

RECOMENDACIÓN UIT-R P.453-6

**ÍNDICE DE REFRACCIÓN RADIOELÉCTRICA:
SU FÓRMULA Y DATOS SOBRE LA REFRACTIVIDAD**

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1970-1986-1990-1992-1994-1995-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) la necesidad de utilizar una fórmula única para calcular el índice de refracción radioeléctrica de la atmósfera;
- b) la necesidad de datos de referencia mundiales sobre la refractividad y sus gradientes;
- c) la necesidad de tener un método matemático para expresar la distribución estadística de los gradientes de refractividad,

recomienda

- 1 que el índice de refracción radioeléctrica de la atmósfera, n , se calcule mediante la fórmula del Anexo 1;
- 2 que se utilicen los datos de refractividad de los mapas mundiales del Anexo 1 cuando no se disponga de datos locales más fiables;
- 3 que la distribución estadística de los gradientes de refractividad se calcule utilizando el método que se da en el Anexo 1.

ANEXO 1

1 Fórmula del índice de refracción radioeléctrica

El índice de refracción radioeléctrica de la atmósfera, n , se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

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

donde:

N : coíndice de refracción radioeléctrica expresado por:

$$N = N_{seco} + N_{húmedo} = \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (2)$$

siendo el término « N_{seco} » de la refracción:

$$N_{seco} = 77,6 \frac{P}{T} \quad (3)$$

y el término « $N_{húmedo}$ »:

$$N_{húmedo} = 3,732 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

donde:

P : presión atmosférica (hPa)

e : presión del vapor de agua (hPa)

T : temperatura absoluta (K).

Esta expresión se puede utilizar para todas las frecuencias; a frecuencias de hasta 100 GHz, el error es inferior a 0,5%. Para perfiles representativos de temperatura, presión y presión del vapor de agua, véase la Recomendación UIT-R P.835.

Para mayor facilidad, la relación entre la presión del vapor de agua, e , y la humedad relativa, H , se expresa por:

$$e = \frac{H e_s}{100} \quad (5)$$

con:

$$e_s = a \exp\left(\frac{b t}{t + c}\right) \quad (6)$$

donde:

H : humedad relativa (%)

t : temperatura en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$)

e_s : presión de vapor de saturación (hPa) a la temperatura t ($^{\circ}\text{C}$). Los coeficientes a , b , c , son:

Para agua

$$a = 6,1121$$

$$b = 17,502$$

$$c = 240,97$$

(valores válidos entre -20° y $+50^{\circ}$,
con una precisión de $\pm 0,20\%$)

Para hielo

$$a = 6,1115$$

$$b = 22,452$$

$$c = 272,55$$

(valores válidos entre -50° y 0° ,
con una precisión de $\pm 0,20\%$)

La presión del vapor de agua, e , se obtiene a partir de la densidad ρ mediante la ecuación:

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad \text{hPa} \quad (7)$$

con ρ (g/m^3). En la Recomendación UIT-R P.836 se dan valores representativos de ρ .

2 Dependencia de la refractividad de la superficie con respecto a la altura

Se ha determinado que el valor medio a largo plazo del índice de refracción n depende de la altura h y se expresa adecuadamente mediante la ley exponencial siguiente:

$$n(h) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times \exp(-h/h_0) \quad (8)$$

donde:

N_0 : valor medio de la refractividad atmosférica considerada al nivel del mar

h_0 : altura de escala (km).

N_0 y h_0 pueden determinarse estadísticamente para distintos climas. A título de referencia, pueden tomarse los siguientes valores medios globalizantes de estas dos características:

$$N_0 = 315$$

$$h_0 = 7,35 \text{ km}$$

Estos valores numéricos se aplican únicamente para trayectos terrenales.

Estas características de referencia pueden utilizarse para calcular el valor de refractividad N_s en la superficie terrestre a partir de N_0 y según la siguiente fórmula:

$$N_s = N_0 \exp(-h_s/h_0) \quad (9)$$

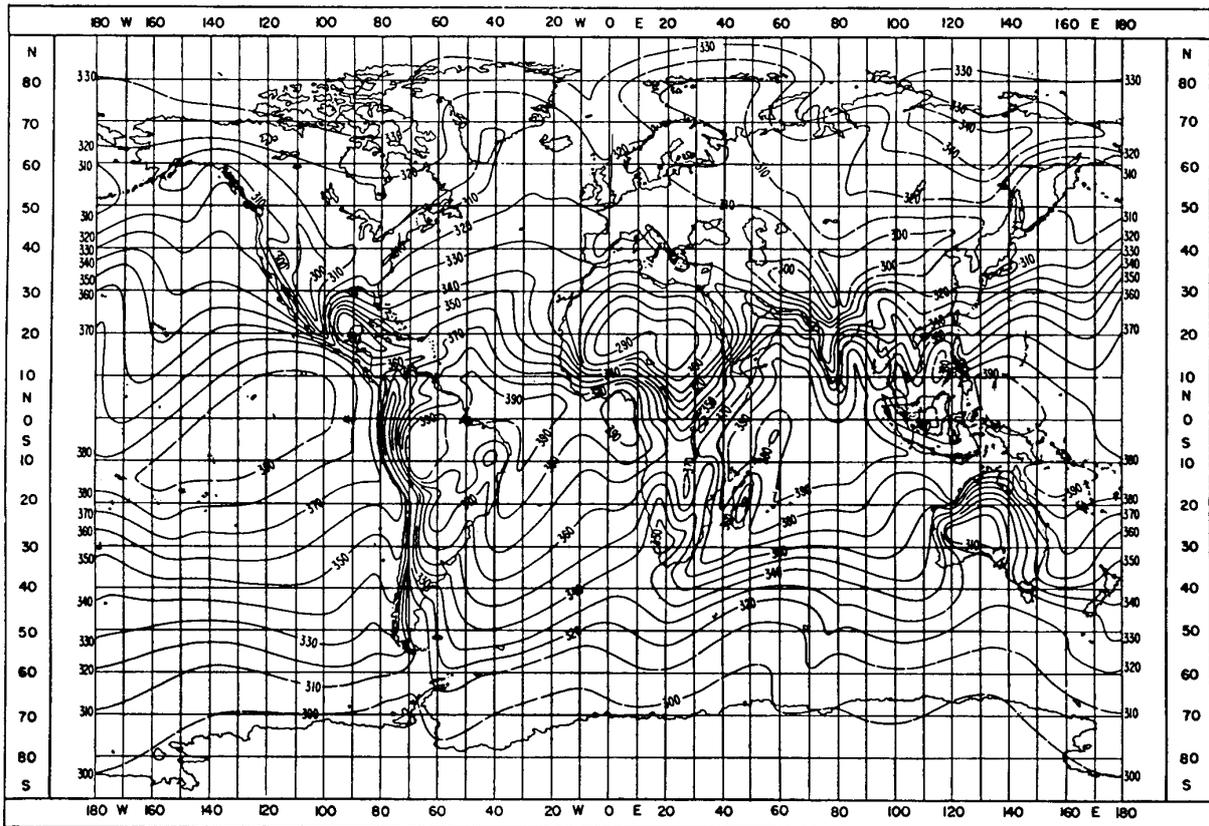
donde:

h_s : altura de la superficie terrestre por encima del nivel del mar (km).

Cabe señalar, sin embargo, que los contornos de las Figs. 1 y 2 se obtuvieron con un valor de $h_0 = 9,5$ km.

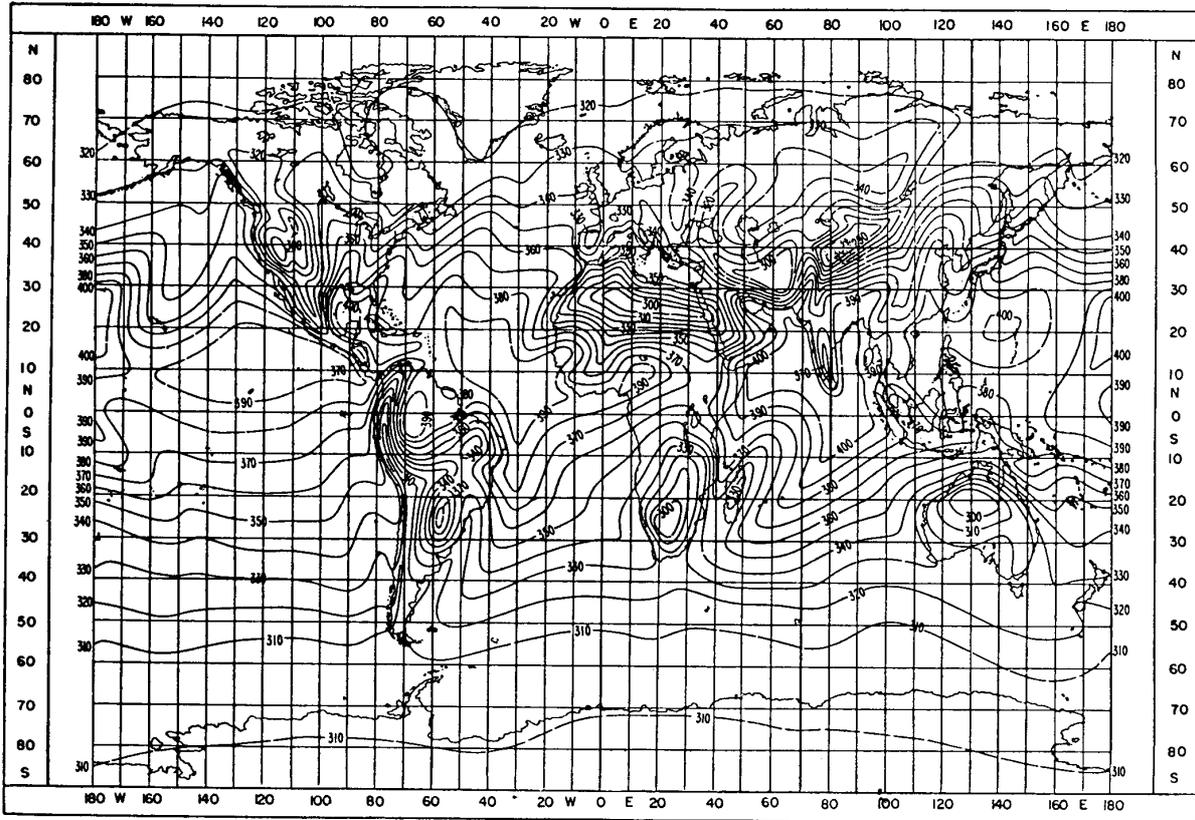
Para los trayectos Tierra-satélite, el índice de refracción en cualquier altura se obtiene mediante las ecuaciones (1), (2) y (7) anteriores, junto con los valores adecuados para los parámetros que figuran en el Anexo 1 de la Recomendación UIT-R P.835. Los índices de refracción obtenidos de esa forma pueden utilizarse para establecer modelos numéricos de los trayectos del rayo a través de la atmósfera.

FIGURA 1
Valores medios mensuales de N_0 : febrero



0453-01

FIGURA 2
Valores medios mensuales de N_0 : agosto



0453-02

3 Gradientes verticales del coíndice de refracción

El gradiente vertical del coíndice en la capa inferior de la atmósfera es un parámetro importante para estimar la zona despejada del trayecto y los efectos de propagación tales como la reflexión superficial, la propagación por conductos y por trayectos múltiples en enlaces terrenales de visibilidad directa.

En las Figs. 3 a 6 se presentan las isopletas del decrecimiento medio mensual (gradiente) del coíndice de refracción radioeléctrica en una capa de 1 km de espesor a partir de la superficie. La variación del coíndice ΔN se calcula mediante:

$$\Delta N = N_s - N_1 \quad (10)$$

donde N_1 es el coíndice de refracción a una altura de 1 km por encima de la superficie de la Tierra. Los valores de ΔN no se redujeron a una superficie de referencia.

Las estadísticas del gradiente del coíndice de refracción en los primeros 100 m a partir de la superficie se utilizan para calcular la probabilidad de ocurrencia de condiciones de propagación por conductos y por trayectos múltiples. Cuando no se dispone de datos locales más fiables, los mapas de las Figs. 7 a 10 proporcionan esas estadísticas para todo el mundo.

FIGURA 3
Valores medios mensuales de ΔN : febrero

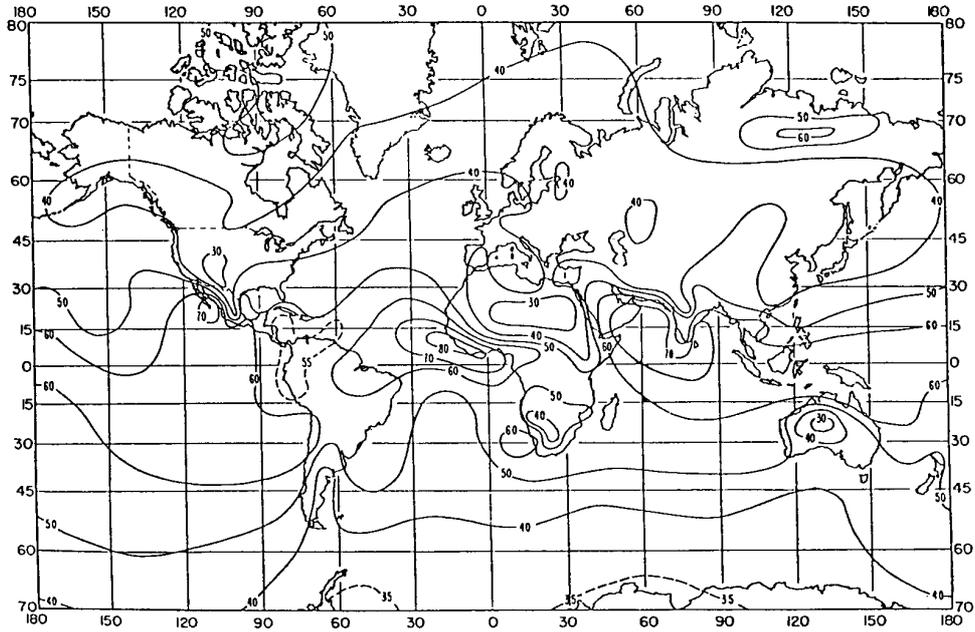
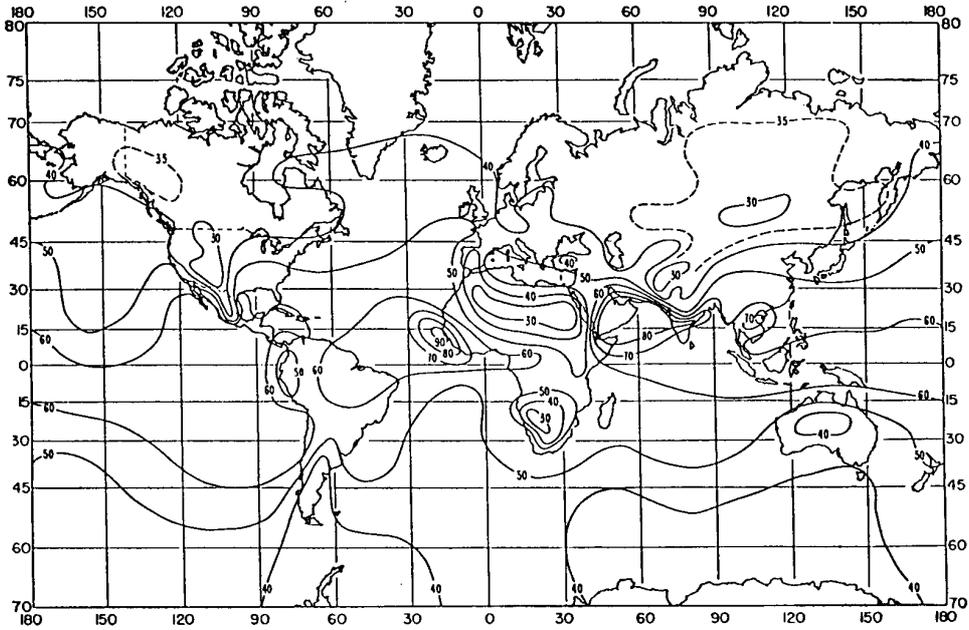


FIGURA 4
Valores medios mensuales de ΔN : mayo



0453-3-4

FIGURA 5
Valores medios mensuales de ΔN : agosto

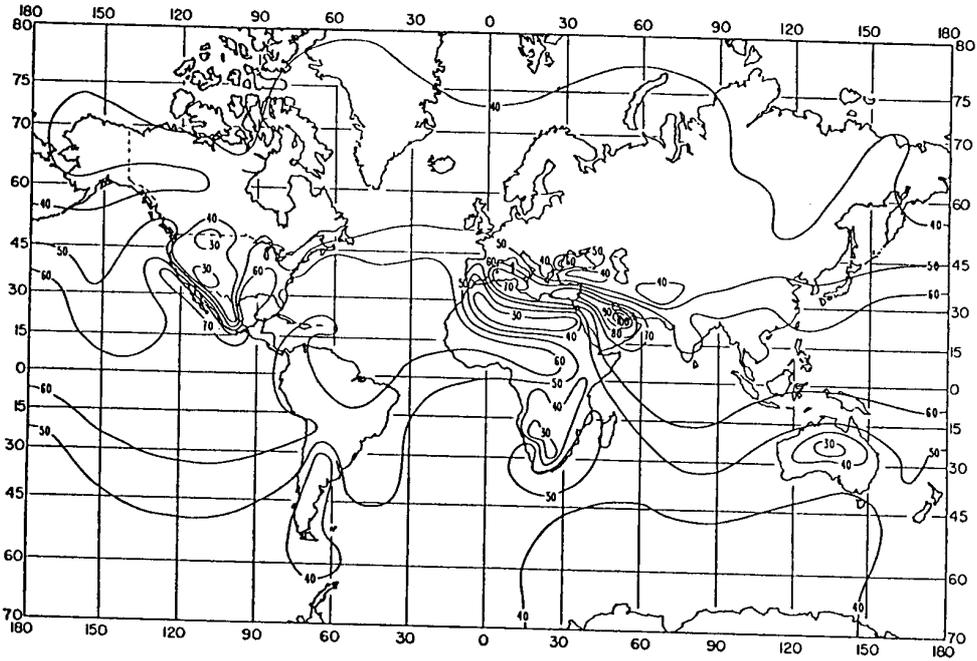


FIGURA 6
Valores medios mensuales de ΔN : noviembre

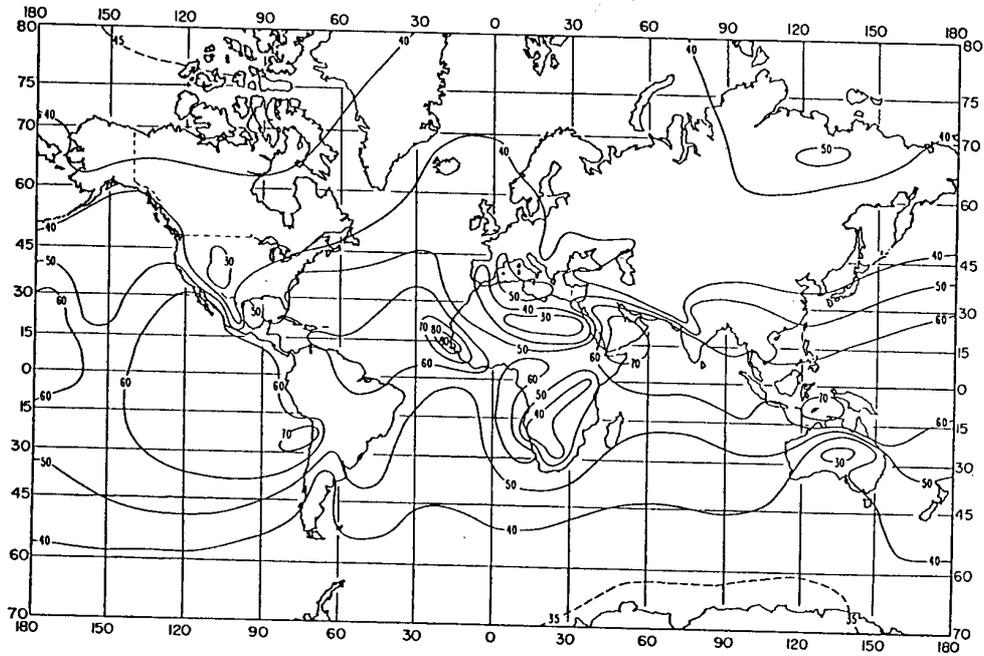


FIGURA 7
Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es ≤ -100 unidades N/km: febrero

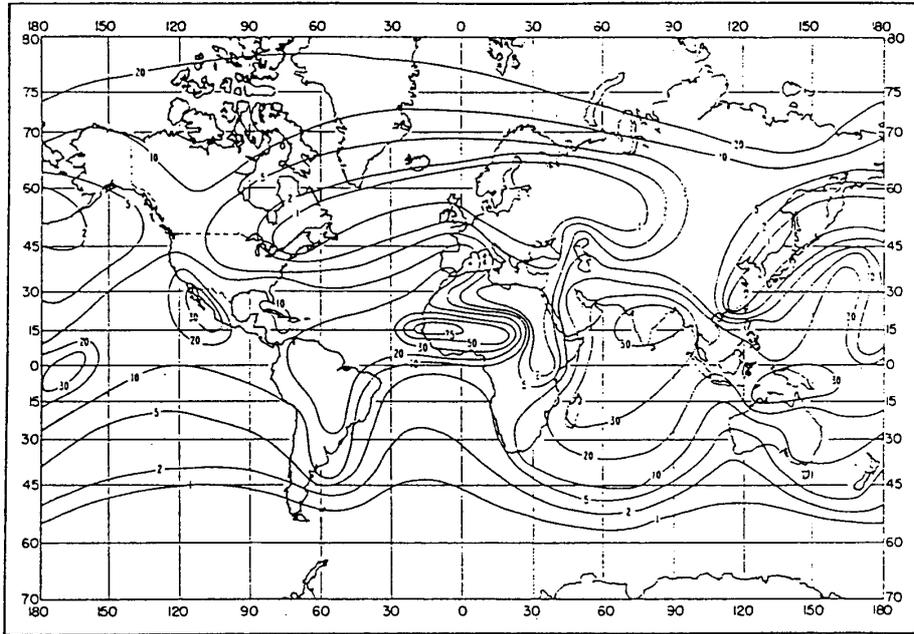


FIGURA 8
Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es ≤ -100 unidades N/km: mayo

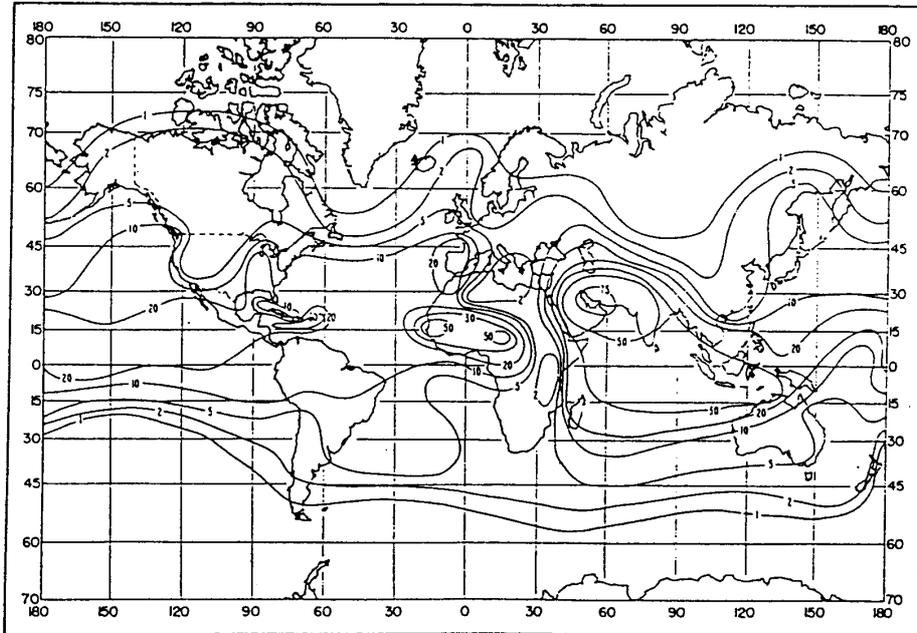


FIGURA 9
Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es ≤ -100 unidades N/km: agosto

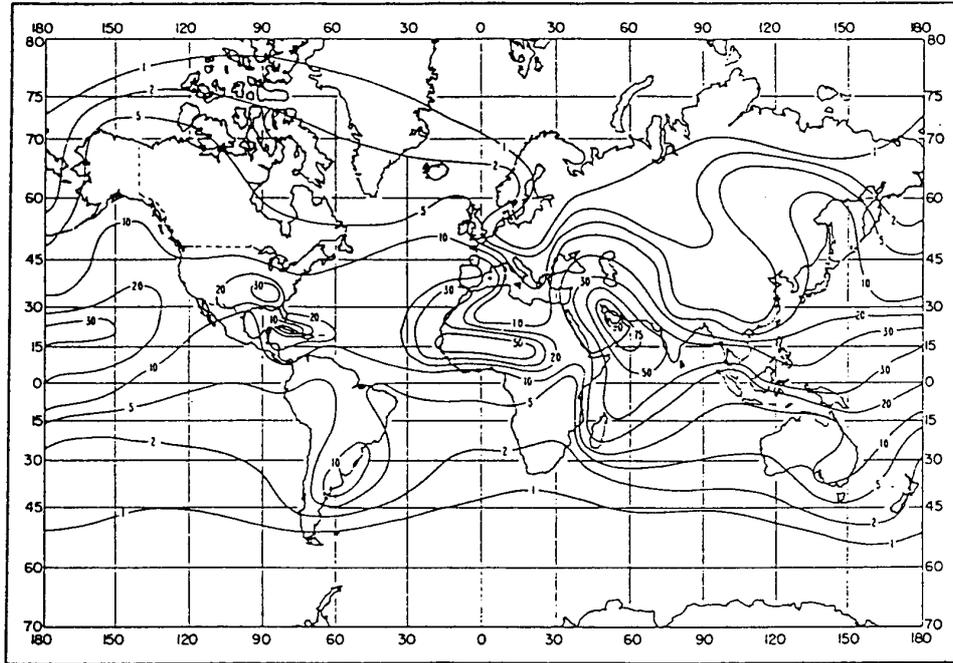
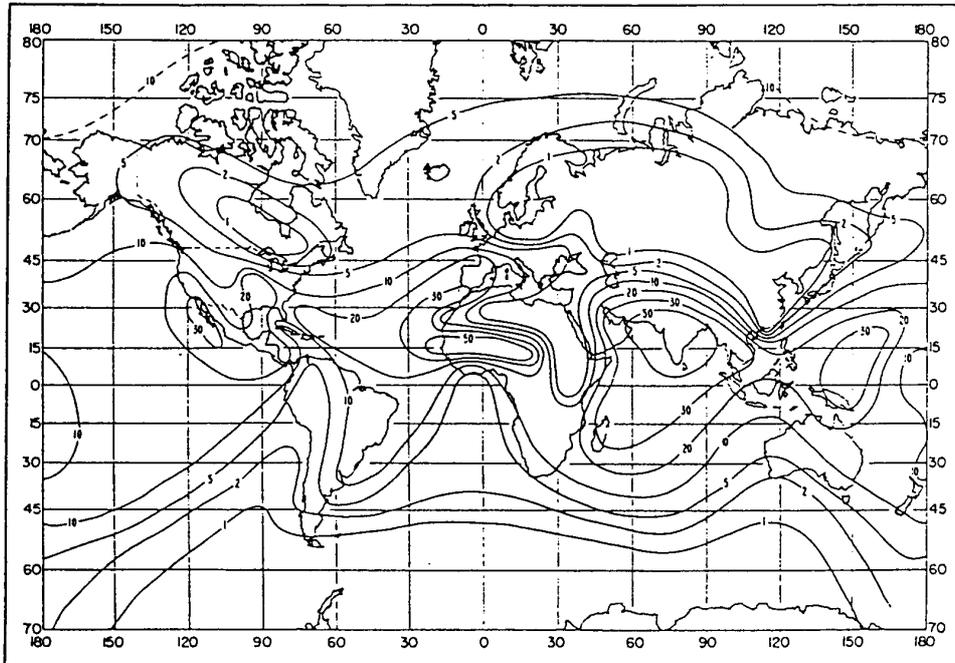


FIGURA 10
Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es ≤ -100 unidades N/km: noviembre



4 Distribución estadística de los gradientes de refractividad

Para calcular la distribución estadística de los gradientes de refractividad cerca de la superficie de la Tierra, en los 100 m más bajos de la atmósfera, es necesario en primer lugar conocer el valor de la mediana, Med , de la distribución de los gradientes de refractividad en el emplazamiento considerado. Dicho valor se puede calcular a partir de la probabilidad, P_0 , durante la cual el gradiente de refractividad es menor o igual a D_n utilizando la siguiente expresión:

$$Med = \frac{D_n + k_1}{(1/P_0 - 1)^{1/E_0}} - k_1 \quad (11)$$

donde:

$$E_0 = \log_{10} (|D_n|)$$

$$k_1 = 30$$

Esta expresión (11) es válida para -300 unidades N/km $\leq D_n \leq -40$ unidades N/km.

Si esta probabilidad, P_0 , correspondiente a cualquier valor D_n del gradiente de refractividad no es conocida para el emplazamiento que se estudia, es posible calcular, P_0 , a partir de los mapas mundiales indicados en las Figs. 7 a 10 de este Anexo, que indican el porcentaje de tiempo durante el cual el gradiente de refractividad sobre los 100 m más bajos de la atmósfera es menor o igual a -100 unidades N/km.

La probabilidad acumulativa de D_n para valores $\leq Med$ puede calcularse mediante:

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{|D_n - Med|}{|Med|} + k_2 \right) k_3 \right]^{E_1}} \quad (12)$$

donde:

$$E_1 = \log_{10} (|D_n - Med| + 1)$$

$$k_2 = \frac{1,6 \times |Med|}{120}$$

$$k_3 = \frac{120}{|Med|}$$

La expresión (12) es válida para valores de $Med > -120$ unidades N/km.

Para $D_n > Med$, la probabilidad acumulativa de D_n se calcula mediante:

$$P_2 = 1 - \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{|D_n - Med|}{|Med|} + k_2 \right) k_4 \right]^{E_1}} \quad (13)$$

donde:

$$E_1 = \log_{10} (|D_n - Med| + 1)$$

$$k_2 = \frac{1,6 \times |Med|}{120}$$

$$k_4 = \left[\frac{100}{|Med|} \right]^{2,4}$$

La expresión (13) es válida para valores de $Med > -120$ unidades N/km.