

Curso anual del perfil vertical del coíndice de refracción de la atmósfera en el PMC*

**Juan Carlos ANTUÑA MARRERO
y **Roberto AROCHE RAMIREZ

RESUMEN. *Se estudia por primera vez la marcha anual de los perfiles verticales del coíndice de refracción (N) para el Polígono Meteorológico de Camagüey (PMC) empleando los datos del modelo estadístico de la atmósfera obtenido para el mismo. Se evalúa la amplitud del curso anual de N por niveles mandatorios y para alturas cada 500 m a partir de la superficie. Se emiten criterios sobre la influencia de las condiciones físico-geográficas en el comportamiento de N en la troposfera baja. Son obtenidos además los perfiles del gradiente vertical de N, permitiendo determinar tres capas de la atmósfera donde su comportamiento es diferente.*

INTRODUCCION

El estudio de la refracción de ondas electromagnéticas por la atmósfera mantiene gran actualidad, a pesar de que en este campo se ha trabajado por largos años a nivel internacional, las particularidades físico-geográficas de cada región determinan la influencia del índice de refracción (n) sobre la propagación de dichas ondas. Además, el desarrollo de nuevas técnicas de monitoreo remoto renueva su importancia. Tomemos como elemento de juicio el hecho de que para la XXII Asamblea General de la Unión Internacional de Ciencias de Radio (URSI) sólo sobre el tema de propagación de ondas y monitoreo remoto se recopilaron más de 900 referencias en el período 1983-1986 (Hide, 1987).

La revisión bibliográfica con los medios a nuestro alcance sólo nos permitió localizar un trabajo sobre el tema realizado con radiosondeos de Ciudad de la Habana en el que se utilizó una muestra de alrededor de 4 años para la capa de 1 km sobre la superficie (Martínez *et al.*, 1984). Además, uno de los autores había obtenido resultados preliminares para el Polígono Meteorológico de Camagüey (PMC), empleando las técnicas del diseño de experimentos (Antuña *et al.*, 1985). Esta falta de información unido al

*Manuscrito aprobado en mayo de 1991.

**Centro Meteorológico Territorial de Camagüey, Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba.

hecho de disponer de un estudio climatológico de las variables de las que depende n (Antuña *et al.*, 1989), nos impulsó a realizar este trabajo con el objetivo de brindar una información que puede ser útil para los especialistas en telecomunicaciones para la

estimación del nivel esperado de la señal así como su rango práctico en el decursar del año, que como se conoce están relacionados en buena medida con el valor de N en superficie y sus proximidades (Antuña y Dutton, 1966).

MATERIALES Y METODOS

Las diferentes teorías que toman en consideración los mecanismos de propagación de las ondas radiotécnicas particularmente en la baja troposfera, utilizan el índice de refracción n . Atendiendo el orden de magnitud de n se utiliza con fines prácticos el llamado índice de refracción (N), que se empleará a lo largo de este trabajo, donde:

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (1)$$

medida por métodos indirectos a través de la expresión (Bean y Dutton, 1966):

$$N = \frac{77.6}{T} P + \frac{4810}{T} e \quad (2)$$

siendo P la presión (en hPa), e la tensión de vapor (en hPa) y T la temperatura (en grados Kelvin).

El error sumario en la evaluación de N empleando (1) para frecuencias de hasta 100 GHz es inferior al 3% (Bean y Dutton, 1966).

Los valores de P , T y e empleados son las medias para cada mes por niveles mandatorios en un período de 8 años (1981-1988) obtenidos a partir de los sondeos de las 12:00 Z (07.00 AM, hora local del meridiano 75° W) de la estación aerológica del PMC (Antuña *et al.*, 1985).

También se emplearon las medias estacionales así como las correspondientes a los

períodos lluvioso y poco lluvioso. Se obtuvieron los valores medios de N por niveles mandatorios para todos estos períodos. Posteriormente se realizó la interpolación logarítmica de estos resultados cada 500 m desde 122 m (superficie) hasta 9,5 km.

En relación con la información original utilizada debe señalarse que aunque no es totalmente homogénea (Antuña *et al.*, 1985), cumple con los criterios que permiten emplearla como serie climatológica (Guardiola, 1989). Los valores medios de N obtenidos a partir de los valores medios de P , T y e difieren a lo sumo en 1,5 unidades de N de los obtenidos a partir del promedio de observaciones individuales (Bean y Dutton, 1966), lo que justifica el empleo indistintamente de uno u otro método.

Se obtuvieron también los valores de N para la superficie (N_s) empleando los valores medios de P , T y e en el mismo período de años a las 12:00 Z de la estación meteorológica de Camagüey, con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos por extrapolación para el nivel de superficie.

Realmente la refracción, como cambio en la dirección de propagación de las ondas, está determinada por el gradiente vertical de N (GVN). Por ello el mismo se calculó a partir de los valores medios de N empleando la expresión:

$$GVN = \frac{N_{i+1} - N_i}{Z_{i+1} - Z_i} \quad (3)$$

Z_{i+1} y Z_i son niveles vecinos y (GVN) =
= unidades de $N/100$ m

El procesamiento de la información se

realizó en la microcomputadora "Electrónica 60" con programas en lenguaje Pascal diseñados al efecto.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 1 se muestran los valores medios de N obtenidos para diferentes niveles mandatorios y meses, así como las magnitudes de la amplitud del curso anual (ACA) del mismo. Se observa que los valores mínimos tienen lugar en invierno y los máximos en verano, disminuyendo con la altura su amplitud anual, lo que indica que las mayores oscilaciones de N se concentran hacia la troposfera baja, disminuyendo su valor en condiciones de bajas temperaturas, lo que está en perfecta concordancia con los resultados obtenidos en (Pisarenko, 1976). Mientras la Fig. 1 muestra los valores interpolados de N apreciándose más claramente el anterior señalamiento. Se aprecian además los valores de NS obtenidos por interpolación para la superficie (con puntos) y los obtenidos de los datos medios de la

estación meteorológica (con signos +). La concordancia es muy buena entre los valores obtenidos por ambas vías, reafirmando los criterios de la validez de la interpolación de N (Bean y Dutton, 1966). Otra característica de interés se aprecia desde 0,5 casi hasta 4,5 km en un punto de inflexión en la curva en el mes de Julio, consecuencia de un comportamiento similar de los valores medios de T y T_d (Antuña *et al.*, 1985), que los autores consideran asociado a características particulares de este mes que aún no han sido estudiadas en detalle. El criterio anterior se sustenta en el hecho de que julio y agosto corresponden a lo que se ha dado en llamar "sequía interestival" dentro del período lluvioso en nuestra provincia (Atlas de Camagüey, 1989).

TABLA No. 1: *Comportamiento de N por meses para algunos niveles mandatorios. ACA = Amplitud del Curso Anual*

Mes	Niveles (hPa)				
	1 000	850	500	300	200
Enero	352,5	281,6	152,0	98,3	70,9
Febrero	354,5	284,2	152,1	98,3	70,8
Marzo	355,9	282,9	152,1	98,3	70,9
Abril	360,2	283,5	151,8	98,0	71,0
Mayo	370,0	290,9	154,2	98,1	70,8
Junio	378,1	295,1	156,7	98,1	70,9
Julio	380,5	290,5	156,7	98,5	71,2
Agosto	382,1	296,1	156,3	98,2	71,1
Setiembre	379,3	297,6	156,7	98,2	71,0
Octubre	374,5	295,6	154,7	98,2	71,1
Noviembre	365,9	285,9	151,9	98,0	71,1
Diciembre	359,5	285,6	150,6	98,0	70,9
ACA	29,6	16,0	6,1	0,5	0,4

Las particularidades del mes de julio se reflejan también en la Fig. 2, donde aparece la marcha anual de dN/dz , pues desde superficie hasta 1 500 m presenta un máximo y a partir de esta última altura hasta prácticamente 7 500 m presenta un punto de inflexión.

En esta propia figura se diferencian tres regiones en que dN/dz tiene un comportamiento característico; de 122 a 1 500 m, correspondiente a la capa fronteriza planetaria (CPF), la curva tiene un carácter bimodal, con los mayores valores de dN/dz así como sus mayores variaciones anuales, lo que se explica por el hecho de ser la CPF la región de la tropósfera donde se producen las mayores variaciones de los parámetros de los que depende N . A partir de 1 500 m hay una tendencia a una curva trimodal, definida más claramente entre 3 000 y 6 000 m. En esta capa se registra la influencia, menos acusada que en la primera, de las variaciones de T y e debido a los procesos convectivos y de la mesoescala.

Por último desde 6 000 a 9 500 m la variación de dN/dz está en clara concordancia con los períodos lluvioso y poco lluvioso, que desaparece prácticamente a partir de los 9 000 m a partir de donde puede considerarse que no existen variaciones de dN/dz .

En dependencia del tipo de refracción que se produce podemos establecer la siguiente clasificación de la tropósfera sobre el PMC (Dolukhanov, 1971);

CAPA	TIPO DE REFRACCION
122 m - 2 500 m	aumentada
2 500 m - 3 500 m	estándar
3 500 m - 9 000 m	subrefracción

Estos resultados concuerdan, en lo fundamental, con los obtenidos para el PMC empleando las técnicas del diseño de Experimentos (Antuña et al., 1985), permitiendo

una mayor precisión del comportamiento del GVN, así como determinar que en la CPF existe refracción aumentada, lo que es de gran interés y utilidad práctica por ser en esta región donde tienen lugar los radioenlaces. Debe tomarse en cuenta que algunos autores no establecen diferencias entre superrefracción y refracción aumentada, optando por la primera.

En la Tabla 2 se muestra una comparación de nuestros resultados con un promedio de N realizado para 39 estaciones-año de radiosondeos individuales para verano e invierno en 13 regiones climáticas diferentes (Bean y Dutton, 1966) que se denomina como N_1 y el promedio de N para los períodos seco y lluvioso de nuestros resultados, denotado por N_2 . Como se aprecia hay una buena concordancia en el carácter de la variación y en su magnitud, entre ambos resultados lo que nos ratifica la validez de los mismos, así como el hecho de que en este intervalo de alturas la propagación de las ondas electromagnéticas presenta características comunes en diferentes regiones del planeta.

TABLA 2. Valores de N para la capa 4 km - 9 km.
 N_1 —Promedio de 39 estaciones-año para 13 regiones climáticas diferentes.
 N_2 —Promedio de 8 años para el PMC.

Altura (en km)	N_1	N_2
4	197,1	197,6
5	172,1	172,9
6	151,4	151,0
7	134,0	134,3
8	118,4	119,3
9	104,8	106,1

Sin embargo, en los niveles bajos, al predominar procesos fuertemente vinculados a las características físico geográficas no hay una concordancia tan buena. Los datos que se muestran en la Tabla No. 3 permiten comparar nuestros resultados y los obtenidos en la Isla Swan relativos a la variación de N .

(DN) por kilómetro por capas para los meses de Febrero y Agosto (Bean y Dutton, 1986). Se aprecian diferencias de hasta 20 unidades de magnitud entre los gradientes en ambas estaciones, acentuándose en la capa de superficie a 0,5 km.

Para tener una idea general del comportamiento de N_s según las características climáticas y geográficas de las estaciones se

emplea una clasificación que consta de 7 tipos diferentes de condiciones climatogeográficas (Beann y Dutton, 1986). En base a ellas nuestra estación se clasifica como Subtropical de Sabana, concordando con el hecho de que como estación típica de esta clasificación se emplea la estación de Miami en la Florida próxima a nuestro país.

TABLA No 3: *Valores medios del GVN para febrero y agosto en las cercanías de la superficie para la Isla Swan y para el PMC.*

Estación	Capa	Febrero	Agosto
		-DN	-DN
Swan	Sup. -0,5 km	39	47
	0,5 km -1,0 km	58	66
PMC	Sup. -0,5 km	55	67
	0,5 km -1,0 km	51	62

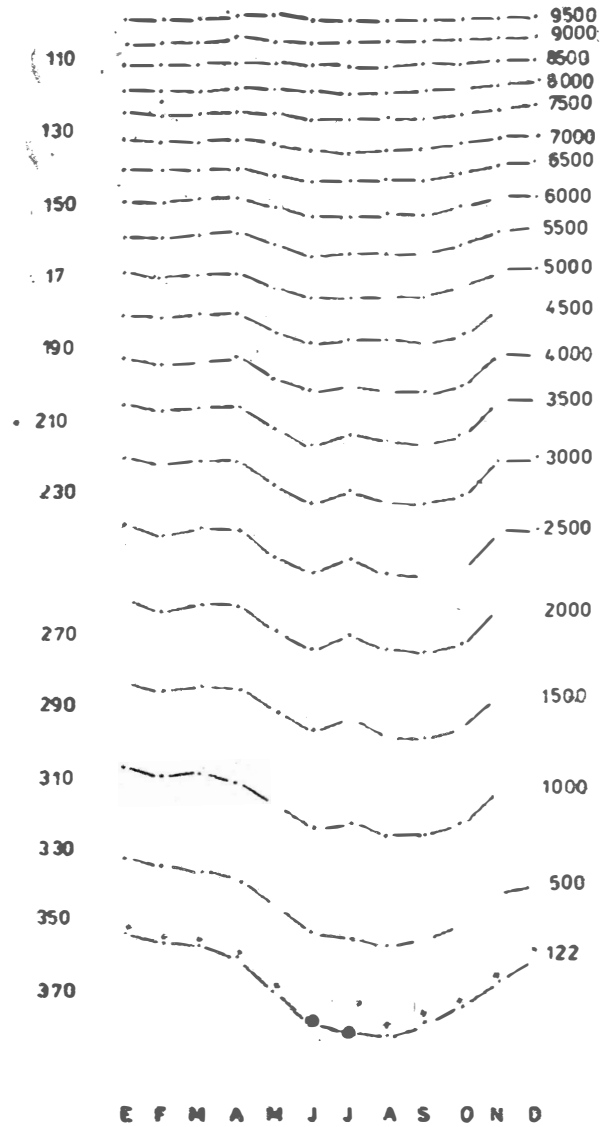


Fig. 1. Se muestran los valores interpolados de N.

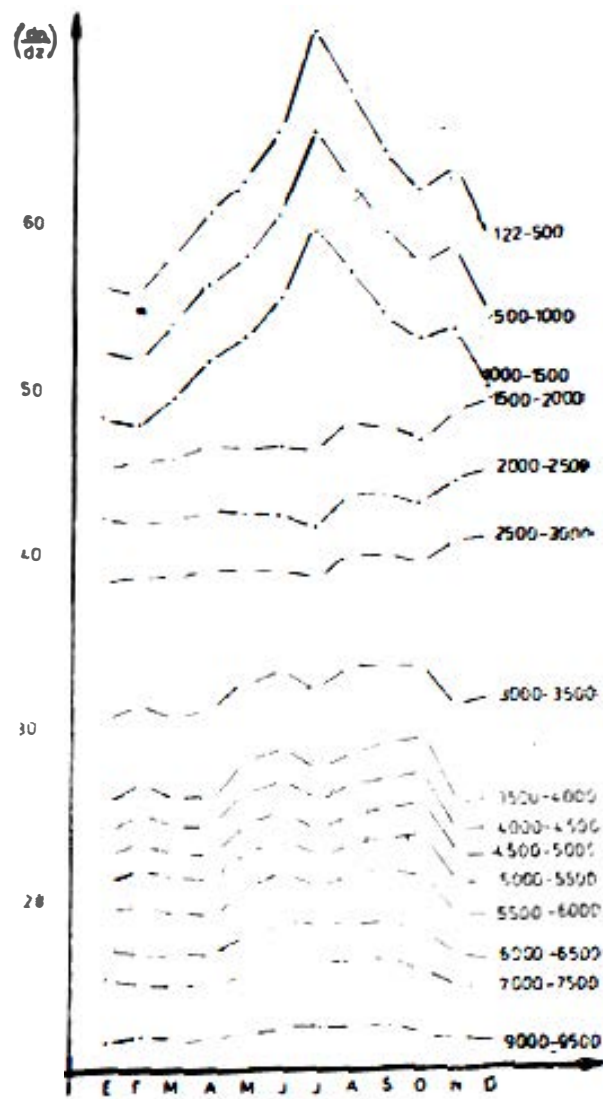


Fig. 2. Refleja las particularidades del mes de julio.

CONCLUSIONES

Se evidencia una fuerte relación entre los valores de N y la temperatura, de manera que las mayores (menores) oscilaciones del mismo tienen lugar cuando las temperaturas son altas (bajas) nexa que se manifiesta tanto en su curso anual como en su distribución vertical.

La marcha anual del índice de refracción de la atmósfera sobre el PMC tiene un carácter similar al de estaciones del área,

con particular diferencia por debajo de 3 km.

Se ha caracterizado el comportamiento del índice de refracción superficial según la clasificación climática subtropical de sabana.

Atendiendo a la distribución vertical del gradiente de N en la tropósfera sobre el PMC pueden diferenciarse tres capas: de los 122 m a 2 500 m con refracción aumentada, de 2 500 a 3 500 m con refracción estándar y por encima de 3500 m con subrefracción.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al C. Dr. Orlando Núñez por el aná-

lisis crítico del manuscrito, sus múltiples sugerencias y recomendaciones.

REFERENCIAS

- Antuña, J. C., C. Morales, A. Pardo y A. Guaty (1985): El comportamiento del índice de refracción en el PMC. Resultados preliminares [inédito]. Trabajo presentado en la II Conferencia Científico-Técnica del Centro Meteorológico Experimental de Camagüey, (UDICT, CMC), No. 23 de marzo de 1985, 11 pág.
- Antuña, J. C. y D. Marin (1989): "Modelo de densidad del aire y otros parámetros de la atmósfera en el PMC" [inédito], Informe Técnico, 27 pp., UDICT, CMC.
- Atlas de Camagüey (1989): Instituto de Geografía, Academia de Ciencias de Cuba, 1ª Edición.
- Bean, B. R. y E. J. Dutton (1966): *Radiometeorology*. National Bureau of Standards Monograph 92, U.S. Government Printing Office, 435 pp.
- Dolukhanov, M. (1971): *Propagation of Radiowaves*. MIR Publishers, Moscow, 372 pp.
- Hyde, G., (ed.) (1987): *Review of Radio Science 1984-1986*, International Union of Radio Science, Brussels, 174 pp.
- Jansa Guardiola, J. M. (1969): *Curso de Climatología*. Madrid.
- Martínez, R., R. Martín, y R. Hourrutine (1984): Caracterización preliminar de la refractividad de la tropósfera inferior en Cuba. *Rev. Ciencias Tierra Espacio*, 8:3-8.
- Pisarenko, B. K. (1976): Estructura vertical del índice de refracción para radioondas ultracortas en condiciones de temperaturas negativas [en ruso]. *Meteorología e Hidrología*, 41(9):100-102.

Ciencias de la Tierra y del Espacio, 21-22/93

THE ANUAL COURSE OF THE VERTICAL PROFILES
OF THE REFRACTION COINDEX (N) FOR THE METEOROLOGICAL
POLIGON OF CAMAGÜEY (PMC)

Juan C. ANTUÑA MARRERO
and Roberto AROCHE RAMIREZ

ABSTRACT. The annual course of the vertical profiles of the refraction coindex (N) for the Meteorological Poligon of Camagüey (PMC) was studied by first ocation, employing data from the atmosphere statistical model obtained for this site. The amplitude of the annual course of N by mandatory levels and every 500 m, begining on the surface, was evaluated. It is proposed some opinion about the physical-geographical conditions influence in the course of N in the low troposphere. The vertical gradient of N permit us to divide the atmosphere in three layers with different characteristics.