

«Space Weather»: la meteorología ionosférica y sus efectos

S. M. RADICELLA

Abdus Salam International Center for Theoretical Physics,
Aeronomy and Radiopropagation Laboratory,
Strada Costiera 11, 34100 Trieste, Italy

RESUMEN

Se mencionan los elementos que definen el «space weather», o «meteorología espacial» en castellano. Se detallan los aspectos más importantes de la componente ionosférica de la meteorología espacial haciendo resaltar las características principales de las tormentas ionosféricas y de los fenómenos como el centelleo de señales de satélites provocados por la presencia de irregularidades ionosféricas de distintas escalas. Se mencionan luego las áreas de conocimiento sobre la ionosfera que necesitan mayores esfuerzos de investigación. Para finalizar, se describen los efectos principales de la meteorología espacial sobre los sistemas tecnológicos avanzados, detallando aquellos que dependen de las condiciones de la ionosfera.

Palabras clave: Meteorología espacial, Geoheliofísica, Ionosfera, Meteorología ionosférica, Efectos ionosféricos.

ABSTRACT

The elements that define «space weather» are mentioned. The main parts of the ionospheric component of space weather are detailed and particular attention is given to ionospheric storms and satellite signal scintillations produced by different types of ionospheric irregularities. The area where increased studies are needed for the understanding of ionospheric weather are mentioned. Finally the effects of space weather on high technology systems are described with particular emphasis on those related to ionospheric weather.

Key words: Space weather, Solar-terrestrial physics, Ionosphere, Ionospheric weather, Ionospheric effects.

1. INTRODUCCIÓN

Las variaciones de la actividad solar y de la emisión de plasma desde la corona solar provocan cambios dramáticos en el ambiente espacial que circunda la

tierra. Estos cambios forman parte de lo que ahora es llamado «space weather» o «meteorología espacial». Este nuevo campo de estudio afecta profundamente una serie de actividades humanas que hacen uso de tecnologías avanzadas de alta complejidad y sofisticación. Para mitigar estos efectos es indispensable llegar a pronosticar el estado del ambiente espacial como ahora se hace con el estado del tiempo meteorológico de la baja atmósfera que controla actividades como la producción de alimentos. Haciendo una analogía se puede decir que el estudio de la meteorología espacial se encuentra ahora al mismo nivel de conocimientos que tenía la meteorología de la atmósfera baja hace cuarenta años.

El sol es una estrella que emite radiación electromagnética equivalente a la de un cuerpo negro a la temperatura de 5700°K , con un máximo espectral en la banda del visible. Las mayores variaciones ocurren en la parte de frecuencias más altas del espectro, desde el UV hacia frecuencias mayores y también en la parte más baja del mismo, que corresponde a las frecuencias de radio. Esta variabilidad está asociada a la presencia de centros magnéticos activos en la superficie del sol que se manifiestan ópticamente como manchas oscuras en el disco. La variación del número de estas manchas y de los grupos en los cuales éstas se asocian, es una medida de la actividad solar que sigue un ciclo de periodicidad próxima a once años. Durante el año 2000 está pronosticado el máximo de actividad del presente ciclo solar, el número 23 según la numeración universalmente aceptada.

Las emisiones explosivas de alta energía, llamadas fulguraciones solares, asociadas a las regiones activas formadas por grupos de manchas, aparecen particularmente en períodos de alta actividad solar. Durante estos fenómenos impulsivos, que duran desde pocas decenas de segundos hasta algunas horas, las emisiones UV y X solares pueden llegar a ser 100 veces más elevadas que las que ocurren en ausencia de actividad.

Además de la radiación electromagnética, el sol emite constantemente partículas de las cuales la mayoría son de bajas energías. Este flujo de partículas constituye el llamado *viento solar* que se mueve desde el sol con una velocidad de cientos de km/seg. Este plasma en movimiento lleva consigo «congelado» el campo magnético solar dando lugar al campo magnético interplanetario (Figura 1). Los cambios violentos en el plasma solar que se propaga en el espacio interplanetario están asociados a las modificaciones del campo magnético del sol.

Durante los fenómenos eruptivos se produce la *eyección de masa coronal* (CME) que da origen a tormentas geomagnéticas de gran intensidad. Durante las erupciones solares pueden ser emitidas también partículas de muy alta energía que alcanzan valores de cientos de MeV y constituyen los *eventos protónicos solares*. Otras formas de perturbaciones solares llamadas *agujeros coronales* generan viento solar de alta velocidad que también origina tormentas geomagnéticas.

El planeta Tierra, ubicado a la distancia de aproximadamente 150 millones de kilómetros del sol, está rodeado de una atmósfera constituida esencialmente de oxígeno y nitrógeno y tiene un campo magnético prácticamente bipolar. Las altas frecuencias del espectro de emisión electromagnética solar en la ban-

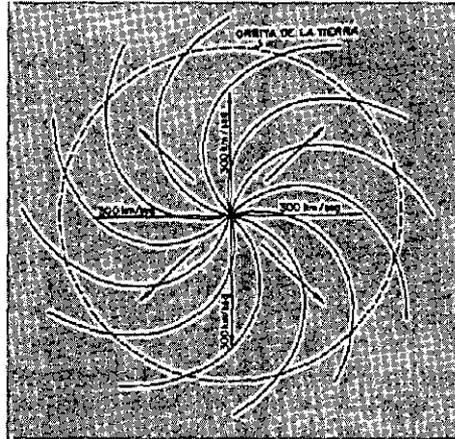


Figura. 1. Esquema simplificado del movimiento del viento solar en el espacio interplanetario. (Tomado del SKYLAB Boletín del Departamento de Física Espacial UNAM, Año 3, No. 16, Mayo 1999, <http://ariel.igeofcu.unam.mx/skylab/>).

da UV y X disocian e ionizan las moléculas atmosféricas, dando lugar al plasma de la ionosfera que es altamente variable y que a su vez es influenciado por el campo magnético terrestre.

En la ionosfera diurna se distinguen diferentes regiones y estratos: la región D (60-90 km), la región E (90-140 km) y la región F con los estratos F1(140-200 km) y F2, que se extiende desde los 200 km hasta alcanzar un máximo que varía entre los 300 y 450 km en función de varios factores como latitud, estación del año y actividad solar. Por encima del máximo la densidad electrónica disminuye de manera regular siguiendo una función básicamente exponencial. La ionosfera nocturna presenta solamente el estrato F2.

El campo geomagnético interactúa con el campo magnético «congelado» en el viento solar dando origen a la magnetosfera que es una cavidad limitada por la magnetopausa que representa una barrera para las partículas del viento solar que no logran penetrarla. La cavidad magnetosférica es de forma alargada, como muestra la Figura 2, terminando en una larga cola que se extiende hasta más de 100 radios terrestres en el hemisferio nocturno (opuesto al sol) mientras lo hace hasta unos 10 radios terrestres en el lado diurno que mira al sol. Partículas solares de distinto tipo consiguen penetrar en la magnetosfera contribuyendo a poblarla con partículas de diferentes energías, que dan origen a las auroras polares cuando precipitan en las altas latitudes. Parte de la radiación corpuscular queda atrapada en los llamados cinturones de Van Allen. Los campos y partículas que interactúan en la magnetosfera generan sistemas de corrientes eléctricas muy complejos que contribuyen a la gran actividad del ambiente espacial que circunda la tierra.

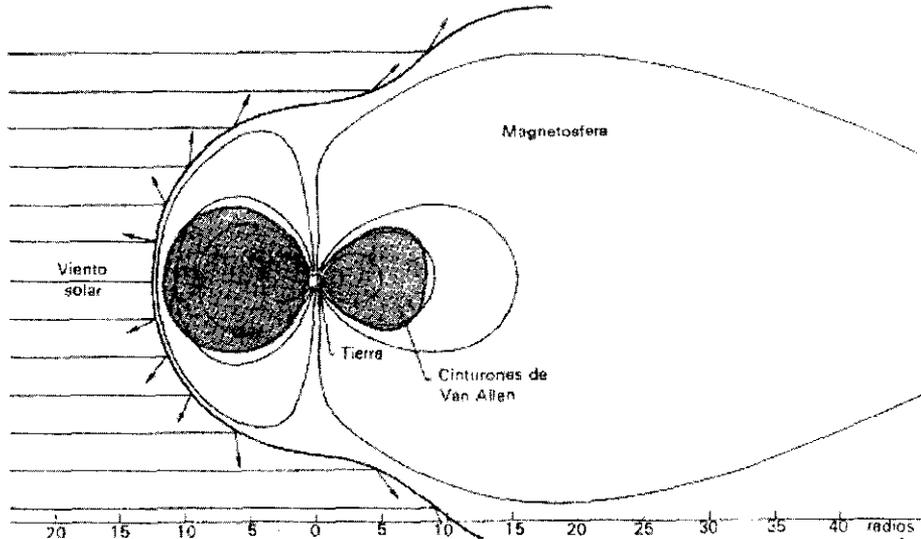


Figura 2. Esquema simplificado de la acción del viento solar sobre la tierra en presencia del campo geomagnético. Es posible notar la deformación de la magnetosfera, la región de los cinturones de radiación (o de Van Allen) y las distancias en radios terrestres (6370 km).

(Tomado de: <http://vppx134.vp.ehu.es/met/html/diccio>).

El efecto más importante de la actividad solar, puesta de manifiesto particularmente con la eyección de masa coronal que perturba el viento solar, es la presencia de perturbaciones geomagnéticas que a su vez generan anomalías en la ionosfera. Una medida de esta actividad geomagnética es dada por el índice planetario A_p^* que mide la intensidad de las tormentas geomagnéticas más fuertes.

La ionosfera representa solamente el 1% de la atmósfera terrestre pero puede ser considerada como la componente del ambiente espacial más sensible a las variaciones solares y a las variaciones del espacio cercano que dependen de éstas. La ionosfera, con su comportamiento altamente complejo y dinámico, representa un importante laboratorio natural para el monitoreo de las interacciones sol-tierra. Por esta razón, el conocimiento de la meteorología ionosférica («ionospheric weather») es fundamental para la comprensión de la meteorología espacial en general y de sus efectos sobre las actividades humanas. El principal parámetro, que define el comportamiento de la ionosfera, es la distribución espacial y temporal de la densidad electrónica. Un parámetro derivado de esa distribución, que reviste gran importancia para la propagación transionosférica de las ondas de radio, es el *contenido electrónico total* (TEC) que mide el número de electrones que contiene un tubo de área unidad y de longitud

determinada por la distancia entre el transmisor y el receptor. En el caso de un receptor en tierra y un transmisor en un satélite GPS en la vertical del receptor, la distancia sería de 20000 km.

En este trabajo la atención se centrará en la meteorología ionosférica, las áreas de ésta que necesitan particular atención por parte de los investigadores científicos, y los efectos sobre la operación de los modernos sistemas de comunicaciones y de navegación satelital.

2. LA METEOROLOGÍA IONOSFÉRICA

La climatología ionosférica, representada por las condiciones medias de la densidad electrónica en la ionosfera y sus variaciones casi periódicas, ha sido ampliamente estudiada. Sin embargo, un pronóstico meteorológico del estado de la ionosfera presupone un conocimiento muy profundo de los fenómenos y procesos físicos y químicos que ocurren en el laboratorio natural representado por la atmósfera superior de la tierra, bajo la acción constante de la radiación electromagnética y corpuscular del sol. Este conocimiento no está suficientemente desarrollado.

Desde el punto de vista de la meteorología espacial y de sus efectos sobre las actividades humanas, los fenómenos meteorológicos ionosféricos más importantes son aquéllos que apartan la ionosfera de sus condiciones medias o climáticas de manera más significativa. Las *perturbaciones ionosféricas repentinas o súbitas* (SID), que producen un rápido y substancial incremento de la densidad electrónica de corta duración en la región D debido al aumento de la intensidad de radiación X durante una fulguración solar, son un ejemplo de estos fenómenos.

Las alteraciones de la densidad electrónica de la ionosfera más importantes por su extensión geográfica y por su impacto son las tormentas ionosféricas que afectan un rango de alturas que comprende también la zona del máximo de la densidad electrónica en el estrato F2. Estas perturbaciones ocurren en la ionosfera después del comienzo súbito (SC) de las tormentas geomagnéticas, si bien no es posible establecer por el momento una correlación cuantitativa y directa entre la ocurrencia del fenómeno geomagnético y la correspondiente perturbación de la ionosfera. Lo que se puede afirmar sin lugar a dudas es que las tormentas geomagnéticas de mayor intensidad dejan siempre una huella muy clara en el comportamiento de la ionosfera.

La Figura 3 muestra el efecto de la tormenta geomagnética del 13 de marzo de 1989 sobre la ionosfera observada desde algunas localidades europeas. Esta tormenta fué la segunda en intensidad en todo el siglo 20. El panel superior de la figura muestra los valores de foF2 (parámetro proporcional a la raíz cuadrada del máximo en el perfil vertical de la densidad electrónica) durante el 12 de marzo, un día de condiciones geomagnéticas e ionosféricas tranquilas. Los valores de foF2 a las 12 UT son de 12-13 MHz. El panel infe-

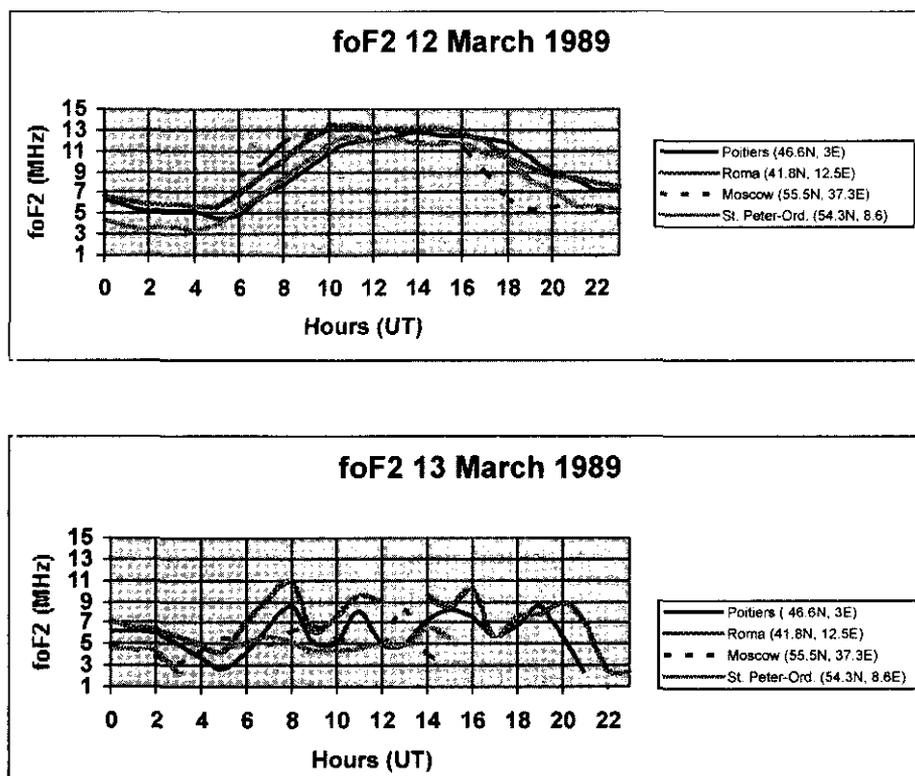


Figura 3. Variaciones de foF2 observadas en diferentes estaciones europeas durante un día tranquilo (12 marzo 1989) y un día de tormenta ionosférica fuerte (13 marzo 1989). (Tomado del Informe interno del Equipo de Expertos Ionosféricos Europeos de la ESA).

rior muestra la tormenta ionosférica producida por la perturbación geomagnética. Se nota la presencia de fuertes oscilaciones cuasi-periódicas de los valores de foF2, que enmascaran casi completamente la variación diaria normal que se observa en el panel superior, y una disminución notable, de hasta 2 MHz, de los valores en las horas diurnas con respecto al día anterior tranquilo. La situación que muestra la figura es un claro ejemplo de cómo las perturbaciones meteorológicas ionosféricas alteran notablemente las condiciones normales de la ionosfera.

Otro ejemplo que muestra la extensión geográfica de las tormentas ionosféricas y sus características puede verse en las Figuras 4 y 5. En la primera se encuentran dibujadas las isolíneas de foF2 sobre Europa a las 13 UT en un día tranquilo, y en la segunda la situación dos días después a la misma hora como resultado de una tormenta geomagnética con índice $Ap^* = 62$. De las dos fi-

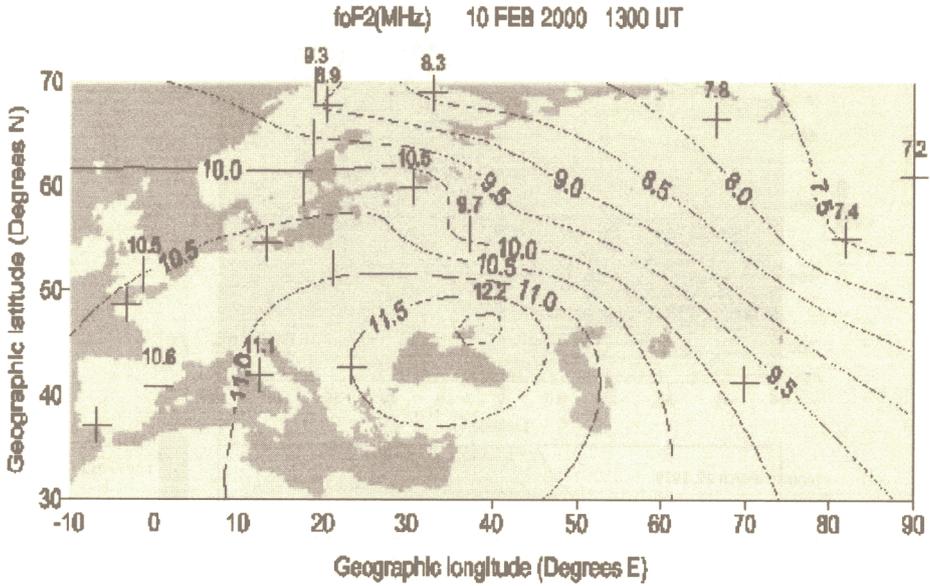


Figura 4. Isolneas de foF2 obtenidas a partir de datos instantáneos en un número limitado de estaciones en un día tranquilo a las 13 UT (Información de Lj. Cander, Rutherford-Appleton Laboratory, Reino Unido).

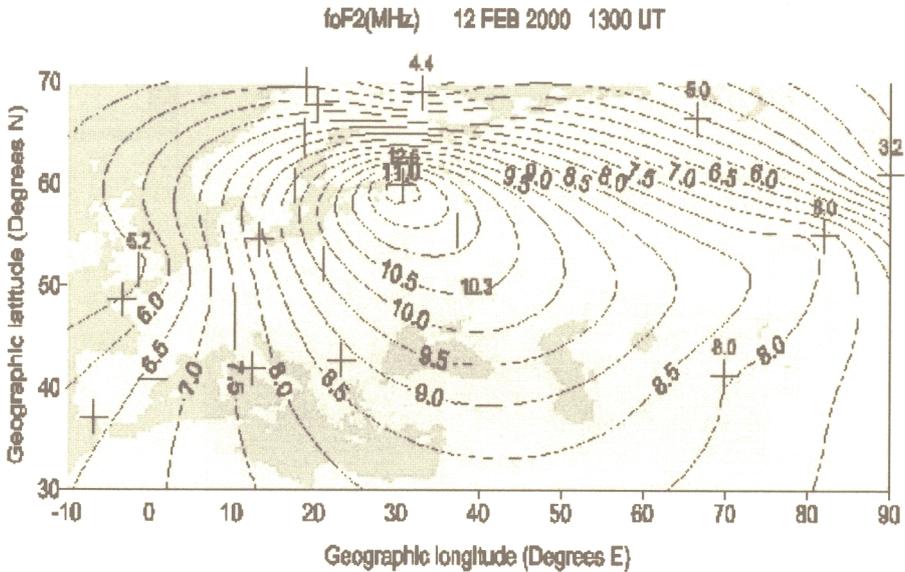


Figura 5. Isolneas de foF2 obtenidas a partir de datos instantáneos en un número limitado de estaciones en un día geomagnéticamente perturbado, a las 13 UT (Información de Lj. Cander, Rutherford-Appleton Laboratory, Reino Unido).

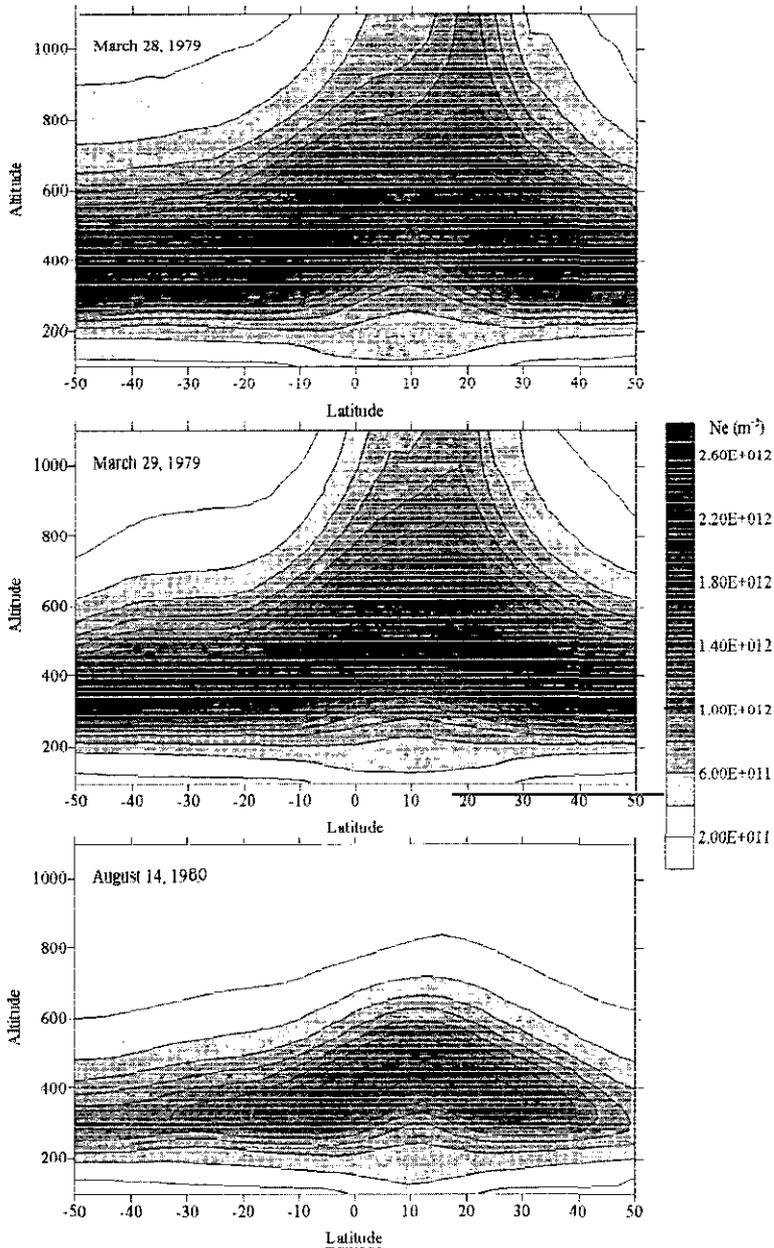


Figura 6. Reconstrucción del corte longitudinal de la densidad electrónica en función de la altura para las 11h LT y dos días geomagnéticamente activos (28 y 29 marzo 1979) y un día tranquilo (14 agosto 1980). Basado en datos de sondeos ionosféricos desde el satélite Intercosmos 19 (Nava et al., 2000).

guras puede observarse nuevamente que en la región europea el efecto de la tormenta ionosférica es una disminución notable de los valores de foF2 en el día de la tormenta, y un substancial aumento de los gradientes espaciales de dichos valores.

La complejidad de la meteorología ionosférica puede verse también con el comportamiento de la ionosfera de bajas latitudes como respuesta a perturbaciones geomagnéticas. La Figura 6 muestra la reconstrucción de la densidad electrónica en un corte longitudinal en la región europea-africana, aproximadamente a las 11 LT, hecha por Nava et al. (2000) utilizando datos de sondeos ionosféricos desde el satélite Intercosmos 19. Los dos paneles superiores de la figura, que corresponden a condiciones de actividad geomagnética alta ($Ap^* = 70$), muestran claramente un notable ensanchamiento de la ionosfera de bajas latitudes en correspondencia con la «anomalía ecuatorial», con la presencia de gradientes horizontales y verticales de la densidad electrónica muy pronunciados. Se llama *anomalía ecuatorial* el comportamiento de la región F de la ionosfera en bajas latitudes que muestra una simetría con respecto al ecuador geomagnético, con máximos o crestas de densidad electrónica a ambos lados de él. El panel inferior de la figura muestra la reconstrucción a la misma hora pero en un día geomagnéticamente tranquilo. En este caso no se nota el ensanchamiento a bajas latitudes y también los gradientes observados son menores.

Como ya se ha mencionado, no se ha encontrado aún una relación cuantitativa clara entre las tormentas geomagnéticas y las ionosféricas. Esto es evidente en la Figura 7 en donde se muestra la variación de foF2 observada desde Slough durante el mes de agosto de 1950, que presenta dos tormentas geomagnéticas aisladas en los días 7-8 y 19-20. El índice de actividad geomagnética Ap^* fue en el primer caso de 96 y en el segundo de 203. Esta última tormenta fue una de las 20 mayores jamás medidas. Se puede notar que la respuesta ionosférica a estas dos tormentas geomagnéticas de intensidad tan distinta no ha sido sustancialmente diferente.

Además de las alteraciones de la distribución normal de la densidad electrónica que pueden ser claramente asociadas a la actividad geomagnética, existe una serie de irregularidades y estructuras ionosféricas de escalas que van desde 1 km a 100 y 1000 km y que aparecen en cualquier momento y lugar. Estas estructuras, que forman parte de los fenómenos meteorológicos ionosféricos, aparecen como condensaciones o burbujas en el plasma ionosférico que se propagan, y que pueden ser causadas por diversos mecanismos físicos.

Otro fenómeno de origen ionosférico caracterizado por una variabilidad temporal y espacial muy grande es el del centelleo de las señales de radio que atraviesan la ionosfera. Este fenómeno está asociado a la presencia de irregularidades de la densidad electrónica, generadas por complejas inestabilidades ionosféricas vinculadas a los sistemas de corrientes eléctricas muy variables en el tiempo que se encuentran en la alta atmósfera. El centelleo se observa con ma-

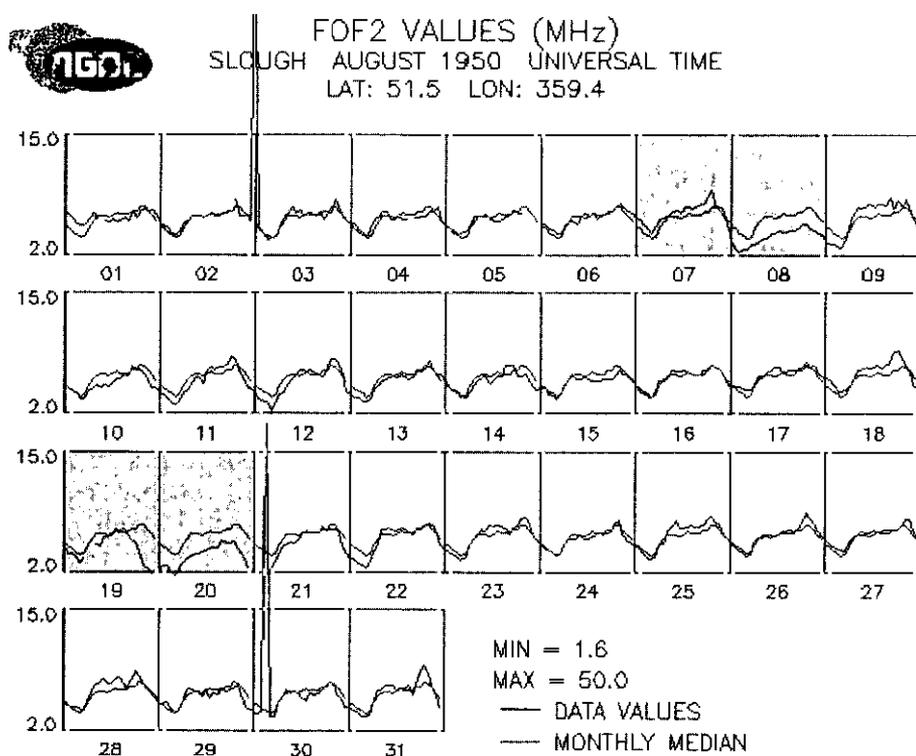


Figura 7. Variación de foF2 observada desde Slough en el mes de agosto de 1950 (esta figura ha sido generada usando información gráfica del NOAA Space Physics Interactive Data Resources). Los días de tormenta aparecen sombreados (Tomado del Informe interno del Equipo de Expertos Ionosféricos Europeos de la ESA)

yor frecuencia e intensidad en las regiones ecuatoriales geomagnéticas entre las dos crestas de la anomalía ecuatorial de la ionosfera presentando una variabilidad día a día muy grande y compleja. Este fenómeno ocurre más frecuentemente durante alta actividad solar pero su relación con la actividad geomagnética no es clara. En las regiones de altas latitudes se observan también episodios de centelleo muy intenso que están relacionados con el movimiento de grandes estructuras de plasma. La variabilidad del fenómeno del centelleo de las señales de un satélite GPS que puede verse en la Figura 8 muestra la variación temporal del índice S4, que mide la intensidad del centelleo en amplitud de la señal durante una noche a partir de mediciones realizadas desde Tucumán, Argentina, en la zona de la anomalía ecuatorial de la ionosfera. Los valores de S4 van desde 0 (ausencia de centelleo) hasta 1 (condiciones de pérdida total de la señal por efecto del centelleo). Un valor superior a 0.5 indica la presencia de fuerte centelleo.

3. NECESIDAD DE UN MAYOR CONOCIMIENTO FÍSICO DE LA METEOROLOGÍA IONOSFÉRICA

Para poder llegar a predecir los cambios meteorológicos en la ionosfera bajo el efecto de la actividad solar y geomagnética, como parte del problema general de la meteorología espacial, se hace necesario conocer de manera cada vez más completa los procesos físicos que controlan dichos cambios. En relación a las perturbaciones ionosféricas tratadas en el punto anterior pueden destacarse los siguientes campos de investigación que requieren una particular atención.

- Relación cualitativa y cuantitativa entre las tormentas geomagnéticas y las tormentas ionosféricas.
- Variabilidad día a día de las irregularidades y estructuras ionosféricas de distinta escala, su evolución temporal y espacial y los mecanismos que las generan.

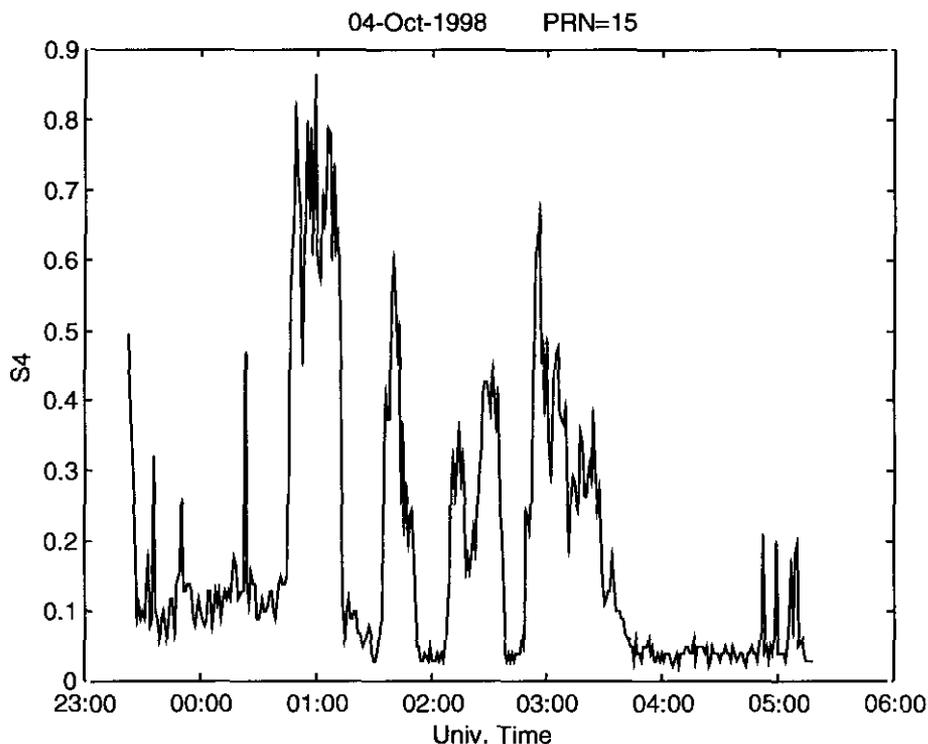


Figura 8. Variación temporal en UT del índice S4 de centelleo en amplitud a lo largo de la órbita del satélite GPS PRN-15, durante una noche de observaciones desde Tucumán, Argentina, (26.9°S, 294.6°E) (Tomado del Informe interno del Equipo de Expertos Ionosféricos Europeos de la ESA).

- Interacciones entre magnetosfera, atmósfera neutra e ionosfera que controlan la formación y la evolución de las irregularidades que producen el centelleo de señales que atraviesan la ionosfera.

Debe tenerse en cuenta además que, a la base del estudio de las perturbaciones ionosféricas, está la necesidad de modelar de la manera más real posible la distribución espacial y temporal de la densidad electrónica y de otros parámetros ionosféricos para reproducir sus variaciones climáticas. La climatología de la densidad electrónica es el punto de partida para la predicción de los cambios meteorológicos. Los esfuerzos ya realizados en los últimos años en el campo de la modelización ionosférica permiten obtener una descripción razonablemente correcta del comportamiento latitudinal, estacional, diario y con la actividad solar de la densidad electrónica. Se pueden destacar los esfuerzos del Grupo de Trabajo Internacional del COSPAR y de la URSI para la Ionosfera Internacional de Referencia (IRI) que realiza una costante tarea para mejorar el modelo de referencia IRI (Bilitza, 1990), el desarrollo de modelos parametrizados como el PIM (Daniell et al., 1995) en los Estados Unidos de Norteamérica, y los modelos que se han obtenido en Europa en el marco de las acciones COST y de las actividades de la Agencia Espacial Europea (ESA) (Hochegger et al., 2000; Radicella y Leitinger, 2000). En la actualidad se hace necesario aumentar la capacidad de dichos modelos para ser adaptados a condiciones de tiempo real, con parámetros de ajuste obtenidos utilizando un número reducido de observaciones solares, geomagnéticas e ionosféricas. De esta manera, los modelos deberían ser capaces de reproducir las perturbaciones ionosféricas y, finalmente, llegar a predecirlas.

4. LOS EFECTOS DE LA METEOROLOGÍA ESPACIAL Y EN PARTICULAR DE LA IONOSFÉRICA

Los fenómenos englobados en la meteorología espacial en general, o ionosférica en particular, que se han mencionado en las páginas anteriores ocurren en el presente como en el pasado. Su efecto sobre las actividades humanas se ha incrementado de manera substancial desde que se hace un uso masivo de sistemas tecnológicos de alta sofisticación en campos como el transporte y las comunicaciones. Estos sistemas, debido a la desregulación de los servicios, a la internacionalización de la información y a la globalización de la economía, están operando en condiciones tales que el más mínimo fallo causado por un fenómeno espacial puede quebrar la operación del sistema involucrado con consecuencias a veces catastróficas.

Los efectos de fenómenos meteorológicos espaciales cubren una vasta gama de casos. Estos comprenden desde los efectos de eventos protónicos solares sobre los lanzamientos de satélites, en cuanto pueden provocar serios daños a los sistemas de control de navegación durante el lanzamiento, hasta la

operación de los satélites ya en órbita, debido a la acción de la radiación de alta energía sobre los elementos de microelectrónica de las cargas útiles del satélite. Los fenómenos solares y geomagnéticos perturban también las órbitas mismas de los satélites debido a sus efectos sobre la atmósfera terrestre y pueden ser de gran peligrosidad para los tripulantes de misiones espaciales. Las tormentas geomagnéticas pueden afectar severamente la operación de grandes redes de distribución de electricidad y de oleoductos en regiones de alta latitud, al generarse en ellos sistemas de corrientes eléctricas anómalas.

Teniendo en cuenta el enfoque de este trabajo, se describirán a continuación los efectos que pueden ser relacionados más directamente con los fenómenos meteorológicos ionosféricos.

4.1. Sistemas de comunicaciones tierra-tierra:

- *Comunicaciones en la banda de las altas frecuencia (HF)*

Las comunicaciones por ondas de radio en alta frecuencia (HF) entre 1.6 y 30 MHz han sido consideradas, en muchos ambientes, como un medio de comunicaciones en vías de extinción. Sin embargo, un análisis más correcto de la situación muestra que el uso de estos sistemas se mantiene elevado tanto en el ámbito militar como en el civil, por razones de costo o de falta de disponibilidad o seguridad de sistemas satelitales de comunicaciones o de otros sistemas alternativos.

Los sistemas más modernos de comunicaciones en HF utilizan técnicas que permiten establecer de manera automática el enlace entre dos puntos distantes (ALE). Los sistemas ALE trabajan según el siguiente esquema: (1) Uno de los terminales hace una llamada en una frecuencia entre un conjunto de frecuencias predeterminado; (2) El otro terminal está escuchando permanentemente y en manera secuencial esas frecuencias; (3) Cuando el receptor capta la señal del transmisor emite una respuesta en el mismo canal, es decir en la misma frecuencia, y queda establecido el enlace. En caso contrario, al no recibir respuesta el transmisor pasa a otras frecuencias hasta recibir una respuesta.

Reducir el número de frecuencias preestablecidas por medio de modelos de propagación basados en el conocimiento que se tiene de la ionosfera, reduce los costos y aumenta la eficiencia del sistema.

Los fenómenos meteorológicos ionosféricos pueden afectar notablemente las comunicaciones en HF. Los SID, que ocurren en presencia de una fulguración solar, provocan un aumento de la absorción de las señales debido al incremento brusco de la densidad electrónica en la región D de la ionosfera que es responsable de la mayor parte de la absorción ionosférica. En algunos casos la absorción es tal que las comunicaciones en HF quedan interrumpidas en una gama muy extensa de frecuencias. Las tormentas ionosféricas a su vez pueden alterar sustancialmente las frecuencias utilizables para las comunicaciones entre dos puntos. La capacidad de predecir en tiempo casi real la ocurrencia de

tormentas ionosféricas puede mejorar notablemente la eficiencia de los sistemas ALE, reduciendo el tiempo de búsqueda de la frecuencia para el enlace entre dos puntos y determinando conjuntos de frecuencias de alternativas para mejorar la confiabilidad del sistema.

- *Comunicaciones en bandas de frecuencias superiores a las HF:*

Generalmente las señales de radio en frecuencias muy alta (VHF) no son reflejadas por la ionosfera, no pudiéndose establecer comunicaciones tierra-tierra utilizando dichas frecuencias. Sin embargo, durante períodos de alta actividad solar en ciclos solares de gran amplitud como en los dos anteriores al presente, es decir los número 21 y 22, las comunicaciones en la banda de VHF son posible en bajas latitudes y durante equinoccios. Estas comunicaciones ocurren también durante la presencia de auroras polares en regiones de alta latitud. Son bastante comunes además cuando se observan nubes de electrones en la región E conocidas como E-esporádica.

A pesar que hay relación entre las comunicaciones en VHF y los fenómenos de meteorología ionosférica, la misma ha sido poco estudiada hasta ahora.

4.2. Sistemas de comunicaciones espaciales

- *Comunicaciones comerciales:*

Los futuros sistemas comerciales de comunicaciones vía satélite, tipo IRI-DIUM, Global Star, Teledesic y otros, que utilizan frecuencias muy superiores a los 30 MHz y están integrados por constelaciones de satélites a diferentes alturas orbitales, podrían ser afectados por la ocurrencia del centelleo de sus señales y la presencia de estructuras como las burbujas ecuatoriales, ambos fenómenos meteorológicos ionosféricos.

También las comunicaciones satélite-aeronave en 1.6 GHz, del tipo de las realizadas mediante los satélites geoestacionarios INMARSAT, son afectadas por el centelleo ionosférico que llega a producir atenuaciones de la señal mayores que 20 dB en zonas ecuatoriales durante la noche, y del orden de 10 dB en zonas polares.

- *Sistemas de navegación satelital:*

Debido a la importancia de los sistemas de navegación satelital y de su dependencia de la propagación de ondas de radio a través de la ionosfera, el impacto de los fenómenos ionosféricos ya mencionados es uno de los efectos más importantes de la meteorología ionosférica.

La propagación de las ondas de radio entre un satélite y la tierra es afectada por el número de electrones que encuentra la señal en su recorrido, es decir

que depende del contenido electrónico total, TEC. Cuando esta señal es utilizada para el posicionado en tierra, mar o aire, la presencia de la ionosfera introduce un error de posición proporcional al TEC. Por otra parte, el centelleo de las señales de los satélites puede llegar a producir una pérdida total de las señales por la fuerte atenuación de la misma, tanto en zonas ecuatoriales como en las regiones de altas latitudes, donde el fenómeno es más frecuente e intenso.

Los sistemas de satélites GPS norteamericano y GLONASS ruso, nacidos para uso militar y basados sobre la emisión desde los satélites de dos frecuencias en la banda de 1.2-1.6 GHz, son utilizados para uso civil también en la modalidad de recepción de una sola frecuencia. Mientras que la utilización de dos frecuencias permite corregir casi íntegramente el error introducido por la ionosfera, el uso de una sola frecuencia implica un posible error de posición del orden de los 30 m. Este error depende críticamente de las condiciones ionosféricas, es decir, de los fenómenos meteorológicos que ocurren en la ionosfera.

Tanto los Estados Unidos de Norteamérica como Japón y Europa han establecido nuevos proyectos que permiten optimizar el uso de los sistemas GPS y GLONASS ya existentes con la adición de satélites geoestacionarios en los llamados Satellite Based Augmentation Systems. De esta manera se podrá llegar al aterrizaje de aviones comerciales con el único auxilio de la posición de la aeronave dada por las señales satelitales. Tanto el sistema europeo EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) como los otros dos mencionados, tienen como objetivo la reducción del error de medida de posición debido principalmente a la presencia de la ionosfera. Para asesorar en los aspectos vinculados a los efectos ionosféricos del diseño del sistema, la Agencia Espacial Europea ha designado un equipo de expertos ionosféricos europeos, bajo la coordinación del autor de este artículo. Dicho equipo ha producido una serie de escenarios de condiciones ionosféricas que permiten simular los efectos de las tormentas ionosféricas sobre los errores de posición y sobre los algoritmos que utilizará el sistema EGNOS para la transmisión de los errores a los usuarios. La tarea del equipo de expertos es pronosticar todas las condiciones meteorológicas ionosféricas extremas que deben ser previstas para confirmar la robustez de dichos algoritmos.

5. CONCLUSIONES

Se puede afirmar que el uso de sistemas tecnológicos de alta sofisticación ha puesto de manifiesto la importancia del conocimiento de las variaciones meteorológicas del ambiente espacial de la tierra. Así como la producción de alimentos, factor esencial para la vida humana, depende críticamente de las condiciones meteorológicas de la baja atmósfera, el uso eficiente de sistemas de alta tecnología, esenciales para la sociedad moderna, depende del conocimiento de las condiciones del ambiente espacial. En particular, las condiciones de la ionosfera controlan el funcionamiento de una vasta gama de comunicaciones

vía radio y sistemas modernos de navegación satelital. La optimización del uso de estos sistemas de comunicaciones y navegación depende crucialmente de la capacidad de comprender y predecir los cambios meteorológicos que ocurren en la ionosfera.

6. REFERENCIAS

- BILITZA, D. (Editor), (1990): «International Reference Ionosphere» 1990, *NSSDC 90-22*, Greenbelt, Maryland.
- DANIELL, R. E., JR.; BROWN, L. D.; ANDERSON, D. N.; FOX, M. W.; DOHERTY, P. H.; DECKER, D. T.; SOJKA, J. J., and Schunk, R. W. (1995): Parameterized ionospheric model: A global ionospheric parameterization based on First Principles Models, *Radio Sci.*, 30, 1499-1510.
- HOCHEGGER, G.; NAVA, B.; RADICELLA, S., and LEITINGER, R. (2000): «A family of ionospheric models for different uses», *Physics And Chemistry Of The Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science* (25) 4, 307-310.
- NAVA, B.; RADICELLA, S. M.; PULINETS, S., and DEPUEV, V. (2000): «Modelling bottom and topside electron density and TEC with profile data from topside ionograms», *Advances on Space Research* (en prensa).
- RADICELLA, S. M., and LEITINGER, R. (2000): «The evolution of the DGR approach to model electron density profiles», *Advances on Space Research* (en prensa).