

METEOROLOGIA

Variación temporal del coíndice de refracción atmosférica referido al nivel medio del mar en el PMC*

**Roberto AROCHE RAMIREZ,
**Juan Carlos ANTUÑA MARRERO
y **René ESTEVAN ÁRREDONDO

RESUMEN. *Se estudia el curso anual del índice de refracción en superficie empleando datos de las estaciones meteorológicas del PMC. Se establecen sus características para cada estación y se logra una diferenciación entre las zonas costeras y las ubicadas en la zona central. Los resultados concuerdan en general con los obtenidos por los investigadores para estaciones vecinas ubicadas en las costas del Golfo de México.*

INTRODUCCION

La propagación de las ondas electromagnéticas en la atmósfera es la base de dos importantes ramas de la ciencia y la técnica: las radiocomunicaciones y el monitoreo remoto, sin las cuales es prácticamente inconcebible la vida moderna. Las ecuaciones de Maxwell permiten describir dicha propagación y ponen de relieve la complejidad de la misma debido a que en ésta intervienen los fenómenos de la dispersión, absorción y difracción. La influencia de éstos depende tanto de la longitud de onda de la radiación electromagnética como de la región y condiciones de la atmósfera en que la misma se propaga.

Las ondas ultracortas que abarcan el rango de frecuencias comprendido entre 30 MHz y 300 GHz, son las empleadas en los sistemas de radioenlace, la radio, la televisión y los sistemas de radares de navegación aérea y marítima, así como en los radares meteorológicos convencionales. El principal fenómeno que afecta la propagación de las mismas es el de la refracción que consiste en que las variaciones en la densidad del medio dan lugar a un aumen-

*Manuscrito aprobado en mayo de 1991.

**Centro Meteorológico Territorial de Camagüey, Instituto de Meteorología de La Habana.

to o disminución de la velocidad de propagación (velocidad de fase de la onda), provocando que la trayectoria de propagación sufra una curvatura. Comúnmente se emplea el índice de refracción (n) para caracterizar este fenómeno, o el llamado coíndice de refracción (N).

Como es conocido la atmósfera es un sistema de densidad no homogénea, tanto en la vertical como en sentido horizontal, por lo que tienen lugar en la misma variaciones de n , que son particularmente notables en la vertical. No obstante, la variación horizontal es relevante en regiones que estén bajo los efectos de las brisas así como de zonas frontales (Bean y Dutton, 1966) como es el caso de nuestro país, en que las primeras ocurren casi simultáneamente en los litorales norte y sur a todo lo largo del país, limitando considerablemente las comunicaciones y el monitoreo radioeléctrico transversal de la isla, particularmente en verano y las segundas en invierno (Moreno, Díaz Maqueira y Pérez Osorio, 1980) durante su recorrido de occidente a oriente que si bien

se realiza en ocasiones en el transcurso de un día, frecuentemente es más lento, incidiendo en los radioenlaces entre las regiones extremas del país. Los efectos de esta variación se manifiestan en la atenuación del nivel de la señal de radio en un rango de 0,14 a 0,24 dB por unidades de variación de Ns (valor de N en la superficie) (Bean y Dutton, 1966). También provoca errores en los sistemas de radar, tanto en el ángulo de elevación, como en la distancia al objetivo y su altura debido a la desviación del haz de radar de su trayectoria y en el caso particular de los últimos por la disminución de la velocidad de propagación de la señal (Bean y Dutton, 1966).

En el caso del Polígono Meteorológico de Camagüey (PMC) la distribución vertical del coíndice de refracción y su correspondiente gradiente han sido estudiados anteriormente (Antuña, Morales, Pardo y Guaty, 1985; Antuña y Aroche 1990), no así en la horizontal. El estudio en esta última es el objetivo del presente trabajo.

MATERIALES Y METODOS

La muestra estudiada corresponde a un período de 10 años de observaciones, desde el año 1980 hasta 1989, de las estaciones meteorológicas Camagüey, Florida, Nuevitas, Esmeralda, Palo Seco, y Santa Cruz del Sur. En el caso de esta última solo se cuenta con información de un período de 4 años desde 1986 hasta 1989. Se tomaron los valores medios mensuales de presión al nivel de la estación (p) en hPa, temperatura (T) en grados Celsius y humedad relativa (HR) en porcentaje, de las observaciones trihorarias comprendidas desde las 12:00 Z hasta las 00.00 Z (07:00 am a 07:00 pm, hora local del meridiano 75°W, ambas inclusive, para cada año.

Si la atmósfera es considerada como una mezcla mecánica de aire seco y vapor de agua, bajo determinados supuestos, relativos a su composición y características de las ondas electromagnéticas que en ella se propagan (Antuña, Morales, Pardo y Guaty, 1985; Antuña y Aroche 1990) se obtiene la siguiente expresión para el índice de refracción:

$$n - 1 + 10^{-6} \left[\frac{77,6}{T} \left(\frac{p + 4810}{T} e \right) \right] \quad (1)$$

donde:

p es la presión atmosférica en hPa

e es la tensión de vapor en hPa

T es la temperatura en grados Kelvin

Empleando el coíndice de refracción

$$N = \left[\frac{77,6}{T} - \left(\frac{p + 4\,810}{T} - e \right) \right] \quad (2)$$

que es una ecuación con un alto grado de exactitud; tómese en cuenta que para frecuencias de hasta 100 GHz el erro es sumario es del 3% (Bean y Dutton, 1966).

Para la tensión de vapor se empleó la ecuación de Magnus (Jromov y Mamontova, 1974):

$$e = 6,1 \times 10^{(7,45 Td) / (235 + Td)} \quad (3)$$

donde Td es la temperatura del punto de rocío en °C.

y para el cálculo de esta última la expresión (Trifonova, 1979):

$$Td = 237,3 \frac{7,5 T + YY}{1\,779,75 - YY} \quad (4)$$

$$YY = 0,43429 [237,3 + T] \times \ln \frac{HR}{100}$$

donde: HR : Humedad relativa en %.

T : Temperatura ambiente en °C.

Para cada estación se obtuvieron los valores de N_s por meses y horarios cada año y posteriormente se obtuvieron los valores medios multianuales de N_s por meses para cada horario durante los 10 años.

La provincia de Camagüey es una de las más llanas de Cuba. No obstante, con el objetivo de poder comparar con mayor rigor los valores de N_s en diferentes estaciones se procedió al cálculo de N_o como recomienda la literatura (Bean y Dutton, 1966), empleando la fórmula:

$$N_o = N_s \exp(h/H) \quad (5)$$

donde: N_s : Valor de N para el nivel de la estación.

h : Altura de la estación sobre el nivel del mar.

H : Altura Escala para N .

N_o : Valor de N reducido al nivel del mar.

Para obtener N_o fue necesario calcular el valor de H , que por definición es la altura a la cual N alcanza el valor $N_s e$ (donde $e = 2,7$ es el número de Nepper). Se evaluó H por meses empleando resultados obtenidos para la distribución vertical de N en el PMC. El valor medio de H resultó ser de 6944 m.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las figuras 1 a la 6 muestran los cambios diurnos y estacionales de N_o para cada una de las estaciones. En todas puede apreciarse que el ciclo anual se caracteriza por notables diferencias entre los períodos poco lluvioso (noviembre-abril) y lluvioso (mayo-octubre), como consecuencia de las diferencias en la temperatura y humedad entre ambos. Los máximos corresponden al período lluvioso, con valores de N_o de alrededor de

385 unidades de N y los mínimos de aproximadamente 350 unidades de N en el período poco lluvioso, conduciendo esto a una amplitud de 35 unidades en la variación anual del parámetro. De manera que, las señales radioeléctricas sufren en el transcurso del año, como promedio, niveles de atenuaciones, cuyas oscilaciones tienen una amplitud de 4,5 db.

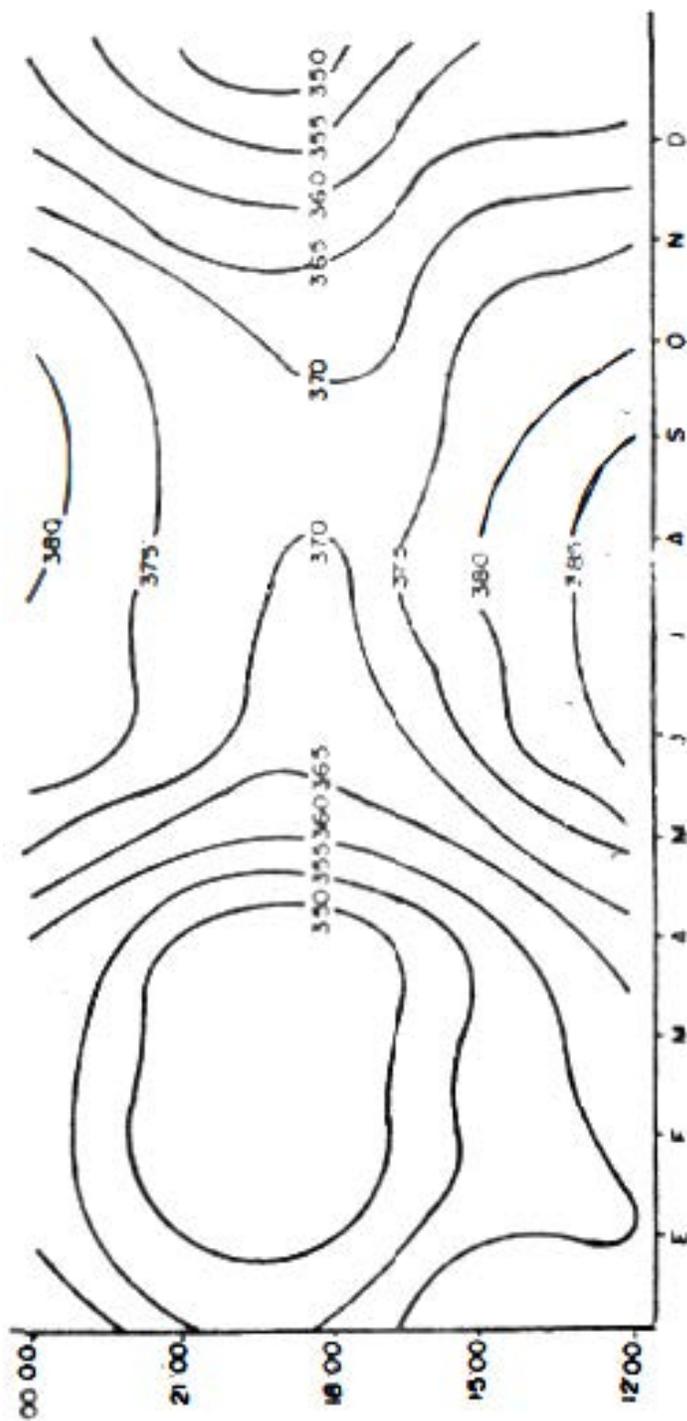


Fig. 1. Camagüey 1980-1989.

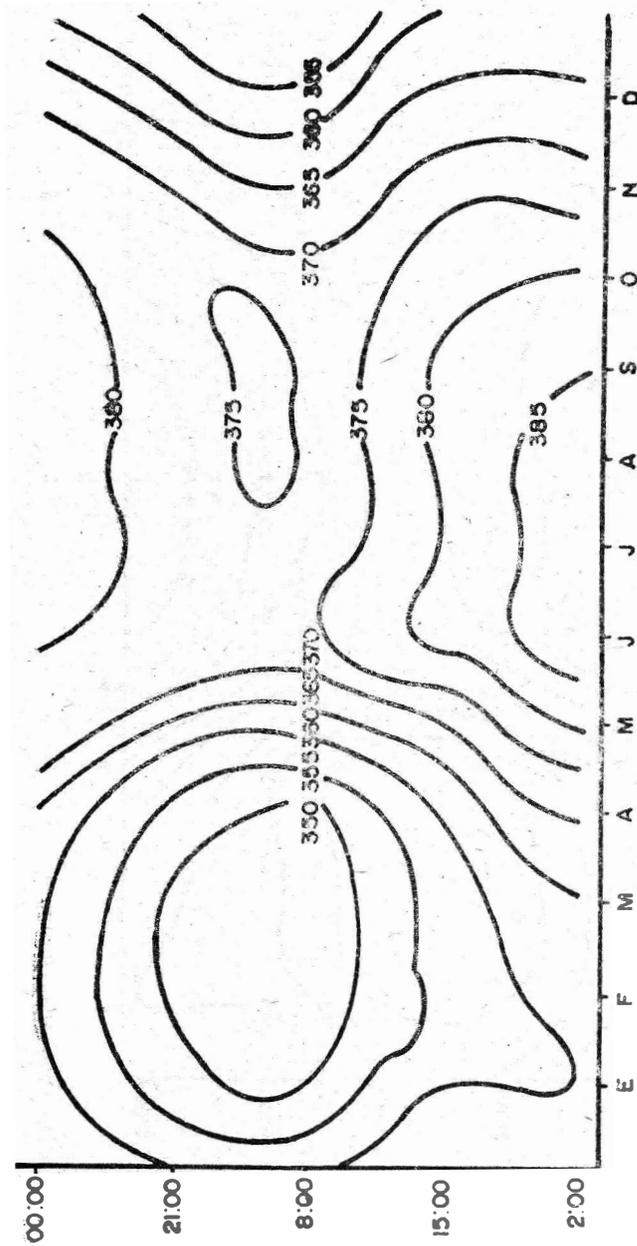


FIG. 2. Prof. Sección FERRAJON.

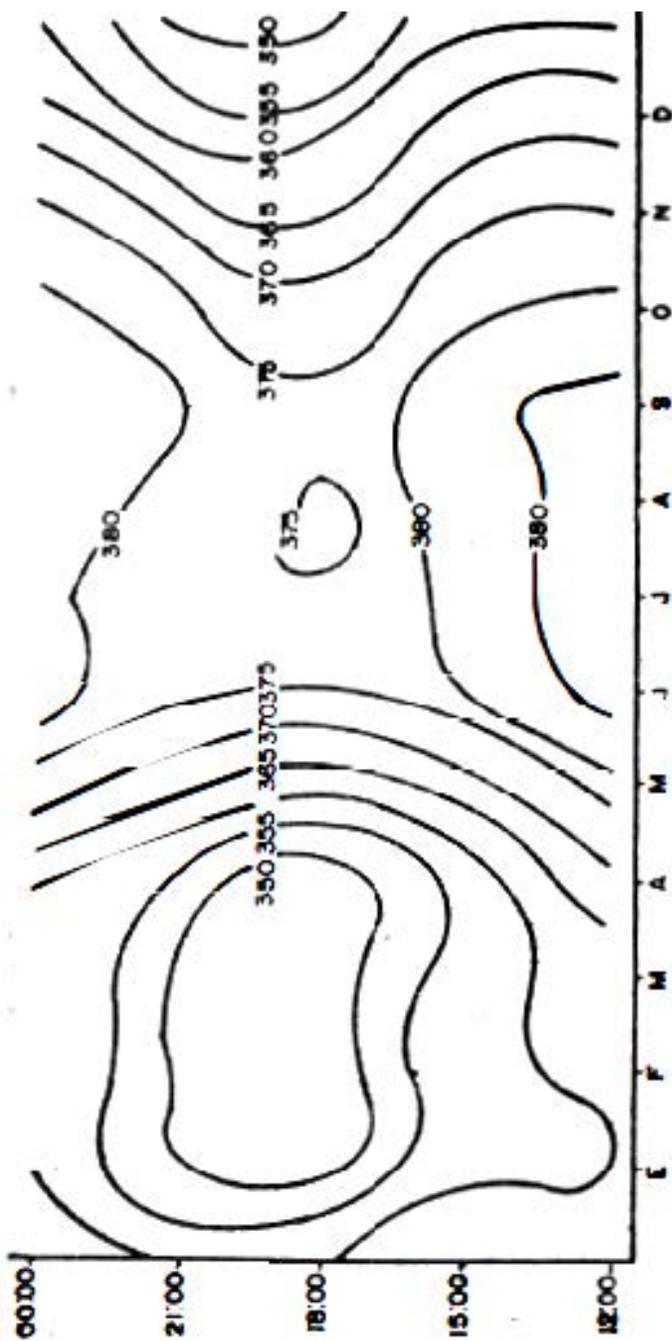
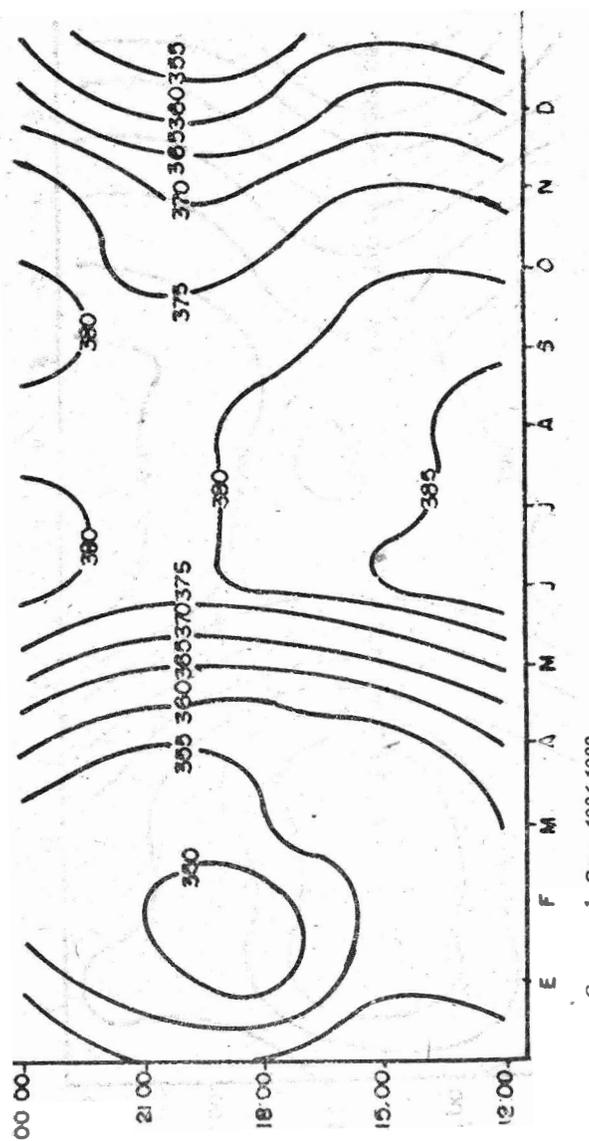


Fig. 3. Florida v980-1989.



Cr el Sur 1986-1989.

Fig. 4. Santa Cruz del Sur 1986-1989.

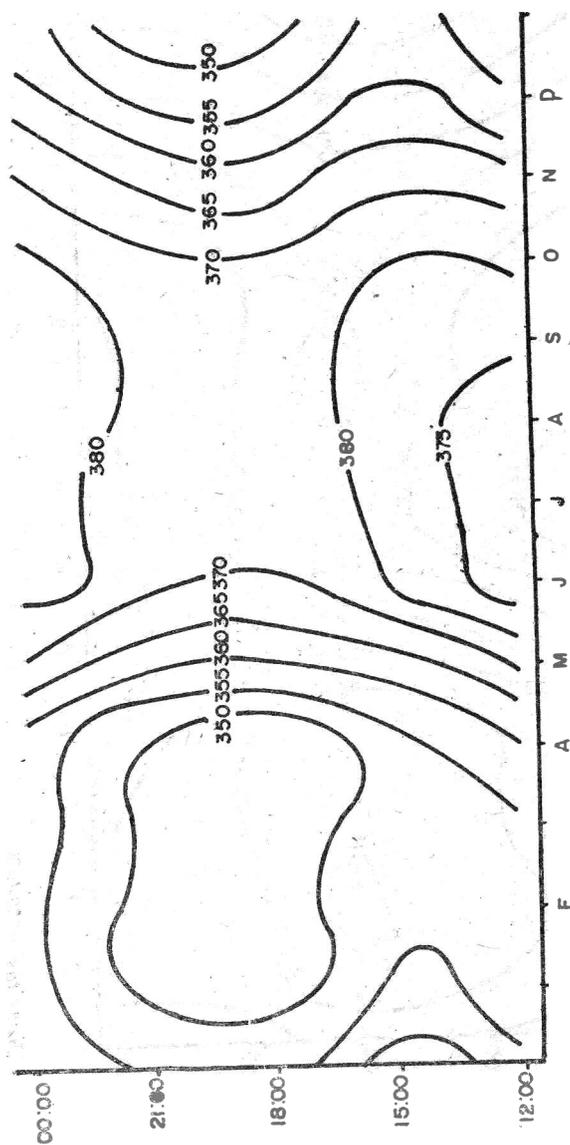


Fig. 5. Esmeralda 1980-1989.

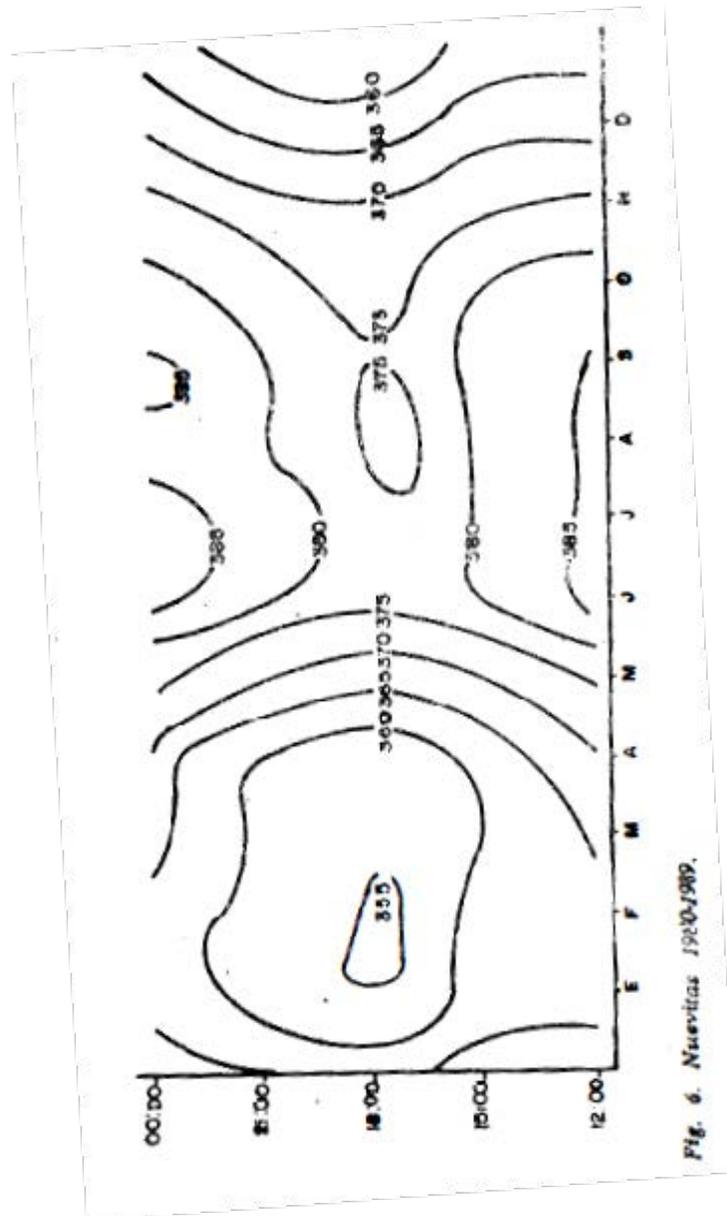


Fig. 6. Nuevitras 1980-1989.

Por su parte el ciclo diurno se caracteriza por variaciones pronunciadas de N_o en los meses de verano, mientras en invierno son menores y muy pequeñas en los meses de tránsito de ambos períodos. Es de notar que los máximos se alcanzan a las 7:00 am y 7:00 pm (hora del meridiano $75^\circ W$) y los mínimos entre la 1:00 y 4:00 pm en que en la superficie la temperatura alcanza sus valores máximos y la humedad relativa el mínimo.

Por otra parte, lo anteriormente expuesto permite precisar una particularidad de N_o , específicamente en lo relativo a su dependencia de la temperatura. En los trabajos (Antuña y Aroche, 1990; Pisarenko, 1976), e incluso en el que nos ocupa, se constataba el hecho de que N sigue a la temperatura tanto en la vertical como en el año. Sin embargo, en el curso diurno encontramos una relación inversa entre dichas variables; encontrándose que para todos los casos abordados N_o no sigue al comportamiento de una variable (de las que figuran en (2)) en sí, sino a algún elemento meteorológico integrador de los efectos de cada una por separado y a la vez, de sus interacciones. Ese elemento podría ser la humedad relativa por ejemplo, cuya distribución permite encontrar una relación estable con la de N_o , tanto en la vertical, en el año como en el día; además, los procesos atmosféricos que condicionan a una u otro son razonablemente admisibles: N_o se hace mínimo en horas al mediodía cuando las temperaturas son altas, pero ello conlleva a un mezclamiento turbulento y convectivo intenso lo cual homogeniza la densidad del aire, disminuyendo tanto la posibilidad de refracción como la de saturación atmosféricas. De ello se infiere que la humedad del aire, así como los fenómenos de transporte que en el mismo tienen lugar, desempeñan un papel determinante en la variabilidad de las características refractarias de la atmósfera.

La similitud del comportamiento diurno y estacional de N_o en las estaciones del PMC y en las estaciones de los Estados Unidos ubicadas en la costas del Golfo de México puede apreciarse si comparamos los resultados obtenidos para nuestras estaciones con las que muestran la fig. 7 y 8 correspondientes a Brownsville, Texas y Miami, Florida respectivamente, obtenidos a partir de una muestra de datos medios de N_o que abarca 8 años, con una periodicidad de 2 horas a lo largo de todo el día. Se aprecia una mayor similitud en la estación de Miami, lo que es atribuible a su proximidad geográfica y a la ocurrencia de fenómenos locales similares a los que tienen lugar en el PMC y que influyen determinantemente sobre la Capa Fronteriza Planetaria. No obstante debe notarse que mientras los valores máximos de N_o están aproximadamente dentro del mismo rango, en las estaciones norteamericanas los valores mínimos son más acusados; además, los mínimos se registran algo más temprano, entre las 12:00 m y las 2:00 pm. A pesar de la similitud existente entre los ciclos diurnos y anuales de nuestras estaciones, éstas pueden clasificarse en dos grandes grupos; las costeras (Santa Cruz del Sur y Nuevititas) y las ubicadas en la porción central del PMC. Las primeras se caracterizan porque el mínimo de invierno se circunscribe a los meses de enero y febrero, así como una variación muy brusca del ciclo diurno entre la 1:00 y 4:00 pm en los meses de septiembre y octubre. Sin embargo, los mínimos de las estaciones centrales se extienden a un período más amplio; enero-abril. Paralelamente su curso diurno presenta variaciones menos acusadas que las anteriores. De lo anterior se puede inferir la existencia de un gradiente horizontal de N_o , al menos a la escala espacial que caracteriza la distancia media entre las estaciones de ambos tipos.

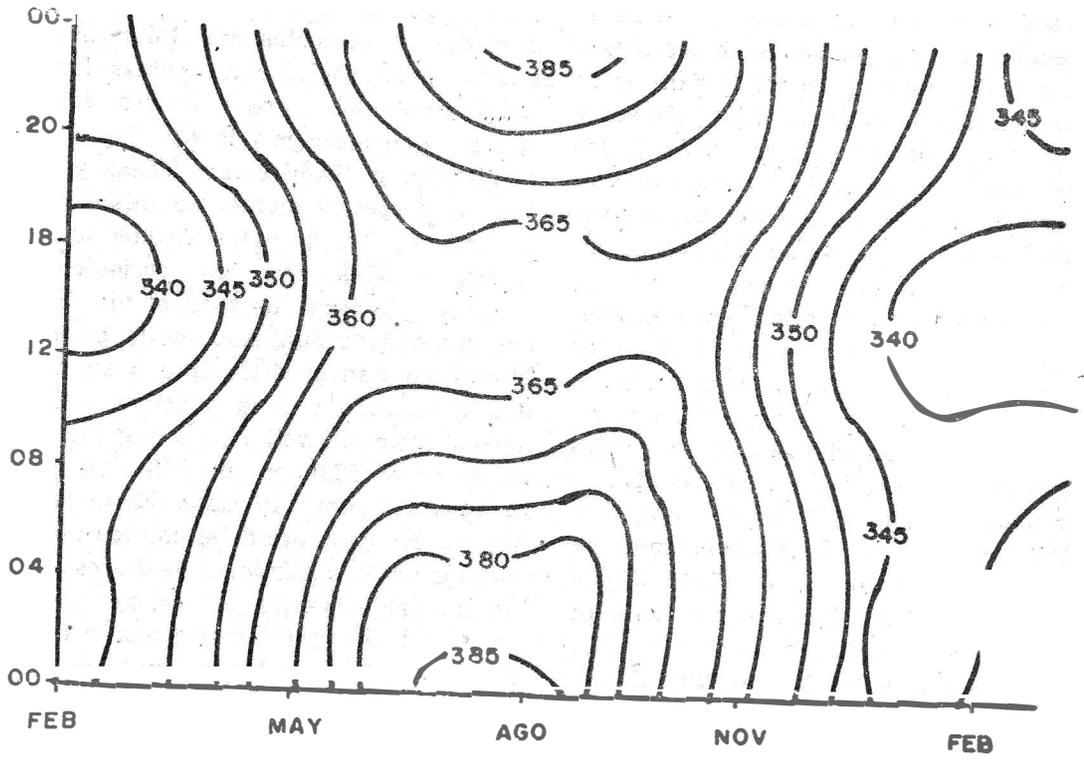


Fig. 7. Brownsville.

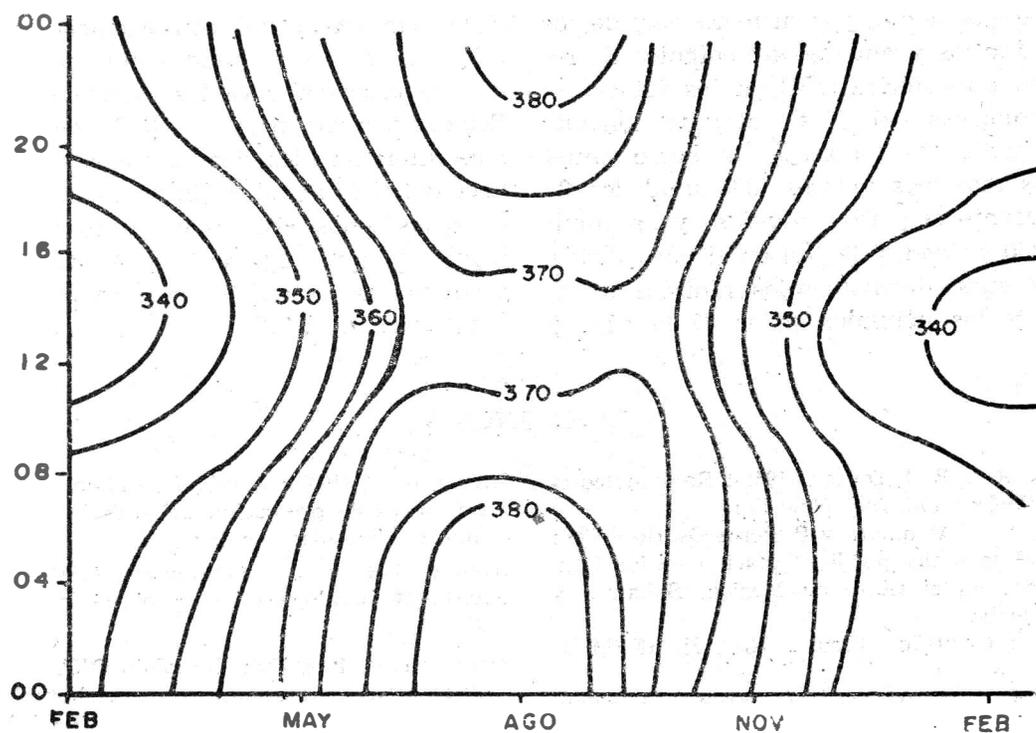


Fig. 8. Miami.

CONCLUSIONES

El establecimiento, por primera vez, de los ciclos diarios y anuales del cóndice de refracción atmosférica (*No*) en las estaciones meteorológicas del PMC, permite concluir lo siguiente: *No* presenta un curso anual con los máximos valores (385 unidades de *No*) durante el período lluvioso y los mínimos (350 unidades de *No*) en el poco lluvioso y un curso diario con los mínimos al mediodía y los máximos a las 07:00 a.m. y

07:00 p.m. existe una concordancia bastante buena entre los resultados obtenidos, y los que se reportan para las estaciones de los Estados Unidos para el Golfo de México. Son diferenciables dos patrones característicos del ciclo anual y diario correspondientes a las zonas costeras e interiores del polígono, lo que sugiere la existencia de un gradiente horizontal de *No* orientado transversalmente al PMC.

REFERENCIAS

- Bean, B. R. y E. J. Dutton (1966): Radiometeorology. *Dover Publ., Inc., New York*.
- Moreno, A., L. Maqueira y P. Pérez Osorio (1980): Frecuencia y tiempo de afectación de los frentes fríos en el Golfo de México, Bahamas y Mar Caribe. Informe Científico Técnico No. 125, INSMET, ACC.
- Antuña, J. C., C. Morales, A. Pardo y A. Guaty (1985): El comportamiento del índice de refracción en el PMC, resultados preliminares [inédito], *UDICT, CMC*, p. 11.
- Antuña, J. C. y R. Aroche (1990): "Curso anual del perfil vertical del índice de refracción de la atmósfera en el PMC" [inédito].
- Pavlov, N. F. (1980): Aerología, radiometeorología y técnicas de protección del trabajo [en ruso]. *Guidrometeoizdat, Leningrado*.
- Jromov, S. P. y L. J. Mamontova (1974): Diccionario Meteorológico [en ruso]. *Guidrometeoizdat*.
- Trifonova, R. P. (1979): Complejo OKA-3 para el procesamiento automático de elaboración de los datos del sistema de sondeo "RKZ Meteorito" [en ruso]. *Guidrometeoizdat*.
- Pisarenko, B. K. (1976): Estructura vertical del índice de refracción para radioondas ultracortas en condiciones de temperaturas negativas. *Meteorología e Hidrología* 41(9):100-102.

Ciencias de la Tierra y del Espacio, 21-22, 1993

TEMPORAL VARIATION OF THE REFRACTION COINDEX OF THE ATMOSPHERE CONCERNING TO THE SEA MIDDLE LEVEL IN THE METEOROLOGICAL POLYGON OF CAMAGÜEY (PMC)

Roberto AROCHE RAMIREZ
Juan Carlos ANTUÑA MARRERO
and René ESTEVAN ARREDONDO

ABSTRACT. *The annual course of the refractive index on the surface is outlined, with the use of data from Meteorological Polygon of Camagüey stations. It was established for each station his characteristics and was obtained a differentiation between the coastal stations and the inland stations. These results agree with those obtained by others investigators for the coastal stations in the Gulf of Mexico.*