

Modelación y representación gráfica del parámetro ionosférico foF2 mediante el análisis en armónicos esféricos

Bienvenido Lazo ⁽¹⁾, Alexander Calzadilla ⁽¹⁾ y Katy Alazo ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Instituto de Geofísica y Astronomía. Calle 212 No.2906, La Lisa, C. Habana, CP 11600, Cuba.

Recibido: enero-octubre, 2005	Aceptado: noviembre, 2005
-------------------------------	---------------------------

Resumen

Se aplica el método del Análisis por Armónicos Esféricos (SHA-Spherical Harmonic Analysis) para dos regiones geográficas seleccionadas; Sector americano o Región Europa-África, dentro de los rangos geográficos de 15°S-70°N latitud y 120°W-55°E longitud para la frecuencia crítica de la capa F2 de la ionosfera. Se colectaron los datos de alrededor de 30 estaciones ionosféricas en América y 50 de la región de Europa y África, y ordenadas según cada estación climática y 19 niveles de actividad solar con el R12 = 3 hasta R12 >200. Se compararon los valores de foF2 calculados por el SHA y por el modelo de referencia IRI (CCIR) con datos experimentales del satélite IK-19. En la mayoría de los casos, los datos experimentales fueron mejor representados por el SHA que por el IRI.

Palabras clave: Ionosfera, armónicos.

Abstract

A Spherical Harmonic Analysis (SHA) over a selected wide region like an American Sector or the European and African Region within the geographic ranges of 15°S-70°N latitude y 120°W-55°E longitude for the critical frequency of the F2 layer is presented. The data was selected from about 30 ionospheric stations on the American Sector, and about 50 ionospheric stations on the European and African Region; and distributed for each season on 19 levels of solar activity, with R12 = 3 to R12 >200. The SHA calculated foF2 and the IRI (CCIR) results for the same conditions were compared with experimental data from IK-19 satellite. In most cases, the experimental data were closer to the modeled data by SHA than by IRI.

Key words: Ionosphere, harmonics.

Introducción

Para el análisis simplificado de datos geofísicos, originalmente distribuidos sobre una esfera y proyectados sobre espacios bidimensionales, se ha utilizado el desarrollo en armónicos esféricos (SHA). Esto permite modelar datos georreferenciados usando un desarrollo en serie de funciones ortogonales que son soluciones de la ecuación de la Laplace. Este método es utilizado ampliamente en la geofísica y es también apropiado para las investigaciones ionosféricas (e.g. Bradley, 1990; Zolesi y Cander, 1991), pero presenta limitaciones cuando se requiere modelar campos geofísicos regionales. Haines (1985) introduce el análisis por armónicos sobre un casquete esférico (SCHA) para dar solución a estas dificultades y posteriormente De Santis (1992) propone el análisis en armónicos esféricos ajustado (ASHA) para modelar regionalmente el campo geomagnético usando la función de Legendre convencional después de una transformación artificial del casquete esférico en un hemisferio, pero ambos métodos requieren una elevada densidad de puntos georreferenciados por unidad de área en la región a modelar.

La alta densidad geográfica de estaciones ionosféricas en Europa, permitió a De Franceschi et al. (1994) la obtención de un nuevo modelo regional basado solamente en los datos disponibles dentro de la región Europea y norte de África, obteniendo mejores resultados que en el caso de un modelo global.

En la Región del Caribe, por el contrario, hay una densidad muy baja de estaciones ionosféricas, lo cual nos impide aplicar el programa (BMASHA) desarrollado por De Santis et al. (1994) para modelar foF2 en nuestra región. Ya que la densidad de estaciones en nuestro caso está por debajo del número crítico de puntos a interpolar, según el modelo de Análisis en Armónicos Esféricos Ajustados, por lo que no se satisface el número de ecuaciones a resolver por el modelo.

Con el propósito de evadir el obstáculo que representa la prácticamente inexistente red de estaciones ionosféricas en la región del Caribe, que impide el uso de los métodos SCHA y ASHA, empleamos el análisis en armónicos esféricos tradicional (SHA), pero con la novedad de incluir datos de una serie de estaciones ionosféricas situadas fuera de la región de interés como condiciones de frontera en el infinito que limiten la tendencia hacia valores extremos, debido al carácter cíclico de las funciones sinusoidales (Lazo et al., 2004).

La expresión matemática del desarrollo del parámetro ionosférico foF2 como una Función en Armónicos Esféricos es la siguiente:

$$foF2(r, \vartheta, \varphi) = R_E \left[\sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_E}{r} \right)^{n+1} P_n^m(\cos \vartheta) \{ g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi) \} \right]$$

RE: el radio de la tierra

n, m: el grado y orden entero de las funciones asociadas de Legendre

(r, J, j): coordenadas del sistema esférico.

Los coeficientes de los armónicos esféricos son determinados por el método de mínimos cuadrados, a partir de los valores medianos mensuales que aquí se asume son sólo función de las coordenadas geográficas (r, J, j).

El objetivo de este trabajo es la modelación y representación espacial gráfica del parámetro ionosférico foF2 para cualquier hora del día (en UT), estación del año y 19 niveles de actividad solar (Tabla 1), representadas por un rango estrecho de variación del parámetro R12 (nivel 1 como R12=3 hasta el nivel 19 como R12>200)

Los valores de las medianas mensuales de foF2 se obtuvieron de la red mundial de estaciones para cada una de las regiones de interés (Tablas 2 y 3). Los datos seleccionados corresponden a los meses representativos de cada una de las estaciones del año: Primavera (Marzo), Verano (Julio), Otoño (Septiembre) y el Invierno (Enero)

Materiales y métodos

Programa de Aplicación

Para la aplicación del Análisis en Armónicos Esféricos se creó la función en MatLab 5.3, SHAGMC (Spherical Harmonic Analysis in the Gulf of México and the Caribbean) y se creó una base de datos de medianas mensuales de foF2 (Lazo et al., 2000). La aplicación antes mencionada tiene dos opciones iniciales, la cartografía de determinada región de interés o el paso diario de la variación del parámetro foF2 en un punto geográfico cualquiera dentro de la región estudiada. La primera opción requiere como datos de entrada la hora del día, estación del año y nivel de actividad solar y la segunda opción sólo los dos últimos parámetros y las coordenadas del punto de interés. A la función SHAGMC se le creó una interface gráfica (GUISHA), que guía al usuario hasta la obtención de la cartografía o del gráfico de la variación diaria, según su necesidad.

Resultados y conclusiones

Ejemplos comparativos de validación (I)

Básicamente la comparación consiste en el cálculo de las diferencias entre los valores foF2 medidos puntualmente sobre una región dada por el satélite INTERKOSMOS-19 (IK-19) y los valores modelados por SHA. También se usaron los valores medianos mensuales de foF2 generados por el Modelo IRI'2000 para comparar con los datos medidos por el IK-19.

La evaluación estadística se realizó mediante el valor promedio de la desviación porcentual (%) y la desviación estándar de las diferencias (MHz) (Ilustraciones 1 y 2)

Conclusiones I

En el Sector americano la desviación estándar varía entre 0.7 y 2 MHz. Es significativo que los valores modelados se ajustan mejor a los valores experimentales de las latitudes ecuatoriales hacia las latitudes altas, en la misma proporción que el número de estaciones consideradas en el modelo GUIISHA se incrementa.

En Europa-Africa la desviación estándar varía de 0.9 Mhz a 1.7 MHz. La alta dependencia de la densidad de estaciones ionosféricas es más notable en esta zona geográfica. El peor resultado es en el rango de latitudes -10° a 0° N, donde la desviación estándar alcanza valores de 2.9 MHz. En el rango de latitudes 15° a 45° N el modelo GUIISHA se ajusta mejor que el IRI'2000 para los valores medidos por el satélite IK-19. Se debe señalar que en este rango de latitudes la densidad de estaciones ionosféricas es más alta.

Nótese que en las latitudes altas los datos modelados, tanto por el GUIISHA como por el IRI, están en buena concordancia con los valores medidos por el IK-19 dentro de límites inferiores al 15%.

Ejemplos comparativos de validación (II): Variación Diaria.

Otra forma de estimar la exactitud de los modelos es comparar las tendencias diarias de los valores modelados de foF2 en una estación ionosférica con el valor mediano mensual de foF2 calculado por los modelos en el punto geográfico en cuestión (Ilustración 3).

Se seleccionaron las estaciones ionosféricas de La Habana y Roma, las estaciones del año corresponden al Verano (Ilustración 4) y el Invierno (Ilustración 5) y niveles de actividad solar: baja, media y alta. El modelo GUIISHA se calcula excluyendo los datos que corresponden a estas estaciones ionosféricas. El dato excluido se usó para la comprobación de los modelos.

Evaluación Estadística. Conclusiones II.

En general, el Verano se modela mejor que el Invierno.

La variación diaria de foF2 en Roma se describe mejor que en La Habana por ambos Modelos.

La prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov muestra que GUIISHA tiene una mejor exactitud que el modelo del IRI'2000 para la variación diaria de foF2 (Ilustración 6)

Debemos señalar la importancia de los datos de la estación Habana en el área del Caribe que mejoran la estimación de los parámetros ionosféricos, lo que redundaría en el perfeccionamiento de los modelos globales. La densidad de Estaciones Ionosféricas en Europa es una garantía por la predicción y la modelación ionosférica.

También se calculó el GUIISHA sobre la región del Océano Atlántico y se comparó con los datos del IK-19 el resultado se muestra en la Ilustración 7. Comparativamente IRI'2000 y GUIISHA tienen casi el mismo nivel de exactitud sobre la mencionada región.

Referencias

- Gaus C. F., 1838, "Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus", Resultate magn. Verein., reprinted in Werke, 5, 121-93.
- Bradley P. A., 1990, Mapping the Critical Frequency of the F2 Layer. *Adv. Space Res.* Vol.10, No. 8, 847-856.
- Zolesi B. y Lj. R. Cander, 1991, Review of Progress in Ionospheric Mapping, *Il Nuovo Cimento C*, Vol. 14, No. 2, 153-169.
- Haines G. V., 1985, Spherical Cap Harmonic Analysis, *J. Geoph. Res.* Vol.90, No.B3, 2583-2591.
- De Santis A., G. De Franceschi, B. Zolesi, Lj. R. Cander, 1992, Regional Modelling and Mapping of the Ionospheric Characteristic Parameters by Spherical Cap Harmonic Expansion, *Adv. Space Res.*, Vol. 12, No. 6, pp (6) 279-282.
- Lazo B., A. Calzadilla, K. Alazo, M. Rodríguez (2004) "Regional Mapping of F2 Peak Plasma Frequency by Spherical Harmonic Expansion. *Adv. Space Res.* Vol. 33 (6), pp 880-883
- De Franceschi G., A. De Santis, S. Pau, 1994, Ionospheric Mapping by Regional Spherical Harmonic Analysis: New Developments, *Adv. Space Res.*
- De Santis A., G. De Franceschi, D.J. Kerridge, 1994, Regional Spherical Modeling of 2-D Functions: The Case of the Critical Frequency of the F2 Ionospheric Layer. *Computers and Geosciences*, vol. 20, No. 5, pp 849-871.
- Zolesi, B., Gander, Lj.R. Review of progress in ionospheric mapping, *Il. Nuovo Cimento C* 14 (2), 153-169, 1991.

Tablas y figuras

Tabla 1: Definición de Niveles de Actividad Solar

<i>Nivel</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
R12 Min	0	4	8	12	15	19	23	28	33	38	43	53	73	96	113	133	153	171	196
R12 Max	3	7	11	14	18	22	27	32	37	42	52	72	95	112	132	152	170	195	220

Tabla 2: Estaciones Ionosféricas para el modelo del Sector americano. En cursivas las tomadas como condiciones de frontera.

No.	Estación	Lat.	Lon.	No.	Estación	Lat.	Lon.
1	Bermuda	32,4	295,4	17	Point Arguello	35,6	239,4
2	Bogota	4,5	285,8	18	Puerto Rico	18,5	292,8
3	Boulder	40,0	254,7	19	<i>Rarotonga</i>	-21,2	200,2
4	Cape Kennedy	28,4	279,3	20	<i>Resolute Bay</i>	74,7	265,1
5	Churchill	58,8	265,8	21	San Salvador	24,1	285,5
6	<i>Dakar</i>	14,7	342,5	22	St Johns	47,6	307,3
7	Fort Monmouth	40,4	285,9	23	Standford	37,4	237,8
8	Grand Bahamas	26,6	281,8	24	<i>Tahiti</i>	-17,7	210,6
9	Habana	23,0	278	25	Talara	-4,6	278,7
10	Huancayo	-12,0	284,7	26	<i>Thule Qanaq</i>	77,5	290,8
11	<i>Mauí</i>	20,8	203,5	27	Victoria	48,4	236,6
12	Mexico	19,3	260,6	28	Wallops Island	37,9	284,5
13	Millstone Hill	42,6	288,5	29	Washington	38,7	282,9
14	Ottawa	45,1	283,8	30	White Sands	32,3	253,5
15	Panama	9,4	280,1	31	Winnipeg	49,8	265,6
16	Paramaribo	5,8	304,8				

Tabla 3: Estaciones ionosféricas para el modelo en la Región Europa-Africa. En cursivas las tomadas como condiciones de frontera.

No.	Estación	Lat.	Lon.	No.	Estación	Lat.	Lon.	No.	Estación	Lat.	Lon.
1	Alma Ata	43,3	76,9	17	Julius-Rugen	54,6	13,4	33	Ouaguadougou	12,4	358,5
2	Arkhangelsk	64,4	40,5	18	Kaliningrado	54,7	20,6	34	Paris Saclay	48,1	2 , 3
3	Atenas	38,0	23,6	19	Kiev	50,5	30,5	35	Poitiers	46,6	0 , 4
4	Bekescsaba	46,7	21,2	20	Kiruna	67,8	20,4	36	Pruhonice	50,0	14 , 6
5	Dakar	14,8	342,6	21	<i>Kodaikanal</i>	10,2	77,5	37	Reikjavik	64,1	338,2
6	De Bilt	52,1	5,2	22	Lannion	48,8	356,6	38	Roma	41,9	12 , 5
7	Djibouti	11,5	42,8	23	<i>La Reunión</i>	-21,1	55,3	39	Rostov	47,2	39 , 7
8	Dourbes	50,1	4,6	24	Leningrado	60,0	30,7	40	Schwarzenburg	46,6	6 , 7
9	El Arenosillo	37,1	353,3	25	Lindau	51,7	10,1	41	Slough	51,5	359,4
10	Freiburg	48,1	7,6	26	Lisboa	39,0	351,0	42	Sodankyla	67,4	26 , 6
11	Gibilmanna	37,6	14,0	27	Loparskaya	68,0	33,0	43	Sofia	42,7	23 , 4
12	Gorky	56,2	44,3	28	Lycksele	64,6	18,7	44	South Vist	57,4	352,7
13	Graz	47,1	15,5	29	Miedzeszyn	52,2	21,2	45	St. Peter Ording	36,0	9 , 3
14	<i>Habana</i>	23,0	278,0	30	Moscú	55,5	39,3	46	Tbilisi	41,7	44 , 8
15	<i>Huancayo</i>	-12,0	284,7	31	Nicosia	35,1	33,2	47	Tortosa	40,8	0 , 5
16	<i>Johannesburgo</i>	-26,1	28,1	32	Norilsk	69,4	88,1	48	Uppsala	59,8	17 , 6

Ilustración 1 : Evaluación estadística N=25. Sector americano (Lat 15°S - 70°N, Lon 120°W - 50°W). Rangos de Latitud en el eje de las ordenadas.

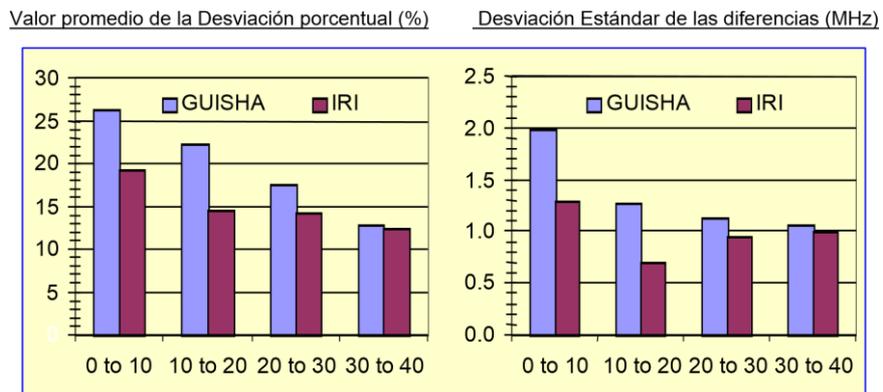


Ilustración 2: Evaluación estadística N=50. Europa–África (Lat 10°S - 70°N, Lon 15°W - 55°E). Rangos de Latitud en el eje de las ordenadas

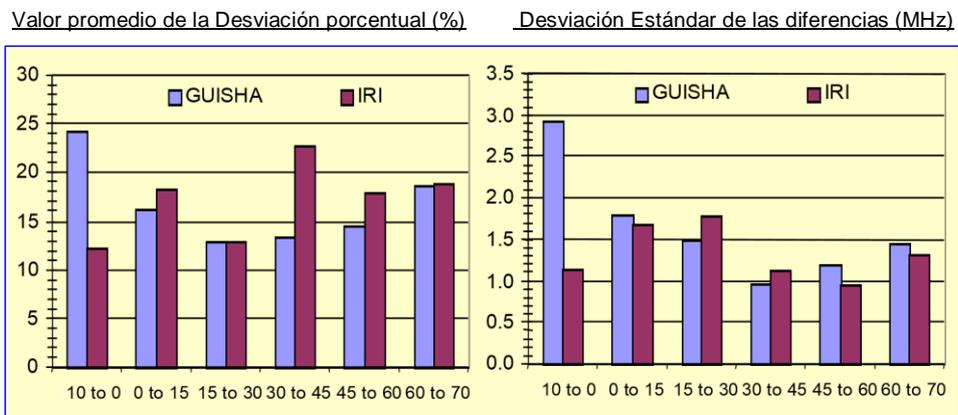


Ilustración 3: Ejemplo de comparación de la Variación Diaria de foF2: para Roma, verano

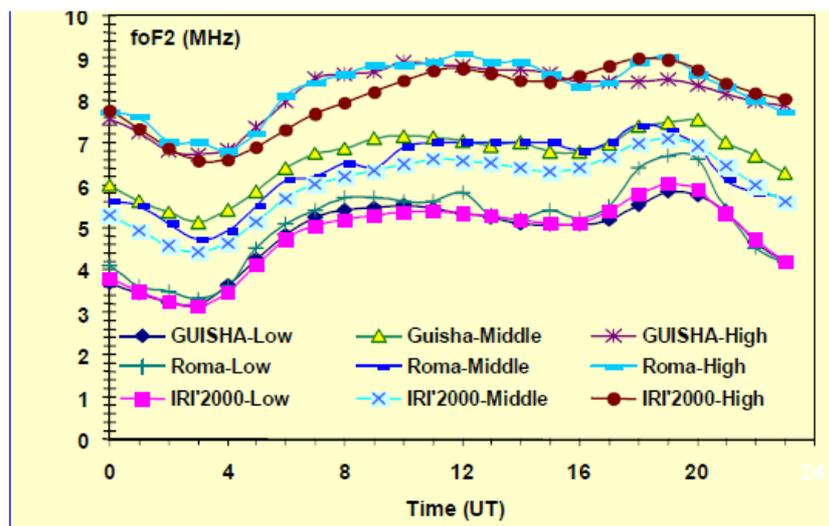


Ilustración 4: Comparación de las tendencias de la Variación Diaria de foF2 para verano

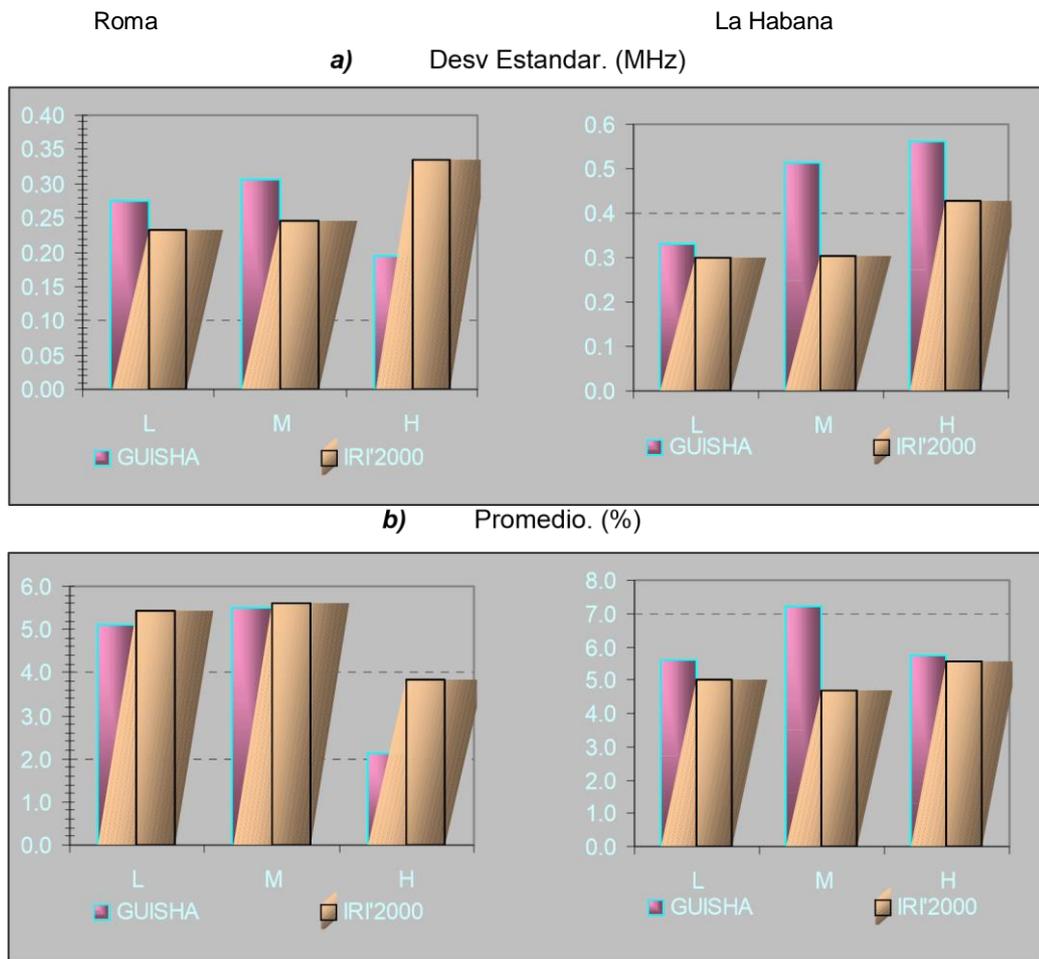
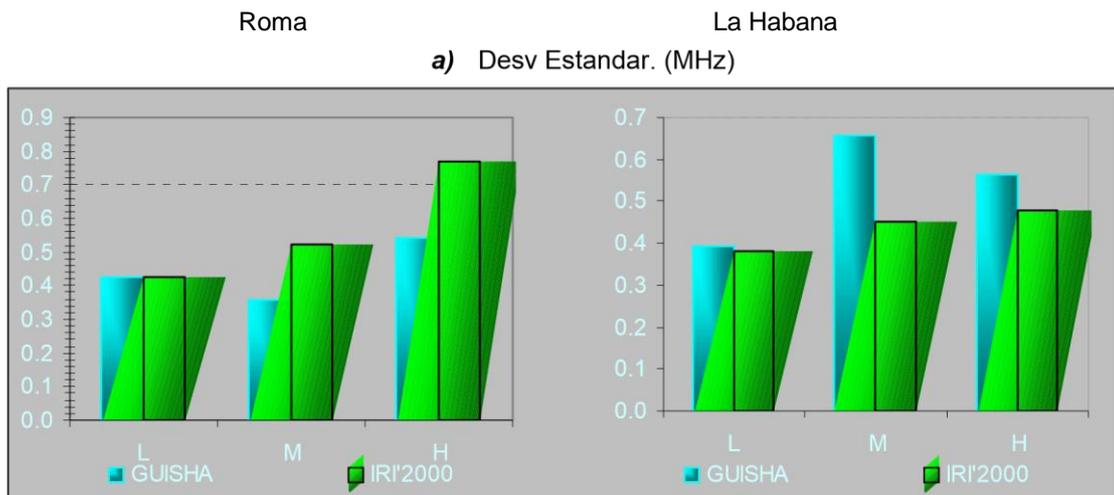


Ilustración 5: Comparación de las tendencias de la Variación Diaria de foF2 para Invierno



b) Promedio. (%)

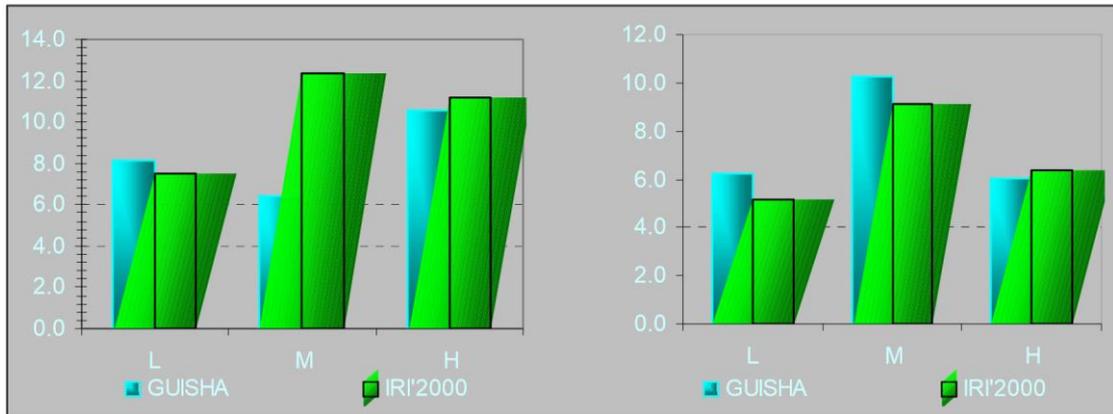


Ilustración 6: Comparación de la Tendencia diaria. Test de Kolmogorov-Smirnov

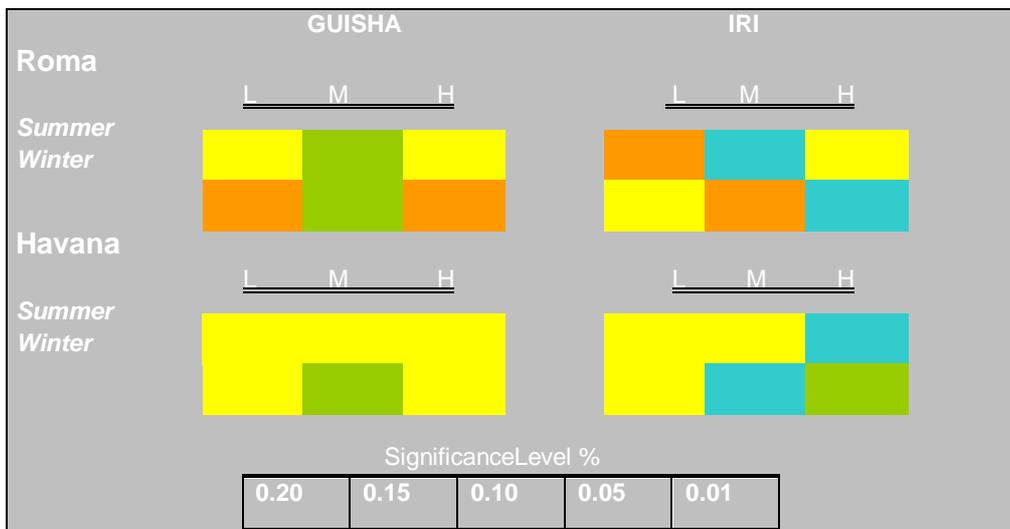


Ilustración 7: Océano Atlántico (Lat 10°S - 70°N, Lon 50°W - 15°W)

