

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.453-13
(12/2017)

**Índice de refracción radioeléctrica: su
fórmula y datos sobre la refractividad**

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2018

© UIT 2018

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.453-13

**Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula
y datos sobre la refractividad**

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1970-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2012-2015-2016-2017)

Cometido

La Recomendación UIT-R P.453 proporciona métodos para realizar una estimación del índice de refracción radioeléctrica y su comportamiento en emplazamiento de todo el mundo; describe las características del perfil de superficie y vertical y presenta mapas mundiales sobre la distribución de los parámetros de refractividad y su variación estadística.

Palabras clave

Índice de refracción radioeléctrica, superficie, perfil vertical, parámetros de refractividad, variación estadística

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que es preciso utilizar una fórmula única para calcular el índice de refracción radioeléctrica de la atmósfera;
- b) que se precisan de datos de referencia mundiales sobre la refractividad y sus gradientes;
- c) que es preciso 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 gráficos mundiales y los mapas numéricos globales 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;
- 4 que si no se dispone de datos locales sobre temperatura y humedad relativa, se utilice el mapa numérico global del término $N_{húmedo}$ de la refracción radioeléctrica de la superficie rebasado durante el 50% del año, que figura en el § 2.2 del Anexo 1 (Fig. 3).

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 la refracción radioeléctrica, N , es:

$$N = 77,6 \frac{P_d}{T} + 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (\text{unidades N}) \quad (2)$$

siendo el término seco, N_{seco} , de la refracción radioeléctrica:

$$N_{dry} = 77,6 \frac{P_d}{T} \quad (3)$$

y el término húmedo $N_{húmedo}$, de la refracción radioeléctrica:

$$N_{wet} = 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

donde:

- P_d : presión atmosférica seca
- P : presión atmosférica total (hPa)
- e : presión del vapor de agua (hPa)
- T : temperatura absoluta (K)

y

$$P = P_d + e \quad (5)$$

dado que la ecuación $P_d = P - e$ (2) puede reformularse como:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (6)$$

La ecuación (6) permitirá hacer una aproximación con menor precisión como:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (7)$$

La ecuación (7) expresa los valores de N dentro del 0,02 por ciento del valor obtenido a partir de la ecuación (2) para el rango de temperatura de -50°C a $+40^\circ\text{C}$. 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:

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad (8)$$

con:

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[\frac{\left(b - \frac{t}{d} \right) \cdot t}{t + c} \right] \quad (9)$$

y:

$$EF_{agua} = 1 + 10^{-4} \left[7,2 + P \cdot \left(0,0320 + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \right) \right]$$

$$EF_{hielo} = 1 + 10^{-4} \left[2,2 + P \cdot \left(0,0383 + 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \right) \right]$$

donde:

t : temperatura (°C)

P : presión atmosférica total (hPa)

H : humedad relativa (%)

e_s : presión de vapor de saturación (hPa) a la temperatura t (°C). Los coeficientes a , b , c y d son:

para agua

$$a = 6,1121$$

$$b = 18,678$$

$$c = 257,14$$

$$d = 234,5$$

(valores válidos entre -40° y +50°)

para hielo

$$a = 6,1115$$

$$b = 23,036$$

$$c = 279,82$$

$$d = 333,7$$

(valores válidos entre -80° y 0°)

Aunque P se define como la presión atmosférica total, se puede utilizar la presión atmosférica seca con una reducción insignificante de la exactitud de la predicción. La presión del vapor de agua, e , se obtiene a partir de la densidad ρ mediante la ecuación:

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad \text{hPa} \quad (10)$$

con ρ en (g/m³). 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

2.1 Refractividad en función de 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:

$$n(h) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times \exp(-h/h_0) \quad (11)$$

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:

$$N_s = N_0 \exp(-h_s/h_0) \quad (12)$$

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. Las Figs. 1 y 2 se obtuvieron a partir de un conjunto de datos, obtenidos durante 5 años (1955-1959), de unas 1 000 estaciones situadas en la superficie. (Las Figs. 1 y 2 no están disponibles en forma numérica.)

Para los trayectos Tierra-satélite, el índice de refracción en cualquier altura se obtiene mediante las ecuaciones (1), (2) y (10) 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.

(Cabe señalar que el perfil exponencial de la ecuación (12) también podría utilizarse para estimaciones rápidas y aproximadas del gradiente de refractividad cerca de la superficie de la Tierra y del ángulo aparente con respecto a la línea de puntería, según figura en el § 4.3 de la Recomendación UIT-R P.834.)

2.2 Término de humedad de la refractividad en la superficie

Los valores anuales y mensuales de la densidad de vapor de agua en la superficie, N_{wet} (ppm), rebasados respectivamente durante el 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95 y 99% de un año promedio y de un mes promedio forman parte de esta Recomendación. están disponibles en forma de mapas digitales en el fichero Rec. P.453-13 Supplement.zip.

Los datos abarcan desde -180° a 180° en longitud y desde -90° a 90° en latitud, con una resolución de $0,75^\circ$ tanto en latitud como en longitud. El término de humedad de la refractividad en la superficie en el emplazamiento deseado sobre la superficie de la Tierra puede obtenerse mediante el siguiente método de interpolación:

- se determinan las dos probabilidades, p_{encima} y p_{debajo} , por encima y por debajo de la probabilidad deseada, p , del conjunto: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95 y 99%;
- para las dos probabilidades, p_{encima} y p_{debajo} , se determina el término de humedad de la refractividad en la superficie, N_{wet1} , N_{wet2} , N_{wet3} , y, N_{wet4} en los cuatro puntos de la cuadrícula más próximos;
- se determina el término de humedad de la refractividad en la superficie, $N_{humedad\ por\ encima}$ y $N_{humedad\ por\ debajo}$, para las probabilidades, p_{encima} y p_{debajo} , y, en el emplazamiento deseado, efectuando una interpolación bilineal de los cuatro valores de la densidad de vapor de agua, $N_{humedad1}$, $N_{humedad2}$, $N_{humedad3}$, y, $N_{humedad4}$ en los cuatro puntos de la cuadrícula como se describe en la Recomendación UIT-R P.1144;
- se determina el término de humedad de la refractividad en la superficie, $N_{humedad}$, en la probabilidad deseada, p , interpolando $N_{humedad\ por\ encima}$ y $N_{humedad\ por\ debajo}$ en función de p_{encima} y p_{debajo} a p en una escala lineal de $N_{humedad}$ en función de $\log p$.

El término de humedad de la refractividad en la superficie se obtuvo a partir de la inicialización de los datos de la predicción meteorológica numérica del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (CEPMPM), obtenidos durante 36 años (1979-2014).

Para facilitar la consulta, en la Fig. 3 se muestra el valor mediano (50%) del término de humedad de la refractividad en la superficie rebasado durante el año medio.

FIGURA 1
Valores medios mensuales de N_0 : febrero

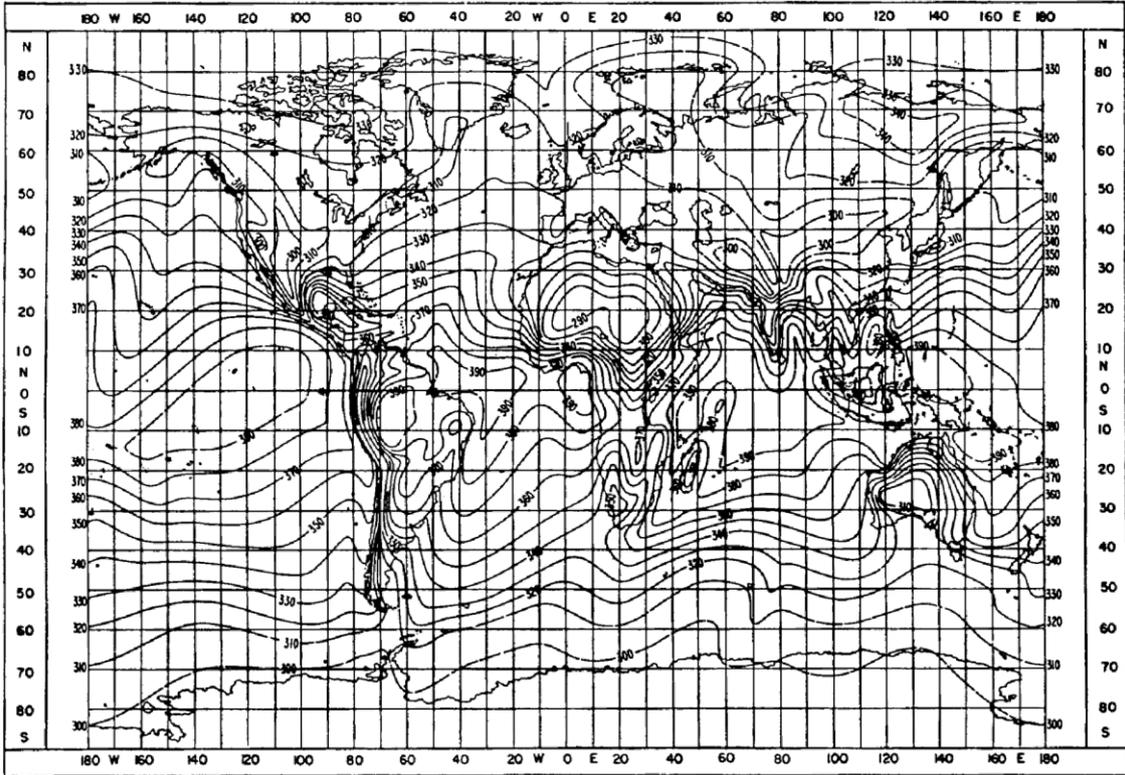


FIGURA 2
Valores medios mensuales de N₀: agosto

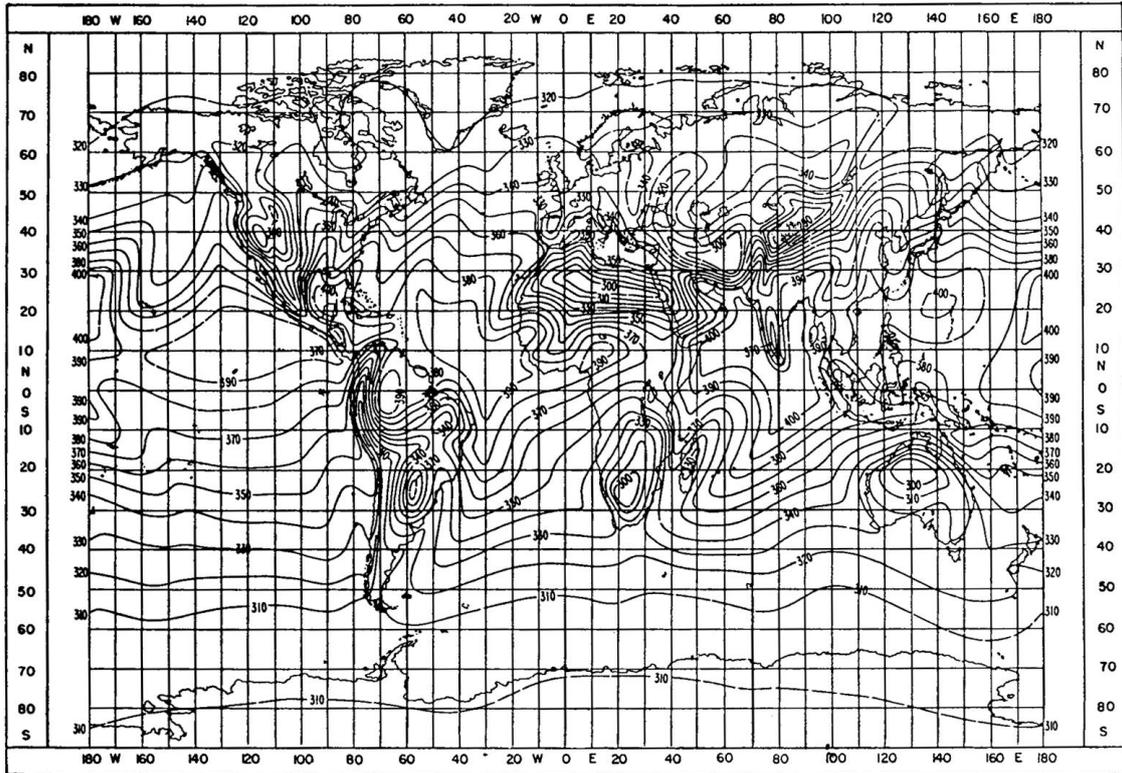
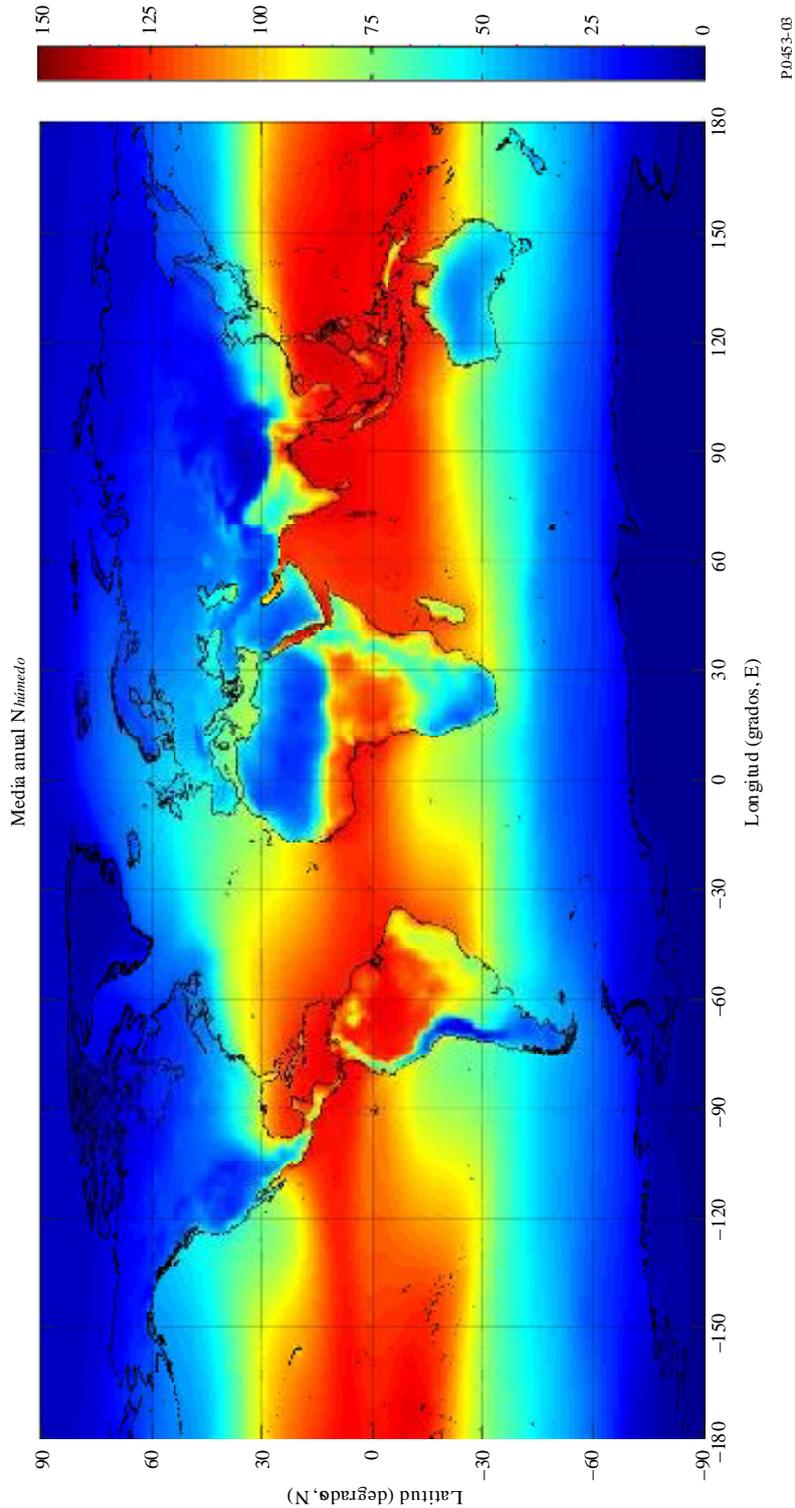


FIGURA 3

Término $N_{húmedo}$ de la refractividad de la superficie (PPm) rebasado durante el 50% del año



3 Gradientes verticales del coíndice de refracción

Las estadísticas del gradiente vertical del coíndice en la capa inferior de la atmósfera son parámetros importantes para estimar la zona despejada del trayecto y los efectos de propagación asociados tales como la reflexión superficial, la propagación por conductos en trayectos más allá del horizonte y por el desvanecimiento y la distorsión de trayectos múltiples en enlaces terrenales de visibilidad directa.

3.1 En el primer kilómetro de la atmósfera

En las Figs. 4 a 7 se presentan las isopletras 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 Figs. 4 a 7 se obtuvieron a partir de un conjunto de datos, obtenidos durante 5 años (1955-1959), de 99 emplazamientos de radiosondas. (Las Figs. 4 a 7 no están disponibles en forma numérica.)

Además, los valores anuales de ΔN rebasados durante el 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 98; 99; 99,5; 99,8 y 99,9% de un año promedio forman parte de esta Recomendación, están disponibles en forma de mapas digitales y se facilitan en el Suplemento. Los valores mensuales de ΔN rebasados durante el 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 98; 99; 99,5; 99,8 y 99,9% de un mes promedio forman parte de esta Recomendación, están disponibles en forma de mapas digitales y se facilitan en el Suplemento.

3.2 En la capa más baja de la atmósfera

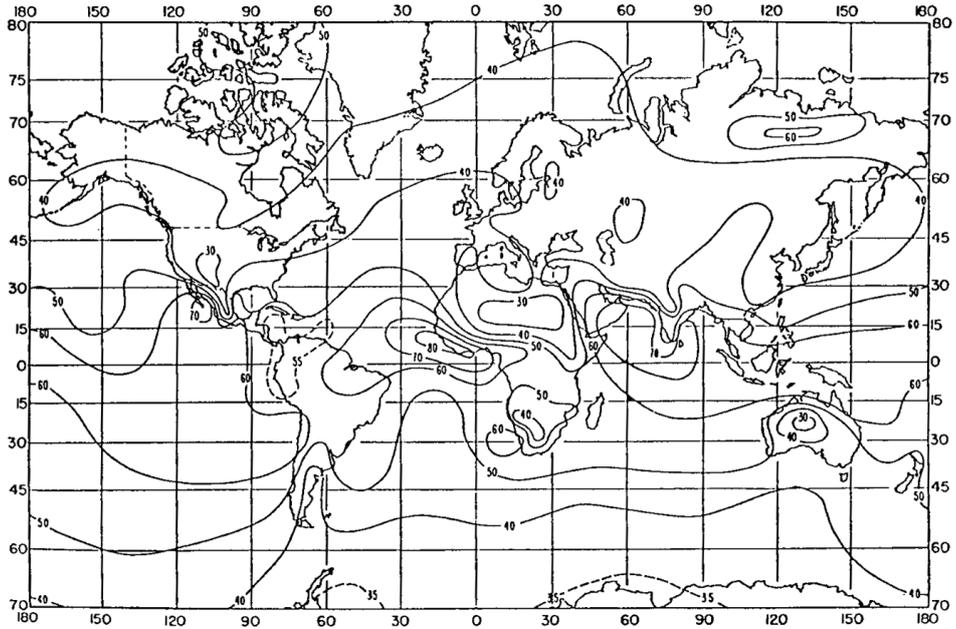
Las estadísticas del gradiente del coíndice de refracción en los primeros 100 m a partir de la superficie se utilizan para calcular la probabilidad de ocurrencia de condiciones de propagación por conductos y por trayectos múltiples. Cuando no se dispone de datos locales más fiables, los mapas de las Figs. 8 a 11 proporcionan esas estadísticas para todo el mundo, que se obtuvieron a partir de un conjunto de datos, obtenidos durante 5 años (1955-1959) de 99 emplazamientos de radiosondas. (Las Figs. 8 a 11 no están disponibles en forma numérica.)

Además, los siguientes parámetros forman parte de esta Recomendación, están disponibles en forma de mapas digitales y se facilitan en el Suplemento.

- Los valores anuales del gradiente de refractividad en los 65 m inferiores de la superficie de la Tierra, ΔN_{65m} , rebasados durante el 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 98; 99; 99,5; 99,8 y 99,9% de un año promedio.
- Los valores mensuales del gradiente de refractividad en los 65 m inferiores de la superficie de la Tierra, ΔN_{65m} , rebasados durante el 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 98; 99; 99,5; 99,8 y 99,9% de un mes promedio.
- El porcentaje del tiempo anual y mensual para los que el gradiente de refracción, ΔN por encima de 100 m es menor que -100 N-unidad/km, (%).

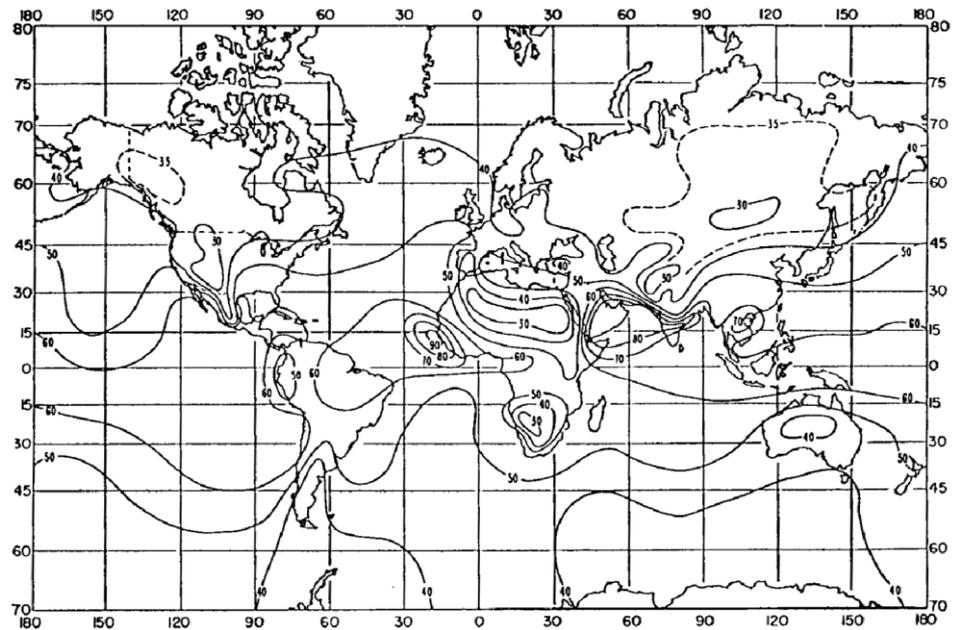
Los datos oscilan de 0° a 360° en longitud y de $+90^\circ$ a -90° en latitud. Para una ubicación distinta de la de los puntos en la cuadrícula, el gradiente de refractividad en el lugar deseado puede obtenerse efectuando una interpolación bilineal en los valores situados en los cuatro puntos de la cuadrícula más próxima, según se describe en la Recomendación UIT-R P.1144.

FIGURA 4
Valores medios mensuales de ΔN : febrero



P.0453-04

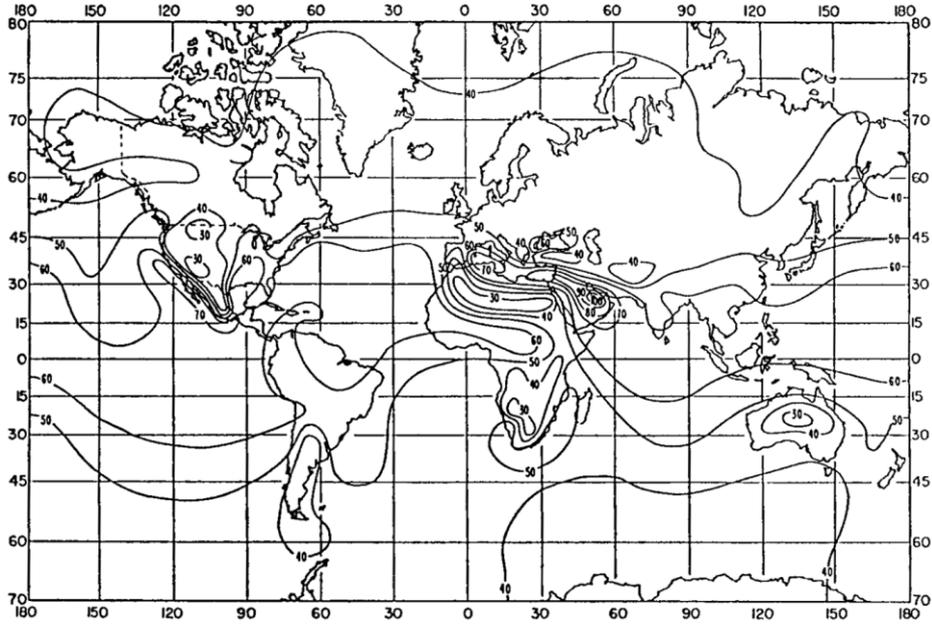
FIGURA 5
Valores medios mensuales de ΔN : mayo



P.0453-05

FIGURA 6

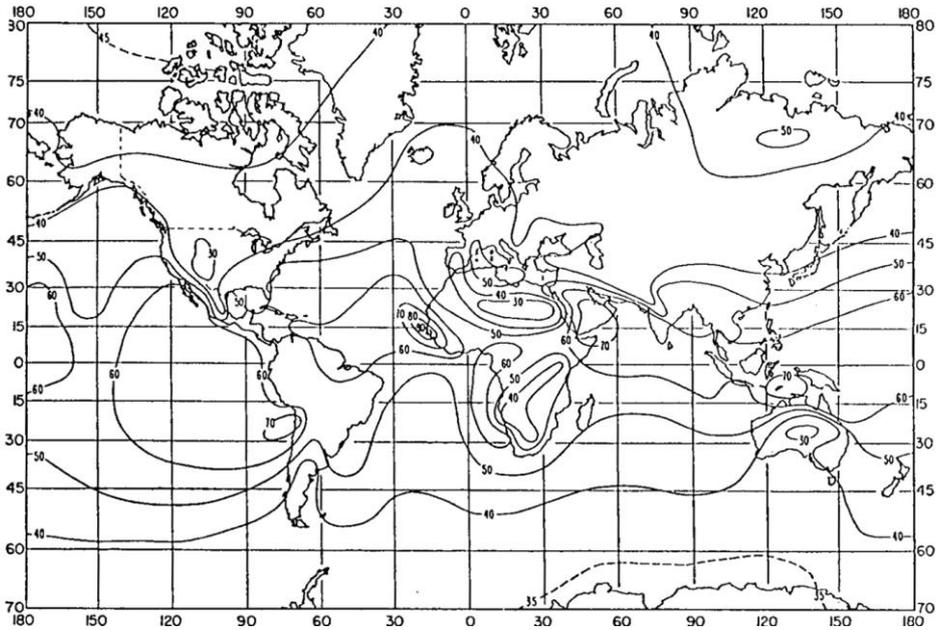
Valores medios mensuales de ΔN : agosto



P.0453-06

FIGURA 7

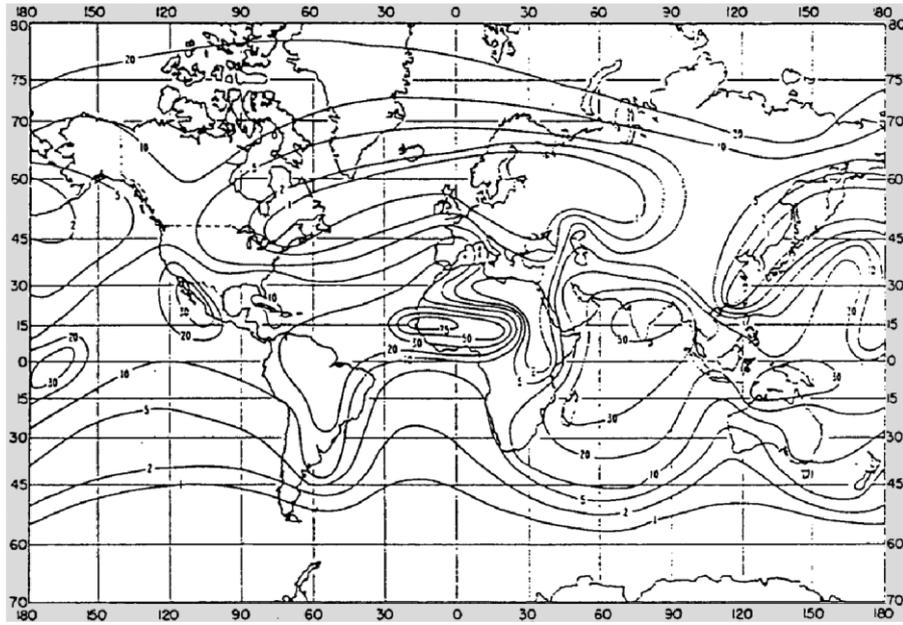
Valores medios mensuales de ΔN : noviembre



P.0453-07

FIGURA 8

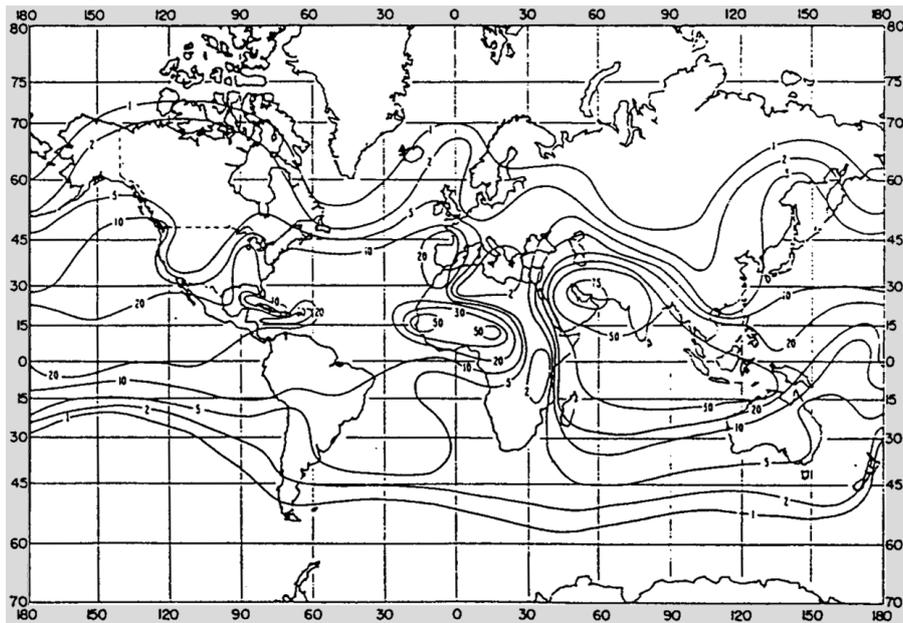
Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es ≤ -100 (unidades N/km): febrero



P.0453-08

FIGURA 9

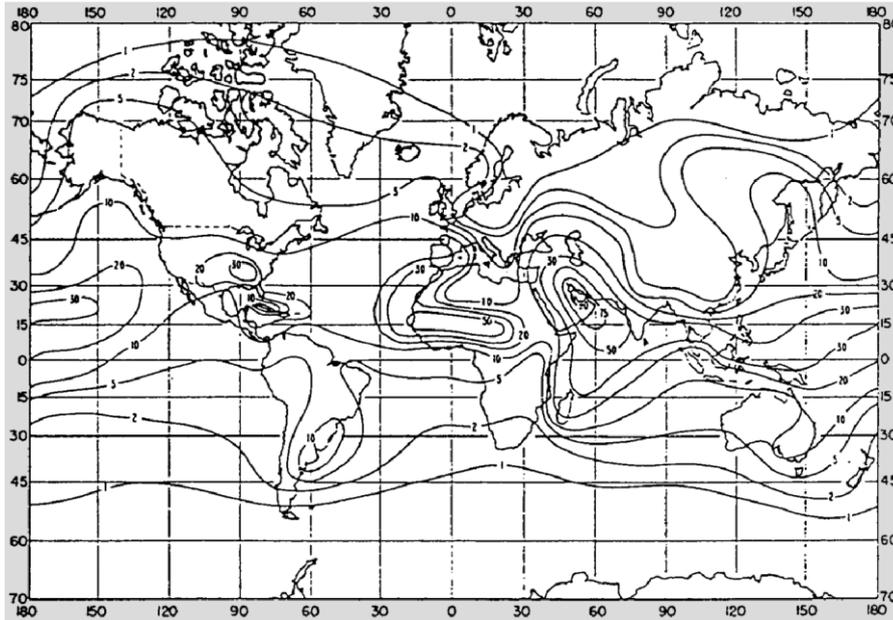
Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es ≤ -100 (unidades N/km): mayo



P.0453-09

FIGURA 10

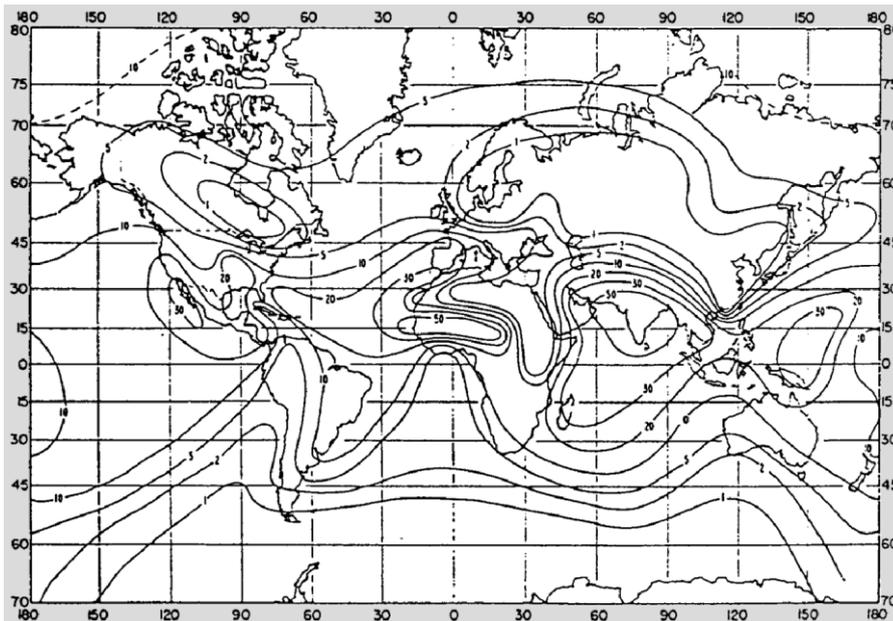
Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es ≤ -100 (unidades N/km): agosto



P.0453-10

FIGURA 11

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



P.0453-11

4 Distribución estadística de los gradientes de refractividad

Es posible estimar la distribución estadística completa de los gradientes de refractividad cerca de la superficie de la Tierra por encima de los 100 m inferiores de la atmósfera a partir del valor mediano Med del gradiente de refractividad y del valor N_s de la refractividad al nivel del suelo en la ubicación de interés.

El valor mediano, Med , de la distribución del gradiente de refractividad puede calcularse a partir de la probabilidad, P_0 , de que el gradiente de refractividad sea inferior o igual a D_n utilizando la expresión siguiente:

$$Med = \frac{D_n + k_1}{(1/P_0 - 1)^{1/E_0}} - k_1 \quad (14)$$

donde:

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

$$k_1 = 30.$$

La ecuación (14) es válida para el intervalo -300 unidades N/km $\leq D_n \leq -40$ unidades N/km. Si para la ubicación de interés no se conoce la probabilidad, P_0 , correspondiente a un valor cualquiera dado, D_n , del gradiente de refractividad, puede obtenerse P_0 de los mapas mundiales de las Figs. 8 a 11, que muestran el porcentaje de tiempo durante el cual el gradiente de refractividad por encima de los 100 m inferiores de la atmósfera es menor o igual a -100 unidades N/km.

Donde no existan datos locales más fiables, N_s puede obtenerse de los mapas de las Figs. 1 y 2 que muestran la refractividad global a nivel del mar, N_0 , y de la ecuación (12).

Para $D_n \leq Med$, la probabilidad acumulativa P_1 de D_n puede obtenerse a partir de:

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_3 \right]^{E_1}} \quad (15)$$

donde:

$$B = \left| \frac{0,3 Med - N_s + 210}{2} \right|$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1)$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left(\frac{B}{67} \right)^{6,5} + 1}$$

$$k_2 = \frac{1,6B}{120}$$

$$k_3 = \frac{120}{B}$$

La ecuación (15) es válida para valores de $Med > -120$ unidades N/km y para el intervalo de -300 unidades N/km $< D_n < 50$ unidades N/km.

Para $D_n > Med$, la probabilidad acumulativa P_2 de D_n se calcula a partir de:

$$P_2 = 1 - \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_4 \right]^{E_1}} \quad (16)$$

donde:

$$B = \left| \frac{0,3 Med - N_s + 210}{2} \right|$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1)$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left(\frac{B}{67} \right)^{6,5} + 1}$$

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

La ecuación (16) tiene validez para valores de $Med > -120$ unidades N/km y para el intervalo de -300 unidades $N/km < D_n < 50$ unidades N/km.

5 Conductos superficiales y conductos elevados

Los conductos atmosféricos pueden ocasionar desvanecimientos profundos lentos, un gran mejoramiento de la señal y el desvanecimiento de trayectos múltiples en enlaces terrenales de visibilidad directa, y pueden también ser la causa de interferencias considerables en los trayectos más allá del horizonte. Por consiguiente, es interesante describir la aparición de conductos y su estructura. Las estadísticas que figuran en este punto se obtuvieron a partir de las observaciones por radiosonda en 661 emplazamientos, efectuadas durante 20 años (1977-1996).

Los conductos se describen en función de la refractividad modificada definida como:

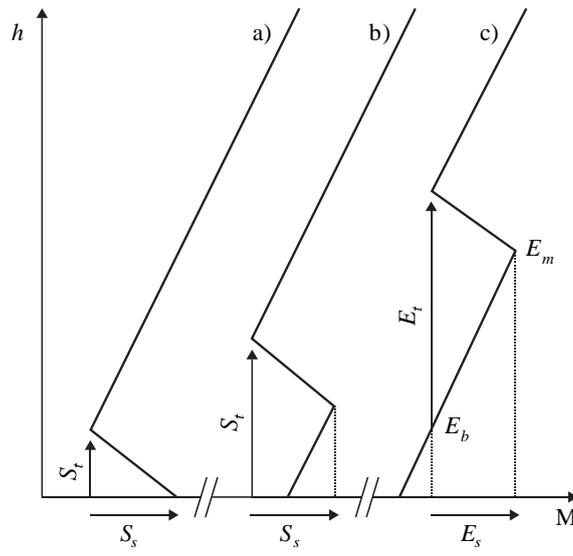
$$M(h) = N(h) + 157h \quad (\text{M-units}) \quad (17)$$

donde h (km) es la altura.

La Fig. 12 ilustra la refractividad modificada en función de la altura por encima de la superficie y las definiciones de los tipos de conductos. Puede haber tres tipos de conductos: superficiales, de superficie elevada y elevados. Debido a que, en general, hay pocos casos de conductos de superficie elevada en comparación con los conductos superficiales, las estadísticas se han obtenido a partir de la combinación de estos dos tipos en un grupo llamado conductos superficiales. Éstos se caracterizan por su intensidad, S_s (unidades M) o E_s (unidades M) y su espesor, S_t (m) o E_t (m). Se utilizan dos parámetros adicionales para establecer las características de los conductos elevados, o sea, la altura básica del conducto E_b (m), y E_m (m), la altura dentro del conducto de M máximas.

FIGURA 12

Definición de los parámetros que describen: a) conductos superficiales, b) conductos de superficie elevada, y c) conductos elevados



P.0453-12

Para facilitar la consulta, en las Figs. 13 a 20 se muestran los datos que contienen los ficheros de datos mencionados en el título de las Figuras. En las estadísticas se ha efectuado una combinación de los conductos superficiales y los conductos de superficie elevada debido a los pocos casos de conductos de superficie elevada.

Los datos oscilan de 0° a 360° en longitud y de $+90^\circ$ a -90° en latitud, con una resolución de $1,5^\circ$. Para una ubicación distinta de la de los puntos en la cuadrícula, el parámetro de interés en el lugar deseado puede obtenerse efectuando una interpolación bilineal en los valores situados en los cuatro puntos de la cuadrícula más próximos.

Los ficheros de datos pueden solicitarse a la BR.

FIGURA 13

Nombre del fichero: S_OCCURRENCE.TXT

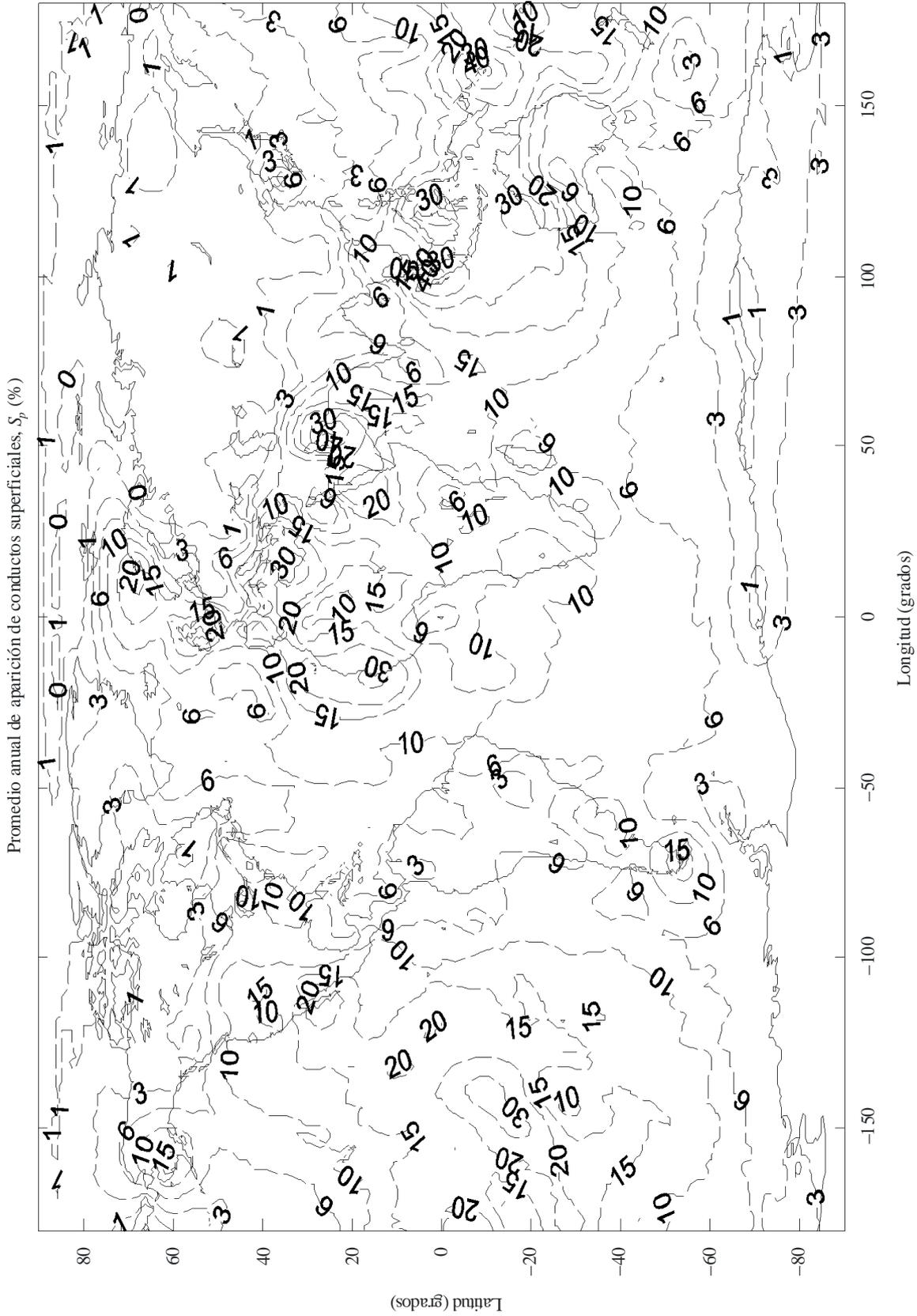


FIGURA 14
Nombre del fichero: S_STRENGTH.TXT

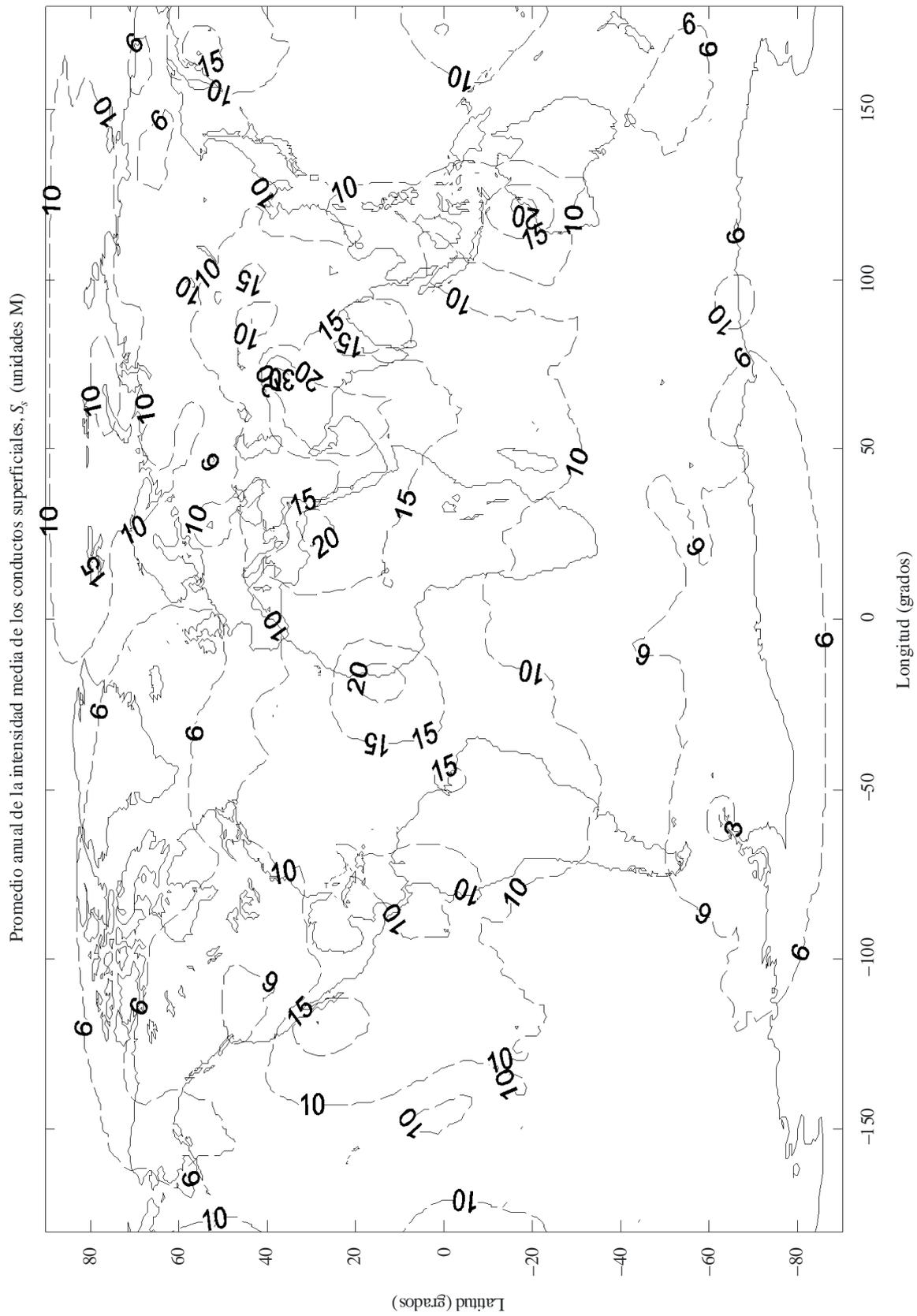
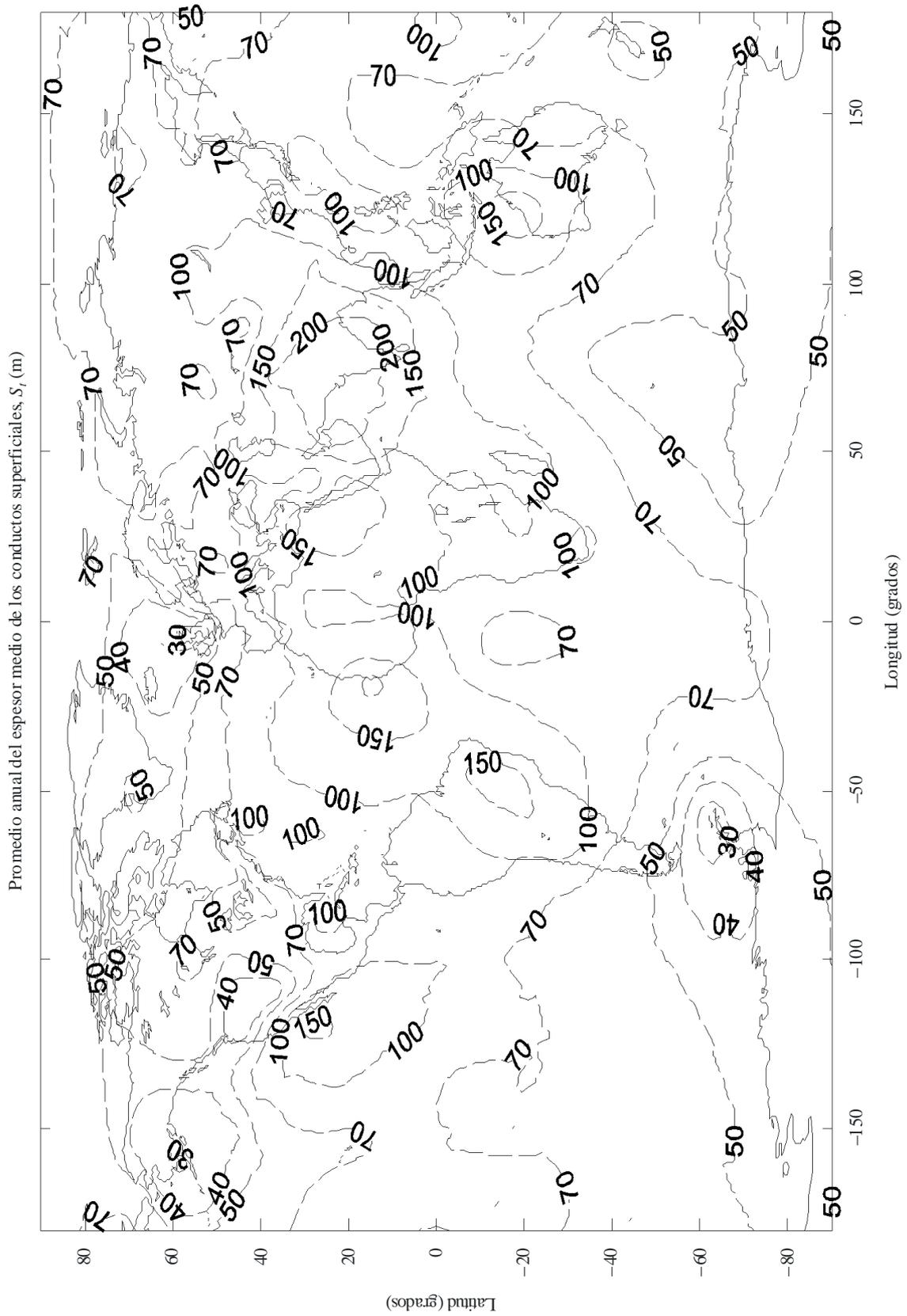


FIGURA 15

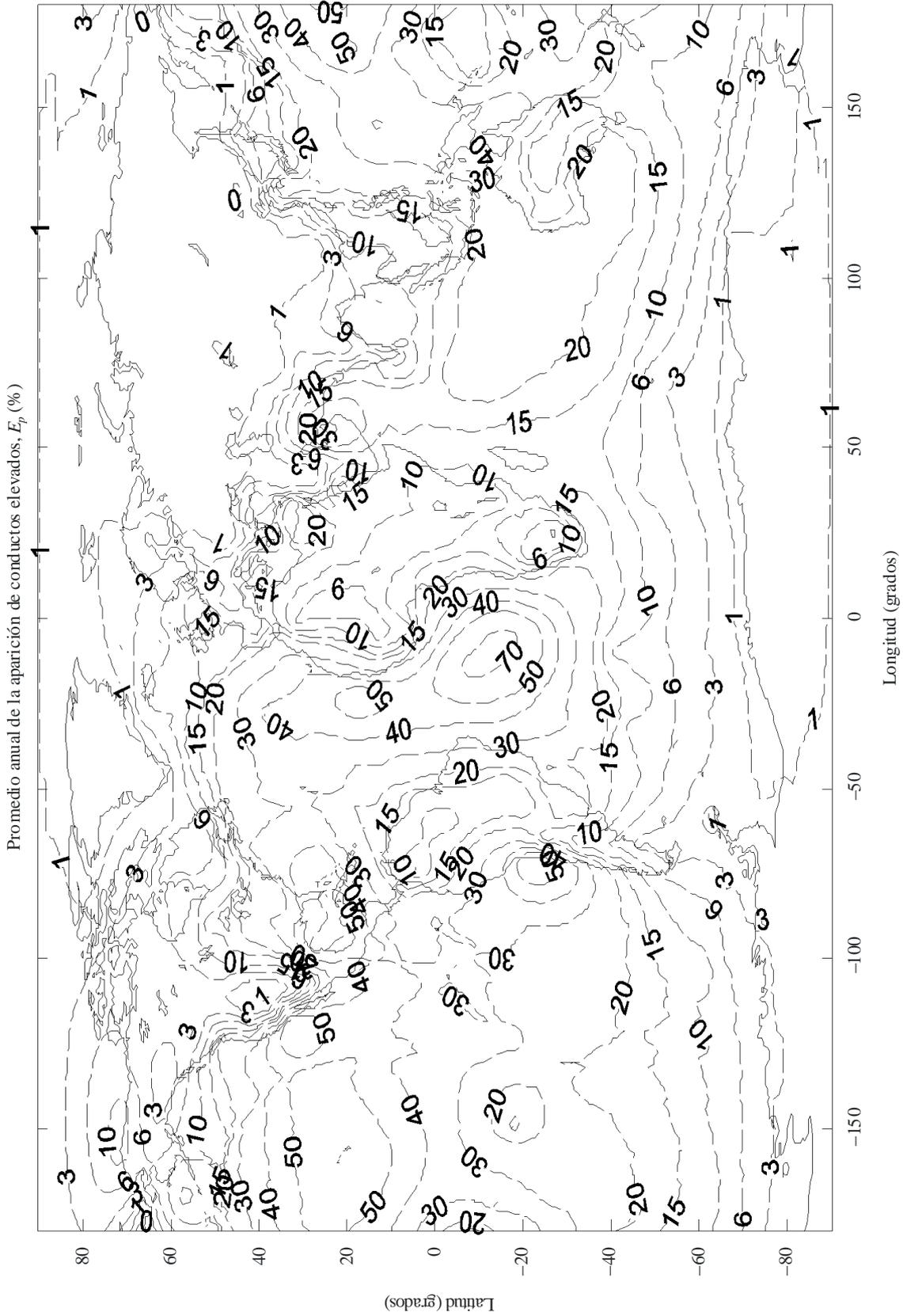
Nombre del fichero: S_THICKNESS.TXT



P.0453-15

FIGURA 16

Nombre del fichero: E_OCCURRENCE.TXT



P:0453-16

FIGURA 17

Nombre del fichero: E_STRENGTH.TXT

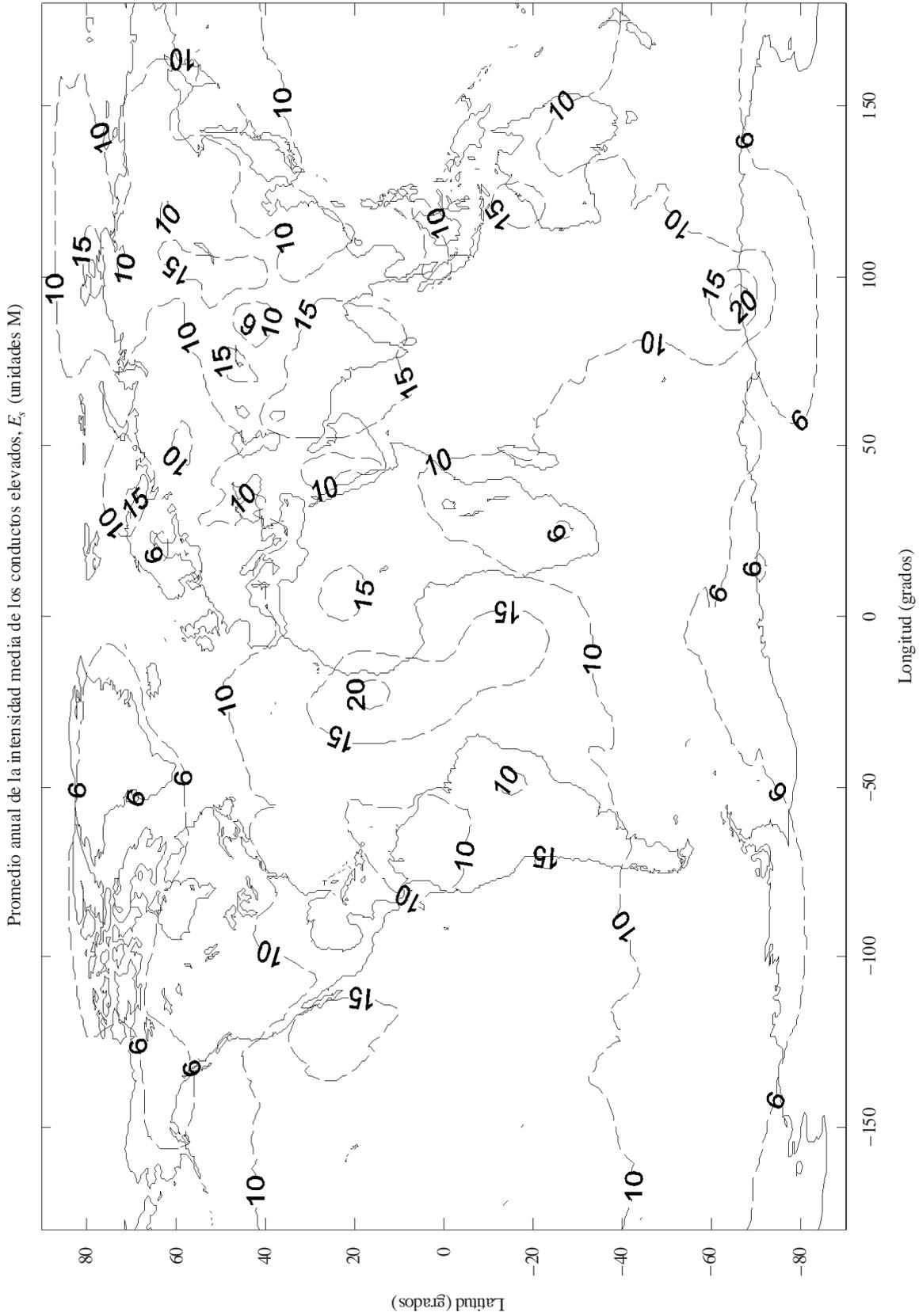
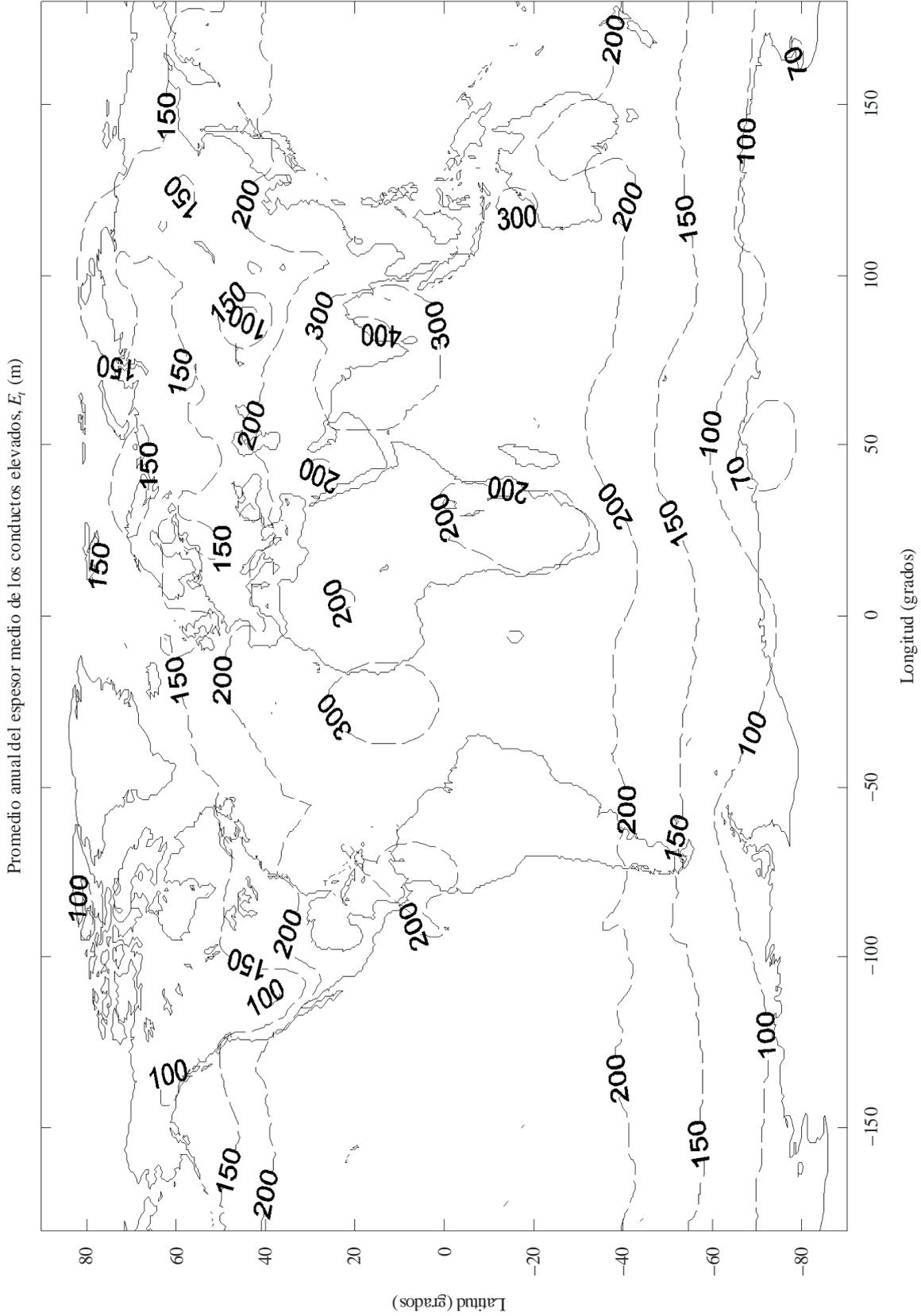


FIGURA 18

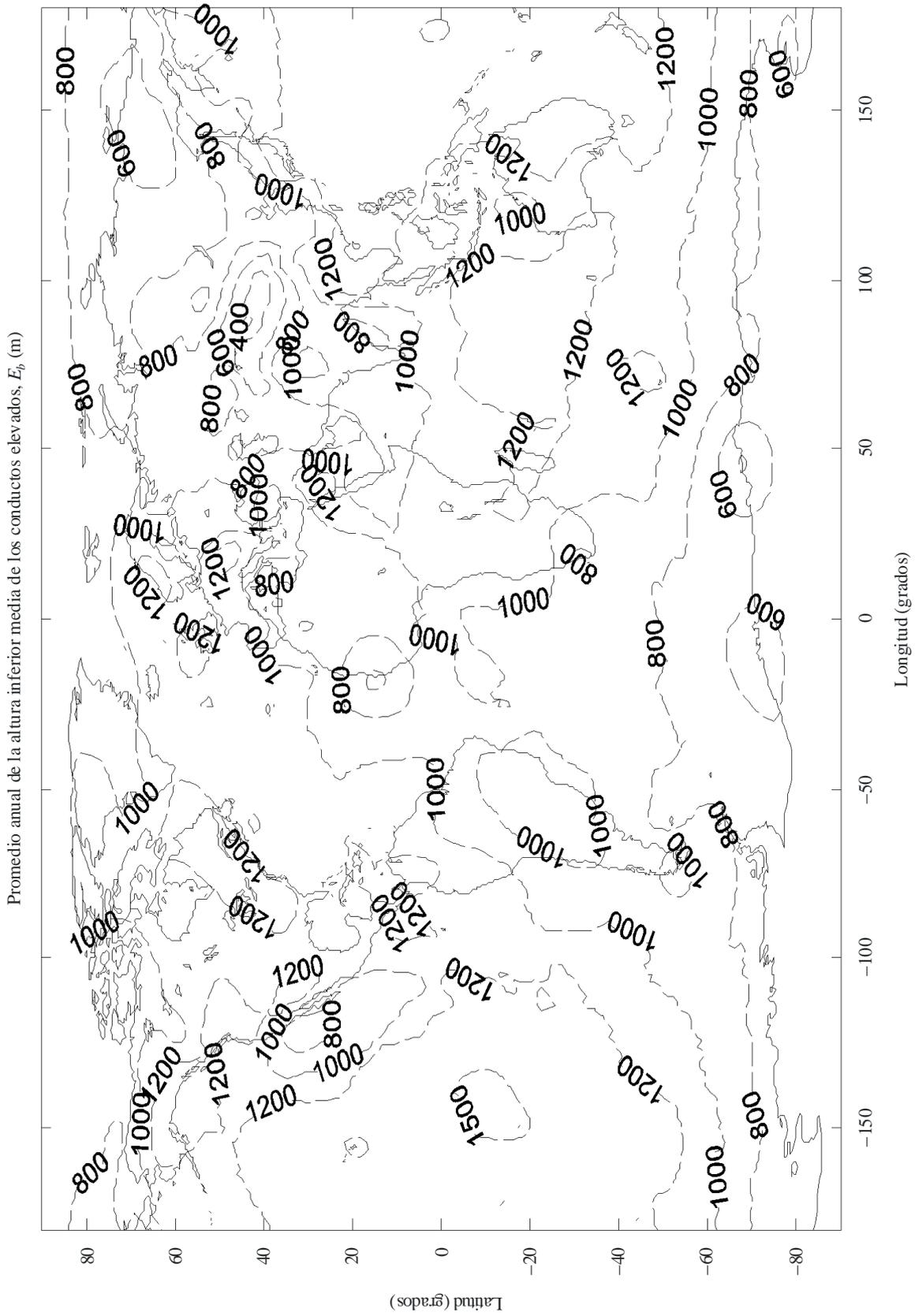
Nombre del fichero: E_THICKNESS.TXT



P.0453-18

FIGURA 19

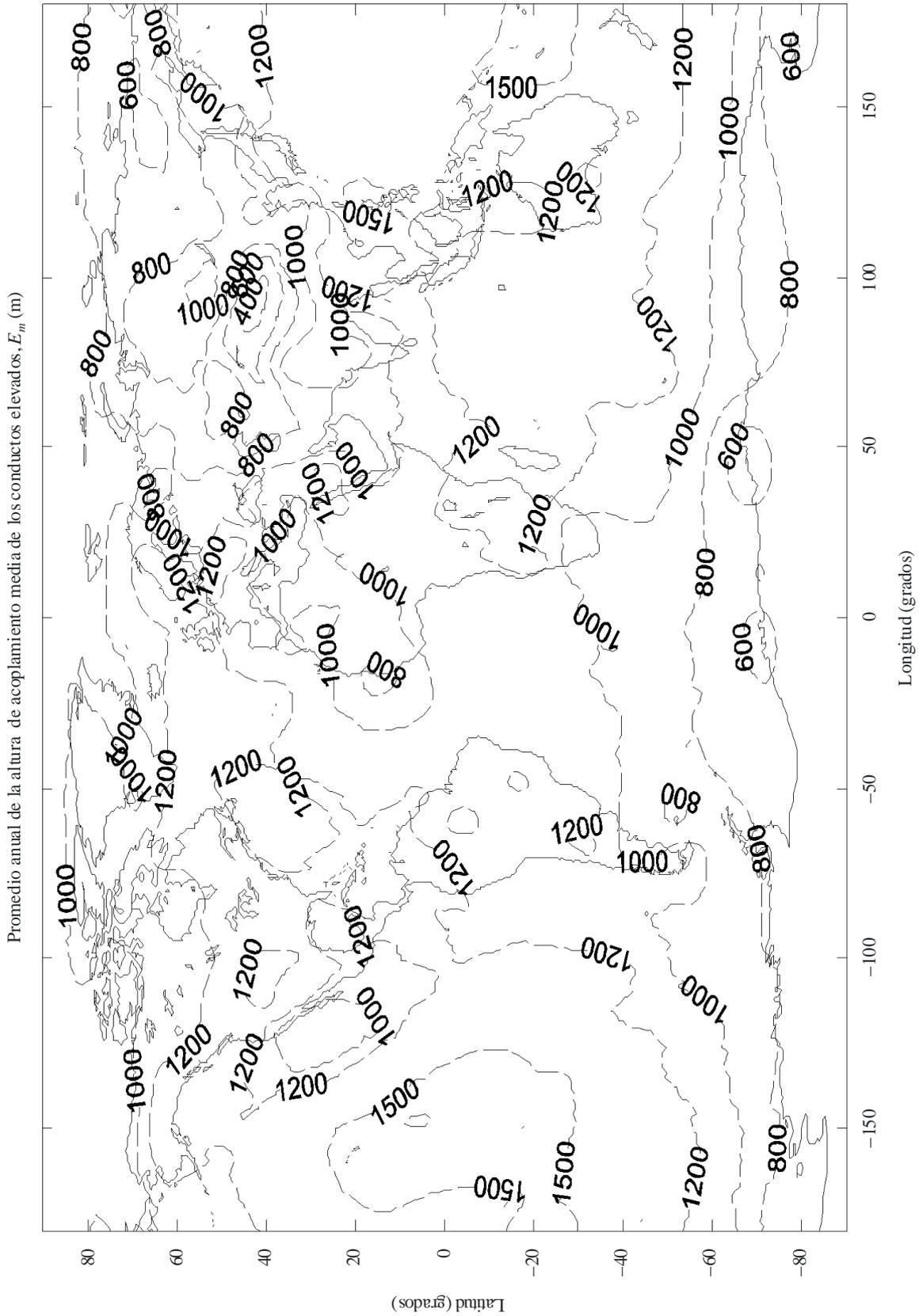
Nombre del fichero: E_BASE.TXT



P.04.53-19

FIGURA 20

Nombre del fichero: E_MAX_M.TXT



P.04-53-20