

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA, ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA I
(GEOFÍSICA Y METEOROLOGÍA)



TESIS DOCTORAL

**ANOMALÍAS ESPACIO-TEMPORALES DE LA IONOSFERA Y SU
REPERCUSIÓN EN LAS COMUNICACIONES SATELITALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Sergio Magdaleno Torras

Directores

Miguel Herraiz Sarachaga
David Altadill Felip
Benito A. de la Morena Carretero

Madrid, 2014



MEMORIA TESIS DOCTORAL



ANOMALÍAS ESPACIO-TEMPORALES DE LA IONOSFERA Y SU REPERCUSIÓN EN LAS COMUNICACIONES SATELITALES

Sergio Magdaleno Torras

Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I
(Geofísica y Meteorología)

Facultad de Ciencias Físicas.
Universidad Complutense de Madrid

Madrid, 2014

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I
(Geofísica y Meteorología)



**ANOMALÍAS ESPACIO-TEMPORALES DE LA IONOSFERA Y SU
REPERCUSIÓN EN LAS COMUNICACIONES SATELITALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR CON LA MENCIÓN DE
DOCTORADO EUROPEO PRESENTADA POR

Sergio Magdaleno Torras

Bajo la dirección de los Doctores

Miguel Herraiz Sarachaga
(Universidad Complutense de Madrid)

David Altadill Felip
(Observatorio del Ebro)

Benito A. de la Morena Carretero
(Estación de Sondeos Atmosféricos El Arenosillo, INTA)

Madrid, 2014

Esta tesis doctoral ha sido financiada parcialmente por la beca del Ministerio de Defensa para la Formación de Personal Investigador “Rafael Calvo Rodés” del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Además, el proyecto AECI C/010043/07 titulado “Influencia de la ionosfera ecuatorial y su repercusión en las comunicaciones satelitales” y el Grupo de Estudios Ionosféricos y Técnicas de Posicionamiento Global por Satélite (GNSS) de la Universidad Complutense de Madrid han financiado parcialmente las estancias en centros de investigación externos.

Durante la realización de la misma se han producido varias Estancias Breves, fundamentalmente en The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP) en Trieste, Italia.

This thesis was partially supported by the Ministry of Defense grant for Research Personnel Training "Rafael Calvo Rodes" of the National Institute for Aerospace Technology (INTA). Also, the AECI C/010043/07 project entitled "Influence of the equatorial ionosphere and its impact on satellite communications" and the Group of Ionospheric Studies and Global Positioning Satellite Techniques (GNSS), Universidad Complutense de Madrid, for partially funding stays.

During this PhD has been made several short stays mainly at The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría mostrar mi más sincero agradecimiento a los Doctores Miguel Herraiz, David Altadill y Benito de la Morena, directores de esta tesis doctoral, sin cuyo esfuerzo, apoyo y conocimiento este trabajo nunca se habría podido llevar a cabo.

A los Doctores Claudio Brunini, Joan Miquel Torta y Estefanía Blanch cuyas colaboraciones han sido esenciales para el desarrollo de este trabajo.

A los Profesores Sandro Radicella y Luigi Ciraolo, así como a Bruno Nava, Yenca Migoya y al resto de personal del Laboratorio de Aeronomía y Radio Propagación del Centro Internacional para la Física Teórica Abdus Salam de Trieste (Italia) por todos sus consejos y su hospitalidad durante mis estancias allí.

Al personal de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad de la Plata, en especial a los Doctores Claudio Brunini, Mauricio Gende, Francisco Azpilicueta y Erika Gularte por sus consejos y la oportunidad de poder visitarles en La Plata.

A la Dra. Marta Mosert y a su equipo, Ana Mejivas y Oscar Abarca, por su ayuda y oportunidad de trabajar con ellos durante mi estancia en el Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio (ICATE-CONICET).

Al personal del Observatorio del Ebro por todo lo que me enseñaron, su hospitalidad y por proporcionarme en todas mis visitas un sitio donde dormir y trabajar.

I wish to acknowledge Dr. Bodo Reinish, Dr. Ivan Galkin, David Kitrosser, Alexander Kozlov, Vadym Paznukhov and all staff of the Center for Atmospheric Research at the University of Massachusetts Lowell for their kind reception and help with digisonde issues.

To Bruno Zolesi and Lucilla Alfonsi, for their help to improve the IBS application.

A la Estación de Sondeos Atmosféricos de El Arenosillo (Mazagón, Huelva) por todo lo que me enseñaron y por hacerme sentir cerca de casa.

Al Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I (Geofísica y Meteorología) de la Facultad de CC. Físicas de la Universidad Complutense de Madrid por su gran acogida y por todo lo aprendido durante estos años.

Por supuesto a mis compañeros de laboratorio, y en especial a María, Bea, Marta (Word), Izarra, Lucía, Maurizio y Salva por aguantarme mientras hacía este trabajo.

A Diana, Rubén, Ana y Termi, digo David, por esas barbacoas veraniegas sin las cuales nunca habría conocido esa carnicería de Yuncos.

A los compañeros del INTA que saben lo que se siente haciendo este tipo de trabajos y que, cuando menos se lo esperen, se verán escribiendo los agradecimientos.

A los compañeros de GMV (Inés, Víctor, Marta,...) por sus constantes presiones para terminar e invitar a unas cañas.

A mis amigos Víctor, Alex, Carlos,..., parientas (Cris, Laura,...) e hijos (Martina y Vitín) por haber estado a mi lado en todo momento, bueno, menos cuando me fui a Huelva, ¡c.....s!

A mi familia, tanto a la de siempre (Mariano, M^a Antonia, Sandra, Christian, abo, abuela, tíos, primos,...) como a la nueva (Javier, MariCarmen, Boli, Martona,...), por sus ánimos y por prometer que se van a leer la tesis y no van a esperar a que salga la película.

Quiero agradecer en especial a mis padres, por haber hecho todo lo posible, imposible e impensable para que pudiera llegar aquí. Sin vosotros, nada habría sido posible.

Y, finalmente, a mi mujer, María, la cual es capaz de sacar lo mejor de mí incluso en las peores situaciones. Tu ayuda, tanto a empezar como a terminar esta tesis, hace que este trabajo también te pertenezca. Te quiero. Sabes que esto no lo habría hecho sin ti.

A María
A mis padres

TABLA DE CONTENIDOS

Lista de figuras y tablas	III
Glosario	V
Resumen extendido.....	IX
Extended summary.....	XVII
Capítulo 1. Introducción / Introduction.....	1
Capítulo 2. La ionosfera.....	11
2.1. Estructura vertical	16
2.2. Ionosfera ecuatorial.....	18
2.3. Irregularidades ionosféricas ecuatoriales.....	20
2.4. Modelos ionosféricos globales.....	23
2.4.1. Modelo internacional de referencia de la ionosfera (IRI)	24
2.4.2. Modelo NeQuick.....	28
Capítulo 3. Sistemas de Navegación por Satélite.....	31
3.1. Funcionamiento de la navegación por satélite	35
3.2. La señal GPS.....	36
3.2.1. Medidas del código.....	37
3.2.2. Medidas de la fase.....	39
3.2.3. Propagación de la señal.....	41
3.2.4. Efecto ionosférico.....	42
3.2.5. Otros efectos en los observables	45
3.3. Mitigación del error ionosférico	46
3.3.1. Modelo Klobuchar	46
3.3.2. Modelo NeQuick.....	48
3.4. Sistemas SBAS.....	49
3.4.1. WAAS	50
3.4.2. EGNOS	51

Capítulo 4. Modelos de altura	53
4.1. Comportamiento de hmF2.....	56
4.2. Modelo global de hmF2 y H _m	66
Capítulo 5. Análisis de burbujas ionosféricas	83
5.1. Detector de burbujas ionosféricas	87
5.2. Comportamiento de las burbujas ionosféricas	98
5.2.1. Sector americano	98
5.2.2. Análisis global.....	109
Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras de investigación /	
Conclusions and future research	119
6.1. Conclusiones / Conclusions.....	121
6.2. Líneas futuras de investigación / Future work lines.....	129
Capítulo 7. Referencias	133
Anexo I - Ionosondas e Ionogramas	147
Anexo II - Formato RINEX.....	151
Anexo III - Función de Fourier	153
Anexo IV - Armónicos Esféricos.....	155
Anexo V – Contribuciones científicas.....	157

Lista de figuras y tablas

Figura 2-1: Variación con la altura de la tasa de producción, la intensidad de radiación y la concentración de partículas.	15
Figura 2-2: Distribución con la altura de las concentraciones de partículas que forman la ionosfera.	17
Figura 2-3: Rango de radiación absorbido por cada una de las capas de la ionosfera.	18
Figura 2-4: Esquema de la anomalía de Appleton.	19
Figura 2-5: Esquema simple para explicar el PRE causado por un viento uniforme U . Figura adaptada de Kelley (1989).	20
Figura 2-6: Esquema de la anomalía de Rayleigh-Taylor en la zona ecuatorial. Figura adaptada de Kelley (1989).	22
Figura 2-7: Secuencia de la inestabilidad de Rayleigh-Taylor hidrodinámico. Figura adaptada de Kelley (1989).	22
Figura 2-8: Perfil de densidad electrónica del IRI. Figura adaptada de Bilitza (1990).	25
Figura 2-9: Izquierda: Representación de los perfiles de densidad electrónica obtenidos utilizando una función α -Chapman con una altura de escala H constante (línea discontinua) y una función vary-Chap (línea de puntos). Derecha: Representación de la variación de la altura de escala con la altura utilizada en la función vary-Chap. Figura adaptada de Bilitza and Reinisch (2008).	26
Figura 3-1: Esquema de la constelación GPS. Figura obtenida de http://www.gps.gov	33
Figura 3-2: Esquema de la constelación GLONASS. Figura obtenida de http://www.russianspaceweb.com/ghlonass.html	34
Figura 3-3: Esquema de las diferentes escalas de tiempos y su relación entre sí. Figura adaptada de Misra and Enge (2006).	37
Figura 3-4: Representación gráfica del IPP. Figura adaptada de RTCA-MOPS (2006).	45
Figura 3-5: Comportamiento de la función de Klobuchar para la corrección del retraso ionosférico (ecuación 3-30).	47
Figura 3-6: Representación de la latitud modip en función de la longitud geográfica.	49
Figura 3-7: Esquema del sistema WAAS.	51

Figura 3-8: Distribución de las RIMS del sistema EGNOS.	52
Figura 3-9: Esquema del sistema EGNOS.....	52
Figura 4-1: Influencia de la distribución del TEC ionosférico en el $sTEC$ y νTEC	67
Figura 4-2: Estimación del νTEC configurando diferentes alturas en la MF. ...	67
Figura 5-1: Representación de la evolución del $sTEC$ calculada a partir de datos GPS frente al tiempo. Datos medidos en la estación BAKO (106.85° E, - 6.49° N), DOY=295, año 2000, PRN=6.	86
Figura A1-1: Ionograma obtenido en el Observatorio del Ebro. Se indican las principales características de la ionosfera que se pueden extraer del mismo. Figura extraída de Morena et al. 2014.	147
Figura A2-1: Ejemplo de fichero RINEX con datos de los observables para la estación MAS1, situada en Maspalomas (Islas Canarias), para el día 1 de Mayo de 2008. Para facilitar su visualización se han destacado los observables medidos (marrón), la época (rojo), los satélites (verde) y el valor de los observables para un satélite en una época (azul).....	152
Figura A4-1: Representación de los armónicos esféricos en la superficie de una esfera. Figura obtenida de http://www.atmos.albany.edu	156
Tabla 3-1: Resumen de los errores en los observables de la señal GPS (Misra and Enge, 2006).....	46
Tabla A1-1: Principales características ionosféricas.	149

Glosario

AE	Armónicos esféricos
AIE	Anomalía de ionización ecuatorial
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
Az	Nivel de ionización efectivo
B0	Parámetro de espesor de la densidad electrónica de la capa F del modelo IRI
B1	Parámetro de forma de la densidad electrónica de la capa F del modelo IRI
C/A	Coarse/adquisition
CCIR	<i>Comité Consultatif International des Radiocommunications</i>
CCMC	<i>Community Coordinated Modeling Center</i>
COSPAR	<i>Committee on Space Research</i>
DGR	Modelo Di Giovanni-Radicella
DIP	Inclinación del campo magnético
DOY	Día del año
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EPB	Equatorial Plasma Bubble
Es	Capa E esporádica
ESA	<i>European Space Agency</i>
EUV	Emisiones ultravioleta extremas
F _{10.7}	Flujo solar en la longitud de onda de 10.7 cm
f _{0E}	Frecuencia crítica de la capa E
f _{0Es}	Frecuencia crítica de la capa E esporádica
f _{0F1}	Frecuencia crítica de la capa F1
f _{0F2}	Frecuencia crítica de la capa F2
FAA	Federal Aviation Administration
fmin	Frecuencia mínima de la onda electromagnética reflejada
FOC	Full Operational Capability
GAGAN	GPS and GEO Augmented Navigation
GEO	Satélite Geoestacionario

GISM	Global Ionospheric Scintillation Model
GIVD	Retraso ionosférico vertical en el IGP
GIVE	Error ionosférico vertical en el IGP
GLONASS	Sistema Mundial de Navegación por Satélite
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite
GPS	Global Positioning System
GPST	Tiempo GPS
GUS	Ground Uplink Stations
h'F2	Altura virtual mínima de la capa F2
h'F	Altura virtual mínima de la región F
h'E	Altura virtual mínima de la capa E
Hm	Altura de escala en hmF2
hmE	Altura del pico de máxima densidad electrónica de la capa E
hmF1	Altura del pico de máxima densidad electrónica de la capa F1
hmF2	Altura del pico de máxima densidad electrónica de la capa F2
HwB	Errores de hardware
IBS	Ionospheric Bubble Seeker
ICTP	Centro Internacional de Física Teórica (Trieste)
IGP	Vértice del mallado ionosférico
IGS	<i>Internaciotal GNSS Service</i>
IOC	Initial Operacional Capability
IPP	Punto de corte señal-ionosfera en la aproximación de capa delgada
IRI	Modelo Ionosférico Internacional de Referencia
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union Recommendations
L1	Frecuencia GPS primaria, 1575.42 MHz
L2	Frecuencia GPS secundaria, 1227.60 MHz
MARP	Perfil Promedio representativo mensual
MCC	Master Control Centre
MF	Mapping Function
modip	DIP modificado

MOPS	Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
MUF(D)	Frecuencia máxima utilizable para una distancia D
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio
NeQuick	Modelo de densidad electrónica
NLES	Navigation Land Earth Station
NmE	Densidad electrónica máxima de la capa E
NmF1	Densidad electrónica máxima de la capa F1
NmF2	Densidad electrónica máxima de la capa F2
PRE	Incremento pre-inversión
PRN	Pseudo random noise
RDG	Raw Data Generation
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Station
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMSE	Error cuadrático medio
Roscosmos	<i>Russian Federal Space Agency</i>
RTI	Inestabilidad de Rayleigh-Taylor
Rz	Número de manchas solares de Wolf
Rz12	Promedio anual de los valores medios mensuales del número de Wolf
SBAS	Sistema de Aumentación Basado en Satélites
sTEC	Contenido Total de Electrones Oblicuo
TEC	Contenido Total de Electrones
TECu	Unidad de Contenido Total de Electrones
UHF	Frecuencia ultra alta
URSI	<i>Union Radio-Scientifique Internationale</i>
vTEC	Contenido Total de Electrones Vertical
WAAS	Wide Area Augmentation System
WAGE	Wide Area GPS Enhancement
WMS	Wide-area Master Stations
WRS	Wide-area Reference Stations

Resumen extendido

Introducción

Una de las principales fuentes de error en el posicionamiento GNSS es la ionosfera. Esta capa de la atmósfera presenta un comportamiento dinámico que unido a las anomalías espaciales y temporales que en ella se generan, conduce a la necesidad de desarrollar nuevas técnicas para su modelización. En este sentido, la comunidad científica ha creado modelos globales de ionosfera (e.g., el modelo Internacional de Referencia Ionosférica, IRI, o el modelo NeQuick) que proporcionan el comportamiento dinámico de la ionosfera. Sin embargo, estos modelos presentan limitaciones al intentar reproducir ciertas anomalías.

Este trabajo se centra en alcanzar los siguientes objetivos generales:

- Revisar y analizar las anomalías ionosféricas que más afectan a los sistemas GNSS.
- Proporcionar un mayor conocimiento del impacto de estas anomalías.

Se han identificado la anomalía ecuatorial, el incremento pre-inversión y las burbujas de plasma ecuatorial como las anomalías ionosféricas que más impactan en la señal GNSS. Para estudiar dichas anomalías, se han analizado tres características ionosféricas más importantes para el desarrollo de los modelos ionosféricos y relacionadas con estas anomalías.

- la altura a la que se localiza la máxima densidad electrónica, $hmF2$
- la altura de escala equivalente, H_m
- y los descensos producidos en el contenido total de electrones, TEC

Objetivos

En este trabajo se ha dividido en dos estudios. El primero se centra en las características ionosféricas $hmF2$ y H_m , donde se han fijado los siguientes objetivos:

1. Evaluar las limitaciones de las predicciones de $hmF2$ del IRI.
2. Caracterizar el comportamiento de $hmF2$ y H_m .
3. Proporcionar dos modelos globales de predicción de $hmF2$ y H_m para todos los rangos de latitud.

El segundo estudio se centra en el análisis de las burbujas ionosféricas utilizando observaciones del contenido total de electrones. Para este estudio se han definido los siguientes objetivos:

1. Proporcionar una nueva técnica para detectar y caracterizar las burbujas ionosféricas a partir de datos GNSS.
2. Proporcionar una caracterización global de las burbujas ionosféricas.

Datos y metodología

1. Modelos $hmF2$ y H_m

El primer estudio ha sido evaluar el comportamiento de $hmF2$ en condiciones tranquilas y para diferentes niveles de actividad solar del ciclo 23 y analizar la bondad del modelado del actual IRI en relación con el comportamiento de $hmF2$ observado experimentalmente así como proponer un modelo global para $hmF2$ y H_m . Para ello se ha utilizado:

1. datos de $hmF2$ obtenidos directamente de los perfiles de densidad electrónica (Huang and Reinisch, 1996a; Reinisch et al., 2004).
2. la técnica del perfil promedio (Huang and Reinisch, 1996a, 1996b) que proporciona el comportamiento tranquilo de la parte inferior de la ionosfera en lugar del comportamiento promedio de una única característica.

Los datos seleccionados cubren las diferentes estaciones del año y los diferentes niveles de actividad solar. Por otro lado, se han obtenido los valores que proporciona el modelo IRI (Bilitza y Reinisch, 2008) para las estaciones y el periodo analizado. Estos valores se han comparado con los valores obtenidos experimentalmente para evaluar la bondad de las predicciones del IRI. Para ello se ha calculado el porcentaje de la desviación de los valores estimado en relación con los valores experimentales.

Primero, se ha desarrollado un modelo empírico de $hmF2$ en función del tiempo y de la actividad solar para tres estaciones localizadas a distintos rangos de latitud. Estos modelos locales han sido comparados con las predicciones proporcionadas por el IRI. A partir de estos resultados, se ha desarrollado un modelo global de $hmF2$ y H_m para condiciones tranquilas.

Por último, se ha utilizado el error cuadrático medio para evaluar la bondad del ajuste de los modelos de $hmF2$ y H_m y la mejora que proporciona el modelo de $hmF2$ respecto al modelo IRI.

2. Burbujas ionosféricas

Se ha diseñado una técnica que, a partir de los arcos de TEC calculados en una estación, indica si alguna de las líneas de vista ha atravesado una EPB y proporciona información sobre el descenso de TEC debido al efecto de la EPB , la

hora de inicio y final y la profundidad máxima de este descenso frente al valor esperado. Dicho valor esperado es simulado como una regresión lineal entre los valores de TEC al comienzo y al final de la burbuja. Esta técnica se basa en el análisis de las variaciones de la pendiente y la varianza de los valores del $sTEC$. Esta técnica ha sido implementada en la aplicación Java *Ionospheric Bubble Seeker* (IBS) la cual permite, de forma sencilla, la configuración de los *parámetros de detección* (e.g., ángulo de elevación y tiempo de muestreo de los datos) así como el análisis masivo de datos, y proporciona resultados gráficos de cada análisis de detección y estadísticas globales del análisis por estación.

Primero, se ha utilizado esta aplicación para analizar y caracterizar las burbujas ionosféricas en la zona Sudamericana. Para ello, se han seleccionado observaciones GNSS en formato RINEX procedentes de 15 estaciones IGS. Se ha utilizado la técnica desarrollada por Brunini *and* Azpilicueta (2009) para estimar los valores de $sTEC$ a partir de las observaciones. Los datos han sido seleccionados para estudiar las burbujas ionosféricas en condiciones de alta (años 2000 y 2001), media (años 2005 y 2006) y baja (año 2008) actividad solar. También se han calculado las predicciones del IRI para las densidades electrónicas máximas de las capas E y F, NmE y $NmF2$, y la deriva vertical de la zona ecuatorial para todo el periodo de estudio.

Se ha realizado un segundo estudio utilizando la misma aplicación para realizar un análisis global del comportamiento de las burbujas ionosféricas. Para este estudio se han seleccionado datos procedentes de 17 estaciones IGS distribuidas entre -21° y $+33^\circ$ de latitud magnética y -156° y $+147^\circ$ de longitud geográfica. En este estudio se han utilizados datos medidos durante los años 2000 y 2001 correspondientes a alta actividad solar.

Resultados

1. Modelos $hmF2$ y H_m

El análisis de las predicciones de $hmF2$ del IRI ha mostrado que éste representa bastante bien la variación diaria, estacional y con la actividad solar de $hmF2$. Se ha obtenido que, para latitudes medias, las predicciones del IRI presentan una desviación del 10% la mayoría del tiempo. Sin embargo, para altas y bajas latitudes, el IRI presenta desviaciones de hasta el 40%. Estas desviaciones en altas latitudes son debidas a que el IRI es un modelo para latitudes no aurorales. Por otro lado, las discrepancias encontradas en bajas latitudes se han observado durante el fuerte aumento de $hmF2$ antes de la salida y después de la puesta de Sol.

Para el análisis de $hmF2$, se generaron tres modelos locales basados en un análisis de Fourier de $hmF2$ para tres estaciones localizadas en cada uno de los rangos de latitud analizados previamente con el IRI. El modelo para las latitudes medias no presenta una mejora significativa con respecto al IRI. Sin

embargo, los modelos para altas y bajas latitudes reproducen las pequeñas estructuras mejor que el IRI. La comparación del error cuadrático medio, RMSE, del IRI y los modelos generados para cada año y para todo el periodo estudiado ha mostrado que los modelos empíricos ajustan mejor a los datos experimentales de $hmF2$ que el modelo IRI.

La generación de los modelos globales de $hmF2$ y H_m se ha basado en el análisis de armónicos esféricos. Este modelo reproduce las variaciones diurnas y estacionales de $hmF2$ mediante funciones de Fourier dependientes de la actividad solar, caracterizada por el número de manchas solares promedio anual, $Rz12$. Para ello se ha utilizado una técnica de análisis de armónicos esféricos:

$$hmF2 / H_m(t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta) \times \{g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)\}$$

donde θ y λ corresponden a la colatitud y la longitud, respectivamente, t es el tiempo, P_n^m son los polinomios de Legendre de grado n y orden m , y $g_n^m(t)$ y $h_n^m(t)$ son los coeficientes de Gauss.

La comparación entre las estimaciones del modelo global de $hmF2$ propuesto y el IRI con las observaciones experimentales ha mostrado que el modelo propuesto mejora las estimaciones del IRI en un 10%. Sin embargo, la comparación por latitudes ha revelado que el modelo de armónicos esféricos presenta una mejora, en promedio, del 10%, en altas latitudes y del 25% para bajas latitudes.

El modelo global de H_m se ha evaluado mediante el RMSE, mostrando una desviación del 10-15% respecto a las medidas observadas. Estas prestaciones del modelo de H_m son muy razonables para su potencial uso por parte de la comunidad científica.

2. Burbujas ionosféricas

El análisis de las burbujas ionosféricas en la región de Suramérica ha corroborado que éstas presentan un máximo de ocurrencia después de la puesta del Sol. Además, se ha analizado el comportamiento mensual mostrando un máximo de ocurrencia en los equinoccios, una ocurrencia moderada entre los meses de Octubre a Febrero y una baja ocurrencia entre los meses de Mayo y Agosto. El análisis del comportamiento de la dependencia de las burbujas con el flujo solar, F10.7, ha mostrado un incremento del número de burbujas al crecer el flujo solar. Este comportamiento se ha comparado con los resultados obtenidos en estudios previos que habían utilizado técnicas

diferentes. La comparación señala un comportamiento similar (Burke et al. 2004; Gentile et al., 2006a, 2006b; Stolle et al., 2006; Nishioka et al., 2008).

El análisis entre la deriva vertical y la formación de las burbujas ionosféricas muestra una gran correlación, observándose que el aumento de la deriva vertical del *TEC* produce una mayor probabilidad de la formación de la inestabilidad de Rayleigh-Taylor, uno de los participantes de la producción de burbujas. De igual modo, el aumento del ratio $NmF2 / NmE$, incrementa la probabilidad de formación de las burbujas. Este análisis también muestra una correlación entre el ratio $NmF2 / NmE$ y el tamaño de la burbuja y la duración del descenso del *TEC*.

En el análisis global de las burbujas ionosféricas se han realizado tres estudios diferentes.

El primero de ellos ha sido analizar el comportamiento latitudinal de las burbujas. Para ello se han seleccionado datos procedentes de estaciones situadas en un mismo rango de longitud y diferentes latitudes. Este análisis ha mostrado que la formación de burbujas presenta un comportamiento gaussiano con el máximo en el ecuador magnético y una sigma de 9.5° .

El segundo estudio ha analizado el comportamiento de las burbujas ionosféricas con la longitud y se ha comparado con los resultados obtenidos en otros estudios utilizando diferentes técnicas. En este análisis se ha evaluado la ocurrencia de las burbujas y se ha puesto de relieve un mayor número de sucesos en los sectores Americano y Atlántico.

El último estudio ha analizado la variación estacional de las burbujas en diferentes rangos de longitud. Este análisis ha mostrado que el comportamiento estacional de las *EPBs* presenta un comportamiento diferente según la longitud. De esta forma se ha observado que todos los sectores presentan una máxima ocurrencia de *EPBs* durante los equinoccios, sin embargo, según el rango de longitud, es posible encontrar *EPBs* durante los meses de Noviembre a Febrero, (sectores americano y atlántico), o durante todo el año (sector africano). Estos resultados están en línea con los obtenidos en otros estudios (Burke et al., 2004; Gentile et al., 2006a and 2006b) con datos in-situ medidos con DMSF y ROCSAT-1.

Conclusiones

A continuación se resumen las conclusiones que se han extraído de cada uno de los estudios realizados.

Primero, se presentan las conclusiones extraídas del estudio de $hmF2$ y H_m :

- Las predicciones del IRI se desvían un 10% respecto a los datos observado en latitudes medias. Estas discrepancias llegan al 40% para altas y bajas latitudes debido a:
 - IRI no es un modelo auroral
 - A bajas latitudes el IRI no representa el incremento de $hmF2$ en el amanecer y el atardecer.
- Se ha generado un modelo local basado en un análisis de Fourier el cual:
 - en altas y bajas latitudes reproduce los incrementos de $hmF2$ mejor que el IRI
 - en latitudes medias presenta una pequeña mejora respecto al IRI.
- Se ha generado dos modelos globales para $hmF2$ y H_m basado en una técnica de armónicos esféricos, donde los coeficientes de Gauss son función del tiempo y de la actividad solar $Rz12$.
- El modelo empírico de $hmF2$ mejora las predicciones del IRI un 25% para bajas latitudes y un 10% para altas latitudes. La mejoría global respecto a las predicciones del IRI es del 10%
- El modelo empírico de H_m se desvía un 10-15% respecto a las observaciones experimentales.

Por último, las conclusiones que se han extraído para el estudio de las burbujas ecuatoriales son:

- Se ha desarrollado una técnica de post-procesado para detectar y caracterizar las burbujas a partir de datos GNSS y se ha implementado en una aplicación Java.
- Esta aplicación proporciona: el número de burbujas detectadas, sus principales características (profundidad y duración) y resultados estadísticos (distribución diurna y estacional, etc.).
- El análisis espacial ha mostrado que el número de burbujas es mayor cerca del ecuador magnético.
- El análisis temporal ha señalado que las burbujas se encuentran de 19:00 a 2:00. Además, se han detectado comportamientos estacionales diferentes dependiendo de la longitud.

Este trabajo ha dado lugar a las siguientes publicaciones científicas incluidas en la memoria:

- Altadill, D., **Magdaleno, S.**, Torta, J.M., Blanch, E., 2013. Global empirical models of the density peak height and of the equivalent

scale height for quiet conditions. *Advances in Space Research*, Volume 52, Issue 10, Pages 1756–1769.

- **Magdaleno, S.**, Herraiz, M., Radicella, S.M., 2011. Ionospheric Bubble Seeker: a Java application to detect and characterize ionospheric plasma depletion from GPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 50, Issue 5, 1719-1727.
- **Magdaleno, S.**, Radicella, S.M., Herraiz, M., 2011. Longitude characterization of GPS derived TEC depletions using a post-processing automatic technique. In: *Proceedings of 13th International Ionospheric Effects Symposium IES2011*. Alexandria, USA
- **Magdaleno, S.**, Herraiz, M., de la Morena, B.A., 2012. Characterization of equatorial plasma depletions detected from derived GPS data in South America. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.
- **Magdaleno, S.**, Altadill, D., Herraiz, M., Blanch, E., de la Morena, B.A., 2011. Ionospheric peak height behavior for low, middle and high latitudes: A potential empirical model for quiet conditions – Comparison with IRI2007 model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 1810–1817.

Extended summary

Introduction

One of the main sources of GNSS positioning error is the ionosphere. Due to the spatial and temporal anomalies and the dynamic behavior of this atmospheric region, it is needed to develop new techniques for its modeling. In this sense, the scientific community has created global ionosphere models (e.g., the International Reference Ionosphere model, IRI, or the NeQuick model) which provide the dynamic behavior of the ionosphere. However, these models have some limitations when trying to reproduce certain anomalies.

In this sense, this work focuses on achieving the following main objectives:

- To review and analyze the ionospheric anomalies which concern to GNSS systems.
- To provide a better knowledge of the impact of these anomalies.

The equatorial anomaly, the pre-reversal enhancement and the equatorial plasma bubbles have been identified as those anomalies that present a greater impact on the GNSS signal. To study these anomalies, three of the most important ionospheric characteristics for the development of the ionospheric models have been used:

- electron density peak height, $hmF2$
- equivalent scale height, H_m
- total electron content (TEC) depletions

Objectives

This work has been divided into two works. The first one focuses on $hmF2$ and H_m . The following objectives have been defined:

1. To evaluate the limitations of the IRI $hmF2$ predictions
2. To characterize $hmF2$ and H_m behavior
3. To provide new prediction models for all latitudes

The second work focuses on the analysis of the equatorial plasma bubbles. For this work, the following objectives were defined:

1. To provide a new technique to analyze GNSS data: EPB detection and characterization
2. To provide a global characterization of EPBs

Data and methodology

1. $hmF2$ and H_m models

The aim of the first work has been to evaluate the quiet-time behavior of the $hmF2$ at three regions with different latitude and for different solar activity levels and to analyze the goodness of the current IRI modeling in relation to the experimentally observed behavior of $hmF2$. To get these objectives the following data and technique have been used:

1. $hmF2$ data obtained from observed electron density profiles (Huang and Reinisch, 1996a; Reinisch et al., 2004).
2. the average profile technique (Huang and Reinisch, 1996a, 1996b) to obtain the quiet-time behavior of the bottomside ionosphere instead of the average behavior of a single characteristic.

The ionospheric stations providing the data have been selected to ensure a good geographical distribution and to cover different levels of solar activity. The $hmF2$ values predicted by IRI model (Bilitza and Reinisch, 2008) have been calculated for the same locations and time intervals from which experimental data were gotten. The percentage deviation of the estimated values in relation to the experimental values was computed to better identify the main discrepancies of the IRI modeling of the $hmF2$.

First, three empirical models of $hmF2$ at different latitude ranges have been developed as dependent on time and solar activity. The $hmF2$ values provided by these local models have been compared with IRI prediction. Using these results, global models for $hmF2$ and H_m for quiet solar conditions has been developed.

Finally, comparisons of models results and root mean square errors (RMSE) are presented to evaluate the models goodness and the potential improvement in relation to the IRI prediction.

2. Ionospheric bubbles

A post-processing technique based on the analysis of the variations of the $sTEC$ along the arc of each satellite has been developed to detect the existence of a bubble by identifying significant $sTEC$ depletions. The technique identifies an EPB when a $sTEC$ depletion is located on the difference curve (original series minus calculated profile). This technique is based on the variations of the slope of the $sTEC$ values calculated and was implemented in the Java application Ionospheric Bubble Seeker (IBS) that allows configuring some detection parameters (e.g. elevation angle). IBS provides the number of depletions detected for each station and the number of days analyzed.

First, IBS application has been used to analyze and characterize the ionospheric bubbles in the South American region. For that, RINEX files from 15 stations of the International GNSS Service (IGS) have been selected. sTEC values have been estimated using the technique developed by Brunini and Azpilicueta, (2009). The data cover high (2000, 2001), moderate (2004, 2005) and low (2008) solar activity conditions. The IRI model has been used to calculate the equatorial vertical drift and the maximum density for the E- and F-layers, NmE and $NmF2$.

The second work has been oriented to analyze the global behavior of the ionospheric bubbles. In this study, 17 IGS stations located between $+33^\circ$ to -21° of magnetic latitude and between -156° to $+147^\circ$ of geographic longitude have been used. Years 2000 and 2001 have been selected to analyze high solar activity condition.

Results

1. $hmF2$ and H_m models

The main behavior of $hmF2$ representing the daily, seasonal and solar activity variations is quite well predicted by the IRI for the three latitudes analyzed here, especially at mid-latitudes. IRI predictions deviate by about 10% most of the time. However, the IRI prediction can report discrepancies as large as 40% at particular local time for high and low latitude stations. IRI discrepancies observed at high latitudes may be explained because IRI is a non-auroral latitude model. On the other hand, at low latitudes, the IRI has a good agreement except for the sharp increasing of $hmF2$ at pre sunrise and post-sunset times.

Three local models have been developed based on $hmF2$ Fourier analysis for three stations located at different latitudinal regions. The model for mid-latitudes does not present significantly better accuracy than IRI. However, the models for high and low latitudes reproduce the fine structures better than IRI does. The Root Mean Square Error (RMSE) corresponding to the estimations given by IRI and the proposed models have been calculated at each observatory for both every single year and the whole period of study. The comparison indicates that the empirical models match the experimental average $hmF2$ values better than the IRI model does.

To model the quiet pattern of the $hmF2$ and H_m at global scale the spherical harmonic (SH) analysis technique has been used. This technique has been widely used in geophysics to model analytically a general magnitude on a spherical surface and as function of the time also:

$$hmF2 / H_m(t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos\theta) \times \{g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)\}$$

where θ and λ are the geocentric spherical coordinates, colatitude and longitude, respectively, and t means time in any convenient unit. P_n^m are the Legendre polynomials of degree n and order m , and $g_n^m(t)$ and $h_n^m(t)$ are the spherical harmonic or the Gauss coefficients.

The SH empirical model of $hmF2$ developed in this research has been tested against the IRI prediction by comparing with the experimental observation. This comparison has shown that the SH model of $hmF2$ improves the IRI prediction by 25% in average at low latitudes and by 10% in average at high latitudes in terms of RMSE, while no significant improvement is observed for mid-latitudes, resulting an average improvement of about 10% at global scale.

The SH model of H_m has been evaluated in terms of RMSE resulting an average error of 8 km which means that the model deviates of about 10-15% in relation to the experimental observations in average. This result indicates a reasonable performance of the SH model of H_m and potential usefulness for the ionospheric community.

2. Ionospheric bubbles

The analysis of the South American region has revealed that the ionospheric bubbles present a greater occurrence after sunset. On the other hand, the analysis of the monthly distribution has shown that the greatest number of bubbles is found during the equinoxes, a moderate occurrence between October and February and a low occurrence between May and August. This analysis has shown a strong correlation between the yearly mean occurrence EPBs rate and the F10.7. These results were compared to previous studies and similar behavior has been obtained (Burke et al. 2004; Gentile et al., 2006a, 2006b; Stolle et al., 2006; Nishioka et al., 2008).

A strong correlation between the yearly mean EVD and the bubbles occurrence has been obtained. A correlation between the yearly mean $NmF2 / NmE$ and the EPBs characteristics, depth and duration, has been obtained establishing a relation between these characteristics and the ionospheric measurements.

The global analysis has been divided into three different studies.

In the first one, stations with similar geographic longitude have been selected to analyze the latitudinal behavior of the EPB occurrence rate. This analysis has shown that a Gaussian distribution has been found centered in the magnetic equator and sigma at 9.5° .

The second study has evaluated the longitudinal behavior of the ionospheric bubbles. This analysis has shown clearly maximum values in the American-Atlantic sectors.

The last study has analyzed the seasonal variation of the bubbles occurrence with the geographical latitude. It was observed that the maximum occurrence is found during equinoxes for all the longitudinal sectors; however, it is possible to find some bubbles between November and February (American and Atlantic sectors) for the whole year (African sector). These results are in agreement with those obtained from in-situ DMSP and ROCSAT-1 measurements (Burke et al., 2004; Gentile et al., 2006a and 2006b).

Conclusions

Hereafter, the main conclusions of each of the studies done are summarized.

First, conclusions from the $hmF2$ and H_m study are provided:

- IRI prediction deviates by about 10% at mid-latitudes. These discrepancies reach up to 40% for high and low latitudes due to:
 - IRI is a non-auroral latitudes model
 - Low accuracy for the sharp increasing of $hmF2$ at pre-sunrise and post-sunset can be observed for low latitudes.
- Preliminary $hmF2$ models based on the Fourier analysis by using Monthly Average Representative Profiles have shown that:
 - High and low latitudes reproduce the fine structures better than IRI
 - Mid-latitudes present better accuracy
- Two models generated for $hmF2$ and H_m , based on the spherical harmonic technique, where Gauss coefficients are time and solar activity ($Rz12$) dependent functions.
- The $hmF2$ empirical model improves the IRI prediction by 25% on average at low latitudes and 10% at high latitudes. Global improvement of about 10% with regards to the IRI prediction.
- The H_m model deviates of about 10–15% in relation to the experimental observations.

The conclusions from the ionospheric bubbles are given next:

- A new post-processing technique to detect and characterize bubbles from GNSS data has been developed and implemented in Java.

- This application provides: the number of bubbles detected, their main characteristics (depth and duration) and statistical results (daily and seasonal distribution, etc.).
- The spatial analysis has confirmed that the greater number of bubbles can be found close to the dip equator.
- The temporal analysis has shown that the ionospheric bubbles appear between 19:00 to 2:00 hours. In addition, different seasonal behavior has been found for different longitudinal sectors.

The work has given rise to the following articles that are included in the text:

- Altadill, D., **Magdaleno, S.**, Torta, J.M., Blanch, E., 2013. Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions. *Advances in Space Research*, Volume 52, Issue 10, Pages 1756–1769.
- **Magdaleno, S.**, Herraiz, M., Radicella, S.M., 2011. Ionospheric Bubble Seeker: a Java application to detect and characterize ionospheric plasma depletion from GPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 50, Issue 5, 1719-1727.
- **Magdaleno, S.**, Radicella, S.M., Herraiz, M., 2011. Longitude characterization of GPS derived TEC depletions using a post-processing automatic technique. In: *Proceedings of 13th International Ionospheric Effects Symposium IES2011*. Alexandria, USA
- **Magdaleno, S.**, Herraiz, M., de la Morena, B.A., 2012. Characterization of equatorial plasma depletions detected from derived GPS data in South America. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.
- **Magdaleno, S.**, Altadill, D., Herraiz, M., Blanch, E., de la Morena, B.A., 2011. Ionospheric peak height behavior for low, middle and high latitudes: A potential empirical model for quiet conditions – Comparison with IRI2007 model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 1810–1817.

Capítulo 1

Introducción

Introduction

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite Systems*) se han convertido en un instrumento indispensable tanto para servicios civiles como militares. El posicionamiento de vehículos aéreos, marítimos y terrestres es ahora impensable sin este tipo de sistemas. Pero el empleo de éstos no se limita al uso militar y de navegación, sino que se extiende a otros campos como el de las ciencias de la Tierra y la ingeniería, incorporados con el fin de desarrollar nuevas aplicaciones.

La tecnología GNSS está en continua expansión y las principales agencias espaciales, e.g. Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA, *National Aeronautics and Space Administration*), Agencia Espacial Europea (ESA, *European Space Agency*), Agencia Federal Espacial Rusa (Roscosmos, *Russian Federal Space Agency*), etc., tienen programas específicos para impulsar esta tecnología y desarrollar nuevas funciones para su explotación. Por un lado, se desarrollan nuevas componentes para los satélites y receptores de forma que las medidas que proporcionen sean más fiables. Por otro lado, se potencian/favorecen nuevas técnicas para mejorar las prestaciones de estos sistemas, es decir, conseguir que los modelos que incorporan los receptores para la estimación de la posición sean más precisos.

La mejora de la precisión permite crear nuevas aplicaciones tales como la posibilidad de utilizar tecnologías GNSS para realizar maniobras de aproximación y aterrizaje de aviones bajo condiciones de poca visibilidad. En este sentido, a principios de siglo la Administración Federal de Aviación (FAA, *Federal Aviation Administration*) y la ESA empezaron a implantar los Sistema de Aumentación Basado en Satélites (SBAS, *Satellite Based Augmentaion System*), que proporcionan correcciones a los receptores de señales GNSS para obtener una mejor estimación de la posición.

Una de las principales fuentes de error en el posicionamiento GNSS es la ionosfera. Esta capa de la atmósfera presenta un comportamiento dinámico que unido a las anomalías espaciales y temporales que en ella se generan, conduce a la necesidad de desarrollar nuevas técnicas para su modelización. En este sentido, la comunidad científica ha creado modelos globales de ionosfera (e.g., el modelo Internacional de Referencia Ionosférica (IRI, *International Reference Ionosphere*) o el modelo NeQuick) que proporcionan el comportamiento dinámico de la ionosfera. Sin embargo, estos modelos presentan limitaciones al intentar reproducir ciertas anomalías.

Este trabajo se centra en lograr los dos siguientes objetivos generales:

- Revisar y analizar las anomalías ionosféricas que más afectan a los sistemas GNSS.
- Proporcionar un mayor conocimiento del impacto de estas anomalías.

Para ello, se han utilizado tres de las características ionosféricas más importantes para el desarrollo de los modelos ionosféricos y que conllevan un mayor impacto en los sistemas GNSS.

- la altura a la que se localiza la máxima densidad electrónica, $hmF2$
- la altura de escala equivalente, H_m
- y los descensos producidos en el contenido total de electrones, TEC

Para presentar la consecución de estos objetivos, este trabajo se estructura en tres partes claramente diferenciadas.

La primera está formada por los Capítulos 2 y 3 y presenta una revisión del estado actual del conocimiento. El Capítulo 2 proporciona una descripción general de la ionosfera, describiendo sus características fundamentales así como los principales fenómenos físicos y químicos que dan lugar a su formación. También se facilita una visión general de los modelos ionosféricos más importantes. En el Capítulo 3 se introduce el funcionamiento de los sistemas GNSS, el impacto que la ionosfera tiene sobre la señal satelital, los modelos utilizados por los sistemas GNSS para la corrección del error ionosférico y los sistemas desarrollados en paralelo para mejorar las prestaciones de estos sistemas.

La segunda parte está formada por el Capítulo 4, donde se presentan los resultados obtenidos de los estudios de $hmF2$ y H_m en forma de dos artículos publicados en lengua inglesa, precedidos por un breve resumen en español. El primero analiza $hmF2$, que es el principal parámetro utilizado por todos los modelos ionosféricos para definir el perfil de densidad electrónica. Los resultados muestran que $hmF2$ presenta una gran dependencia temporal y espacial. En este mismo estudio se propone una técnica para modelar dicha característica y sus resultados se comparan con las predicciones proporcionadas por el modelo IRI para diferentes latitudes y diferentes periodos de tiempo. Tras los resultados obtenidos en el primer artículo, se publicó otro que proporciona un modelo global del comportamiento de $hmF2$. La evaluación

con respecto a los modelos de $hmF2$ utilizados por los modelos globales de ionosfera muestra una mejora en la estimación de $hmF2$, especialmente en altas y bajas latitudes donde los modelos actuales presentan mayores errores. Utilizando la misma técnica se proporciona también un modelo global de H_m , que relaciona las zonas superior e inferior del perfil de densidad electrónica.

La tercera parte de esta tesis está formada por el Capítulo 5, donde se presentan los resultados obtenidos de los análisis de los descensos del *TEC*. La estructura de este capítulo, compuesto por tres artículos, es la misma que en el Capítulo 4. El primer artículo define una metodología que, a partir de datos GPS, permite detectar y caracterizar la duración y el descenso de la densidad electrónica que se produce en la señal GPS. También se presenta la implementación de dicha técnica en una aplicación Java que permite la automatización de todo el proceso. El segundo artículo se centra en la caracterización de los descensos del *TEC* en el sector sudamericano, especialmente interesante debido a su gran comportamiento dinámico. También se han evaluado los descensos del *TEC* con la actividad solar así como con el comportamiento de otras propiedades de la ionosfera, como la relación entre las densidades electrónicas. El tercer artículo presenta un análisis del comportamiento espacial y temporal de los descensos del *TEC* durante un ciclo solar. Este artículo analiza la distribución espacio-temporal de la formación, duración y tamaño de los descensos de *TEC*, proporcionando también un análisis estadístico de estas características.

En el Capítulo 6 se recogen las conclusiones de los resultados presentados y se proponen líneas de investigación futuras abiertas durante el desarrollo de este trabajo.

The Global Navigation Satellite Systems (GNSS) have become an essential tool for both civil and military services. The positioning of air, sea and land vehicles is now unthinkable without such systems. However, the use of these systems is not limited to military or navigation purposes; in fact it has been extended to other fields such as the Earth sciences and engineering, in order to develop new applications.

GNSS is a continuously expanding technology and the main space agencies, e.g. National Aeronautics and Space Administration (NASA), European Space Agency (ESA), Russian Federal Space Agency (Roscosmos), etc., have specific programs to promote this technology and develop new features for its exploitation. On one hand, new satellites and receivers' components are developed in order to provide more reliable measurements. Moreover, new techniques are being enhanced to improve the performance of these systems, that is, to make the models integrated in GNSS receivers being more accurate for position estimation.

The accuracy improvements allow generating new applications such as the usage of GNSS technology for maneuvering of aircraft approaching and landing under poor visibility conditions. In this sense, in the early century the Federal Aviation Administration (FAA) and ESA began the implementation of Satellite Based Augmentation Systems (SBAS), which provide corrections to GNSS receivers in order to obtain a better estimation of the position.

One of the main sources of GNSS positioning error is the ionosphere. Due to the spatial and temporal anomalies and the dynamic behavior of this atmospheric region, it is needed to develop new techniques for its modeling. In this sense, the scientific community has created global ionosphere models (e.g., the International Reference Ionosphere model, IRI, or the NeQuick model) which provide the dynamic behavior of the ionosphere. However, these models have some limitations when trying to reproduce certain anomalies.

In this sense, this work focuses on achieving the following main objectives:

- To review and analyze the ionospheric anomalies which concern to GNSS systems.
- To provide a better knowledge of the impact of these anomalies.

Thus, three of the most important ionospheric characteristics for the development of the ionospheric models have been used. These characteristics were chosen due to their great impact on the GNSS systems:

- electron density peak height, $hmF2$
- equivalent scale height, H_m
- total electron content (TEC) depletions

In order to introduce the achievement of these objectives, this work is divided into three parts.

The first part includes Chapters 2 and 3, where a review of the state of the art is presented. Chapter 2 provides a general description of the ionosphere, explaining its fundamental characteristics as well as the main physical and chemical phenomena that cause its formation. Also, a global view of the more important ionospheric models is given. Chapter 3 introduces the GNSS operation and the impact of the ionosphere on the satellite signal. In addition, a description of the models used by GNSS to correct the ionospheric error as well as the systems developed in parallel to improve the performances of GNSS is included.

The second part of this thesis is formed by Chapter 4, where the $hmF2$ and H_m results are presented in two papers preceded by a brief summary in Spanish. The first paper analyzes $hmF2$, the main parameter used by the ionospheric models to define the electron density profile. The results of this paper show that $hmF2$ presents a high spatial and temporal dependence. In this study, a technique to model this feature is proposed and the results are compared with the predictions provided by the IRI model for different latitudes and different time periods. After the conclusions of this first paper, a global model that provides the behavior of $hmF2$ was published. The assessment of the $hmF2$ models shows an improvement in the $hmF2$ estimation, especially at high and low latitudes where the current reference models have greater errors. Using the same technique, it is also provide a global H_m model, which relates the topside and the bottomside electron density profiles.

In the third part, an analysis of the TEC depletions is shown in Chapter 5. In this part three papers have been included, and the structure is similar as in Chapter 4. The first paper defines a methodology that uses Global Position System (GPS) data to detect and characterize the duration and decrease of

electron density depletions in the GPS signal. The implementation of this technique is also presented in a Java application that allows automating the entire process. The second paper focuses on the characterization of the *TEC* depletions in the South American sector, where a high dynamic behavior is found. The relationship between *TEC* depletions and the solar activity has been also assessed, as well as the behavior of other ionospheric characteristics, e.g. electron density ratio. The third paper shows an analysis of the spatial and temporal behavior of *TEC* depletions occurrence in the whole world.

In Chapter 6, the conclusions of the results obtained in the previous Chapters are collected and some lines of research are proposed for future development of this work.

Capítulo 2

La ionosfera

La ionosfera es la parte ionizada de la atmósfera que contiene una cantidad significativa de electrones libres e iones, predominantemente positivos aunque también existen iones negativos en alturas bajas (e.g., Ratcliffe, 1960). Aproximadamente, la ionosfera empieza entre los 50 - 60 km de altura y se extiende hasta los 2000 km. Es un medio eléctricamente neutro (existe la misma cantidad de cargas positivas y negativas) y conductor. La ionosfera se comporta como un plasma y, aunque la cantidad de partículas cargadas respecto a las partículas neutras pueda ser minoritaria, puede influir sobre las propiedades eléctricas del medio (e.g., Hargreaves, 1992).

La ionosfera terrestre se puede dividir principalmente en tres regiones que presentan propiedades distintas según su latitud magnética. En latitudes medias, la ionización se produce debido a las emisiones ultravioleta extremas (EUV) y rayos X procedentes del Sol y se elimina por procesos de recombinación química que implican a la atmósfera neutra así como a las moléculas ionizadas. Los movimientos de los iones y el balance entre producción y pérdida se ven afectado por los vientos neutros. Los procesos típicos de la ionosfera a latitudes medias también se producen a latitudes bajas y altas, pero en esas regiones existen procesos adicionales también importantes.

A bajas latitudes, $\pm 30^\circ$ sobre el ecuador magnético, la electrodinámica desempeña un papel importante sobre la ionosfera, debido a que las líneas del campo magnético son horizontales en el ecuador. La consecuencia principal es que la conductividad eléctrica es anormalmente mayor en el ecuador. En la sección 0 se detalla más en profundidad el comportamiento de la ionosfera a bajas latitudes.

A altas latitudes encontramos la situación opuesta. Aquí, las líneas de campo magnético están cerca de la vertical y conectan las altas latitudes con la parte externa de la magnetosfera definida por el viento solar. Este proceso implica que la ionosfera a altas latitudes presenta una mayor sensibilidad a las influencias externas (Hunsucker and Hargreaves, 2003).

Además de los procesos de ionización, los electrones libres y los iones tienden a interactuar entre ellos y con los componentes neutros de la atmósfera, bien recombinándose o reaccionando con otros gases. De esta forma, existe un equilibrio fotoquímico y dinámico por el cual la relación entre las velocidades de los procesos de producción y pérdida establece la concentración neta de electrones libres (densidad electrónica, n_e). La variación

temporal de la densidad electrónica se expresa a partir de la ecuación de continuidad (Hunsucker and Hargreaves, 2003):

$$\frac{dn_e}{dt} = q - L - \nabla(n_e \vec{v}) \quad 2-1$$

donde q es la tasa de producción, L la tasa de pérdida debido a la recombinación, $\nabla(n_e \vec{v})$ la pérdida de electrones debido a su movimiento y \vec{v} su velocidad.

Como la ionización depende de la radiación procedente del Sol, la tasa de producción derivará de la intensidad de energía ionizante así como de la concentración de partículas a ionizar, n . Para explicar la variación de la tasa de producción nos basaremos en el modelo de Chapman (Chapman, 1931). Este modelo teórico fue el primero en intentar explicar la formación de la ionosfera. Para ello considera una atmósfera plana, estratificada, compuesta por un único gas y en equilibrio hidrostático. Con ello podemos considerar que:

- la intensidad de energía ionizante decrece exponencialmente a medida que penetra en la atmósfera tal que

$$I = I_\infty \cdot e^{-\tau} \quad 2-2$$

donde I_∞ es el valor máximo de intensidad, que tendrá lugar por encima de la atmósfera y τ la profundidad óptica, siendo ésta el producto entre la sección de absorción, σ , y el número de átomos absorbentes que hay en una columna de sección unidad por debajo del nivel considerado, n_a .

- la concentración de partículas decrece exponencialmente con la altura según la expresión

$$n = n_0 \cdot e^{-\left(\frac{h}{H}\right)} \quad 2-3$$

donde n_0 es la concentración de partículas en la superficie (altura cero), h es la altura sobre la superficie y H es la altura de escala que a su vez se define como

$$H = \frac{k_B T}{mg} \quad 2-4$$

donde k_B es la constante de Boltzman, T la temperatura (uniforme), m la masa de la partícula y g la aceleración de la gravedad (que se supone independiente de la altura).

Con estas dos aproximaciones se puede deducir el perfil de producción de Chapman, q , a partir del cual se obtiene el perfil de densidad electrónica,

$$q = q_{m,0} \cdot \exp[1 - z - e^{-z} \cdot \sec \chi] \quad 2-5$$

donde $q_{m,0}$ es la máxima tasa de producción, χ el ángulo cenital con el que incide la radiación, $z = \frac{h - h_{m,0}}{H}$ es la altura normalizada reducida al nivel de máxima ionización e incidencia vertical ($\chi = 0$), h es la altura, $h_{m,0}$ la altura del máximo de ionización y H la altura de escala. Dicha expresión predice que existirá una altura en la que la tasa de producción, q , alcanzará un máximo (Figura 2-1).

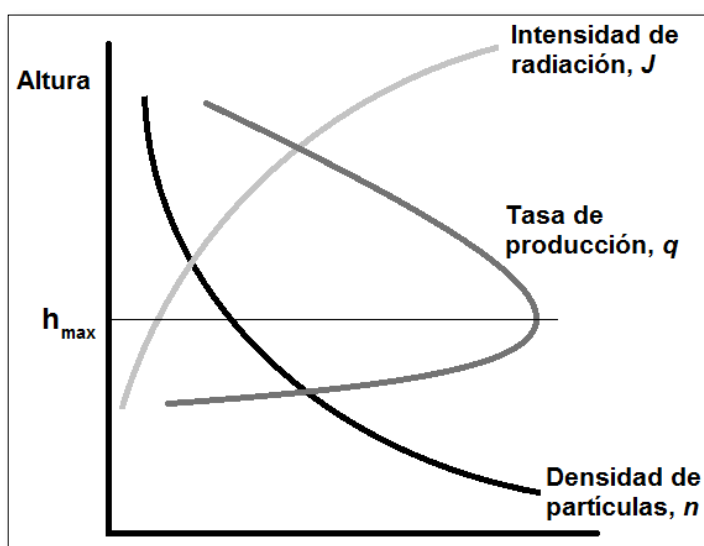


Figura 2-1: Variación con la altura de la tasa de producción, la intensidad de radiación y la concentración de partículas.

2.1. Estructura vertical

Debido a que la radiación ionizante procedente del Sol varía a lo largo del día y la composición de la atmósfera no presenta una distribución homogénea, la ionosfera presenta varios máximos de densidad en diferentes alturas y se estructura en distintas regiones designadas como D, E, F1 y F2.

La región D se encuentra entre 50–60 km y 90 km de altura aproximadamente. Esta región presenta un alto índice de absorción de las ondas electromagnéticas debido a las colisiones entre iones, electrones y partículas neutras. Esta región está principalmente compuesta por N_2 , O_2 , CO_2 , Ar, Ne y He, si bien también contiene una destacable concentración de NO. Debido a esta composición, la principal fuente de ionización de esta región son los rayos X ($\lambda = 0.01-10$ nm), la radiación Lyman- α ($\lambda = 121.6$ nm), la radiación ultravioleta ($\lambda = 102.7-111.8$ nm) y los rayos cósmicos ($\lambda < 0.1$ pm) (Kelley, 2009). La dependencia de ionización altamente energética hace que la capa D sea muy variable, presentando durante el día máximos de concentración de densidad electrónica del orden de 10^8 e-/m³ y mínimos de 10^6 e-/m³ y desvaneciéndose durante la noche por la falta de radiación.

La región E se sitúa por encima de la región D, extendiéndose desde 90 km hasta 140 km aproximadamente. Esta capa se compone principalmente de O_2 , O, NO^+ , O^+ y electrones libres, formándose principalmente por la radiación ultravioleta ($\lambda = 80-102.7$ nm) y los rayos X ($\lambda = 0.01-10$ nm). La concentración de densidad electrónica varía entre 10^{11} e-/m³ durante el día y 10^{10} e-/m³ durante la noche. Una característica importante de la región E es la presencia ocasional de una zona anómala llamada capa E esporádica (E_s), que puede manifestarse tanto por el día como por la noche. Esta capa se forma principalmente en verano a unos 100 km de altura y consiste en un aumento de la densidad electrónica en una zona localizada (entre 1000 km y 2000 km de radio y 1 km de espesor). Esta anomalía se debe a la combinación de los vientos de cizalla y el campo magnético terrestre que producen una compresión de la ionización

A mayor altura se encuentra la región F, que a su vez se subdivide en dos regiones, F1 y F2. La región F1 se sitúa entre 140 km y 200 km, aproximadamente. Se forma por la radiación ultravioleta ($\lambda = 20-80$ nm), está constituida principalmente por N_2 , NO^+ , O^+ y electrones libres y presenta un perfil que se ajusta muy bien al modelo de Chapman descrito anteriormente. Esta capa aparece exclusivamente durante el día, tiene una fuerte dependencia

de la actividad solar y la estación del año y alcanza un máximo de densidad electrónica del orden de 10^{11} e⁻/m³. La capa F2 se localiza entre 180 km y 2000 km aproximadamente y está formada por el mismo rango de radiación ultravioleta de la capa F1. La composición de esta capa es fundamentalmente O, N, O⁺ y electrones. Es en ella donde se localiza el máximo de densidad electrónica ionosférico, (en torno a 10^{12} e⁻/m³), que se sitúa entre 300 km y 500 km de altura dependiendo de la latitud, hora local, época del año, etc. Aunque la mayor densidad electrónica se localiza en esta capa, el máximo de producción no se encuentra en ella sino en la capa F1. A las alturas en donde se encuentra la capa F2 la densidad atmosférica disminuye y el plasma se ve arrastrado hacia arriba por procesos de difusión. A la altura del máximo, los procesos de difusión y recombinación son igual de importantes.

La Figura 2-2 muestra la distribución en altura de los principales constituyentes de la ionosfera a 45° de latitud durante los equinoccios. En la Figura 2-3 se observa un esquema del rango de radiación absorbido por cada una de las regiones ionosféricas.

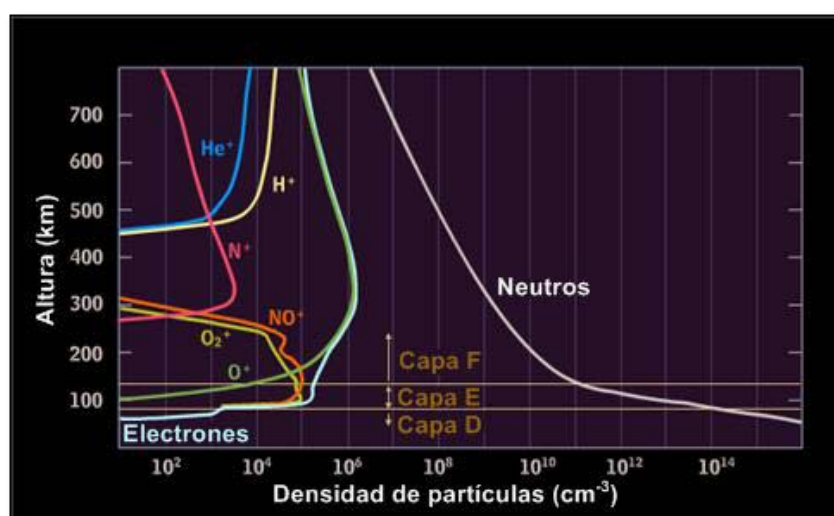


Figura 2-2: Distribución con la altura de las concentraciones de partículas que forman la ionosfera.

Los perfiles de densidad electrónica se obtienen utilizando diferentes técnicas (medidas directas e indirectas) e instrumentación (sondeadores terrestres, satélites, etc.). En esta tesis se han utilizado medidas obtenidas por sondeadores terrestres de incidencia vertical (ionosondas) así como medidas GPS. En el Anexo I se detalla qué es un ionograma y cuáles son las características ionosféricas que se extraen de ellos.

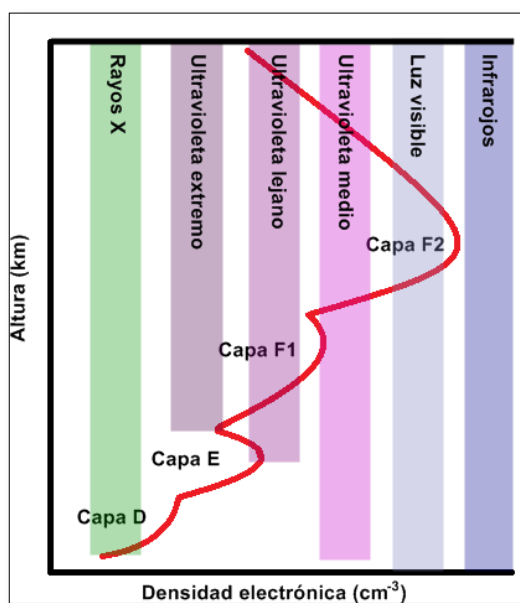


Figura 2-3: Rango de radiación absorbido por cada una de las capas de la ionosfera.

2.2. Ionosfera ecuatorial

Los movimientos de los iones y electrones libres de la ionosfera están ligados a las frecuencias de colisión y a las fuerzas de Lorenz debidas a la acción de un campo magnético. Estas fuerzas hacen que la trayectoria de las partículas sea circular o helicoidal dependiendo del ángulo que forme la velocidad de la partícula con el campo magnético. A la frecuencia de giro de la partícula se le conoce como giro-frecuencia angular. Entre los 70 km y los 300 km, según disminuye la altura aumenta la frecuencia de colisión mientras que la giro-frecuencia se mantiene aproximadamente constante. Por tanto, dentro de este rango de alturas el comportamiento de cada tipo de partículas varía notablemente, dando lugar a una capa con una buena conductividad a 110 km de altura (Ratcliffe, 1972).

La ionosfera presenta un comportamiento diferente al predicho por la teoría de Chapman, esencialmente porque ésta no considera los efectos dinámicos. Dichas diferencias respecto a la teoría de Chapman se conocen como anomalías. Particularmente, en bajas latitudes, la densidad electrónica presenta dos picos con una alta densidad electrónica localizados a 15° en ambos lados del ecuador magnético. Esta anomalía se conoce como anomalía ecuatorial o de Appleton. El aumento de la densidad electrónica tiene su origen

en la deriva vertical del plasma $\vec{E} \times \vec{B}$ de la capa F en el ecuador. En esta región, las líneas del campo magnético son prácticamente horizontales, lo que provoca que la deriva sea máxima y vertical. El campo eléctrico zonal que existe en la ionosfera ecuatorial está dirigido al Este durante el día, creando una velocidad de deriva ascendente, \vec{v}_D , en el plasma

$$\vec{v}_D = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad 2-6$$

Cuando el plasma llega a alturas elevadas en la región ecuatorial, empieza a descender moviéndose a lo largo de las líneas del campo magnético. Este movimiento ocurre debido a la acción de la gravedad (\vec{g}) y de los gradientes de presión (∇p) (Figura 2-4). Este fenómeno, la elevación del plasma y su consecuente descenso por las líneas de campo magnético a bajas latitudes, es conocido como “efecto fuente”.

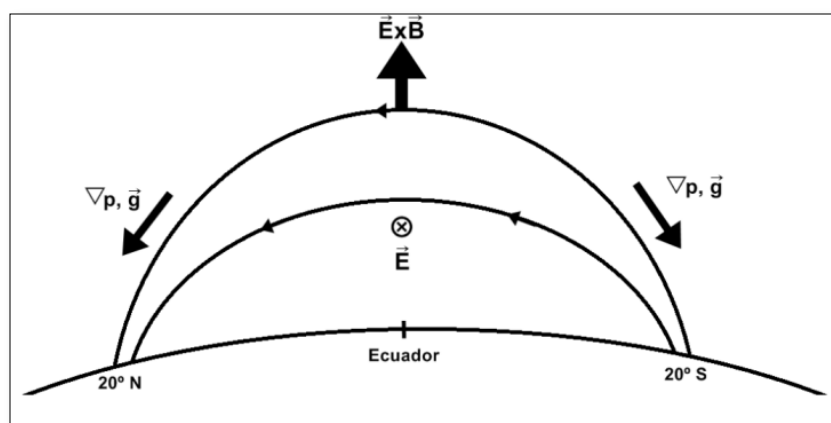


Figura 2-4: Esquema de la anomalía de Appleton.

Además, durante la puesta de Sol, el campo eléctrico dirigido hacia el Este se intensifica por la dinamo de la capa F y el plasma de la capa F es desplazado a mayores alturas. Mientras, el plasma a bajas alturas desciende rápidamente debido a la disminución de la intensidad de la radiación solar incidente (Kelley, 1989). Este efecto se conoce como “Incremento pre-inversión” (PRE, *pre-reversal enhancement*).

El PRE se explica debido a la acción de viento neutro uniforme en la capa F (Figura 2-5). Según Farley et al. (1986), el campo eléctrico E_z generado por la

dinamo de la capa F, $(-\vec{U} \times \vec{B})$, genera un campo eléctrico en la capa E, (E_θ) , dirigido al ecuador. Este campo eléctrico origina a su vez una corriente eléctrica a bajas latitudes $(J_{\theta\phi})$ dirigida al oeste. Debido a que la conductividad es mucho mayor en la zona diurna que en la nocturna, y a que no hay flujos de corriente en la capa E nocturna, la carga negativa se acumula en la línea del terminador dando origen a un campo E_ϕ y a una corriente $J_{\phi\phi}$ que se opone a $J_{\theta\phi}$. El campo E_ϕ genera una corriente en la capa F causando una deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ del plasma primero hacia arriba y, después, hacia abajo.

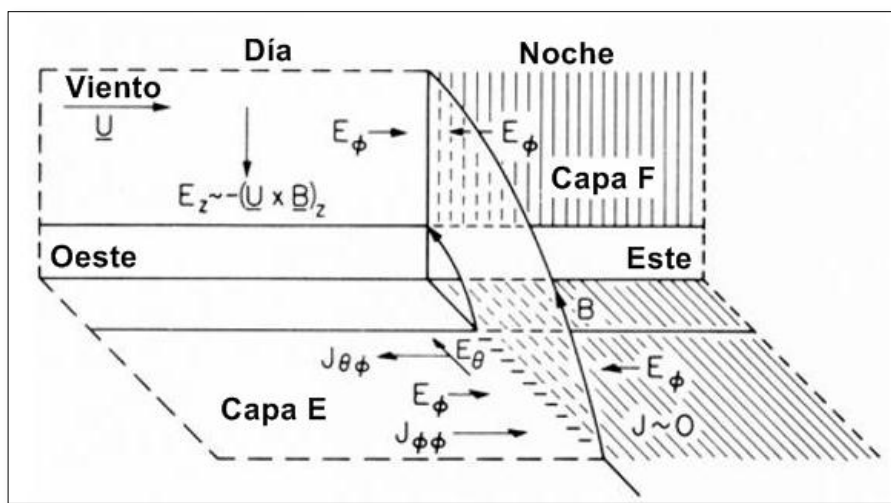


Figura 2-5: Esquema simple para explicar el PRE causado por un viento uniforme U .
Figura adaptada de Kelley (1989).

2.3. Irregularidades ionosféricas ecuatoriales

Como acabamos de describir, la región ecuatorial de la ionosfera presenta una anomalía importante en la densidad electrónica debido al efecto de las fuerzas de Lorenz que generan las corrientes eléctricas de la ionosfera y el campo magnético terrestre. Se ha observado en ionogramas obtenidos en estas latitudes un efecto conocido como “spread F” que consiste en una dispersión de la señal recibida por el sondaador debida a efectos de reflexión múltiple. En el Anexo I se detallan las características de los sondeos ionosféricos de incidencia vertical y el tipo de registros que se obtiene de ellos (ionogramas). Esta dispersión se puede encontrar tanto en altura como en frecuencia o en ambas (Kelley, 1989). El fenómeno de “spread F” se ha relacionado con la presencia de

zonas localizadas con una densidad electrónica menor que la del medio que le rodea. A estas zonas se las conoce como burbujas ionosféricas y cumplen la relación

$$\frac{n(x,y,z)}{n_0(x,y,z)} < 1 \quad 2-7$$

donde $n(x,y,z)$ es la densidad local y $n_0(x,y,z)$ es la densidad ambiental del plasma ionosférico.

Dungey (1956) propuso la inestabilidad gravitacional de Rayleigh-Taylor (GRT) como el proceso que conduce a estas irregularidades. En la Figura 2-6 se muestra, en dos dimensiones, cómo la GRT puede causar irregularidades en la ionosfera ecuatorial. Se ha aproximado el gradiente de la parte baja de la capa F nocturna a dos capas donde la densidad electrónica de la capa superior es n_1 y de la inferior es cero. La fuerza gravitatoria es anti-paralela al gradiente de densidad y el campo magnético es horizontal (hacia dentro). Se ha dibujado una pequeña perturbación en forma de onda sinusoidal y se ha asumido que existen pocas colisiones.

Podemos determinar la corriente eléctrica considerando que las velocidades de los iones y los electrones son debidas a los gradientes de presión y a la fuerza gravitatoria. Las corrientes producidas por el gradiente de presión no crean perturbaciones en los campos eléctricos siempre que la corriente y el gradiente de presión sean perpendiculares.

Como la velocidad es proporcional a la masa de cada partícula, el término dominante será el de los iones y, por tanto, la densidad de corriente neta que fluye en el eje X será

$$J_x = \frac{nMg}{B} \quad 2-8$$

donde n es la densidad del plasma (partículas/m³), M la masa de los iones, g la aceleración de la gravedad y B el módulo del campo magnético.

Como la corriente está en la dirección $\vec{g} \times \vec{B}$, que es estrictamente horizontal, el valor de J_x será exclusivamente proporcional a la densidad. Por tanto, cuanto mayor sea la densidad, mayor será la corriente y viceversa. Debido a esto, se produce una divergencia y las cargas se agruparán en los

bordes de la perturbación inicial, generando como resultado una perturbación en forma de campo eléctrico, $\delta\vec{E}$. Estos campos $\delta\vec{E}$ crean una deriva $\delta(\vec{E} \times \vec{B})$ cuya dirección es hacia arriba para las partículas de la zona menos densa del plasma, y hacia abajo para las partículas de la zona más densa.

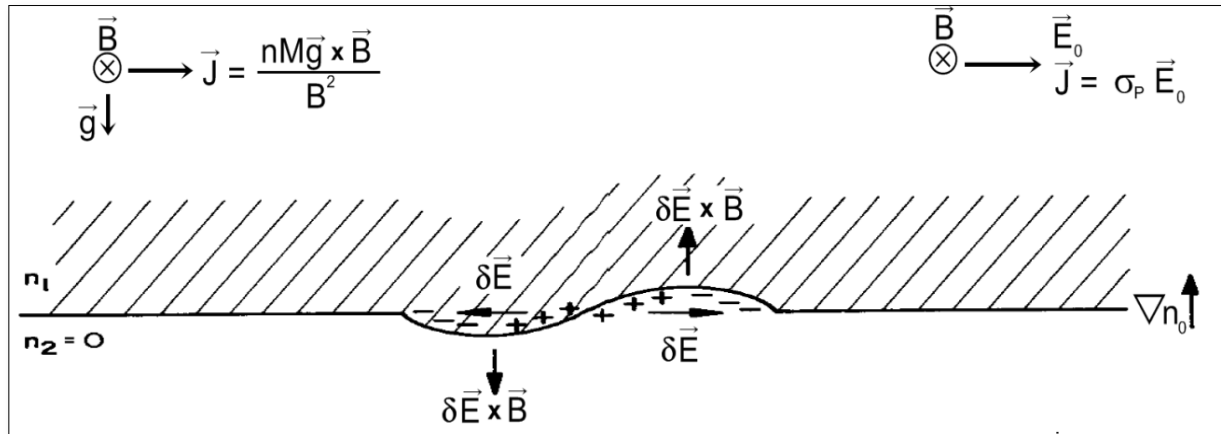


Figura 2-6: Esquema de la anomalía de Rayleigh-Taylor en la zona ecuatorial. Figura adaptada de Kelley (1989).

El plasma menos denso será pues desplazado hacia arriba en esta zona, aumentando la perturbación y haciendo inestable al sistema. En la Figura 2-7 podemos ver este efecto en un fenómeno hidrodinámico análogo.

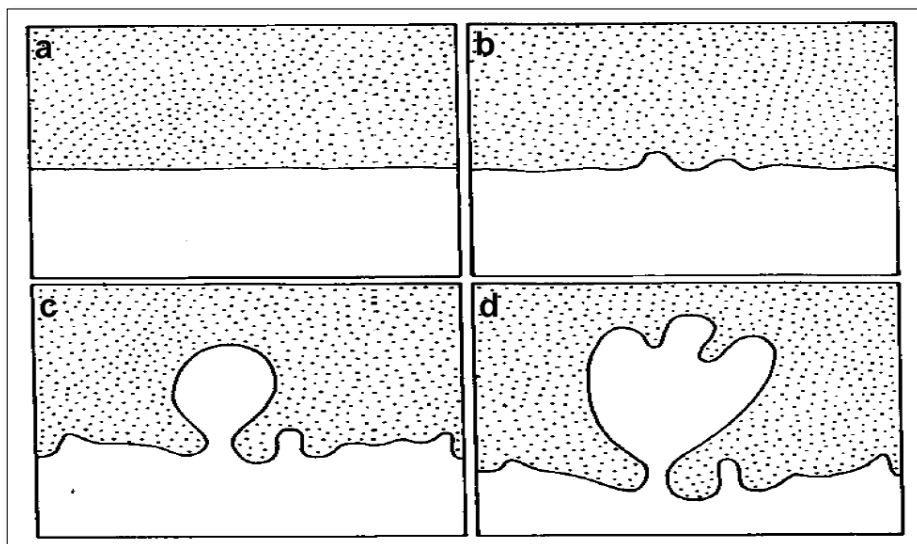


Figura 2-7: Secuencia de la inestabilidad de Rayleigh-Taylor hidrodinámico. Figura adaptada de Kelley (1989).

El ritmo de crecimiento de la inestabilidad de Rayleigh-Taylor, asumiendo una pequeña perturbación inicial en la densidad de plasma y el campo eléctrico, es

$$\gamma = \frac{g}{Lv_{in}} \quad 2-9$$

donde g es la aceleración de la gravedad, v_{in} es la frecuencia de colisión de los iones sobre los neutros y L es la inversa de la longitud de escala del gradiente de densidad, definida como

$$L = \left[\left(\frac{1}{n_0} \right) \frac{dn_0}{dz} \right]^{-1} \quad 2-10$$

Además de la gravedad, hay más factores que pueden desestabilizar la ionosfera ecuatorial, como los vientos neutros (\vec{U}) y el campo eléctrico ambiental (\vec{E}_0). Teniendo en cuenta que, cuando ambos factores existen, se produce una corriente $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}'_0$, donde $\vec{E}'_0 = \vec{E}_0 + \vec{U} \times \vec{B}$, podemos introducir estos factores como posibles causantes de la inestabilidad de Rayleigh-Taylor en la ionosfera. Así, la tasa de crecimiento de la inestabilidad generalizada de Rayleigh-Taylor viene dada por

$$\gamma_{R-T} = \frac{E'_{x,0}}{LB} \cos \alpha + \frac{g}{v_{in}L} \cos \alpha + \frac{E'_{z,0} + UB}{LB} \sin \alpha \quad 2-11$$

donde α es el ángulo de inclinación (positivo desde el Este hacia el cenit) y los ejes X y Z están definidos hacia el Este y hacia arriba en la vertical.

2.4. Modelos ionosféricos globales

Debido a la gran influencia que presenta la ionosfera en las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia se ha visto necesaria la creación de modelos de ionosfera para tratar de predecirla y poder así mitigar sus efectos en las comunicaciones. Se han realizado numerosos esfuerzos en la creación, por diversas instituciones, de diferentes modelos de ionosfera tratando de

predecir, al menos, la variabilidad de alguna de sus características. En la página Community Coordinated Modeling Center (CCMC) perteneciente al Goddard Space Flight Center (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/>) aparece un listado de los modelos de ionosfera actuales clasificados por la/s característica/s que modelan (ionosfera general, densidad electrónica, etc). A continuación se introducen dos de los modelos más utilizados por la comunidad científica: el modelo Internacional de Referencia de la Ionosfera (IRI, *International Reference Ionosphere*) y el modelo NeQuick.

2.4.1. Modelo Internacional de Referencia de la Ionosfera (IRI)

La atención de este trabajo se centra en el modelo IRI. Este modelo empírico destaca por ser el más completo y más utilizado por la comunidad científica. Su creación se llevó a cabo en la década de los 60 por el Committee on Space Research (COSPAR) y la Union Radio-Scientifique Internationale (URSI). El IRI proporciona medias mensuales de los parámetros que definen el perfil de densidad electrónica de la ionosfera entre los 50 km y los 2000 km e, inicialmente, en condiciones de calma (sin eventos magnéticos, tales como las tormentas magnéticas) para cualquier posición geográfica, día y hora. El esfuerzo de la comunidad científica ha hecho posible que el IRI se actualice periódicamente, mejorando la predicción / representación de algunas de las características ionosféricas (Rawer et al., 1978; Bilitza 1990, 1997, 2001; Bilitza and Reinisch, 2008). El modelo IRI se encuentra disponible en versión on-line y en código fortran descargable en <http://irimodel.org/>. En esta misma dirección pueden obtenerse todas las publicaciones descriptivas y los manuales.

La Figura 2-8 muestra la estructura del perfil de densidad electrónica proporcionado por el IRI. La parte superior de la ionosfera (topside) es la región situada por encima del pico de máxima densidad electrónica. Para generar el topside, la primera versión del IRI se basaba en el modelo ionosférico de Bent (Bent et al. 1972) que ajusta el topside a una exponencial de forma similar al perfil de densidad descrito por el modelo de Chapman.

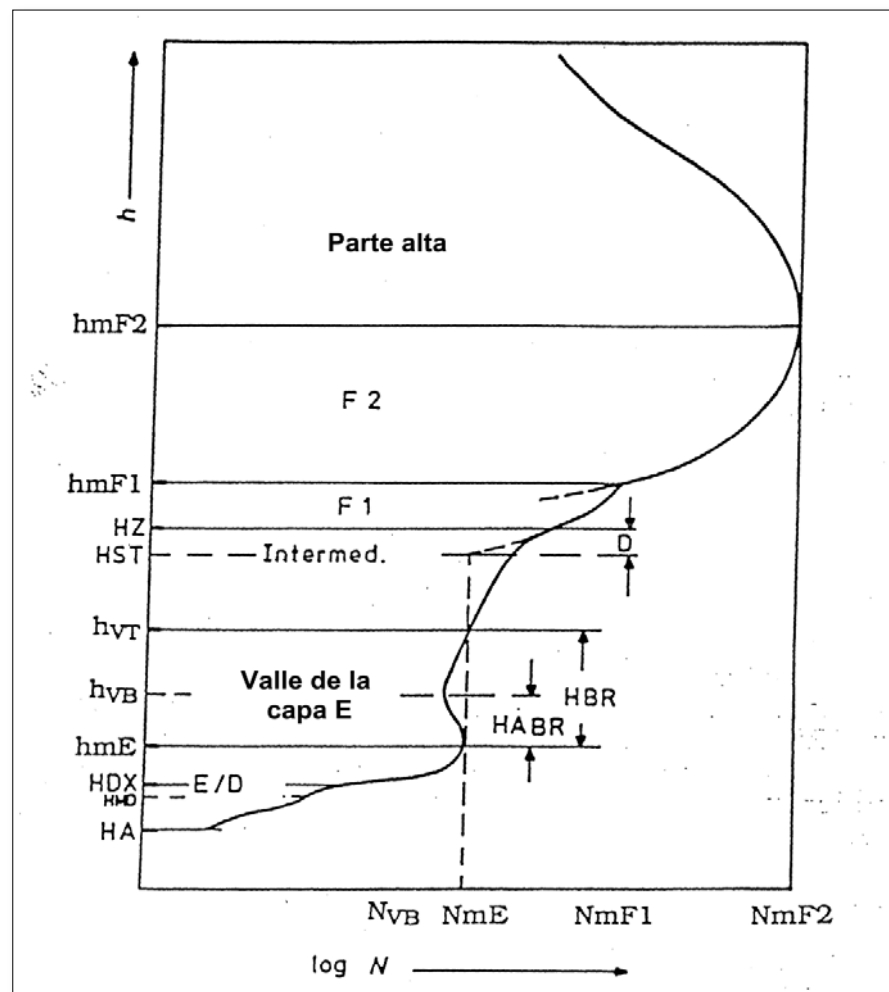


Figura 2-8: Perfil de densidad electrónica del IRI. Figura adaptada de Bilitza (1990).

Bilitza et al. (2004) introdujo una modificación en el modelo del topside del IRI haciendo que éste fuese generado a partir de una función α -Chapman

$$N(h) = NmF2 \cdot \exp\left[\frac{1}{2}(1 - z - e^{-z})\right] \quad 2-12$$

donde $z = \frac{h - hmF2}{H}$, siendo h la altura, $hmF2$ y $NmF2$ la altura y la densidad del pico máximo de densidad electrónica, relacionada con la frecuencia crítica de la forma $NmF2 [m^{-3}] = 1.24 \cdot 10^{10} (f_0F2 [MHz])^2$, y H la altura de escala a la altura del máximo de densidad.

Posteriormente, Reinisch et al. (2007) propuso la formulación de Chapman (*vary-Chap*) para representar el perfil en el “*topside*”, considerando la variación de la altura de escala H con la altura. El resultado fue

$$N_{VC}(h) = NmF_2 \cdot \left(\frac{H_m}{H(h)} \right)^{1/2} \cdot \exp \left[\frac{1}{2} \left(1 - y(h) - e^{-y(h)} \right) \right] \quad 2-13$$

donde $y(h) = \int_{h_{mF_2}}^h \frac{dh}{H(h)}$, siendo H_m la altura de escala al nivel del máximo de densidad. En la Figura 2-9 se muestra el comportamiento de las funciones α -Chapman con una altura de escala H constante y la función vary-Chap.

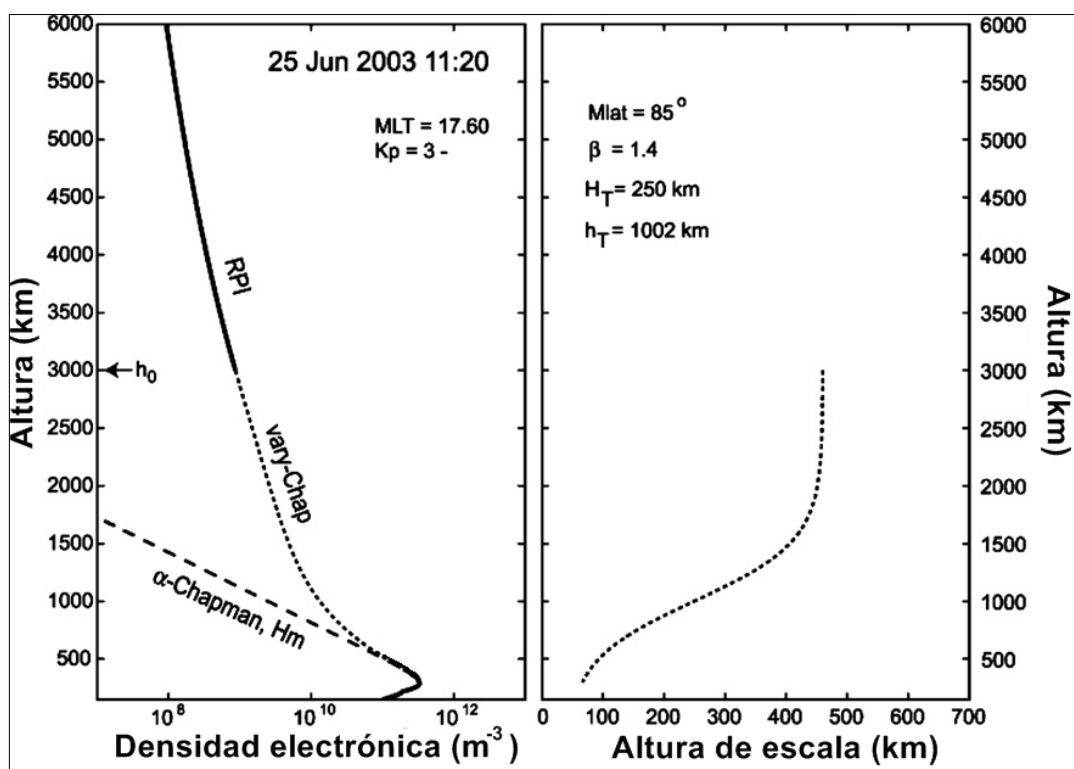


Figura 2-9: Izquierda: Representación de los perfiles de densidad electrónica obtenidos utilizando una función α -Chapman con una altura de escala H constante (línea discontinua) y una función vary-Chap (línea de puntos). Derecha: Representación de la variación de la altura de escala con la altura utilizada en la función vary-Chap. Figura adaptada de Bilitza and Reinisch (2008).

El IRI puede proporcionarnos el perfil de densidad a partir de los valores obtenidos experimentalmente de las principales características ionosféricas (f_0F_2 y $M(3000)F_2$) o a partir de valores modelados. En este sentido, el IRI

dispone de dos opciones para modelar la frecuencia del pico de máxima densidad electrónica, f_oF2 : los coeficientes CCIR desarrollados por el Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR, 1991) y los coeficientes URSI, desarrollados por Union Radio-Scientifique Internationale (Rush et al., 1989). Una de las mejoras del IRI fue añadir un modelo para f_oF2 en condiciones perturbadas (Araujo-Pradere et al., 2002), que simula los efectos de una tormenta magnética en la frecuencia crítica.

Para calcular $hmF2$, el IRI utiliza la formulación propuesta por Bilitza et al. (1979), basada en la de Shimazaki (1955), que relaciona esta característica con el factor de propagación $M(3000)F2$ de la siguiente manera:

$$hmF2 = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176 \quad 2-14$$

Bilitza et al. (1979) modificaron esta ecuación introduciendo un factor de corrección (ΔM) relacionado con la actividad solar y la localización geográfica:

$$hmF2 = \frac{1490}{M(3000)F2 - \Delta M} - 176 \quad 2-15$$

donde el factor de corrección utilizado por el IRI es

$$\Delta M = \frac{F_1(R_{12}) \cdot F_2(R_{12}, \varphi)}{\frac{f_oF2}{f_oE} - F_3(R_{12})} - F_4(R_{12}) \quad 2-16$$

siendo

$$F_1(R_{12}) = 0.00232 \cdot R_{12} + 0.222 \quad 2-17$$

$$F_2(R_{12}, \varphi) = 1 - \frac{R_{12}}{150 \cdot \exp\left[-\frac{\varphi^2}{1600}\right]} \quad 2-18$$

$$F_3(R_{12}) = 1.2 - 0.0116 \cdot \exp\left[\frac{R_{12}}{41.84}\right] \quad 2-19$$

$$F_4(R_{12}) = \frac{0.096 \cdot (R_{12} - 25)}{150} \quad 2-20$$

donde φ es la latitud magnética, relacionada con la inclinación magnética I de la forma $\tan\varphi = \tan I$, y R_{12} (o $Rz12$) es la media del número de manchas solares de 12 meses, definida como

$$R_{12} = \frac{\left[\frac{R_{n-6}}{2} + R_{n-5} + \dots + R_n + \dots + R_{n+5} + \frac{R_{n+6}}{2} \right]}{12} \quad 2-21$$

Para el cálculo de $hmF2$, el modelo de $M(3000)F2$ utilizado es el modelo de armónicos esféricos desarrollado por el CCIR (Jones and Gallet, 1962, 1965).

2.4.2. Modelo NeQuick

El modelo NeQuick (Hochegger et al., 2000; Radicella and Leitinger, 2001; Nava et al., 2008) es un modelo ionosférico de densidad electrónica desarrollado por el ICTP y la universidad de Graz, que representa una evolución del modelo DGR (Di Giovanni and Radicella, 1990; Radicella and Zhang, 1995).

La versión actual del modelo NeQuick utiliza la formulación del perfil DGR modificado (Di Giovanni y Radicella, 1990) para describir la región inferior de la ionosfera (bottomside). Este perfil utiliza cinco capas descritas con una función semi-Epstein (Rawer, 1982) cuyos espesores son obtenidos a partir de varios parámetros (Radicella y Zhang, 1995). Para modelar estas capas se utilizan los picos de las regiones E, F1 y F2, representados por los parámetros f_0F2 , f_0F1 , f_0F2 y $M(3000)F2$ obtenidos a partir de medidas de ionosondas. Estos valores pueden ser modelados o conseguidos experimentalmente:

$$N(h) = \frac{4 \cdot N_{max}}{(1 + e^z)^2} \cdot e^z \quad 2-22$$

donde $z = \frac{h - hmF2}{B}$, N_{max} corresponde a la densidad máxima de la capa, $hmF2$

es la altura donde se encuentra el pico de densidad máxima y B es el parámetro de espesor de la capa. Estos valores de altura y densidad máxima, que sirven como puntos de anclaje del modelo, se obtienen a partir de los coeficientes del CCIR (ahora ITU-R) (CCIR, 1991) que, como se ha indicado en la sección anterior, proporcionan los valores de f_oF2 y $M(3000)F2$ estimando la altura máxima a partir de este último parámetro y su relación a través de la expresión de Dudeney (1978, 1983).

La parte superior de la ionosfera (topside) está representada por una función semi-Epstein con un parámetro de espesor dependiente de la altura (Hochegger et al., 2000) y determinado empíricamente (Coisson et al., 2006).

El modelo NeQuick es un modelo global que, introduciendo la posición, tiempo y flujo solar (o número de manchas solares) proporciona el perfil de densidad electrónica hasta los 20000 km en cualquier lugar del planeta. En la última versión del IRI (IRI2007), se introdujo la formulación utilizada en el modelo NeQuick como opción preferida para el cálculo del topside (Bilitza and Reinisch, 2008).

El modelo NeQuick ha sido adoptado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) como modelo para calcular el contenido electrónico total (*TEC*) para la evaluación del efecto ionosférico en comunicaciones transionosféricas y navegación satelital (ITU-R, 2009). El modelo es muy utilizado en aplicaciones prácticas como el proyecto Galileo (Zimmerman et al., 2005) cuyo generador de escenarios, *Raw Data Generation* (RDG), utiliza NeQuick para calcular el retraso de la señal debido al efecto ionosférico (ver 3.2.4 para más detalle). NeQuick también está incorporado en el modelo global de centelleo ionosférico (GISM, *Global Ionospheric Scintillation Model*) (Beniguel and IEEA, 2004) que utiliza el gradiente de densidad electrónica, calculado a partir del NeQuick, para simular el efecto en la señal que esté produce.

Una capacidad muy importante de NeQuick es poder generar una representación más realista de la ionosfera en una región dada o globalmente a partir de la asimilación de medidas experimentales en el modelos (Nava et al., 2011). Esta técnica, llamada asimilación de datos, consiste en la estimación de los parámetros que controlan el modelo NeQuick minimizando los residuos con

respecto a unos datos experimentales provenientes de medidas de GNSS o digisondas.

Una versión web del modelo NeQuick está disponible en <http://t-ict4d.ictp.it/nequick2>. Esta versión proporciona tanto perfiles verticales como oblicuos, muy útiles para el desarrollo de los sistemas GNSS.

Este modelo se ha utilizado en el marco de diversos proyectos de la ESA, entre ellos la evaluación de efectos ionosféricos para el sistema SBAS europeo EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*). Actualmente una versión del modelo que se basa el concepto de asimilación de medidas es utilizada en el programa Galileo para obtener correcciones ionosféricas en operaciones a una frecuencia.

Capítulo 3

Sistemas de Navegación por satélite

Los Sistemas GNSS consisten en sistemas de radio-navegación que cubren todo el planeta, formados por constelaciones de satélites (24 o más), estaciones en tierra y usuarios. Estos segmentos (espacio, tierra y usuario) trabajan juntos para proporcionar una posición precisa (coordenadas geográficas y altitud) a cualquier hora y en cualquier parte del mundo. Actualmente estos sistemas se utilizan para fines de navegación, transporte, geodésicos, hidrográficos, agrícolas y otras actividades semejantes.

El primer sistema de navegación por satélite completamente operacional fue el NAVSTAR-GPS (*Navigation System with Time And Ranging-Global Positioning System*) (<http://www.gps.gov/>) actualmente conocido como GPS (*Global Positioning System*), desarrollado y controlado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. El sistema GPS está formado por una constelación de 24-27 satélites orbitando a 20200 km de altura, aproximadamente, en seis planos con una inclinación de 55° respecto al ecuador geográfico (Figura 3-1).

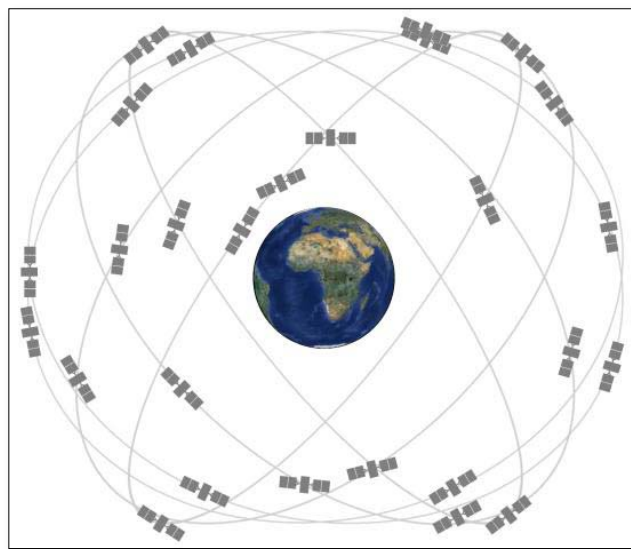


Figura 3-1: Esquema de la constelación GPS. Figura obtenida de <http://www.gps.gov>.

El siguiente sistema de navegación por satélite desarrollado fue el Sistema Mundial de Navegación por Satélites (GLONASS, *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) (<http://glonass-iac.ru>). Este sistema, creado por la Unión Soviética y actualmente gestionado por la Federación Rusa, consta de 24 satélites (21 en activo y 3 satélites de repuesto) orbitando a una altitud de 19100 km y repartidos en tres planos orbitales con una inclinación de 65°.

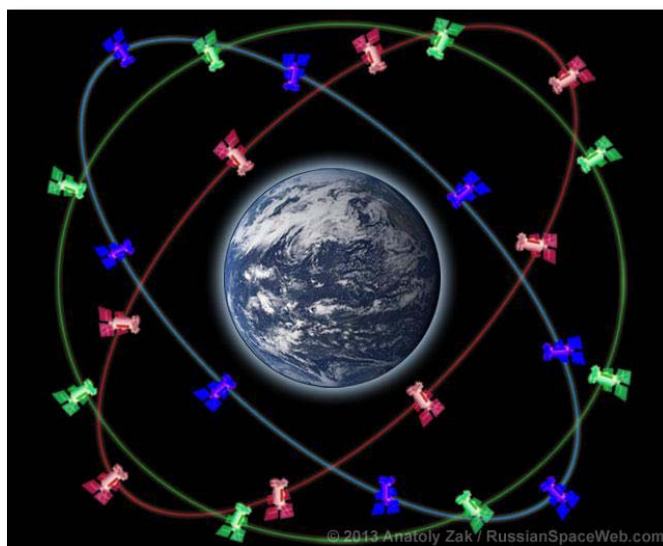


Figura 3-2: Esquema de la constelación GLONASS. Figura obtenida de <http://www.russianspaceweb.com/glonass.html>.

En la actualidad, existen varios países que están desarrollando sus propios sistemas de navegación por satélite:

- Unión Europea y Agencia Espacial Europea: Sistema de Posicionamiento **Galileo**. Constará de 30 satélites orbitando a 24000 km y cubrirá toda la superficie del planeta. Este sistema será compatible con la nueva generación de satélites GPS, pudiendo utilizar los satélites Galileo y GPS al mismo tiempo para obtener una mayor precisión en el posicionamiento. Esta constelación es de uso civil.
- República Popular China: **Beidou, Compass o BNTS** (*BeiDou/Compass Navigation Test System*). Este sistema costará de 30 satélites situados en una órbita geoestacionaria (36000 km de altura).
- India: Sistema de Navegación por Satélite regional Indio (**IRNSS**, *Indian Regional Navigation Satellite System*). Este sistema consistirá en tres satélites colocados en una órbita geoestacionaria y otros cuatro a una altura de 24000 km aproximadamente, de forma que los siete satélites tengan siempre una visión continua con las estaciones en tierra de la India.

Al ser la constelación más utilizada en el ámbito científico a partir de ahora nos centraremos en el funcionamiento de la constelación GPS.

3.1. Funcionamiento de la navegación por satélite

La navegación por satélite consiste en localizar la posición de un objeto utilizando como punto de referencia satélites que se desplazan a altas velocidades a 20200 km de altura. Para saber la posición exacta, los receptores GNSS determinan la distancia a cada uno de los distintos satélites:

- Calculando dónde está exactamente cada satélite en el espacio
- Midiendo el tiempo que tarda la emisión de las señales de radio entre el satélite y el receptor para cada satélite
- Contabilizando los retrasos de las señales por su paso a través de la atmósfera terrestre.

La ubicación de cada satélite está basada en un modelo de su órbita llamada efemérides. Cada satélite incluye datos de sus efemérides como parte de la información que emite de forma continua. Las efemérides de cada satélite cambian lentamente ya que al estar muy por encima de la atmósfera terrestre, no sufren efectos de arrastre atmosférico. Debido a la acción de la gravedad lunar y solar y a la presión de la radiación solar, los satélites presentan una pequeña deriva respecto de sus órbitas. El error en las efemérides causado por esta deriva es muy pequeño pero ha de tenerse en cuenta para mantener la precisión del sistema. Para ello, la constelación GPS dispone de estaciones en tierra que corrigen la posición de la órbita y los errores en los relojes enviando estas correcciones a los satélites.

Los satélites GPS emiten continuamente usando dos radiofrecuencias en la banda-L llamadas Link 1 ($L1$) y Link 2 ($L2$). La banda-L cubre las frecuencias localizadas entre 1 GHz y 2 GHz y forma parte de la banda de frecuencias ultra altas (UHF, *ultra high frequency*). Las señales $L1$ y $L2$ están centradas en las siguientes frecuencias:

$$L1: f_{L1} = 1575.42 \text{ MHz}$$

$$L2: f_{L2} = 1227.60 \text{ MHz}$$

En la frecuencia $L1$ se emiten dos señales, una de uso civil y otra, al igual que la señal emitida en la frecuencia $L2$, para usuarios autorizados por el Departamento de Defensa estadounidense.

Cada señal GPS emitida consta de tres componentes:

- Portadora (*carrier*): consiste en una señal sinusoidal con frecuencia f_{L1} o f_{L2} ($L1$ y $L2$, respectivamente).
- Código (*ranging code*): es una familia de códigos binarios llamadas secuencias de ruido pseudo-aleatorio (PRN, *pseudo-random noise*) o códigos PRN. El código PRN identifica cada satélite, proporciona la coordinación temporal para el sistema y hace posible la amplificación de la señal GPS. En estos códigos PRN se emiten los códigos C/A (*coarse/acquisition*) utilizados en los Servicios de Posicionamiento Estándar, de uso civil, y los códigos de precisión P(Y) (encriptados) utilizados por los Servicios de Posicionamiento Preciso, de uso militar. Cada satélite emite un código C/A único en $L1$ y unos códigos P(Y) únicos para $L1$ y $L2$ (C1, P1 y P2, respectivamente).
- Datos de navegación (*navigation data*): es un mensaje en código binario que envía información sobre el estado de operatividad del satélite, las efemérides (posición y velocidad del satélite), parámetros de los errores del reloj y un almanaque con datos sobre las efemérides de todos los satélites de la constelación. Los parámetros esenciales de las efemérides y el reloj de cada satélite se repiten cada 30 segundos.

3.2. La señal GPS

La posición de un usuario se calcula a partir de la señal emitida por los satélites. Los receptores GNSS procesan las señales de los satélites y las codifican en ficheros RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*, véase Anexo II). Estos ficheros proporcionan toda la información necesaria para poder estimar la posición. Para ello se utiliza el fichero RINEX que contiene los observables.

Este fichero contiene las medidas del **código**, que suministra estimaciones del tiempo de tránsito aparente de la señal, y la **fase** de la portadora, que proporciona medidas de la fase portadora recibida en relación con la fase de la señal sinusoidal generada por el reloj del receptor.

3.2.1. Medidas del código

Una medida básica que realiza un receptor GPS es el tiempo de tránsito aparente de la señal entre el satélite y el receptor, definido como la diferencia entre el tiempo de recepción de la señal, determinado por el reloj del receptor, y el tiempo de transmisión del satélite, marcado en la señal. Esta medida presenta un error debido al hecho de que los relojes del satélite y el receptor no están sincronizados perfectamente. Cada satélite genera su señal en concordancia con el reloj que lleva a bordo. El receptor genera una réplica de cada señal en relación con su propio reloj. Por tanto, la correspondiente distancia aparente, o pseudo-rango, se define como el tiempo de tránsito medido multiplicado por la velocidad de la luz en el vacío.

Existen tres escalas de tiempo a tener en cuenta: los tiempos marcados por los relojes del satélite, los del receptor y un tercer tiempo como tiempo común de referencia, tiempo GPS (GPST, *GPS Time*), definido como una escala de tiempo compuesto derivado de los tiempos marcados por los relojes de las estaciones de monitorización GPS y los de cada satélite (Figura 3-3).

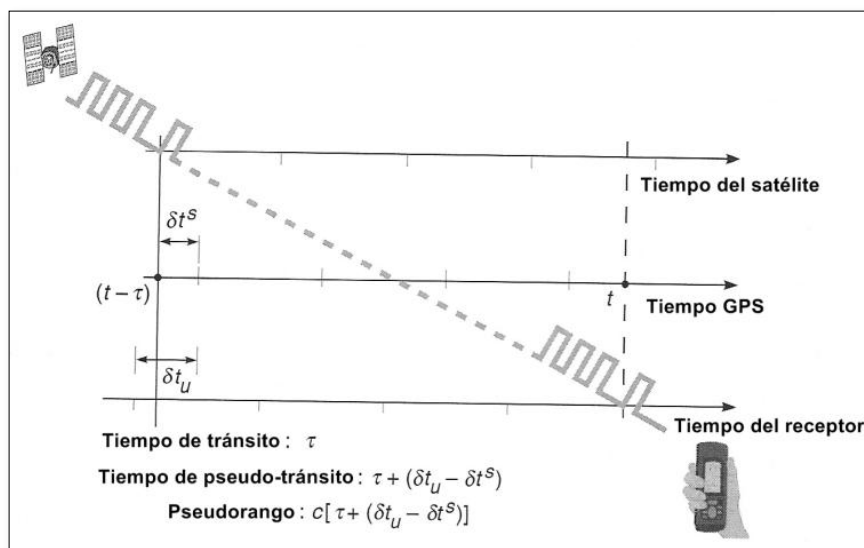


Figura 3-3: Esquema de las diferentes escalas de tiempos y su relación entre sí. Figura adaptada de Misra and Enge (2006).

De esta forma, el pseudo-rango, ρ , se puede determinar, a partir del tiempo de tránsito, τ , asociado con la transición de un código específico de la señal de un satélite recibido a un tiempo t en GPST, de la forma:

$$\rho(t) = c [t_u(t) - t^s(t - \tau)] \quad 3-1$$

$t^s(t - \tau)$ corresponde al tiempo de emisión y $t_u(t)$ es el tiempo de llegada medido por el reloj del receptor. Tanto t como τ son desconocidos y han de estimarse.

Las escalas de tiempo de los relojes del satélite y el receptor se relacionan con el GPST como

$$t_u(t) = t + \delta t_u(t) \quad 3-2$$

$$t^s(t - \tau) = t - \tau + \delta t^s(t - \tau) \quad 3-3$$

donde $\delta t_u(t)$ y $\delta t^s(t)$ son los errores relativos al GPST del reloj del receptor y el satélite, respectivamente.

Introduciendo los errores de los relojes en el cálculo del pseudo-rango obtenemos

$$\rho(t) = c [t + \delta t_u(t) - (t - \tau + \delta t_u(t - \tau))] + \varepsilon_\rho(t) \quad 3-4$$

siendo $\varepsilon_\rho(t)$ corresponde a los errores de medida del modelado y los efectos no modelados.

El tiempo de tránsito multiplicado por la velocidad de la luz en el vacío puede ser modelado como

$$c\tau = r(t, t - \tau) + I_\rho(t) + T_\rho(t) \quad 3-5$$

$r(t, t - \tau)$ representa la distancia geométrica real entre la posición del receptor en el tiempo t y la posición de satélite en el tiempo $(t - \tau)$. I_ρ y T_ρ representan los retrasos sufridos por la señal al atravesar la ionosfera y la troposfera, respectivamente. La velocidad de propagación de las ondas en estas capas es inferior a la considerada (la velocidad de la luz) por lo tanto ambas capas introducen un retraso en la señal.

Simplificando podemos reescribir el modelo para el pseudo-rango como

$$\rho = r + I_\rho + T_\rho + c(\delta t_u - \delta t^s) + \varepsilon_\rho \quad 3-6$$

La medida que tenemos en los receptores GPS es el pseudo-rango, una medida, con errores y ruidosa, de la distancia real del satélite, r . Por tanto, nuestra precisión dependerá de la calidad de nuestra estimación de los errores y los ruidos. En secciones posteriores volveremos a esta ecuación.

3.2.2. Medidas de la fase

Una medida mucho más precisa que el código es la fase de la portadora recibida desde el satélite. La medida de la fase es la diferencia entre las fases de la señal portadora generada por el receptor y la portadora recibida del satélite en el instante de la medida.

La fase se mide en términos de número de ciclos generados o recibidos desde el inicio de un intervalo. La fase a un tiempo t se define como

$$\phi(t) = \phi(t_0) + \int_{t_0}^t f(s) ds \quad 3-7$$

donde $f(s)$ es la variación temporal de la frecuencia y $\phi(t_0)$ es la fase inicial. Si utilizamos un corto periodo de tiempo $(t - t_0)$ y la señal generada es muy estable, podemos decir

$$\phi(t) = \phi(t_0) + f_0 \cdot (t - t_0) \quad 3-8$$

donde f_0 es la frecuencia nominal específica generada por el oscilador. Con esto podemos modelar la fase de la portadora generada por el reloj del receptor.

Primero vamos a considerar que los relojes del satélite y del receptor, s y u respectivamente, son perfectos, están sincronizados y que no hay movimientos relativos entre el satélite y el receptor. En este caso, las medidas de fase permanecerán fijas en una fracción de ciclo y la distancia entre el satélite y el receptor será un número desconocido de ciclos enteros más la fracción de ciclo medida. Esta medida no contiene información sobre el número de ciclos enteros llamada **ambigüedad** entera. Supongamos que estamos

midiendo la fase de la portadora mientras el receptor o el satélite se mueve de forma que la distancia entre ellos aumente una longitud de onda. La fase correspondiente será un ciclo entero más la fracción de ciclo medida antes del inicio del movimiento.

La fase de la señal recibida en cualquier instante se puede relacionar con la fase en el satélite a la hora de la transmisión por el tiempo de tránsito, τ , de la señal. Siguiendo con nuestro sistema de relojes perfectos, la fase de la portadora en unidades de ciclo sería

$$\phi(t) = \phi_u(t) - \phi^s(t - \tau) + N \quad 3-9$$

donde $\phi_u(t)$ es la fase de la señal generada por el receptor, $\phi^s(t - \tau)$ corresponde a la fase de la señal recibida del satélite en el tiempo t , o la fase de la señal en el satélite en $(t - \tau)$, y N es la ambigüedad.

Podemos simplificar la expresión anterior definiendo

$$\phi^s(t - \tau) = \phi_u(t) - f \cdot \tau \quad 3-10$$

obteniendo

$$\phi(t) = f \cdot \tau + N = \frac{r(t, t - \tau)}{\lambda} + N \quad 3-11$$

donde f y λ son la frecuencia y la longitud de onda de la portadora, respectivamente, y $r(t, t - \tau)$ es, al igual que en el caso anterior, la distancia geométrica entre la posición del receptor en el tiempo t y la del satélite en el tiempo $(t - \tau)$.

Si ahora tenemos en cuenta todos los errores de los relojes, los retrasos debidos a la propagación por la atmósfera y los errores de medida obtenemos

$$\phi = r + I_\phi + T_\phi + c(\delta t_u - \delta t^s) + N \cdot \lambda + \varepsilon_\phi \quad 3-12$$

donde I_ϕ y T_ϕ son los retrasos debidos a la ionosfera y la troposfera, respectivamente, y c es la velocidad de la luz en el vacío.

3.2.3. Propagación de la señal

La señal GPS se ve afectada por el medio en el que se propaga desde su emisión por el satélite hasta su llegada al receptor. Esta distancia oscila entre los 20000 km (en la vertical) hasta los 26000 km (cuando se encuentra en el horizonte). Prácticamente la mayoría de esta distancia la recorre en un medio que puede ser considerado como el vacío, sin embargo, en los últimos 1000-2000 km, la señal entra en la atmósfera terrestre, primero en la ionosfera y más tarde, en la troposfera.

La atmósfera cambia la trayectoria y la velocidad de las señales de radio. El cambio en la velocidad de propagación de la señal modifica el tiempo de tránsito de la señal, la medida básica del GPS.

En primer lugar, se define el índice de refracción, n , de un medio como el cociente entre la velocidad de propagación de la señal en el vacío y la velocidad en el medio:

$$n = \frac{c}{v} \quad 3-13$$

Tanto la ionosfera como la troposfera no son uniformes por lo que el índice de refracción varía a lo largo de la trayectoria. Como se ha indicado, los cambios en la velocidad de propagación modifican el tiempo de recorrido de la señal y, como consecuencia, la distancia al satélite definida en la Ec. 3-1.

Dado el perfil del índice de refracción, $n(l)$, a lo largo del camino de propagación de la señal (U - usuario, S - satélite), el tiempo de recorrido de la señal será

$$\tau = \frac{1}{c} \int_S^U n(l) \cdot dl \quad 3-14$$

El retraso en la propagación de la señal debido a la refracción se define como

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \int_s^U [n(l) - 1] dl \quad 3-15$$

o, de forma equivalente, el incremento en la distancia de propagación

$$\Delta\rho = \int_s^U [n(l) - 1] dl \quad 3-16$$

Además, la ionosfera, es un medio dispersivo para las señales de radio en banda L, es decir, que el índice de refracción depende de la frecuencia de la señal. La velocidad de propagación de la fase de la señal, v_f , difiere de la velocidad de grupo, v_g , asociada a la propagación de la amplitud de la onda.

La velocidad de grupo se define como:

$$v_g = v_f - \lambda \frac{dv_f}{d\lambda} \quad 3-17$$

donde λ es la longitud de la onda y $\frac{dv_f}{d\lambda}$ es la variación de la velocidad de fase con la longitud de onda.

Los correspondientes índices de refracción se relacionan como

$$n_g = n_f - f \frac{dn_f}{df} \quad 3-18$$

donde f es la frecuencia de la señal. En el caso de un medio no dispersivo, la propagación de la onda es independiente de la frecuencia y, por tanto, ambas velocidades son iguales.

3.2.4. Efecto ionosférico

La ionosfera, al ser un medio formado por iones y electrones libres, afecta a la propagación de la señal GPS que la atraviesa. La velocidad de propagación de una onda de radio en la ionosfera depende de la cantidad de electrones libres que hay en el camino de la señal. Esta cantidad se denomina *TEC* y se define como el número de electrones que hay en un cilindro de 1 m² de sección que se extiende entre el satélite y el receptor. La expresión matemática es

$$TEC = \int_S^U n_e(l) dl \quad 3-19$$

donde $n_e(l)$ es la densidad electrónica variable a lo largo del camino de la señal y la integral se extiende al camino entre el satélite y el receptor. El TEC se mide en unidades de TEC ($TECu$, *Total Electron Content units*) y equivale a 10^{16} e/m².

En primera aproximación, el índice de refracción para una onda de frecuencia f viene dado por

$$n_\phi = 1 - \frac{40.3}{f^2} n_e \quad 3-20$$

donde n_ϕ es el índice de refracción de la fase y n_e la densidad electrónica. Con esta expresión podemos calcular el retraso en la fase $\Delta\tau_\phi$ (en segundos) sufrido por la señal al atravesar la ionosfera.

$$\Delta\tau_\phi = \frac{1}{c} \int_S^U (n_\phi(l) - 1) dl = -\frac{1}{c} \int_S^U \frac{40.3 \cdot n_e(l)}{f^2} dl = -\frac{40.3 \cdot TEC}{cf^2} \quad 3-21$$

El retraso de la fase es negativo debido a que está avanzando. Este avance es directamente proporcional al número de electrones que hay en el camino de la señal. El retraso de la fase en metros debido a la ionosfera (sección 3.2.2) será

$$I_\phi = c \cdot \Delta\tau_\phi = -\frac{40.3 \cdot TEC}{f^2} \quad 3-22$$

De la misma forma podemos también determinar el índice de refracción de grupo y el retraso de grupo como

$$n_g = 1 + \frac{40.3 \cdot n_e}{f^2} \quad 3-23$$

$$I_\rho = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2} \quad 3-24$$

Por tanto, obtenemos que los términos de retraso debidos a la ionosfera en pseudo-rango (sección 3.2.1) y fase portadora (sección 3.2.2) son iguales en magnitud pero de signo opuesto

$$I_{\rho} = -I_{\phi} = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2} \quad 3-25$$

El efecto de la ionosfera, a diferencia de los demás errores, depende de la frecuencia. De esta forma se puede crear un observable libre del error ionosférico.

$$\rho_{iono-free} = \frac{\rho_{L2} - \gamma \cdot \rho_{L1}}{1 - \gamma} \quad 3-26$$

donde $\gamma = \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}} \right)^2$

Este nuevo observable elimina los errores debido al retraso ionosférico pero tiene la desventaja que, debido a esta combinación, los errores de la medida se intensifican significativamente.

El error ionosférico se suele expresar en unidades de *TEC* que generalmente se refiere a la dirección vertical. Para obtener la relación entre el *TEC* de una línea de vista oblicua (*sTEC*, *Slant TEC*) y el *TEC* vertical (*vTEC*, *Vertical TEC*) se define el factor oblicuo o función de mapeo (*MF*; *mapping function*) cuyos términos se definen en la Figura 3-4:

$$MF = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_0}{R_0 + h_1} \cos E \right)^2}} \quad 3-27$$

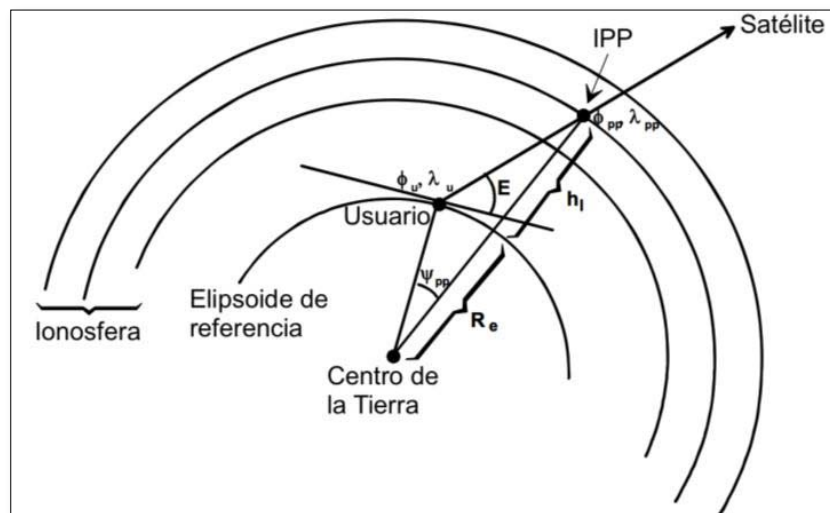


Figura 3-4: Representación gráfica del IPP. Figura adaptada de RTCA-MOPS (2006).

3.2.5. Otros efectos en los observables

Como se ha mostrado en la sección 3.2, los observables de código y fase se ven afectados por los errores de sincronización entre los relojes de los satélites y los receptores, la troposfera y la ionosfera. Sin embargo, a estos errores en la propagación hay que añadir los errores propios del receptor y el satélite.

Los errores del satélite están asociados al retraso que sufre la señal entre su generación y su emisión. Estos errores son debidos al hardware propio del satélite y son únicos para cada satélite y para cada frecuencia emitida.

Por otro lado, los receptores producen un error similar entre la adquisición de la señal y su procesado. Este error, también está asociado al hardware del receptor y es único para cada receptor y cada frecuencia recibida. Además de este error, el receptor puede sufrir interferencias causadas por las señales de radio reflejadas en superficies próximas al receptor y que pueden interferir o ser confundidas con la señal real del satélite. A este error se le conoce como **Multipath**.

Incluyendo estos errores en las medidas de código y fase definidas en las secciones 3.2.1 y 3.2.2 se obtiene:

$$\rho = r + I_{\rho} + T_{\rho} + c(\delta t_u - \delta t^s) + HwB_{\rho}^s + HwB_{\rho,u} + M_{\rho} + \varepsilon_{\rho} \quad 3-28$$

$$\phi = r + I_{\phi} + T_{\phi} + c(\delta t_u - \delta t^s) + N \cdot \lambda + HwB_{\phi}^s + HwB_{\phi,u} + M_{\phi} + \varepsilon_{\phi} \quad 3-29$$

donde:

r : es la distancia geométrica entre el satélite y el receptor

I : es el error ionosférico

T : es el error troposférico

$c(\delta t_u - \delta t^s)$: es el error debido a los relojes

HwB : es el error de hardware debido al satélite o al receptor

M : es el error debido al multipath

El rango de estos errores en el pseudo-rango se indica en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Resumen de los errores en los observables de la señal GPS (Misra and Enge, 2006).

Fuente	Rango del error
Reloj	2.0 m (rms)
Orbita	2.0 m (rms)
Ionosfera	2.0 – 10.0 m
Troposfera	2.3 - 2.5 m
Multipath	0.5 - 1.0 m

3.3. Mitigación del error ionosférico

Como se ha podido observar en la

Tabla 3-1, la ionosfera es la mayor fuente de error para la estimación de la posición. Para mitigar este error, se utiliza un modelo de ionosfera simple cuyos coeficientes puedan ser transmitidos por los satélites. A continuación se proporciona una breve descripción de los modelos utilizados por GPS y Galileo.

3.3.1. Modelo Klobuchar

El modelo de Klobuchar (Klobuchar, 1987) es el elegido por el sistema GPS para la corrección de la ionosfera de los usuarios mono frecuencia. El modelo

proporciona el retraso de la señal debido al efecto de la ionosfera para la frecuencia L1.

Este modelo estima el contenido total de electrones vertical, $vTEC$, considerando la ionosfera como una capa delgada, *thin layer*, situada a una altura de 350 km y utilizando la función de mapeo, MF , para convertir el $vTEC$ en el TEC entre satélite y receptor o contenido total de electrones oblicuo, $sTEC$.

El comportamiento diurno de la ionosfera es modelado utilizando una función coseno. Esta función se define de forma que el máximo se sitúa a las 14:00 LT. Durante la noche, el retraso ionosférico se considera constante e igual a 5 ns (DC).

$$\begin{cases} DC + A \cdot \cos\left[\frac{2\pi(t-\phi)}{P}\right] & (\text{día}) \\ DC & (\text{noche}) \end{cases} \quad 3-30$$

donde $A = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \vartheta^n$ y $P = \sum_{n=0}^3 \beta_n \vartheta^n$, siendo ϑ la latitud geomagnética y α, β los 8 coeficientes transmitidos por los satélites GPS a los usuarios en el mensaje de navegación para estimar el retraso ionosférico. El comportamiento de la expresión de Klobuchar está representado en la Figura 3-5.

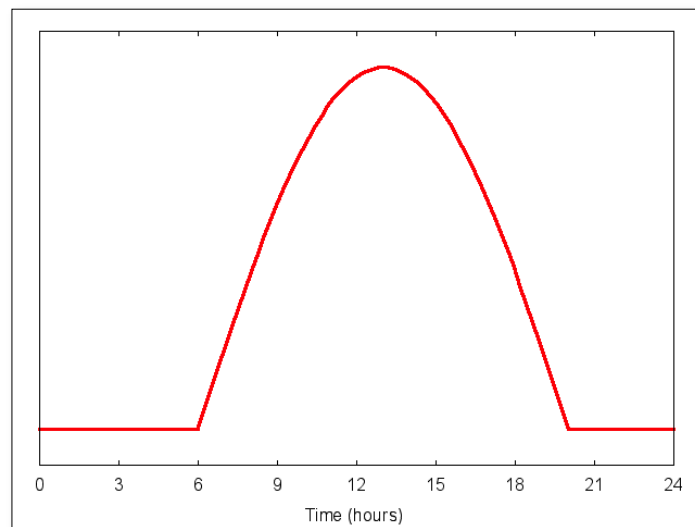


Figura 3-5: Comportamiento de la función de Klobuchar para la corrección del retraso ionosférico (ecuación 3-30).

Para convertir el $vTEC$ proporcionado por el modelo Klobuchar en el retraso sufrido por la señal a lo largo de su trayectoria, $sTEC$, se utiliza la función de mapeo, MF , definida como:

$$MF = 1 + 16 \cdot (0.53 - E)^3 \quad 3-31$$

donde E es el ángulo de elevación del satélite (semicírculos).

Se asume que la corrección proporcionada por el modelo Klobuchar equivale aproximadamente al 50-60% del retraso ionosférico real para un usuario situado a latitudes medias y en condiciones ionosféricas tranquilas (Klobuchar, 1987).

3.3.2. Modelo NeQuick

El sistema de navegación global por satélite europeo, Galileo, proporciona las correcciones ionosféricas a sus usuarios mono frecuencia usando el modelo tridimensional de densidad electrónica NeQuick (Arbesser-Rastburg, 2006) (véase la sección 2.4.2 para una descripción más detallada del modelo NeQuick).

Para el caso de aplicaciones para la navegación en el programa Galileo el modelo NeQuick está regido por el nivel de ionización efectivo, A_z , que sustituye al flujo solar como índice del nivel de actividad solar. En el caso del sistema Galileo, A_z se define como:

$$A_z = a_0 + a_1 \cdot \mu + a_2 \cdot \mu^2 \quad 3-32$$

donde

a_0 , a_1 y a_2 son los coeficientes transmitidos por los satélites Galileo a los usuarios.

μ es la latitud modip (*modified dip*) introducida por Rawer (1963) y definida como

$$\tan \mu = \frac{I}{\sqrt{\cos \varphi}} \quad 3-33$$

siendo:

I , la inclinación del campo magnético y
 φ , la latitud geográfica.

En la Figura 3-6 se puede observar la latitud modip en función de las coordenadas geográficas.

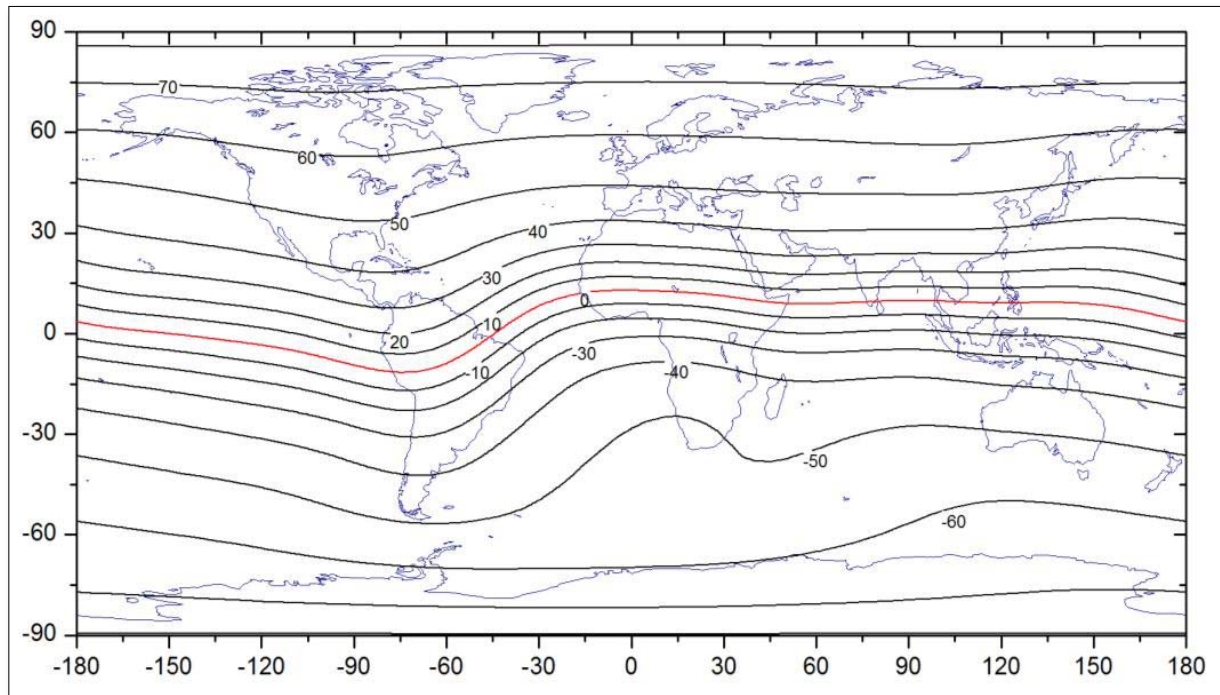


Figura 3-6: Representación de la latitud modip en función de la longitud geográfica.

Los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 son calculados utilizando información del *TEC* obtenida mediante estaciones GNSS distribuidas globalmente. Estos coeficientes se actualizan cada 24 horas.

3.4. Sistemas SBAS

En la sección 3.2.4 se ha descrito el retraso que la ionosfera produce sobre la señal emitida por el satélite mientras que en la sección 3.3 se han introducido los modelos utilizados por el sistema GPS y Galileo para la mitigación del efecto ionosférico en el cálculo de la posición.

Además de estos modelos, se han diseñado programas paralelos, llamados Sistemas de Aumentación Basado en Satélites (SBAS, *Satellite Based Augmentation System*) que proporcionan información adicional a los sistemas

por navegación por satélite para mejorar sus servicios. Los sistemas SBAS aportan una mejora en las prestaciones de precisión de los sistemas GNSS, proporcionando correcciones de los relojes y órbitas de los satélites e ionosfera a estos sistemas. La mejora de las prestaciones y en especial la información íntegra permiten el uso de la señales GNSS para operaciones críticas; aquéllas donde la vida humana puede estar en peligro, como por ejemplo las maniobras de aproximación o aterrizaje de los aviones.

Los sistemas SBAS desarrollados hasta ahora son: *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) puesto a punto por la Unión Europea, *Wide Area Augmentation System* (WAAS) de EEUU, *Wide Area GPS Enhancement* (WAGE) de uso militar, *GPS and GEO Augmented Navigation* (GAGAN) desarrollado por India y el sistema japonés *Multi-functional Satellite Augmentation System* (MSAS).

En la actualidad los sistemas SBAS disponibles son WAAS y EGNOS. Ambos han sido desarrollados siguiendo los estándares definidos en el *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System* (RTCA-MOPS, 2006). Estos estándares especifican cómo deben interactuar los sistemas SBAS con sus usuarios, es decir, la información que deben proporcionar, el formato y los periodos de actualización de la información.

3.4.1. WAAS

El sistema WAAS fue desarrollado por la Administración Federal de aviación (FAA, *Federal Aviation Administration*) cuya señal estuvo disponible para aplicaciones no-críticas (seguridad, transporte por carretera, control de flotas, etc.) en el año 2000. Este sistema obtuvo la capacidad inicial operacional (IOC, *Initial Operational Capability*) en Julio de 2003 y la capacidad total (FOC, *Full Operational Capability*) en 2007.

La arquitectura de WAAS consta de 38 estaciones de referencia (WRS, *Wide-area Reference Stations*) distribuidas entre Estados Unidos (20), Alaska (7), Canadá (4), Hawaii (1), Puerto Rico (1) y Méjico (5). Estas estaciones proporcionan la señal GPS a los tres centros de control (WMS, *Wide-area Master Stations*) que calculan las correcciones y la integridad de las mismas, transmitiéndola a los dos satélites geoestacionarios (GEO) mediante cuatro estaciones terrestres (GUS, *Ground Uplink Stations*), dos por GEO, una activa y la otra de apoyo. La Figura 3-7 muestra un esquema de la arquitectura del

sistema WAAS.

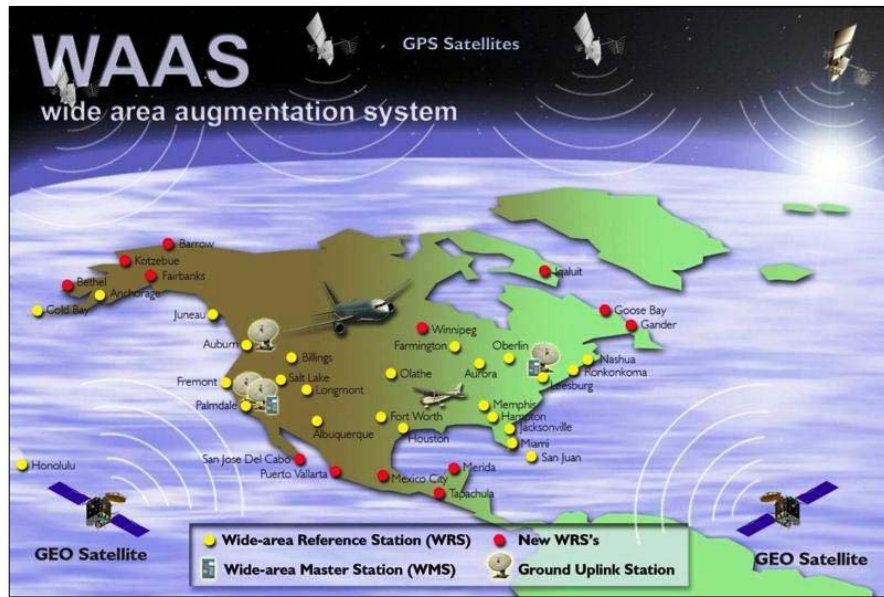


Figura 3-7: Esquema del sistema WAAS.

3.4.2. EGNOS

El 18 de Junio de 1996, se produjo el acuerdo entre la Comisión Europea, la Agencia Espacial Europea y Eurocontrol para la creación del sistema EGNOS y las primeras señales experimentales empezaron a emitirse en el año 2000. La capacidad inicial operacional fue declarada en Julio de 2005. En Marzo de 2011 el sistema EGNOS obtuvo la certificación de sistema para operaciones críticas.

El sistema EGNOS consta de 39 receptores (RIMS, *Ranging and Integrity Monitoring Station*) que procesan la señal GPS distribuidos entre Europa (27), África (8), Guayana Francesa (1), Canadá (1) y Sudáfrica (1) (Figura 3-8). Estos receptores transmiten la señal a los cuatro centros de control (MCC, *Master Control Centre*), de los cuales uno está activo, otro se activa si se detecta algún fallo y los otros dos sirven de apoyo. De esta forma se evitan problemas de difusión y procesamiento de la información en el sistema. Una vez generada la información, se transmite a las 6 estaciones en tierra (NLES, *Navigation Land Earth Station*). Este diseño supone dos estaciones por satélite: una activa y otra de apoyo que emiten la información a los tres satélites geostacionarios (GEO). La Figura 3-9 muestra el esquema de la arquitectura del sistema EGNOS.

Capítulo 4

Modelos de altura

La altura del pico de máxima densidad electrónica de la región F2, $hmF2$, es una de las principales características ionosféricas junto con la frecuencia crítica de la región F2, f_oF2 , y con el parámetro de espesor ionosférico. La frecuencia crítica se relaciona directamente con la densidad electrónica máxima ($NmF2[m^3]=1.24 \cdot 10^{10} f_oF2^2 [MHz]$). Conocidas éstas y utilizando modelos ionosféricos (véase sección 2.4) se puede reconstruir la parte inferior del perfil de densidad electrónica. Por tanto, $hmF2$ es una característica muy útil para el estudio de la propagación de las ondas de radio en la ionosfera pero también para la estimación de los vientos meridionales y la evaluación de la dinámica termosférica (Buonsanto et al., 1997).

Tal y como se ha comentado en la sección 2.4.1, el modelo de $hmF2$ del IRI se basa en la fuerte anti-correlación con el factor de propagación $M(3000)F2$ (Shimazaki, 1955) modificado por un factor de corrección para tener en cuenta la capa E (Bilitza et al., 1979). En esa misma sección también se menciona que el modelo IRI presenta dos opciones para predecir los parámetros del pico de la región F, CCIR (CCIR, 1991) y URSI (Rush et al., 1989) así como la posibilidad de usar valores experimentales.

Estudios previos han mostrado que el modelo CCIR para $M(3000)F2$ no consigue representar características espaciales o temporales a pequeña escala (e.g. Oyeyemi et al., 2007; Zhang et al., 2007) como por ejemplo la abrupta caída en $M(3000)F2$ después de la puesta de Sol correspondiente al pico que aparece en $hmF2$ en ese momento (e.g. Obrou et al., 2003; Adeniyi et al., 2003). Otros estudios que comparan las predicciones de $hmF2$ proporcionadas por el IRI con medidas de ionosondas (e.g. Sethi et al., 2004, 2008; Lee et al., 2008; Ehinlafa et al., 2010; Oyeyemi et al., 2010) han mostrado discrepancias significativas entre el comportamiento de $hmF2$ modelado por el IRI y el observado experimentalmente. Debido a esto se han realizado numerosos esfuerzos para mejorar las predicciones de $hmF2$ proporcionadas por el IRI.

Por otro lado, la versión actual del IRI (Bilitza and Reinisch, 2008) ha adoptado la formulación del NeQuick para modelar la parte superior del perfil de densidad electrónica (Nava et al., 2008). Esta modelización, descrita en la sección 2.4.2, utiliza la altura de escala, H_m , como parámetro para definir la forma de la función. El valor de H_m en la altura $hmF2$ es el anclaje entre la

forma del perfil de densidad electrónica por encima y por debajo de $hmF2$. Nava et al. (2008) describe la formulación utilizada por el modelo NeQuick para el cálculo de H_m . El uso de un modelo global, obtenido a partir de datos experimentales, reduciría la complejidad actual de la estimación de H_m , así como los errores introducidos, ya que la actual formulación depende de la estimación y modelado de otros valores. Es en este ámbito donde se enmarcan las investigaciones que han dado lugar a dos artículos presentados en esta sección y que se introducen a continuación.

4.1. Comportamiento de $hmF2$

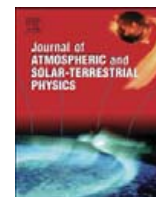
El propósito del primer artículo es evaluar el comportamiento de $hmF2$ en condiciones tranquilas en tres regiones latitudinales y para diferentes niveles de actividad solar del ciclo 23 y analizar la bondad del modelado del actual IRI en relación con el comportamiento de $hmF2$ observado experimentalmente. También se presenta una técnica que mejora este modelado. La mayor diferencia entre el presente estudio y otros anteriores respecto al análisis del modelado de $hmF2$ se basa en dos aspectos:

1. la utilización de datos de $hmF2$ obtenidos directamente de los perfiles de densidad electrónica (Huang and Reinisch, 1996a; Reinisch et al., 2004), y el análisis de un gran intervalo temporal y distintos rangos de latitudes para un grupo representativo de estaciones y condiciones solares.
2. el uso de la técnica del perfil promedio (Huang and Reinisch, 1996a, 1996b) que proporciona el comportamiento tranquilo de la parte inferior de la ionosfera en lugar del comportamiento promedio de una única característica.

Para este estudio se han seleccionado datos procedentes de tres estaciones situadas a diferentes rangos de latitud que permiten hacer una validación del comportamiento en función de este parámetro. Los datos seleccionados cubren las diferentes estaciones del año y los diferentes niveles de actividad solar. Estos datos se han comparado con los valores que proporciona el modelo IRI (Bilitza y Reinisch, 2008) encontrando claras

discrepancias, especialmente en latitudes bajas y altas. Estas discrepancias son debidas principalmente a que el modelo de *hmF2* que utiliza el IRI fue obtenido a partir de datos experimentales medidos en estaciones localizadas a latitudes medias.

Finalmente, se ha desarrollado y validado un modelo local preliminar de *hmF2* basado en un análisis de Fourier (Anexo III) para cada una de las estaciones. Comparando los resultados obtenidos por el IRI y los modelos locales se observó una mejora en el modelado de *hmF2*, con respecto a la predicha por el modelo IRI, especialmente para latitudes bajas y altas.



Ionospheric peak height behavior for low, middle and high latitudes: A potential empirical model for quiet conditions—Comparison with the IRI-2007 model

S. Magdaleno^{a,*}, D. Altadill^b, M. Herraiz^{c,d}, E. Blanch^b, B. de la Morena^a

^a Atmospheric Sounding Station “El Arenosillo”, INTA, Huelva, Spain

^b Ebro Observatory, CSIC – Universitat Ramon Llull, Roquetes, Spain

^c Department of Geophysics and Meteorology, University Complutense, Madrid, Spain

^d Institute of Geosciences, UCM – CSIC, Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 September 2010

Received in revised form

5 April 2011

Accepted 10 April 2011

Available online 1 May 2011

Keywords:

Ionosphere

hmF2

F2-layer

Modeling

ABSTRACT

The quiet behavior of the ionospheric electron density peak height of the F2 region, hmF2, at different latitudes has been evaluated for different seasons and solar activity levels and compared with the prediction of the International Reference Ionosphere model (IRI). The results show clear disagreements of the IRI prediction compared to the experimental behavior. Though IRI prediction agrees reasonably well with the experimental values of the hmF2 for mid-latitudes, this model may underestimate the equatorial values as low as –40% of the experimental ones and it may overestimate the hmF2 by 30% at high latitudes. Preliminary models based on Fourier analysis performed better than IRI for high and low latitudes and they may reduce the deviations by a 23% and 40%, respectively, compared to the deviations of the IRI prediction.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The height of the peak electron density of the F2-layer, hmF2, is one of the main ionospheric characteristics jointly with the critical frequency of the F2-layer, foF2 (this being related to the electron density maximum, NmF2 (m^{-3}) = 1.24×10^{10} (foF2 (MHz))²) and with ionospheric thickness parameter. Knowing these ionospheric characteristics one may build the bottomside electron density profile using ionospheric models. Therefore, the hmF2 is a useful characteristic for the study of ionospheric radio propagation but also for estimating meridional winds and evaluating thermospheric dynamics (e.g. Buonsanto et al., 1997 and references therein). Among these models, the International Reference Ionosphere, IRI, (e.g. Bilitza, 2001) is the most commonly used by the ionospheric community as the standard model of the ionosphere.

IRI provides monthly averages of the ionospheric plasma parameters such as critical frequencies, heights, electron density profiles and many others. The predictions of the IRI model are tested with measured ionospheric data. The IRI predictions of the critical frequencies and heights show that IRI has a good agreement with the measured values for geomagnetically quiet periods (Fuller-Rowell et al., 2000; Mosert et al., 2004). IRI is being updated continuously thanks to new data and modeling efforts

(e.g. Bilitza, 2001; Bilitza and Reinisch, 2008) and newer versions are released as IRI improves.

Recent works compared the predictions of the hmF2 by the IRI with ionosonde measurements at equator latitudes for low solar activity (e.g. Lee et al., 2008; Ehinlafa et al., 2010), at low-middle latitudes for moderate-low solar activity (e.g. Sethi et al., 2008) and for high solar activity (e.g. Sethi et al., 2004), as well as at high latitudes (e.g. Oyeyemi et al., 2010). All of them have showed significant discrepancies of the IRI modeled behavior of the hmF2 in relation to the experimentally observed behavior. Consequently, modeling efforts have been carried out trying to improve the IRI prediction of hmF2. For instance, Gulyaeva et al. (2008) proposed a model for hmF2 based on top-side sounding measurements but appreciable differences exist comparing the IRI predictions and the outcome of the new model. These differences might be attributed to the different techniques of the peak electron density and height derivation, different epochs and different global distribution of the source data as well as the different mathematical functions involved in the maps and the model presentation (Gulyaeva, 2009). Zhang et al. (2009) have also proposed an hmF2 model based on bottomside ionosonde measurements; estimating hmF2 by the model formulation of Bilitza et al. (1979). However, the estimated hmF2 might significantly differ from the experimentally observed (e.g. Ehinlafa et al., 2010).

The IRI model of hmF2 is based on the strong anti-correlation with the propagation factor M(3000)F2 (Shimazaki, 1955) and considering a correction factor accounting for the underlying

* Corresponding author.

E-mail address: smactor@gmail.com (S. Magdaleno).

E-layer (Bilitza et al., 1979). The IRI has two options for predicting the F-region peak parameters: the CCIR coefficients developed by Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR, 1991) and the URSI coefficients developed by the Union Radio-Scientifique Internationale (Rush et al., 1989). In addition, to estimate the hmF2, the IRI uses either the measured values of M(3000)F2 or the CCIR model for M(3000)F2. One of the shortcomings of the last representation is that it cannot represent the small scale temporal and spatial features (e.g. Oyeyemi et al., 2007; Zhang et al., 2007) like the sharp drop in M(3000)F2 after sunset that corresponds to the post-sunset peak in hmF2 (e.g. Obrou et al., 2003; Adeniyi et al., 2003).

The aim of this paper is to evaluate the quiet-time behavior of the hmF2 at three latitude regions and for different solar activity levels of the past solar cycle 23 and to analyze the goodness of the current IRI modeling in relation to the experimentally observed behavior of the hmF2. It is also seen that a modeling technique which improves the current IRI modeling of the hmF2 is presented. The major difference between the present study and others concerns the analysis and modeling of the hmF2 in two aspects: (i) we have used experimentally observed data from the Digital Ionospheric Data Base (DIDB) of the Center for Atmospheric Research (CAR) of the University of Massachusetts, Lowell (Reinisch et al., 2004), analyzing a time interval and distinct latitude ranges for a representative set of conditions; (ii) we have used the average profile technique (Huang and Reinisch, 1996a, 1996b) to obtain the quiet-time behavior of the bottomside ionosphere instead of the average behavior of a single characteristic.

2. Data and method

We have used the vertical incidence ionograms recorded at three ionospheric stations located at high, middle and low latitudes, i.e. Sondrestrom (66.98°N, 309.06°E), Ebro Observatory (40.8°N, 0.5°E) and Jicamarca (12°S, 283.2°E), respectively. The data of Sondrestrom and Jicamarca have been obtained from the Digital Ionospheric Data Base (DIDB) of the Center for Atmospheric Research (CAR) of the University of Massachusetts, Lowell (Reinisch et al., 2004). Sondrestrom's data cover the years 2000, 2002 and 2004–2006 and data from Jicamarca embraces the years 1998–1999 and 2001–2006. The Ebro observatory has furnished data from 1995 to 2008. Thus, data analyzed cover distinct latitude ranges and representative time interval for different seasonal and solar activity conditions.

The experimental quiet-time behavior of the hmF2 for the above locations has been obtained in a similar way to that described by Blanch et al. (2007). The ionograms have been first inverted into electron density profiles with the technique described by Huang and Reinisch (1996a), hereafter called as HR. The inversion of ionogram traces to electron density profiles is affected by the valley in the E-region, introducing an uncertainty into the hmF2 of several tens of km (e.g. Chen et al., 1994). These authors have shown that the accuracy of the hmF2 increases by improving the E-valley model. Mahajan et al. (1994) have developed an E-valley model based on incoherent scatter radar (ISR) measurements that improves hmF2 accuracy and which has been adopted by profiling technique of HR. Scali et al. (1997) have shown that the hmF2 values obtained from digisondes by HR's technique are in good agreement with those values measured by ISR with an average difference of few km. According to these papers, we may speculate that the uncertainty estimating hmF2 by HR's technique might be of about 10 km, especially at regions with unavailable ISR measurements, or less for latitudes covered by the ISR measurements. Then, the individual profiles corresponding to a given month and a given hour

have been used to obtain the average profile (hereafter called as MARP) for a given month and hour (Huang and Reinisch, 1996b). To avoid the influence of the “extreme” profiles into the MARP, we have excluded the 25% of the profiles deviating most from the average. Blanch et al. (2007) show in Fig. 1 an example comparing an average profile to the individual profiles for a particular time at a mid-latitude station.

Once the MARPs are computed, we obtain the representative hmF2 values for quiet conditions (hmF2MARP). Although not shown here, the values of hmF2MARP computed this way coincide with those values of hmF2MARP obtained by removing the most geomagnetically disturbed days of the month. This way, the “extreme” profiles, most likely related to disturbed ionospheric conditions, have not been taken into account for obtaining the average and the MARPs are accepted to be the representative profiles for quiet ionospheric conditions. Also, the hmF2MARP agrees very well with the values obtained by averaging of the individual values of hmF2 excluding the most geomagnetically disturbed days, with discrepancies of about 2% in average (less than 5 km) and of 7% in the worst case.

We have used the IRI-2007 model (Bilitza and Reinisch, 2008) to obtain the hmF2 value for the same locations and time intervals from which experimental data were gotten. Because the experimental data represent the typical quiet time conditions, the foF2 storm model (Araujo-Pradere et al., 2002) was turned off in the IRI options. We have used the CCIR option of the IRI to estimate the hmF2, the CCIR and URSI options generated similar results for F-peak characteristics. However, the CCIR option performs better than the URSI option on average (Adewale et al., 2009; Adeniyi et al., 2003).

The IRI predictions of the hmF2 (hmF2IRI) are compared with those values obtained experimentally (hmF2MARP) for evaluating the potential shortcomings of the current IRI modeling of the quiet-time behavior of the hmF2. The percentage deviation of the estimated values in relation to the experimental values was computed to better identify the main discrepancies of the IRI modeling of the hmF2.

An empirical modeling of the hmF2 as function of the time and solar activity has been developed for each of the stations under study. The modeling is based on a general least-square fitting of the measurements to a Fourier function (e.g. Press et al., 1986). The model reproduces the diurnal and seasonal variations of the hmF2 by Fourier functions which in turn are dependent on the solar activity through the yearly mean sunspot number, Rz12 (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/INTERNATIONAL/yearly/YEARLY), similarly to the modeling approach described by Blanch et al. (2007). Comparisons of the models results and of the root mean square errors (RMSE) of the models are presented to evaluate their goodness and the potential improvement in relation to the IRI prediction.

3. Results

Fig. 1 shows examples of the IRI modeled values of the hmF2 (hmF2IRI) compared to the experimental values hmF2MARP obtained at the stations under study for different solar activity levels. The presented linear fitting results mean the correlation of the IRI prediction with the observations. In general, there is a good agreement at the mid-latitude station for all the solar activity levels. However, there is a lower correlation at high latitude station for low and middle solar activity as well as it does at low latitude station for all solar activity levels compared to mid-latitudes. It should be noted that IRI is a model for non-auroral latitudes, thus, these discrepancies for Sondrestrom latitudes are not surprising, even so IRI prediction agrees reasonable well for high solar activity.

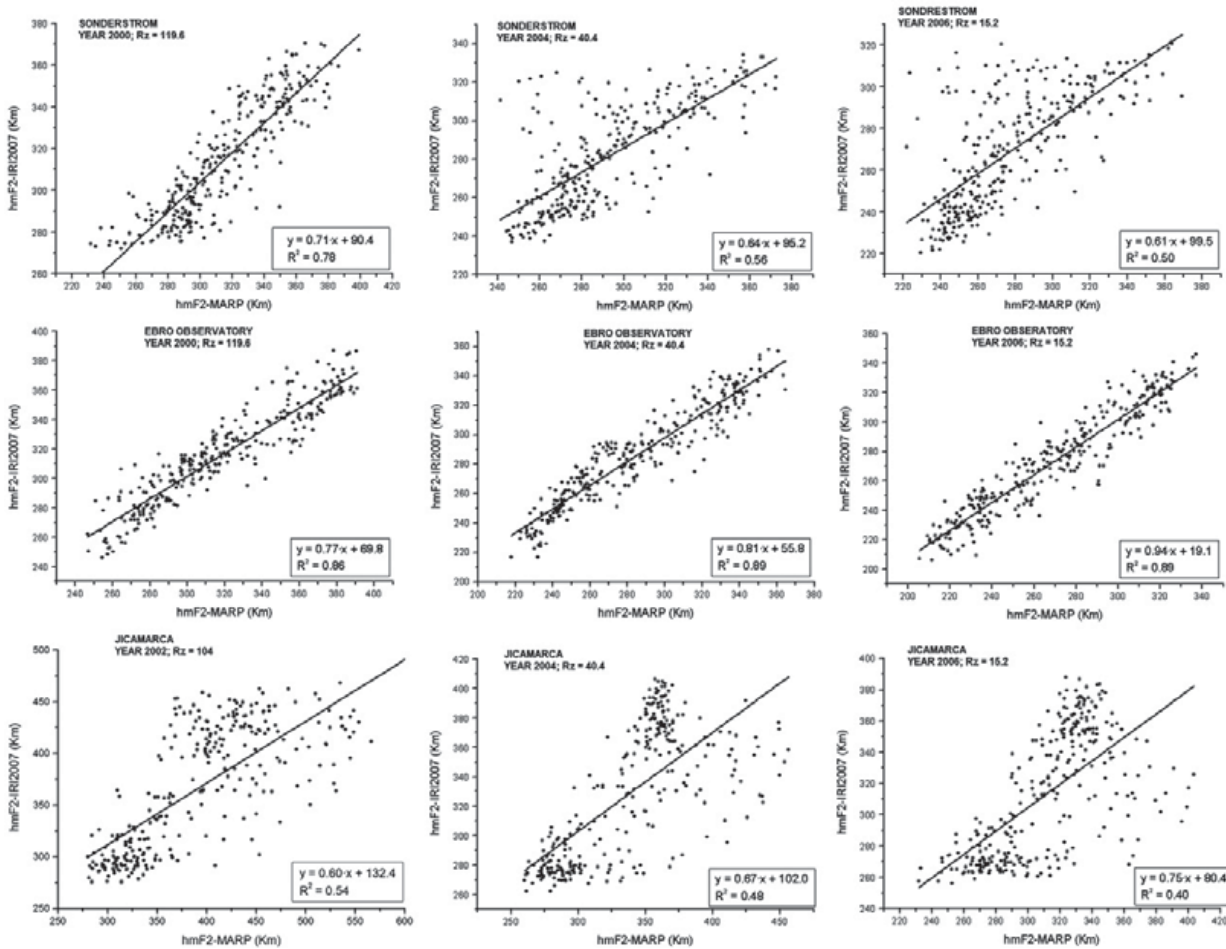


Fig. 1. Scatter plots of the hmF2 values given by IRI against those obtained from observational data at the three stations considered in this study. The stations are arranged from top to bottom according to the latitude (top row corresponds to the highest latitude) and the results according to the solar activity (highest on the left). Linear fit adjust are given in every single plot.

Oyeyemi et al. (2010) have found greater deviations between hmF2IRI and the observed values for the low solar activity at high latitude stations. In addition, Lee et al. (2008) have found significant differences between hmF2IRI and hmF2MARP at low latitude for the sunrise and post-sunset peaks which could explain the low correlation we observe for the low latitude station.

3.1. Observed quiet time behavior

The experimental daily and seasonal variations of the hmF2 for particular years with different solar activity are shown in Fig. 2 and compared with the IRI prediction. The three stations show a clear daily variation of the hmF2 but the high- and mid-latitude stations report lower daytime values of hmF2 compared to night-time values whereas the low latitude station reports the opposite, larger daytime values than night-time. This diurnal variation of hmF2 can be explained by patterns of the ion-production rate, temperature variations, thermospheric neutral winds and ExB drifts (e.g. Rishbeth and Garriott, 1969; Kohl and King, 1967). The ExB drifts play a significant role at equatorial latitudes (e.g. Fejer, 1997) resulting a rising of the F2 peak after sunrise and a prominent uplifting after sunset as consequence of the “pre-reversal enhancement” (Farley et al., 1986). However, the thermospheric winds and temperature variations play a dominant role in the variations of the F2 peak height at mid-high latitudes (e.g. Rishbeth, 1998) and the dominant night-time equatorward winds explain the larger night-time hmF2 values in relation to the daytime.

The three stations also present a seasonal variation of the hmF2 whose amplitude and phase seems to be related with the latitude (e.g. Rishbeth et al., 2000; Rishbeth, 2000). A well defined semiannual variation of the night-time values exists for high latitudes. This semiannual variation maximizes in the equinoxes and minimizes at solstices and it seems to be better defined for mid- low-solar activity compared to high solar activity. Daytime values of the hmF2 at high latitudes show an annual variation with larger values in winter compared to summer values and this annual variation is better pronounced for years of high solar activity. The annual and semi-annual behavior is a bit different at mid-latitudes. Though a semi-annual variation of the night-time values of the hmF2 can be observed, with larger values for equinoxes than for solstices, this is less pronounced than observed at high latitudes. As for high latitudes, the semiannual behavior of the night-time hmF2 is better seen for mid-low-solar activity compared to high solar activity, when it is difficult even to be detected. The daytime values of the hmF2 at mid-latitudes show an annual variation also but opposite in phase in relation to that observed at high latitudes – the larger values are observed in summer compared to winter – and this annual variation is better pronounced for years of high solar activity. Quite different picture is observed at equator latitudes; a weak semiannual variation (with lower values at the equinoxes compared to the solstices) is observed for the night-time values of the hmF2 and a well defined annual variation of the daytime and post-sunset values of hmF2 (with larger values for the summer compared to the winter ones). The later annual variation enhances as the solar activity increases.

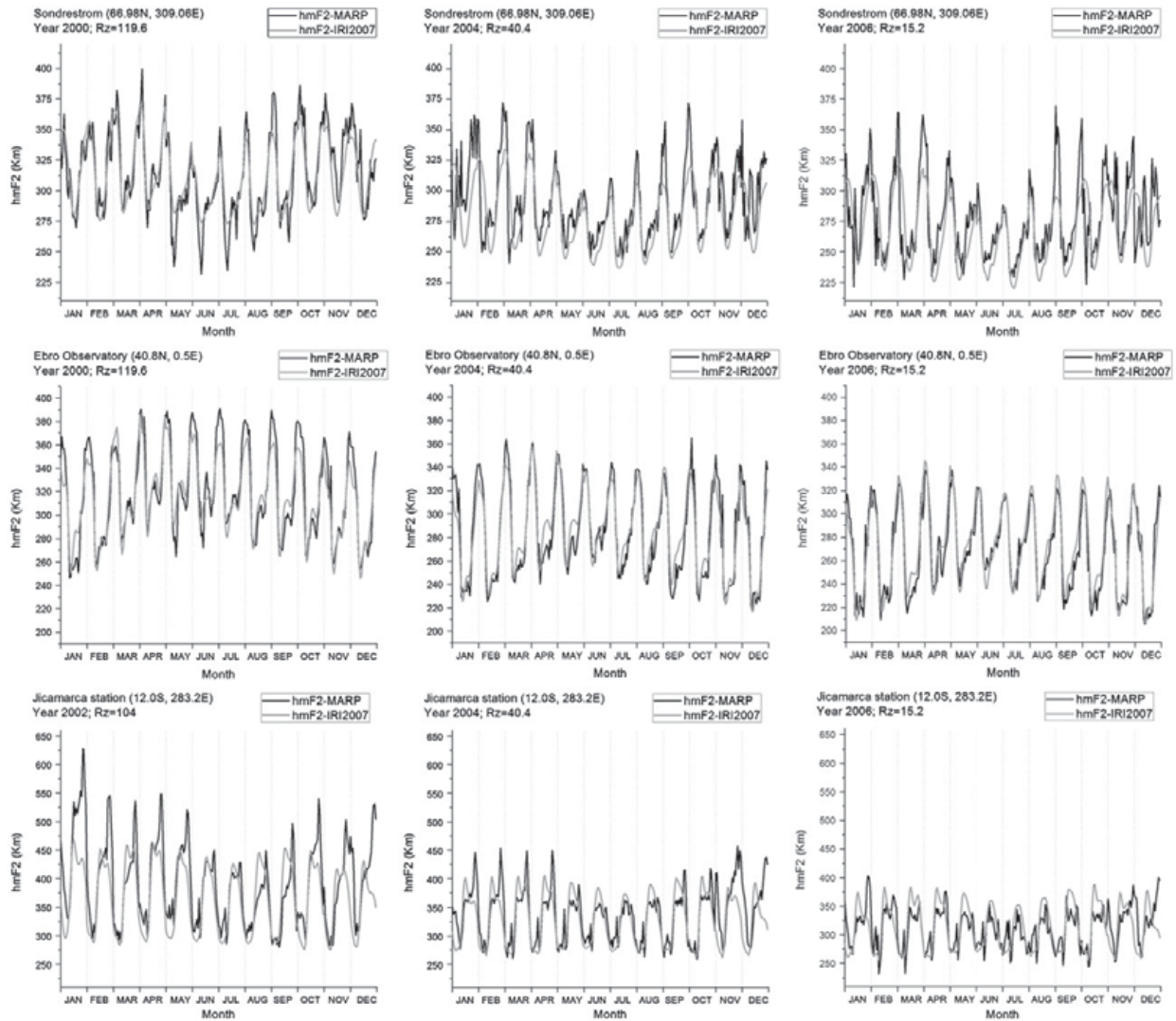


Fig. 2. Experimental quiet-time behavior of the hmF2 (black line) compared to the IRI predicted (gray line) for indicated years and stations. The results are arranged from high latitude stations (top row) to low latitude (bottom) and from high solar activity (left column) to low solar activity as indicated in the legends.

Fig. 2 shows also the behavior of the hmF2 for different levels of solar activity. The three stations observe certain degree of variability in relation to the solar activity. We have discussed above the influence of the solar activity on the annual and semiannual variations. Moreover, the average values of the hmF2 (for night-time or daytime) increases as the solar activity does (e.g. Rishbeth et al., 2000).

The main behavior of hmF2 discussed above (Fig. 2) and concerning the daily, seasonal and solar activity variations is quite well predicted by the IRI for the three latitudes analyzed here. Particularly, the agreement is excellent at mid-latitudes while significant discrepancies can be observed at particular local time for low latitude station at high solar activity and for high latitude station at low solar activity. These observations agree with previously reported results (e.g. Altadill et al., 2008; Sethi et al., 2004; Oyeyemi et al., 2010).

3.2. Deviation of the IRI prediction to the observed behavior

To better observe the discrepancies commented above we have obtained the percentage of the deviation of IRI predicted values of hmF2 in relation to the observed ones (i.e. $\text{Dev. (\%)} = (\text{hmF2}_{\text{IRI}} - \text{hmF2}_{\text{MARP}}) / \text{hmF2}_{\text{MARP}}$). Fig. 3 shows the

percentage of deviation as function of local time and season at the three analyzed stations and for different level of solar activity. Fig. 3 shows that most of the time, discrepancies are of about $\pm 10\%$ in agreement with the reasonable prediction of the main behavior of hmF2. However, the IRI prediction can report discrepancies as large as 40%.

The results at high latitudes show that the IRI model overestimates the hmF2 around 8 LT for summer at high solar activity and it slightly underestimate the winter values about 9 LT. The IRI overestimates the hmF2 around the small hours for winter and spring at middle solar activity, this being even more pronounced at low solar activity with deviations of 20–30%. To some extent, the above results are in agreement with that reported by Oyeyemi et al. (2010).

Concerning the mid-latitude station, Fig. 3 shows reasonably good agreement between the IRI predicted and the experimentally observed hmF2 values. The IRI slightly overestimates the daytime values of the hmF2 and it slightly underestimates the night-time ones, with discrepancies less than 10–15%.

The equatorial station observes the largest deviations. The IRI clearly underestimates the post-sunset values of hmF2. This fact is especially noteworthy at high and middle solar activity for equinoxes and summer, deviating by 30% for high solar activity.

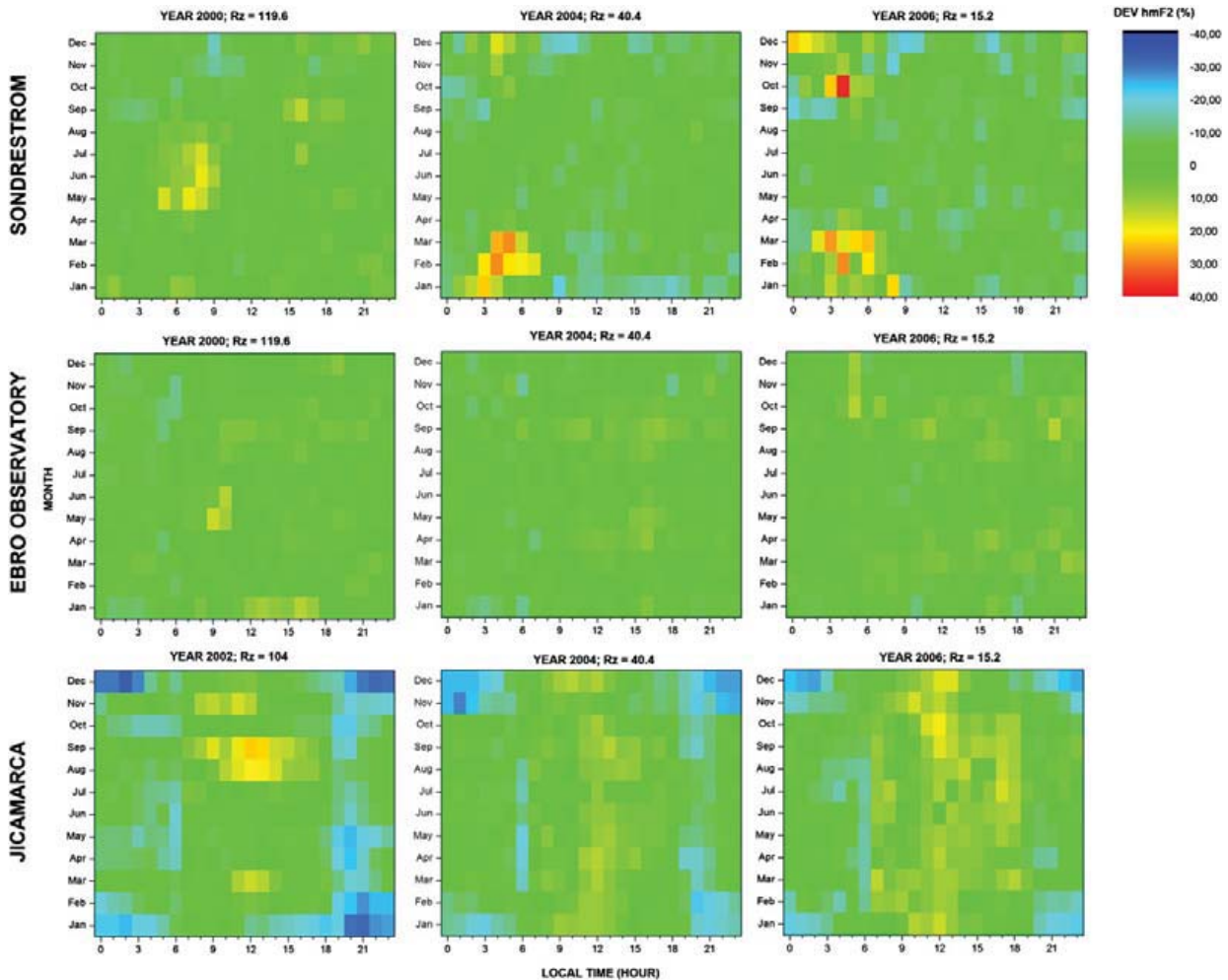


Fig. 3. Percentage of the deviation of the IRI prediction in relation to the observed quiet-time behavior of the hmF2 for indicated years and stations. The results are arranged from high latitude stations (top row) to low latitude (bottom) and from high solar activity (left column) to low solar activity as indicated in the legends.

IRI underestimates also the hmF2 for the summer night-time whose deviation increases from 20% to 40% as the solar activity increases. Moreover, the IRI underestimates hmF2 about sunrise for equinoxes and winter. However, the IRI slightly overestimates the daytime values of the hmF2 for equinoxes; this being enhanced at high solar activity, reaching up to 25%. These results concerning the low latitude station agree with those reported by previous investigations (e.g. Lee and Reinisch, 2006; Lee et al., 2008). Thus, it is worthwhile trying to improve the IRI modeling of the hmF2 to better represent their experimental behavior.

3.3. Improving the IRI prediction to the observed behavior

In order to obtain better results modeling the hmF2 compared to the IRI, we have applied a similar technique as the one described by Blanch et al. (2007) and Altadill et al. (2008). We have used Fourier analysis to obtain the dominant harmonics that better fits to the obtained daily and yearly variations of the hmF2 (e.g. Press et al., 1986). The results confirm that dominant periods are 24 and 12 h to represent the daily variation and 12- and 6-month to represent the yearly variation of the hmF2. Once we obtain the amplitudes and the phases, we find the potential dependence of them in relation to the solar activity, and build an analytical model for the hmF2 as the one presented in Eq. (1) of Altadill et al. (2008). We obtain one model for each of the three

stations under analysis and compare their results with the experimental behavior.

Fig. 4 shows the percentage of deviation of predicted values of the hmF2 with the current models in relation to the observed hmF2 (i.e. $\text{Dev. (\%)} = (\text{hmF2}_{\text{Mi}} - \text{hmF2}_{\text{MARP}}) / \text{hmF2}_{\text{MARP}}$, where Mi denotes the model for a given station) as function of the local time and season. Comparing the results shown in Fig. 3 with those in Fig. 4, we observe that we do not get significant improvement for the mid-latitude station; i.e. deviations reported in both figures lie in between $\pm 15\%$. However, we obtain significant improvement for other latitude stations, especially for Jicamarca. The model for Sondrestrom has significantly decreased the overestimation of the hmF2 around 8 LT for summer at high solar activity by the IRI from 20–25% to 10–15% and it has reduced the overestimation of the hmF2 by the IRI around the small hours for winter and spring at middle solar activity from 25–30% to 10–15%. The model for Jicamarca has also diminished the underestimation of the post-sunset values of hmF2 by IRI from 25–35% to 10% or even less and it has reduced the underestimation of the night-time values of hmF2 by IRI from 30% to 10–15%. The model of Jicamarca has also reduced the overestimation of the daytime values of the hmF2 by IRI from 15–25% to 10–15%.

The goodness of our models compared to the IRI for predicting the hmF2 values is shown in Fig. 5. We have chosen the root mean square error (RMSE) as a quantitative measure of the goodness and the lower RMSE the better modeling approach. Fig. 5 shows

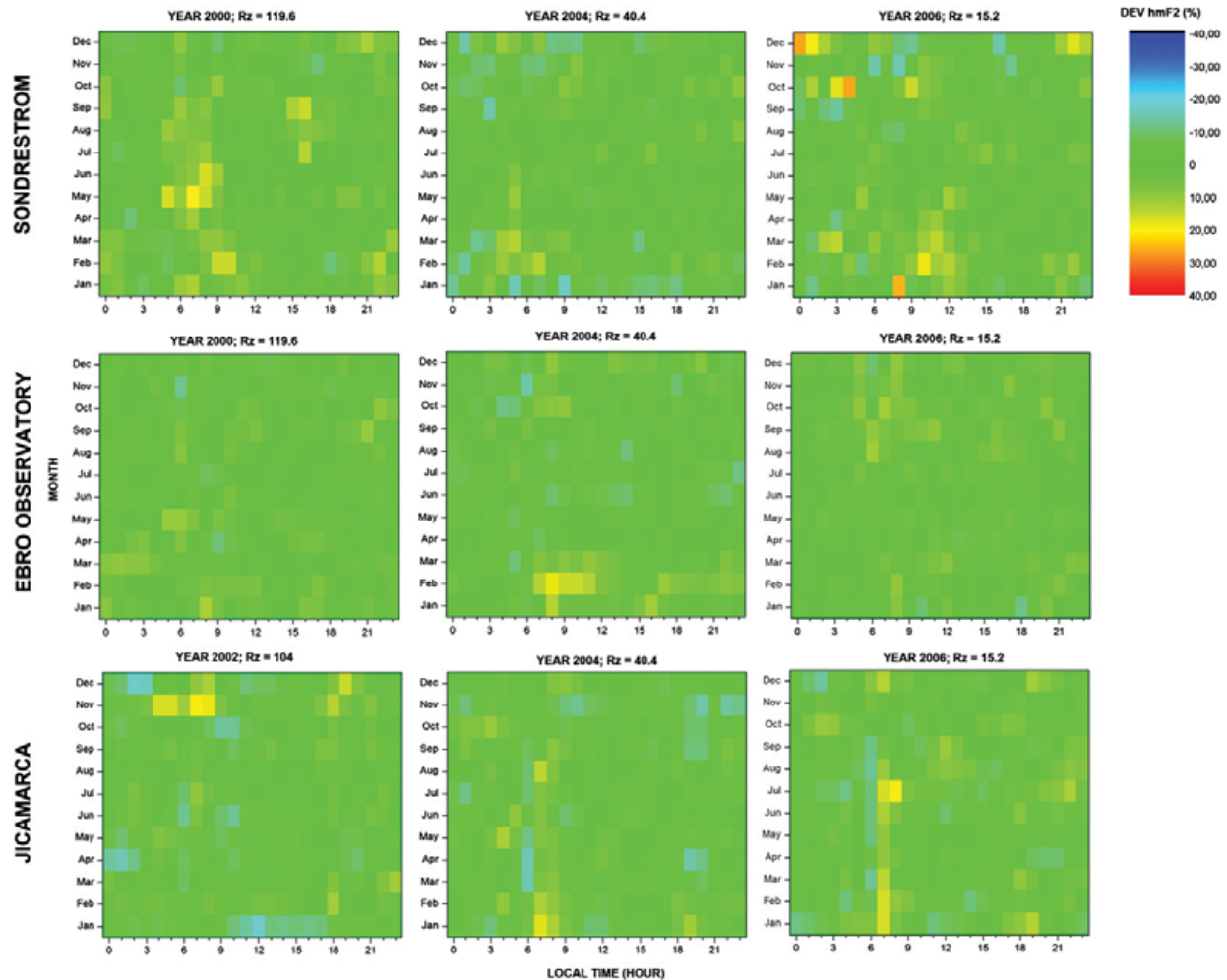


Fig. 4. Percentage of the deviation of the proposed models prediction in relation to the observed quiet-time behavior of the hmF2 for indicated years and stations. Plots are arranged from high latitude stations (top row) to low latitude (bottom) and from high solar activity (left column) to low solar activity as indicated in the legends.

that IRI performs better for mid-latitudes, with an average RMSE of 17 km, than for high (average RMSE of 22 km) and low latitudes (average RMSE of 42 km). Although mid-latitude model has not improved significantly the prediction of the IRI (average RMSE of 16 km), the error is reduced by a 23% (average RMSE of 17 km) for high latitudes and by a 40% (average RMSE of 25 km) for low latitudes compared to the error of the IRI prediction.

4. Discussion and concluding remarks

The experimental values of hmF2 obtained by the HR's average profile technique at different latitudes and solar activity have been compared with IRI predictions. The main behavior of hmF2 representing the daily, seasonal and solar activity variations is quite well predicted by the IRI for the three latitudes analyzed here, especially at mid-latitudes. IRI predictions deviate by about $\pm 10\%$ most of the time. However, the IRI prediction can report discrepancies as large as 40% at particular local time for high and low latitude stations. These discrepancies might be partially caused by the uncertainty estimating hmF2 by HR's technique which should be larger in the regions with unavailable ISR measurements. Moreover, IRI discrepancies observed at high latitudes may be explained because IRI is a non-auroral latitudes model. The high latitude has poor ionosonde data coverage and as a result the IRI predictions, which are data-driven, are less

accurate at high latitudes (Bilitza and Reinisch, 2008). On the other hand, at low latitudes, the IRI has a good agreement except for the sharp increasing of hmF2 at pre sunrise and post-sunset times. The post-sunset increase is due to the pre-reversal enhancement (Farley et al., 1986). The pre sunrise increase of hmF2 might be related to solar production occurring at higher altitudes during the sunrise period when the solar zenith angle is greater (Lee et al., 2008). We should notice at this point that the post-sunset peak observed in hmF2 is also manifest in M(3000)F2 measurements as a sharp drop (Adeniyi et al., 2003; Obrou et al., 2003). However, it is well known that the CCIR M(3000)F2 model used by IRI does not capture the fine structures in the variations of M(3000)F2 (e.g. Zhang et al., 2007). The limitations of this model of M(3000)F2 in representing fine structures may be due to the limited number of terms used when developing the model (CCIR, 1991).

A model based on the Fourier analysis has been obtained by using the average profiles for a given month and hour (MARPs) obtained at Sondrestrom, Ebro and Jicamarca observatories at low, moderate and high solar activity periods. This analysis has yielded a relationship between diurnal and seasonal variations. In order to temporally extent the model, a linear dependence with the solar activity evaluated through the Rz12 parameter has been obtained. The model for mid-latitudes does not present significantly better accuracy than IRI. However, the models for high and low latitudes reproduce the fine structures better than IRI.

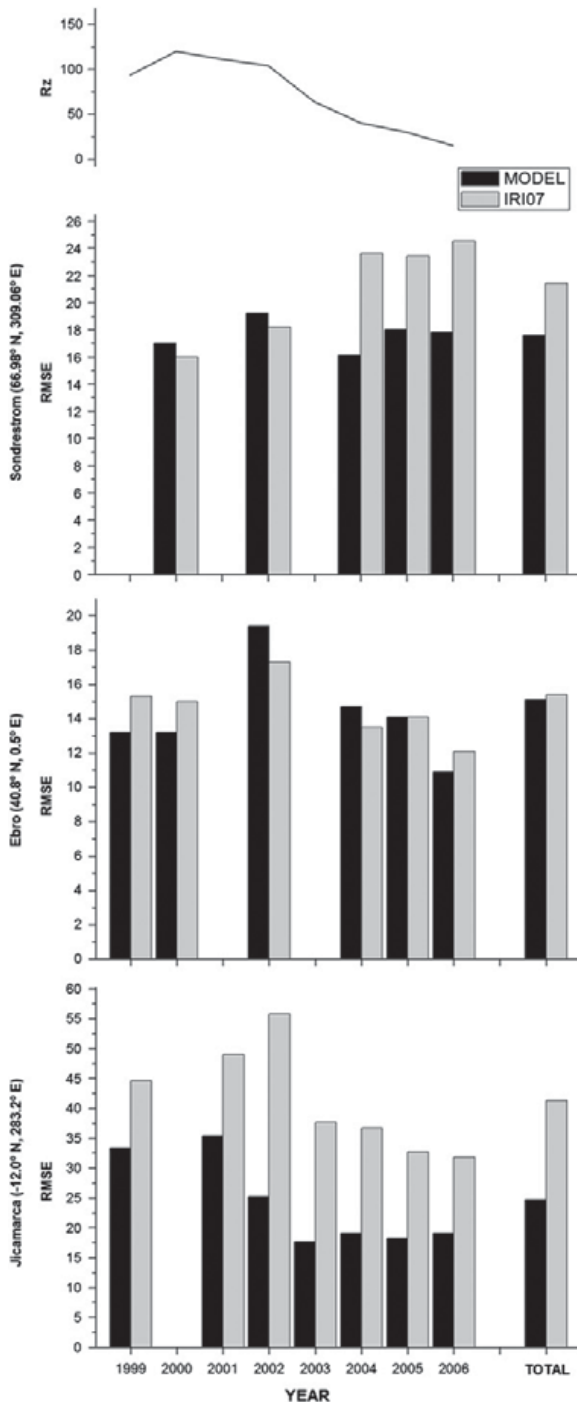


Fig. 5. Comparison of the RMSE provided by the IRI prediction (gray histograms) and by the proposed models (black histograms) for the indicated years and ionospheric stations. The variation of the solar activity (Rz_{12}) is shown at the top.

The Root Mean Square Error (RMSE) corresponding to the estimations given by IRI and our models have been calculated at each observatory for both every single year and the whole period of study. The comparison indicates that our empirical models match the experimental average hmF2 values better than the IRI does.

Acknowledgments

This work has been possible thanks to financial support granted by the National Institute for Aerospace Technology

(INTA) and the Spanish projects CGL2009-08407-E, 2009SGR507, CTM2010-21312-C03-01 and BSCH-UCM2009-910596. The authors wish to express their gratitude to the DIDB team and to the ionospheric stations contributing to it for making the data available, as well as to the IRI team for making the IRI model available.

References

- Adeniyi, J.O., Bilitza, D., Radicella, S.M., Willoughby, A.A., 2003. Equatorial F2-peak parameters in the IRI model. *Adv. Space Res.* 31, 507–512.
- Adeyemi, A.O., Oyeyemi, E.O., McKinnell, L.A., 2009. Comparisons of observed ionospheric F2 peak parameters with IRI-2001 predictions over South Africa. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 71, 273–284.
- Altadill, D., Arrazola, D., Blanch, E., Buresova, D., 2008. Solar activity variations of ionospheric measurements and modeling results. *Adv. Space Res.* 42, 610–612.
- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.V., 2002. Storm: an empirical storm-time ionospheric correction model—1. Model description. *Radio Sci.* 37 (3), 1–12.
- Bilitza, D., 2001. International reference ionosphere 2000. *Radio Sci.* 36 (2), 261–275. doi:10.1029/2000RS002432.
- Bilitza, D., Reinisch, B.W., 2008. International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* 42, 599–609.
- Bilitza, D., Sheikh, N.M., Eyfrig, R., 1979. A global model for the height of the F2-peak using M3000 values from the CCIR numerical map. *Telecommun. J.* 46, 549–553.
- Blanch, E., Arrazola, D., Altadill, D., Buresova, D., Mosert, M., 2007. Improvement of IRI B0, B1 and D1 at mid-latitudes using MARP. *Adv. Space Res.* 39, 701–710.
- Buonsanto, M.J., Starks, M.J., Titheridge, J.E., Richards, P.G., Miller, K.L., 1997. Comparison of techniques for derivation of neutral meridional winds from ionospheric data. *J. Geophys. Res.* 102, 14,477–14,484.
- Chen, C.F., Reinisch, B.W., Scali, J.L., Huang, X., Gamache, R.R., Buonsanto, M.J., Ward, B.D., 1994. The accuracy of ionogram derived N(h) profiles. *Adv. Space Res.* 12 (12), 43–46.
- CCIR, 1991. Atlas of ionospheric characteristics, Comité Consultatif International des Radiocommunications, Report 340-6. International Telecommunications Union, Geneva.
- Ehinlafa, O.E., Falaiye, O.A., Adeniyi, J.O., 2010. Comparison of observed hmF2 and IRI 2007 model with M(3000)F2 estimation of hmF2 at low solar activity for an equatorial station. *Adv. Space Res.* 46, 89–93.
- Farley, D.T., Bonelli, E., Fejer, B.G., 1986. The pre-reversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. *J. Geophys. Res.* 91, 13723–13728.
- Fejer, B.G., 1997. The electrodynamics of the low-latitude ionosphere: recent results and future challenges. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 59, 1465–1482.
- Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.C., Wilkinson, P., 2000. Quantitative modeling of the ionospheric response to geomagnetic activity. *Ann. Geophys.* 18, 766–781.
- Gulyaeva, T.L., 2009. Linkage of the ionospheric peak electron density and height deduced from the topside sounding data. *Adv. Space Res.* 43, 1794–1799.
- Gulyaeva, T.L., Bardley, P.A., Stanislawski, I., Juchnikowski, G., 2008. Towards a new reference model of hmF2 for IRI. *Adv. Space Res.* 42, 666–672.
- Huang, X., Reinisch, B.W., 1996a. Vertical electron density profiles from the digisonde network. *Adv. Space Res.* 18 (6), 121–129.
- Huang, X., Reinisch, B.W., 1996b. Vertical electron density profiles from digisonde ionograms. The average representative profile. *Ann. Geophys.* 39 (4), 751–756.
- Kohl, H., King, J.W., 1967. Atmospheric winds between 100 and 700 km and their effects on the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 29, 1045–1062.
- Lee, C.C., Reinisch, B.W., 2006. Quiet-condition hmF2, NmF2, and B0 variations at Jicamarca and comparison with IRI-2001 during solar maximum. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 68, 2138–2146.
- Lee, C.C., Reinisch, B.W., Su, S.-Y., Chen, W.S., 2008. Quiet-time variations of F2-layer parameters at Jicamarca and comparison with IRI-2001 during solar minimum. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 70, 184–192.
- Mahajan, K.K., Pandey, V.K., Goel, M.K., Sethi, N.K., Kohli, R., 1994. Incoherent-scatter measurements of E-F valley and comparisons with theoretical and empirical models. *Adv. Space Res.* 14 (12), 75–78.
- Mosert, M., Buresova, D., Ezquer, R., Mansilla, G., 2004. Behavior of the bottomside electron density profile over Pruhonice. *Adv. Space Res.* 34 (9), 1982–1989.
- Obrou, O.K., Bilitza, D., Adeniyi, J.O., Radicella, S.M., 2003. Equatorial F2-layer peak height and correlation with vertical ion drift and M(3000)F2. *Adv. Space Res.* 31, 513–520.
- Oyeyemi, E.O., McKinnell, L.A., Poole, A.W.V., 2007. Neural network-based prediction techniques for global modeling of M(3000)F2 ionospheric parameter. *Adv. Space Res.* 39 (5), 643–650. doi:10.1016/j.asr.2006.09.038.
- Oyeyemi, E.O., Adeyemi, A.O., Adeloye, A.B., Akala, A.O., 2010. Comparison between IRI-2001 predictions and observed measurements of hmF2 over three high latitude stations during different solar activity periods. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 72, 676–684.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsiy, S.A., Vetterling, W.T., 1986. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, New York.
- Reinisch, B.W., Galkin, I.A., Khmyrov, G., Kozlov, A., Kitrosser, D.F., 2004. Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network. *Adv. Radio Sci.* 2, 241–247.

- Rishbeth, H., 1998. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2 layer. *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.* 60, 1385–1402.
- Rishbeth, H., 2000. The equatorial F-layer: progress and puzzles. *Ann. Geophys.* 18, 730–739.
- Rishbeth, H., Garriott, O.K., 1969. *Introduction to Ionospheric Physics*, International Geophysics Series, vol. 14. Academic Press, New York.
- Rishbeth, H., Sedgemore-Schulthess, K.J.F., Ulich, T., 2000. Semiannual and annual variations in the height of the ionospheric F2-peak. *Ann. Geophys.* 18, 285–299.
- Rush, C.M., Fox, M., Bilitza, D., Davies, K., McNamara, L., Stewart, F.G., PoKempner, M., 1989. Ionospheric mapping: an update of foF2 coefficients. *Telecommun. J.* 56, 179–182.
- Scali, J.L., Reinisch, B.W., Kelley, M.C., Miller, C.A., Swartz, W.E., Zhou, Q.H., Radicella, S., 1997. Incoherent scatter radar and Digisonde observations at tropical latitudes, including conjugate point studies. *J. Geophys. Res.—Space Phys.* 102 (A4), 7357–7367.
- Sethi, N.K., Dabas, R.S., Vohra, V.K., 2004. Diurnal and seasonal variations of hmF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001. *Ann. Geophys.* 22, 453–458.
- Sethi, N.K., Dabas, R.S., Sharma, K., 2008. Comparison between IRI predictions and digital ionosonde measurements of hmF2 at New Delhi during low and moderate solar activity. *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.* 70, 756–763.
- Shimazaki, T., 1955. Worldwide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric F2 layer. *J. Radio Res. Lab. Jpn.* 2 (7), 85–97.
- Zhang, M.L., Shi, J.K., Wang, X., Shang, S.P., Wu, S.Z., 2007. Ionospheric behavior of the F2 peak parameters foF2 and hmF2 at Hainan and comparisons with IRI model predictions. *Adv. Space Res.* 39 (5), 661–667. doi:10.1016/j.asr.2006.03.047.
- Zhang, M.-L., Liu, C., Wan, W., Liu, L., Ning, B., 2009. A global model of the ionospheric F2 peak height based on EOF analysis. *Ann. Geophys.* 27, 3203–3212.

4.2. Modelo global de $hmF2$ y H_m

Los esfuerzos recientes para modelar la parte superior de la ionosfera van dirigidos al uso de la formulación α -Chapman utilizando una altura de escala variable (Reinisch et al., 2007; Ram et al., 2009). La altura de escala efectiva en $hmF2$, H_m , se deduce a partir de medidas de ionosondas asumiendo que el perfil de densidad electrónica se ajusta a una función α -Chapman (Huang and Reinisch, 2001). H_m puede ayudar a construir la parte superior del perfil de densidad electrónica utilizando el factor de corrección apropiado para estimar la altura de escala de la parte superior (Kutiev et al., 2009). Además, Nsumei et al. (2010) mostraron una relación potencial entre los valores de H_m obtenidos a partir de medidas del bottomside, con los valores deducidos a partir de medidas del topside. Con esa relación, se puede estimar información del topside, por encima del máximo de densidad electrónica, a partir de medidas tomadas en la parte inferior y mejorar los modelos de densidad electrónica.

Varios estudios han analizado el comportamiento de H_m para diferentes latitudes y condiciones de actividad solar (e.g., Zhang et al., 2006; Nambala et al., 2008; Lee and Reinisch, 2007; Mosert et al., 2012). Sin embargo, todavía no se ha realizado ningún análisis exhaustivo a escala global.

Este artículo trata de contribuir a un mejor modelado del comportamiento de $hmF2$ a escala global, y un mejor conocimiento y modelado de comportamiento tranquilo de H_m . Se describe el desarrollo de dos modelos empíricos, para $hmF2$ y H_m respectivamente, que predicen el comportamiento tranquilo de estas magnitudes con una formulación analítica en función de la localización, la hora local, mes y actividad solar.

La primera parte del estudio analiza el comportamiento de $hmF2$ y H_m en condiciones de calma. Con los resultados de este análisis se modelan analíticamente ambos parámetros utilizando el análisis de armónicos esféricos (AE) (Anexo IV). En ambos modelos se ha utilizado la latitud modip como parámetro de referencia. Los coeficientes de los modelos AE son función de la actividad solar mientras que la variación diurna y estacional se ha considerado como una expansión de los coeficientes de Fourier. Ambos modelos proporcionan una predicción a cualquier hora y para cualquier longitud en un rango de latitudes de 70°N a 70°S.

La segunda parte, compara los resultados obtenidos por el modelo global

de $hmF2$ con los predichos por el IRI, mostrando una mejora de la estimación de $hmF2$ por parte del modelo AE de $hmF2$, especialmente en aquellas estaciones situadas en latitudes altas y ecuatoriales.

En la sección 3.2.4, se muestra la relación entre $sTEC$ y $vTEC$ y se define la función de mapeo como función de la altura $hmF2$ (Ec 3-27). Tal y como se ha visto en la sección 4.1, $hmF2$ presenta un comportamiento dependiente del tiempo y, sobre todo, muy dependiente de la latitud. El uso de una altura constante produce un error en la función de mapeo que conduce a una estimación errónea del $vTEC$. Como se ha visto en la sección 0, la ionosfera ecuatorial es donde se encuentran los mayores valores del $vTEC$ (Figura 4-1).

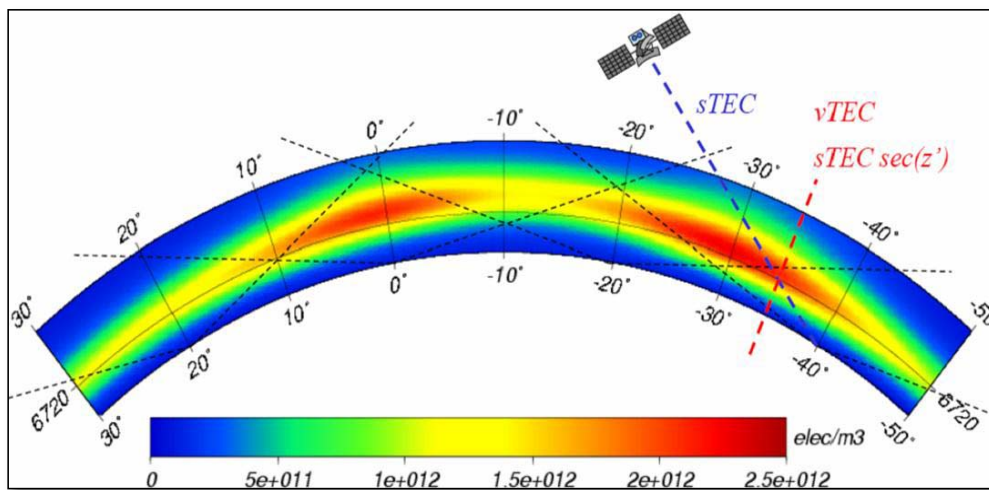


Figura 4-1: Influencia de la distribución del TEC ionosférico en el $sTEC$ y $vTEC$.

El error en la estimación será mayor a medida que la altura utilizada en la función de mapeo, MF, difiera más de la $hmF2$ real (Figura 4-2) y, sobre todo, cuanto mayor sea el $vTEC$.

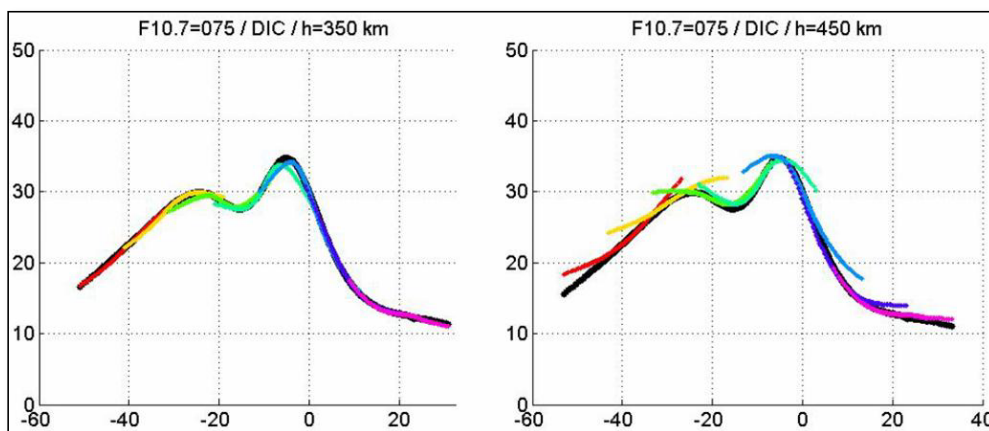


Figura 4-2: Estimación del $vTEC$ configurando diferentes alturas en la MF.

Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions

D. Altadill^{a,*}, S. Magdaleno^{b,1}, J.M. Torta^a, E. Blanch^a

^a Ebro Observatory (OE), University Ramon Llull - CSIC, Roquetes, Spain

^b Atmospheric Sounding Station El Arenosillo, INTA, Huelva, Spain

Available online 28 November 2012

Abstract

Monthly average electron density profiles have been calculated from hourly electron density $N(h)$ recorded in 26 digisonde stations distributed worldwide encompassing the time interval 1998–2006. The ionospheric electron density peak height of the F2 region, $hmF2$, and the effective scale height at the $hmF2$, Hm , deduced from average profiles have been analyzed to obtain the quiet-time behavior and have been analytically modeled by the spherical harmonic analysis (SH) technique using the modip latitude as the coordinate of the reference system. The coefficients of the SH models of $hmF2$ and Hm are bounded to the solar activity, and the temporal and seasonal variations are considered by Fourier expansion of the coefficients. The SH models provide a tool to predict $hmF2$ and Hm located anywhere in the range of latitudes between of $70^\circ N$ and $70^\circ S$ and at any time. The SH analytical model for $hmF2$ improves the fit to the observations by 10% in average compared to the IRI prediction, and it might improve the IRI prediction of $hmF2$ by more than 30% at high and low latitudes. The analytical model for Hm predicts the quiet behavior of the effective scale height with accuracy better than 15% in average which enables to obtain a good estimation of vertical profiles. These results could be useful to estimate information for the topside profile formulation.

© 2012 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Electron density peak height; Equivalent scale height; International Reference Ionosphere; Empirical ionospheric modeling; Analytical formulation

1. Introduction

The International Reference Ionosphere model (IRI) is an empirical standard model of the ionosphere promoted by the Committee on Space Research (COSPAR) and the International Union of Radio Science (URSI). IRI provides the monthly median values of electron density, electron temperature, and the ion composition as a function of height, for a given location, time, and sunspot number (e.g., Bilitza, 2001). The IRI is one of the most widely used models among the related scientific community and it is

continuously evaluated and updated thanks to new data and modeling efforts and newer versions are released as IRI improves (e.g., Bilitza 2003; Bilitza and Reinisch, 2008). The IRI models the bottomside F2-layer electron density profile with an analytic function dependent on two ionospheric characteristics – the F2 layer peak electron density, $NmF2$, proportional to the square of the F2 layer critical frequency, $foF2$, and height, $hmF2$ – and two parameters – the thickness, $B0$, and the shape, $B1$, parameters – (e.g., Bilitza, 1990).

The IRI models the critical frequency $foF2$ reasonably well compared to the measured values for geomagnetically quiet periods (e.g., Fuller-Rowell et al., 2000; Mosert et al., 2004). Nevertheless, the later IRI models for $B0$ and $B1$ showed significant discrepancies with the experimental values (e.g., Sethi and Mahajan, 2002; Lei et al., 2004; Blanch et al., 2007; Zhang et al., 2008). Altadill et al. (2009) have

* Corresponding author. Tel.: +34 977 500 511; fax: +34 977 504 660.

E-mail addresses: David_Altadill@obsebre.es (D. Altadill), smactor@gmail.com (S. Magdaleno), jmtorta@obsebre.es (J.M. Torta), eblanch@obsebre.es (E. Blanch).

¹ Present address: GMV, Tres Cantos, Spain.

proposed new models of the B0 and B1 which improve IRI predictions and these models are included into the latest IRI release (Bilitza et al., 2011). Bilitza et al. (1979) developed an empirical formulation to compute hmF2 for IRI which considers the anti-correlation with the propagation factor M(3000)F2 (Shimazaki, 1955) and a correction factor accounting for the E-layer. However, current IRI uses the M(3000)F2 model developed by the Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR, 1991) to predict hmF2. Though IRI models reasonably well the main trends of the quiet hmF2, it cannot capture the features of small spatial scale and of relative short time life (e.g., Adeniyi et al., 2003; Oyeyemi et al., 2007). Therefore, many works have shown significant discrepancies when comparing the IRI predictions of the hmF2 with experimental measurements for different latitudes and solar activity levels (e.g., Lee et al., 2008; Sethi et al., 2008; Ehinlafa et al., 2010; Oyeyemi et al., 2010; Magdaleno et al., 2011). Consequently, recent works present further modeling efforts aiming at improving the IRI modeling (e.g., Gulyaeva et al., 2008; Zhang et al., 2009). However, different techniques of the peak height derivation might result on different hmF2 estimation (Gulyaeva, 2009) resulting significant differences from the experimental hmF2 values and calibration might be necessary (Gulyaeva, 2010).

The current IRI, IRI-2007, (Bilitza and Reinisch, 2008) has adopted the formulation of the NeQuick to model the topside electron density profile which is represented by a semi-Epstein layer with a height-dependent thickness parameter H (Nava et al., 2008). However, other profiling techniques, based on exponential or Chapman formulation, can serve for practical applications (e.g., Reinisch and Huang, 2004; Kutiev et al., 2006; Liu et al., 2008; Stankov et al., 2011). Recent efforts for modeling the topside goes toward the α -Chapman formulation with varying scale height (Reinisch et al., 2007; Ram et al., 2009). The effective scale height at the hmF2 deduced from ground-based ionosonde assuming an α -Chapman profile function, Hm (Huang and Reinisch, 2001), can help to construct the topside electron density profile using appropriate correction factor to estimate the topside scale height (Kutiev et al., 2009). In addition, Nsumei et al. (2010) have shown potential relationship of the Hm values deduced from bottomside measurements with those values deduced from topside measurements. Thus, relating the topside estimated values with the bottomside ones, one may estimate information of the topside ionosphere by bottomside measurements. Many studies have analyzed the behavior of the Hm at particular latitudes and solar activity conditions (e.g., Zhang et al., 2006; Nambala et al., 2008; Lee and Reinisch, 2007; Mosert et al., 2012) but an exhaustive analysis at global scale has not been done yet.

This paper aims to contribute to a better modeling of the quiet pattern of the hmF2 at global scale, and to the better knowledge and to the modeling of the quiet behavior of the Hm. It describes the development of two empirical models, for hmF2 and Hm respectively, which predict the quiet

term behavior of these magnitudes with analytical formulations as functions dependent on the location, local time, season and solar activity.

2. Data and methodology

This work uses ionospheric data deduced of ionograms recorded by digisondes (Reinisch et al., 2005). The Digital Ionospheric Data Base (DIDB) of the Center for Atmospheric Research (CAR) of the University of Massachusetts, Lowell (Galkin et al., 2006) makes available the digisondes' ionograms. The ionospheric stations providing the data have been selected to ensure a good geographical distribution, embracing latitudes from 65°N to 52°S and the longitude sector from 120°W to 170°E, and to cover different levels of solar activity (spanning from 1998 to 2006). The Table 1 lists the digisonde stations used in this study and the Fig. 1 illustrates the time span of the data and the geographical distribution of the stations used in the analyses.

We have used the average profile technique (Huang and Reinisch, 1996) to obtain the quiet-time behavior of the ionosphere instead of the average behavior of a single characteristic. The DIDB provides also the 'true' height electron density profiles corresponding to the recorded ionograms. The individual profiles have been used to obtain the average profiles for a given location and time representative for a given month. The average profile computed by this technique removes the influence of the profiles recorded under disturbed conditions and it is accepted to represent the N(h) profiles under quiet ionospheric conditions (e.g., Altadill et al., 2009; Magdaleno et al., 2011). The average profiles have been computed at hourly sampling. Therefore, the experimental values of the hmF2 and Hm representing the quiet-time ionospheric conditions were obtained by the average profiles and used in further analysis and to feed the models.

To model the quiet pattern of the hmF2 and Hm at global scale we have followed the same methodology as described by Altadill et al. (2009), the spherical harmonic analysis (SH) technique. This technique has been widely used in geophysics to model analytically a general magnitude on a spherical surface and as function of the time also; i.e.:

$$f(\theta, \varphi, T) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta) \{g_n^m(t) \cos(m\varphi) + h_n^m(t) \sin(m\varphi)\} \quad (1)$$

θ and φ in Eq. (1) are the geocentric spherical coordinates, colatitude and longitude, respectively, and t means time in any convenient unit. P_n^m are the Legendre polynomials of degree n and order m , and $g_n^m(t)$ and $h_n^m(t)$ are the spherical harmonic or the Gauss coefficients, which can be functions of time (t). The SH technique requires a good distribution of the data source to provide a good modeling output. However, this is not the case in our data sets, for which

Table 1

List of ionospheric stations used in the analysis arranged from high to low modip latitude. The URSI station codes, Geographical and Geomagnetic coordinates are also given for each station.

Station	URSI code	Geog. lat.	Geog. lon.	Geom. lat.	Geom. lon.	Modip lat.
Sondrestrom	SMJ67	66.98	309.06	76.35	35.63	63.19
Goose Bay	GSJ53	53.3	299.7	63.55	15.14	53.78
Chilton	RL052	51.5	359.4	53.77	84.46	47.04
Wallops Is.	WP937	37.9	284.5	48.39	355.27	43.81
Eglin AFB	EG931	30.4	273.2	40.5	342.61	38.20
Point Arguello	PA836	34.8	239.5	41.27	304.49	37.76
Roquetes	EB040	40.8	0.5	43.24	81.29	36.08
Anyang	AN438	37.39	126.95	27.35	196.47	33.48
Osan AB	SN437	37.1	127	27.06	196.53	33.16
El Arenosillo	EA036	37.1	353.3	40.92	72.8	31.88
Wuhan	WU430	30.5	114.4	20.03	185.43	26.69
Ramey	PRJ18	18.5	292.9	28.99	4.8	26.63
Okinawa	OK426	26.7	128.2	16.75	198.35	21.28
Hainan	HA419	19.4	109.0	8.88	180.5	13.50
Kwajalein	KJ609	9.0	167.2	3.45	237.74	3.80
Jicamarca	JI91J	-12.0	283.2	-1.52	354.84	0.61
Sao Luis	SAA0K	-2.6	315.8	6.75	27.5	-0.48
Fortaleza	FZA0M	-3.8	322.0	4.98	33.58	-5.04
Cachoeira Pau.	CAJ2M	-23.2	314.2	-13.66	24.24	-17.19
Ascension Is.	AS00Q	-7.95	345.6	-2.17	56.34	-19.70
Learmonth	LM42B	-21.8	114.1	-32.27	186.18	-33.17
Port Stanley	PSJ5J	-51.6	302.1	-41.32	11.23	-34.30
Madimbo	MU12K	-22.39	30.88	-24.25	97.92	-35.43
Louisvale	LV12P	-28.5	21.2	-28.47	86.99	-40.02
Grahamstown	GR13L	-33.3	26.5	-34.13	91.0	-40.65
Bundoora	BV53Q	-37.7	145.05	-45.83	222.58	-45.65

we have a rather good latitude distribution of the stations only (Fig. 1). We have applied the approximation described in Altadill et al. (2009) to overcome this problem, assuming the local time differences in the ionospheric characteristics to be equivalent to the longitude differences for quiet-time conditions. Under this approximation, we have defined 24 fictitious stations distributed 15° in longitude apart from each other around the parallel over each original station lays. The geographical latitudinal position which defines the parallels over the original stations is bounded to the choice of the coordinate system that fits better the variations of the ionospheric magnitudes under study.

We have used also the IRI-2007 model (Bilitza and Reinisch, 2008) to obtain the IRI predicted hmF2 values. The foF2 storm model (Araujo-Pradere et al., 2002) was turned off in the IRI options to analyze quiet time conditions and the CCIR option of the IRI was used to estimate the hmF2. The IRI prediction of hmF2 is computed to compare with the experimental data and to evaluate the goodness of the models. The percentage deviation of the predicted values in relation to the experimental values has been computed to identify the main discrepancies of the models and the goodness of the models for the hmF2 has been evaluated in terms of the root mean square error (RMSE).

3. Data analyses and results

According to the above approximation, we have tested different coordinate systems to analyze which accommo-

dates better to the experimental variations under quiet conditions of hmF2 and Hm. It is well known that the variations of the ionospheric characteristics over a particular station are bounded to the geographic latitude and that these variations are sensitive to the geomagnetic field. Thus, we have analyzed the time-space variations arranging the stations source of data according to different coordinate systems: Geodetic, geomagnetic (given by the simplification provided by assuming a dipolar field only), the magnetic dip (which take into account the “true” magnetic inclination), the magnetic apex (which are aligned with the geomagnetic field lines) and the modified dip latitudes (modip, which approaches to the geomagnetic inclination at low latitudes and get closer to the geodetic latitude as latitude increases). Details of the different coordinates systems might be found in Parkinson (1983), Rawer (1963) and Richmond (1995). The modip latitudes are currently used by IRI to model the ionospheric characteristics (e.g., Bilitza, 2001). According to our results (not shown here), the modip latitude system is among the best choice to fit the experimental variations of hmF2 and Hm. That is why all the data analyses and modeling results presented hereafter will refer to the modip coordinate system.

3.1. Quiet-time variations of hmF2 and Hm

The Fig. 2 shows the variation of the hmF2 as function of the local-time as observed for our data set. The results of the Fig. 2 are arranged for different modip ranges and

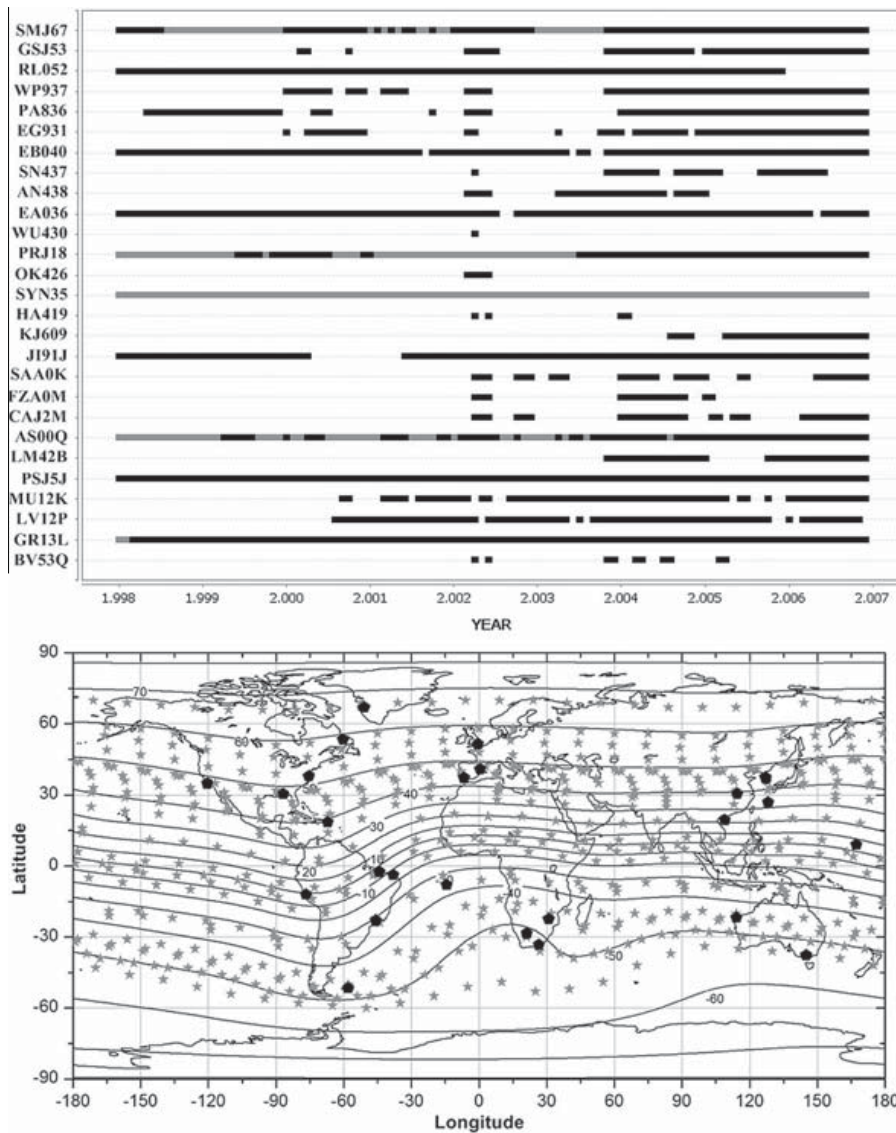


Fig. 1. Top: time span covered by the data base for each station used in the analysis. The stations are distributed from North to South modip latitude. Black lines indicate the availability of the experimental data and grey lines indicate the time and stations with synthesized data as described in Section 3.2. Bottom: geographical distribution of the stations under analysis. The black dots indicate the position of the original stations listed in the Table 1 and the grey stars indicate the position of the fictitious stations as explained in the Section 2.

seasons for low and high solar activity ($Rz12 = 15$ and 120 respectively). Winter season embraces the data from November to February of the Northern Hemisphere and the data from May to August of the Southern Hemisphere. Summer season contains data from May to August of the Northern Hemisphere and the data from November to February of the Southern Hemisphere. Equinoxes accounts for data of March, April, September and October of both hemispheres. The black dots in the Fig. 2 indicate the experimental values of hmF2 and the grey lines show the time-dependent polynomial functions that fit better to the experimental data, indicating the dominant daily pattern for different latitudes ranges and seasons.

The results presented in Fig. 2 indicate a distinct daily pattern in the experimental variations of the hmF2.

hmF2 at high- and mid-latitudes observes the largest values for nighttime and the lowest values for daytime at both hemispheres and for all seasons. This behavior is similar for both high solar activity (HSA) and low solar activity (LSA) but hmF2 observes larger values for HSA compared to LSA. However, hmF2 at low-latitudes shows larger values for daytime compared to nighttime though it still observes larger values of hmF2 during HSA than during LSA. It is also appreciated a significant uplift of the hmF2 for the post-sunset hours at low latitudes which is better expressed for HSA than for LSA. The thermospheric winds play a significant role on the variations of hmF2 (e.g., Rishbeth and Mendillo, 2001) – in fact the meridional winds and the thermospheric dynamics can be estimated by variations of the hmF2 (e.g., Buonsanto et al., 1997 and

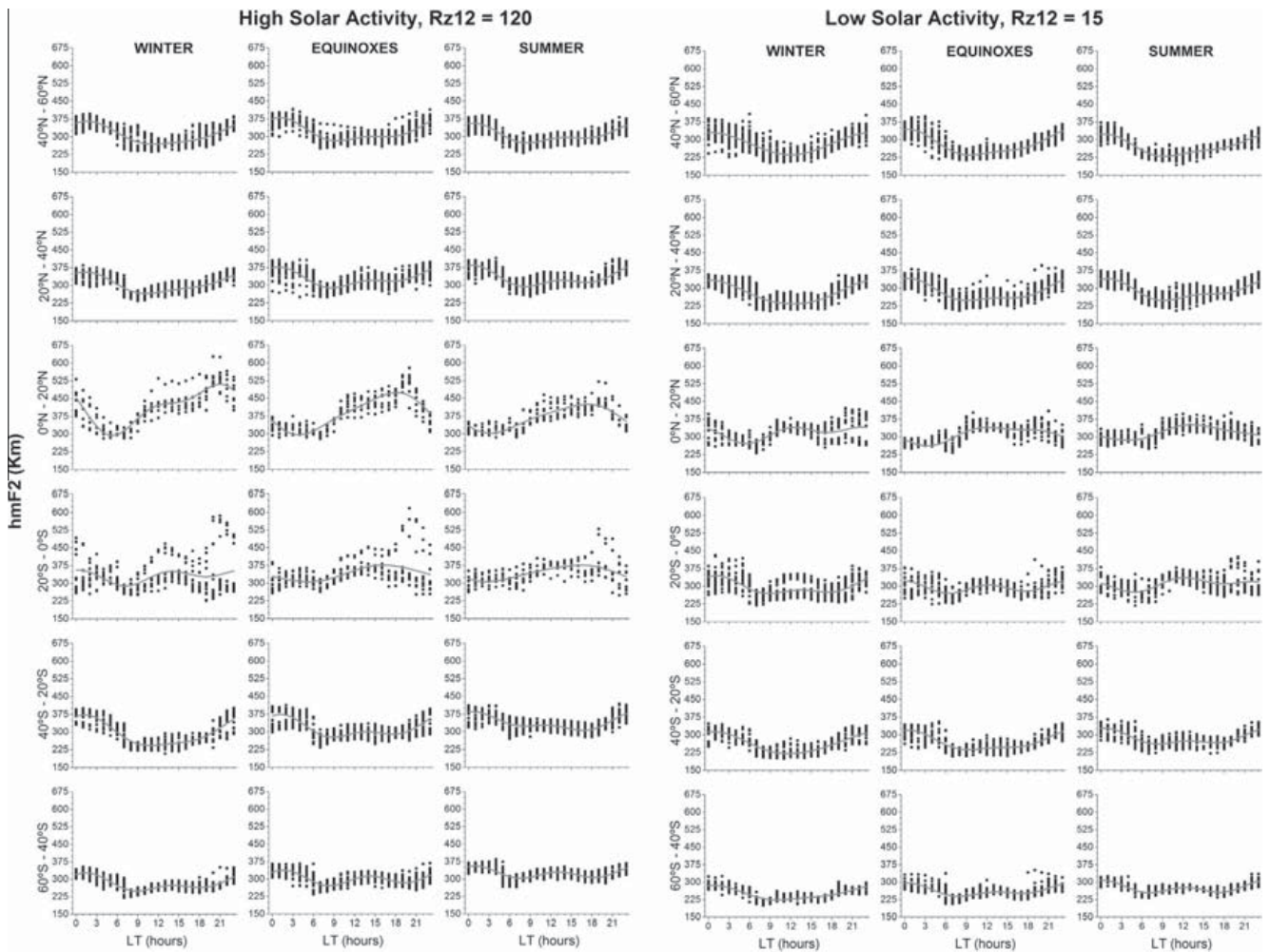


Fig. 2. Scatter plots showing the experimental variation of hmF2 as function of the local time for different stations located within the indicated latitudinal belts and for indicated seasons and solar activity levels. Note that stations are grouped within modip latitudes. The grey lines depict the time-dependent polynomial functions that fit better to the dominant daily pattern. See Section 3.1 for details.

references therein) – and the dominant nighttime equatorward winds explains the larger values of hmF2 for nighttime than for daytime. However, the electric fields play a dominant role on the variations of hmF2 at equator-low latitudes where the drifts caused by $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ (e.g., Fejer, 1997) results in an important increase of the F2 peak layer during daytime, especially after sunrise and an uplift after sunset due to the pre-reversal enhancement (Farley et al., 1986) which is followed by a decrease during nighttime.

The Fig. 3 depicts the results of the variation of the Hm which are arranged exactly as in Fig. 2. The experimental values of Hm clearly observe daily variations dominated by diurnal and semidiurnal components. The maximum values of Hm occur at around local noon while minimum values happen near local midnight. This behavior is better expressed at low latitudes (see also Nsumei et al., 2010), where the ratio of day to night values is larger than that observed at mid-to-high latitudes. Hm shows a distinct annual variation, with average summer values larger than

the winter ones, and also a solar activity effect, the average Hm values for high solar activity are larger than those for low solar activity (e.g., Lee and Reinisch, 2007; Mosert et al., 2012; Nambala et al., 2008). The aforementioned behavior of the Hm is physically meaningful taking into account the definition of the Hm (Huang and Reinisch, 2001) – the effective scale height at the hmF2, Hm, is deduced from ground-based measurements assuming an α -Chapman function and it relates to the neutral scale height ($H = kT/mg$) which is positively correlated to the neutral temperature (T). Thus, Hm should have some positive correlation with the temperature and we expect the highest temperature around noontime and summer as well as a positive correlation with the solar activity (e.g., Zhang et al., 2006). However, the effective scale height Hm does not have the classical physical meaning of the scale height but it is a measure of the gradient of the electron density profile (Huang and Reinisch, 2001), and intrinsically it relates to ionospheric dynamics, temperature and composition.

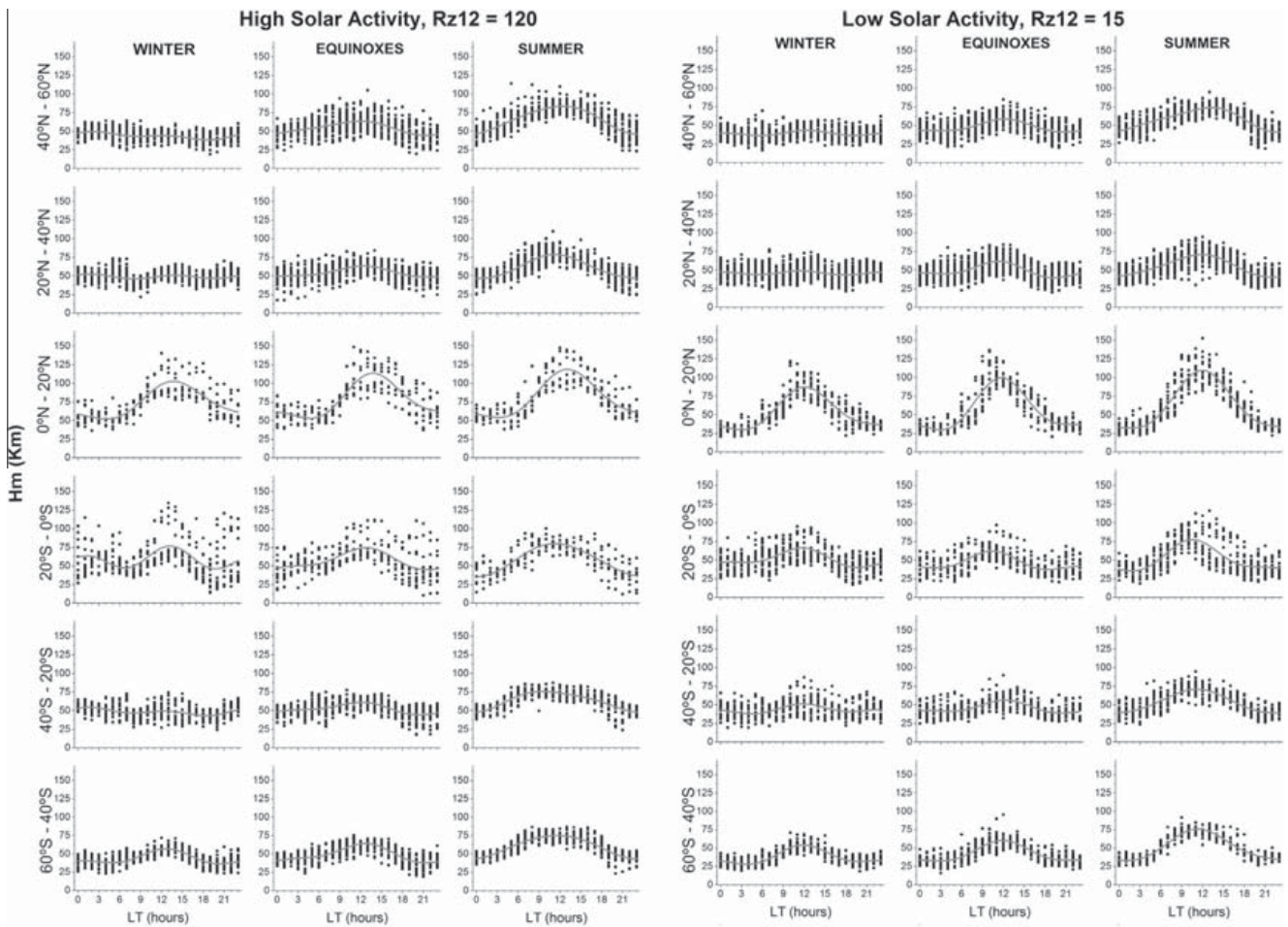


Fig. 3. The same as in Fig. 2 but for Hm.

3.2. Models for hmF2 and Hm

We have applied similar parameterization for the models of hmF2 and Hm due to their very similar observed experimental behavior. In order to capture the sharp increase of the hmF2 values at low and equatorial latitudes compared to other latitudes which is related to the drifts caused by $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, we have selected the maximum degree of the expansion for the latitudinal dependence, N in Eq. (1), to be 8. However, the latitudinal variation Hm behaves smoother than that of hmF2 and $N = 6$ for the parameterization of Hm. These values allow the best fit to model the latitudinal dependences of hmF2 and Hm. We have set the maximum order of the expansion for the longitudinal dependence, m in Eq. (1), to 4 for the parameterization of both hmF2 and Hm. Note that the longitudinal dependence has been approximated to the local time dependence in the modip reference system and there is no reason to set for more than four diurnal harmonics having hourly samplings. Finally, we have represented the time dependence of the hmF2 and Hm over the year by a two-degree Fourier expansion of the Gauss coefficients, $g_n^m(t)$ and $h_n^m(t)$ in Eq. (1), to model the yearly variations according to the

experimental results. Thus, the Gauss coefficients defined in the Eq. (1) are expressed as follow:

$$\begin{cases} g_n^m(t) \\ h_n^m(t) \end{cases} = \sum_{q=0}^2 \begin{cases} gq_{n,q}^m \\ ha_{n,q}^m \end{cases} \cos(2\pi qt/12) + \begin{cases} gb_{n,q}^m \\ hb_{n,q}^m \end{cases} \sin(2\pi qt/12) \quad (2)$$

Eqs. (2) and (1) model analytically the spatial–temporal variation of the hmF2 and Hm for a particular year, or better said for a particular year of a particular solar activity level. Applying this technique, we have obtained nine sets of spherical harmonic coefficients for each hmF2 and Hm by fitting the above analytical formulation to the experimental data. The lack of data of some stations can produce some critical errors in some of the above nine models, especially from those at the northernmost or southernmost latitudes that constrain the model behavior or from those located at regions with a distinct pattern and without any neighbor station. We have applied the same methodology as explained in Altadill et al. (2009) to overcome the problem caused by the lack of data. We have built a preliminary model using the yearly models for 2002, 2004, 2005 and 2006. These years have enough data in those strategically

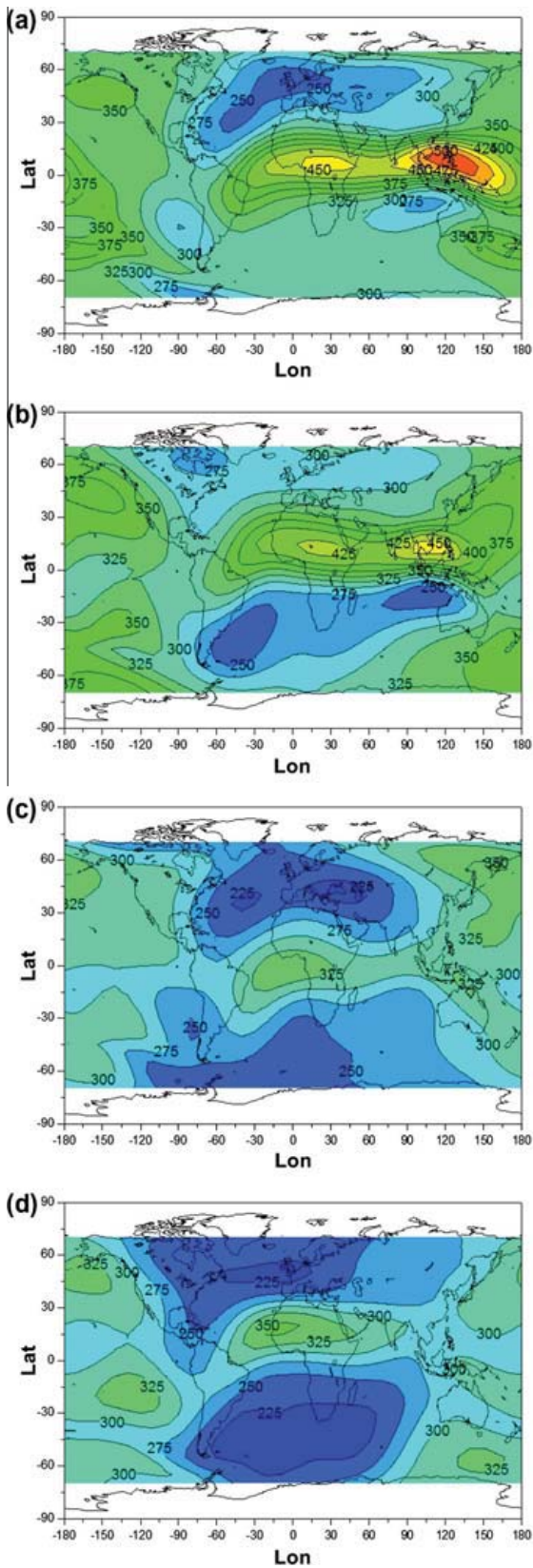


Fig. 4. Cross section plots showing the SH model output of hmF2 as function of geographical longitude and latitude for different seasons and solar activity levels. (a) and (b) January and July for high solar activity ($R_z = 120$) respectively; (c) and (d) January and July for low solar activity ($R_z = 15$) respectively. The plots show the results at 12 UT.

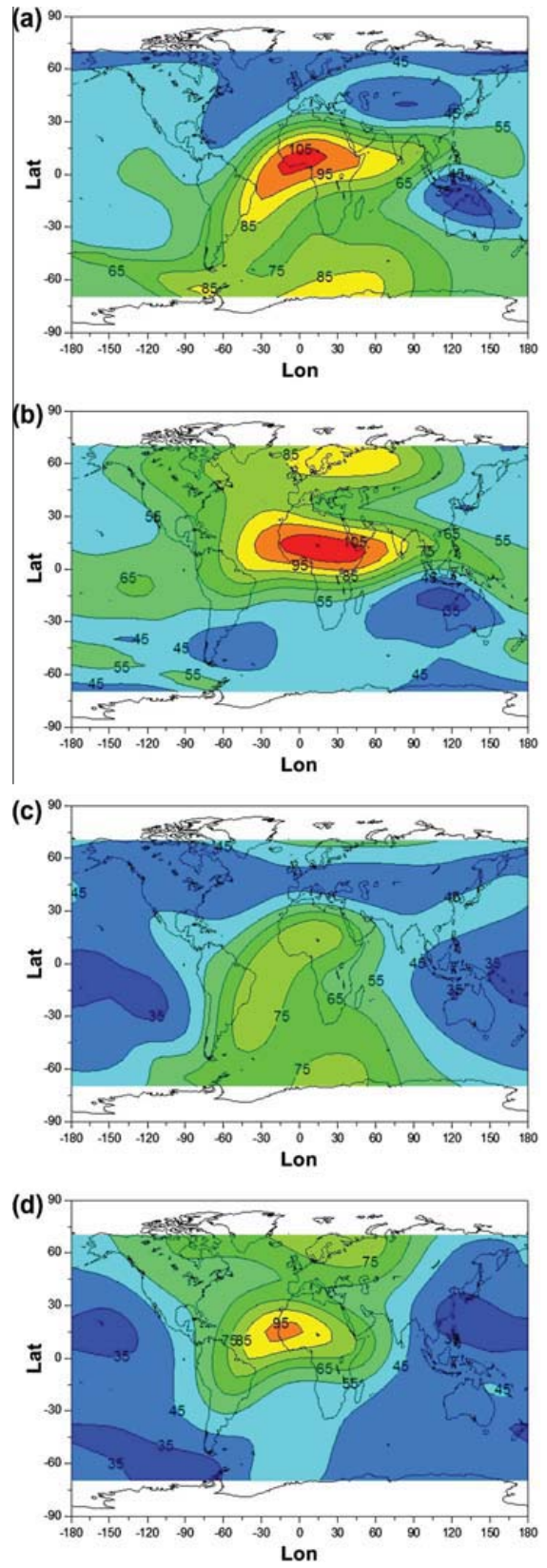


Fig. 5. As in Fig. 4 but for Hm.

located stations allowing obtaining realistic yearly models for both hmF2 and Hm and they practically cover the whole range of solar activity levels. The above preliminary

model results by obtaining the dependence of the Gauss coefficients of these four years as linear functions of the solar activity index $R_z \geq 12$. With the help of the preliminary

model, we have filled the data gaps of the critical stations SMJ67, PRJ18, AS00Q and GR13L with synthetic data. In addition, we have added one fictitious station located

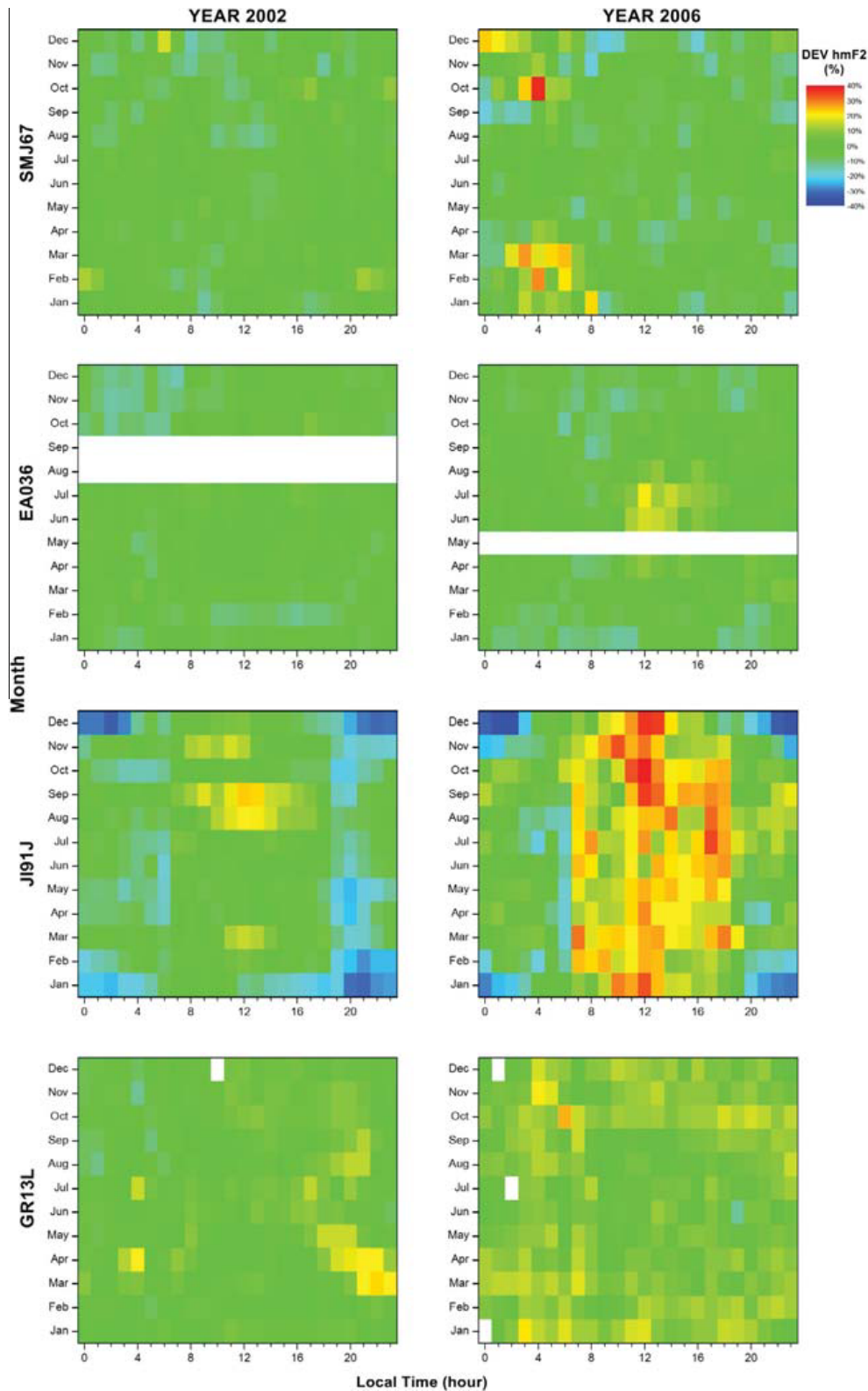


Fig. 6. Percentage of the deviation of the IRI prediction in relation to the observed quiet-time behavior of the hmF2 for indicated years and stations. The results are arranged from high latitude stations (top row) to low latitude (bottom) and from high solar activity (left column) to low solar activity as indicated in the legends.

at 35° modip North (SYN35 in Fig. 1) to constrain the behavior of the equatorial-low latitudes. Finally, we have reanalyzed the new data set (including the original experi-

mental data and the synthetic data filling up the gaps) to obtain nine yearly models (from 1998 to 2006). These yearly models provided the definitive sets of Gauss

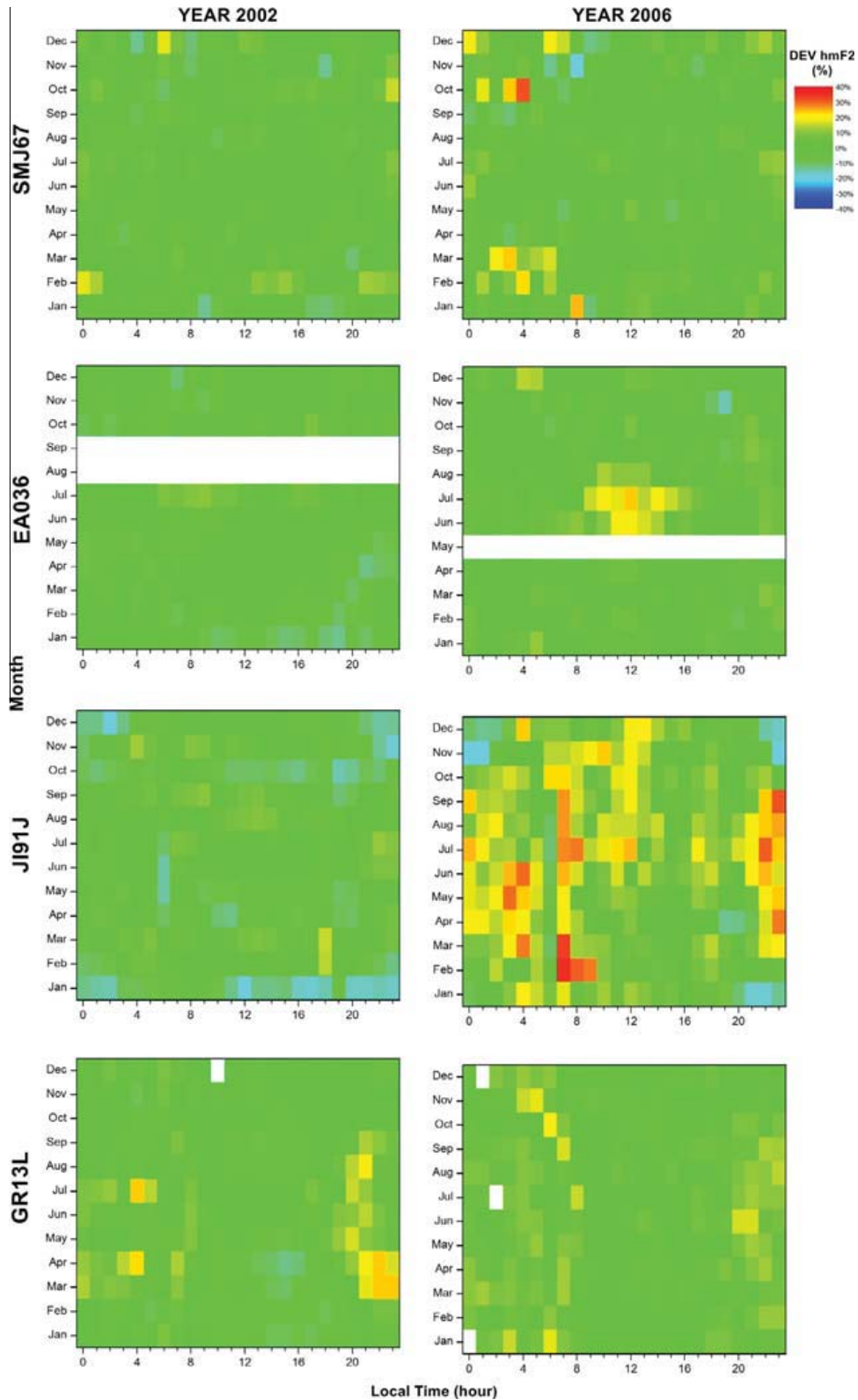


Fig. 7. As in Fig. 6 but for the deviation of the SH model of hmF2.

coefficients with which we have obtained analytical functions of the linear dependence of these coefficients with the solar activity, i.e., $ga_n^m(Rz12)$, $gb_n^m(Rz12)$, $ha_n^m(Rz12)$ and $hb_n^m(Rz12)$. We have selected the yearly average of the sunspot activity number, $Rz12$, as proxy of the solar activity in the models of hmF2 and Hm.

Summarizing, the spherical harmonic (SH) models for hmF2 and Hm are represented by 610 and 430 coefficients respectively which are solar activity dependent. Some examples of the model results for hmF2 and Hm at different seasons and solar activity levels are shown in the Figs. 4 and 5, respectively. Although the models predict hmF2 and Hm over all the latitudes, we have limited the results to the latitude range in between 70° N and 70° S. These borders have been established by the lack of experimental data at higher latitudes to build the models and where one expects good model performance. A comparison between the models output (Figs. 4 and 5) and the experimental variations of hmF2 and Hm (Figs. 2 and 3) indicate that the empirical models reproduce the dominant patterns noticed in previous Section 3.1.

3.3. Models results: validity and comparison with IRI

The experimental quiet-time values of hmF2 have been compared with the SH model output, hmF2S, and with the IRI prediction, hmF2I, to estimate how well the models perform. Fig. 6 depicts the percentage of the deviation of hmF2I in relation to the observed hmF2 ($DI (\%) = (hmF2I - hmF2)/hmF2$) and Fig. 7 illustrates the percentage of the deviation of hmF2S in relation to the observed hmF2 ($DS (\%) = (hmF2S - hmF2)/hmF2$). Both deviations, DI and DS, are presented as cross-sections plots as function of the local time and season for two years (representing high and low of solar activity) and at four stations (representing different latitudes).

Fig. 6 shows that IRI prediction of hmF2 at high latitudes of the Northern Hemisphere (i.e., SMJ67) is quite reasonable for HSA, with deviations lower than 20%. However, IRI shows large deviations during winter half-year before sunrise at LSA when IRI can overestimate hmF2 by more than 20%. IRI predicts quite well the variation of hmF2 at mid-latitudes of the Northern Hemisphere (i.e., EA036), where IRI slightly underestimates hmF2 for nighttime – early morning during winter at HSA and IRI slightly overestimates hmF2 for noon during summer at LSA. The largest deviations of the IRI predictions manifest at low and equatorial latitudes (i.e., JI91J) where IRI significantly underestimates hmF2 for nighttime during December–January solstice for both HAS and LSA and for post-sunset during equinoxes at HSA, when it reaches deviations larger than 30%. Also significant are the deviations of the IRI prediction at low latitudes for day-time during LSA, overestimating the hmF2 by more than 30%, especially for noontime during the equinoxes. Similarly to the Northern Hemisphere, IRI predicts quite well the variation of hmF2 at mid-latitudes of the Southern

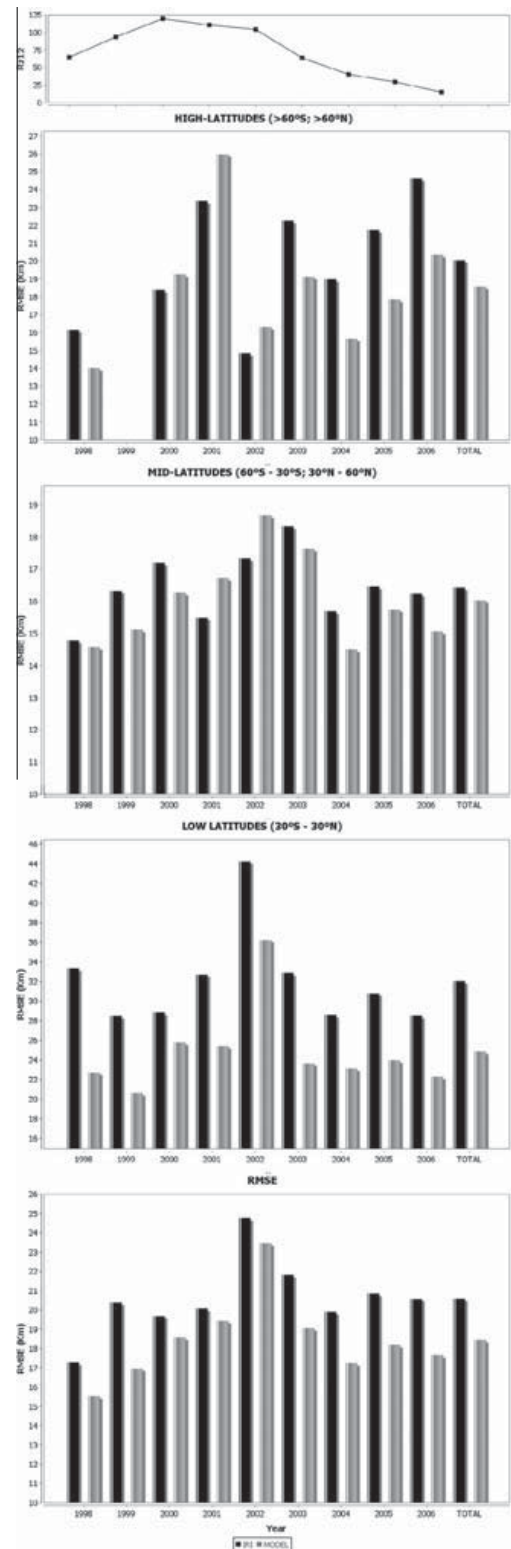


Fig. 8. Comparisons of the root mean square errors (RMSEs) produced by the IRI model and the SH model of hmF2 in relation to the experimentally observed values. The plots are arranged for different latitude ranges, high-, mid-, and low-latitudes respectively. The bottom plot compares the RMSE at global scale.

Hemisphere (i.e., GR13L), where IRI slightly overestimate hmF2 by 20% after sunset during summer and equinoxes of

HSA and the IRI predictions overestimate hmF2 for winter daytime and for summer and equinoxes night time at LSA, with deviations by 20%.

Fig. 7 shows that SH prediction of hmF2 deviates less compared with the IRI results (Fig. 6). Although we do not observe a significant improvement of the SH prediction compared to the IRI prediction at the mid-latitudes, we notice a slight improvement of the SH prediction at high latitudes of the Northern Hemisphere. However, we observe a significant improvement of the SH model of hmF2 compared to the IRI prediction at low-equatorial latitudes. The SH model reduces the underestimation of hmF2 for winter nighttime by the IRI from 40% to less than 20% and the SH model improves the overestimation of hmF2 for summer daytime at LSA by the IRI from 30% to 20% approximately.

We have computed the root mean squared error (RMSE) of the IRI hmF2 model in relation to the experimentally observed values and the RMSE of the SH model of hmF2 to evaluate quantitatively the goodness of these models. Fig. 8 compares the results the IRI-RMSE with the SH-RMSE predicting the hmF2. These results are shown for different ranges of modip latitudes and for the global range of latitudes. According to the RMSE we can assert that the SH model of hmF2 performs better than IRI does. The SH model of hmF2 improves the IRI

prediction by 25% in average at low latitudes and by 10% in average at high latitudes in terms of RMSE, while the improvement of the SH model of hmF2 compared to the IRI prediction for mid-latitudes is not significant (by 5%). This results confirm those of Magdaleno et al. (2011) who suggested that new models with larger number of terms compared to current IRI versions may improve the IRI prediction of the hmF2 which is well known to fail capturing the fine structures in the variations of hmF2 (e.g., Zhang et al., 2007).

As we did for the SH model of hmF2, we have computed the RMSE of the SH model of Hm to evaluate quantitatively the goodness of the model (Fig. 9). The results show SH model estimates Hm with an average RMSE of 8 km which means an average error of about 10–15% in relation to the experimental observations. The later results indicate a reasonable performance of the SH model of Hm. However, we cannot compare with other modeling because, to best of our knowledge, no such model has been done before.

4. Summary and concluding remarks

Many studies have analyzed and compared the experimental behavior of hmF2 with the IRI prediction, showing particular disagreements of the IRI prediction in relation

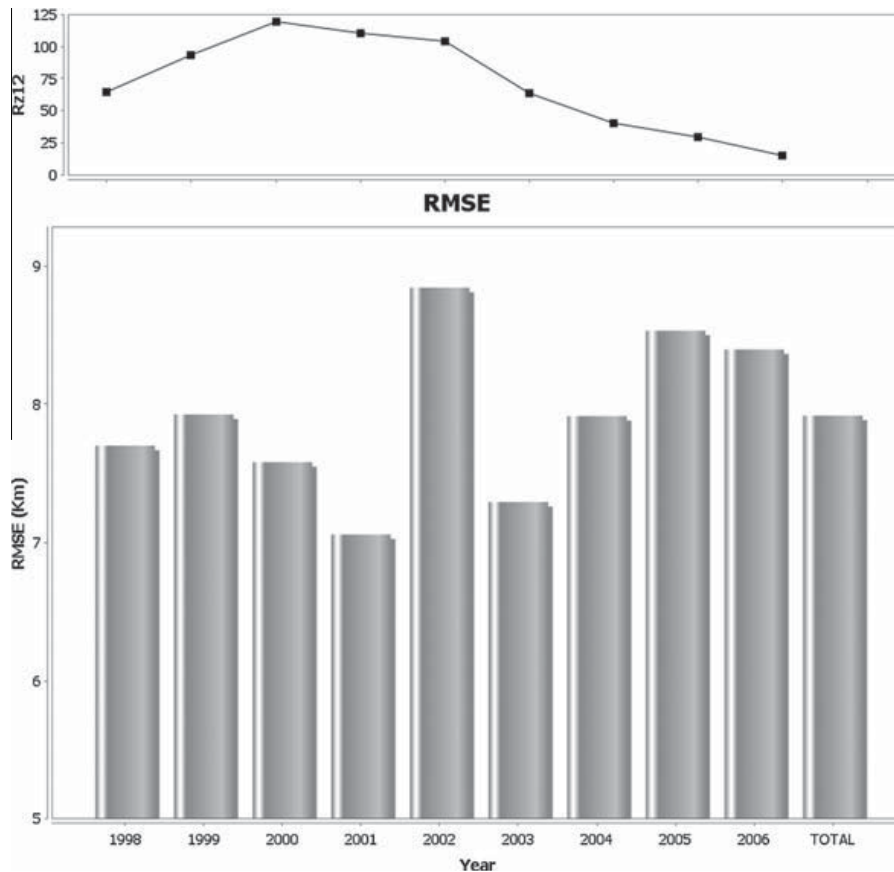


Fig. 9. Root mean square errors (RMSEs) produced by the SH model of Hm for different years.

to the observed hmF2. The IRI model certainly predicts the main behavior of the hmF2 quite well, especially at mid-latitudes. The IRI predictions for hmF2 compared to the experimental values deviate by about $\pm 10\text{--}15\%$ most of the time. However, the IRI prediction can report discrepancies as large as 40% at particular local time for high and low latitudes. The IRI is a non-auroral latitudes model because IRI is a data-driven empirical model and the high latitudes have poor data coverage, resulting less accurate prediction of the IRI at high latitudes (Bilitza and Reinisch, 2008). The main disagreements in the hmF2 prediction by IRI occur at low latitudes for pre sunrise and post sunset times when sharp increase of hmF2 is systematically observed. The post sunset increase relates with the pre-reversal enhancement (Farley et al., 1986) and the pre sunrise increase may relate to solar production occurring at higher altitudes (Lee et al., 2008). We should notice that IRI uses the CCIR model of the M(3000)F2 to estimate hmF2 (e.g., Bilitza, 1990) and it is well known that the CCIR model does not capture the fine structures in the variations of M(3000)F2 (e.g., Zhang et al., 2007) due to the limited number of terms used when developing the model (CCIR, 1991). Thus, we have dedicated efforts to build a new model of hmF2 increasing the number of terms to improve the current IRI prediction as suggested by Magdaleno et al. (2011).

Another important ionospheric magnitude for practical profiling applications is the scale height. Recent efforts for modeling the topside electron density profile go toward the α -Chapman formulation with varying scale height (e.g., Reinisch et al., 2007) and the effective scale height at the hmF2, Hm, may relate the topside with the bottomside formulation (Nsumei et al., 2010). Thus, one may estimate information of the topside by bottomside measurements and many efforts have been done to characterize the behavior of the Hm (e.g., Zhang et al., 2006; Nambala et al., 2008; Lee and Reinisch, 2007; Mosert et al., 2012) but neither an exhaustive analysis nor modeling at global scale have been done yet. We have presented also the analysis to the better knowledge and to the modeling of the quiet behavior of the Hm.

This work has analyzed the electron density profiles measured over 26 stations for the time interval 1998–2006 and obtained the average profiles to represent the quiet-time ionospheric conditions (Huang and Reinisch, 1996). The average profiles have furnished the experimental values of hmF2 and Hm to characterize the spatial–temporal variations and to feed the models of these magnitudes. We have applied the same methodology as explained in Altadill et al. (2009) for modeling purposes which is based on the spherical harmonic technique, SH, and obtained empirically two sets of Gauss coefficients to model analytically hmF2 and Hm by time dependent functions on a spherical surface (Eqs. (1) and (2)). The SH models of hmF2 and Hm have been parameterized according to their respective time–space pattern and whose coefficients depend of the solar activity – the yearly average of the sunspot number,

R_z12 , has been selected as proxy of the solar activity. The SH models of hmF2 and Hm consist of 610 and 430 coefficients respectively and the SH model of hmF2 is able to model finer structures compared to the current hmF2 model of the IRI.

The SH empirical model of hmF2 developed in this research has been tested against the IRI prediction by comparing with the experimental observation. We have shown that the SH model of hmF2 improves the IRI prediction by 25% in average at low latitudes and by 10% in average at high latitudes in terms of RMSE, while no significant improvement is observed for mid-latitudes, resulting an average improvement of about 10% at global scale. Particularly, the SH model captures the significant rising of the hmF2 after sunrise and the prominent post-sunset uplifting at low-latitudes whose small scale structure is not well modeled by the IRI. Therefore, we believe to be worthwhile considering the SH model of hmF2 as potential options into further IRI versions.

The experimentally time-spatial variations of Hm have been characterized at global scale, observing distinct daily variations whose amplitude is better expressed at low latitudes and being modulated by seasons and solar activity and modeled by SH technique. We have evaluated the goodness of the SH model of Hm in terms of RMSE resulting an average error of 8 km which means that the model deviates of about 10–15% in relation to the experimental observations in average. The later results indicate a reasonable performance of the SH model of Hm and potential usefulness for the ionospheric community.

Acknowledgments

This research has been supported by the Spanish Projects CTM2010-21312-C03-01 and 2009SGR507. One of the authors, S.M., thanks the Spanish National Institute for Aerospace Technology (INTA) for financial support. The authors wish to express their gratitude to the DIDB team and to the ionospheric stations contributing to it for making the data available, as well as to the IRI team for making the IRI model available.

References

- Adeniyi, J.O., Bilitza, D., Radicella, S.M., Willoughby, A.A. Equatorial F2-peak parameters in the IRI model. *Adv. Space. Res.* 31, 507–512, 2003.
- Altadill, D., Torta, J.M., Blanch, E. Proposal of new models of the bottom-side B0 and B1 parameters for IRI. *Adv. Space Res.* 43, 1825–1834, 2009.
- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.V. Storm: an empirical storm-time ionospheric correction model – 1. model description. *Radio Sci.* 37 (3), 1–12, 2002.
- Bilitza, D., The International Reference Ionosphere 1990. National Space Science Data Center, NSSDC/WDC-A-R&S Reports 90-22, Greenbelt, Maryland, November 1990.
- Bilitza, D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Sci.* 36 (2), 261–275, 2001.

- Bilitza, D. International Reference Ionosphere 2000—Examples of improvements and new features. *Adv. Space Res.* 31 (3), 757–767, 2003.
- Bilitza, D., Reinisch, B.W. International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* 42, 599–609, 2008.
- Bilitza, D., Sheikh, N.M., Eyfrig, R. A global model for the height of the F2-peak using M3000 values from the CCIR numerical map. *Telecommun. J.* 46, 549–553, 1979.
- Bilitza, D., McKinnell, L.-A., Reinisch, B., Fuller-Rowell, T. The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future. *J. Geod.* 85, 909–920, 2011.
- Blanch, E., Arrazola, D., Altadill, D., Buresova, D., Mosert, M. Improvement of IRI B0, B1 and D1 at mid-latitudes using MARP. *Adv. Space Res.* 39 (5), 701–710, 2007.
- Buonsanto, M.J., Starks, M.J., Titheridge, J.E., Richards, P.G., Miller, K.L. Comparison of techniques for derivation of neutral meridional winds from ionospheric data. *J. Geophys. Res.* 102, 14477–144484, 1997.
- CCIR. Atlas of ionospheric characteristics. Comité Consultatif International des Radiocommunications, Report 340–6, Int. Telecom. Union, Geneva, 1991.
- Ehinlafa, O.E., Falaiye, O.A., Adeniyi, J.O. Comparison of observed hmF2 and IRI 2007 model with M(3000)F2 estimation of hmF2 at low solar activity for an equatorial station. *Adv. Space Res.* 46, 89–93, 2010.
- Farley, D.T., Bonelli, E., Fejer, B.G. The pre-reversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. *J. Geophys. Res.* 91, 13723–13728, 1986.
- Fejer, B.G. The electrodynamics of the low-latitude ionosphere: recent results and future challenges. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 59, 1465–1482, 1997.
- Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.C., Wilkinson, P. Quantitative modeling of the ionospheric response to geomagnetic activity. *Ann. Geophys.* 18, 766–781, 2000.
- Galkin, I.A., Khmyrov, G.M., Kozlov, A., Reinisch, B.W., Huang, X., Kitrosser, D.F. Ionosonde networking, databasing and web serving. *Radio Sci.* 41, RS5S33, 2006.
- Gulyaeva, T.L. Linkage of the ionospheric peak electron density and height deduced from the topside sounding data. *Adv. Space Res.* 43, 1794–1799, 2009.
- Gulyaeva, T.L. Calibration of IRI–ITU-R peak density and height over the oceans with topside sounding data. *Adv. Space Res.* 45, 276–283, 2010.
- Gulyaeva, T.L., Bardley, P.A., Stanislawski, I., Juchnikowski, G. Towards a new reference model of hmF2 for IRI. *Adv. Space Res.* 42, 666–672, 2008.
- Huang, X., Reinisch, B.W. Vertical electron density profiles from digisonde ionograms. The average representative profile. *Ann. Geophys.* 39 (4), 751–756, 1996.
- Huang, X., Reinisch, B.W. Vertical electron content from ionograms in real time. *Radio Sci.* 22 (6), 335–342, 2001.
- Kutiev, I.S., Marinov, P.G., Watanabe, S. Model of topside ionosphere scale height based on topside sounder data. *Adv. Space Res.* 37, 943–950, 2006.
- Kutiev, I., Marinov, P., Belehaki, A., Reinisch, B., Jakowski, N. Reconstruction of topside density profile by using the topside sounder model profiler and digisonde data. *Adv. Space Res.* 43, 1683–1687, 2009.
- Lee, C.C., Reinisch, B.W. Quiet-condition variations in the scale height at the F2-layer peak at Jicamarca during solar minimum and maximum. *Ann. Geophys.* 25, 2541–2550, 2007.
- Lee, C.C., Reinisch, B.W., Su, S.-Y., Chen, W.S. Quiet-time variations of F2-layer parameters at Jicamarca and comparison with IRI-2001 during solar minimum. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 70, 184–192, 2008.
- Lei, J., Liu, L., Wan, W., Zhang, S.R., Holt, J.M. A statistical study of ionospheric profile parameters derived from Millstone Hill incoherent scatter radar measurements. *Geophys. Res. Lett.* 31, L14804, 2004.
- Liu, L., He, M., Wan, W., Zhang, M.-L. Topside ionospheric scale heights retrieved from Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate radio occultation measurements. *J. Geophys. Res.* 113, A10304, 2008.
- Magdaleno, S., Altadill, D., Herraiz, M., Blanch, E., de la Morena, B. Ionospheric peak height behavior for low, middle and high latitudes: A potential empirical model for quiet conditions – Comparison with IRI2007 model. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 73, 1810–1817, 2011.
- Mosert, M., Buresova, D., Ezquer, R., Mansilla, G. Behavior of the bottomside electron density profile over Pruhonice. *Adv. Space Res.* 34 (9), 1982–1989, 2004.
- Mosert, M., Buresova, D., Magdaleno, S., de la Morena, B., Altadill, D., Ezquer, R.G., Scidae, L. An analysis of the scale height at the F2-layer peak over three middle latitude stations in the European sector. *Earth Planets Space* 64, 493–503, 2012.
- Nambala, F.J., McKinnell, L.-A., Oyeyemi, E. Variations in the ionospheric scale height parameter at the F2 peak over Grahamstown, South Africa. *Adv. Space Res.* 42, 707–711, 2008.
- Nava, B., Coisson, P., Radicella, S.M. A new version of the Ne Quick ionosphere electron density model. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 70, 1856–1862, 2008.
- Nsumei, P.A., Reinisch, B.W., Huang, X., Bilitza, D. Comparing topside and bottomside-measured characteristics of the F2 layer peak. *Adv. Space Res.* 47, 974–983, 2010.
- Oyeyemi, E.O., McKinnell, L.A., Poole, A.W.V. Neural network-based prediction techniques for global modeling of M(3000)F2 ionospheric parameter. *Adv. Space Res.* 39 (5), 643–650, 2007.
- Oyeyemi, E.O., Adewale, A.O., Adeloye, A.B., Akala, A.O. Comparison between IRI-2001 predictions and observed measurements of hmF2 over three high latitude stations during different solar activity periods. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 72, 676–684, 2010.
- Parkinson, W.D. Introduction to Geomagnetism. Elsevier, Amsterdam, 1983.
- Ram, S., Tulasi, S.-Y., Su, C., Liu, H., Reinisch, B.W., McKinnell, L.-A. Topside ionospheric effective scale heights (HT) derived with ROC-SAT-1 and ground-based ionosonde observations at equatorial and mid-latitude stations. *J. Geophys. Res.* 114, A10309, 2009.
- Rawer, K. Propagation of decameter waves HF Band, in: Landmark, B. (Ed.), *Meteorological and Astronomical Influences on Radio Wave Propagation*. Academic Press, New York, pp. 221–250, 1963.
- Reinisch, B.W., Huang, X. Deducing topside profiles and total electron content from bottomside ionograms. *Adv. Space Res.* 27 (1), 23–30, 2004.
- Reinisch, B.W., Huang, X., Galkin, I.A., Paznukhov, V., Kozlov, A. Recent advances in real-time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 67, 1054–1062, 2005.
- Reinisch, B.W., Nsumei, P., Huang, X., Bilitza, D.K. Modeling the F2 topside and plasmasphere for IRI using IMAGE/RPI, and ISIS data. *Adv. Space Res.* 39, 731–738, 2007.
- Richmond, A.D. Ionospheric electrodynamics using magnetic apex coordinates. *J. Geomag. Geoelectr.* 47, 191–212, 1995.
- Rishbeth, H., Mendillo, M. Patterns of the F2-layer variability. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 63 (15), 1661–1680, 2001.
- Sethi, N.K., Mahajan, K.K. The bottomside parameters B0, B1 obtained from incoherent scatter measurements during a solar maximum and their comparisons with the IRI-2001 model. *Ann. Geophys.* 20 (6), 817–822, 2002.
- Sethi, N.K., Dabas, R.S., Sharma, K. Comparison between IRI predictions and digital ionosonde measurements of hmF2 at New Delhi during low and moderate solar activity. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 70, 756–763, 2008.
- Shimazaki, T. Worldwide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric F2 layer. *J. Radio Res. Lab. Jpn.* 2 (7), 85–97, 1955.
- Stankov, S., Stegen, K., Muhtarov, P., Warnant, R. Local ionospheric electron density profile reconstruction in real time from simultaneous

- ground-based GNSS and ionosonde measurements. *Adv. Space Res.* 47, 1172–1180, 2011.
- Zhang, M.L., Reinisch, B., Shi, J.K., Wu, S.Z., Wang, X. Diurnal and seasonal variation of the ionogram-derived scale height at the F2 peak. *Adv. Space Res.* 37, 967–971, 2006.
- Zhang, M.L., Shi, J.K., Wang, X., Shang, S.P., Wu, S.Z. Ionospheric behavior of the F2 peak parameters foF2 and hmF2 at Hainan and comparisons with IRI model predictions. *Adv. Space Res.* 39, 661–667, 2007.
- Zhang, M.-L., Wan, W., Liu, L., Shi, J.K. Variability of the behavior of the bottomside (B0, B1) parameters obtained from the ground-based ionograms at China's low latitude station. *Adv. Space Res.* 42, 695–702, 2008.
- Zhang, M.-L., Liu, C., Wan, W., Liu, L., Ning, B. A global model of the ionospheric F2 peak height based on EOF analysis. *Ann. Geophys.* 27, 3203–3212, 2009.

Capítulo 5

Análisis de burbujas ionosféricas

Como ya se ha indicado anteriormente (sección 2.2), la ionosfera ecuatorial es una región muy dinámica que se caracteriza por la existencia de la anomalía de ionización ecuatorial (EIA), mostrando un pico de densidad iónica localizado a 15-20° de latitud a ambos lados del ecuador magnético. La EIA se genera debido al efecto fuente, que consiste en el desplazamiento vertical del plasma ionosférico en el ecuador magnético, debido a los campos eléctricos y magnéticos, y a su posterior redistribución por las líneas de campo magnético hacia latitudes más altas (Figura 2-4). Después de la puesta del Sol, se registra un incremento de la altura del pico de densidad máxima en la capa F, $hmF2$, debido al campo eléctrico. Este incremento de la altura es conocido como PRE, fenómeno que genera las condiciones favorables para la aparición de la inestabilidad de RT. Esta inestabilidad y el drift vertical resultante de los campos eléctrico y magnético, $\vec{E} \times \vec{B}$, producen un intercambio de plasma entre la zona inferior de la ionosfera y la zona cercana al pico de densidad máxima, $NmF2$, que genera irregularidades en la densidad del plasma (Kelley, 1989; Fejer et al., 1999). Estas irregularidades, consisten en una zona con una densidad de plasma menor que la regional, se conocen como burbujas ionosféricas y tienen una extensión que varía entre varios metros y decenas de kilómetros. Estas disminuciones de plasma duran hasta varios cientos de minutos y presentan un movimiento horizontal hacia el Este cuyo rango de velocidades oscila entre 100 m/s y 200 m/s (Valladares et al., 2002).

El estudio de las burbujas ionosféricas ha aumentado exponencialmente en la última década debido a su interés físico y a su efecto en la transmisión de ondas electromagnéticas. Se han realizado varios trabajos centrándose en su distribución global y climatológica (Valladares et al., 2004; Gentile et al., 2006a; Cervera and Thomas, 2006; Nishioka et al., 2008) y en su dependencia con la meteorología espacial (Huang et al., 2001; Li et al., 2009).

Muchos de los estudios más recientes basados en datos de $sTEC$ (Portillo et al., 2008; Nishioka et al., 2008; Magdaleno et al., 2011, 2012), principal característica proporcionada por las observaciones GPS, han comparado sus resultados con datos de observaciones in situ (Burke et al., 2004; Gentile et al., 2006a, b), mostrando una fuerte correlación entre ambos. Por ello y gracias a su cobertura global, GPS se ha convertido en la principal fuente de información para el análisis de la presencia de $EPBs$ (*Equatorial Plasma Bubbles*).

Como se ha comentado al principio de esta sección, las disminuciones de plasma están relacionadas con la EIA. Para ver el efecto que produce una

burbuja ionosférica se ha seleccionado una estación IGS (*International GNSS Service*) localizada en la EIA, concretamente la estación de BAKO, localizada en Indonesia, perteneciente a la red global IGS. La Figura 5-1 representa el *sTEC* estimado en dicha estación el día 21 de Octubre del 2000 para el PRN 6. En ella se puede apreciar el efecto que produce una *EPB*, en forma de un descenso abrupto del *sTEC* debido a la disminución de la densidad electrónica respecto a la densidad regional.

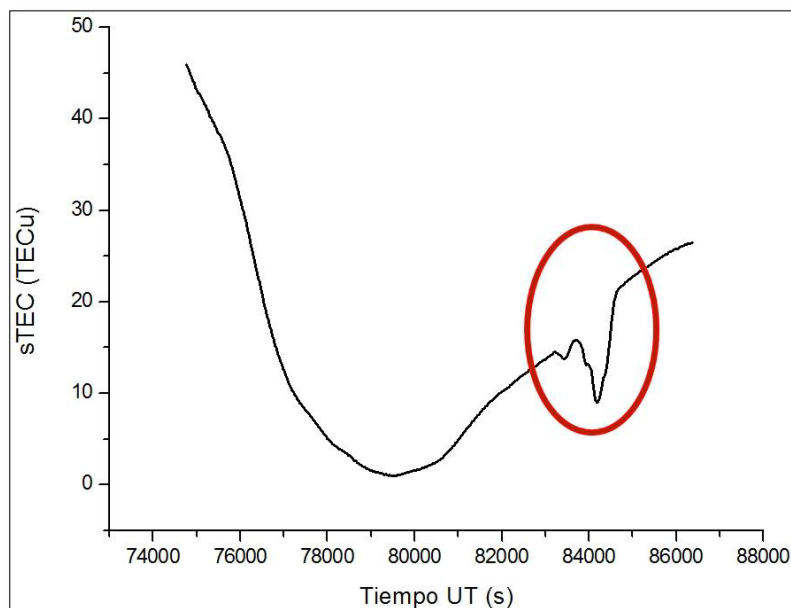


Figura 5-1: Representación de la evolución del *sTEC* calculada a partir de datos GPS frente al tiempo. Datos medidos en la estación BAKO (106.85° E, -6.49° N), DOY=295, año 2000, PRN=6.

El primer paper presentado en esta sección describe el diseño e implementación de una técnica que permite detectar *EPBs* de forma automática a partir de datos pre-procesados. De esta manera es posible analizar y caracterizar las *EPBs* y obtener información sobre cómo se forman estas irregularidades, su duración a lo largo de la línea de vista del satélite y el efecto máximo en el *sTEC*.

Los resultados del análisis y la caracterización de las *EPBs* se muestran en dos papers, los cuales se centran en el estudio de la ocurrencia, la profundidad y la duración de las mismas. El primero de estos artículos presenta los resultados obtenidos en la región de Sudamérica y el segundo proporciona un análisis a nivel global.

Los objetivos finales de esta investigación son:

1. disponer de una herramienta rápida que permita detectar y caracterizar las *EPBs*
2. así como proporcionar una caracterización global de la formación, duración y tamaño (diferencia de densidad) de las *EPBs*.

5.1. Detector de burbujas ionosféricas

A continuación se muestra el artículo realizado para automatizar la detección de anomalías ecuatoriales. Se ha diseñado una técnica que, a partir de los arcos de *sTEC* calculados en una estación, indica si alguna de las líneas de vista ha atravesado una *EPB* y proporciona información sobre el descenso de *TEC* debido al efecto de la *EPB*, la hora de inicio y final y la profundidad máxima de este descenso frente al valor esperado. Dicho valor esperado es simulado como una regresión lineal entre los valores de *TEC* al comienzo y al final de la burbuja. Esta técnica se basa en el análisis de las variaciones de la pendiente y la varianza de los valores del *sTEC*.

Esta técnica ha sido implementada en la aplicación Java Ionospheric Bubble Seeker (IBS) la cual permite, de forma sencilla, la configuración de los parámetros de detección (e.g. ángulo de elevación y tiempo de muestreo de los datos) así como el análisis masivo de datos, y proporciona resultados gráficos de cada análisis de detección y estadísticas globales del análisis por estación. Los valores de configuración del IBS se han estimado utilizando 5 años de datos obtenidos en cinco estaciones distribuidas a lo largo de la anomalía ecuatorial y bajo condiciones de actividad solar diferentes. Estos datos corresponden a medidas tomadas diariamente y, teniendo en cuenta que cada estación tiene en vista como mínimo 6 satélites, supone más de 50000 perfiles analizados.

Esta técnica y su implementación presentan una serie de ventajas frente a otros algoritmos existentes numeradas a continuación:

- Los parámetros del algoritmo son fácilmente modificables, permitiendo un mejor ajuste del mismo a las características de las *EBPs* de cada región.
- El algoritmo proporciona la profundidad y el tiempo que la *EPB* atraviesa la línea de vista. Estas características son muy

importantes para la predicción y el modelado del comportamiento de las *EPBs*.

- El algoritmo utiliza variaciones del *sTEC* época a época, para detectar la presencia de *EPBs*, mientras que otros algoritmos (e.g., Nishioka et al., 2008) utilizan la diferencia entre el ROTI diurno y el ROTI durante la puesta del Sol para determinar la actividad de *EPBs*, lo cual solo proporciona una medida diaria por *EPB* detectada.
- El tamaño de la ventana temporal no ha de ser muy grande, mientras otros algoritmos (e.g., Portillo et al., 2008) necesitan estimar la tendencia del *sTEC* para tomarla como referencia, lo que implica ventanas temporales muy grandes, aumentando los datos, al principio y al final de la pasada, que no son analizados.

La aplicación ha sido validada utilizando datos procedentes de diferentes estaciones situadas a diferentes rangos de longitud a lo largo de la anomalía ecuatorial. Los resultados han mostrado una clara dependencia diaria, indicando también una influencia de la estación del año, de la longitud y de la actividad solar. Estos resultados concuerdan con estudios previos obtenidos utilizando diferentes técnicas y medidas.

Ionospheric Bubble Seeker: A Java Application to Detect and Characterize Ionospheric Plasma Depletion From GPS Data

Sergio Magdaleno, Miguel Herraiz, and Sandro M. Radicella

Abstract—A new postprocessing technique has been developed to detect and characterize equatorial plasma bubbles (EPBs) from slant total electron content values calculated from GPS observations. The technique identifies an EPB when a slant total electron content depletion is detected. This technique is based on the analysis of the slope and the population variance variations of the slant total electron content values. The Ionospheric Bubble Seeker, based on the Java programming language, has been developed to implement this technique, allowing its use in all operating systems and on the Internet. Several thousands of slant total electron content profiles from different stations around the equatorial region have been analyzed to configure it. Different stations distributed worldwide have been analyzed to evaluate the robustness of the technique. The results reveal a clear daily dependence, showing the influence of the seasonal, longitudinal, and solar activity conditions. These results are compared with previous studies accomplished from different techniques and measurements and show clear agreements in the results.

Index Terms—Equatorial anomaly, ionosphere, plasma bubbles, slant total electron content (sTEC).

I. INTRODUCTION

THE equatorial and low-latitude ionosphere is a highly dynamic region, which is characterized by the existence of the equatorial ionization anomaly (EIA), shown as a peak in the ion densities located on either side of the magnetic equator at about $\pm 15^\circ$ – 20° latitude. The EIA is known to be created by the fountain effect, which consists of the uplift of plasma at the magnetic equator by eastward electric fields and subsequent redistribution along the magnetic field lines to higher latitudes. After sunset, an uplift of the F-layer by the eastward electric field, known as prereversal enhancement, creates favorable condition for the Rayleigh–Taylor (RT) instability. The RT

Manuscript received May 11, 2011; revised July 6, 2011; accepted September 11, 2011. Date of publication November 25, 2011; date of current version April 18, 2012. This work was supported in part by the National Institute of Aerospace Technology (INTA) and in part by the Spanish Project BSCH-UCM2011-910596.

S. Magdaleno is with the Atmospheric Sounding Station El Arenosillo, National Institute of Aerospace Technology (INTA), E21130 Huelva, Spain, and also with the Department of Geophysics and Meteorology, Complutense University of Madrid (UCM), 28040 Madrid, Spain (e-mail: smactor@gmail.com).

M. Herraiz is with the Department of Geophysics and Meteorology, Complutense University of Madrid (UCM), 28040 Madrid, Spain, and also with the Institute of Geosciences, UCM–Spanish National Research Council (CSIC), 28040 Madrid, Spain (e-mail: mherraiz@fis.ucm.es).

S. M. Radicella is with the Aeronomy and Radiopropagation Laboratory, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 34014 Trieste, Italy (e-mail: rsandro@ictp.it).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TGRS.2011.2168965

and $E \times B$ instabilities produce interchanges between bottom-side plasma and the plasma near and above the peak of the F-layer, causing irregular plasma density depletions [1], [2]. These depleted plasma regions, with scale sizes of meters to kilometers, are known as equatorial plasma bubbles (EPBs).

Observational data, such as radar measurements [3], [4], ground-based observatories [5], [6], *in situ* measurements by satellites [7]–[10], and GPS dual-frequency observations [11], [12], have been used to characterize the occurrence of EPBs.

EPBs are related to signal scintillation that is the main source of errors for satellite signals used for transionospheric telecommunications and navigation. These errors cause receiver failures and degradation of satellite positioning and are a concern for safety of life navigation, such as civil air traffic.

In this paper, we want to introduce both a technique to detect and characterize depletions and the Java program which applies this technique. The Ionospheric Bubble Seeker (IBS) provides a characterization of the depletion in time, depth, and spatial positioning based on GPS data. The slant total electron content (sTEC), defined as the integral of the electron density along the line from the satellite to the receiver, is the main ionospheric parameter retrieved from GPS observations [13].

II. IBS TECHNIQUE

A postprocessing technique based on the analysis of the variations of the sTEC along the arc of each satellite [pseudorandom noise (PRN)] has been developed to detect the existence of a bubble by identifying significant sTEC depletions. The technique identifies an EPB when an sTEC depletion is located on the difference curve (original series minus calculated profile) and satisfies some requirements introduced by the users.

To calculate the sTEC values, instrumental and measured errors depend on the number of observations and decrease with increasing this number. Consider that a minimum length for the arcs of 5430 s has been established and only a gap of data lower than 900 s is permitted, to avoid small arcs which calibration cannot be guaranteed.

The technique is based on the variations of the slope of the sTEC values calculated. The slope of each point between one point and the next one is calculated dividing the difference of sTEC values by the difference of time. The slope of the data should be smooth due to the small variations of the sTEC during the time that the PRN is observed from the station. EPBs are shown in the sTEC by great variations in the slope differences that show a discontinuity of the electron density. A slope threshold (SLT) has been used to estimate if the value of

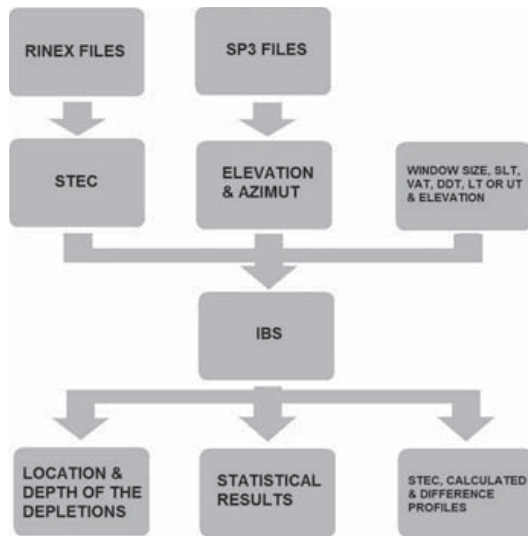


Fig. 1. Schema of the IBS flow diagram.

the slope is low or, on the contrary, a depletion has started. Over 150 000 *s*TEC profiles have been analyzed to estimate the SLT that we have selected as default to detect the depletions.

As we have considered that the data profile must be smooth, the variations of the slope should also be smooth. To satisfy this condition, the population variance (σ^2) has been calculated to study the variations of the slope

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (1)$$

where

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)$$

and N is the number of values selected by the moving window used to calculate the population variance of the data. The value of the variance is assigned to the value placed in the middle of the moving window ($N/2$). A variance threshold (VAT) has been also defined, and a default value has been calculated to detect the depletions.

Data values must satisfy the SLT and the VAT conditions in order to be included in the calculated profile. To complete the profile, a linear fitting has been calculated to obtain the values during each gap of data using their extreme values. As the value of the variance is calculated for a data window, some values can be considered as depletions. To avoid this, data values with a higher value than the one calculated in the linear fit are added to the calculated profile. With these added points, the profile is calculated by using a linear fitting to complete it.

The difference between the data and the profile obtained is calculated, and it will be used to detect and characterize the depletions. A new parameter, i.e., the depth depletion threshold (DDT), expressed in total electron content units (TECUs), is defined to select the minimum depth that a depletion has to reach to be considered as an EPB. This parameter is configurable by the user and will be explained in the configuration section.

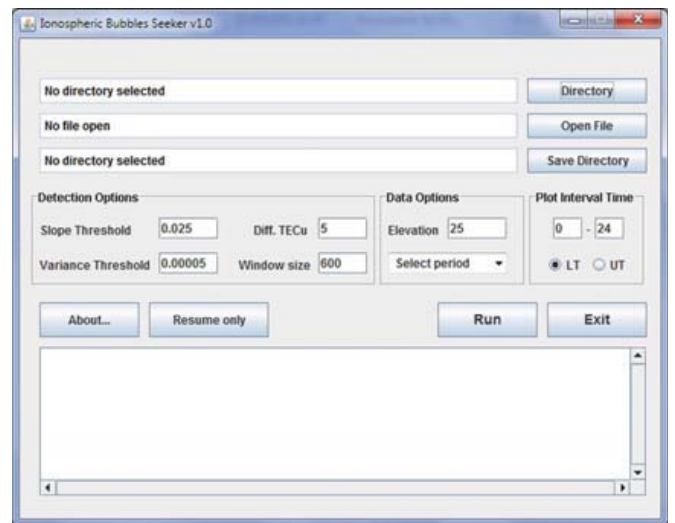


Fig. 2. IBS interactive window. Top panel is to introduce the input file or folder and the output folder. The configuration options and buttons are located in the middle panel. Analysis status is in the bottom panel.

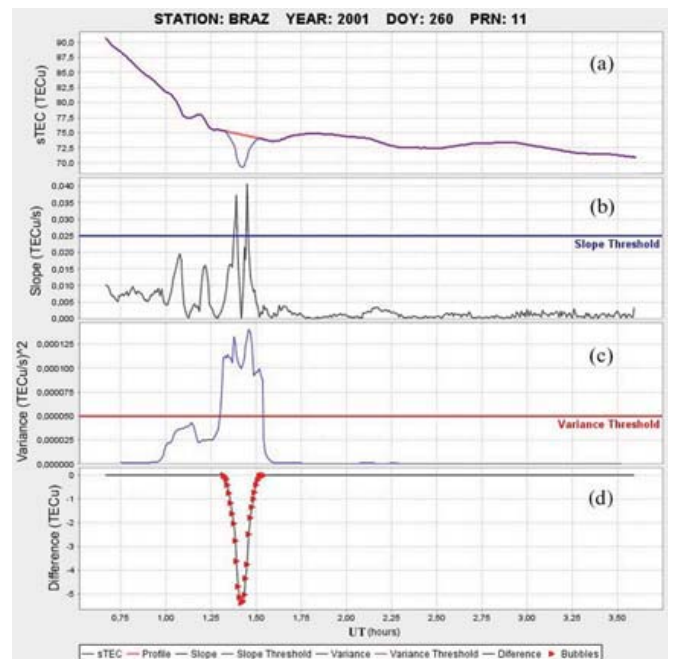


Fig. 3. Output picture file for a *s*TEC arc from BRAZ station (DOY 260, year 2001).

III. IBS APPLICATION

The IBS program has been developed in Java programming language (www.java.com), allowing its use in all operating systems (Windows, Linux, and Mac) and, also, its integration into the frame of a Web page. The external Java chart library JFreeChart (<http://www.jfree.org/jfreechart/>) has been used to plot the results and create the picture files. A main screen has been created to facilitate the interaction between the users. The technique and a schema of the processes are shown in Fig. 1.

A jar file has been created to facilitate its use. The application and the GPS_stations.list file have to be in the same folder. The GPS_stations.list file contains the information of the GPS stations with its code, city, location, geographical longitude and

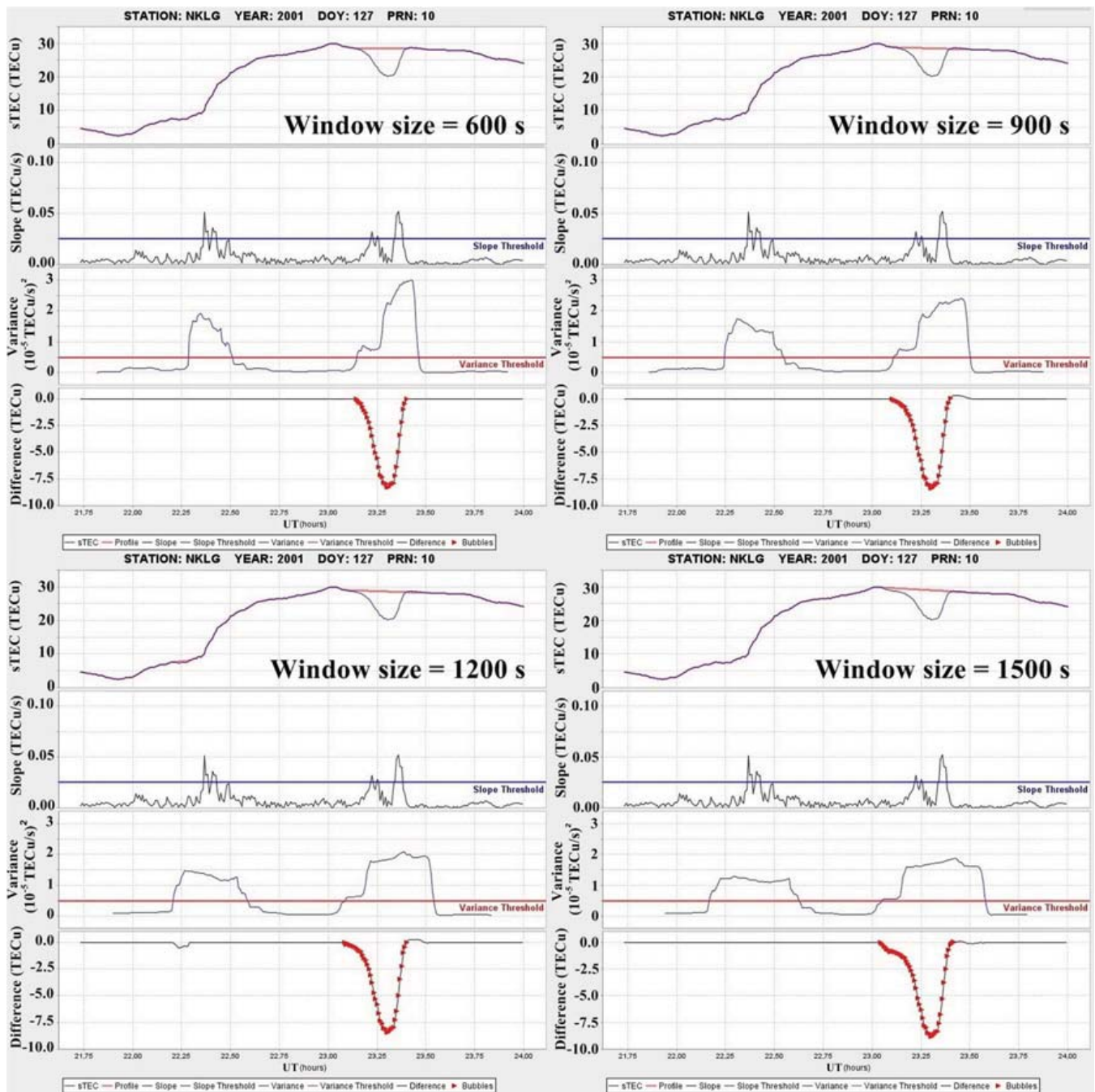


Fig. 4. Results obtained for different window sizes: 600 s (top-left), 900 s (top-right), 1200 s (bottom-left) and 1500 s (bottom-right).

latitude, height, agency, and type of clock. This file can be edited by users to add or change station information. To execute the application, users only need to execute the jar file, and the interactive window will appear (Fig. 2).

A. Inputs

The main screen presents two options to input the data: with either one file or one folder with some files. The name of the input file must follow the structure AAAA9990.YYX, where AAAA is the code of the GPS station, 999 the day of year, YY the year, and X a character which defines the type of the file. IBS analyzes data for one year each time. Files have to be American Standard Code for Information Interchange

(ASCII) files, and the data must be structured as follows: time (in seconds), PRN, elevation (in degrees), azimuth (in degrees), and sTEC (in TECUs). Each value must be separated by one space and without semicolons. Data must be ordered by PRN, and each PRN must be ordered by time. These conditions are the same for both options. If the option selected is to use a folder, users must be sure that the folder only contains data to analyze and no other folders or files.

B. Configuration

The IBS program presents some easy configurable parameters to detect the depletions in the main screen. As we have

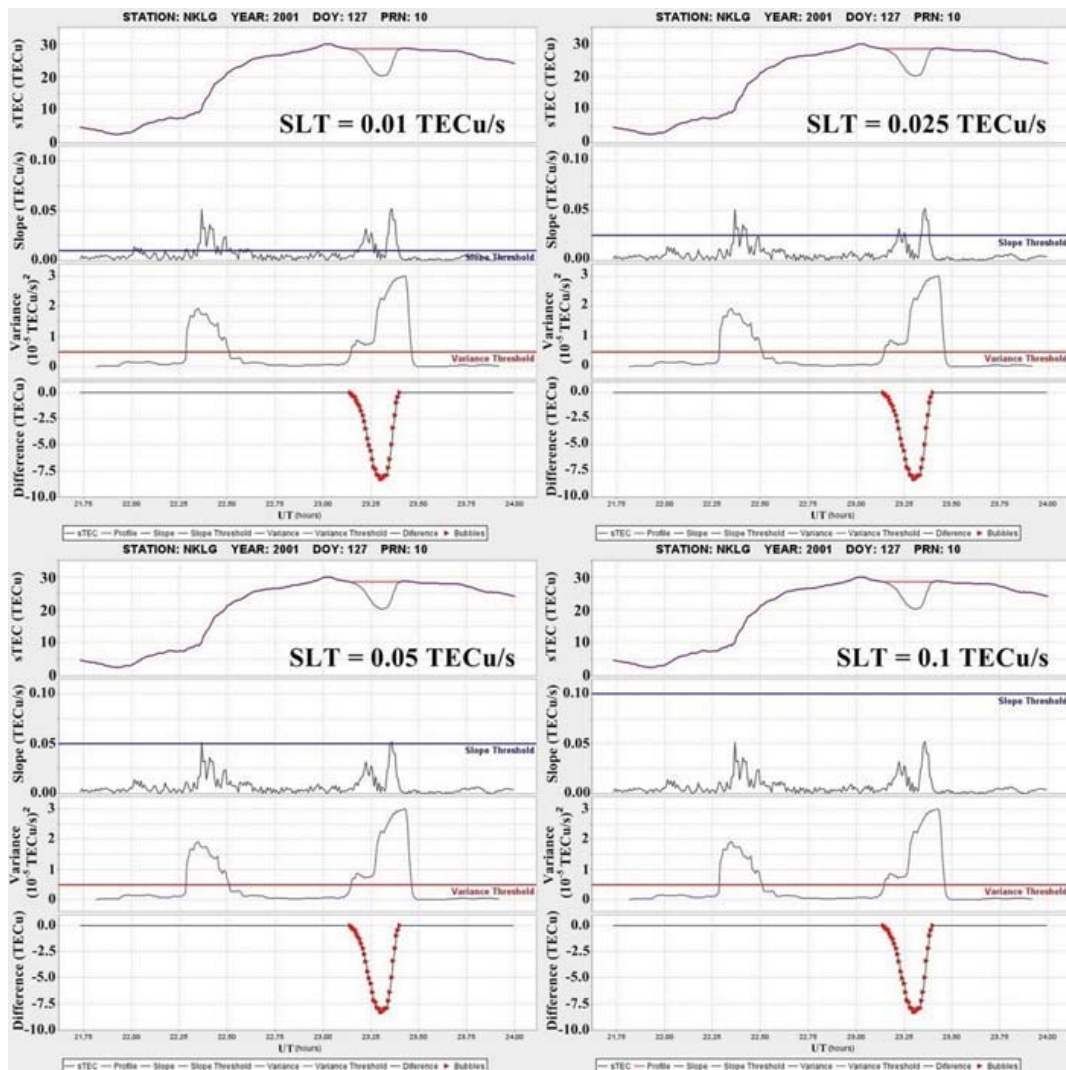


Fig. 5. Results obtained for different SLT: 0.01 TECu/s (top-left), 0.025 TECu/s (top-right), 0.05 TECu/s (bottom-left) and 0.1 TECu/s (bottom-right).

explained before, the window size, the DDT, the SLT, and the VAT are the most important parameters for the detection and characterization of the depletions. All these parameters are configurable by the users on the interactive window.

An example of one output picture file is shown in Fig. 3. The sTEC profile (blue line) and the calculated profile (red line) are represented against time in panel (a). In panel (b), the slope values (black line) and the SLT selected values (blue line) are shown. Panel (c) represents the variance values calculated (blue line) and the VAT selected value (red line). The difference curve and the values of the depletion considered are represented in panel (d) with the black line and the red dots, respectively.

To analyze the effects that produce each parameter, some analyses are shown. Fig. 4 shows the variation of the calculated profile for different window sizes. The influence of the window size is only noted in the variance, showing that the dispersion of the variance values increases with the increasing of the window size values. A default value of 600 s has been selected for the window size.

The variations in the calculated profile produced by different SLT values and VAT values are shown in Figs. 5 and 6, respectively. These parameters, as the DDT parameter, are only aimed

to determinate when a depletion can be considered as a significant event. The dependence of the sTEC values calculated by the users on the slope values makes necessary to include these parameters as configurable ones. To calculate the threshold values, four International GNSS Service (IGS) stations (NKLK, BAKO, GUAM, and BRAZ) have been chosen. These stations are located worldwide close to the magnetic equator. The analysis consisted in the study of the slope values from arcs with depletions and arcs without depletions. Although it is not shown here, higher slope values were found for low-elevation angles (less than 25°) than for high-elevation angles (more than 25°). It was also observed that the slope values from arcs with no depletions were less than 0.025 TECU/s. So, considering that and testing it with 15 000 days of data from other stations located at equatorial and low latitudes during different solar activity conditions, default values of 0.025 TECU/s for the SLT and $5 \cdot 10^{-5}$ (TECU/s)² for the VAT have been selected.

The geometry between the GPS satellite and the receiver plays an important role in the sTEC values. At low elevations, the horizontal and vertical ionospheric structure is quite complex [14]. This complexity generates important errors and variations in the sTEC values. An elevation angle option has

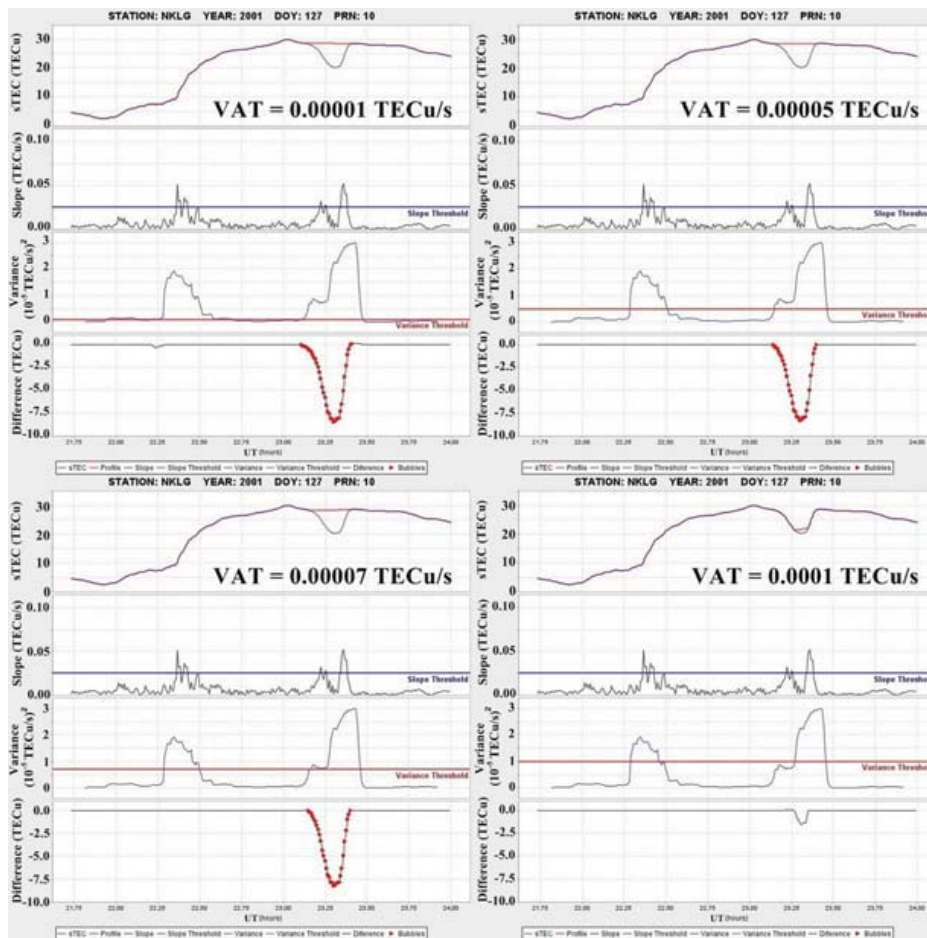


Fig. 6. Results obtained for different VAT: 0.00001 (TECu/s)² (top-left), 0.00005 (TECu/s)² (top-right), 0.00007 (TECu/s)² (bottom-left) and 0.0001 (TECu/s)² (bottom-right).

been added to the program as a configurable value to eliminate the low-elevation values from the analysis. An elevation mask of 25° has been established as the default value.

Local Time (LT) and Universal Time (UT) are introduced in the configuration options for the results. A file with the coordinates of all the IGS stations is implemented by the program to localize the stations and calculate the satellite tracks. The geographical longitude *Lon* is used to calculate an approximated LT as follows:

$$LT = \begin{cases} UT + Lon/15, & \text{if } 0 \leq Lon \leq 180 \\ UT - Lon/15, & \text{if } 180 \leq Lon \leq 360. \end{cases}$$

An optional time interval can be selected to represent the arcs and the depletions detected at this interval in function of longitude and latitude.

C. Outputs

The IBS program will generate five folders in the one selected by the user to save the result. These folders include all the information about the characteristics of the depletion found and the arcs where a depletion has been detected. The sTEC values, calculated profile, and the difference between both are saved as a picture.

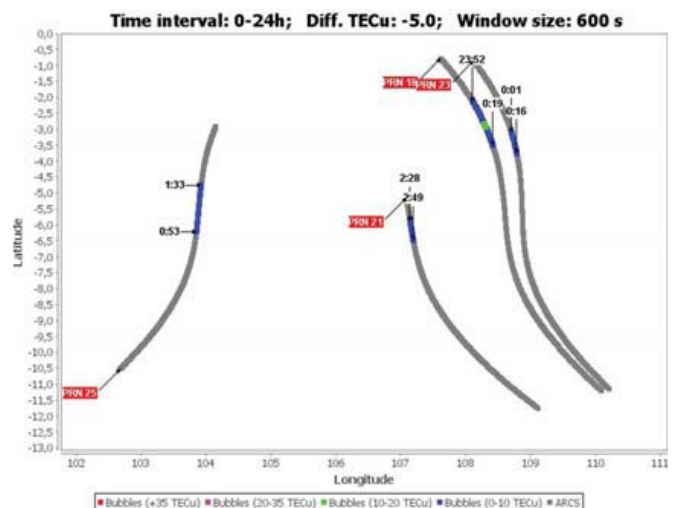


Fig. 7. Map of the satellite tracks and the depth of the depletions detected represented by the ipps from BAKO station (DOY=75, YEAR=2001). The satellite PRN and the starting and finishing times of the depletion in local time are also shown.

Satellite tracks and depletions information are also saved as a picture (Fig. 7). The satellite track is represented by the ionospheric pierce point (ipp), defined as the intersection between the satellite–station ray and the ionosphere considered as a thin

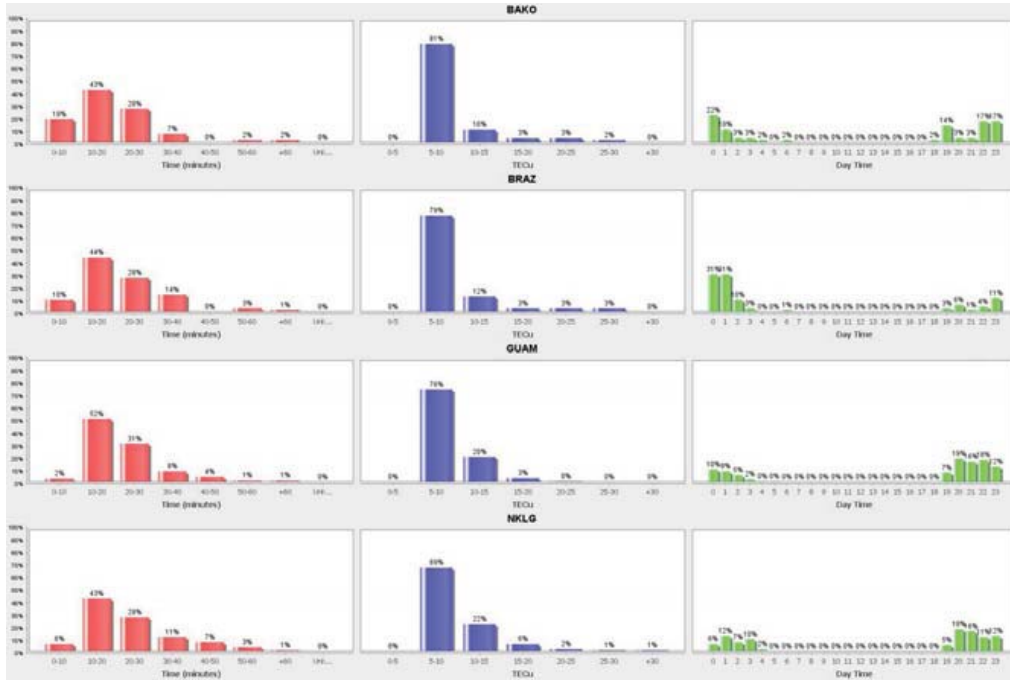


Fig. 8. Statistical results obtained from the analysis of, from top to bottom, BAKO, BRAZ, GUAM and NKLG for HSA conditions (in year 2001).

shell model at 350-km altitude. The expressions to calculate the ipp for the satellite track and the bubbles encountered are

$$\phi_{\text{iono}} = \arcsin(\sin \phi_{\text{St}} \cos \xi + \cos \phi_{\text{St}} \sin \xi \cos \varphi_{\text{Sat}})$$

$$\lambda_{\text{iono}} = \lambda_{\text{St}} + \arcsin\left(\frac{\sin \xi \sin \varphi_{\text{Sat}}}{\cos \phi_{\text{iono}}}\right)$$

where ϕ_{St} and λ_{St} are the station latitude and longitude, respectively, ϕ_{iono} and λ_{iono} are the ipp latitude and longitude, respectively, φ_{Sat} is the satellite azimuth angle, and ξ is the angle defined as

$$\xi = \frac{\pi}{2} - z_{\text{Sat}} - \arcsin\left(\frac{R_0}{R_0 + h_{\text{iono}}} \cos z_{\text{Sat}}\right)$$

where z_{Sat} is the satellite elevation angle, R_0 is the nominal Earth radius (6370 km), and h_{iono} is the ionosphere height for the modeled ionosphere.

An ASCII file is generated with the information of all the depletions detected and the configurable options selected. This information is used to calculate the statistics results plotted in the statistics folder which includes the rates of the duration of the depletion, the maximum depth (MD), and the depletion starting time (T_0). They are represented in different ranges for each station.

A summary picture with the rate of days analyzed with depletions, the number of depletions, the number of days analyzed, and the rate of depletions which are capable of producing “loss of lock” for each station analyzed is generated. Possible loss of lock (PLOL) has been considered when a depletion has a gap of data greater than 2 min.

IV. DATA

The data selected to test the IBS program have been obtained from the IGS and consist of Receiver INdependent Exchange (RINEX) files that are available at the Crustal

Dynamics Data Information System (CDDIS) data center (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov>). Four stations from different geographical longitudes have been chosen: NKLG (0.3° N, 9.7° E—African sector), BAKO (6.5° S, 106.9° E—Asian sector), GUAM (13.6° N, 144.9° E—Pacific sector), and BRAZ (15.9° S, 312.1° E—American sector). Two different years have been selected to cover different solar activity conditions: 2001 for high solar activity (HSA) and 2005 for moderate-low solar activity (LSA).

The sTEC is determined by comparing the signals received from the two GPS dual-frequency transmissions on L1 (1.57542 GHz) and L2 (1.22760 GHz). Dual-frequency carrier-phase and code-delay GPS observations have been combined to obtain an ionospheric observable related to the sTEC [15]. The technique developed in [16] has been used in this paper to calculate the sTEC values derived from the RINEX files. The elevation and azimuth of each satellite have been calculated from the IGS orbit files, SP3. These files are also available at the CDDIS data center.

V. RESULTS

The default configuration of the IBS has been used to analyze the data. The statistical results obtained from the analysis of each station for the HSA are shown in Fig. 8. From top to bottom, BAKO, BRAZ, GUAM, and NKLG stations are represented. The rate of the duration of the depletions is represented at the left. This value is plotted with intervals of 10 min or an “unknown” value if the ending time of the depletion has not been estimated.

The rate of the MD is represented at the middle of the picture. Intervals of 5 TECUs have been used for its representation. A configuration value of 7 TECUs has been used for the MD, so it was expected that no depletions were detected for the 0–5-TECU range.

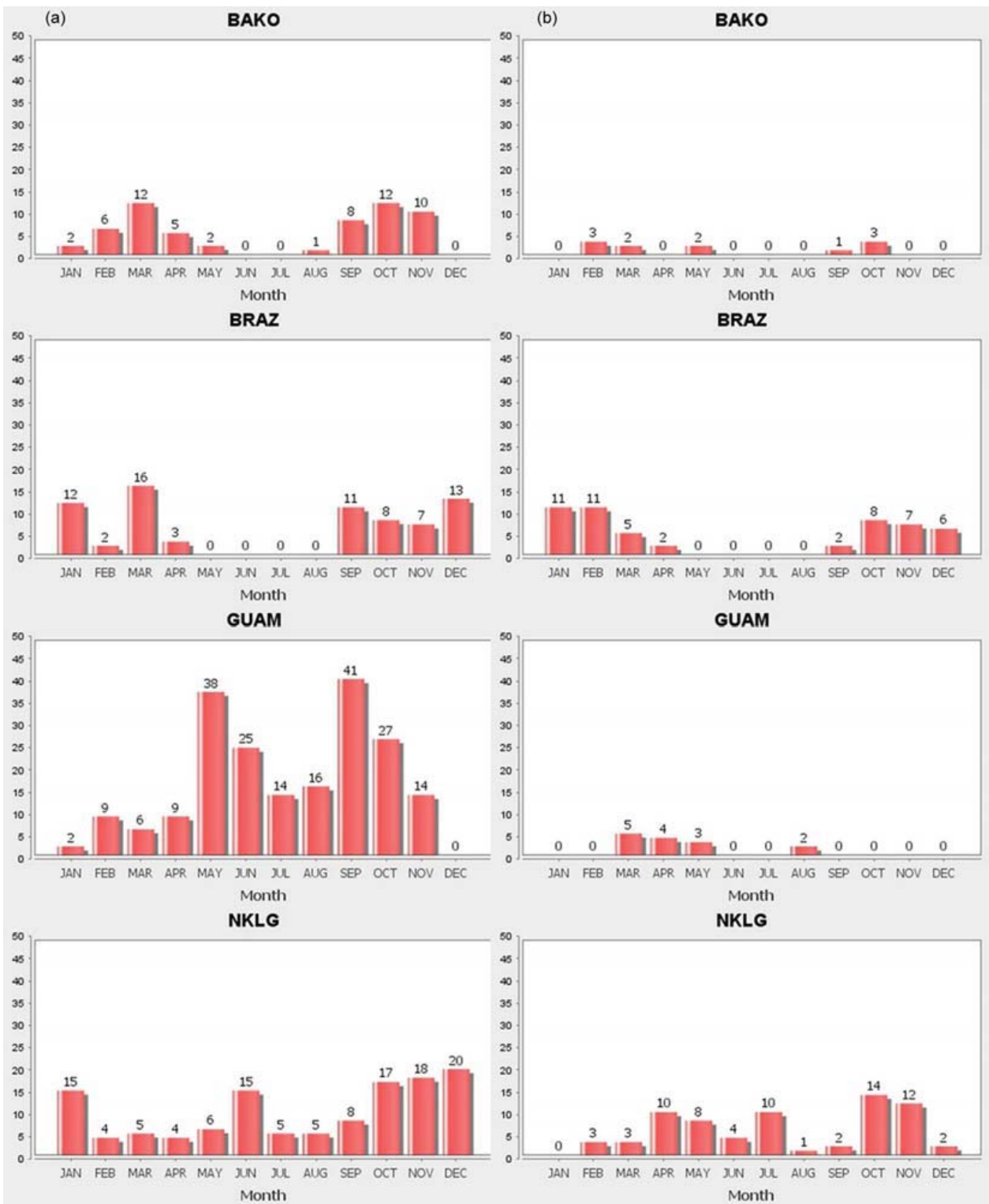


Fig. 9. Number of depletions detected each month, from top to bottom, BAKO, BRAZ, GUAM and NKLK for (a) HSA conditions (in year 2001) and (b) LSA conditions (in year 2005).

The rate of the starting time of the depletions is represented at the right of the picture. This hourly distribution confirms that the depletions occur from the post sunset to the early hours of the day [17].

The monthly distribution of the number of depletions for the HSA (year 2001) is shown in Fig. 9(a). A different seasonal distribution can be observed for each station. The Asian sector

station shows a maximum value of depletions detected during equinoxes and a minimum value, or zero, during the solstices. The American sector station presents a similar behavior, with a clear maximum in December and January and a minimum from May to August. On the other hand, the seasonal distribution of the depletions from the African station presents a different behavior. Depletions have been detected during all the months,

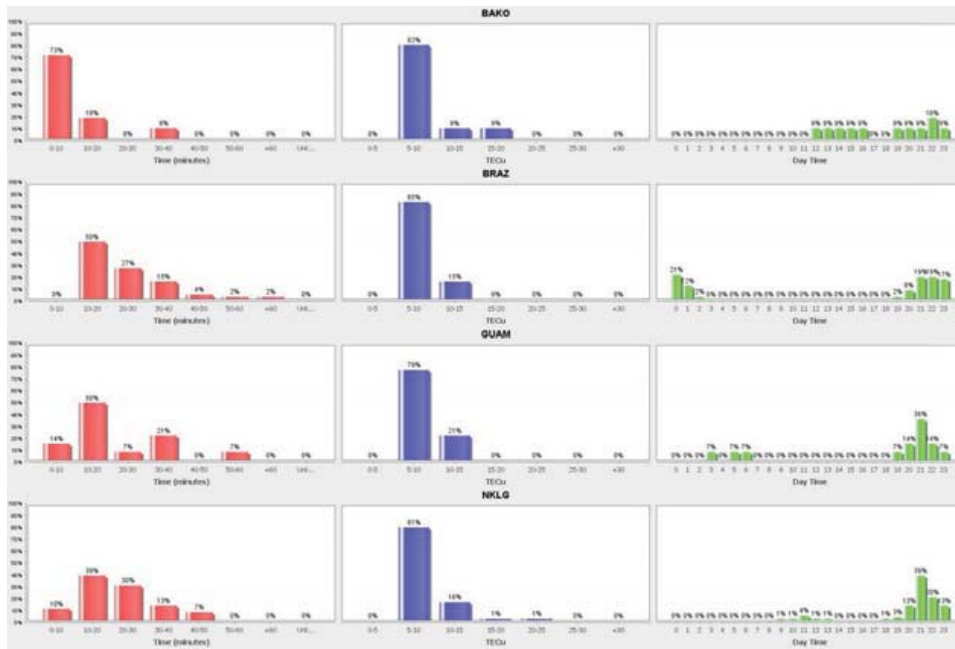


Fig. 10. Same as Figs. 8 for LSA conditions (in year 2005).

and the maximum values have been reached during Northern Hemisphere winter period. These results agree with previous studies as in [8]–[10].

Results for the LSA (year 2005) are shown in 9(b) and Figs. 10. There is a strong correlation between the depletion characteristics and solar activity. Fig. 10 shows a decrease in the MD and in the duration of the depletions compared with Fig. 8 previously commented. A clear decrease of the number of depletions detected each month is also noted in Fig. 9(b) as in [18].

The summary pictures for HSA (left) and LSA (right) are shown in the Fig. 11. These pictures show the rate of the days in which a depletion has been detected. It is observed that the value of this rate is higher during HSA conditions. The number of depletions detected is also shown. A clear decrease of 40%–80% between HSA and LSA conditions in the number of depletions can be observed. The number of days analyzed indicates that the values of the number of depletions can be compared as in [8]–[10] and [17]. Finally, the rate of “PLOW” is shown for all the stations.

VI. CONCLUSION

A new postprocessing technique to detect and characterize depletions from sTEC values has been developed. The technique is based on the expected smooth variations of the slope of the sTEC values during a long arc. These values must present a small variation, so the population variance is used to confirm it. An SLT and a VAT have been introduced to detect a depletion. A Java application has been created to implement it and to facilitate its use. Some configurable parameters, such as the SLT, the VAT, etc., have been introduced in the application to avoid undesired detection, e.g., small variations in the sTEC, errors due to the elevation angle, etc. Different configurations are shown to compare the results and to validate the default configuration. RINEX files from BAKO, BRAZ, GUAM, and

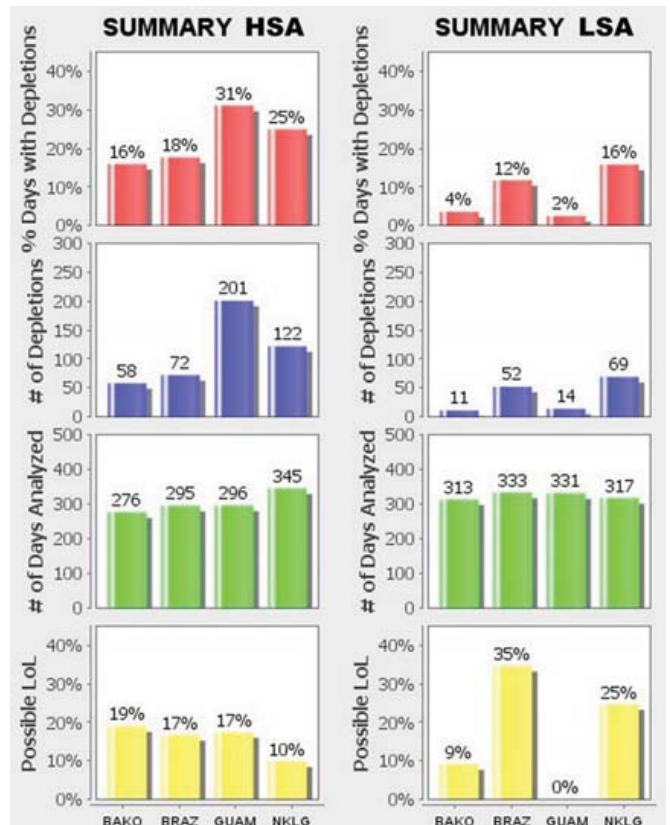


Fig. 11. Statistical results for all the stations for HSA (right) and LSA (left).

NKLG stations for moderately low and high solar conditions have been analyzed to test this technique. sTEC values, elevation, and azimuth have been calculated using the technique in [16]. Data have been analyzed by the IBS using the default configuration. The results obtained by the IBS show a clear dependence on the formation of the EPBs during nighttime

and early hours. The seasonal behavior calculated by the IBS clearly depends on the EPB formation, reaching the maximum values of EPBs during equinoxes. A longitudinal dependence on the seasonal behavior can also be shown. These behaviors given by the IBS were compared to previous studies, showing similar behaviors. Dependence on solar activity conditions and the number of EPBs has been shown. These results obtained by the IBS program are in complete agreement with the results shown in previous studies using different techniques. The IBS application is available at <http://gnss.fis.ucm.es>.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Dr. C. Brunini for his help and wish to express their gratitude to the International GNSS Service and the Crustal Dynamics Data Information System data center for making the data available.

REFERENCES

- [1] M. C. Kelley, *The Earth's Ionosphere, Plasma Physics and Electrodynamics*. San Diego, CA: Academic, 1989.
- [2] B. G. Fejer, L. Scherliess, and E. R. de Paula, "Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F," *J. Geophys. Res.*, vol. 104, no. A9, pp. 19 859–19 869, 1999.
- [3] D. Hysell, M. Larsen, C. Swenson, A. Barjatya, T. Wheeler, T. Bullett, M. Sarango, and R. Woodman, "Rocket and radar investigation of background electrodynamic and bottom-type scattering layers at the onset of equatorial spread F," *Ann. Geophys.*, vol. 24, no. 5, pp. 1387–1400, 2006.
- [4] T. Yokoyama and S. Fukao, "Upwelling backscatter plumes in growth phase of equatorial spread F observed with the Equatorial Atmosphere Radar," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, p. L08 104, Apr. 2006, doi: 10.1029/2006GL025680.
- [5] Y. Sahai, J. R. Abalde, P. R. Fagundes, V. G. Pillat, and J. A. Bittencourt, "First observations of detached equatorial ionospheric plasma depletions using OI 630.0 nm and OI 777.4 nm emissions nightglow imaging," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, p. L11 104, Jun. 2006, doi: 10.1029/2005GL025262.
- [6] J. J. Makela and E. S. Miller, "Optical observations of the growth and day-to-day variability of equatorial plasma bubbles," *J. Geophys. Res.*, vol. 113, p. A03 307, Mar. 2008, doi: 10.1029/2007JA012661.
- [7] W. J. Burke, L. C. Gentile, C. Y. Huang, C. E. Valladares, and S. Y. Su, "Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1," *J. Geophys. Res.*, vol. 109, p. A12 301, Dec. 2004, doi: 10.1029/2004JA010583.
- [8] L. C. Gentile, W. J. Burke, and F. J. Rich, "A global climatology for equatorial plasma bubbles in the topside ionosphere," *Ann. Geophys.*, vol. 24, pp. 163–172, 2006.
- [9] L. C. Gentile, W. J. Burke, and F. J. Rich, "A climatology of equatorial plasma bubbles from DMSP 1989–2004," *Radio Sci.*, vol. 41, p. RSS521, Apr. 2006, doi: 10.1029/2005RS003340.
- [10] C. Xiong, J. Park, H. Lühr, C. Stolle, and S. Y. Ma, "Comparing plasma bubble occurrence rates at CHAMP and GRACE altitudes during high and low solar activity," *Ann. Geophys.*, vol. 28, no. 9, pp. 1647–1658, 2010.
- [11] E. R. de Paula, F. S. Rodrigues, K. N. Iyer, I. J. Kantor, M. A. Abdu, P. M. Kintner, B. M. Ledvina, and H. Kil, "Equatorial anomaly effects on GPS scintillations in Brazil," *Adv. Space Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 749–754, 2003.
- [12] A. Portillo, M. Herraiz, S. M. Radicella, and L. Ciralo, "Equatorial plasma bubbles studied using African slant total electron content observations," *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, vol. 70, no. 6, pp. 907–917, Apr. 2008.
- [13] K. Davies and G. K. Hartmann, "Studying the ionosphere with the global positioning system," *Radio Sci.*, vol. 32, no. 4, pp. 1695–1703, 1997.
- [14] J. A. Vladimer, M. C. Lee, P. H. Doherty, D. T. Decker, and D. N. Anderson, "Comparisons of Topex and Global Positioning System total electron-content measurements at equatorial anomaly latitudes," *Radio Sci.*, vol. 32, no. 6, pp. 2209–2220, 1997.
- [15] L. Ciralo, F. Azpilicueta, C. Brunini, A. Meza, and S. M. Radicella, "Calibration errors on experimental slant total electron content determined with GPS," *J. Geodesy*, vol. 81, no. 2, pp. 111–120, Feb. 2007.
- [16] C. Brunini and F. Azpilicueta, "Accuracy assessment of the GPS-based slant total electron content (STEC)," *J. Geodesy*, vol. 83, no. 8, pp. 773–785, Aug. 2009.
- [17] R. T. Tsunoda, "Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated E region pedersen conductivity," *J. Geophys. Res.*, vol. 90, no. A1, pp. 447–456, 1985.
- [18] M. Nishioka, A. Saito, and T. Tsugawa, "Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks," *J. Geophys. Res.*, vol. 113, p. A05 301, May 2008, doi: 10.1029/2007JA012605.



Sergio Magdaleno was born in Madrid, Spain, on November 25, 1980. He received the B.S. degree in physics and geophysics from the Complutense University of Madrid, Madrid, in 2007 and the M.S. degree from the University of Huelva, Huelva, Spain, in 2009. He is currently working toward the Ph.D. degree at the Complutense University of Madrid.

He has participated in international and Spanish-founded research projects.

Mr. Magdaleno obtained in 2008 a Ph.D. grant from the National Institute of Aerospace Technology at the Atmospheric Sounding Station El Arenosillo, Huelva, for the study of the ionosphere.



Miguel Herraiz was born in Bilbao, Spain, in 1948. He received the Ph.D. degree in physics from the Complutense University of Madrid (UCM), Madrid, Spain, in 1984.

He has been a Visiting Scientist at the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge; the University of Central Arkansas, Conway; the U.S. Geological Survey, Lakewood, CO; the Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú; and the International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy.

Since 1982, he has been an Associate Professor with UCM, where he has been the Head of the Department of Geophysics and Meteorology since 2008. His fields of interest are ionosphere and seismology. He is the author of one text on seismology and the author/coauthor of 49 peer-reviewed papers and over 125 papers in meeting proceedings.



Sandro M. Radicella received the Doctor Honoris Causa degree from the University of Bucharest, Bucharest, Romania, in 2001 and the Doctor of Science degree Honoris Causa from the Obafemi Awolowo University, Ile-Ife, Nigeria, in 2005.

Since 1989, he has been the Head of the Aeronomy and Radiopropagation Laboratory, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy. He has authored and coauthored more than 130 papers in the fields of aeronomy and radio communications.

5.2. Comportamiento de las burbujas ionosféricas

En la sección anterior se ha presentado la herramienta IBS que detecta y caracteriza las *EPBs* a partir de ficheros RINEX pre-procesados.

En esta sección se presentan dos estudios realizados con esta herramienta que analizan el comportamiento y las características de las *EPBs*. El primero se centra en la caracterización de las *EPBs* detectadas en la zona de Sudamérica. El segundo analiza el comportamiento de las *EPBs* en diferentes rangos de longitud.

5.2.1. Sector americano

Para este primer artículo se han utilizado datos medidos en 15 estaciones IGS distribuidas en Suramérica. La selección de datos cubre diferentes periodos de actividad solar: 2000 y 2001 (alta actividad solar), 2004 y 2005 (actividad solar moderada) y 2008 (baja actividad solar). Las *EPBs* han sido detectadas utilizando la aplicación IBS, descrita en la sección 5.1, y tomando los valores de configuración por defecto.

Este estudio ha corroborado que las *EPBs* presentan un máximo de ocurrencia después de la puesta del Sol. Además, se ha analizado el comportamiento mensual mostrando un máximo de ocurrencia en los equinoccios, una ocurrencia moderada entre los meses de Octubre a Febrero y una baja ocurrencia entre los meses de Mayo y Agosto. También se ha analizado el comportamiento de la dependencia de las *EPBs* con el flujo solar, $F107$, observando un incremento del número de *EPBs* al aumentar el flujo solar. Este comportamiento se ha comparado con los resultados obtenidos en estudios previos que habían utilizado técnicas diferentes. La comparación señala un comportamiento similar (Burke et al. 2004; Gentile et al., 2006a, 2006b; Stolle et al., 2006; Nishioka et al., 2008).

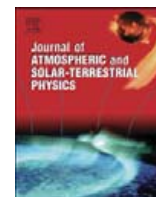
En este estudio también se ha comparado la variación estacional de las *EPBs* con la deriva vertical de la zona ecuatorial, calculada utilizando el modelo IRI (Bilitza and Reinisch, 2008). Asimismo se ha utilizado el modelo IRI para calcular los picos de densidad máxima de las capas E y F, NmE y $NmF2$, y se han comparado con la profundidad y la duración de las *EPBs* proporcionado por el IBS. El resultado muestra una gran correlación entre la deriva vertical y

la formación de las burbujas ionosféricas. El aumento de la deriva vertical del *TEC* produce una mayor probabilidad de la formación de la inestabilidad GRT. De igual modo, el aumento del ratio $NmF2 / NmE$, incrementa la probabilidad de formación de las burbujas. Este análisis también muestra una correlación entre el ratio $NmF2 / NmE$ y el tamaño de la burbuja y la duración del descenso del *TEC*.



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jastp

Characterization of equatorial plasma depletions detected from derived GPS data in South America

S. Magdaleno^{a,*}, M. Herraiz^{b,c}, B.A. de la Morena^a

^a Atmospheric Sounding Station El Arenosillo, INTA, Huelva, Spain

^b Department of Geophysics and Meteorology, UCM, Madrid, Spain

^c Institute of Geosciences, UCM-CSIC, Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 July 2011

Received in revised form

3 October 2011

Accepted 16 October 2011

Available online 28 October 2011

Keywords:

Equatorial plasma bubbles

Ionospheric bubbles seeker

Equatorial ionosphere

ABSTRACT

The equatorial plasma bubbles (EPBs) have been studied using slant total electron content (sTEC) derived from GPS data. The sTEC has been calculated from data measured at 15 International GNSS Service (IGS) stations located from 90°W to 30°W, covering the ionospheric equatorial anomaly at the American sector, for the years 2000, 2001, 2004, 2005 and 2008. The Ionospheric Bubbles Seeker (IBS) application has been used to detect and characterize the sTEC depletions associated to the EPBs. This technique bases its analysis on the time-variation of the sTEC and the population variance of this time-variation. The default configuration has been used and an EPB has been considered when a sTEC depletion was greater than 5 TEC units (TECu). The hourly occurrence shows the well-known maximum number of depletions after the post-sunset. The monthly occurrence of the EPBs is also analyzed and compared with previous studies. The International Reference Ionosphere model (IRI) has been used to calculate the equatorial vertical drift (EVD) and the peak densities of the E- and F-layers (NmE and NmF2, respectively). The EVD variation has been compared with the seasonal variation of the EPB. A discussion between the yearly mean occurrence EPBs rate and the solar activity is included. The variation of the yearly mean depth and duration of the sTEC depletions with the solar activity conditions and its relation with the ionospheric characteristics given by the IRI model has been also studied.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The equatorial plasma bubble (EPB) is a depleted plasma region, which size ranges from meters to kilometers. These regions are produced at the equatorial ionization anomaly (EIA), which is located at the equatorial and low-latitude ionosphere. The EIA is characterized by two peaks in the ion densities located on either side of the magnetic equator at about $\pm 15\text{--}20^\circ$ latitude. In the F-layer, the eastward electric field combined with the northward magnetic field produces an upward vertical $E \times B$ plasma drift velocity, named fountain effect, which produces an uplift of the plasma in the magnetic equator and the subsequent redistribution along the magnetic field lines to higher latitudes. The evening equatorial region shows an uplift of the F-layer by the eastward electric field, known as pre-reversal enhancement (PRE). After sunset, exits a much faster recombination at lower altitudes than at higher altitudes. This causes a steep upward

plasma density gradient existing between the depleted bottom-side ionosphere and the higher density zone in the upper F region, creating favorable condition for the Rayleigh–Taylor (RT) instability. The RT and $E \times B$ instabilities produce interchanges between bottomside plasma and plasma near and above the peak of the F-layer, causing irregular plasma density depletions (Kelley, 1989; Fejer et al., 1999).

Previous studies using in-situ satellite data have concluded that the number of EPBs is greater during high solar activity (Huang et al., 2002) and have deduced a relationship between the occurrence EPB rate and the solar extreme ultra violet flux (Stolle et al., 2006). These last authors also studied the longitudinal and the seasonal variation of the occurrence EPBs rate obtaining a maximum occurrence EPB rate from 280°E to 40°E corresponding with the African–Atlantic–American sector. The seasonal variation presents a dependency with the geographical latitude, showing a maximum occurrence EPB rate during the equinoxes for all sectors and during the equinoxes and the winter solstice particularly for these three sectors. These results agree with others studies (Burke et al., 2004; Magdaleno et al. 2011a).

The slant total electron content (sTEC), defined as the integral of the electron density along the line from the satellite to the

* Corresponding author. Tel.: +34 959 20 88 54.

E-mail address: smactor@gmail.com (S. Magdaleno).

¹ At present at the Department of Geophysics and Meteorology, UCM, Madrid, Spain.

receiver, is the main ionospheric parameter retrieved from GPS observations (Davies and Hartmann, 1997). The sTEC values are expressed in TEC units ($\text{TECu} = 10^{16}$ electrons/ m^2). In this paper we have used the Ionospheric Bubble Seeker (IBS) application (Magdaleno et al., 2011b) to provide a characterization of an EPB in time and depth. We have studied the seasonal variation and have compared with previous results obtained from in-situ satellite data. The hourly behavior is also presented and compared with the well-known results. The dependence of the duration and the depth of the EPBs have been related with the solar flux and with the equatorial vertical drift and the peak densities of the E- and F-layers rate calculated from the International Reference Ionosphere (IRI) model.

2. Data and methodology

For this study we have selected data available from 15 stations of the International GNSS Service (IGS). These data consist on RINEX files that are available at the Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) data center (<http://cddis.gsfc.nasa.gov>). The stations used are listed in Table 1 and the data covers high (2000, 2001), moderate (2004, 2005) and low (2008) solar activity conditions. The yearly average solar radio flux, $F_{10.7}$, values, which are related with the ultraviolet radiation, have been obtained from the NOAA web site (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/spaceweather.html>).

Comparing the signals received from the two GPS dual frequency transmissions on L1 (1.57542 GHz) and L2 (1.22760 GHz) the sTEC can be estimated. Dual-frequency carrier-phase and code-delay GPS observations have been combined to obtain an ionospheric observable related to the sTEC (Ciraolo et al., 2007). sTEC values have been estimated from RINEX files using the technique developed by Brunini and Azpilicueta, (2009). The elevation and azimuth of each satellite have been calculated from the IGS orbit files, SP3. These files are also available at the CDDIS data center.

To detect and characterize the EPB we have used the IBS. This technique, based on an analysis of the sTEC arcs, identifies an EPB when a sTEC depletion is located on the difference-curve (original series minus calculated one). To detect a depletion, the IBS bases its analysis on the variation of the slope of the sTEC values and the population variance of these slope values. To consider a depletion, a slope threshold (SLT), variance threshold (VAT), window size,

which determinate the number of values that IBS uses to calculate the population variance, and a depth depletion threshold have been defined. In addition, the IBS has an option to configure the minimum value of the elevation to discard errors due to the horizontal and vertical ionospheric complexity structure (Vladimer et al., 1997).

For this study, the default configurable values have been used: the window size (600 s), the SLT (0.025 TECu/s), the VAT ($5 \times 10^{-5} \text{TECu}^2/\text{s}^2$) and the elevation (25°). A depth depletion threshold equal to 5 TECu has been selected. IBS provides the number of depletions detected for each station and the number of days analyzed. However, a summary file is generated by the IBS that provides specific information about each EPB detected as the starting time, finishing time and maximum difference between the original sTEC profile and the estimated one. These data have been used in the present investigation. (See Magdaleno et al., 2011b for more details.)

The International Reference Ionosphere model (IRI) (Bilitza, 2001) has been used to calculate the equatorial vertical drift (EVD) (Scherliess and Fejer, 1999) and the maximum density for the E- and F-layers, NmE and NmF2, respectively. To calculate these characteristics we have used the default setting of the IRI but, as we are using monthly values, the foF2 storm model (Araujo-Pradere et al., 2002) has been turn off. The values have been computed for a station located at 24.7°S , 294.6°E in geographic coordinates and the 15th of each month has been selected as the monthly representative ionosphere. As the formation of EPB is due to the RT instability and the PRE creates favorable conditions for this, we have computed these characteristics at 19:00 LT considering the PRE at this hour.

2.1. Example of an EPB detected by the IBS application

Fig. 1 shows an example of an EPB detected by the IBS application at the CFAG station located in the Argentina's West region the 9th December 2000. In the panel a, the sTEC profile calculated from the RINEX file and the calculated profile, both in TECu , are represented against local time. The slope of the sTEC profile and the variance calculated by the IBS and their thresholds are represented in panel b and c, respectively. Finally, the difference-curve, original series minus calculated one, is represented in the panel d. In this panel, the dots represent the points of the EPB detected. The first and the last dots are the starting and

Table 1

List of the stations used with the days analyzed for each year studied. The geographical latitude and longitude and the magnetic latitude for each station are also given. The geomagnetic latitude was computed from IGRF (Macmillan and Maus, 2005) evaluated at 2000.0. Finally, the number of days analyzed each year for each station and the total days analyzed each year are given.

Station code	Geographic longitude	Geographic latitude	Magnetic latitude	Days analyzed				
				2000	2001	2004	2005	2008
AREQ	-71.4928	-16.4655	-5.91	282	337	261	358	362
BRAZ	-47.8778	-15.9474	-6.44	279	295	343	333	344
BRFT	-38.4255	-3.8774	4.91	X	X	X	107	X
CFAG	-68.2326	-31.6022	-20.99	336	352	84	40	361
CHPI	-44.9852	-22.6871	-13.14	X	X	310	237	338
GLPS	-90.3037	-0.743	9.16	X	X	261	288	131
KOUR	-52.806	5.2522	14.9	289	264	349	363	X
MANA	-86.2487	12.1491	22.17	162	285	219	228	262
POVE	-63.8963	-8.7093	1.71	X	X	X	X	79
QUI1	-78.4936	-0.2152	10.17	X	X	338	339	327
QUI2	-78.4936	-0.2152	10.17	X	X	X	72	361
RIOP	-78.652	-1.6506	8.74	X	X	X	X	176
SAVO	-38.4323	-12.9392	-4.05	X	X	X	X	82
SLOR	-87.4365	13.4239	23.37	66	212	X	X	X
UNAS	-65.4076	-24.7275	-14.18	317	151	294	323	283
			Total	1744	1908	2459	2688	3106

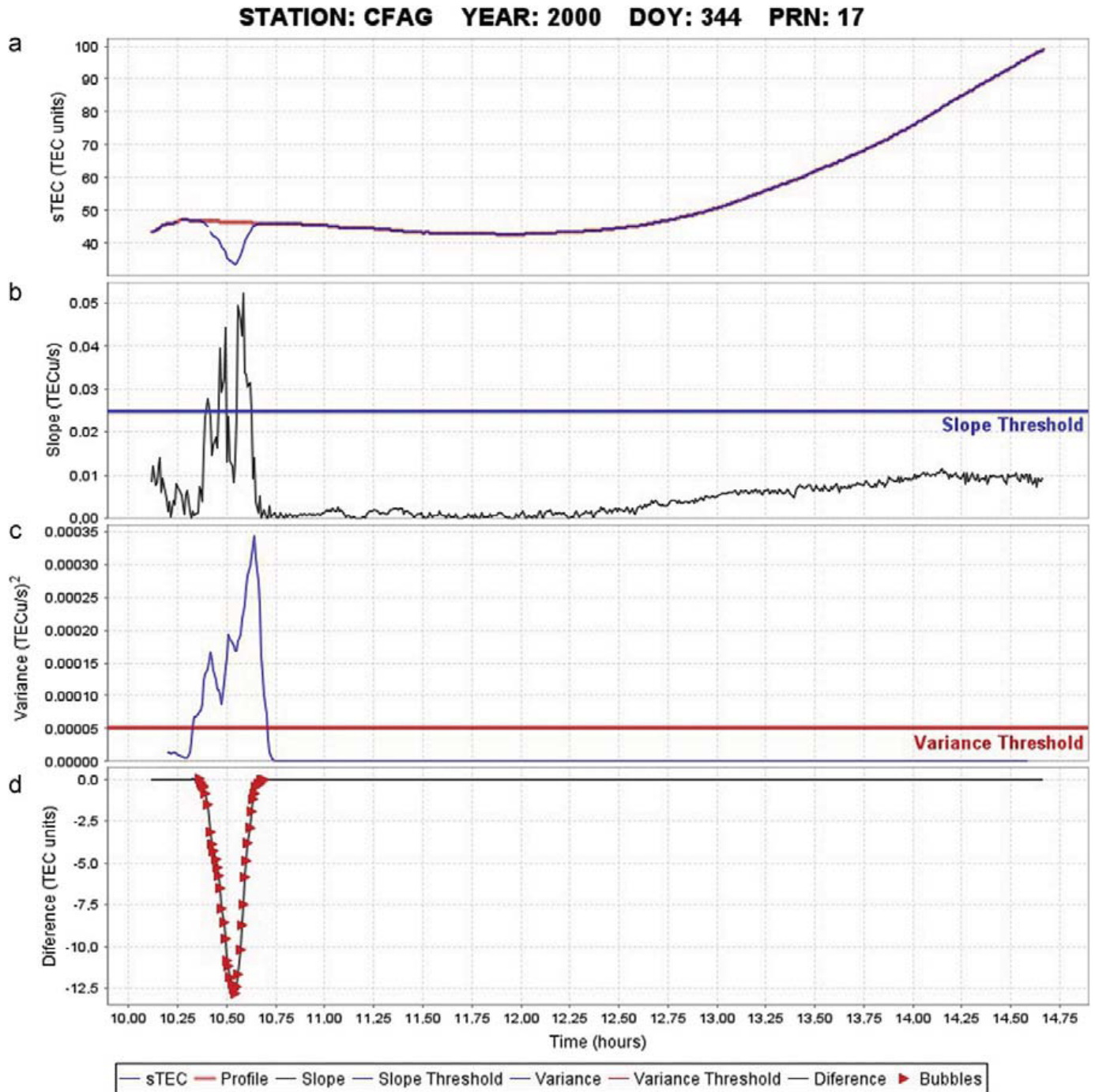


Fig. 1. An example of an IBS result for one sTEC arc from the CFAG station (PRN=17, DOY=344, YEAR=2000).

the finishing times, respectively. The difference between these values is the time when the depletion crossed the satellite-station ray path and we have named it “the effective time”. The depth of the depletion corresponds with the dot, which difference is the lowest (please keep in mind that these values are negative).

3. Results and discussion

3.1. Geographical distribution

Fig. 2 depicts the geographical behavior of the occurrence EPBs rate (occurrence EPBs Rate (%)=# of EPBs detected/days

analyzed). It is appreciated a latitudinal variation which depends on the magnetic latitude. During high solar activity conditions (years 2000 and 2001) the greater values of the occurrence EPBs rate are located close to the magnetic equator and these values decrease gradually as the distance from the magnetic equator increases (Burke et al., 2004; Magdaleno et al., 2011a). However, during moderate solar activity conditions (2004, 2005), the high values of the occurrence EPBs rate are located at $\pm 10^\circ$ magnetic latitude and, during low solar activity conditions (2008), these values are located at $\pm 14^\circ$ magnetic latitude. In both cases, the maximum value of the occurrence EPBs rate was slightly higher in the northern hemisphere. This behavior was also found by Stolle et al., (2006) using in-situ satellite measurements. It can be also

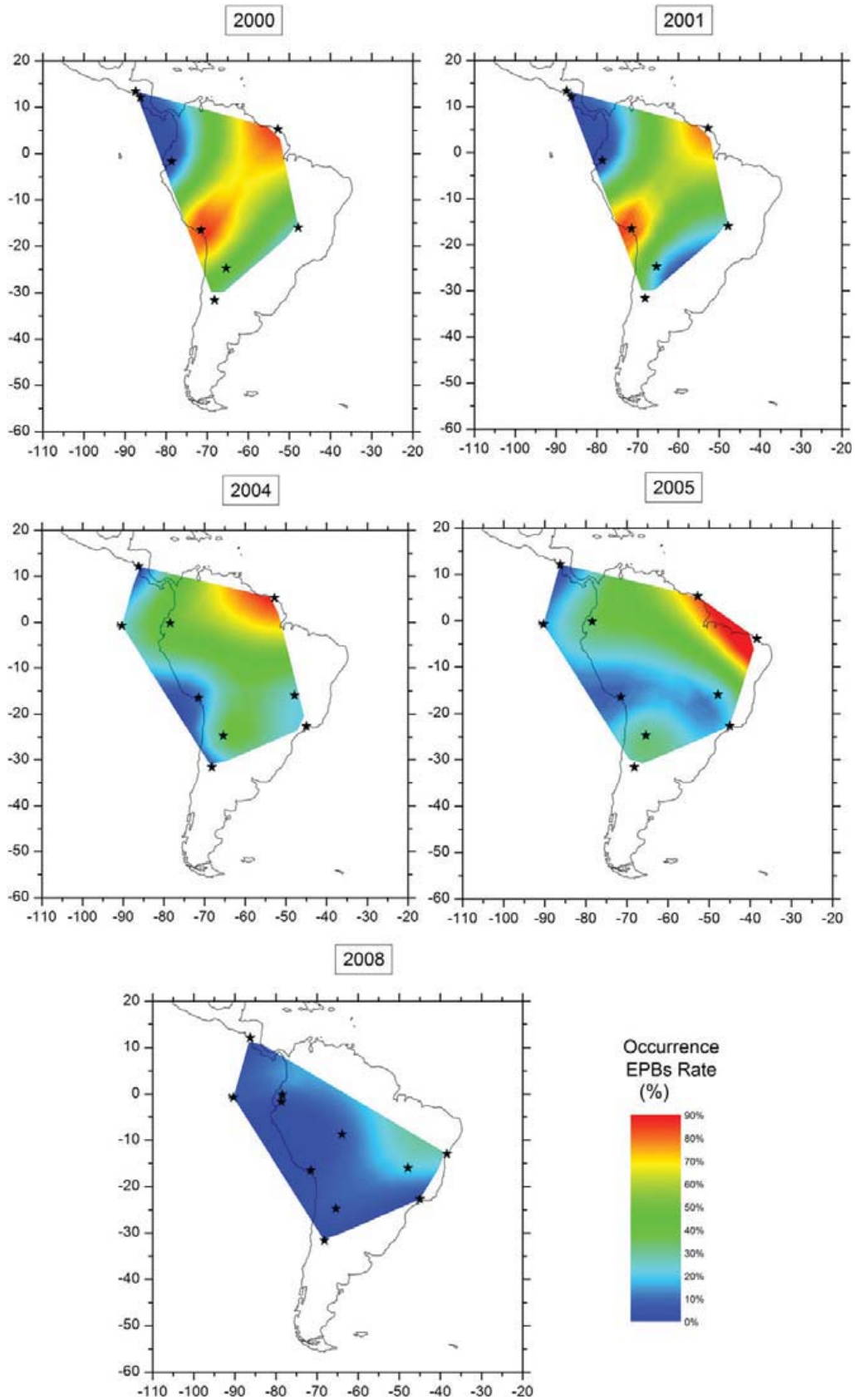


Fig. 2. Occurrence EPBs rate maps for the years 2000, 2001, 2004, 2005 and 2008. The black stars represent the location of the stations used for each map.

observed that the maximum values of the occurrence EPB rate are located closer to the Atlantic sector than to the Pacific sector. This behavior is more remarkable during moderate and low solar

activity conditions than during high solar activity conditions. Previous studies have analyzed the longitudinal variation showing that the greatest values of the occurrence EPB rate are located

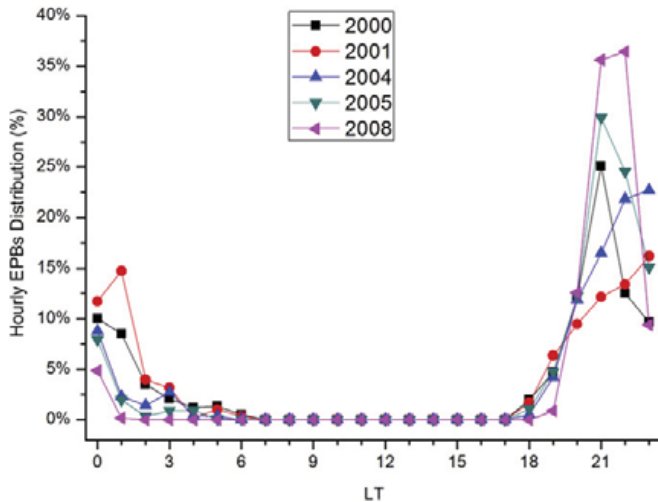


Fig. 3. Hourly occurrence EPB rate against local time for the years are studied here.

in the African–Atlantic–American sectors (Burke et al., 2004; Stolle et al., 2006; Magdaleno et al., 2011a).

3.2. Time distribution

Although it is known from numerous studies that the EPBs are produced after sunset (e.g. Tsunoda, 1985; Xiong et al., 2010) we have checked our results for that characteristic. Fig. 3 shows the local time distribution of the EPBs (hourly EPBs distribution (%) = # of EPBs at one LT/# of EPBs detected) for the stations studied here. The production of EPBs presents a rapidly increase between 19:00 and 20:00 LT, reaching the maximum value between 21:00 and 22:00 LT when the number of EPBs starts to decrease gradually until sunrise.

The monthly variation is also shown in this study (Fig. 4). The maximum number of EPBs detected is located from September to April. Previous studies have related the seasonal variation of the EPBs with the geometry between the geomagnetic field lines and the terminator line (Tsunoda, 1985). Nishioka et al., (2008) show in Fig. 5 the sunset time lag between the geomagnetic conjugate points to represent the geometry described before. It is expected a high number of EPBs when the sunset time lag is minimum. This figure shows minimum values of the sunset time lag in January and November for the Atlantic sector (60°W–20°W) and in March and September for the Eastern Pacific sector (120°W–60°W). As the stations used in this study are located from 90°W to 30°W, it is expected a high number of EPBs during the equinoxes and the winter solstice. On the other hand, Fig. 5 depicts the monthly EVD calculated by the IRI model for all the years studied in this paper. It can be noted that the greatest values of the EVD occur between September and April for all the years studied in this paper and agree with the greatest values of EPBs detected. This behavior agrees with previous studies carried out with in-situ satellites (Burke et al., 2004; Stolle et al., 2006).

3.3. Occurrence EPBs solar activity dependency

The yearly mean occurrence EPBs rate has been calculated for each year of this study. These values have been plotted against the yearly average solar radio flux, $F_{10.7}$, in Fig. 6. It can be observed that a strong correlation between the yearly mean occurrence EPBs rate and the $F_{10.7}$ seems to be. We can obtain the probability of detecting an EPB for a given level of $F_{10.7}$ making a linear regression. This result only compares yearly

averaged quantities. The gray line satisfies the linear equation $y=0.24x+1.56$.

Huang et al., (2002) concluded that the increase of the occurrence EPBs rate increasing the solar activity can be explained using the linear growth rate γ for the generalized Rayleigh–Taylor instability using the local approximation (Kelley, 1989) and determinate that the penetration of the electric fields in the magnetosphere and the ionosphere decrease with decreasing the solar activity. The yearly mean EVD has been calculated from the monthly EVD computed in the IRI model for each year and has been plotted against the yearly average $F_{10.7}$ in Fig. 7a. A linear correlation is appreciated and the linear fit is represented by the gray line. The slope value indicates that the EVD computed by the IRI model increases with increasing the solar activity conditions (Vichare and Richmond, 2005). However, Fig. 8 shows the yearly mean occurrence EPBs rate against (a) the yearly mean EVD and (b) the yearly mean NmF2/NmE. These plots show that the occurrence EPB rate has a strong correlation with the EVD but also with the relation between the peak densities of the E- and F-layers. This implies that, even the penetration of the electric fields in the magnetosphere and the ionosphere is an important factor in the EPB formation; the density gradient also plays an important role in this process.

3.4. EPB characteristics solar dependency

The characteristics studied in this paper are the yearly mean depth of the depletion detected from sTEC values, given in TECU, and the yearly mean effective time of the depletion, given in minutes. These yearly means are plotted against the solar activity conditions, represented by $F_{10.7}$, in the Fig. 9a and b, respectively. It is observed in Fig. 9a that the yearly mean depth values decreases with increasing the solar activity. Fig. 7b shows the relation between the yearly mean NmF2 and NmE given by IRI model against the $F_{10.7}$. The greater values of the flux increase the temperature in the thermosphere, which in its turn increases the scale height, related with the electron density profile. This effect, in addition to the ions formed in the E-layer by the ultraviolet radiation and moved upward by the density gradient and the $E \times B$ drift, makes the electron density of the F-layer increase and produces a greater difference between the electron densities of the E- and F-layers. Fig. 10a represents the yearly mean depth against the yearly mean NmF2/NmE. An increase in the rate between the electron densities of the E- and F-layers implies a decrease in the yearly mean depth (an increase of the difference between the original series minus the calculated one) and implies an increase of the difference between the EPBs and the plasma ambient densities.

The yearly mean effective time is represented against the yearly average $F_{10.7}$ in the Fig. 9b. It is clearly shown that an increase of the solar flux produces an increase in the effective time. The linear growth rate equation is related with the plasma ambient density, so it is expected that an increase of the difference between the E- and F-layers densities implies an increase in the linear growth rate and this produces an increase of the duration of the EPB. The correlation between the yearly mean effective time and the yearly mean NmF2/NmE is showed in Fig. 10b, where it can be noted that an increase of the NmF2/NmE values implies an increase in the effective time.

4. Summary and conclusions

Using the IBS application (Magdaleno et al., 2011b), the number of EPBs for the South American region has been obtained from the sTEC values. These sTEC values have been calculated

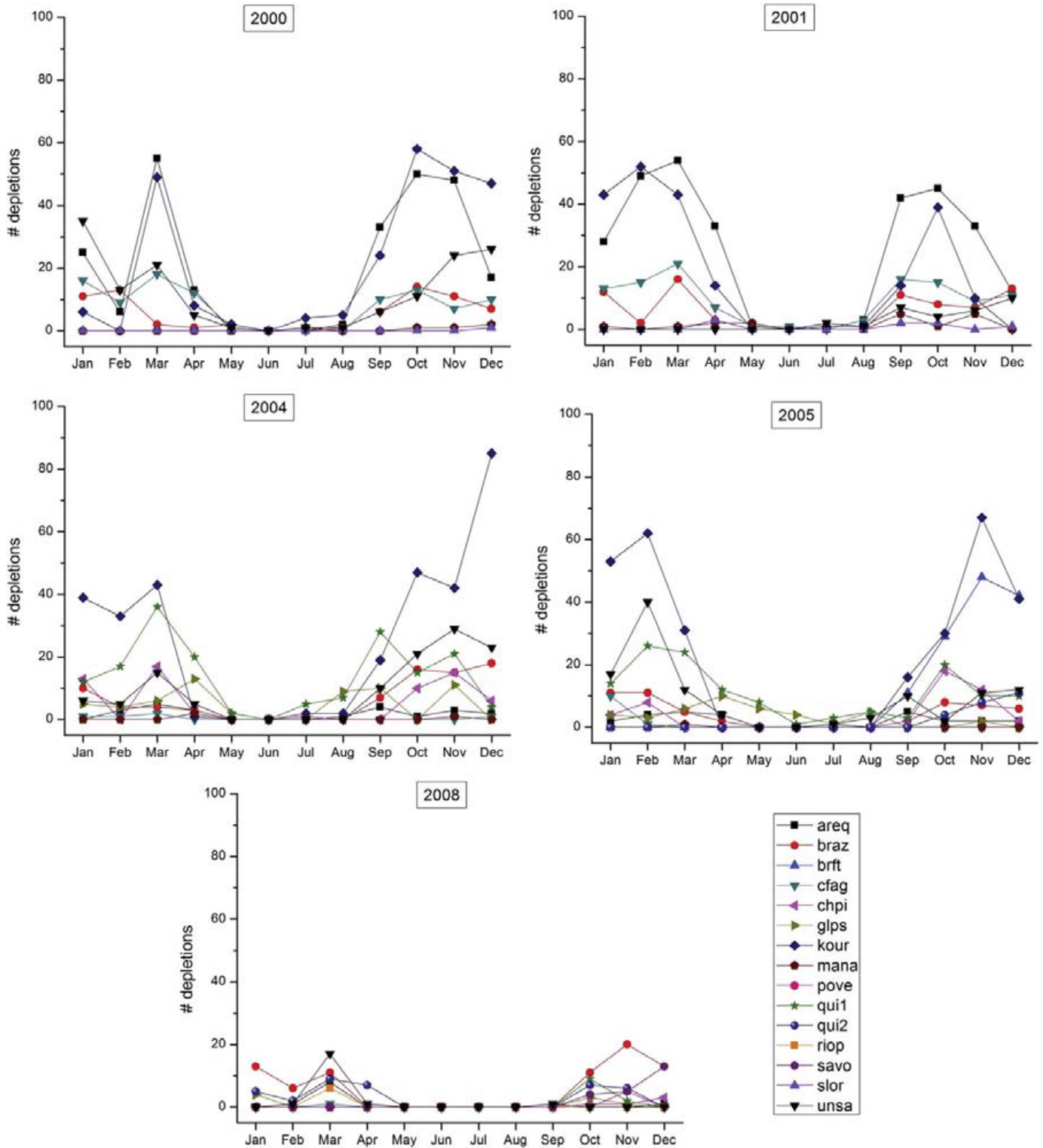


Fig. 4. Number of depletion detected at each station is represented against the month for the years 2000, 2001, 2004, 2005 and 2008.

from RINEX files using the technique developed by Brunini and Azpilicueta, (2009). The yearly mean depth and the effective time of these EPBs have been also calculated from the individual ones given by the IBS. The IRI model has been used to calculate the day 15th of each month, which has been considered as the monthly representative value for the EVD and the peak densities for the E- and F-layers. These values have been also used to calculate the yearly mean values. The distribution of the EPBs has shown a

dependency with the magnetic latitude with greater values close to the dip equator during high solar activity conditions (Burke et al., 2004; Magdaleno et al., 2011a) and high values of the occurrence EPBs rate located at $\pm 10^{\circ}$ – 15° magnetic latitude during moderate and low solar activity conditions (Stolle, 2006). The production of EPBs presents a rapidly increase between 19:00 and 20:00 LT with the greatest values between 21:00 and 22:00 LT and a decrease gradually until sunrise. Seasonal

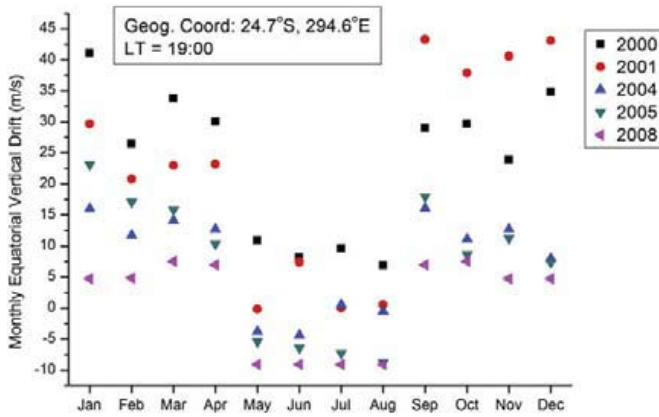


Fig. 5. Monthly Equatorial Vertical Drift obtained from the IRI model the 15th of each month at 24.7°S, 294.6°N at 19:00 LT for the years studied plotted against the month.

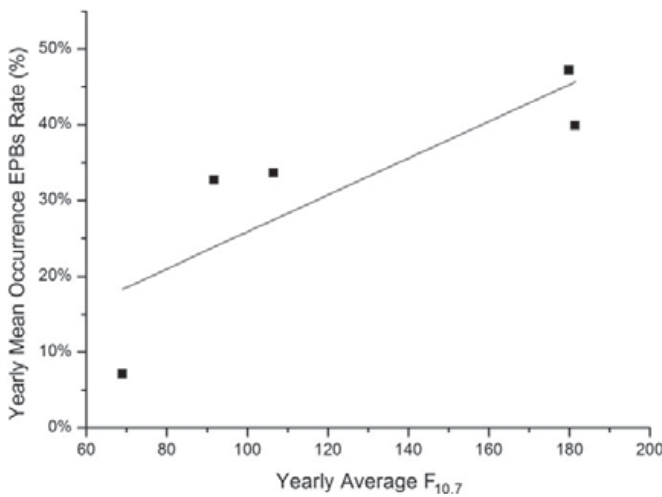


Fig. 6. Yearly mean occurrence EPB rate, calculated from all the stations, plotted versus the yearly average $F_{10.7}$.

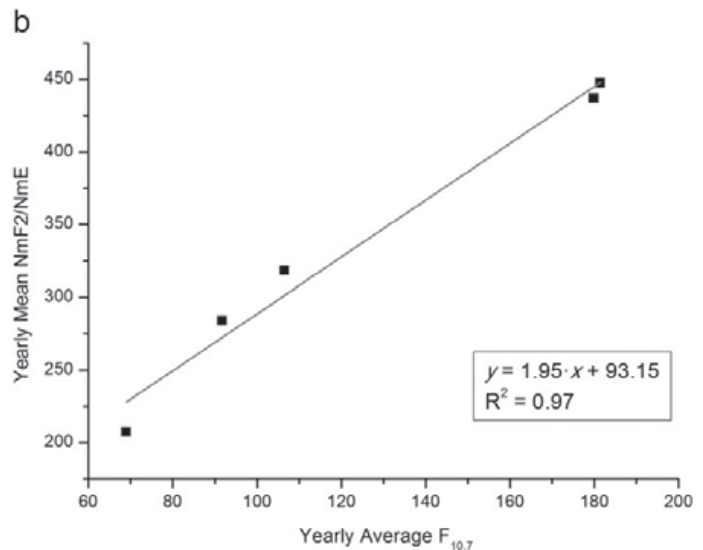
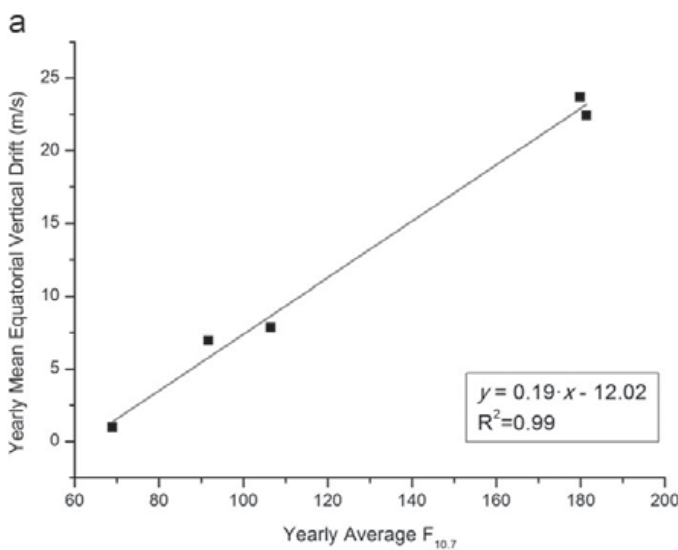


Fig. 7. Yearly mean Equatorial Vertical Drift (a) and the yearly mean NmF2/NmE (b) obtained from the IRI model are plotted against the yearly average $F_{10.7}$. The gray line represents the linear fit of each plot. The equation of the linear fit and the R^2 are also included.

variation can be explained by the equatorial vertical drift variation, with maximum values from September to April. Tsunoda, (1985) related this variation with the geometry between the geomagnetic field lines and the terminator line. A strong correlation between the yearly mean occurrence EPBs rate and the $F_{10.7}$ exists and also with the yearly mean EVD and the yearly mean NmF2/NmE. These correlations present an increase of the yearly mean occurrence EPBs rate increasing the yearly mean EVD and the yearly mean NmF2/NmE and satisfy the local approximation of the linear growth rate γ for the generalized Rayleigh–Taylor instability (Kelley, 1989). The study of the yearly mean depth and effective time of a depletion has determined that an increase of the solar flux increases the size of the EPB obtaining greater values of the difference between the densities of the EPB and the plasma ambient and increasing the effective time of the EPB. A correlation between the yearly mean NmF2/NmE and these EPBs characteristics has been obtained establishing a relation between the EPBs characteristics and ionospheric measurements.

The present work offers a description of the distribution of the EPB in a latitude range of 30°S–10°N and covers high (2000 and 2001), moderate (2004 and 2005) and low (2008) solar activity conditions. The results here presented can be extended using new data from local, regional or worldwide networks. Currently, there is a network in South America, named LISN (Low-Latitude Ionospheric Sensor Network) (<http://lisn.igp.gob.pe/>), which has 50 GPS stations, 5 Magnetometers and 5 Ionosondes distributed in the equatorial region with the purpose of studying and forecasting the ionospheric phenomena. The data of this network could be used to corroborate or even improve the results here presented. The sensibility of the method also allows studying other current topics related with the disturbances of the ionosphere from below as gravity waves.

Acknowledgments

This work has been possible thanks to financial support granted by the National Institute for Aerospace Technology (INTA). The authors would like to thank Dr. C. Brunini for his help and wish to express their gratitude to the IGS and the CDDIS

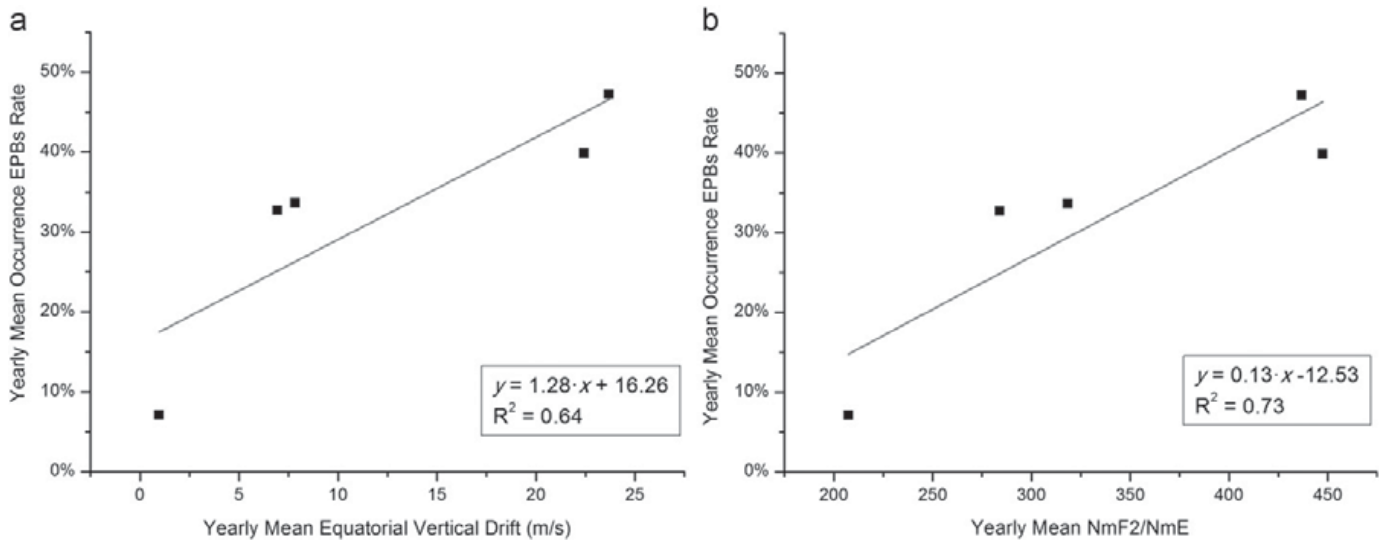


Fig. 8. Yearly mean occurrence EPB rate plotted versus (a) the yearly mean Equatorial Vertical Drift and (b) the yearly mean NmF2/NmE. The gray line satisfies the linear equation of each plot and R^2 indicates the goodness of each equation.

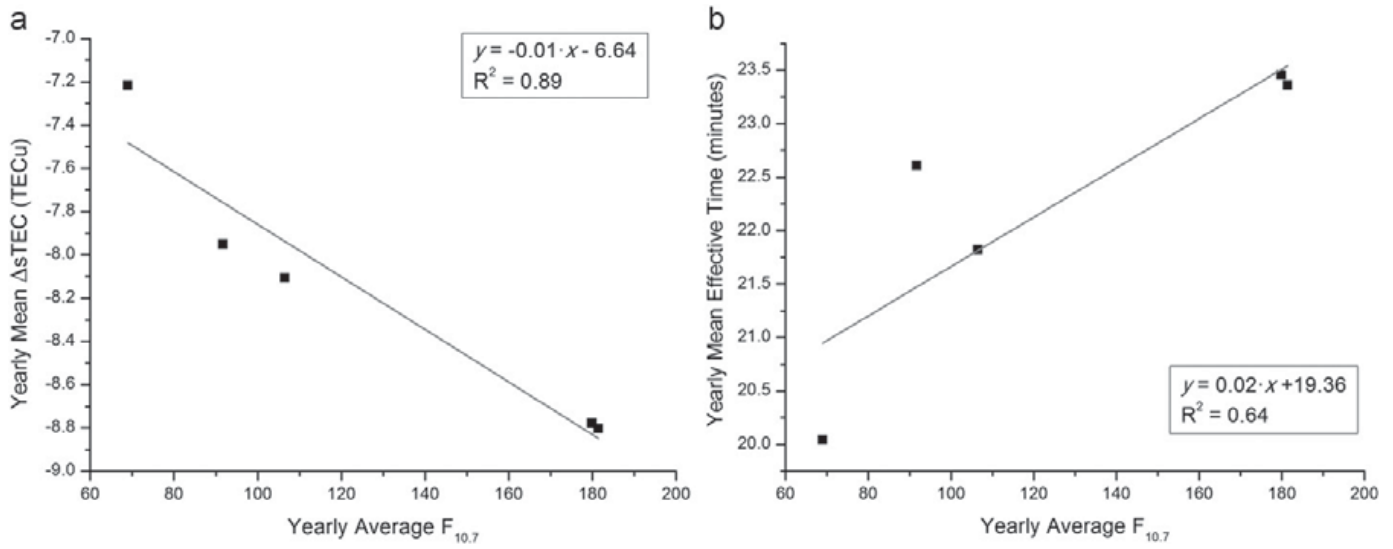


Fig. 9. Yearly mean depth (a) and the yearly mean effective time (b) obtained from the IBS are plotted against the yearly average $F_{10.7}$. Linear equation and R^2 coefficient are included.

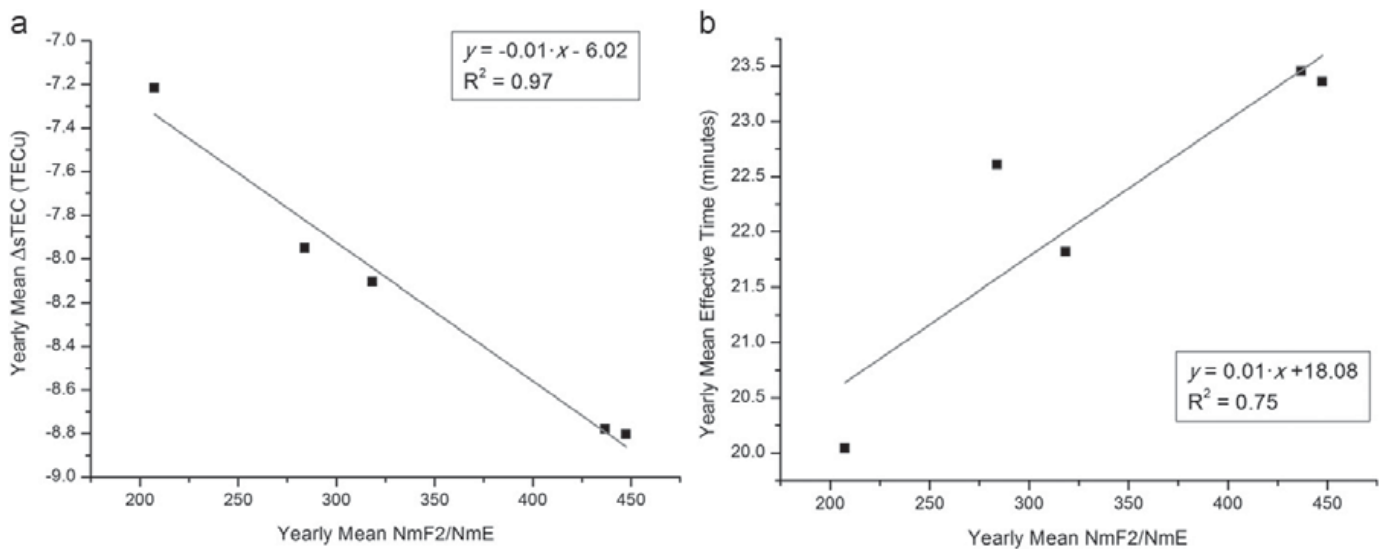


Fig. 10. Same as Fig. 9 but characteristics against the yearly mean NmF2/NmE.

for making the data available, as well as to the IRI team for making the IRI model available.

References

- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.V., 2002. Storm: an empirical storm-time ionospheric correction model 1. Model description. *Radio Science* 37 (3), 1–12.
- Bilitza, D., 2001. International reference ionosphere 2000. *Radio Science* 36 (2), 261–275. doi:10.1029/2000RS002432.
- Brunini, C., Azpilicueta, F., 2009. Accuracy assessment of the GPS-based slant total electron content (sTEC). *Journal of Geodesy*. doi:10.1007/s00190-008-0296-8.
- Burke, W.J., Gentile, L.C., Huang, C.Y., Valladares, C.E., Su, S.Y., 2004. Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1. *Journal of Geophysical Research* 109, A12301. doi:10.1029/2004JA010583.
- Ciraolo, L., Azpilicueta, F., Brunini, C., Meza, A., Radicella, S.M., 2007. Calibration errors on experimental slant total electron content determined with GPS. *Journal of Geodesy* 81 (2), 111–120. doi:10.1007/s00190-006-0093-1.
- Davies, K., Hartmann, G.K., 1997. Studying the ionosphere with the global positioning system. *Radio Science* 32 (4), 1695–1703. doi:10.1029/97RS00451.
- Fejer, B.G., Scherliess, L., de Paula, E.R., 1999. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. *Journal of Geophysical Research* 104, 19,859–19,869.
- Huang, C.Y., Burke, W.J., Machuzak, J.S., Gentile, L.C., Sultan, P.J., 2002. Equatorial plasma bubbles observed by DMSP satellites during a full solar cycle: toward a global climatology. *Journal of Geophysical Research* 107 (A12), 1434. doi:10.1029/2002JA009452.
- Kelley, M.C., 1989. *The Earth's Ionosphere, Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic, San Diego, Calif.
- Macmillan, S., Maus, S., 2005. International geomagnetic reference field—the tenth generation. *Earth Planets Space* 57, 1135–1140.
- Magdaleno, S., Radicella, S.M., Herraiz, M., 2011a. Longitude characterization of GPS derived TEC depletions using a post-processing automatic technique. In: *Proceedings of 13th International Ionospheric Effects Symposium IES2011*. Alexandria, USA.
- Magdaleno, S., Herraiz, M., Radicella, S.M., 2011b. Ionospheric bubbles seeker: a Java application to detect and characterize ionospheric plasma depletion from GPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. doi: 10.1109/TGRS.2011.2168965.
- Nishioka, M., Saito, A., Tsugawa, T., 2008. Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks. *Journal of Geophysical Research* 113, A05301. doi:10.1029/2007JA012605.
- Scherliess, L., Fejer, B.G., 1999. Radar and satellite global equatorial F region vertical drift model. *Journal of Geophysical Research* 104, 6829–6842.
- Stolle, C., Lühr, H., Rother, M., Balasis, G., 2006. Magnetic signatures of equatorial spread F as observed by the CHAMP satellite. *Journal of Geophysical Research* 111, A02304. doi:10.1029/2005JA011184.
- Tsunoda, R.T., 1985. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated E region Pedersen conductivity. *Journal of Geophysical Research* 90 (A1), 447–456.
- Vichare, G., Richmond, A.D., 2005. Simulation studies of the longitudinal variation of evening vertical ionospheric drifts at the magnetic equator during equinox. *Journal of Geophysical Research* 110, A05304. doi:10.1029/2004JA010720.
- Vladimer, J.A., Lee, M.C., Doherty, P.H., Decker, D.T., Anderson, D.N., 1997. Comparisons of Topex and Global Positioning System total electron-content measurements at equatorial anomaly latitudes. *Radio Science* 32 (6), 2209–2220.
- Xiong, C., Park, J., Lühr, H., Stolle, C., Ma, S.Y., 2010. Comparing plasma bubble occurrence rates at CHAMP and GRACE altitudes during high and low solar activity. *Annales Geophysicae* 28, 1647–1658. doi:10.5194/angeo-28-1647-2010.

5.2.2. Análisis global

En este segundo artículo estudio se ha analizado el comportamiento longitudinal de las *EPBs*. Para ello se han seleccionado 17 estaciones pertenecientes a la red IGS distribuidas a ambos lados del ecuador geomagnético y en todos los rangos de longitud. Los datos utilizados pertenecen a los años 2000 y 2001, correspondientes a un periodo de alta actividad solar. Los resultados descritos en este estudio se han obtenido con la aplicación IBS, introducida en la sección 5.1.

En primer lugar se ha estudiado el comportamiento latitudinal. Para ello se han seleccionado datos procedentes de estaciones situadas en un mismo rango de longitud y diferentes latitudes. Este análisis ha mostrado un comportamiento gaussiano de la ocurrencia de las *EPBs* con el máximo en el ecuador magnético y un sigma de 9.5° .

Por otro lado se ha analizado el comportamiento de las *EPBs* con la longitud y se ha comparado con los resultados obtenidos en otros estudios utilizando diferentes técnicas. En este análisis se ha evaluado la ocurrencia de las *EPBs* y se ha puesto de relieve un mayor número de sucesos en los sectores Americano y Atlántico.

Por último, se han seleccionado varias estaciones distribuidas en diferentes rangos de longitud para analizar la variación estacional de las *EPBs*. Este análisis ha mostrado que el comportamiento estacional de las *EPBs* presenta un comportamiento diferente según la longitud. De esta forma se ha observado que todos los sectores presentan una máxima ocurrencia de *EPBs* durante los equinoccios, sin embargo, según el rango de longitud en el que nos encontremos es posible encontrar *EPBs* durante los meses de Noviembre a Febrero, (sectores americano y atlántico), o durante todo el año (sector africano). Estos resultados están en línea con los obtenidos en otros estudios (Burke et al., 2004; Gentile et al., 2006a and 2006b) con datos in-situ medidos con DMSP y ROCSAT-1.

Longitude characterization of GPS derived TEC depletions using a post-processing automatic technique

S. Magdaleno (1), S. M. Radicella (2), M. Herraiz (3,4)

(1) Atmospheric Sounding Station El Arenosillo. National Institute for Aerospace Technology. Spain

(2) Aeronomy and Radiopropagation Laboratory. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. Italy

(3) Dept. of Geophysics and Meteorology. University Complutense of Madrid. Spain

(4) Institute of Geosciences. UCM-CSIC. Spain

Abstract

A new technique for the post-processing detection and characterization of TEC depletions associated to ionospheric plasma bubbles (IPB) has been used to analyze depletions behavior at different longitudes at low geomagnetic dip and modip. The technique permits the processing of slant TEC data in a very fast and efficient way allowing for different values of depletion characteristics.

This technique has been applied to data from stations located in the American, Asian and African equatorial sectors. For years of high solar activity it was found that the number of depletions with amplitudes higher than 10 TECu is consistent with the results obtained by Gentile et al. (2006) for the topside ionosphere using DMSP data. These authors found that the highest occurrence of IPB is located in the American-Atlantic-African sector confirming previous findings. Our study draws the same conclusion but analyzing GPS derived sTEC data.

1.0 Introduction

The equatorial ionization anomaly (EIA) presents a highly dynamic behavior and is characterized by a peak in the ion densities created by the fountain effect which consists of the uplift of plasma at the magnetic equator by eastward electric fields and subsequent redistribution along the magnetic field lines to higher latitudes. After sunset, an uplift of the F-layer by the eastward electric field, known as pre-reversal enhancement (PRE), creates favorable condition for the Rayleigh-Taylor (RT) instability. The RT and ExB instabilities produce an interchange between bottomside plasma and plasma near and above the peak of the F-layer, causing irregular plasma density depletions (Kelley, 1989; Fejer et al., 1999). This depleted plasma regions, with scale sizes of meters to kilometers, are known as ionospheric plasma bubbles (IPB). The spatial gradients of the ionospheric electron density they create can introduce severe errors in GPS derived range measurements.

Several studies have been realized to characterize the occurrence of IPBs using observational data, such as radar measurements (e.g., Hysell et al., 2006; Yokoyama and Fukao, 2006), ground-based observatories (e.g., Sahai et al., 2006; Makela and Miller, 2008), in-situ measurements by satellites (e.g., Burke et al. 2004; Gentile et al., 2006a, 2006b; Xiong et al., 2010) and GPS dual-frequency observation (e.g., de Paula et al., 2003; Portillo et al., 2008).

This paper reports the results obtained from a post-processing detection technique applied to data from some stations at different longitudes. The results have been compared to those obtained from Gentile et al. (2006b) to verify the longitudinal behavior found with in-situ topside ionosphere measurements.

2.0 Methodology

The slant total electron content (sTEC), defined as the integral of the electron density along the satellite to the receiver, is the main ionospheric parameter retrieved from GPS observations (Davies and Hartmann, 1997). An IPB located on the satellite-to-ground ray path causes a sudden reduction of the sTEC value, which is followed by a recovery when the ray no longer propagates through the bubble. This effect will be noted with a depletion in the sTEC values. Dual-frequency carrier-phase and code-delay GPS observations have been combined to obtain an ionospheric observable related to the sTEC (Ciraolo et al., 2007, Brunini and Azpilicueta, 2009).

The Ionospheric Bubble Seeker, IBS, has been used to detect and characterize depletions in the sTEC (Magdaleno et al., 2011). This technique, based on an analysis of the sTEC arcs, identifies an EPB when a sTEC depletion is located on the difference-curve (original series minus calculated one). The smooth behavior of the sTEC data is supposed and when a great variation in the slope, a depletion, is detected it is considered that the effect is produced by an IPB. A slope threshold (SLT) has been used to estimate if the value of the slope is smooth or, on the contrary, if a depletion has started.

The consideration that the sTEC data must be smooth implies that the variations of the slope should also be smooth. To satisfy this condition the population variance (σ^2) has been calculated to study the variations of the slope as follow

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2$$

where

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

and N are the number of values selected by the moving window used to calculate the population variance of the data. The value of the variance is assigned to the value placed in the middle of the moving window (N/2). A variance threshold (VAT) has been also defined and a default value has been calculated to detect the depletions.

For this study, the default configurable values have been used for the window size (600 seconds), the slope threshold (0.025 TECu/s), the variance threshold ($5 \cdot 10^{-5}$ TECu/s) and the elevation (25 degrees). A depth depletion threshold equal to 10 TECu has been selected for this study. Figure 1 depicts the analyzed results for a sTEC under default configuration. The sTEC arc (thick line) and the calculated one (thin line) are represented against time in panel a). In panel b), the slope values (black line) and the SLT selected value (thick line) are shown. The variance values calculated (black line) and the variance threshold selected value (thick line) are plotted in panel c). The difference-curve and the values of the depletion considered are represented in panel d) with line and dots, respectively.

IBS provides the number of depletions detected for each station and the number of days analyzed. These data have been used in the present investigation.

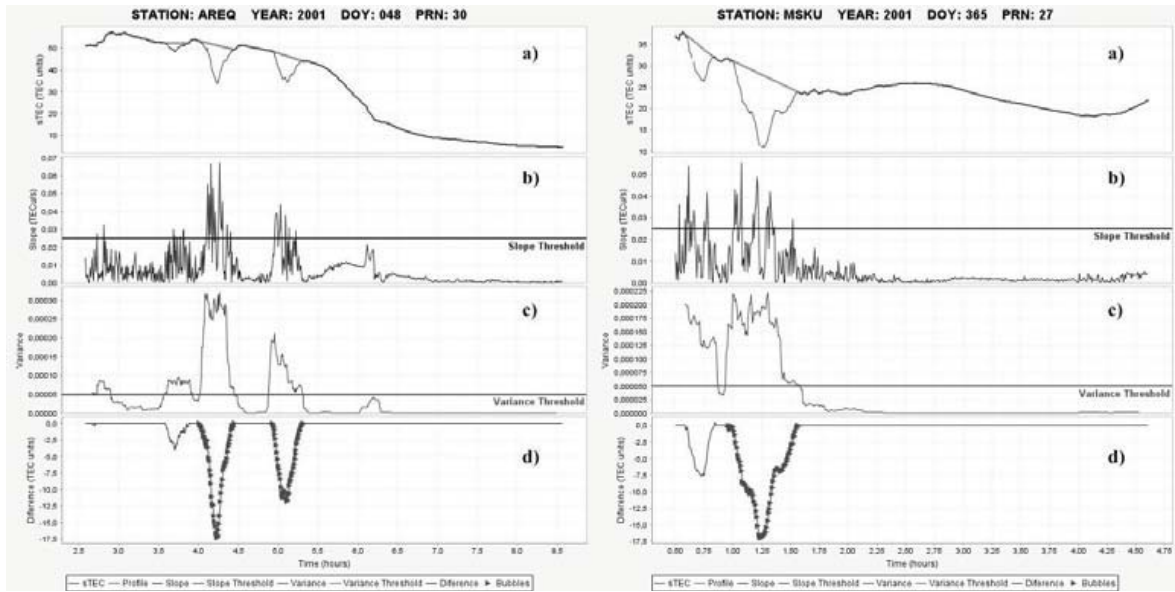


Figure 1. Results obtained by the IBS for the sTEC values calculated for the PRN 30 at Arequipa, Peru (AREQ), DOY 48, year 2001 (left) and the PRN 27 at Franceville, Gabon (MSKU), DOY 365, year 2001.

3.0 Data

The data selected have been obtained from the International GNSS Service (IGS). RINEX and SP3 files are available at the CISS data center (<ftp://cdis.gsfc.nasa.gov>). The stations are listed in table 1. Years 2000 and 2001, with yearly mean sunspot number 119.6 and 111 respectively, have been selected to analyze high solar activity condition due to the great number of IPB expected for this period. Stations used in this study are located between $+33^\circ$ to -21° of magnetic latitude and between -156° to $+147^\circ$ of geographic longitude.

STATION CODE	GEOGRAPHIC LONGITUDE	GEOGRAPHIC LATITUDE	MAGNETIC LATITUDE	DAYS ANALYZED	
				2000	2001
AREQ	-71.49	-16.47	-5.91	282	337
BAKO	106.85	-6.49	-16.7	231	276
BHR1	50.61	26.21	20.19	309	305
BRAZ	-47.88	-15.95	-6.44	279	295
CFAG	-68.23	-31.60	-20.99	336	352
GUAM	144.87	13.59	5.03	213	296
KOUR	-52.81	5.25	14.9	289	264
LAE1	146.99	-6.67	-14.31	--	348
LHAS	91.10	29.66	19.47	225	281
MALD	73.53	4.19	-4.42	307	220
MANA	-86.25	12.15	22.17	162	285
MAS1	-15.63	27.76	33.14	270	343
MKEA	-155.46	19.80	20.35	220	286
NKLG	9.67	0.35	2.05	247	345
SEY1	55.48	-4.67	-10.8	48	245
SLOR	-87.44	13.42	23.37	66	212
UNSA	-65.41	-24.73	-14.18	317	151
				3801	4841

Table 1. List of the stations and their coordinates used in this study.

Slant TEC values have been calculated from RINEX files using the technique developed by Brunini and Azpilicueta (2009). The elevation and azimuth of each satellite has been calculated from the IGS orbit files, SP3.

4.0 Results

The distribution of the stations along the world makes difficult to compare results between stations. A previous study of the IPB behavior is required. The first step followed in this study has been to analyze the latitudinal behavior that IPBs present for a similar geographic longitude.

4.1 Latitudinal behavior

As has been described before, the EIA plays an important role in the IPB formation. This anomaly creates an important electron density variation along the latitude. Once an IPB is formed, it moves along the magnetic field lines, implying a geomagnetic dependence. In this section we have studied the behavior of the IPB versus the inclination of the magnetic field (DIP), the modified dip (MODIP) and the magnetic latitude. These results have revealed that the parameter that better represents the distribution of the IPB is the magnetic latitude.

Stations with similar geographic longitude have been selected to analyze the latitudinal behavior of the EPB occurrence rate. Data from AREQ, CFAG, MANA, SLOR and UNSA stations measured during 2001 have been used to this study. These stations are inside a geographic longitude range of -88° – -65° .

The IPB occurrence rate for 2001 has been calculated from the IBS results and has been plotted against the magnetic latitude (figure 2). A Gaussian distribution has been found centered in the magnetic equator. This result agrees with those obtained for the plasma density measurements from the Republic of China Satellite (ROCSAT-1) by Burke et al. (2004).

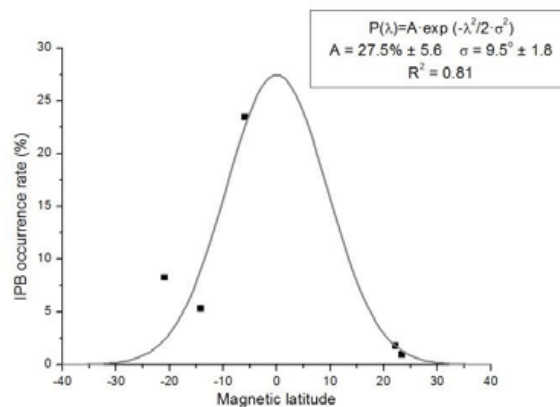


Figure 2. IPB occurrence rate for 2001 plotted against magnetic latitude for the stations located between -88° and -65° longitude. Gaussian fit is also plotted.

4.2 Longitudinal behavior

The longitudinal behavior of the IPB occurrence rate is clearly influenced by the latitudinal behavior of the IPB occurrence rate described before. This behavior indicates that to study the IPB occurrence rate, the stations selected must be at similar magnetic latitude.

To study the longitudinal behavior we have selected all the stations which magnetic latitude ranges between $\pm 14^\circ$ and $\pm 24^\circ$. It can be observed in figure 2 that this range has a latitudinal variation in the IPB occurrence lower than 10% and the EIA reaches the peaks of maximum ionization. The IPB occurrence rate of these stations for the years 2000 and 2001 has been represented against the geographic longitude in figure 3. It is noted that the maximum values of the occurrence are reached between -60° and $+60^\circ$, corresponding with the American-Atlantic-African sectors. This behavior agrees with previous studies with in-situ satellite measurements (Burke et al., 2004; Gentile et al., 2006a, b).

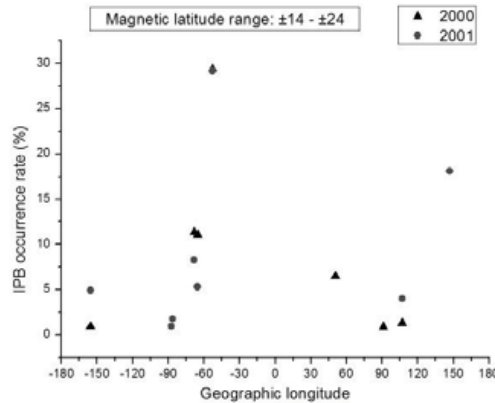


Figure 3. IPB occurrence rate for 2000 (triangles) and 2001 (circles) are represented against geographical longitude. Stations selected are located between $\pm 14^\circ$ and $\pm 24^\circ$. Maximum values could be noted between $+60^\circ$ and -60° corresponding to the American-Atlantic-African sectors.

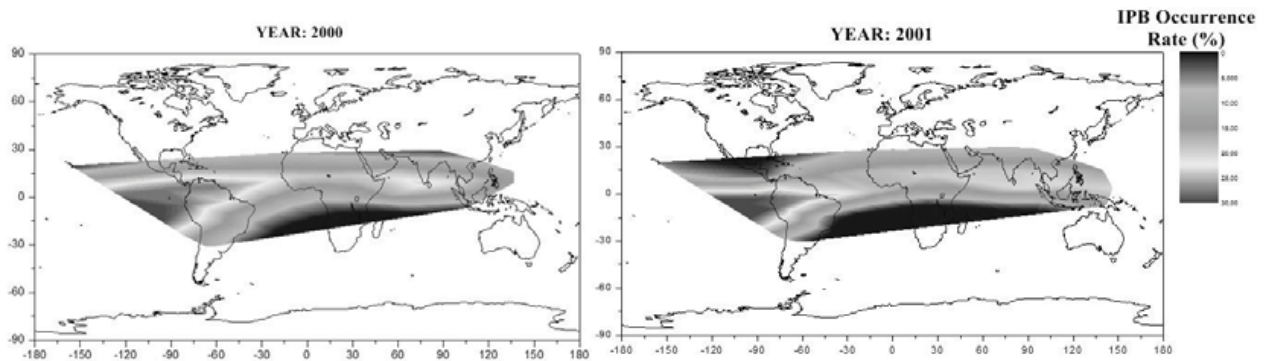


Figure 4. Representation of the IPB occurrence rate as a function of the geographical latitude and longitude for the years 2000 and 2001. Maximum values are located near the magnetic equator and in the American-Atlantic sector. A decrease with latitude is appreciated. Poor station coverage in the African sector can be noted.

The IPB occurrence rate for all the stations analyzed in this paper is plotted in a world map in figure 4. The latitudinal behavior in all the sectors reaches maximum values close to the magnetic equator and decreases with increasing latitude. Longitudinal behavior clearly has maximum values in the American-Atlantic sectors. The poor coverage in the African sector prevents the latitudinal behavior to be represented by a Gaussian function centered in the magnetic equator over that continent.

4.3 Monthly behavior

Gentile et al. (2006a, 2006b) described a seasonal variation in the IPB occurrence rate presenting dependence with the geographical latitude. Figure 5 shows the monthly IPB occurrence rate for different stations at different longitudinal sector in 2001 obtained in the present study. For the Pacific sector (top-left) we can find a maximum IPB occurrence in September-November and a weak occurrence in June-August. American and Atlantic sectors (top-middle and -right) show maximum values at the equinoxes and some activity can be observed in November-February. No IPB occurrence is found in May-August. African sector (bottom-left and -middle) presents IPB occurrence for all the months, reaching the maximum values during equinoxes. Maximum values of the IPB occurrence for the Asian sector (bottom-right) are found at the equinoxes while no IPB occurrence appears in May-August. These results are in agreement with those obtained by Gentile et al. (2006a, b).

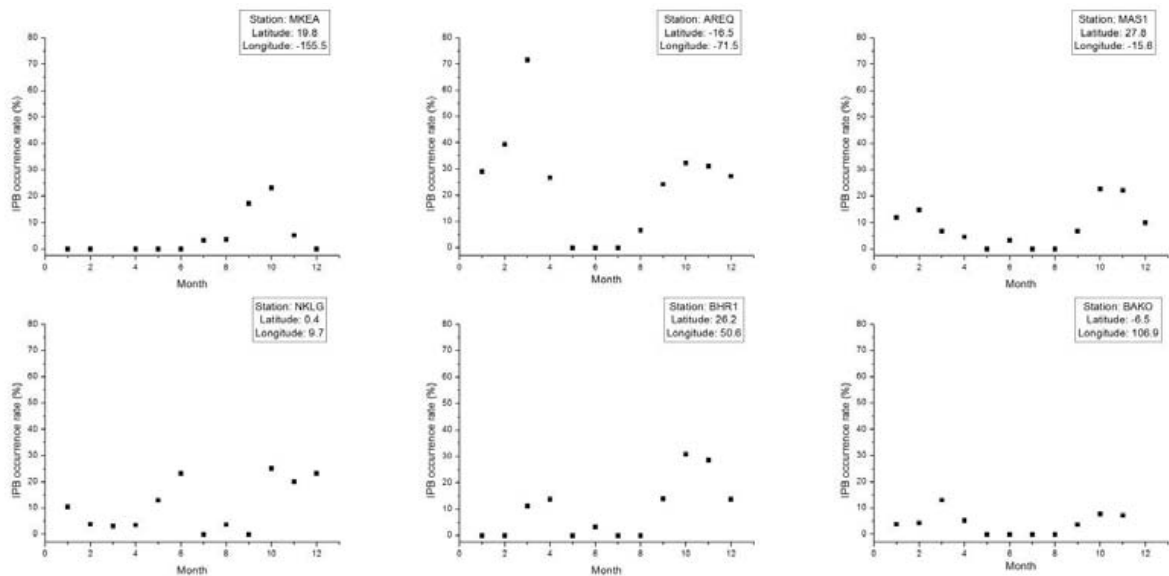


Figure 5. Monthly IPB occurrence rate for year 2001. Seasonal variation is described by maximum values of the IPB occurrence during equinoxes. Longitudinal variation is shown by stations located in different sectors: Pacific sector (top-left), American sector (top-middle), Atlantic sector (top-right), African sector (bottom-left and -middle) and Asian sector (bottom-right).

5.0 Summary and conclusions

Slant TEC, elevation and azimuth for different stations at low magnetic latitudes have been calculated using the method developed by Brunini and Azpilicueta (2009). IPBs have been detected using the technique implemented in the IBS program (Magdaleno et al., 2011). Latitudinal, longitudinal and monthly dependences for the IPB occurrence rate have been obtained. These dependences, obtained using GPS derived slant TEC, are in agreement with the results obtained from in-situ DMSP and ROCSAT-1 measurements (Burke et al., 2004; Gentile et al., 2006a and 2006b).

Acknowledgments

This work has been possible thanks to financial support granted by the National Institute for Aerospace Technology (INTA) and the Spanish project BSCH-UCM2009-910596. The authors wish to express their gratitude to the IGS project and the CDDIS for making the data available.

References

- Brunini, C., Azpilicueta, F., 2009, Accuracy assessment of the GPS-based slant total electron content (sTEC) *Journal of Geodesy*, doi 10.1007/s00190-008-0296-8.
- Burke, W. J., Gentile, L. C., Huang, C. Y., Valladares, C. E., Su, S. Y., 2004, Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1, *J. Geophys. Res.*, 109, A12301, doi:10.1029/2004JA010583.
- Ciraolo, L., Azpilicueta, F., Brunini, C., Meza, A., Radicella, S. M., 2007, Calibration errors on experimental slant total electron content determined with GPS. *J Geod* 81(2):111–120. doi:10.1007/s00190-006-0093-1.
- Davies, K., Hartmann, G. K., 1997, Studying the ionosphere with the global positioning system. *Radio Sci* 32(4):1695–1703. doi:10.1029/97RS00451.
- de Paula, E. R., Rodrigues, F. S., Iyer, K. N., Kantor, I. J., Abdu, M. A., Kintner, P. M., Ledvina, B. M., Kil, H., 2003. Equatorial anomaly effects on GPS scintillations in Brazil. *Advances in Space Research* 31, 749–754.
- Fejer, B. G., Scherliess, L., de Paula, E. R., 1999, Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F, *J. Geophys. Res.*, 104, 19,859–19,869.
- Gentile, L. C., Burke, W. J., Rich, F. J., 2006a, A global climatology for equatorial plasma bubbles in the topside ionosphere, *Ann. Geophys.*, 24, 163.
- Gentile, L.C., Burke, W. J., and Rich, F. J., 2006b, A climatology of equatorial plasma bubbles from DMSP 1989–2004, *Radio Sci.*, 41, RS5S21, doi:10.1029/2005RS003340.
- Hysell, D., Larsen, M., Swenson, C., Barjatya, A., Wheeler, T., Bullett, T., Sarango, M., Woodman R., 2006, Rocket and radar investigation of background electrodynamic and bottom-type scattering layers at the onset of equatorial spread F, *Ann. Geophys.*, 24(5), 1387– 1400.
- Kelley, M. C., 1989, *The Earth's Ionosphere, Plasma Physics and Electrodynamics*, Academic, San Diego, Calif.
- Magdaleno, S., Herraiz, M., Radicella, S. M., 2011, Ionospheric bubble seeker: a potential technique to detect and characterize ionospheric plasma depletions, *GPS Solutions*. (Submitted for publication)
- Makela, J. J., Miller, E. S., 2008, Optical observations of the growth and day-to-day variability of equatorial plasma bubbles, *J. Geophys. Res.*, 113, A03307, doi:10.1029/2007JA012661.
- Nishioka, M., Saito, A., Tsugawa, T., 2007, Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks, *J. Geophys. Res.*, 113, A05301, doi:10.1029/2007JA012605.
- Portillo, A., Herraiz, M., Radicella, S. M., Ciraolo, L., 2008, Equatorial plasma bubbles studied using African slant total electron content observations, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*, 70, 907-917.
- Sahai, Y., Abalde, J. R., Fagundes, P. R., Pillat, V. G., Bittencourt, J. A., 2006, First observations of detached equatorial ionospheric plasma depletions using OI 630.0 nm and OI 777.4 nm emissions nightglow imaging, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L11104, doi:10.1029/2005GL025262.

Xiong, C., Park, J., Lühr, H., Stolle, C., Ma, S.Y., 2010, Comparing plasma bubble occurrence rates at CHAMP and GRACE altitudes during high and low solar activity. *Annales Geophysicae*, 28, 1647-1658 DOI: 10.5194/angeo-28-1647-2010.

Yokoyama, T., Fukao, S., 2006, Upwelling backscatter plumes in growth phase of equatorial spread F observed with the Equatorial Atmosphere Radar, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08104, doi:10.1029/2006GL025680.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras
de investigación

Conclusions and future research

6.1. Conclusiones / Conclusions

A continuación se resumen las conclusiones extraídas de cada uno de los estudios presentados en los capítulos anteriores.

La primera parte de esta investigación se centra en el estudio de $hmF2$ y H_m . Para ello se ha utilizado datos tomados por una red de sondeadores verticales (e.g. ionogramas, ver Anexo I) distribuidos por todo el planeta. Estos datos han sido pre-procesados para obtener el comportamiento característico de $hmF2$ y H_m . Las principales conclusiones que extraemos de esta investigación son:

- El IRI representa bastante bien la variación diaria, estacional y con la actividad solar de $hmF2$. En latitudes medias, el IRI presenta las mejores estimaciones, ofreciendo una desviación del 10% la mayoría del tiempo. Sin embargo, las predicciones del IRI incluyen desviaciones de hasta el 40% para aquellas estaciones localizadas en latitudes altas y bajas. Las discrepancias encontradas en altas latitudes pueden explicarse porque el IRI no es un modelo auroral. Debido a que en altas latitudes hay una cobertura muy pobre de datos de ionosondas, que son la principal fuente de datos para el IRI, este modelo presenta una peor precisión (Bilitza and Reinisch, 2008). Por otro lado, en bajas latitudes, el IRI proporciona una buena estimación excepto el fuerte aumento de $hmF2$ antes de la salida y después de la puesta de Sol.
- Los estudios recientes se orientan a la modelización de la parte superior del perfil de densidad electrónica a través de la formulación α -Chapman con una altura de escala variable (e.g., Reinisch et al., 2007). Estos trabajos utilizan la altura de escala efectiva en $hmF2$, H_m , para relacionar las parte inferior y superior del perfil de densidad (Nsumei et al., 2010). A pesar de los numerosos esfuerzos realizados para la caracterización de H_m (e.g., Zhang et al., 2006; Nambala et al., 2008; Lee and Reinisch, 2007; Mosert et al., 2012), todavía no se ha presentado ningún modelo global de este parámetro.

- Se han generado tres modelos locales de $hmF2$ para tres estaciones localizadas en cada uno de los rangos de latitud analizados previamente con el IRI. Estos modelos locales, basados en un análisis de Fourier, se han generado a partir de perfiles medios mensuales tomados para todos los periodos de actividad solar. Este análisis ha mostrado una relación entre la variación diurna y estacional. Además, se ha obtenido una dependencia lineal con la actividad solar, caracterizada con el parámetro $Rz12$, promedio anual del número de manchas solares, con el fin de extender en el tiempo el modelo. El modelo para las latitudes medias no presenta una mejora significativa con respecto al IRI. Sin embargo, los modelos para altas y bajas latitudes reproducen las pequeñas estructuras mejor que el IRI. Comparando el error cuadrático medio, RMSE, del IRI y nuestros modelos para cada año y para todo el periodo estudiado concluimos que nuestros modelos empíricos ajustan mejor a los datos experimentales de $hmF2$ que el modelo IRI.
- Aplicando la metodología descrita por Altadill et al. (2009), basada en la técnica de armónicos esféricos, se han generado dos modelos globales, uno de $hmF2$ y otro de H_m . Estos modelos están compuestos de dos grupos de coeficientes de Gauss para modelar analíticamente $hmF2$ y H_m con funciones dependientes del tiempo en una superficie esférica. Los modelos se han parametrizado de acuerdo a su respectivo comportamiento espacio-temporal y los coeficientes presentan una dependencia de la actividad solar, representada por el número de manchas solares $Rz12$. El modelo de $hmF2$ consiste en 610 coeficientes, suficiente para modelar las pequeñas estructuras que el IRI no es capaz de representar, mientras que el de H_m consiste en 430 parámetros.
- La comparación entre las estimaciones del modelo global de $hmF2$ propuesto y el IRI con las observaciones experimentales muestra que nuestro modelo mejora las estimaciones del IRI, en general, en un 10%. Sin embargo, si comparamos las mejoras por latitudes vemos que el modelo de armónicos esféricos presenta una mejora, en promedio, del 10%, en altas latitudes y del 25% para bajas

latitudes, mientras que no hay una mejora significativa en latitudes medias. La mejora en latitudes bajas se debe principalmente a que el modelo propuesto reproduce algunas de las estructuras que el IRI no es capaz de modelar.

- La evaluación del modelo global de H_m se ha realizado en términos del RMSE y ha revelado una desviación del 10-15% con respecto a las observaciones experimentales. Estos resultados indican unas prestaciones muy razonables del modelo de armónicos esféricos de H_m para su potencial uso por la comunidad científica.
- Durante la reunión del IRI de Julio de 2012 se acordó la inclusión del modelo global de $hmF2$ en la próxima versión del IRI (Radio Science Bulletin, 2012).

La segunda parte de esta investigación se centra en el estudio de las irregularidades en la densidad electrónica que se producen en la zona ecuatorial. Para ello, se han utilizado datos procedentes de estaciones de la red IGS localizadas dentro de la anomalía ecuatorial. Estos datos, en formato RINEX (Anexo II), se han procesado para estimar el $sTEC$ utilizando la técnica descrita en Brunini and Azpilicueta (2009). Las principales conclusiones que extraemos de esta investigación son:

- Se ha desarrollado una nueva técnica de post-procesado para detectar y caracterizar los descensos de la densidad electrónica que constituyen las burbujas ionosféricas. Esta técnica se ha implementado en una aplicación Java que permite el procesado automático de múltiples ficheros. Además, proporciona estadísticas de los análisis facilitando el número de $EPBs$ detectadas, la duración y la profundidad, la distribución en el tiempo, tanto diaria como mensual, la distribución espacial y la probabilidad de pérdida de la señal por parte del receptor. Asimismo, la sensibilidad de la técnica permite la posibilidad de estudiar otras anomalías como las perturbaciones generadas por capas situadas por debajo de la ionosfera y por ondas de gravedad.
- Las burbujas de plasma ionosférico se originan entre las 19:00 y las 2:00h, LT, presentando la máxima ocurrencia entre las 21:00 y las 22:00h, LT. La mayor concentración de burbujas se localiza cerca

latitud magnética. Esta distribución de las burbujas confirma que la generación de las burbujas está ligada a la anomalía ecuatorial. Además, el número de burbujas generadas se incrementa con el aumento de la actividad solar.

- Por otro lado, se ha observado que la generación de las burbujas presenta un comportamiento estacional dependiente de la longitud. En el sector americano los descensos de plasma son más comunes entre los meses de Septiembre y Abril, mientras que entre los meses de Mayo y Agosto la presencia de burbujas es prácticamente nula. En el sector africano, la generación de anomalías de densidad de plasma es constante a lo largo del año, mostrando un pequeño pico en los meses de Abril y Septiembre. En el sector indio, la generación de burbujas está localizada en los meses equinocciales, con los máximos en los meses de Marzo y Octubre. En este sector también se generan burbujas de plasma entre los meses de Noviembre y Febrero, aunque en menor medida. Por último, en el sector del pacífico, los descensos de plasma se originan entre los meses de Febrero y Noviembre, presentando los valores máximos en los meses de Abril y Septiembre.
- Los análisis de la distribución espacial de la profundidad y duración de las burbujas han mostrado que los mayores descensos de plasma se localizan cerca del ecuador magnético.

Hereafter, the main conclusions of each of this thesis are summarized.

The first part of this research focuses on the study of $hmF2$ and H_m . For this purpose, data from a worldwide vertical sounders network (e.g., ionograms, see Anexo I) have been used. These data have been pre-processed in order to obtain the characteristic behavior of $hmF2$ and H_m . The main conclusions we draw from this research are:

- The main behavior of $hmF2$ representing the daily, seasonal and solar activity variations is quite well predicted by the IRI. At mid-latitudes, IRI predictions deviate by about 10% most of the time. However, the IRI prediction can report discrepancies as large as 40% at particular local time for high and low latitude stations. IRI discrepancies observed at high latitudes may be explained because IRI is a non-auroral latitudes model. High latitudes have poor ionosonde data coverage and as a result the IRI predictions, which are data-driven, are less accurate (Bilitza and Reinisch, 2008). On the other hand, at low latitudes, the IRI has a good agreement except for the sharp increasing of $hmF2$ at pre-sunrise and post-sunset times.
- Recent efforts for modeling the topside electron density profile go toward the α -Chapman formulation with varying scale height (e.g., Reinisch et al., 2007) and the effective scale height at the $hmF2$, H_m , may relate the topside with the bottomside formulation (Nsumei et al., 2010). Thus, one may estimate information of the topside by bottomside measurements and many efforts have been done to characterize the behavior of the H_m (e.g., Zhang et al., 2006; Nambala et al., 2008; Lee and Reinisch, 2007; Mosert et al., 2012) but neither an exhaustive analysis nor modeling at global scale have been done yet. We have presented also the analysis to the better knowledge and to the modeling of the quiet behavior of the H_m .
- $hmF2$ local models have been generated for the three stations located at different latitude ranges analyzed previously. These models, based on the Fourier analysis, have been obtained by using the average profiles for a given month and hour (Monthly Average

Representative Profiles, MARPs) obtained at three observatories at low, moderate and high solar activity periods. This analysis has yielded a relationship between diurnal and seasonal variations. In order to temporally extend the model, a linear dependence with the solar activity evaluated through the $Rz12$ parameter has been obtained. The model for mid-latitudes does not present significantly better accuracy than IRI. However, the models for high and low latitudes reproduce the fine structures better than IRI. The Root Mean Square Error (RMSE) corresponding to the estimations given by IRI and our models have been calculated at each observatory for both every single year and the whole period of study. The comparison indicates that our empirical models match the experimental average $hmF2$ values better than the IRI does.

- We have applied the same methodology as explained in Altadill et al. (2009) for modeling purposes which is based on the spherical harmonic (SH) technique, and obtained empirically two sets of Gauss coefficients to analytically model $hmF2$ and H_m by time dependent functions on a spherical surface. The SH models of $hmF2$ and H_m have been parameterized according to their respective time-space pattern and whose coefficients depend on the solar activity. The yearly average of the sunspot number ($Rz12$) has been selected as a proxy of the solar activity. The SH models of $hmF2$ and H_m consist of 610 and 430 coefficients respectively and the SH model of $hmF2$ is able to model finer structures compared to the current $hmF2$ model of the IRI.
- The comparison between the empirical model of $hmF2$ developed in this research and the IRI prediction with the experimental observation shows that the $hmF2$ model provides an average improvement of about 10% with regards to the IRI prediction. However, the comparison at different latitude regions indicates that the model of $hmF2$ improves the IRI prediction by 25% on average at low latitudes and by 10% in average at high latitudes in terms of RMSE, while no significant improvement is observed for mid-latitudes. Particularly, the SH model captures the significant rising of the $hmF2$ after sunrise and the prominent post-sunset uplifting

at low-latitudes whose small scale structure is not well modeled by the IRI.

- The analysis of the goodness of the SH model of H_m in terms of RMSE demonstrates that the model deviates of about 10–15% in relation to the experimental observations in average. The later results indicate a reasonable performance of the SH model of H_m and potential usefulness for the ionospheric community.
- During the IRI business meeting held on July 2012 was agreed to include the SH model of $hmF2$ as new option in the next version of IRI-2012 (Radio Science Bulletin, 2012).

The second part of this research is focused on the study of the electron density irregularities that are generated in the equatorial region. For that, data from IGS stations network located at the equatorial region have been used. $sTEC$ values have been estimated from these data, in RINEX format (Anexo II), using the technique developed by Brunini and Azpilicueta, (2009). The main conclusions we draw from this research are:

- A new post-processing technique to detect and characterize depletions from $sTEC$ values has been developed. This technique has been implemented in Java programming language to allow automating the process of multiple files. In addition, this application provides the number of EPBs detected, depth and duration, daily and monthly distribution and the loss-of-lock probability as statistics results. Furthermore, the sensibility of the method also allows studying other current topics related with the disturbances of the ionosphere from below as gravity waves.
- The generation of EPBs is presented between 19:00h and 2:00h, LT, with the greatest values between 21:00h and 22:00h, LT. The distribution of the EPBs has shown a dependency with the magnetic latitude with greater values close to the dip equator. In addition, it is shown that an increase of the solar activity provokes an increase of the occurrence EPBs rate.
- On the other hand, the distribution of the detected EPB shows a different EPB occurrence behavior depending on the longitudinal sector. In the American region, the occurrence rate is greater during equinoxes, with an important rate of EPBs during November-

February period but no *EPBs* were detected during May-August period. However, in the African region the *EPBs* are found during the whole year, with maximum *EPBs* detection values during the equinoxes. The Indian region presents a similar behavior than the American region, with the greatest *EPB* occurrence rate during equinoxes and no *EPBs* detected during May-August period, but, during November-February period, the *EPB* rate is lower than for the American region. Otherwise, the Pacific region also presents the maximum *EPBs* occurrence during the equinoxes, as the other regions. However, during May-August period, it is found a significant number of *EPBs* while during November-February period, *EPBs* are not found.

6.2. Líneas futuras de investigación / Future work lines

Los resultados obtenidos en esta Tesis proporcionan información de interés para la modelización climatológica de la ionósfera así como herramientas para analizar su comportamiento. En este sentido se han identificado las siguientes líneas de investigación:

- I. La inclusión del modelo de $hmF2$ desarrollado, en el modelo NeQuick en sustitución del CCIR. Se ha observado que el modelo de $hmF2$ presentado en este trabajo proporciona predicciones de $hmF2$ más precisas que el modelo CCIR, lo que aumentaría la precisión de las predicciones del NeQuick, especialmente a latitudes bajas.
- II. La mejora del modelo NeQuick permitiría la actualización del modelo de ionosfera utilizado por el sistema de navegación Galileo, aportando una mejor estimación de la influencia ionosférica y un incremento en las prestaciones de precisión.
- III. El uso del modelo de $hmF2$ en la estimación de las funciones de mapeo permitiría obtener una mayor precisión en la estimación del $vTEC$ a partir del $sTEC$, lo que mejoraría la estimación de los modelos globales de $vTEC$ ionosféricos (e.g. mapas ionex).
- IV. La evolución de la herramienta IBS para la modelización tridimensional de las burbujas ionosféricas a partir del análisis de estaciones cercanas.
- V. El uso de la caracterización de las burbujas en los sistemas SBAS, donde estas anomalías son una de las principales fuentes de error.

The results obtained in this thesis provide information of interest to the climatological ionospheric models and tools to analyze the ionospheric behavior. In this way, the following future work lines have been identified:

- I. To include the *hmF2* model in the NeQuick model instead of CCIR model. We have observed that the *hmF2* model here presented provides better predictions that CCIR does, which could improve NeQuick accuracy, especially at low latitudes.
- II. The improvement on the NeQuick model would allow the upgrade of the ionospheric model used by the Galileo Navigation system, providing a better estimation of the ionospheric contribution and increasing the accuracy performance.
- III. The usage of the *hmF2* model in the mapping functions in order to increase the accurate of the *vTEC* values calculated from *sTEC* values. This will improve the estimation of *vTEC* models (e.g., ionex maps).
- IV. The evolution of IBS tool in order to model *EPBs* in 3-D using information from close stations.
- V. The usage of the *EPBs* characterization in the SBAS systems, where these anomalies are one of the main error sources.



Capítulo 7

Referencias

- Adeniyi, J.O., D. Bilitza, D., Radicella, S.M., Willoughby, A.A., 2003. Equatorial F2-peak parameters in the IRI model. *Advances in Space Research*, 31, 507–512.
- Altadill, D., Torta, J.M., Blanch, E., 2009. Proposal of new models of the bottom-side B0 and B1 parameters for IRI. *Advances in Space Research*. 43, 1825– 1834.
- Altadill, D., **Magdaleno, S.**, Torta, J.M., Blanch, E., 2013. Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions. *Advances in Space Research*, Volume 52, Issue 10, Pages 1756–1769.
- Arbesser-Rastburg, B., 2006. The GALILEO single frequency ionospheric correction algorithm. 3rd European Space Weather Week, Brussels.
- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.V., 2002. STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model, 1, Model description. *Radio Science*, 37, 10.1029/ 2001RS002467.
- Beniguel, Y., IEEA, 2004. Global Ionospheric Scintillation Model (GISM) Technical Manual, v 5.1. ITU-R RP 257 2004-10-03.
- Bent, R.B., Llewellyn, S.K., Schmid, P.E., 1972. A Highly Successful Empirical Model for the Worldwide Ionospheric Electron Density Profile. DBA Systems, Melbourne, Florida.
- Bilitza, D., 1990. International Reference Ionosphere 1990. NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland.
- Bilitza, D., 1997. International Reference Ionosphere - Status 1995/96. *Advances in Space Research*, 20 (9), 1751-1754.
- Bilitza, D., 2001. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, 36(2), 261–275.
- Bilitza, D., Reinisch, B.W., 2008. International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters. *Advances in Space Research*, 42, 599–609.
- Bilitza, D., Sheikh, N.M., Eyfrig, R., 1979. A global model for the height of the F2-peak using M3000 values from the CCIR numerical map. *ITU Telecommunication Journal*, 46, 549–553.
- Bilitza, D., Huang, X., Reinisch, B.W., Benson, R., Hills, H.K., Schar, W.B., 2004. Topside Ionogram Scaler With True Height Algorithm (TOPIST): automated processing of ISIS topside ionograms. *Radio Science*, 39 (1), RS1S27.

- Brunini, C., Azpilicueta, F., 2009. Accuracy assessment of the GPS-based slant total electron content (sTEC). *Journal of Geodesy*, vol. 83, no. 8, pp. 773 – 785.
- Buonsanto, M.J., Starks, M.J., Titheridge, J.E., Richards, P.G., Miller, K.L., 1997. Comparison of techniques for derivation of neutral meridional winds from ionospheric data. *Journal of Geophysical Research*, 102, 14,477–14,484.
- Burke, W. J., Gentile, L.C., Huang, C.Y., Valladares, C.E., Su, S.Y., 2004. Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1. *Journal of Geophysical Research*, 109, A12301.
- CCIR, 1991. Atlas of ionospheric characteristics. Comité Consultatif International des Radio-communications, Report 340, International Telecommunication Union, Geneva.
- Cervera, M.A., Thomas, R.M., 2006. Latitudinal and temporal variation of equatorial ionospheric irregularities determined from GPS scintillation observations. *Annales Geophysicae*, 24, 3329–3341.
- Chapman, S., 1931. The absorption and dissociative or ionizing effect on monochromatic radiation in an atmosphere on rotating Earth. *Proc. Phys. Soc. (London)*, 43, 26-45.
- Coisson, P., Radicella, S.M., Leitinger, R., Nava, B., 2006. Topside electron density in IRI and NeQuick: features and limitations. *Advances in Space Research*, 37, 937–942.
- Di Giovanni, G., Radicella, S.M., 1990. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. *Advances in Space Research* 10 (11), 27–30.
- Dudeney, J.R., 1978. An improved model of the variation of electron concentration with height in the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 40, 195–203.
- Dudeney, J.R., 1983. The accuracy of simple methods for determining the height of the maximum electron concentration of the F2-layer from scaled ionospheric characteristics. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 45, 629–640.
- Dungey, J. W., 1956. Convective diffusion in the equatorial F-region. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 9, 304-310.
- Ehinlafa, O.E., Falaiye, O.A., Adeniyi, J.O., 2010. Comparison of observed hmF2 and IRI 2007 model with M(3000)F2 estimation of hmF2 at low solar activity for an equatorial station. *Advances in Space Research*, 46, 89–93.

- Farley, D.T., Bonelli, E., Fejer, B.G., Larsen, M.F., 1986. The pre-reversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 91, 13723-13728.
- Fejer, B.G., Scherliess, L., de Paula, E.R., 1999. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F, *Journal of Geophysical Research*, 104, 19859–19869.
- Gentile, L.C., Burke, W.J., Rich, F.J., 2006a. A global climatology for equatorial plasma bubbles in the topside ionosphere, *Annales Geophysicae*, 24, 163.
- Gentile, L.C., Burke, W.J., Rich, F.J., 2006b. A climatology of equatorial plasma bubbles from DMSP 1989–2004, *Radio Science*, 41, RS5S21, doi:10.1029/2005RS003340.
- Hargreaves, J.K., 1992. *The solar-terrestrial environment*, Cambridge University Press.
- Hatanaka, Y., 2008. A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data. *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 55, 21-30.
- Hochegger, G., Nava, B., Radicella, S.M., Leitinger, R., 2000. A Family of Ionospheric Models for Different Uses. *Physics and Chemistry of The Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 25(4), 307-310.
- Huang, X., Reinisch, B.W., 1996a. Vertical electron profiles from the Digisonde network. *Advances in Space Research*, 18 (6), 121–129.
- Huang, X., Reinisch, B.W., 1996b. Vertical electron density profiles from Digisonde ionograms: The average representative profile. *Annali di Geofisica*, 39 (4), 751–756.
- Huang, X., Reinisch, B.W., 2001. Vertical electron content from ionograms in real time. *Radio Science*, 36(2), 335–342.
- Huang, C.Y., Burke, W.J., Machuzak, J.S., Gentile, L.C., Sultan, P.J., 2001. DMSP observations of equatorial plasma bubbles in the topside ionosphere near solar maximum. *Journal of Geophysical Research*, 106 (A5), 8131–8142.
- Hunsucker, R.D., Hargreaves, J.K., 2003. *The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation*. Cambridge University Press, Cambridge.
- ITU-R, 2003. *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems Recommendation P. 531-7*, Geneva.
- ITU-R, 2009. *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems. Recommendation P. 531-10*, Geneva.

- Jones, W.B., Gallet, R.M., 1962. The Representation of Diurnal and Geographic Variations of Ionospheric Data by Numerical Methods, ITU Telecommunication Journal, 29, 129.
- Jones, W.B., Gallet, R.M., 1965. The Representation of Diurnal and Geographic Variations of Ionospheric Data by Numerical Methods, ITU Telecommunication Journal, 32, 18.
- Kelley, M.C., 1989. The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics. Academic Press, 484p, San Diego.
- Kelley, M.C., 2009. The Earth Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics. International geophysics series, v. 96.
- Klobuchar, J.A., 1987. Ionospheric Time- Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 23 (3), 325-332.
- Kutiev, I., Marinov, P., Belehaki, A., Reinisch, B.W., Jakowski, N., 2009. Reconstruction of topside density profile by using the topside sounder model profiler and digisonde data. Advances in Space Research, 43, 1683–1687.
- Lee, C.C., Reinisch, B.W., 2007. Quiet-condition variations in the scale height at the F2-layer peak at Jicamarca during solar minimum and maximum. Annales Geophysicae, 25, 2541–2550.
- Lee, C.C., Reinisch, B.W., Su, S.-Y., Chen, W.S., 2008. Quiet-time variations of F2-layer parameters at Jicamarca and comparison with IRI-2001 during solar minimum. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 70, 184–192.
- Li, G., Ning, B., Liu, L., Wan, W., Liu, J.Y., 2009. Effect of magnetic activity on plasma bubbles over equatorial and low-latitude regions in East Asia. Annales Geophysicae, 27, 303–312.
- Magdaleno, S.**, Herraiz, M., Radicella, S.M., 2011. Ionospheric Bubble Seeker: a Java application to detect and characterize ionospheric plasma depletion from GPS data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume 50, Issue 5, 1719-1727.
- Magdaleno, S.**, Herraiz, M., Morena, B.A. de la, 2012. Characterization of equatorial plasma depletions detected from derived GPS data in South America. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 74, 136–144.
- Magdaleno, S.**, Radicella, S.M., Herraiz, M., 2011. Longitude characterization of GPS derived TEC depletions using a post-processing automatic technique.

- In: Proceedings of 13th International Ionospheric Effects Symposium IES2011. Alexandria, USA.
- Magdaleno, S.**, Altadill, D., Herraiz, M., Blanch, E., de la Morena, B.A., 2011. Ionospheric peak height behavior for low, middle and high latitudes: A potential empirical model for quiet conditions – Comparison with IRI2007 model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 1810–1817.
- Misra, P., Enge, P., 2006. *Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance*, 2nd edition. Ganga-Jamuna Press, ISBN 0-9709544-1-7.
- Morena, B. de la, Torta, J.M., Herraiz, M., 2014. Libro blanco. Geomagnetismo y Aeronomía, Eds., INTA.
- Mosert de Gonzales, M., Radicella, S.M., 1990. On a characteristic point at the base of F2 layer in the ionosphere. *Advances in Space Research* 10 (11), 17–25.
- Mosert, M., Buresova, D., Magdaleno, S., Morena, B. de la, Altadill, D., Ezquer, R.G., Scidae, L., 2012. An analysis of the scale height at the F2-layer peak over three middle latitude stations in the European sector. *Earth, Planets and Space*, 64, 493–503.
- Nambala, F.J., McKinnell, L.-A., Oyeyemi, E., 2008. Variations in the ionospheric scale height parameter at the F2 peak over Grahamstown, South Africa. *Advances in Space Research*, 42, 707–711.
- Nava, B., Coisson, P., Radicella, S.M., 2008. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1856-1862.
- Nava, B., Radicella, S.M., Azpilicueta, F., 2011. Data ingestion into NeQuick 2. *Radio Science*, 46, RS0D17.
- Nishioka, M., Saito, A., Tsugawa, T., 2008. Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks. *Journal of Geophysical Research* 113, A05301.
- Nsumei, P.A., Reinisch, B.W., Huang, X., Bilitza, D., 2010. Comparing topside and bottomside-measured characteristics of the F2 layer peak. *Advances in Space Research*, 47, 974–983.
- Obrou, O.K., Bilitza, D., Adeniyi, J.O., Radicella, S.M., 2003. Equatorial F2-layer peak height and correlation with vertical ion drift and M(3000)F2. *Advances in Space Research*, 31, 513–520.

- Oyeyemi, E.O., Mckinnell, L.A., Poole, A.W.V., 2007. Neural network-based prediction techniques for global modeling of M(3000)F2 ionospheric parameter. *Advances in Space Research*, 39 (5), 643–650.
- Oyeyemi, E.O., Adewale, A.O., Adeloye, A.B., Akala, A.O., 2010. Comparison between IRI-2001 predictions and observed measurements of hmF2 over three high latitude stations during different solar activity periods. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72, 676–684.
- Portillo, A., Herraiz, M., Radicella, S.M., Ciralo, L., 2008. Equatorial plasma bubbles studied using African slant total electron content observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, 907–917.
- Radicella, S.M., 2009. The NeQuick model genesis, uses and evolution. *Annals of geophysics*, vol. 52, N. 3/4.
- Radicella, S.M., Zhang, M.L., 1995. The improved DGR analytical model of electron density height profile and total electron content in the ionosphere. *Annali di Geofisica*, 38 (1), 35–41.
- Radicella, S.M., Leitinger, R., 2001. The evolution of the DGR approach to model electron density profiles. *Advances in Space Research*, 27 (1), 35–40.
- Radio Science Bulletin, No 343, 2012. URSI.
- Ram, S., Tulasi, S.Y., Su, C., Liu, H., Reinisch, B.W., McKinnell, L.-A., 2009. Topside ionospheric effective scale heights (HT) derived with ROC- SAT-1 and ground-based ionosonde observations at equatorial and mid-latitude stations. *Journal of Geophysical Research*, 114, A10309.
- Ratcliffe, J.A., 1960. *Physics of the Upper Atmosphere*. Academic Press, New York.
- Ratcliffe, J.A., 1972. *An introduction to the ionosphere and magnetosphere*. Cambridge University Press.
- Rawer, K., 1963. *Meteorological and astronomical influences on radio wave propagation* (edited by B. Landmark), 221-250, New York Academic Press.
- Rawer, K., 1982. Replacement of the present sub-peak plasma density profile by a unique expression. *Advances in Space Research*, 2 (10), 183–190.
- Rawer, K., Ramakrishnan, S., Bilitza, D., 1978. *International Reference Ionosphere 1978*. International Union of Radio Science, URSI Special Report, 75 pp., Bruxelles, Belgium.
- Reinisch, B.W., Galkin, I.A., Khmyrov, G., Kozlov, A., Kitrosser, D.F., 2004. Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network. *Advances in Radio Science*, 2, 241–247.

- Reinisch, B.W., Nsumei, P., Huang, X., Bilitza, D.K., 2007. Modeling the F2 Topside and Plasmasphere for IRI Using IMAGE/RPI and ISIS Data. *Advances in Space Research*, 39 (5), 731–738.
- Rush, C.M., Fox, M., Bilitza, D., Davies, K., McNamara, L., Stewart, F.G., Pokempner, M., 1989. Ionospheric mapping: an update of foF2 coefficients. *ITU Telecommunication Journal*, 56, 179–182.
- RTCA-MOPS DO-229D, 2006. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment.
- Sethi, N.K., Dabas, R.S., Vohra, V.K., 2004. Diurnal and seasonal variations of hmF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001. *Annales Geophysicae*, 22, 453–458.
- Sethi, N.K., Dabas, R.S., Sharma, K., 2008. Comparison between IRI predictions and digital ionosonde measurements of hmF2 at New Delhi during low and moderate solar activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, 756–763.
- Shimazaki, T., 1955. World wide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric F2 layer, *Journal of the Radio Research Laboratory*, 2, 85–97.
- Stolle, C., Luhr, H., Rother, M., Balasis, G., 2006. Magnetic signatures of equatorial spread F as observed by the CHAMP satellite. *Journal of Geophysical Research*, 111, A02304.
- Valladares, C.E., Villalobos, J., Sheehan, R., Hagan, M.P., 2004. Latitudinal extension of low-latitude scintillations measured with a network of GPS receivers. *Annales Geophysicae*, 22, 3155–3175.
- Valladares, C.E., Meriwether, J.W., Sheehan, R., Biondi, M.A., 2002. Correlative study of neutral winds and scintillation drifts measured near the magnetic equator. *Journal of Geophysical Research*, 107, A7, 1112, doi:10.1029:2001JA000042.
- Zhang, M.L., Shi, J.K., Wang, X., Shang, S.P., Wu, S.Z., 2007. Ionospheric behavior of the F2 peak parameters foF2 and hmF2 at Hainan and comparisons with IRI model predictions. *Advances in Space Research*, 39 (5), 661–667.
- Zhang, M.L., Reinisch, B.W., Shi, J.K., Wu, S.Z., Wang, X., 2006. Diurnal and seasonal variation of the ionogram-derived scale height at the F2 peak. *Advances in Space Research*, 37, 967–971.

Zimmermann, F., Haak, T., Steindl, E., Vardarajulu, S., Kalden, O., 2005. Generating Galileo Raw Data – Approach and Application, presented at Data Systems in Aerospace (DASIA), Edinburgh (Scotland).

Páginas web referenciadas

<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/>

<http://irimodel.org/>

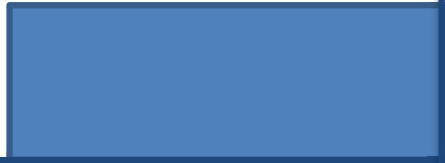
<http://t-ict4d.ictp.it/nequick2>

<http://www.gps.gov/>

<http://glonass-iac.ru>

<http://www.russianspaceweb.com/glonass.html>

<http://www.atmos.albany.edu>



Anexos



Anexo I - Ionosondas e Ionogramas

Las ionosondas son instrumentos para medir la estructura vertical de la ionosfera proporcionando perfiles de densidad en función de la altura. La técnica de medida está basada en enviar pulsos electromagnéticos a diferentes frecuencias, generalmente en un rango de 0 MHz a 30 MHz, hacia la ionosfera, medir el retardo del eco y de esta forma evaluar las posiciones de las capas de la ionosfera. El producto final de un sondeo vertical es el ionograma, que es la representación de la altura virtual correspondiente al retardo del eco vs la frecuencia. La Figura A1-1 muestra la relación entre las principales características ionosféricas y el ionograma.

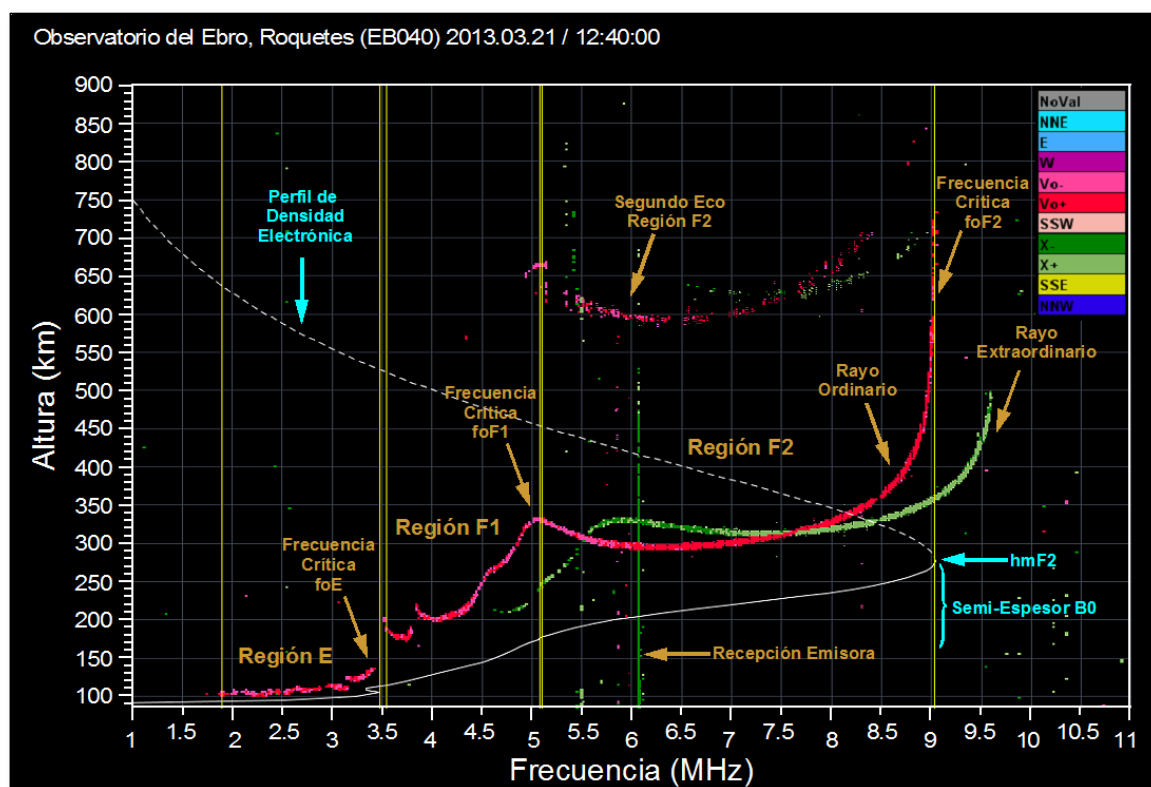


Figura A1-1: Ionograma obtenido en el Observatorio del Ebro. Se indican las principales características de la ionosfera que se pueden extraer del mismo. Figura extraída de Morena et al. 2014.

En un medio ionizado, sin presencia de un campo magnético, el índice de refracción se expresa:

$$n^2 = 1 - \frac{f_N^2}{f^2} \quad A1-1.$$

donde f^2 corresponde a la frecuencia emitida por la ionosonda y f_N es la frecuencia del plasma, que se relaciona con la densidad del plasma mediante la siguiente expresión:

$$f_N [Hz] = \sqrt{80.8 \cdot N \left[\frac{e^-}{cm^3} \right]} \quad A1-2.$$

De acuerdo con la Figura 2-2, la densidad electrónica aumenta con la altura y, por consiguiente, el índice de refracción disminuye. Cuando la frecuencia de la onda electromagnética y la frecuencia del plasma son iguales, $f = f_N$, la onda se refleja. A medida que aumenta la frecuencia de la onda emitida por la ionosonda, la onda alcanza capas más altas de la ionosfera hasta que la frecuencia emitida se iguala a la frecuencia crítica de cada una de las capas, f_0 , relacionada con la máxima densidad de plasma de cada capa. Una vez medido el retraso de la señal y considerando que la señal se propaga a la velocidad de la luz, se puede estimar la altura a la cual la señal se ha reflejado. Esta altura se conoce como “altura virtual”, pues la onda no se propaga a la velocidad de luz, sino a la velocidad $v = \frac{c}{n}$, siendo c la velocidad de la luz y n el índice de refracción (Hargreaves, 1992). Huang and Reinisch (1996a) describen una de las técnicas utilizadas para obtener la altura real en la que se ha producido la reflexión a partir del tiempo de retardo del eco de la onda.

En la Tabla A1-1 se indican las principales características que se extraen de un ionograma.

Tabla A1-1: Principales características ionosféricas.

f_0F2	Frecuencia crítica de la capa $F2$
f_0F1	Frecuencia crítica de la capa $F1$
f_0E	Frecuencia crítica de la capa E
$f \text{ min}$	Frecuencia mínima de la onda electromagnética reflejada
$h'F2$	Altura virtual mínima de la capa $F2$. $h'F2 = h'F$ durante la noche
$h'F$	Altura virtual mínima de la región F . $h'F = h'F1$ durante el día.
$h'E$	Altura virtual mínima de la capa E
f_0E_s	Frecuencia crítica de la capa E esporádica
$hmF2$	Altura del pico de máxima densidad de la capa $F2$
$hmF1$	Altura del pico de máxima densidad de la capa $F1$
hmE	Altura del pico de máxima densidad de la capa E
TEC	Contenido Total de Electrones
$MUF(D)$	Frecuencia máxima utilizable para una distancia D
H_m	Altura de escala en $hmF2$

Anexo II - Formato RINEX

El formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) es el estándar utilizado en navegación para el almacenamiento de la información proveniente de los satélites. Los receptores registran las señales procedentes de los satélites y los almacenan en ficheros ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). El formato RINEX consiste en tres archivos ASCII que proporcionan diferente información:

- Fichero datos observados
- Fichero mensaje de navegación
- Fichero datos meteorológicos

El nombre de los ficheros ASCII proporciona información sobre el contenido y la procedencia de la información de cada fichero. La estructura del nombre los ficheros RINEX viene dada como

XXXXDDDF.YYT

donde:

XXXX, código de cuatro caracteres de la estación

DDD, día del año (DOY, *day of year*) del primer dato grabado

F, secuencia del día grabado:

Fichero diario: F=0

Ficheros horarios: F=a, primera hora del día (00:00-01:00)

F=b, segunda hora del día (01:00-02:00)

...

F=x, última hora del día (23:00-00:00)

YY, año (dos últimos dígitos)

T, tipo de fichero:

O: fichero con los observables

D: fichero con los observables comprimido con el formato desarrollado por Hatanaka (Hatanaka, 2008)

N: fichero con el mensaje de navegación GPS

M: fichero con datos meteorológicos

G: fichero con el mensaje de navegación GLONASS

L: fichero con el mensajes de navegación Galileo

- P: fichero con el mensaje de navegación GNSS mixto
- H: fichero con el mensaje de navegación SBAS
- B: fichero con los datos emitidos por SBAS
- C: fichero del reloj
- S: fichero resumen (no es estándar)

En la Figura A2-1 se muestra el contenido de un fichero RINEX con los datos observables. Se puede observar como el fichero se inicia con una cabecera donde se da información acerca del tipo de fichero, fecha, institución que ha proporcionado los datos, modelo de receptor, comentarios, intervalo entre observables, características de los observables que proporciona, etc.

Los datos empiezan con la época de la medida (año, mes, día, hora, minuto y segundo), el número de satélites visibles en esa época, el número del satélite (PRN) y la constelación a la que pertenece (G – GPS, E – Galileo, R – GLONASS, etc.). Después de un salto de línea se listan, para cada satélite, el valor de los observables ordenados según está indicado en la cabecera (si no se tiene medida de un observable se deja el hueco en blanco).

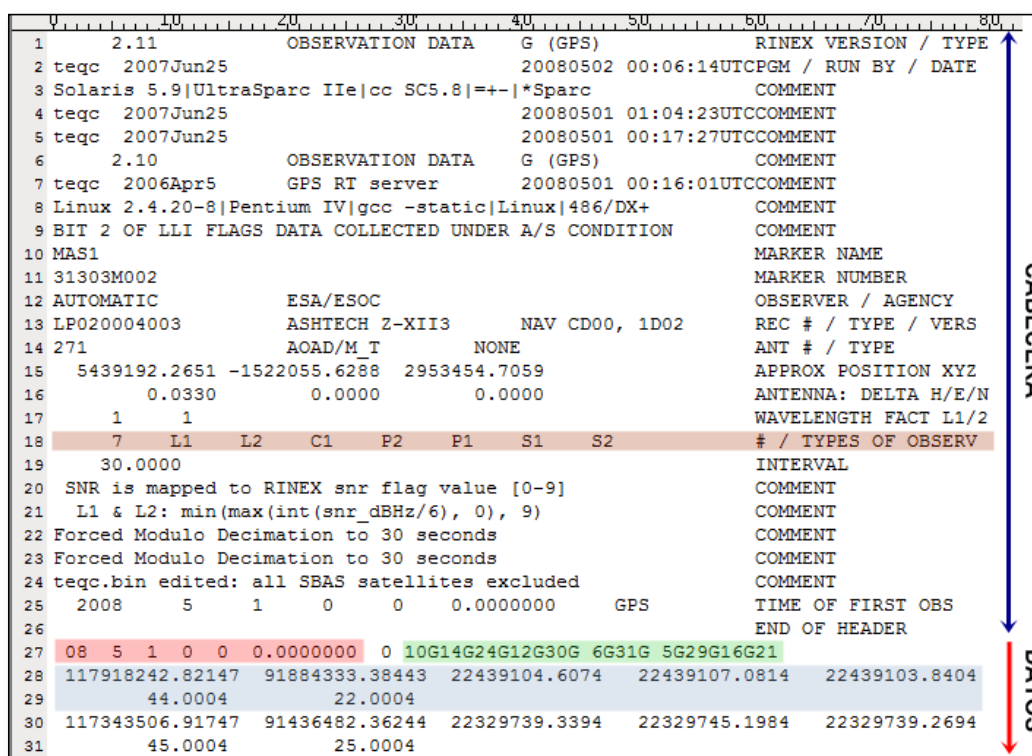


Figura A2-1: Ejemplo de fichero RINEX con datos de los observables para la estación MAS1, situada en Maspalomas (Islas Canarias), para el día 1 de Mayo de 2008. Para facilitar su visualización se han destacado los observables medidos (marrón), la época (rojo), los satélites (verde) y el valor de los observables para un satélite en una época (azul).

Anexo III - Función de Fourier

La expansión en series de Fourier de una señal periódica de periodo T_0 consiste en expresar la señal como una serie infinita de sumas de funciones seno y coseno

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi \cdot x}{T_0} + b_n \sin \frac{n\pi \cdot x}{T_0} \right) \quad A3-1.$$

donde los coeficientes a_n y b_n representan las amplitudes de las funciones coseno y seno, respectivamente.

El cálculo del término independiente a_0 se obtiene

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(x) dx \quad A3-2.$$

Debido a que cada una de las funciones senos y cosenos son funciones base y, por tanto, forman un conjunto ortogonal en el intervalo T_0 , satisfacen las siguientes relaciones:

$$\int_0^{T_0} \cos \frac{m\pi x}{T_0} \cos \frac{n\pi x}{T_0} dx = \begin{cases} T_0 / 2 & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases} \quad A3-3.$$

$$\int_0^{T_0} \cos \frac{m\pi x}{T_0} \sin \frac{n\pi x}{T_0} dx = 0 \quad \forall m, n \quad A3-4.$$

$$\int_0^{T_0} \sin \frac{m\pi x}{T_0} \sin \frac{n\pi x}{T_0} dx = \begin{cases} T_0 / 2 & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases} \quad A3-5.$$

Utilizando estas identidades se pueden calcular los coeficientes a_n y b_n utilizando las siguientes expresiones:

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(x) \cos \frac{n\pi x}{T_0} dx \quad A3-6.$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(x) \sin \frac{n\pi x}{T_0} dx \quad A3-7.$$

Anexo IV - Armónicos Esféricos

Se definen los armónicos esféricos como aquellas funciones armónicas que representan la variación espacial de un conjunto ortogonal de soluciones de la ecuación de Laplace en coordenadas esféricas.

Se escribe la ecuación de Laplace en coordenadas esféricas como:

$$\nabla^2 f = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial \phi^2} = 0 \quad A4-1.$$

Considerando la función f en dos partes, la radial (r) y la angular (θ, ϕ) podemos escribir la solución como:

$$f(r, \theta, \phi) = R(r) Y_l^m(\theta, \phi) \quad A4-2.$$

donde la función Y_l^m es denominada función armónica esférica de grado l y orden m . La solución de esta función es periódica, depende de los números enteros (l, m) , y viene definida por funciones trigonométricas y por los polinomios asociados de Legendre:

$$Y_l^m(\theta, \phi) = N e^{im\phi} P_l^m(\cos \theta) \quad A4-3.$$

donde N es una constante de normalización y P_l^m son los polinomios asociados de Legendre definidos como:

$$P_l^m(\cos \theta) = \frac{(-1)^m}{l! \cdot 2^l} (1 - \cos^2 \theta)^{m/2} \frac{d^{l+m}}{d(\cos \theta)^{l+m}} \left[(\cos^2 \theta - 1)^l \right] \quad A4-4.$$

La Figura A4-1 muestra la representación de los armónicos esféricos en la superficie de una esfera.

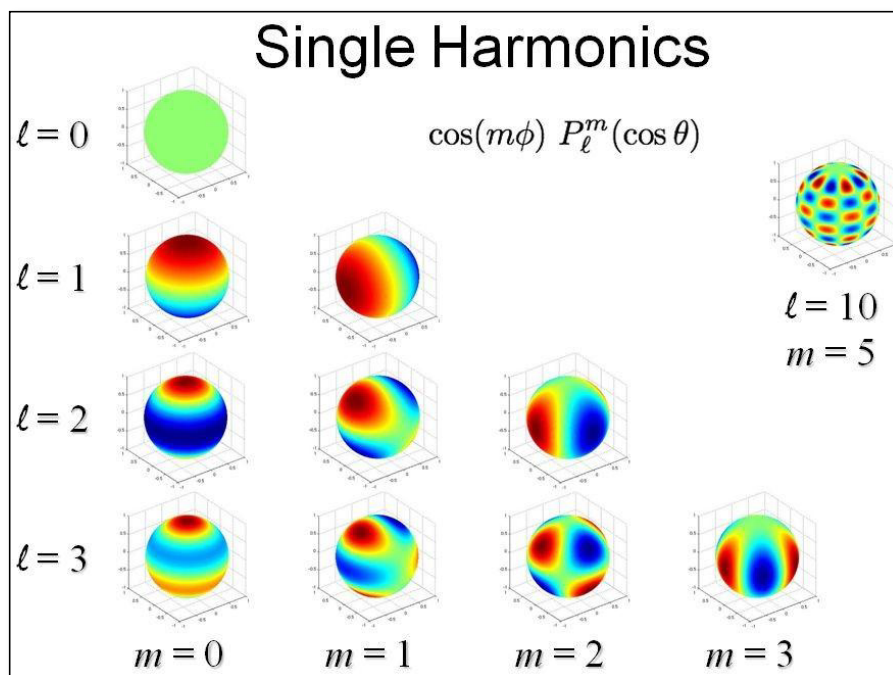


Figura A4-1: Representación de los armónicos esféricos en la superficie de una esfera.
Figura obtenida de <http://www.atmos.albany.edu>.

Anexo V – Contribuciones científicas

El contenido de esta tesis doctoral ha dado lugar a diferentes publicaciones científicas así como a la presentación de los principales resultados de esta tesis doctoral en diferentes congresos.

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

Altadill, D., **Magdaleno, S.**, Torta, J.M., Blanch, E., 2013. Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions. *Advances in Space Research*, Volume 52, Issue 10, Pages 1756–1769.

Kutiev, I., Tsagouri, I., Perrone, L., Pancheva, D., Mukhtarov, P., Mikhailov, A., Lastovicka, J., Jakowski, N., Buresova, D., Blanch, E., Andonov, B., Altadill, D., **Magdaleno, S.**, Parisi, M., Torta, J.M., 2013. Solar activity impact on the earth's upper atmosphere, *Journal of Space Weather Space Climate*, 3, A06,

Magdaleno, S., Herraiz, M., Radicella, S.M., 2011. Ionospheric Bubble Seeker: a Java application to detect and characterize ionospheric plasma depletion from GPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 50, Issue 5, 1719-1727.

Magdaleno, S., Herraiz, M., de la Morena, B.A., 2012. Characterization of equatorial plasma depletions detected from derived GPS data in South America. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 74, 136-144.

Magdaleno, S., Herraiz, M., Altadill, D., de la Morena, B., 2014. Climatological characterization of plasma depletions using GPS data. *Journal Geophysical Research Letters*. En preparación.

Magdaleno, S., Altadill, D., Herraiz, M., Blanch, E., de la Morena, B., 2011. Ionospheric peak height behavior for low, middle and high latitudes: A potential empirical model for quiet conditions – Comparison with IRI2007 model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 1810–1817.

Magdaleno, S., Cueto, M., Herraiz, M., Rodríguez-Caderot, G., Sardón, E., Rodríguez, I, 2013. Ionospheric bubbles detection algorithms: Analysis in low latitudes, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 95-96, pp. 65-77.

Mosert, M., **Magdaleno, S.**, Buresova, D., Altadill, D., Gende, M., Gularte, E., Scida, L., 2013. Behavior of the equivalent slab thickness over three European stations. *Advances in Space Research*, 51, 677–682.

Mosert, M., Buresova, D., **Magdaleno, S.**, Morena, B. de la, Altadill, D., Ezquer, R.G., Scidae, L., 2012. An analysis of the scale height at the F2-layer peak over three middle latitude stations in the European sector. *Earth, Planets and Space*, 64, 493–503.

PROCEEDINGS

M. Cueto, **S. Magdaleno**, A. Cezón and E. Sardón. Characterization of Equatorial Ionospheric Features on the verge of the Next Solar Cycle Maximum. 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2012, ION GNSS 2012, 4, PP. 2709 – 2721.

M. Cueto, **S. Magdaleno**, A. Cezón and E. Sardón. Equatorial Ionosphere on the verge of the next solar cycle maximum: Characterization and system/service/user perspective. *Proceedings of Beacon Satellite Symposium*, Bath, 2013.

Magdaleno, S., Radicella, S.M., Herraiz, M., 2011. Longitude characterization of GPS derived TEC depletions using a post-processing automatic technique. In: *Proceedings of 13th International Ionospheric Effects Symposium IES2011*. Alexandria, USA.

Magdaleno, S., Cueto, M., Cezón, A., Sardón, E., 2013. Characterization of the Equatorial Ionosphere during the Ascending Phase of Solar Cycle 24. *Proceedings of 4th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme*, Prague.

CONGRESOS INTERNACIONALES

Presentación: Comunicación Oral

S. Magdaleno, M. Cueto, A. Cezón and E. Sardón.

Título: Characterization of the Equatorial Ionosphere during the Ascending Phase of Solar Cycle 24.

Fecha: 4-6 Diciembre 2013

Congreso: 4th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, Praga, República Checa.

Presentación: Comunicación Oral

M. Cueto, **S. Magdaleno**, A. Cezón and E. Sardón.

Título: Equatorial Ionosphere on the verge of the next solar cycle maximum: Characterization and system/service/user perspective.

Fecha: 8-12 Julio 2013

Congreso: Beacon Satellite Symposium, Bath, Reino Unido.

Presentación: Póster

Blanch, E., Altadill, D., Torta, J. M., **Magdaleno, S.**

Título: Advances on the real time Forecasting Tool for hmF2 coupling quiet and disturbance hmF2 Models.

Fecha: 5 – 9 Noviembre 2012.

Congreso: 9th European Space Weather Week, Bruselas, Bélgica.

Presentación: Comunicación Oral. (splinter)

Blanch, E., Altadill, D., Torta, J. M., **Magdaleno, S.**

Título: ionospheric forecast

Fecha: November 5 - 9, 2012.

Congreso: 9th European Space Weather Week, Bruselas, Bélgica.

Presentación: Comunicación Oral

M. Cueto, **S. Magdaleno**, A. Cezón and E. Sardón.

Título: Characterization of Equatorial Ionospheric Features on the verge of the Next Solar Cycle Maximum.

Fecha: 19 Septiembre 2012

Congreso: 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2012, ION GNSS 2012. Nashville, Tennessee, Estados Unidos de América.

Presentación: Comunicación Oral.

Mosert, M., M. Gende, D. Altadill, D. Buresova, **S. Magdaleno**, B.de la Morena, E. Gularte, and R. G. Ezquer

Título: Behaviour of the total electron content over three European stations

Fecha: 10-14 de Octubre, 2011.

Congreso: International Reference Ionosphere (IRI) Workshop 2011; Hermanus, South Africa.

Presentación: Comunicación Oral

Magdaleno, S., D. Altadill, J. M. Torta, and E. Blanch

Título: Global empirical models for the density peak height and the scale height for quiet conditions.

Fecha: 10-14 de Octubre, 2011

Congreso: International Reference Ionosphere (IRI) Workshop 2011; Hermanus, South Africa.

Presentación: Comunicación Oral.

Mosert, M., D. Altadill, M. Gende, C. Brunini, A. J. Costa, L. Scida, and **S. Magdaleno**

Título: Variations of GPS TEC over the Antarctic region.

Fecha: 10-14 de Octubre, 2011.

Congreso: International Reference Ionosphere (IRI), Workshop 2011; Hermanus, South Africa.

Presentación: Comunicación Oral

S. Magdaleno, S. M. Radicella, M. Herraiz

Título: Longitude characterization of GPS derived TEC depletions using a post-processing automatic technique.

Fecha: 17-19 Mayo 2011

Congreso: 13th International Ionospheric Effects Symposium. Alexandria. Estados Unidos de América.

Presentación: Póster

M. E. Mosert, **S. Magdaleno**, D. Buresova, D. Altadill, M. Gende, L. A. Scida

Título: Behavior of the equivalent slab thickness over three European stations

Fecha: 18-25 Julio 2010

Congreso: 38th COSPAR Scientific Assembly 2010. Bremen. Alemania

Presentación: Póster

M. E. Mosert, D. Buresova, **S. Magdaleno**, D. Altadill, B. de la Morena, R. G. Ezquer, M. A. Cabrera

Título: Disturbed time variations in the scale height at the F2 layer Peak over three European stations

Fecha: 18-25 Julio 2010

Congreso: 38th COSPAR Scientific Assembly 2010. Bremen. Alemania

Presentación: Póster

M. Mosert, L-A. McKinnell, **S. Magdaleno**, C. A. Jadur

Título: Temporal variations of the ionospheric parameters derived from electron density profiles at high latitudes

Fecha: 18-25 Julio 2010

Congreso: 38th COSPAR Scientific Assembly 2010. Bremen. Alemania

Presentación: Póster

L. García Panadero, B. Moreno, M. Herraiz, G. Rodriguez-Caderot, R. G. Ezquer, **S. Magdaleno**

Título: A preliminary analysis of the slant total electron content (sTEC) obtained from GPS observations in Tucumán region and its relationship with the ionospheric scintillation

Fecha: 7-11 Junio 2010

Congreso: Beacon Satellite Symposium 2010. Barcelona. España.

Presentación: Comunicación Oral

S. Magdaleno, E. Blanch, M. Herraiz, D. Altadill, B. de la Morena

Título: Combining quiet- and disturbance- hmF2 models to provide a forecasting tool for hmF2

Fecha: 3-7 Mayo 2010

Congreso: European Geosciences Union General Assembly 2010. Vienna. Austria.

Presentación: Comunicación Oral.

M. Mosert, D. Buresova, M. Gende, C. Brunini, B. de la Morena, S. **Magdaleno**, R. G. Ezquer, D. Altadill, M. Cabrera

Título: Variations of the total electron content over three Europeans stations

Fecha: 1-6 Noviembre 2009

Congreso: IRI 2009 Workshop, Kagoshima. Japón.

Presentación: Comunicación Oral.

M. Mosert, D. Buresova, B. de la Morena, **S. Magdaleno**, D. Altadill, R.G. Ezquer, L. Scida

Título: An analysis of the scale height at the F2-layer peak over three middle latitude stations in the European sector.

Fecha: 1-6 Noviembre 2009.

Congreso: IRI 2009 Workshop, Kagoshima, Japón.

Presentación: Comunicación Oral.

S. Magdaleno, D. Altadill, E. Blanch, M. Herraiz, B. de la Morena

Título: Ionospheric Peak height behavior at equatorial latitudes: A potential empirical model for quiet conditions.

Fecha: 22-25 Junio 2009.

Congreso: 1st Spain-China Symposium on Geophysical & Geochemical Geosystems (SG3), Zaragoza, España.

Presentación: Comunicación Oral.

M. Mosert, D. Buresova, C. Brunini, M. Gende, **S. Magdaleno**, B. de la Morena, R. G. Ezquer.

Título: Analysis of the total electron content over two European stations using different techniques.

Fecha: 14-17 Abril 2009.

Congreso: Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Mendoza, Argentina.

CONGRESOS NACIONALES

Presentación: Comunicación Oral.

S.Magdalen

Título: Efectos del Clima Espacial en el sector aeroespacial

Fecha: 26 Noviembre 2013.

Congreso: Jornada técnica sobre el Clima Espacial III, Madrid.

Presentación: Comunicación Oral.

S.Magdalen

Título: El impacto de la ionosfera en la navegación por satélite.

Fecha: 29 Mayo 2012.

Congreso: Jornada técnica sobre el Clima Espacial II, Madrid.

Presentación: Comunicación Oral.

Autores: M. Herraiz, G. Rodríguez-Caderot, A. Portillo, B. Moreno, **S.**

Magdaleno

Título: Estudio de Burbujas Ionosféricas: Desarrollo de un nuevo método de detección basado en datos de sTEC y su aplicación a la ionosfera ecuatorial africana.

Fecha: 7-11 Septiembre 2009.

Congreso: XXXII Bienal de Física, Ciudad Real.

Presentación: Comunicación Oral.

M. A. Hernández, J. F. López, D. Domínguez, A. C. Gálvez, M. Fernández, **S. Magdaleno**, M. C. Ruiz, M. Parias, M. Sorribas, J. A. Adame, J. M. Vilaplana, B. de la Morena, J. M. Andújar, C. Vilchez, J. P. Bolívar.

Título: Líneas de investigación e instrumentación en la estación de sondeos atmosféricos de "El Arenosillo".

Fecha: 10-14 Noviembre 2008.

Congreso: Semana de la Ciencia y la Tecnología, Universidad de Huelva.

Presentación: Comunicación Oral.

S. Magdaleno, I. Blanco, J. M. Córdoba, D. Marín, J. M. Andújar, B. de la Morena.

Título: Método de predicción a corto plazo de f_0F_2 en modelado neuroborroso para su aplicación en sistemas de comunicación por satélite de alta precisión

Fecha: 10-14 Noviembre 2008.

Congreso: Semana de la Ciencia y la Tecnología, Universidad de Huelva.

CONFERENCIAS INTERNACIONALES INVITADAS

Presentación: Comunicación Oral

S. Magdaleno

Título: Automatic detection of ionospheric depletions

Fecha: 5-23 Abril 2010

Lugar: Second Workshop on Satellite Navigation Science and Technology for Africa. Trieste, Italy.

GRUPOS DE INVESTIGACIÓN

Nombre: WP1.1 Near Earth space plasma monitoring en el Grupo de Trabajo Advanced terrestrial systems within the COST 296 Action, Mitigation of Ionospheric Effects on Radio Systems.

Fecha: Sep 2008 - Mar 2009.

Investigador principal: Dr. D. Altadill.

Nombre: WP2.2 HF/MF communications en el Grupo de Trabajo Ionospheric Monitoring and modelling within the COST 296 Action, Mitigation of Ionospheric Effects on Radio Systems.

Fecha: Sep 2008 - Mar 2009.

Investigador principal: Prof J.M. Andujar and Dr P. Lassudrie-Duchesne.

Nombre: MIERS – Mitigation of Ionospheric Effects on Radio Systems
COST-296

Fecha: Septiembre 2008 – Marzo 2009.

Investigador principal: Dr. Alain Bourdillon, Dr. Bruno Zolesi

Nombre: C/010043/07, AECID.

Fecha: Mayo 2008 – Diciembre 2008.

Investigador principal: Dr. Miguel Herraiz Sarachaga.

Título: Influencia de la anomalía ecuatorial en la ionosfera y su repercusión en las comunicaciones satelitales. Ref.: C/010043/07. Universidad Complutense de Madrid.

Fecha: Mayo 2008 – Diciembre 2008.

Investigadores principales: Dr. M. Herraiz, Dr. Claudio Brunini.

Nombre: Grupo de estudios Ionosféricos y Técnicas de Posicionamiento Global por Satélite (GNSS) de los grupos de investigación de la UCM.

Investigadores principales: Dr. M. Herraiz, Dr. G. Rodríguez Caderot.

Incorporación: Septiembre 2008.

REVISOR EN PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

Durante la realización de esta tesis se ha colaborado como revisor en:

- Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics
- 7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica
- Earth Science India

ESTANCIAS EN CENTROS DE INVESTIGACIÓN

Centro: The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP) en Trieste, Italia

Fecha: 90 días en diferentes periodos

Centro: Observatorio de Ebro en Roquetes, Tarragona.

Fecha: 30 días en diferentes periodos

Centro: The Center for Atmospheric Research at the University of Massachusetts Lowell en Lowell, EEUU.

Fecha: desde el 7 al 17 de mayo de 2009.

Centro: Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata en La Plata, Argentina.

Fecha: desde el 5 al 13 de Noviembre de 2008.

Centro: Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio en San Juan, Argentina.

Fecha: desde el 13 al 18 de Noviembre de 2008.

Este trabajo se centra en el estudio de la ionosfera y su impacto en los sistemas GNSS. Para ello, se han investigado tres características de la ionosfera: hmF2, Hm y las burbujas ionosféricas.

El análisis de hmF2 muestra una gran dependencia temporal y espacial. Se ha propuesto una técnica para modelar dicha característica, proporcionando un modelo global. Los resultados se han comparado con las predicciones proporcionadas por el modelo IRI para diferentes latitudes y diferentes periodos de tiempo, obteniendo una mejora en la estimación. Usando esta misma técnica, se ha proporcionado también un modelo global de H_m , que relaciona la parte superior del perfil de densidad electrónica con la parte inferior.

Así mismo, se ha presentado una metodología que, a partir de datos GNSS, permite detectar y caracterizar la duración y el descenso que las burbujas ionosféricas. Esta técnica ha sido implementada en una aplicación Java que permite la automatización de todo el proceso. Usando esta aplicación, se han caracterizado las burbujas en el sector sudamericano, especialmente interesante debido su gran comportamiento dinámico, evaluado su formación con la actividad solar así como con el comportamiento de otras propiedades de la ionosfera. A nivel global, se ha analizado el comportamiento espacial y temporal de las burbujas ionosféricas durante un ciclo solar, caracterizando la distribución espaciotemporal de la formación, duración y tamaño de las burbujas.

