

## Perfiles N(h) sobre Cuba y su comparación con los resultados del IRI

L. Lois Menéndez, B. Lazo Olazábal y E. Araujo Pradere

Instituto de Geofísica y Astronomía

Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, Cuba.

### RESUMEN

Con base en el cálculo de perfiles N(h) promedio se compararon los resultados experimentales correspondientes a 4 meses de mínima y 4 meses de máxima actividad solar con los calculados para dichas condiciones mediante el modelo empírico global "Ionosfera Internacional de Referencia" (IRI). El IRI modela razonablemente la región del máximo de la capa F2 sobre Cuba, mientras que las discrepancias se incrementan notablemente con la disminución en altura. En general, la concordancia entre los datos modelados y los experimentales no depende claramente de la actividad solar y es mayor durante el día y en los equinoccios que en sus condiciones nocturnas y solsticiales.

**PALABRAS CLAVE:** perfiles N(h), IRI, altura del pico de la capa F2, densidad electrónica del pico de la capa F2.

### ABSTRACT

Based on the calculation of average N(h) profiles, experimental results from 4 months of minimum and 4 months of maximum solar activity were compared with the modelling predictions from the "International Reference Ionosphere" (IRI). The IRI models reasonably the region of the F2 peak in Cuba, while discrepancies increase notably with decreasing height. Generally, the agreement between the model and experimental data shows no clear dependence on the solar activity. It is greater during the day and at equinox than in nocturnal and solstitial conditions.

**KEY WORDS:** N(h) profiles, IRI, F2-layer peak height (hmF2), F2-layer peak electron density (NmF2).

### INTRODUCCION

El IRI (International Reference Ionosphere) es un modelo global de la ionosfera que fue establecido por un proyecto conjunto URSI-COSPAR bajo la dirección de K. Rawer. Representa el comportamiento medio de la ionosfera tranquila, con excepción de la región auroral, con base en las mediciones realizadas en todo el planeta durante los años 1950-1975. Su propósito es proveer información de la estructura vertical de los 4 parámetros principales de la ionosfera: la concentración del plasma, las temperaturas iónica y electrónica, y la composición iónica.

Los resultados del IRI han sido y son extensamente comprobados en diferentes regiones del planeta, utilizando diversas fuentes de información: observaciones de sondeo vertical e inclinado, rotación Faraday y dispersión incoherente, así como mediciones a bordo de cohetes y satélites. En los últimos años, Pasheva *et al.* (1984) y Hoang *et al.* (1984) han publicado comparaciones entre el IRI y los perfiles observados en Bulgaria y Viet-Nam, respectivamente. Los mismos autores sugieren que el ajuste no es bueno, con frecuentes discrepancias en concentraciones fijas que exceden los 50 km, particularmente en verano. Asimismo, McNamara (1984) obtuvo valores diurnos del contenido electrónico ionosférico inferiores en un 50% a los registrados en Manila, en un estudio global de las observaciones de rotación Faraday y las predicciones del IRI.

Estas divergencias resultan naturales por el carácter y la extensión de este modelo que, no obstante sus restricciones, se considera razonable si no se cuenta con un mode-

lo empírico muy localizado. Por otra parte, se realizan ingentes esfuerzos por mejorarlo en varias direcciones: e.g., mediante la eliminación de las discontinuidades que presenta el gradiente (Rawer, 1984; Guliaeva, 1984), la consideración de niveles superiores de actividad solar (Benkova *et al.*, 1984), y el logro de mejores concordancias con las observaciones (Bilitza, 1986). Esto se debe a que un modelo global brinda posibilidades que no se obtienen con los modelos más restringidos.

El objeto de estudio de este trabajo lo constituye la distribución vertical de la ionización ionosférica hasta hmF2; específicamente, la relación existente entre nuestros datos experimentales y los modelados mediante el IRI bajo diferentes situaciones heliogeofísicas. Su comparación permitirá determinar las limitaciones que tal modelo presenta en la región de Cuba.

### MATERIALES Y METODOS

Los materiales básicos utilizados en este trabajo fueron los perfiles N(h) de concentración electrónica con la altura sobre La Habana - experimentales y modelados - correspondientes a 8 meses de los años 1976-1977 y 1979-1980.

Este período, 4 meses de mínima (enero 77, junio 76, abril 76, septiembre 76) y 4 meses de máxima actividad solar (diciembre 79, junio 79, abril 80, octubre 79), se eligió por contener un volumen representativo de información ionosférica magneto-tranquila, por abarcar las diferentes estaciones del año y por corresponder a niveles extremos de actividad solar.

Los perfiles  $N(h)$  experimentales se calcularon a partir de los ionogramas de sondeo vertical registrados en la estación Centro Geofísico ( $22^{\circ}58'N$ ,  $82^{\circ}09'W$ ). Considerando condiciones magnéticas tranquilas ( $k_p \leq 3$ ), se elaboraron 192 ionogramas promedio, correspondientes a cada una de las 24 horas de los 8 meses seleccionados, usando el método de la altura virtual compuesta. Esto es, se determinaron gráficamente los ionogramas promedio de los grupos horario-mensuales de curvas  $h'(f)$  antes de computar el perfil, procedimiento cuyas bondades han sido discutidas en la literatura (e.g. Laird y Wright, 1967; Laird et al., 1974).

Los ionogramas promedio fueron transformados en perfiles  $N(h)$  con ayuda del programa ITERAN (Guliaeva, 1978), escrito en FORTRAN-77. El algoritmo del mismo está basado en un método laminar de segundo orden, que emplea la aproximación de Jackson ( $\Phi = N$ ), 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.

Por otro lado, se obtuvieron los perfiles  $N(h)$  modelados mediante el programa IRI-86 para las condiciones heliogeofísicas anteriores, i. e. latitud y longitud de la estación ionosférica en La Habana, meses elegidos y magnitudes respectivas de las medias móviles para 12 meses del número de manchas solares ( $R_{12}$ ), resolución horaria, y desde 100 km hasta hmF2. En cuanto a los parámetros críticos de la capa F2, se consideraron las dos opciones que ofrece este modelo: empleo de los valores predichos por el CCIR (IRI-CCIR) e introducción de los datos observados en la estación (IRI-EXP), con vistas a concluir sobre la alternativa más adecuada a nuestras condiciones.

Con base en esta información, se tabularon los isocontornos  $N(h, t)$  y  $h(N, t)$ , correspondientes a las variantes del modelo (IRI-CCIR e IRI-EXP) y a los datos experimentales. Se utilizaron los dos métodos para cotejar cabalmente los resultados empíricos y modelados, pues son demostrativos, el primero, de la variación temporal en altura de los niveles de isodensidad y el segundo, de los cambios en densidad para alturas dadas con el tiempo.

## RESULTADOS

La comparación de los perfiles  $N(h)$  sobre Cuba, obtenidos mediante la reducción de ionogramas de sondeo vertical terrestre y la aplicación del programa IRI, se realizó a partir del cálculo de sus desviaciones absolutas y relativas en densidad ( $N$ ) y en altura ( $h$ ), con el otro parámetro constante, y para diferentes niveles de  $N$  (múltiplos de  $10^5 \text{cm}^{-3}$  y NmF2) y  $h$  (100, 150, 200, 250, 300 km y hmF2).

En la Tabla 1 se presentan las desviaciones standard

(SD) y los coeficientes de variación ( $V$ ) de las  $N$  modeladas con respecto a las experimentales, considerando elevaciones de 200 km, 300 km y hmF2. Estos datos estadísticos se computaron diferenciadamente para horas nocturnas (19-23, 00-06 LT  $75^{\circ}W$ ), diurnas (07-18 LT  $75^{\circ}W$ ), y todo el día (00-23 LT  $75^{\circ}W$ ), que están representados en la Tabla por las letras N, D y T; además se examinaron en forma independiente las dos variantes del modelo IRI (CCIR, EXP).

El cuadro observado evidencia un buen ajuste al nivel del máximo de concentración ( $h = \text{hmF2}$ ), mayor en los equinoccios y alta actividad solar (10-15%) que en los solsticios y baja actividad solar (15-25%), en conformidad con la persistente manifestación del efecto semianual de la ionización en la ionosfera sobre Cuba y los valores superiores registrados durante períodos de máxima. Sin embargo, la concordancia empeora notablemente con la disminución en altura y durante la noche, cuando la dispersión relativa puede llegar a 10, a consecuencia, en gran medida, de la pequeñez de las concentraciones medidas en tales condiciones. Por otro lado, no puede afirmarse que el empleo del IRI-EXP mejore sustancialmente la precisión de los perfiles  $N(h)$  modelados en la región F, mientras que aquella disminuye con frecuencia en la baja ionosfera.

La Tabla 2, de forma análoga a la precedente, muestra los parámetros SD y  $V$  de las alturas correspondientes a concentraciones modeladas y empíricas fijas, pero combinando los niveles de isodensidad proporcionales a  $10^5 \text{cm}^{-3}$  ( $N$ -fijo) y - separadamente - para la concentración pico (NmF2). Ante todo, se advierte una mayor exactitud en las alturas predichas que en los patrones de densidad electrónica derivados mediante el IRI. La correspondencia entre los datos también es adecuada al nivel crítico ( $N = \text{NmF2}$ ), con errores inferiores a los 20 km, excepto en las horas diurnas de diciembre 79 en que alcanza 36 km, y se debilita por debajo del máximo de ionización de la ionosfera.

Finalmente, en la Tabla 3 se exhiben las frecuencias acumulativas de aparición de desviaciones entre los parámetros modelados y los observados, superiores a valores dados de concentración ( $N \geq 50\%$ ) y altura ( $h \geq 30, 50 \text{ km}; 15, 20\%$ ). Se reitera que el ajuste es mejor a alturas mayores, durante el día y en primavera, mientras que no se explicita la dependencia con el nivel de actividad solar, aunque es peor en diciembre 79, así como la inconveniencia del uso de la alternativa del IRI-EXP para modelar la baja ionosfera, fundamentalmente en períodos de mínima actividad solar.

## SUMARIO

Los perfiles  $N(h)$  obtenidos en Cuba a partir de los ionogramas de sondeo vertical terrestre y del modelo empírico IRI para condiciones extremas de actividad solar muestran un ajuste razonable en la región crítica de la capa F2. Además, la concordancia es mayor durante el día y en los equinoccios que en condiciones nocturnas y solsticiales. A medida que disminuimos en altura se observan discre-

Tabla 1

Desviaciones standard (SD) y coeficientes de variación ( $\Delta$ ) de las concentraciones electrónicas modeladas con el IRI respecto a los valores experimentales para h constante.

ENE '77							JUN '76					
200 Km 300 Km							200 Km 300 Km					
CCIR EXP CCIR EXP h <sub>m</sub> F2							CCIR EXP CCIR EXP h <sub>m</sub> F2					
NOCHE	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	0.20	0.26				0.37	0.50	0.57			0.68
	D %	91	118				23	135	154			27
DIA	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	1.72	0.75				0.85	0.84	0.52			0.97
	D %	74	32				20	36	22			20
TOTAL	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	1.22	0.56				0.66	0.69	0.55			0.84
	D %	97	44				24	51	41			23

  

DIC '79							JUN '79					
200 Km 300 Km							200 Km 300 Km					
CCIR EXP CCIR EXP h <sub>m</sub> F2							CCIR EXP CCIR EXP h <sub>m</sub> F2					
NOCHE	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	0.79	0.39	1.23	0.18		0.76	0.71	0.68	2.89	2.02	1.11-
	D %	658	325	42	6		22	254	243	63	44	14
DIA	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	4.54	2.19	2.53	0.82		1.80	0.92	1.11	0.87	1.63	2.47
	D %	225	108	19	6		12	28	33	9	17	20
TOTAL	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	3.26	1.57	1.99	0.59		1.38	0.82	0.92	2.13	1.83	1.91
	D %	305	147	25	7		17	43	48	30	26	19

  

SEP '76							ABR '76					
200 Km 300 Km							200 Km 300 Km					
CCIR EXP CCIR EXP h <sub>m</sub> F2							CCIR EXP CCIR EXP h <sub>m</sub> F2					
NOCHE	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	0.36	0.44				0.25	0.62	0.79			0.37
	D %	138	169				14	282	359			16
DIA	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	1.75	0.82				0.93	0.70	1.11			0.76
	D %	85	40				16	28	44			12
TOTAL	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	1.27	0.66				0.68	0.66	0.96			0.60
	D %	109	57				19	48	70			15

  

OCT '79							ABR '80					
200 Km 300 Km							200 Km 300 Km					
CCIR EXP CCIR EXP h <sub>m</sub> F2							CCIR EXP CCIR EXP h <sub>m</sub> F2					
NOCHE	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	1.86	0.83	1.62	0.81		1.63	0.51	0.33	2.23	0.79	1.38
	D %	845	377	27	14		24	464	300	39	14	14
DIA	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	3.39	2.30	2.60	1.27		1.50	1.83	1.57	1.55	1.26	1.47
	D %	54	37	16	8		7	38	33	9	8	8
TOTAL	SD [10 <sup>5</sup> cm <sup>-3</sup> ]	2.73	1.73	2.07	1.03		1.57	1.34	1.13	1.94	1.04	1.43
	D %	84	53	20	10		12	55	46	17	9	10

Tabla 2

Desviaciones standard (SD) y coeficientes de variación (D) de la alturas modeladas con el IRI respecto a los valores experimentales para N constante.

		ENE'77		JUN'76	
		NFIJO	NmF2	NFIJO	NmF2
NOCHE	SD [Km]	21	11	20	15
	D %	8	4	8	5
DIA	SD [Km]	27	14	32	21
	D %	14	6	16	7
TOTAL	SD [Km]	26	12	28	18
	D %	13	5	13	6

  

		DIC'79		JUN'79	
		NFIJO	NmF2	NFIJO	NmF2
NOCHE	SD [Km]	50	36	48	19
	D %	17	11	15	5
DIA	SD [Km]	42	36	22	14
	D %	17	11	8	4
TOTAL	SD [Km]	44	36	35	17
	D %	17	11	12	5

  

		SEP'76		ABR'76	
		NFIJO	NmF2	NFIJO	NmF2
NOCHE	SD [Km]	18	13	19	25
	D %	7	4	8	9
DIA	SD [Km]	43	21	15	8
	D %	20	8	8	3
TOTAL	SD [Km]	39	17	16	18
	D %	18	6	8	7

  

		OCT'79		ABR'80	
		NFIJO	NmF2	NFIJO	NmF2
NOCHE	SD [Km]	32	20	26	20
	D %	12	6	9	5
DIA	SD [Km]	22	10	20	10
	D %	10	3	7	3
TOTAL	SD [Km]	25	15	22	16
	D %	11	5	8	5

Tabla 3

Frecuencias de ocurrencia de desviaciones superiores a niveles fijos del IRI respecto a los valores experimentales

	$\Delta N \geq 50 \%$								CCIR $\Delta h$			
	200 Km				300 Km				$\Delta h \geq 50$ Km	$\Delta h \geq 30$ Km	$\Delta h \geq 20 \%$	$\Delta h \geq 15 \%$
	NOCHE		DIA		NOCHE		DIA					
	CCIR	EXP	CCIR	EXP	CCIR	EXP	CCIR	EXP				
ENE '77	50	75	58	17	0	0	0	0	2	25	9	28
JUN '76	67	83	17	0	0	0	0	0	11	30	8	27
SEP '76	83	83	42	25	0	0	0	0	4	28	6	21
ABR '76	42	83	8	25	0	0	0	0	1	10	4	12
SUBTOTAL	60	81	31	17	0	0	0	0	5	23	7	21
DIC '79	100	83	92	67	33	0	0	0	30	63	32	53
JUN '79	100	89	17	25	33	42	0	0	20	40	9	31
OCT '79	100	100	42	17	8	0	0	0	3	20	6	19
ABR '80	100	92	17	8	0	0	0	0	2	16	6	12
SUBTOTAL	100	91	42	29	19	10	0	0	10	30	11	25
TOTAL	80	86	36	23	14	8	0	0	8	27	9	23

pancias significativas que pueden incrementarse al considerar la variante IRI-EXP. La correspondencia entre los datos experimentales y los modelados no manifiesta una clara relación con el nivel de actividad solar, aunque es superior durante períodos de máxima a las alturas del pico de ionización. El empleo del IRI como una alternativa en las tareas de predicción de la FMU (frecuencia máxima utilizable) se justifica en nuestra región, fundamentalmente para propagación a través de la capa F2.

#### BIBLIOGRAFIA

- BENKOVA, N. P., N. A. KOCHENOVA, A. D. LEGENKA, M. N. FATKULLIN and M. D. FLIGEL, 1984. Model representation of mid-latitude electron density by means of Interkosmos-19 data. *Adv. Space Res.*, 4, 1, 51-58.
- BILITZA, D., 1986. International reference ionosphere: Recent developments. *Radio Sci.*, 21, 3, 343-346.
- GULIAEVA, T. L., 1978. Programa ITERAN en FORTRAN para el análisis N(h) iterativo rápido de ionogramas (en ruso). IZMIRAN, Moscú, 39 pp.
- GULIAEVA, T. L., 1984. Geometry of the "exponential" middle ionosphere. *Adv. Space Res.*, 4, 1, 17-24.
- HOANG, L., K. B. SERAFIMOV, I. KUTIEV and M. KARADIMOV, 1984. Bottomside N(h) profiles over VietNam and their comparison with IRI. *Adv. Space Res.*, 4, 1, 65-70.

LAIRD, A. R. and J. W. WRIGHT, 1967. Computation and application of synoptic ionospheric profiles. *Radio Sci.*, 2, 10, 1255-1261.

LAIRD, A. R., J. W. WRIGHT and 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.

McNAMARA, L. F., 1984. Prediction of total electron content using the International Reference Ionosphere. *Adv. Space Res.*, 4, 1, 25-50.

PASHEVA, Ts., D. SAMARDZIEV, N. P. BENKOVA, N. A. KOCHENOVA and Ju. KUSHNEREVSKIY, 1984. Observed and model N(h) profiles for the Bulgarian region. *Adv. Space Res.*, 4, 1, 61-64.

RAWER, K., 1984. New description of the electron density profile. *Adv. Space Res.*, 4, 1, 11-16.

L. L. Menéndez, B. Lazo Olazábal y E. Araujo Pradere

*Instituto de Geofísica y Astronomía  
Academia de Ciencias de Cuba.  
Ave. 212 No. 2906 E/29 y 31,  
La Lisa, Ciudad de La Habana, Cuba.*