

## Valoración estadística de diferentes medidas de hmF2 en Cuba

L. Lois Menéndez, B. Lazo Olazábal y E. Araujo Pradere  
*Instituto de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba.*

### RESUMEN

Se determinó mediante regresión lineal una expresión empírica para estimar hmF2 de los datos de M(3000)F2 obtenidos en La Habana que, del conjunto de otras 7 medidas calculadas, ofrece el mejor ajuste con los valores reales de la altura del máximo de ionización de la capa F2. En este sentido, el análisis estadístico de la información ionosférica deducida de los ionogramas de sondeo vertical señala que los modelos de Eyfrig y del IRI también proporcionan estimaciones adecuadas, mientras que los planteados por Booker-Seaton y Shimazaki exhiben las diferencias más significativas con los datos experimentales. Se sugiere el empleo de los primeros en las tareas operativas de pronóstico ionosférico en Cuba.

**PALABRAS CLAVE:** altura del pico de la capa F2, factor de transmisión, pronóstico ionosférico.

### ABSTRACT

By means of linear regression, an empirical expression was derived to estimate the height of the F region peak (hmF2) which, among other 7 measures calculated, offers the best adjustment with the N(h) profiles data obtained in Havana. Statistical analysis of the ionospheric information routinely scaled from bottomside ionograms suggests that the models of Eyfrig and IRI provide adequate estimates, while the models of Booker-Seaton and Shimazaki show significant differences with the experimental data. The use of Eyfrig and IRI models for ionospheric prediction in Cuba is proposed.

**KEY WORDS:** F2-layer peak height, transmission factor, ionosphere forecasting.

### INTRODUCCION

El cálculo de la altura del máximo de concentración de la capa F2 (hmF2) requiere la reducción de ionogramas h' (f) a perfiles N(h), lo cual constituye un procedimiento laborioso que consume considerable cantidad de tiempo y recursos. Una alternativa a esta problemática está dada por el desarrollo de métodos simples para evaluar operativamente la magnitud de hmF2, que surgieron desde la década del 40, pero cuya demanda continúa en la actualidad. Los mismos son de utilidad tanto desde el punto de vista de las investigaciones aeronómicas como de su aplicación en las radiocomunicaciones, y ofrecen - ante todo - economía y rapidez de cálculo.

Estos modelos parten de que el perfil N(h) puede describirse, fundamentalmente cerca de su máximo, mediante una aproximación parabólica. Bajo ciertas suposiciones puede demostrarse que la altura virtual (h'), correspondiente a la frecuencia  $f = 0.834 f_oF2$ , coincide con la altura equivalente del máximo de la capa F2 para un modelo parabólico (hp), i.e.

$$hp = h' (f = 0.834 f_o F2) \quad (1)$$

expresión que Booker y Seaton (1940) propusieron para valorar hmF2, y que ha sido ampliamente utilizada en la práctica, aunque desprecia los efectos del campo geomagnético y de la ionización en las capas inferiores de la ionosfera.

Continuando en este sentido, Shimazaki (1955) mostró que la hipótesis de capa parabólica y la definición del factor de transmisión M(3000)F2 conllevan una relación inversa de este último con hmF2,

$$hmSHIM = -176 + 1490 / M(3000)F2 \quad (2)$$

cuyos valores muestran un excelente acuerdo con los relativos a hp. Sin embargo, esto no implica que varíen armónicamente con la altura real (hmF2), ya que la magnitud de M(3000)F2 depende fuertemente del retardo de grupo sufrido por las ondas de radio al propagarse a través de las capas inferiores de la ionosfera.

Wright y McDuffie (1960) compararon los hpF2 anteriores (hp y hmSHIM) con los hmF2 calculados por los perfiles N(h) según el método de Budden (1955), y mostraron que los primeros constituyen una buena medida de hmF2 por la noche; pero durante el día, y fundamentalmente en las altas latitudes, muestran diferencias significativas. Concluyeron que los hpF2 dan valores demasiado altos en condiciones diurnas y que para trabajos exactos era esencial obtener hmF2 de los perfiles N(h). No obstante, encontraron que se logra un mejor acuerdo entre M(3000)F2 y hmF2 si se modifica ligeramente la relación (2):

$$hmWMcD = -169 + 1411 / M(3000)F2 \quad (3)$$

Posteriormente, Bradley y Dudeney (1973) desarrollaron un modelo idealizado de la ionosfera, con vistas a estimar hmF2, que considera un perfil compuesto por 2 capas parabólicas (E y F2) y una lineal en N(h) desde el máximo de la capa E (hmE) hasta  $f1 = 1.7 f_oE$ , que marca el comienzo de la parábola de la capa F2. Obtuvieron resultados consistentes para valores de hmF2 entre 200 y 500 km, que cubren casi todas las alturas posibles en la práctica, con una relación de tipo potencial ( $hm = a[M(3000)F2]^b$ ), cuya semejanza con la obtenida por

Shimazaki (1955) les sugirió una representación más simple y de mayor aplicación en los cálculos

$$hmBRD = -176 + 1490 / [M(3000)F2 + M] \quad (4)$$

donde  $M_{BRD} = 0.18 / (x - 1.4) \quad (4a)$

$$x = foF2 / foE$$

Esta promisoría dirección, que considera los efectos de la ionización inferior con la introducción de una corrección M al factor M(3000)F2, ha sido subsecuentemente empleada por diferentes especialistas: Eyfrig (1974), Dudeney (1974), y otros. En todos ellos la expresión de la altura (4) mantiene su forma, variando sólo la corrección

$$M_{EYF} = 0.251 / (x - 1.147) \text{ mínima actividad solar} \\ = 0.650 / (x - 0.340) \text{ máxima actividad solar} \quad (4b)$$

$$M_{DUD} = (0.253) / (x - 1.215) - 0.012 \quad (4c)$$

Otra manera de evaluar operativamente la magnitud de hmF2 es a partir de los modelos empíricos de la ionosfera; en particular, del International Reference Ionosphere (e.g. Rawer *et al.*, 1978), por las amplias posibilidades que actualmente ofrece y los ingentes esfuerzos que se realizan para su desarrollo futuro. El IRI, que representa el comportamiento medio global y temporal de la estructura vertical de la ionosfera no perturbada, utiliza los coeficientes del CCIR para generar los valores pico de la región F; i.e. considera un esquema de naturaleza híbrida para el cálculo de hmF2 - que denominaremos hmIRI - consistente en variaciones sobre el modelo planteado por Bradley y Dudeney (1973).

El objetivo de este trabajo es valorar la representatividad de las alturas que estos métodos alternativos de cómputo de hmF2 brindan para nuestra región, con vistas a su empleo en las tareas operativas de pronóstico ionosférico en Cuba.

## MATERIALES Y METODOS

Los materiales básicos utilizados en este trabajo fueron ionogramas de sondeo vertical terrestre, registrados en la estación Centro Geofísico (22°58 N, 82°09 W). Además, como datos auxiliares, el índice magnético kp y el parámetro solar R<sub>12</sub> para definir la actividad heliogeofísica del período.

Se analizaron 8 meses de los años 1976-1977 y 1979-1980, los cuales se eligieron por contener un volumen representativo de información ionosférica horaria de sondeo vertical bajo condiciones magnéticas tranquilas (kp ≤ 3), considerar las diferentes estaciones del año (verano, invierno, primavera y otoño), y corresponder a niveles de actividad solar catalogados de muy altos (R<sub>12</sub> ≈ 150) o muy bajos (R<sub>12</sub> ≈ 15).

Los ionogramas horarios promedio se computaron

utilizando el método de la curva de altura virtual compuesta, que consiste en la determinación gráfica del ionograma mediano de un grupo de curvas h'(f) antes de computar el perfil. El mismo está basado en una sugerencia de Schmerling y Thomas (1956), posteriormente reiterada por King (1960), y cuyas ventajas y facilidades por sobre otros procedimientos fueron sucesivamente discutidas por Wright (1960), Laird y Wright (1967) y Laird *et al.* (1974).

Los ionogramas incluidos en cada una de las 192 muestras conformadas se limitaron a aquéllos cuyo índice magnético planetario era adecuadamente bajo (kp ≤ 3), para garantizar la tendencia central y el carácter no perturbado de las medianas. A partir de ellas, se obtuvieron los datos ionosféricos de rutina correspondientes a cada ionograma promedio e indispensables para evaluar las diferentes medidas de la altura del máximo de concentración electrónica de la capa F2, i.e. los parámetros foE, foF2, M(3000)F2, h'f, hp, y otros.

Por otro lado, el cálculo de la altura real hmF2 se realizó mediante la reducción de las características promedio h'(f) a perfiles N(h) con el programa ITERAN (Guliaeva, 1978), escrito en FORTRAN 77. El algoritmo del mismo está fundamentado en un método laminar de segundo orden, que emplea la aproximación de Jackson (Φ = N), y una o dos componentes magneto-iónicas - aparte de otras opciones - en su análisis. La variante introducida en este estudio considera sólo una componente, la curva virtual ordinaria o extraordinaria; pero estima la ionización de fondo o baja altura y del valle, mediante fórmulas de corrección y valles sinópticos incluidos en los procedimientos de partida o comienzo de cada capa.

Finalmente, toda esta información ionosférica fue almacenada en un fichero con ayuda del paquete de programas estadístico MICROSTAT y, mediante opciones de transformación adecuadas, se determinaron los valores horarios de las diferentes alturas modeladas del máximo de ionización de la capa F2 (ec. 1-4c) para los 8 meses analizados. Los mismos fueron elaborados utilizando las pruebas y métodos usuales de la estadística clásica.

## RESULTADOS

El análisis estadístico de los datos de hmF2 y M(3000)F2 en La Habana, utilizando el método de regresión lineal, permitió determinar los coeficientes mínimo cuadráticos para una formulación parabólica simple en condiciones extremas de actividad solar sobre Cuba:

$$hmREG = -130 + 1257 / M(3000)F2 \quad (5)$$

estimación esta cuyo error estándar es de 14 km, con un coeficiente de variación asociado del 5%. Tal regresión explica un 86% de la variación total, lo que está dado por el alto coeficiente de correlación obtenido (0.93). Estos índices, y el gran tamaño de la muestra (192 casos), aseguran una buena relación funcional entre los parámetros examina-

Tabla 1

Medidas estadísticas de diferentes modelos para estimar hmF2

## Comparación hmF2 vs. hm

	ESTADISTICA DESCRIPTIVA					CORRELACION $\rho$ (u)	BONDAD DE AJUSTE	
	$\bar{X}$ (Km)	$\sigma$ (Km)	V (%)	Xmin (Km)	Xmax (Km)		KOLMOGOROV - SMIRNOV (D max)	$\chi^2$ ( $\chi^2_{obs}$ )
hm F2	309	42	13.6	216	394	1.00	0.0000	0.00
hm REG	309	39	12.6	214	394	0.93	0.0573	1.26
hm EYF	318	45	14.2	206	405	0.95	0.0990	3.76
hm IRI	301	38	12.0	211	366	0.90	0.1042	4.17
hm W-McD	324	43	13.3	218	419	0.93	0.1875	13.50
hm DUD	325	51	15.7	206	416	0.96	0.2240	19.26
hm B-D	325	52	16.0	208	415	0.95	0.2240	19.26
hm SHIM	344	46	13.4	232	445	0.93	0.3021	35.04
hp	341	47	13.8	240	460	0.92	0.3073	36.26
VALOR CRITICO (0.05)							0.1388	5.99

dos, que fue verificada mediante las correspondientes docimas de ajuste, marginal y de correlación.

Este nuevo parámetro (hmREG), y los relativos a los 7 modelos discutidos en la Introducción, fueron estadísticamente elaborados conjuntamente con los valores reales de hmF2. Se determinaron las distribuciones de frecuencia para cada una de estas diferentes medidas de la altura del máximo de ionización de la ionosfera, computándose las mismas con un paso de 10 km entre los límites de 200-470 km.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros descriptivos de las distribuciones consideradas: valor medio ( $\langle X \rangle$ ), desviación media cuadrática (S), coeficiente de variación (V), valor mínimo (Xmin) y valor máximo (Xmax), así como los coeficientes de correlación relativos a la regresión lineal entre hmF2 y las hm modeladas. Los mismos ofrecen el siguiente cuadro: los métodos que consideran la ionización de fondo brindan las mejores medidas de hmF2, excepto - naturalmente - la formulación establecida con nuevos datos experimentales (hmREG) y el procedimiento de Wright-McDuffie.

Las distribuciones de frecuencia de las hm modeladas fueron comparadas con las relativas a hmF2, a partir de la aplicación de las pruebas de dos muestras de Kolmogorov-Smirnov y  $\chi^2$ . Ello permitió obtener criterios estadísticos globales sobre los modelos que mejor representan las variaciones reales de hmF2 en Cuba.

En la Tabla 1 también se presentan las respectivas estadísticas y se concluye la existencia de tres medidas que ajustan adecuadamente los datos reales: hmREG, hmEYF y hmIRI, sobresaliendo hmREG por su nivel de concordancia. El resto de los procedimientos valorados muestra diferencias significativas al considerar ambas pruebas de mejor ajuste. Entre estos últimos, el modelo debido a Wright-McDuffie presenta una concordancia aceptable - teniendo en cuenta sus limitaciones - mientras que los propuestos por Shimazaki y Booker-Seaton exhiben los ajustes más pobres con los datos experimentales.

Estos resultados pueden apreciarse mediante los gráficos incluidos en la Figura 1, donde se observan las variaciones temporales de todas las medidas de hmF2 investigadas, y

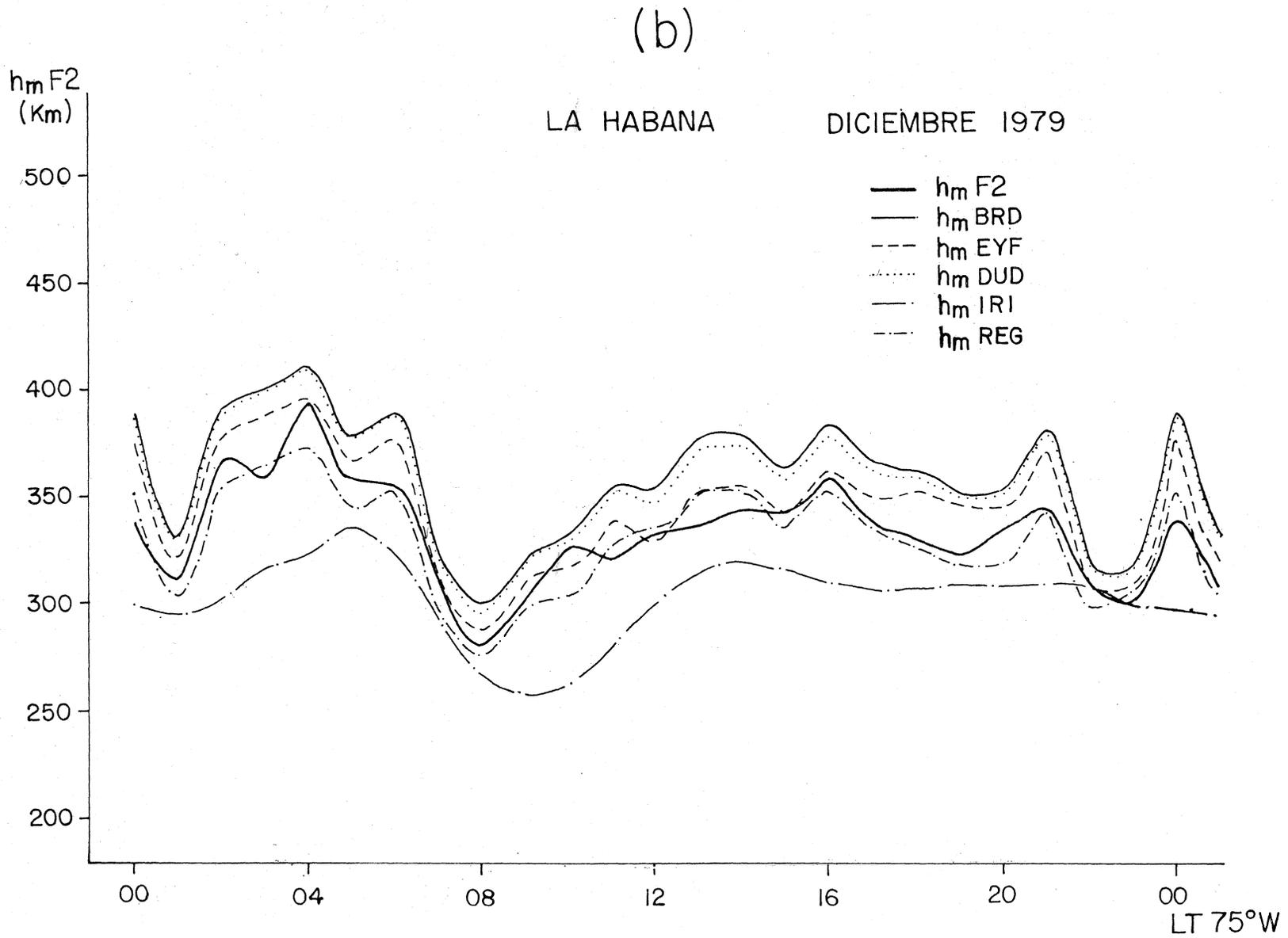


Fig. 1a. Variaciones temporales de diferentes medidas de  $h_m F2$  durante diciembre de 1979 en La Habana.

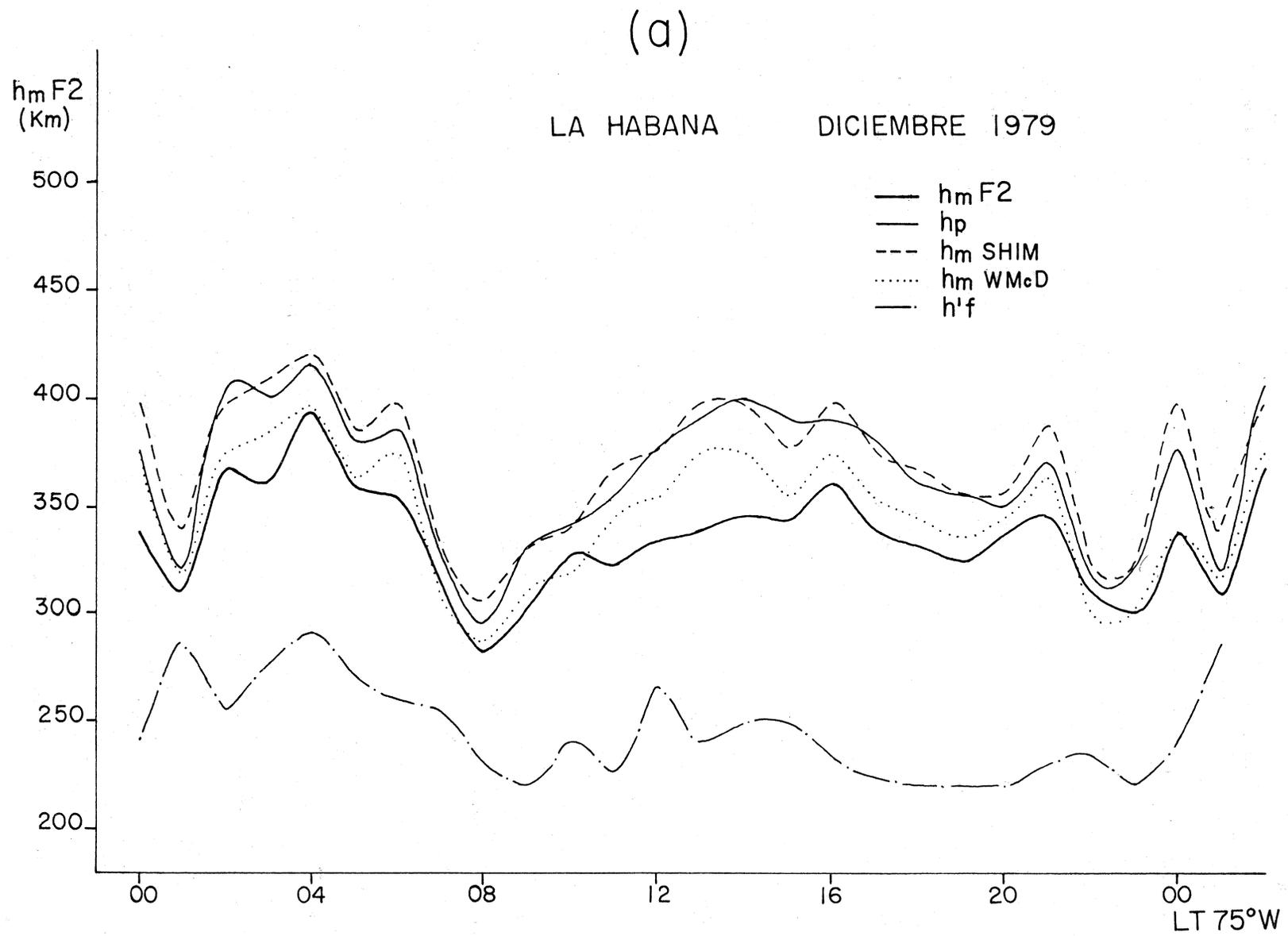


Fig. 1b. Variaciones temporales de diferentes medidas de  $h_m F2$  durante diciembre de 1979 en La Habana.

también de la altura virtual  $h'f$ , para el período de diciembre 79, elegido a modo de ejemplo. En ella resaltan ciertos aspectos generales: la sobrevaloración manifiesta de los modelos (con excepción del IRI), en particular de hp; el mejor ajuste nocturno que diurno - ambos relacionados con el efecto de las capas inferiores (E, F1) y el retardo de grupo extra inducido por el alejamiento de N(h) de una parábola simple equivalente - el grado de variación conjunta o asociación de todos ellos con hmF2, que se expresa por los altos coeficientes de correlación obtenidos (ver Tabla 1), y las discrepancias elevadas que muestran ocasionalmente las medidas más efectivas de hmF2, lo que indica la necesidad de determinar hmF2 de los perfiles N(h) para trabajos de precisión.

### SUMARIO

La altura real del máximo de concentración electrónica de la capa F2, para condiciones magnéticas tranquilas y 8 meses de mínima y máxima actividad solar (1976-1977, 1979-1980), fue determinada mediante la reducción a perfiles N(h) de los ionogramas horarios de sondeo vertical  $h'(f)$  registrados en la estación Centro Geofísico (22°58'N, 82°09'W). A partir de esta muestra representativa de valores de hmF2, se establecieron los coeficientes de regresión lineal para su valoración (hmREG) por la información del factor de transmisión M(3000)F2 obtenida en La Habana. Esta medida de hmF2, que ofrece el mejor ajuste con los datos experimentales, y las relativas a otros 7 métodos establecidos en la literatura (Booker-Seaton, Shimazaki, Wright-McDuffie, Bradley-Dudeney, Eyfrig, Dudeney e IRI), fueron analizadas estadísticamente. Se señala que los modelos de Eyfrig y del IRI también proporcionan estimaciones efectivas de hmF2, mientras que los planteados por Booker-Seaton y Shimazaki exhiben las diferencias cuantitativas más significativas al considerar las pruebas de bondad de ajuste. Se sugiere el empleo de los primeros en las tareas operativas de pronóstico ionosférico en Cuba.

### BIBLIOGRAFIA

- BOOKER, H. G. y S. L. SEATON, 1940. Relation between actual and virtual ionospheric height. *Phys. Rev.*, 57, 87-94.
- BRADLEY, P. A. y J. R. DUDENEY, 1973. A simple model of the vertical distribution of electron concentration in the ionosphere. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 35 (12), 2131-2146.
- BUDDEN, K. G., 1955. A method for determining the variation of electron density with height from curves of equivalent height versus frequency. Rep. Cambridge Conf. Iono. Phys., Phys. Soc., London, pp. 332-339.
- DUDENEY, J. R., 1974. A simple empirical method for estimating the height and semi-thickness of the F2-layer at the Argentine Islands, Graham Land. *Brit. Antarct. Surv. Sci. Rep.*, 88, 46 pp.
- EYFRIG, R. W., 1974. Prediction of ionospheric layer-height parameters and oblique-path modes for propagation via ionosphere in band 7 (HF). Contribution to Interim Working Party 6/1 from the Federal Republic of Germany.
- GULIAEVA, T. L., 1978. Programa ITERAN en FORTRAN para el análisis N(h) iterativo rápido de ionogramas (en ruso). IZMIRAN, Moscu, 39 pp.
- KING, G. A. M., 1960. A convenient method of getting representative ionospheric heights. *J. Geophys. Res.*, 65 (5), 1623-1624.
- LAIRD, A. R. y J. W. WRIGHT, 1967. Computation and application of synoptic ionospheric profiles. *Radio Sci.*, 2 (10), 1255-1261.
- LAIRD, A. R., J. W. WRIGHT y T. N. GAUTIER, 1974. Remarks on achieving representative electron density profiles of the ionosphere: Performance and advantages of the "composite virtual height method". *Radio Sci.*, 9 (10), 825-835.
- RAWER, K., S. RAMAKRISHNAN y D. BILITZA, 1978. International Reference Ionosphere 1978. Report URSI, Brussels.
- SCHMERLING, E. R. y J. O. THOMAS, 1956. The distribution of electrons in the undisturbed F2 layer of the ionosphere. *Phyl. Trans. Roy. Soc.*, A248 (956), 609-620.
- SHIMAZAKI, T., 1955. World-wide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric F2 layer. *J. Rad. Res. Labs.*, 2, 85-97.
- WRIGHT, J. W., 1960. A test of a procedure for easy estimation of representative monthly electron density profiles for the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 65 (10), 3215-3217.
- WRIGHT, J. W. Y R. E. MCDUFFIE, 1960. The relation of  $h_{max}F2$  to M(3000) F2 and hpF2. *J. Rad. Res. Labs.*, 7 (32), 409-417.

---

L. Lois Menéndez, B. Lazo Olazábal y  
E. Araujo Pradere  
*Instituto de Física y Astronomía,  
Academia de Ciencias de Cuba.*