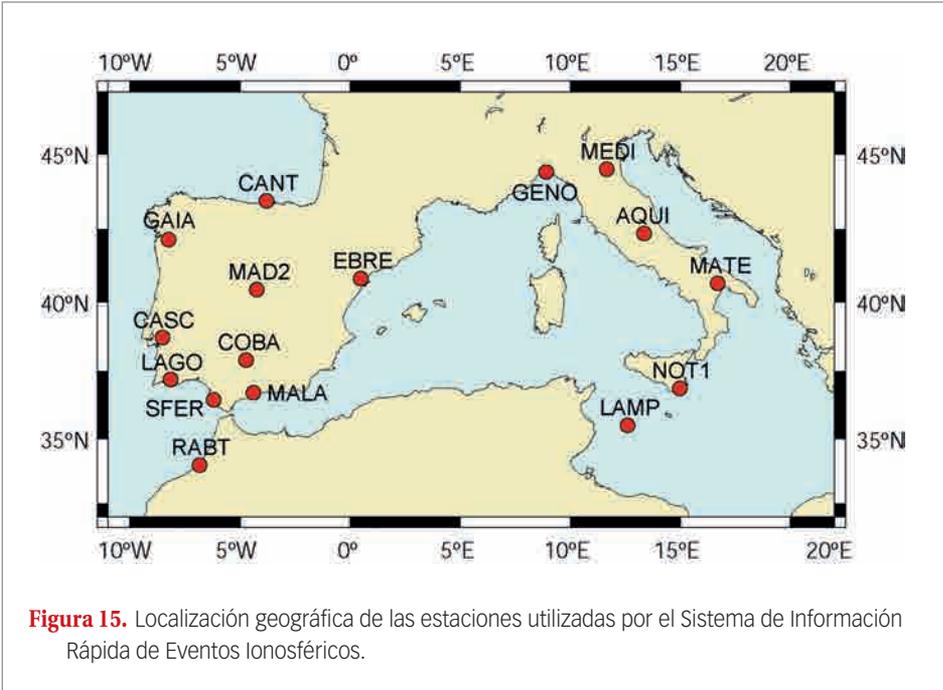


Figura 15. Localización geográfica de las estaciones utilizadas por el Sistema de Información Rápida de Eventos Ionosféricos.

Conclusiones

Las tormentas geomagnéticas son procesos naturales que afectan a toda la Tierra, inducen fenómenos físicos importantes, como la aparición de auroras, el aumento de la radiación, la generación de GICs y las tormentas ionosféricas y, si son muy intensas, pueden provocar un gran impacto en muchos recursos tecnológicos que sustentan nuestra vida cotidiana. Los daños en satélites, líneas de transmisión de energía eléctrica, sistemas de navegación y ferrocarriles que una gran tormenta magnética es capaz de generar pueden producir

perarlo en, al menos, el 50% de las estaciones, se emite el mensaje de aviso. Este mensaje puede ser utilizado por los usuarios para tomar las medidas preventivas oportunas.

El esquema del sistema aparece resumido en la figura 16. Para comprobar su validez, se ha aplicado el Sistema de Información a cinco tormentas que tuvieron lugar en diciembre de 2006, octubre de 2011, enero de 2012, abril de 2012, y julio de 2012. Para realizar la verificación se han estudiado 24 días en torno a la fecha en la que se alcanza el valor mínimo del índice Dst y se han comparado los días en los que se emite el mensaje de aviso con los días con tormenta ionosférica. Estas pruebas han proporcionado un resultado correcto en un 77,18% de los días estudiados. En general, de 29 días con tormenta ionosférica, se habrían emitido mensajes de aviso de perturbación en 23 de ellos, y en solo 21 de los 89 días sin perturbación se habría emitido un mensaje de aviso innecesario. Estos resultados indican la validez del sistema, que próximamente será dotado de una mayor rapidez de ejecución y puesto a disposición de los usuarios a través de internet.

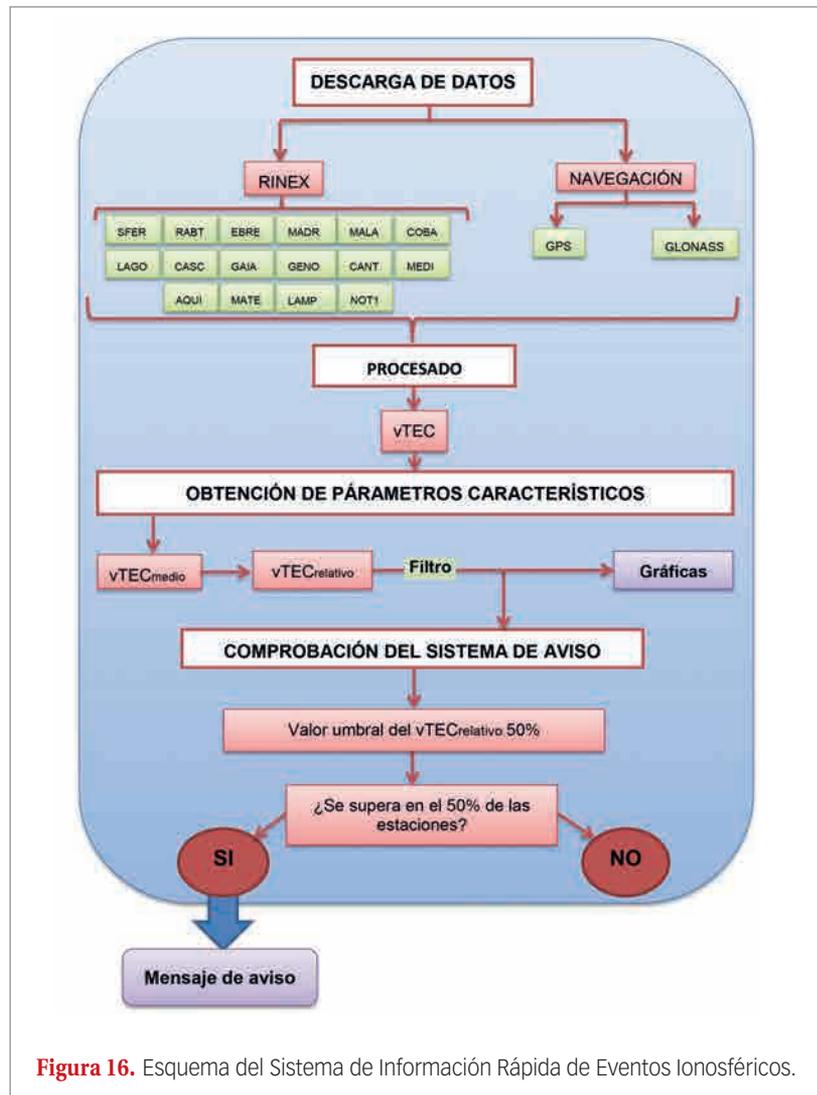
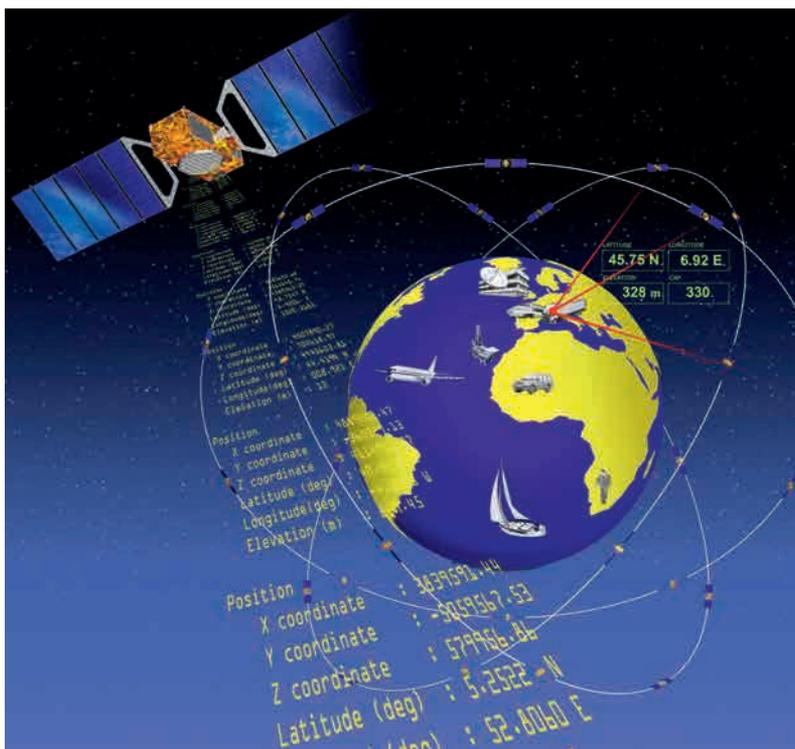


Figura 16. Esquema del Sistema de Información Rápida de Eventos Ionosféricos.

Las pruebas del sistema desarrollado han proporcionado el resultado correcto en un 77,18% de los días estudiados, lo que indica su validez

pérdidas económicas gigantescas y alterar el funcionamiento de nuestra sociedad, creando multitud de problemas de dimensiones inimaginables. Es por tanto imprescindible prestar a este riesgo natural la debida atención, fomentar su estudio y transmitir a la sociedad la importancia de estar preparados para hacerle frente.

Los notables avances realizados en la meteorología espacial, algunos de los cuales han sido presentados en este artículo, permiten hoy alertar con un tiempo de 30-40 minutos, de la llegada de una perturbación en el viento solar a la Tierra que puede producir una tormenta geomagnética. Este margen de tiempo da la oportunidad de adoptar muchas medidas protectoras para los ciudadanos y los bienes materiales, siempre que



la sociedad haya sido convenientemente formada para ello. Por ello, la toma de conciencia de esta amenaza por parte de autoridades, instituciones, educadores y medios de comunicación, a la que este trabajo ha querido contribuir, debe ir acompañada por una constante labor formativa en este tema. ♦

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado gracias a una Ayuda a la Investigación concedida por FUNDACIÓN MAPFRE.

Los autores desean expresar su agradecimiento a Eduardo Sánchez Díaz por su colaboración en el proyecto que ha dado lugar a este artículo y a los organismos IGS, EUREF, Intermagnet, Omniweb y WDC for Geomagnetism (Kyoto) por las facilidades para el acceso a datos y recursos informáticos.

Referencias

- [1] González, WD; Joselyn, JA; Kamide, Y; Kroehl, HW; Rostoker, G; Tsurutani, BT; Vasyliunas, VM. What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research*, 1994, (99) 5771-5792.
- [2] Carrington, RC. Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1859, (20) 13-15.
- [3] Hodgson, R. On a curious appearance seen in the Sun. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1859, (20) 15-16.
- [4] Green, J; Boardsen, S. Duration and extent of the great auroral storm of 1859. *Adv. Space Res.* 2006, (38) 130-135.
- [5] Boteler, DH. The super storms of August/September 1859 and their effects on the telegraph system. *Adv. Space Res.*, 2006, (38) 159-172.
- [6] Hapgood, MA. Towards a Scientific Understanding of the Risk from Extreme Space Weather. *Adv. Space Res.*, 2006, doi:10.1016/j.asr.2010.02.007.
- [7] Riley, P. On the probability of occurrence of extreme space weather events, *Space Weather*, 2012, (10), doi: 10.1029/2011sw000734.
- [8] Kataoka, R. Probability of occurrence of extreme magnetic storms, *Space Weather*, 2013, (11) doi:101002/swe.20044.
- [9] Odenwald, S; Green, J; Taylor, W. Forecasting the impact of an 1859-calibre superstorm on satellite resources. *Adv. Space Res.* 2007, (38) 280-297.
- [10] Aguado, J. Recuperación de la magnetosfera terrestre tras sucesos solares geoeffectivos. Tesis doctoral, Universidad de Alcalá, 2010.
- [11] Buonsanto, MJ. Ionospheric storms-a review, *Space Science Reviews*, 1999, 88: 563-601.
- [12] Parkinson, W.D. Introduction to Geomagnetism, Scottish Academic Press, 1983.
- [13] Siscoe, G; NU. Crooker and CR. Clauer, Dst of the Carrington storm of 1859, *Adv. Space Res.* 2006, (38) 173-179.
- [14] Lakhina, GS; S. Alex; BT. Tsurutani y WD. González. Research on Historical Records of Geomagnetic Storms, *Proceedings IAU Symposium No. 226, 2005 International Astronomical Union*, doi:10.1017/S1743921305000074.
- [15] Blanch, E; Marsal, S; Segarra, A; Torta, JA; Altadill, D; Curto, JJ. Space weather effects on Earth's environment associated to the 24-25 October 2011 geomagnetic storm. *Space Weather*, 2013, (11) 153-168.
- [16] Kelley, M. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics, 2nd ed., 2009, Academic Press, Amsterdam.
- [17] Mendillo, M; Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content, *Rev. Geophys.* 2006, 44, 2 RG4001, doi:10.1029/2005RG000193.
- [18] Saiz, E; C. Cid; Y. Cerrato, Forecasting intense geomagnetic activity using interplanetary magnetic field data. *Annales Geophysicae*. 2008, (26), 3989-3998.
- [19] Cerrato, Y., E. Saiz, C. Cid, 2012, Terrestrial Magnetosphere, in *Advances in Solar and Solar-Terrestrial Physics*, Editors: Georgeta Maris and Crisan Demetrescu, 177-206, ISBN: 978-81-308-0483-5.