

Aplicaciones en la investigación ionosférica de datos procedentes de sondeos de incidencia vertical y receptores GPS

G. MIRÓ AMARANTE^a, K. ALAZO^b, L. CIRAOLO^c, S. M. RADICELLA^d

^a Dpto. de Tecnología Electrónica, Escuela Universitaria Politécnica, Universidad de Sevilla, C. Virgen de África, 7, 41011, Sevilla (España)

^b I. de Geofísica y Astronomía, Calle 212, N. 2906, C. Habana 11600, Cuba

^c I. di Fisica Applicata Carrara, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze, Italia

^d Aeronomy and Radiopropagation Laboratory, Abdus Salam ICTP, Strada Costiera 11, 34014, Trieste, Italy

(Recibido, 18 febrero 2008; recibido en forma revisada, 28 febrero 2008; aceptado, 31 marzo 2008)

RESUMEN

En la actualidad, existen diversos Centros de Datos Ionosféricos accesibles a través de Internet. Uno de estos centros ha sido desarrollado por la Universidad de Massachusetts-Lowell. El conjunto de características ionosféricas (f_oF2 , f_oF1 , $M(3000)F2$, etc) junto con los perfiles de densidad electrónica provenientes de un elevado número de digisondas extendidas por todo el mundo, están disponibles on-line mediante el software diseñado por este Centro. Una visión complementaria de la Ionosfera se puede obtener mediante observaciones recogidas por la red mundial de receptores GPS. A través de estas dos fuentes de datos es posible desarrollar numerosos estudios y permiten abrir una gama amplia de aplicaciones. En este trabajo se abordan de forma resumida algunas investigaciones realizadas recientemente a partir de estos datos por los autores de este artículo.

Palabras claves: Digisonda, Sistema de Posicionamiento Global GPS, tratamiento de datos, aplicaciones.

ABSTRACT

Currently ionospheric data are available via Internet through different World Data Centers. One of these databases has been developed by the University of Massachusetts-Lowell. Measurements of ionospheric characteristics (f_oF2 , f_oF1 , $M(3000)F2$, etc) and electron density profiles obtained from digisondes extended around the world are available on-line by means of the software designed by this Center. GPS observations obtained from the worldwide network of receivers are also useful to study the ionospheric behaviour. Many studies and applications can be developed from these two data sources. This paper shows briefly studies which were recently published by the authors of this work.

Key words: Digisonde, Global Positioning System GPS, data processing, applications.

1. INTRODUCCIÓN

Durante décadas, la obtención de datos ionosféricos a partir de sondeos efectuados con instrumentos localizados sobre la superficie terrestre y distribuidos por todo el planeta, ha posibilitado el desarrollo de numerosos estudios científicos con multitud de aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones y de los sistemas de navegación y posicionamiento satelital.

El proceso de distribución y transferencia de estos datos se ha mejorado notablemente en los últimos años con la posibilidad de acceder a través de Internet a muchos de estos sondeadores. De esta forma, las principales características ionosféricas (f_oF2 , f_oF1 , f_oE , $h'F2$, $h'F1$, $h'E$, etc.) y los perfiles de densidad electrónica ($N(h)$) están disponibles fácilmente.

En los últimos años, los autores de este artículo han llevado a cabo diversos estudios a partir de datos ionosféricos procedentes de sondeos terrestres y de satélites Global Positioning System, GPS. En este trabajo, se describen en primer lugar, algunos centros de distribución de datos ionosféricos procedentes de sondeadores terrestres y se detallan algunas de las técnicas utilizadas para su procesamiento y tratamiento. De forma similar, se trata el tema de los datos GPS. Posteriormente, se explican dos modelos de perfiles de densidad electrónica, IRI y NeQuick. En las últimas secciones, se presenta de forma resumida una selección de los trabajos más recientes realizados por los autores de esta publicación y relacionados con algunas de las aplicaciones que estos datos ionosféricos permiten.

2. DISPONIBILIDAD DE DATOS PROCEDENTES DE SONDEADORES TERRESTRES

A nivel mundial son muchos los centros que ofrecen servicios para uso comercial y científico relacionados con la Ionosfera: los World Data Centers (<http://www.ngdc.noaa.gov/wdc/wdcmain.html>), los Space Physics Interactive Data Resources SPIDR (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>), el Space Environment Center SEC (<http://www.sec.noaa.gov/>), el UMass Lowell Center for Atmospheric Research UMLCAR (<http://ulcar.uml.edu/index.html>), los Northwest Research Associates NWRA (http://www.nwra-az.com/nwra_spawx.html), y el Ionospheric Prediction Service IPS (<http://www.ips.gov.au>), etc.

En Europa, podemos destacar dos instituciones que ofrecen servicios para los usuarios ionosféricos: El laboratorio Rutherford Appleton en Reino Unido (http://www.wdc.rl.ac.uk/cgi-bin/digisondes/cost_database.pl) y el Space Research Centre en Polonia (<http://www.cbk.waw.pl/rwc>).

En general, estos centros agrupan las características ionosféricas que se obtienen con los sondeadores de incidencia vertical. Estos equipos de sondeos ionosféricos miden la estructura y propiedades de las capas ionosféricas y se localizan en estaciones ionosféricas extendidas por todo el mundo. Muchas de estas estaciones tienen la capacidad de escalar automáticamente las principales características ionosféricas, reconstruir los perfiles de densidad electrónica y transmitirlos en tiempo real.

Algunos modelos de ionosondas son: Advanced Ionospheric Sounder AIS-INGV (Zuccheretti, *et al.*, 2003); BIZON (Ionosonde Network Advisory Group Bulletin, 1994); Canadian Advanced Digital Ionosonde CADI, <http://www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/uag-104/text/macdoug.html> (Gao and MacDougall, 1991; MacDougall, *et al.*, 1995); Digisonde 256 (Bibl and Reinisch, 1978) y Digisonde Portable Sounder, DPS (Reinisch, 1996), <http://ulcar.uml.edu/digisonde.html>; Dynasonde, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/Dynasonde/>; IPS-71, (Ionosonde Network Advisory Group Bulletin, 1993).

3. TRATAMIENTO DE DATOS PROCEDENTES DE SONDEADORES TERRESTRES

El estudio de la Ionosfera desde sistemas de observación terrestre se basa en la reflexión total de las ondas de radio con transmisores y receptores ubicados en la superficie. La mayoría de las técnicas terrestres de observación de la Ionosfera, están limitadas tanto por la parte superior, debido a la altura del máximo de la capa F_2 , como por debajo, debido a la poca información que ofrece la capa D . Existen además, situaciones especiales como la aparición de la capa E_s ocultante, que impide detectar las características de las capas superiores.

Los datos utilizados en los estudios que se presentarán en las próximas secciones proceden principalmente de las digisondas diseñadas por el UMass Lowell Center for Atmospheric Research (UMLCAR). A continuación, se describirán algunas de las técnicas y programas informáticos para el tratamiento de datos ionosféricos diseñados en este Centro.

La información recogida por las digisondas se representa en imágenes conocidas como ionogramas (Fig. 1). Para facilitar el intercambio y almacenamiento de los datos procedentes de ionogramas el Ionospheric Informatics Working Group (IIWG) desarrolló el formato Standard Archiving Output, SAO (Reinisch, 1998). Este formato está recomendado por la Commission G de la International Union of Radio Science, URSI y actualmente es usado por la mayoría de las ionosondas.

Los ionogramas obtenidos son editados con el programa informático Sao-Explorer (<http://ulcar.uml.edu/SAO-X/SAO-X.html>). Esta herramienta permite verificar el escalado automático (Automatic Real Time Ionogram Scaler with True Height, ARTIST, Reinisch and Huang, 1983) y corregir manualmente los posibles errores de interpretación. Además, ofrece una gran variedad de representaciones gráficas de las características ionosféricas para facilitar su posterior interpretación y análisis.

Recientemente, el UMLCAR ha desarrollado la base de datos Digital Ionogram DataBase DIDBase (Reinisch, *et al.*, 2004; <http://umlar.uml.edu/DIDBase/>) que agrupa un gran número de archivos de sondeos ionosféricos. El número de características ionosféricas se situaba a mediados del año 2007 en 168.892.663. Desde esta base de datos, los usuarios pueden descargar no sólo parámetros ionosféricos, sino ionogramas y perfiles de densidad electrónica de estaciones distribuidas por todo el

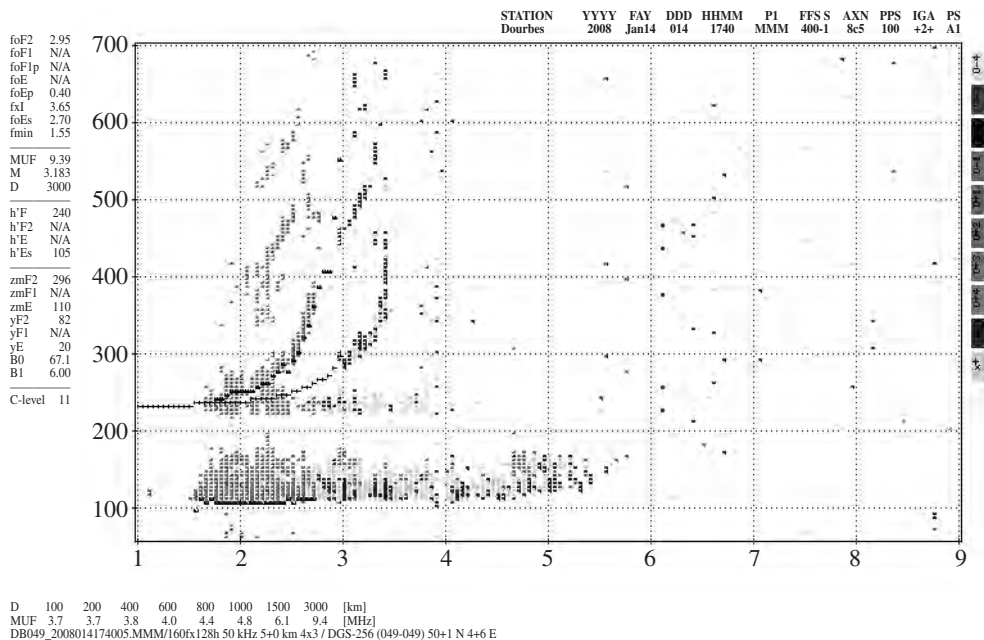


Figura 1.- Ionograma obtenido el 14 de enero de 2008 en la estación ionosférica de Dourbes (Bélgica).

planeta (<http://ulcar.uml.edu/stationmap.html>). Una característica muy importante de este servicio es la posibilidad que tienen algunos usuarios con acceso autorizado, entre los que se encuentran dos de los autores de este artículo y que en total suman alrededor de 25, para corregir y reescalar ionogramas de forma remota. De esta forma, pueden encontrarse múltiples interpretaciones para un mismo ionograma. Las características ionosféricas se extraen de la “mejor” interpretación dependiendo de una clasificación que se basa en la experiencia del editor y en determinados niveles de calidad.

4. DISPONIBILIDAD DE DATOS DE GPS

Además, el estudio de la Ionosfera terrestre ha sido complementado con sistemas de observación desde el espacio a través de cohetes, satélites o globos. En concreto, vamos a tratar datos obtenidos a partir de los sistemas de satélites de posicionamiento global.

La principal fuente de datos GPS es a través del International GNSS Service (IGS) (Beutler *et al.*, 1999), que agrupa datos y productos provenientes de muchos centros regionales y mundiales (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/index.html>). Otro archivo importante, auspiciado por la University of California, San Diego (UCSD), la Scripps Institution of Oceanography (SIO) y el Institute of Geophysics and Planetary Physics (IGPP) se encuentra en <http://garner.ucsd.edu>, donde era posible

obtener datos anteriores hasta 1988. Algunas redes regionales de particular interés para las investigaciones ionosféricas son la Brazilian Network for GPS Continuous Monitoring (RMBC) (Fortes *et al.*, 1998) y el Geographical Survey Institute, de Japón (Saito and Fukao, 1998).

5. TRATAMIENTO DE DATOS DE GPS

Con los equipos de observación desde el espacio se obtiene una visión más global y sus datos están menos contrastados, aunque son sistemas más caros y complejos, sobre todo a la hora de su calibración.

El método más utilizado para la estimación del TEC en el camino satélite-receptor es a través del observable ionosférico, que resulta de la combinación de las pseudodistancias filtradas por la fase de las portadoras en un receptor de doble frecuencia, el denominado algoritmo de “levelling carrier to code”. En el TEC así estimado, aún están presentes los errores sistemáticos producidos por el hardware del transmisor y del receptor (denominado en inglés Inter-frequency biases IFB), sujetos al envejecimiento de los equipos y a variaciones de temperatura (Mannucci *et al.*, 1999).

Por lo general, en la calibración del TEC derivado de los datos GPS, se asume que los IFB del satélite y receptor son valores constantes durante 1-3 días. Un ejemplo de estrategia de calibración del GPS-TEC es el Global Ionospheric Mapping (GIM), programa informático desarrollado en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA (Mannucci *et al.*, 1998).

Recientemente, Ciruolo *et al.*, (2007) han encontrado evidencias de errores sistemáticos introducidos por este algoritmo de leveling, asociados al error del mult camino en el observable de las pseudodistancias. Por otra parte, fue detectado que el IFB del receptor tiene una significativa variabilidad diaria, de 1.4 a 8.8 TECU.

Para una estimación más exacta del GPS-TEC, dichos autores proponen cambios en el algoritmo tradicional de calibración que tomen en cuenta el efecto del mult camino y que el término del IFB sea expresado como una variable temporal.

6. PERFILES DE DENSIDAD ELECTRÓNICA. MODELOS

IRI: El modelo de densidad electrónica International Reference Ionosphere (IRI) (Bilitza, 1990) se engloba dentro de un proyecto internacional patrocinado por el Committee on Space Research (COSPAR) y la International Union of Radio Science (URSI). Se trata de un modelo empírico de la Ionosfera basado en fuentes de datos de diversa índole y ampliamente usado para diferentes aplicaciones.

Para una determinada posición, fecha y hora, IRI describe la densidad electrónica, la temperatura electrónica, la temperatura y la composición iónica y el Contenido Total Electrónico (TEC) desde una altura de 50 km hasta los 2000 km.

El modelo IRI continúa su proceso de actualización anualmente con las IRI TFA (Task Force Activity). Algunos de los trabajos presentados más adelante fueron defendidos en estas sesiones.

El programa fuente del citado modelo está disponible en lenguaje Fortran en la página: <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/ionospheric/iri/>. Además, el modelo puede ejecutarse directamente on-line en la página IRIweb: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/iri.html>

NeQuick: El NeQuick es un modelo ionosférico de densidad electrónica desarrollado por el laboratorio ARPL- The Abdus Salam ICTP (Italia) y la Universidad de Graz (Austria). Se trata de un modelo quick-run para aplicaciones ionosféricas que ha sido adoptado en las especificaciones ionosféricas dentro del proyecto EGNOS de la Agencia Espacial Europea y recomendado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (Recomendación P.531-6, ITU-R, actualmente conocida como P.531-7; ITU, 2001). Dos de los parámetros que se introducen como entradas son los valores de foF2 y M(3000)F2 que se obtienen experimentalmente desde sondeos de incidencia vertical o bien modelados a partir de extensas bases de datos. La salida es la concentración electrónica de la Ionosfera en función de la altura, latitud y longitud geográfica, actividad solar, estación del año (mes) y hora (Tiempo Universal, UT o Local, LT). El modelo permite también calcular la concentración electrónica a lo largo de un rayo y el Contenido Total Electrónico (TEC) oblicuo y vertical.

7. INVESTIGACIÓN IONOSFÉRICA A PARTIR DE DATOS DE SONDEOS TERRESTRES Y RECEPTORES GPS

A continuación se presentan de forma resumida algunas de las investigaciones más recientes desarrolladas por los autores de este artículo y relacionadas con las diversas aplicaciones a partir de las distintas fuentes de datos ionosféricos.

A: Validación de un método de reconstrucción de densidad electrónica en la Ionosfera con datos de incidencia vertical correspondientes a períodos de calma y tormenta geomagnética (Miró Amarante *et al.*, 2005)

En este trabajo, se presenta una validación (una versión preliminar se hizo en Miró Amarante *et al.*, 2003) de una técnica de ingestión de datos basada en el Contenido Total Electrónico (TEC) y desarrollada a partir del modelo de densidad electrónica NeQuick y del *parámetro de ionización efectiva* Az (Nava *et al.*, 2003). La importancia del parámetro TEC se centra en el hecho de ser directamente proporcional al retardo que experimentan las señales electromagnéticas por lo que un buen conocimiento de éste tiene aplicación en el campo de la navegación y el posicionamiento satelital para una sola frecuencia.

El método usado para la validación se basa en la comparación de valores de pico horarios (la frecuencia crítica, foF2 y la altura del máximo, hmF2) medidos con las digisondas y extraídos con el software Sao-Explorer y aquellos calculados con la nueva técnica de ingestión de datos. El valor de Az en cada punto se determina haciendo mínimas las diferencias entre los mapas globales de TEC vertical experimentales y los calculados con la técnica de ingestión. Los mapas experimentales de TEC vertical utilizados para la minimización fueron generados con dos técnicas

diversas, una desarrollada por el Centre for Orbits DEterminations, CODE (<http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>) y otra por la Universidad de La Plata en Argentina (Meza *et al.*, 2002; Brunini *et al.*, 2004).

A partir del mapa de Az obtenido se calcula el perfil de densidad electrónica mediante el modelo NeQuick y los parámetros de pico foF2 y hmF2. Este cálculo se realiza para varias estaciones ionosféricas distribuidas a lo largo del planeta y diferentes condiciones horarias, estaciones del año, actividad solar y geomagnética. El número total de ionogramas escalados manualmente asciende a 8300.

Las Figs. 2 y 3 muestran el caso de Millstone Hill (Hemisferio Norte y latitud media) y Grahamstown (Hemisferio Sur) para calma geomagnética y tormenta geomagnética respectivamente. En estas figuras se comparan los valores de frecuencia crítica experimentales (foF2SAO) y los calculados a partir del mapa CODE (foF2CODE) y de La Plata (foF2LAPLATA).

Los resultados más relevantes obtenidos en este trabajo pueden resumirse en:

- La frecuencia crítica foF2 calculada mediante la técnica de ingestión se ajusta muy bien a los valores experimentales durante períodos de calma geomagnética y actividad solar media y alta. Este resultado se mantiene también para la tormenta de Noviembre de 2003.
- Para el caso de la altura máxima hmF2, el ajuste es peor sobre todo en el caso de alta actividad solar.
- Los resultados obtenidos no dependen de la técnica utilizada para calcular los mapas globales de TEC vertical, CODE y La Plata.

Con todo ello, se demuestra que la nueva técnica de ingestión de datos puede utilizarse para construir escenarios que reproduzcan condiciones ionosféricas globales y que se aproximen bastante a la realidad.

B: Uso de las técnicas de trazado de rayo en modelos para investigar la caracterización del canal ionosférico (Miró Amarante *et al.*, 2007b)

Los principales parámetros que caracterizan el canal ionosférico son la frecuencia de transmisión, el ángulo de elevación, el retardo de grupo, el rango y el apogeo. Estos parámetros pueden calcularse a partir de técnicas de trazado de rayos. La técnica utilizada para este estudio, desarrollada en lenguaje Fortran en el programa conocido como *abcray03*, se basa en los algoritmos descritos por Croft y Hoogasian (1968) y Croft (1969). Este programa ha sido diseñado expresamente para caracterizar una Ionosfera bidimensional y ha sido considerado en otros estudios para caracterización del canal ionosférico (Moorhead y Radicella, 1998; Miró, 2000; Miró *et al.*, 2002).

Para este análisis se han seleccionado diferentes condiciones horarias (0, 6, 12 y 18 LT), cuatro días de calma geomagnética (25-28 March 2000) y cinco estaciones ionosféricas: Ascension Island, Grahamstown, Jicamarca, Millstone Hill y Ramey (<http://ulcar.uml.edu/stationmap.html>). Los días seleccionados corresponden a alta actividad solar. El programa de trazado de rayos requiere como entrada los perfiles de densidad electrónica N(h). Estos perfiles que deter-

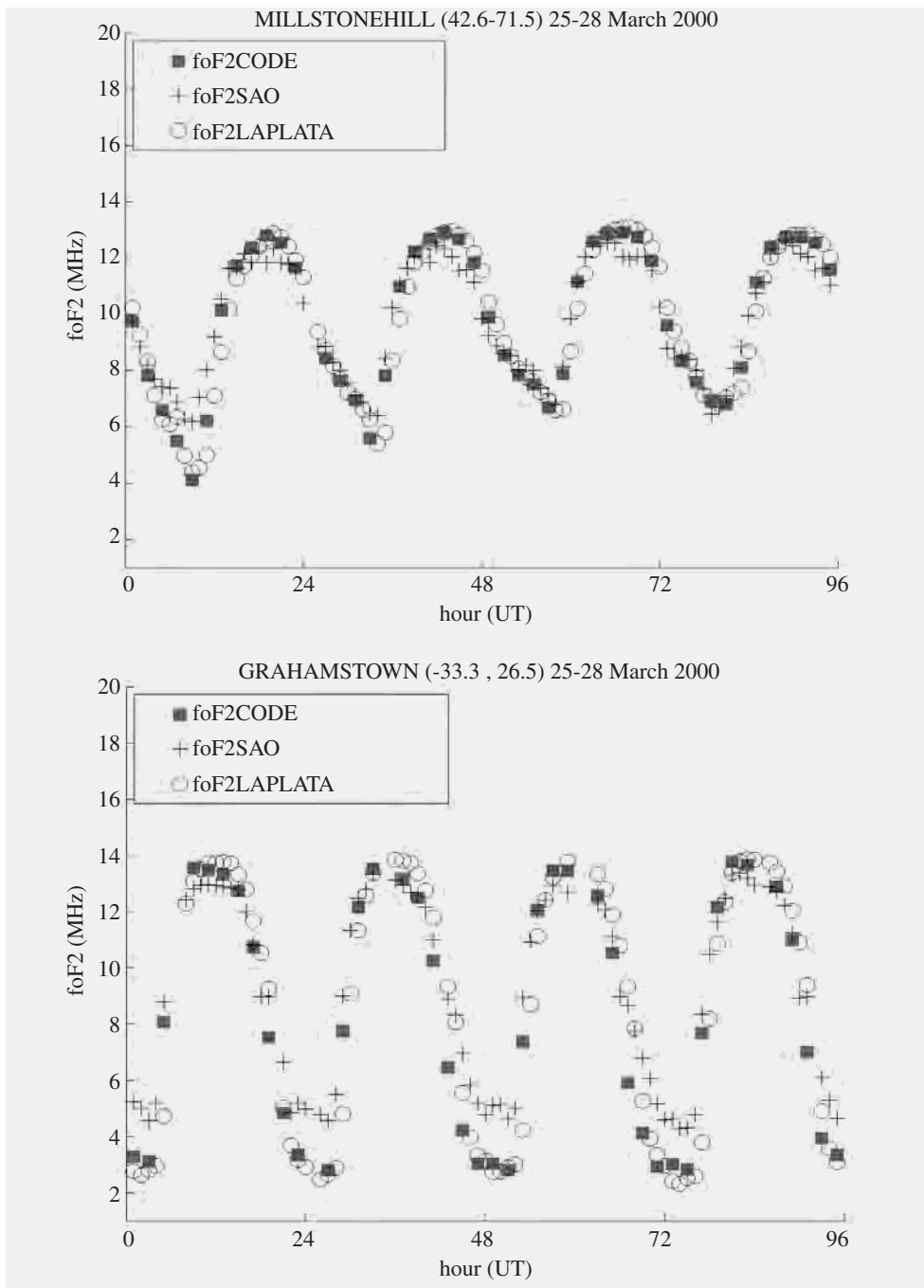


Figura 2.- Comparación de $foF2$ para Millstone Hill y Grahamstown durante Marzo de 2000 (calma geomagnética).

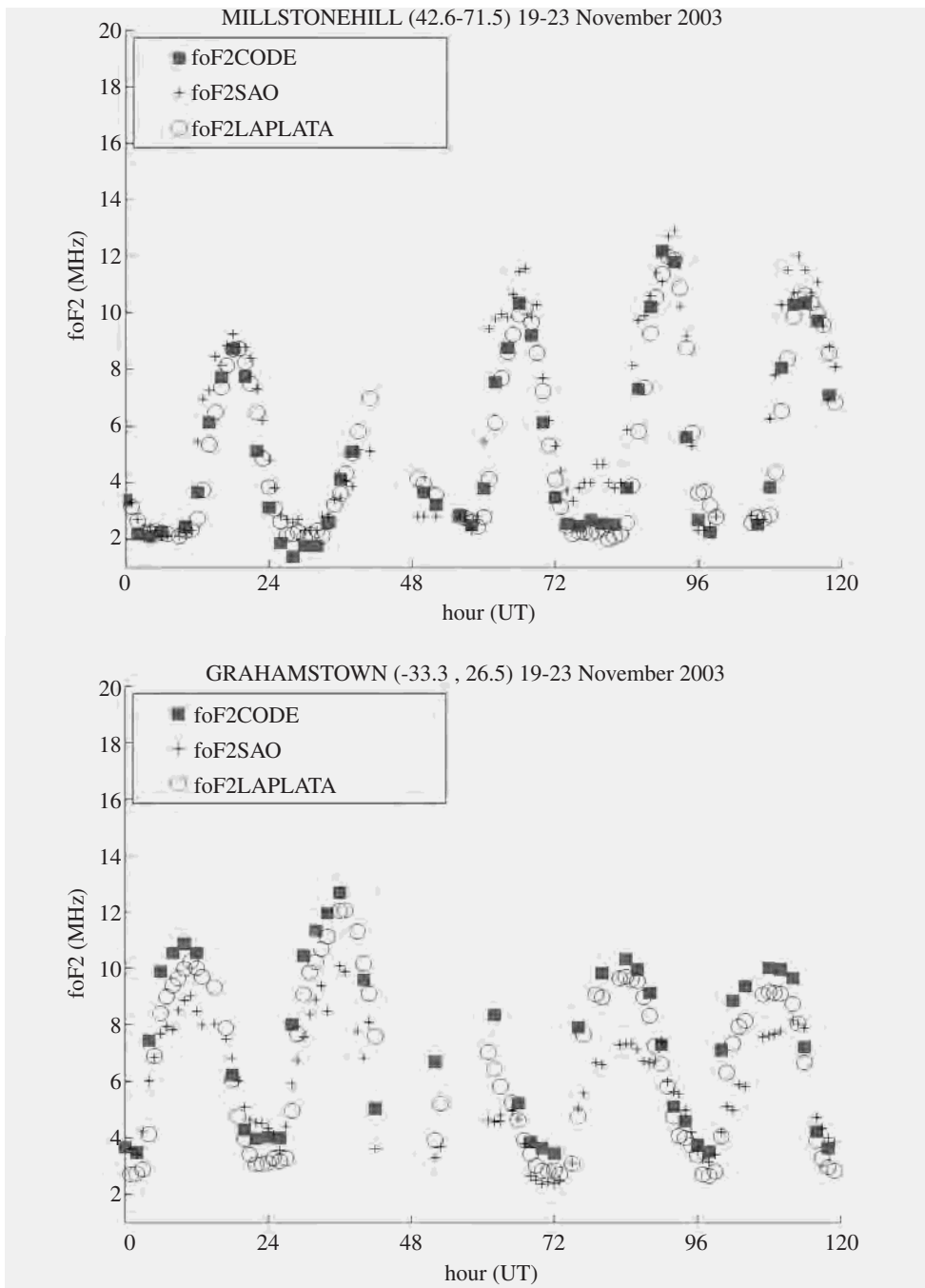


Figura 3.- Comparación de $foF2$ para Millstone Hill y Grahamstown durante Noviembre de 2003 (tormenta geomagnética).

minan las condiciones ionosféricas, han sido calculados por un lado, directamente de los datos experimentales mediante la técnica de inversión NHPC (Huang and Reinisch, 1997) y por otro de los obtenidos con los modelos IRI y NeQuick ajustados a los valores experimentales de pico (*foF2* y *M3000F2*). Los ionogramas, de los que se extraen tanto las características ionosféricas como los perfiles de densidad electrónica, han sido interpretados manualmente mediante el software Sao-Explorer.

La Fig. 4 presenta un ejemplo de los resultados obtenidos. La caracterización del canal ionosférico que se muestra corresponde a una frecuencia de transmisión de 12 MHz en la estación ionosférica de Millstone Hill. Las condiciones ionosféricas vienen determinadas por los perfiles de densidad electrónica experimentales obtenidos para cada día a las 12:00 LT. De forma similar se ha caracterizado el canal ionosférico con perfiles de densidad electrónica modelados por el IRI y el NeQuick (NQ). Agrupando todos los resultados obtenidos, se ha llevado a cabo un análisis estadístico que ha permitido comparar el comportamiento en la caracterización del canal ionosférico de los dos modelos de perfil de densidad electrónica con respecto al perfil experimental.

Las conclusiones obtenidas en este estudio podrían resumirse en (Tabla 1):

- NQ sobreestima los tres parámetros (ángulo de elevación, rango y apogeo).
- IRI subestima los tres parámetros.
- Para IRI y NQ, el valor medio de las diferencias se sitúa en 4 grados en el ángulo de elevación, 33 Km en apogeo y 4% en retardo de grupo.

Tabla 1.- Resultados estadísticos (número de casos N, media de las diferencias absolutas (Med), casos con diferencias positivas (>0) y casos con diferencias negativas (<0)) para ángulos de elevación, apogeos y retardos de grupo correspondientes al modelo NeQuick e IRI. Las casillas sombreadas muestran la sobreestimación del NQ y la subestimación del IRI.

Diferencias	NeQuick			IRI		
	Elevación (grado)	Apogeo (km)	Retardo (%)	Elevación (grado)	Apogeo (km)	Retardo (%)
N	85597	85597	85597	99530	99530	99530
Med.	4.4	32.8	4.2	3.9	33.0	3.6
>0	67.1%	59.1%	60.2%	36.6%	29.5%	24.0%
<0	32.8%	40.8%	25.6%	63.2%	70.5%	51.9%

C: Validación del modelo STORM del IRI mediante datos ionosféricos (Miró Amarante et al., 2007a)

La nueva versión del modelo de perfil de densidad electrónica IRI incluye una corrección empírica para las situaciones de tormentas ionosféricas: el modelo

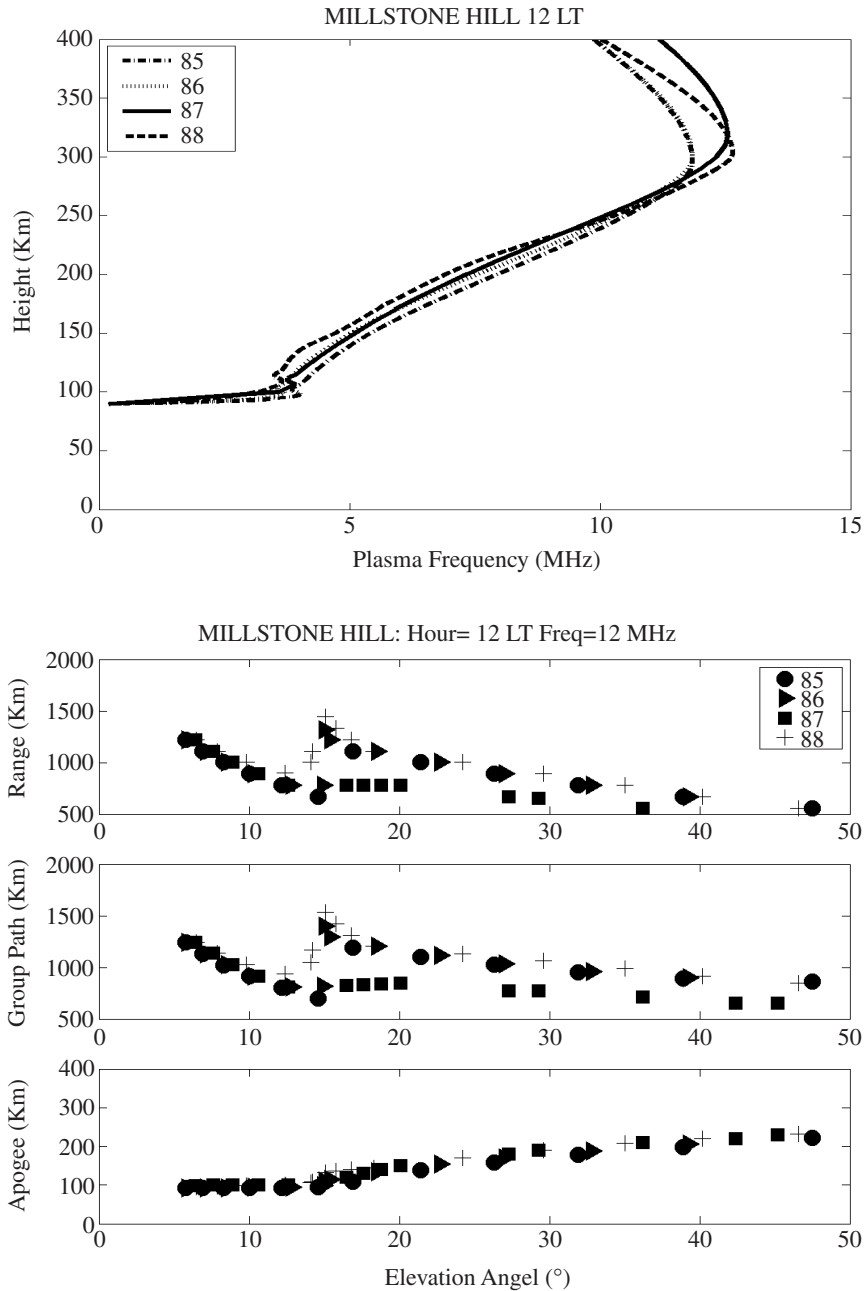


Figura 4.- Arriba: Representación de los perfiles de densidad electrónica experimentales obtenidos a las 12h de los días 25-28 de marzo 2003 en la estación de Millstone Hill. Abajo: Valores de rango, retardo de grupo y apogeo en función del ángulo de elevación de la señal transmisora para los cuatro días analizados.

STORM (Araujo-Pradere *et al.*, 2002). Se basa en la evolución temporal previa a la tormenta (33 horas antes) del índice *ap* y depende de la latitud y la estación del año. El modelo está disponible on-line en: <http://sec.noaa.gov/storm/>.

En este trabajo se analiza el comportamiento de esta corrección mediante los valores de frecuencia crítica (foF2) medidos durante dos tormentas geomagnéticas del año 2003 (*ap* >150 y actividad solar media). En cada caso, se comparan los valores de foF2 experimentales con las previsiones del modelo IRI con corrección STORM y sin corrección STORM. Las frecuencias críticas experimentales se extrajeron de ionogramas obtenidos en 30 estaciones distribuidas por todo el planeta e interpretados manualmente con el software Sao-Explorer.

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de las comparaciones realizadas con el parámetro foF2 para el caso de la tormenta de Octubre de 2003 donde los efectos aparecen en los días 302, 303 y 304. De forma similar se ha tratado el caso de la tormenta de Noviembre de 2003.

El análisis estadístico se basa en el método presentado por Araujo-Pradere *et al.*, (2004) y considera el Error Cuadrático Medio (RMSE) para 24 horas, intervalo-día (08-16 LT) e intervalo-noche (20-24 LT). Las principales conclusiones obtenidas pueden resumirse en:

- STORM captura bastante bien la dirección de los cambios para los efectos negativos (disminución clara del valor de foF2) durante periodos estivos. El porcentaje de mejora alcanza valores del 63% para Octubre 2003 y del 74% para Noviembre 2003.
- Para el caso de efectos positivos y condiciones invernales, STORM mejora las predicciones en Europa y Japón (23% para Octubre 2003 y 13% para Noviembre 2003).
- Para bajas latitudes (Ascension Island y Jicamarca) no se aprecian mejoras destacables.
- En Octubre de 2003 el modelo STORM trabaja mejor durante el día en las estaciones del hemisferio sur (11% de mejora).

D: Variación diurna de los parámetros B sobre La Habana. (Lazo *et al.*, 2007)

Los parámetros B0 y B1 describen el grosor y la forma de la capa F2 en el perfil de densidad electrónica modelado por el IRI. En este trabajo, se utilizan ionogramas registrados en la estación ionosférica de La Habana (CD923), correspondientes a años de baja (1975-1977) y de alta actividad solar (1968-1982) para realizar una descripción estadística de la variabilidad de B0 y B1.

En el invierno el comportamiento de B0 sobre La Habana es similar a los observados en Ouagadougou y San Juan, los valores mayores se alcanzan entre el mediodía local y las 14 LT. Esto es contrario a lo observado en Jicamarca y Pruhonice, donde se reportan mayores valores en las horas nocturnas (Fig. 6).

En condiciones de verano, la tendencia de B0 es más irregular que en invierno. La desviación estándar tiende a ser menor para alta actividad solar en ambas estaciones climáticas, no obstante en verano se manifiestan valores mayores.

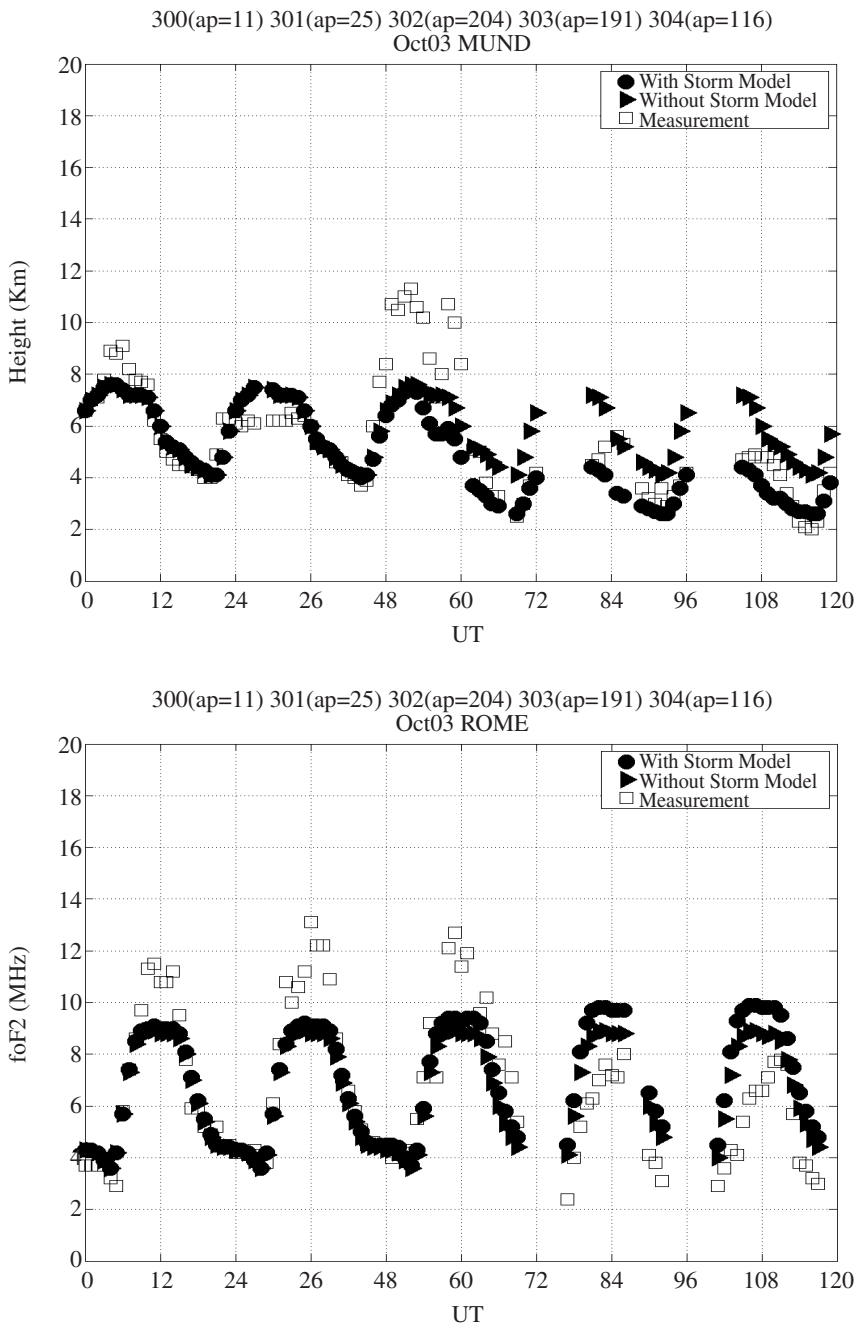


Figura 5.- Variación horaria de $foF2$ para la tormenta de Octubre de 2003 en Mundaring y Roma. Los círculos corresponden a las predicciones del IRI con STORM, los triángulos a las de IRI sin STORM y los cuadrados a las medidas experimentales.

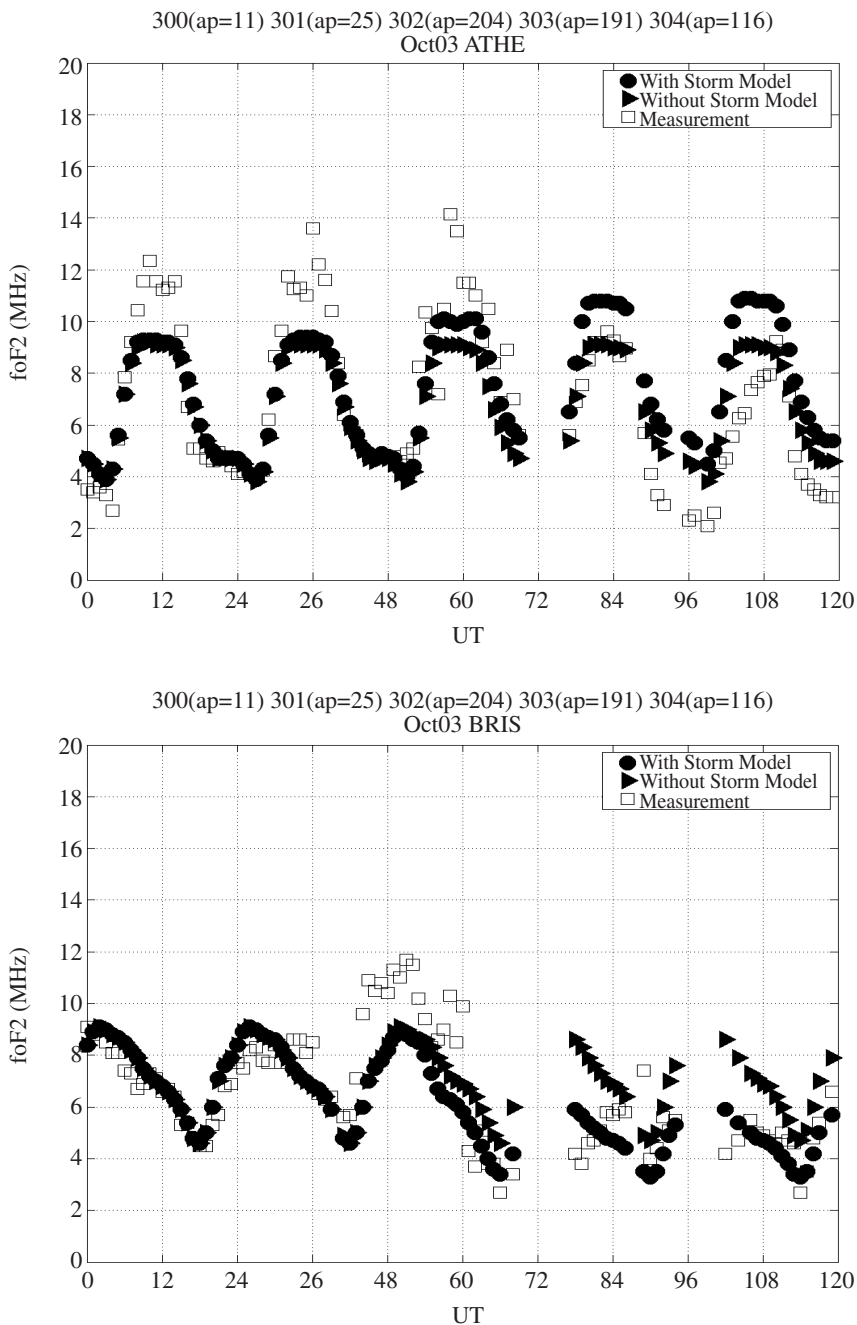


Figura 5 (cont.).- Variación horaria de $foF2$ para la tormenta de Octubre de 2003 en Atenas y Brisbane. Los círculos corresponden a las predicciones del IRI con STORM, los triángulos a las de IRI sin STORM y los cuadrados a las medidas experimentales.

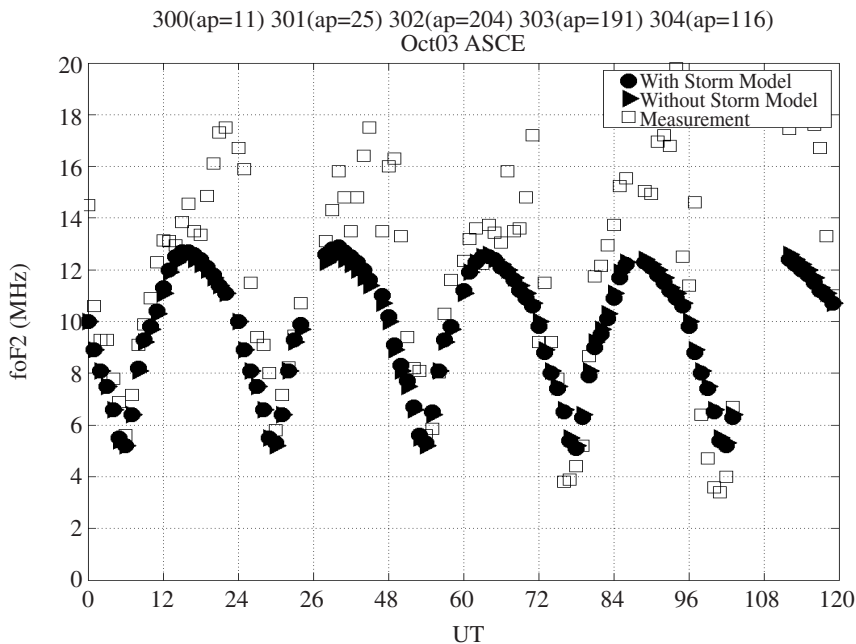


Figura 5 (cont.).- Variación horaria de $foF2$ para la tormenta de Octubre de 2003 en Ascension Island. Los círculos corresponden a las predicciones del IRI con STORM, los triángulos a las de IRI sin STORM y los cuadrados a las medidas experimentales.

Por otro lado, el comportamiento de B1 obtenido está en concordancia con lo reportado en otros trabajos, la tendencia a ser mayor en las horas nocturnas. También en B1 se observa un comportamiento más irregular en verano que en invierno.

E: Mapa regional de la frecuencia de plasma en el pico de F2 usando armónicos esféricos (Lazo *et al.*, 2004)

El desarrollo de un modelo regional en el área de América Central y el Caribe por medio de armónicos esféricos (AS) se ve limitado debido a la baja densidad de estaciones ionosféricas en dicha región.

Para salvar esta limitación, los autores aplican el desarrollo tradicional de AS en la representación bidimensional regional de los valores medianos mensuales de $foF2$ incluyendo datos correspondientes a estaciones ionosféricas fuera del área de interés, como condiciones de frontera en el infinito.

Los mapas regionales generados por esta técnica y los mapas numéricos globales del CCIR (IRI 2000) fueron comparados utilizando datos experimentales procedentes del satélite IK-19. El análisis estadístico mostró que la modelación regional brinda una mejor representación de la variación diurna del $foF2$.

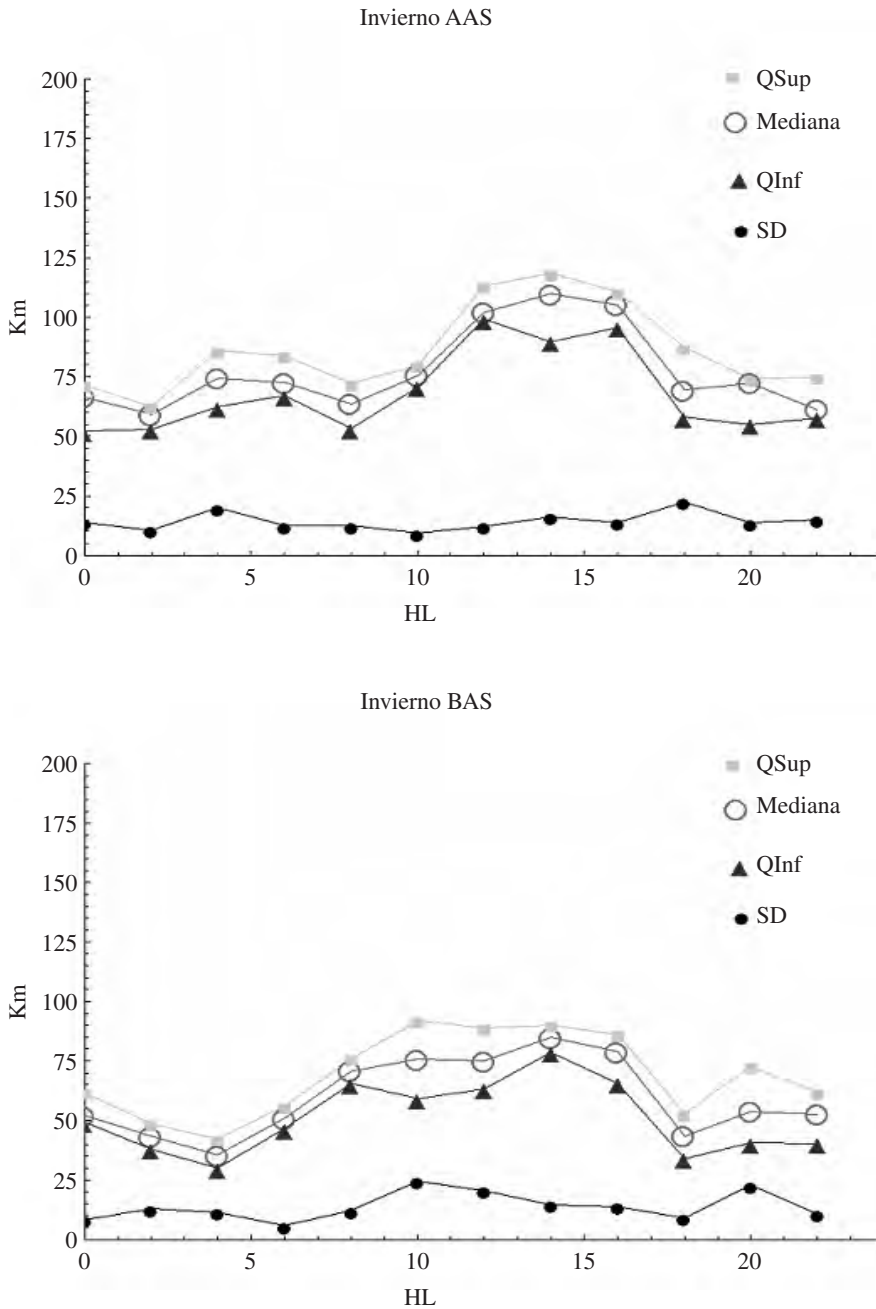


Figura 6.- Variabilidad diaria del parámetro B0 en Invierno de alta (AAS) y baja (BAS) actividad solar en La Habana.

8. CONCLUSIÓN

Con este trabajo queríamos poner de manifiesto la importancia de las mediciones ionosféricas y algunas de sus numerosas aplicaciones.

En los últimos años varias estaciones ionosféricas han tenido problemas para mantener sus instalaciones por falta de recursos económicos. La mayoría de estas estaciones disponen de largas series temporales de datos y cubren zonas estratégicas de la Ionosfera por lo que suponen una fuente de incalculable valor para estudios científicos, militares y civiles. También contrasta la baja cobertura de estaciones ionosféricas y disponibilidad de datos históricos en las zonas de bajas latitudes, donde ocurren los mayores valores y gradientes espaciales de TEC.

Por otro lado, la posibilidad de disponer de este tipo de datos en tiempo real amplía la gama de aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones y de los sistemas de navegación y posicionamiento satelital.

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores están agradecidos al grupo ionosférico de la Universidad de Massachusetts-Lowell (USA) por su inestimable labor en el tratamiento y procesamiento de datos procedentes de digisondas.

10. BIBLIOGRAFÍA

- ARAUJO-PRADERE, E.A., FULLER-ROWELL, T.J. and CODRESCU, M.V. (2002). STORM: an empirical storm-time ionospheric correction model, 1, Model description. *Radio Sci.* 37 (5), 1070, doi:10.1029/2001RS00246.
- ARAUJO-PRADERE, E.A., FULLER-ROWELL, T.J., CODRESCU, M.V. and ANGHEL, A. (2004). Evaluation and prospects for storm-time corrections in the International Reference Ionosphere. *Adv. Space Res.* 33, 902–909.
- BIBL, K. and REINISCH, B. W., (1978). The Universal Digital Ionosonde, *Radio Sci.*, 13, 519–530.
- BEUTLER, G., ROTHACHER, M., SCHAER, S., SPRINGER, T.A., KOUBA, J. and NEILAN., R.E. (1999). The International GPS Service (IGS): An Interdisciplinary Service in Support of Earth Sciences. *Adv. Space Res.* 23 (4), 631-635.
- BILITZA, D. (1990). International reference Ionosphere 1990, National Space Center/World Data Center A for Rockets and Satellites 90-22, Maryland USA.
- BRUNINI, C., MEZA, A., AZPILICUETA, F., VAN ZELE, A., GENDE, M. and DIAZ, A. (2004). A new ionosphere monitoring technology based on GPS, *Astrophys. Space Sci.*, 290 (3), 415-429.
- CIRAULO, L., AZPILICUETA, F., BRUNINI, C., MEZA, A. and RADICELLA, S. M. (2007). Calibration Errors on Experimental Slant Total Electron Content (TEC) Determined with GPS. *J. of Geodesy*, 81: 111-120.

- CROFT, T.A. and HOOGASIAN, H. (1968). Exact ray calculations in a quasiparabolic ionosphere with no magnetic field. *Radio Science* 3, 69–74.
- CROFT, T.A. (1969). Methods and applications of computer raytracing. Stanford Electronics Labs tech. Report. SU-SEL- 69-007.
- FORTES, L.P., LUZ, R. T., PEREIRA, K. D., COSTA, A. S. M. and BLITZKOW, D. (1998). The Brazilian network for Continuous Monitoring of GPS (RBMC): Operation and Products. *Advances in Positioning and Reference Frames*, International Association of Geodesy Symposia, 118, Springer-Verlag, Germany.
- GAO, S. and MACDOUGALL, J.W. (1991). A Dynamic Ionosonde Design Using Pulse Coding, *Canadian Journal of Physics*, Vol. 69, No. 8-9, p.1184-9, Aug.-Sept.
- HUANG, X. and REINISCH, B.W. (1997). Vertical electron density profiles from digisonde ionograms. The average representative profile. *Annali di Geofisica* 39 (4), 751–756.
- Ionosonde Network Advisory Group (INAG), 1993. Ionospheric Station Information, Bulletin N. 59, ISSN 1021-3546, pp 28.
(<http://www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/pdf/inag59.pdf>)
- Ionosonde Network Advisory Group (INAG), 1994. Ionospheric Station Information, Bulletin N. 60, ISSN 1021-3546.
(<http://www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/web-60/bizon.htm>).
- ITU (2001). Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems ionosphere characteristics, *Recommendation P.531-6*, approved in 2001-02, managed by ITU-R Study Group SG3 (version 6 superseded in 2004 by version 7).
- LAZO, B., CALZADILLA, A., ALAZO, K. and RODRÍGUEZ, M. (2004). Regional Mapping of F2 Peak Plasma Frequency by Spherical Harmonic Expansion. *Adv. Space Res.*, **33** (6), pp 880-883
- LAZO, B., SAVIO, S., ALAZO, K., CALZADILLA, A. and OJEDA, A. (2007). Diurnal variation of B parameters over Havana at low and high solar activity. *Adv. Space Res.*, **39**: 711-714.
- MACDOUGALL, J.W., GRANT, I. F., SHEN, X. and WILKINSON, P. (Ed.). (1995). The Canadian Advanced Digital Ionosonde: Design and Results in Ionosonde Networks and Stations, UAG-104.
- MANNUCCI, A.J., WILSON, B.D., YUAN, D. N., HO, C. H., LINDQWISTER, U. J. and RUNGE, T. F. (1998). A Global Mapping Technique for GPS-derived Ionospheric Total Electron Content Measurements. *Radio Sci.*, **33**, 565-582.
- MANNUCCI, A.J., IJIMIA, B. A., LINDQWISTER, U. J., PI, X., SPARKS, L. and WILSON, B. D. (1999). *GPS and Ionosphere*. *URSI Reviews of Radio Sci.*
- MEZA, A., BRUNINI, C. A. and KLAEUSBERG, A. (2002). Global behaviour of the ionosphere electron density using GPS observations, *Adv. Space Res.*, **30** (2), 307-312.
- MIRÓ, G. (2000). Caracterización del canal ionosférico para un enlace HF punto a punto mediante técnicas de trazado de rayos, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- MIRÓ, G., DE LA MORENA, B.A., RADICELLA, S.M. and HERRAIZ, M. (2002). Worst cases for a one-hop High Frequency Link. *Annals of Geophysics* 45 (1), 201–205.

- MIRÓ AMARANTE, G., RADICELLA, S. M., NAVA, B. and COÏSSON, P. (2003). Validation of a new method for ionospheric electron density reconstruction by means of vertical incidence data, in Proceedings of 'Atmospheric Remote Sensing using Satellite navigation Systems', Special Symposium of the URSI Joint Working Group, Matera (FG), Italy, 335-342.
- MIRÓ AMARANTE, G., RADICELLA, S. M., NAVA, B. and COÏSSON, P. (2005). Validation of a method for ionospheric electron density reconstruction by means of vertical incidence data during quiet and storm periods, *Annals of Geophysics*, V. 48, N. 2.
- MIRÓ AMARANTE, G., CUETO SANTAMARÍA, M., ALAZO, K. and RADICELLA, S. M. (2007a). Validation of the STORM model used in IRI with ionosonde data, *Advances in Space Research* 39, 681-686.
- MIRÓ AMARANTE, G. and RADICELLA, S. M. (2007b). Use of raytracing in models to investigate ionospheric channel performance, *Advances in Space Research*, 39, 926-931.
- MOORHEAD, M.D. and RADICELLA, S.M. (1998). Using 2D raytracing to model the effects of vertical profile variability on oblique path propagation at HF frequencies. Proceedings of the Side Workshop of COST 251.
- NAVA, B., COÏSSON, P., MIRÓ AMARANTE, G. and RADICELLA, S. M. (2003). A new model assisted method for ionosphere electron density reconstruction, in Proceedings of 'Atmospheric Remote Sensing using Satellite navigation Systems', Special Symposium of the URSI Joint Working Group, Matera (FG), Italy, 343-348.
- REINISCH, B. W. and HUANG, X. (1983). Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms, 3, Processing of bottomside ionograms, *Radio Science*, **18**, 477-492.
- REINISCH, B. W. (1996). Modern Ionosondes, in Modern Ionospheric Science, edited by Kohl, H., Ruster, R., and Schlegel, K., European Geophysical Society, 37191 Katlenburg-Lindau, Germany, 440-458.
- REINISCH, B. W. (1998). SAO (Standard ADEP Output) format for ionogram scaled data archiving, INAG Bulletin No. 62, WDC-A for STP, Boulder, CO, 47-58.
- REINISCH, B. W., GALKIN, I. A., KHMYROV, G., KOZLOV, A. and KITROSSER, D. F. (2004). Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network, *Advances in Radio Science*, 2, 241-247.
- SAITO, A. and FUKAO, S. (1998). High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 25(16), 3079-3082.
- ZUCCHERETTI, E., TUTONE, G., SCIACCA, U., BIANCHI, C. and AROKIASAMY B. J. (2003). The new AIS-INGV digital ionosonde. *Annals of Geophysics*, V. 46, N. 4.