

## RECOMENDACIÓN UIT-R P.453-9

**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)

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:

 $N$ : coíndice de refracción radioeléctrica expresado por:

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

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:

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

con:

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

donde:

$H$ : humedad relativa (%)

$t$ : temperatura en grados centígrados (°C)

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

*Para agua*

$$a = 6,1121$$

$$b = 17,502$$

$$c = 240,97$$

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

*Para hielo*

$$a = 6,1115$$

$$b = 22,452$$

$$c = 272,55$$

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

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

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

con  $\rho$  ( $\text{g/m}^3$ ). En la Recomendación UIT-R P.836 se dan valores representativos de  $\rho$ .

## 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:

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

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. Las Figs. 1 y 2 se obtuvieron a partir de un conjunto de datos, obtenidos durante 5 años (1955-1959), de unas 1000 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 (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.

(Cabe señalar que el perfil exponencial de la ecuación (9) 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 $N_{húmedo}$ de la refractividad de la superficie

Para facilitar la consulta, en la Fig. 3 se muestra el valor medio (50%) del término  $N_{húmedo}$  de la refractividad de la superficie rebasado durante el año medio. En el fichero de datos ESANWET.TXT figuran los datos numéricos.

El término  $N_{húmedo}$  de la refractividad de 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 dos años (1992-1993).

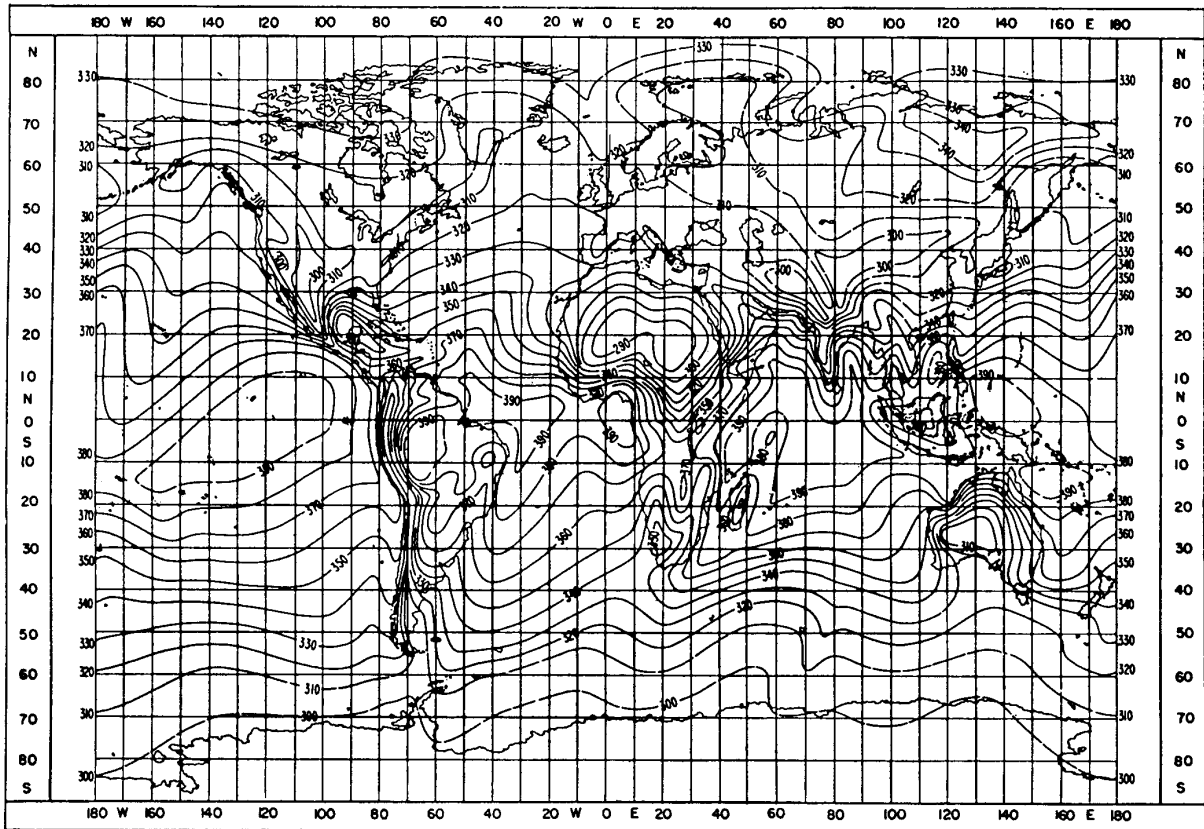
NOTA 1 – El fichero de datos ESANWET.TXT tiene una resolución de  $1,5^\circ$  en latitud y longitud. Los ficheros de datos complementarios ESALAT.TXT y ESALON.TXT contienen respectivamente las latitudes y longitudes de las entradas correspondientes (puntos en la cuadrícula) en el fichero de datos ESANWET.TXT.

Los datos oscilan de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  en longitud y de  $+90^\circ$  a  $-90^\circ$  en latitud. Para una ubicación distinta de la de los puntos en la cuadrícula, el término  $N_{húmedo}$  de la refractividad 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 Oficina de Radiocomunicaciones (BR).

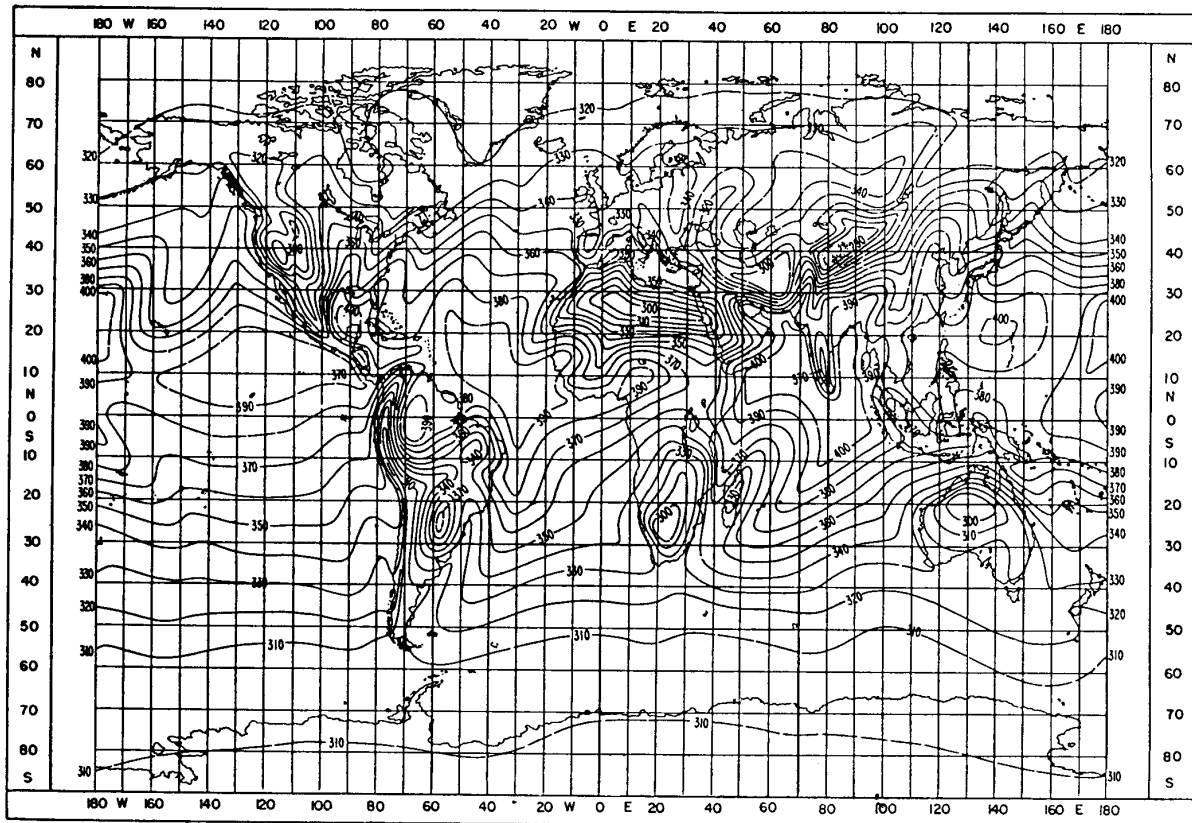
FIGURA 1

Valores medios mensuales de  $N_0$ : febrero



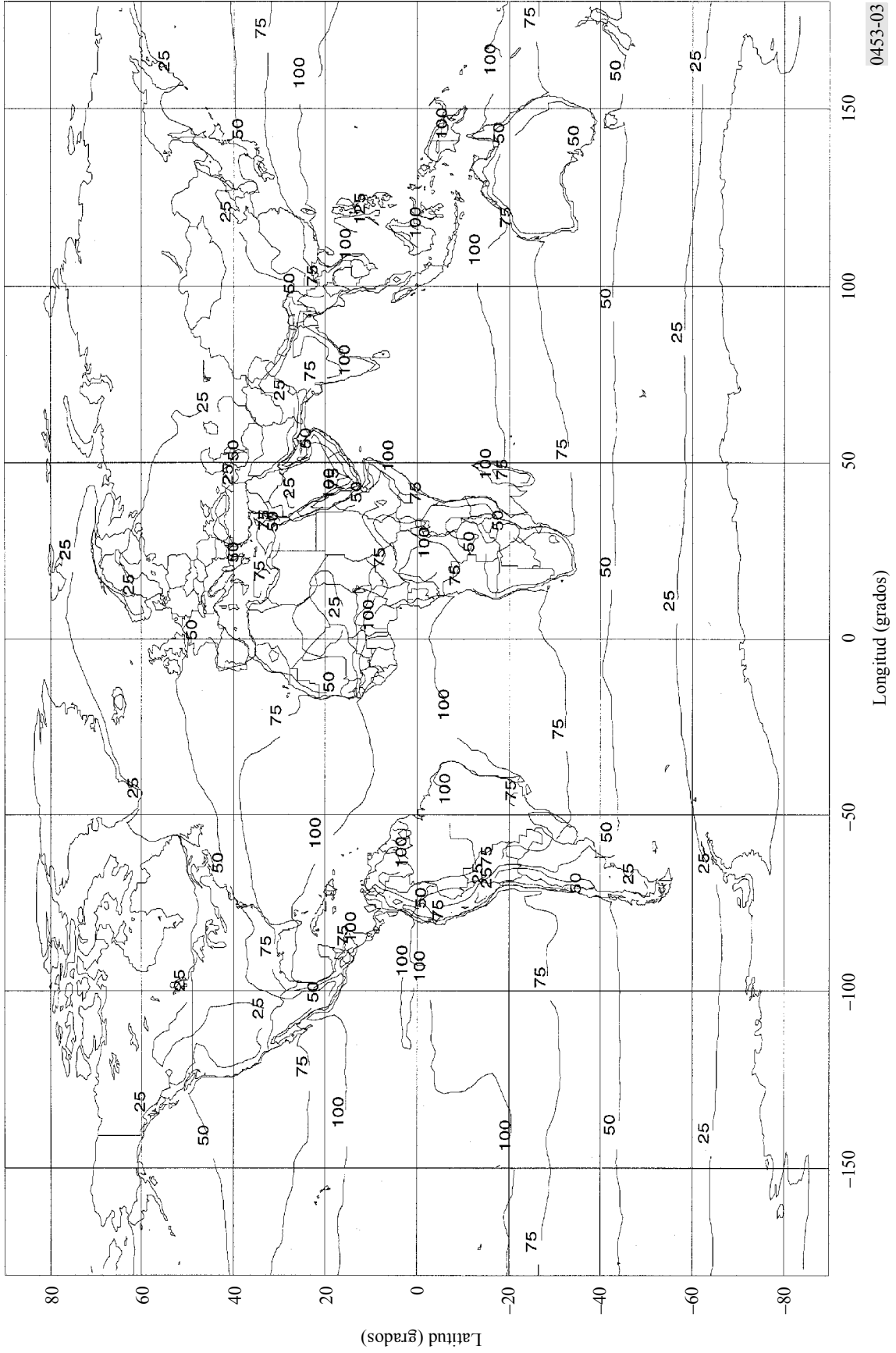
0453-01

FIGURA 2  
Valores medios mensuales de  $N_0$ : agosto



0453-02

FIGURA 3  
Término  $N_{\text{humado}}$  de la refractividad de la superficie (ppm) rebasado durante el 50% del año



0453-03

### 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 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  $\Delta N$  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  $\Delta N$  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.)

#### 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.)

Para facilitar la consulta, en las Figs. 12 a 16 se muestran el gradiente de refractividad en los 65 m inferiores de la atmósfera,  $dN_1$ . Los ficheros de datos DNDZ\_xx.TXT contienen los datos numéricos que aparecen en estas Figuras.

El gradiente de refractividad se obtuvo a partir de la inicialización de los datos (4 veces por día) de la predicción meteorológica numérica del CEPMPM, obtenidos durante dos años (1992-1993).

NOTA 1 – El fichero de datos DNDZ\_xx.TXT tiene una resolución de 1,5° en latitud y longitud. Los ficheros de datos complementarios DNDZLAT.TXT y DNDZLON.TXT contienen respectivamente las latitudes y longitudes de las entradas correspondientes (puntos en la cuadrícula) en el fichero de datos DNDZ\_xx.TXT.

Los datos oscilan de 0° a 360° en longitud y de +90° 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.

Los ficheros de datos pueden solicitarse a la BR.

FIGURA 4

Valores medios mensuales de  $\Delta N$ : febrero

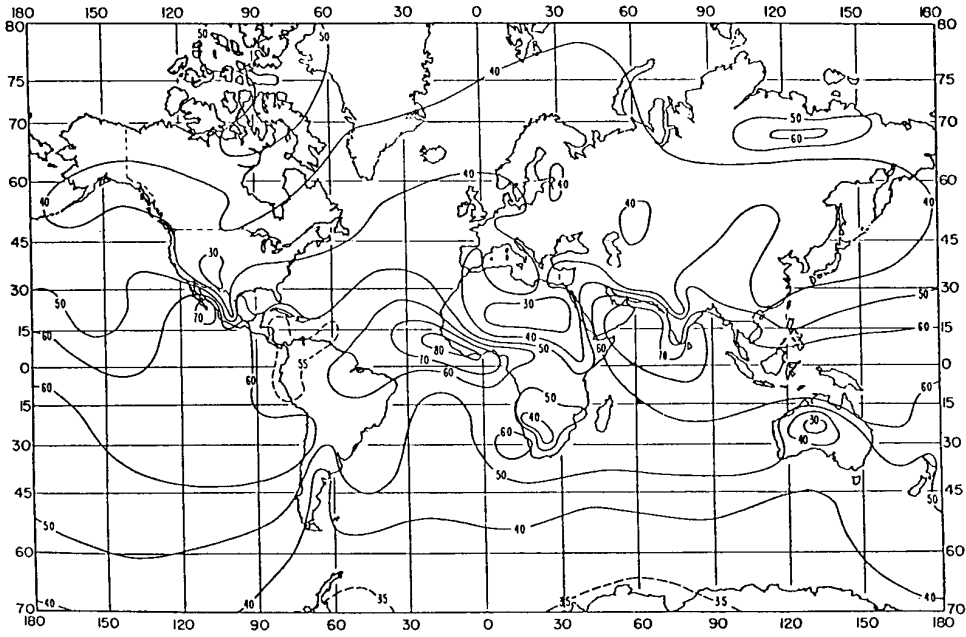


FIGURA 5

Valores medios mensuales de  $\Delta N$ : mayo

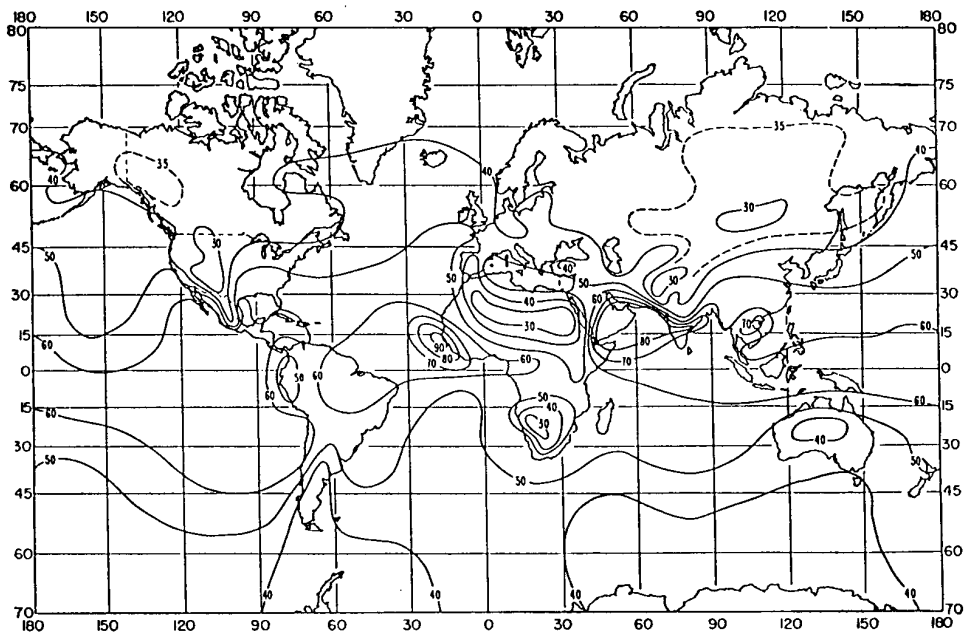




FIGURA 6  
Valores medios mensuales de  $\Delta N$ : agosto

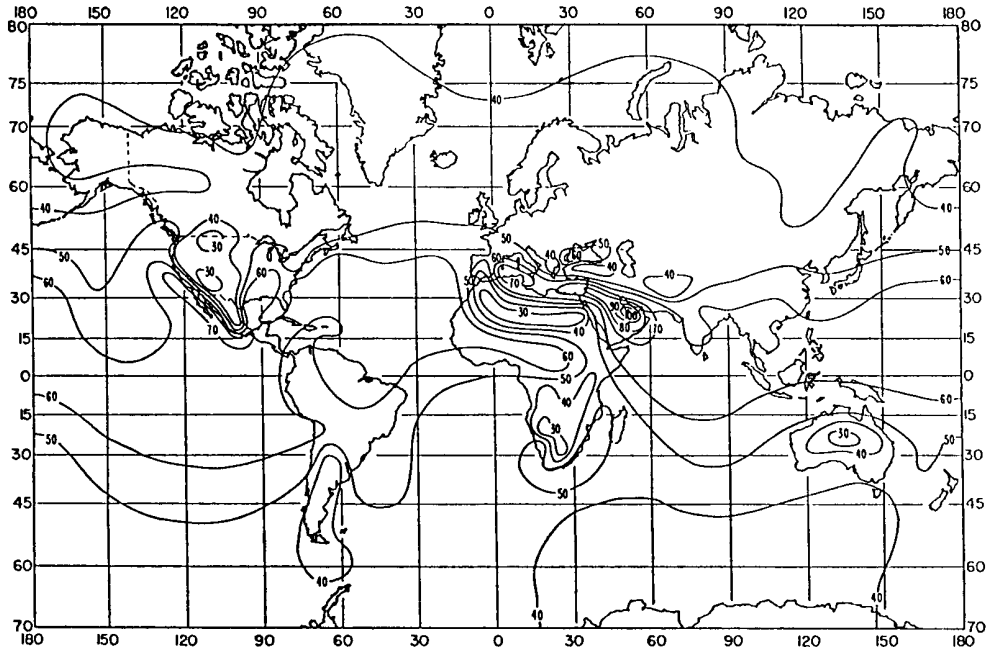
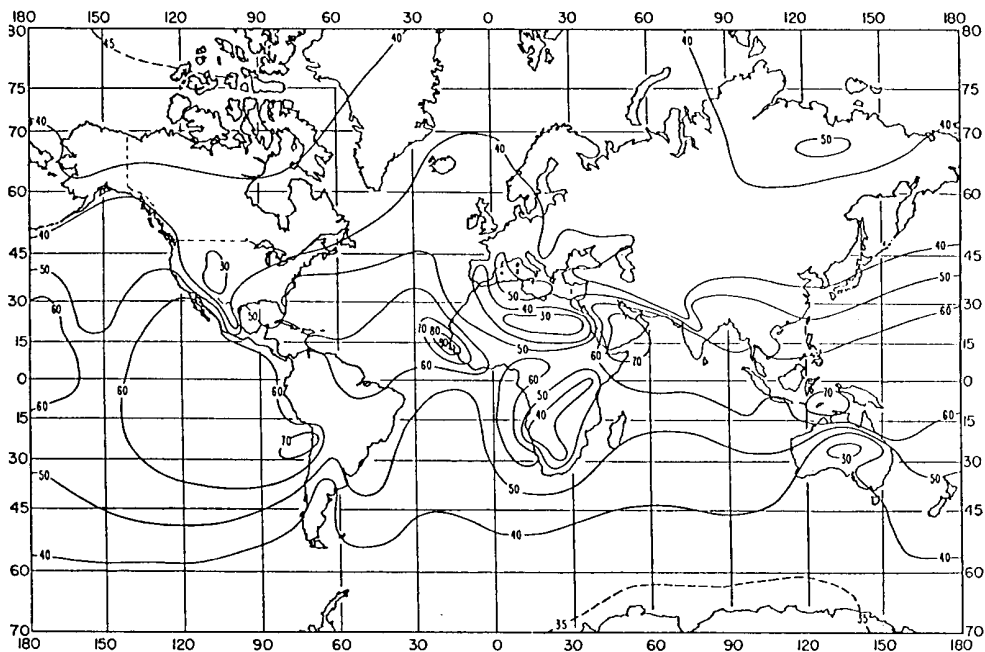


FIGURA 7  
Valores medios mensuales de  $\Delta N$ : noviembre



0453-067

FIGURA 8

Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es  $\leq -100$  unidades N/km: febrero

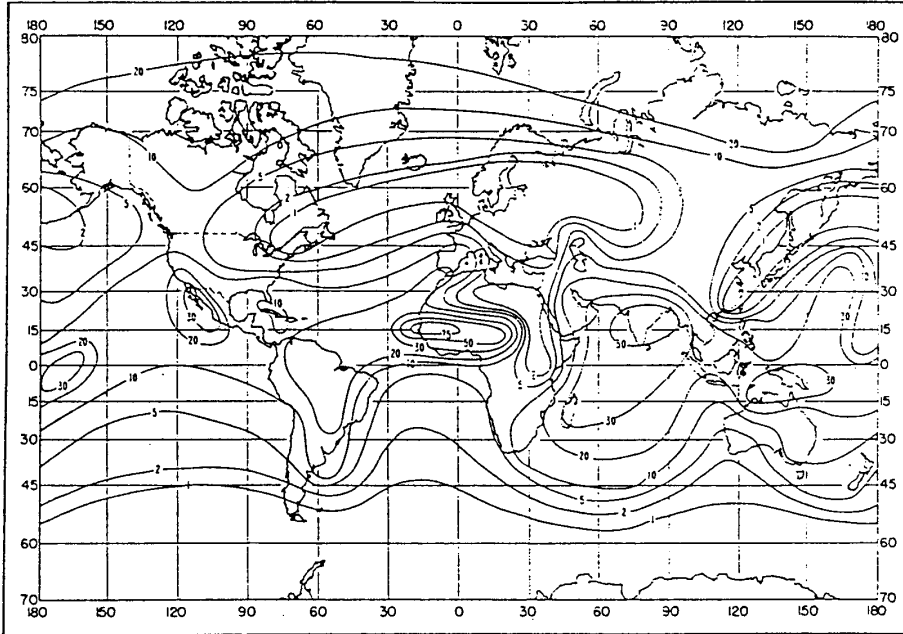


FIGURA 9

Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es  $\leq -100$  unidades N/km: mayo

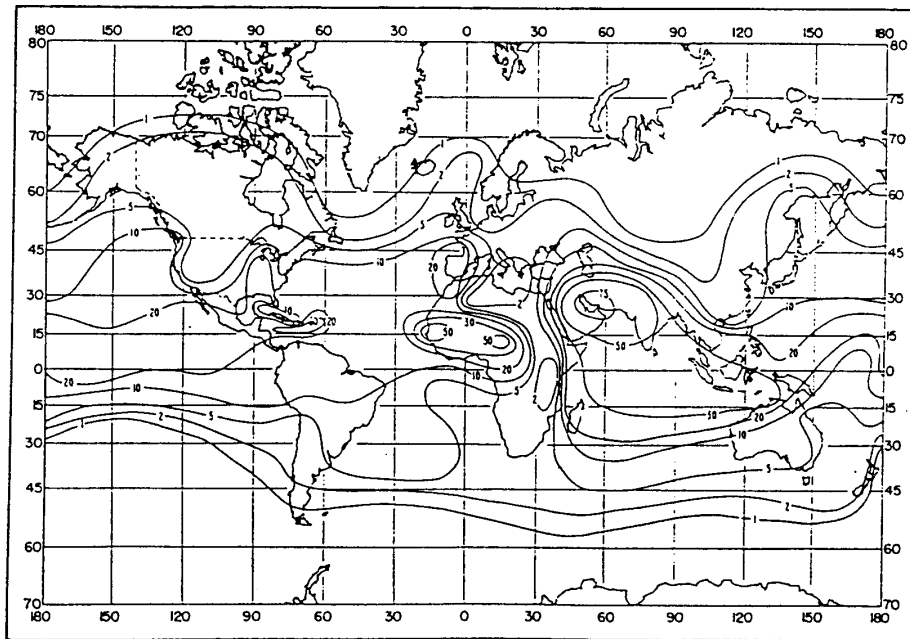


FIGURA 10

Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es  $\leq -100$  unidades N/km: agosto

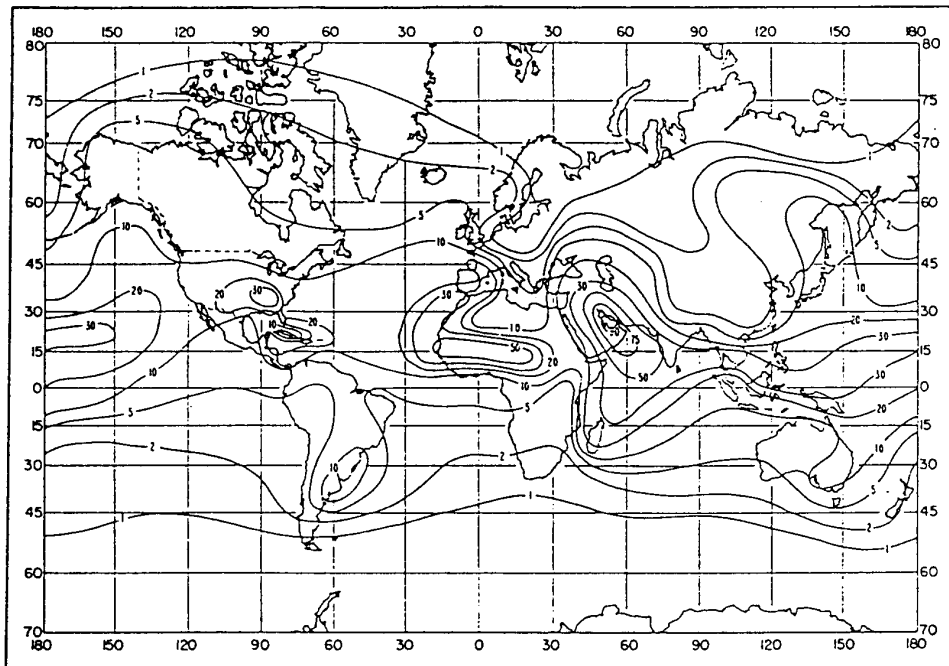


FIGURA 11

Porcentaje de tiempo durante el cual su gradiente es  $\leq -100$  unidades N/km: noviembre

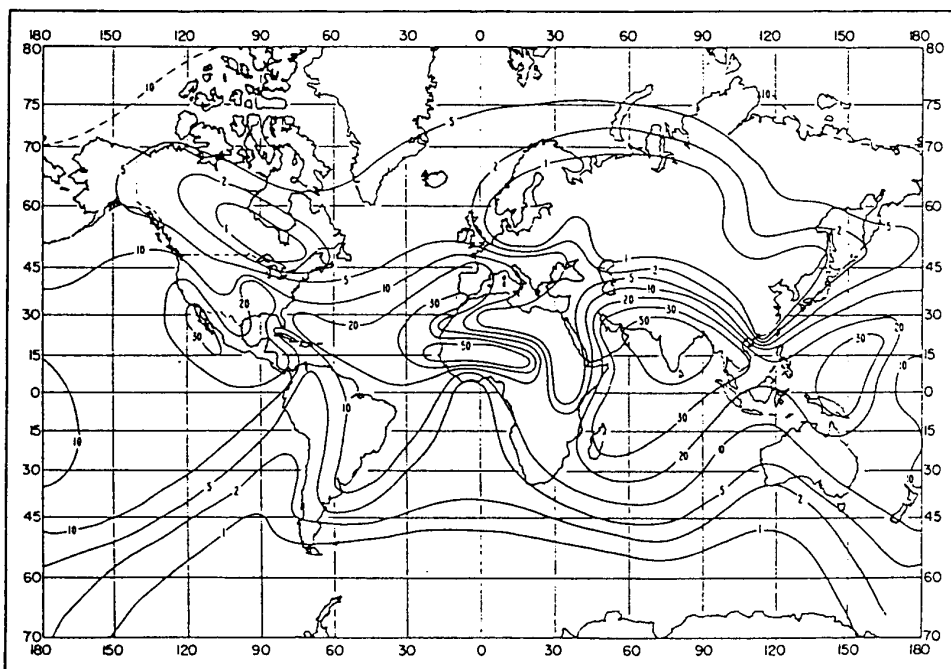
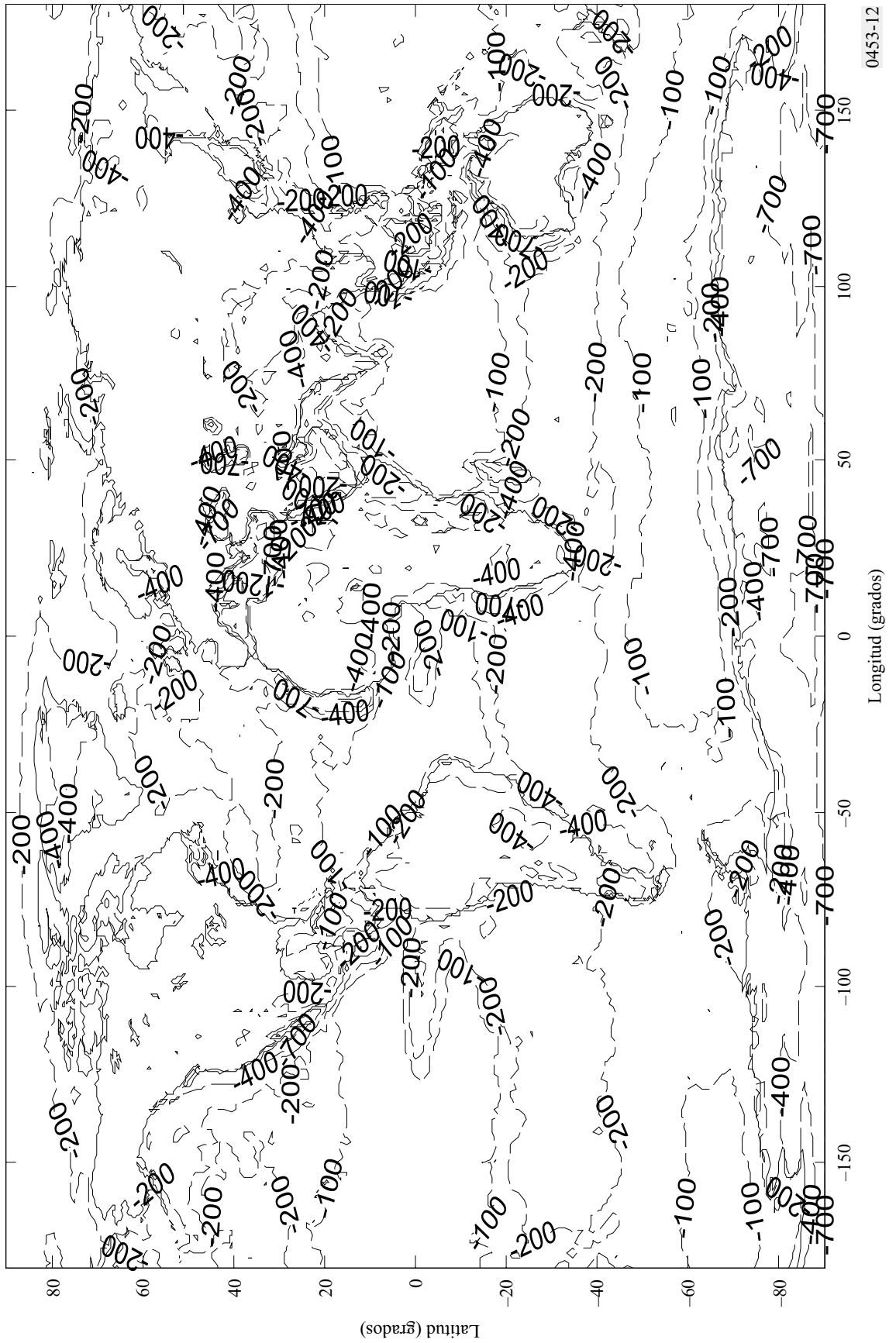


FIGURA 12  
Gradiente de refractividad no rebasado durante el 1% del año medio en los 65 m más bajos de la atmósfera

(Es el parámetro denominado  $dN_1$  en la Recomendación UIT-R P.530)



0453-12

FIGURA 13  
Gradiente de refractividad no rebasado durante el 10% del año medio en los 65 m más bajos de la atmósfera

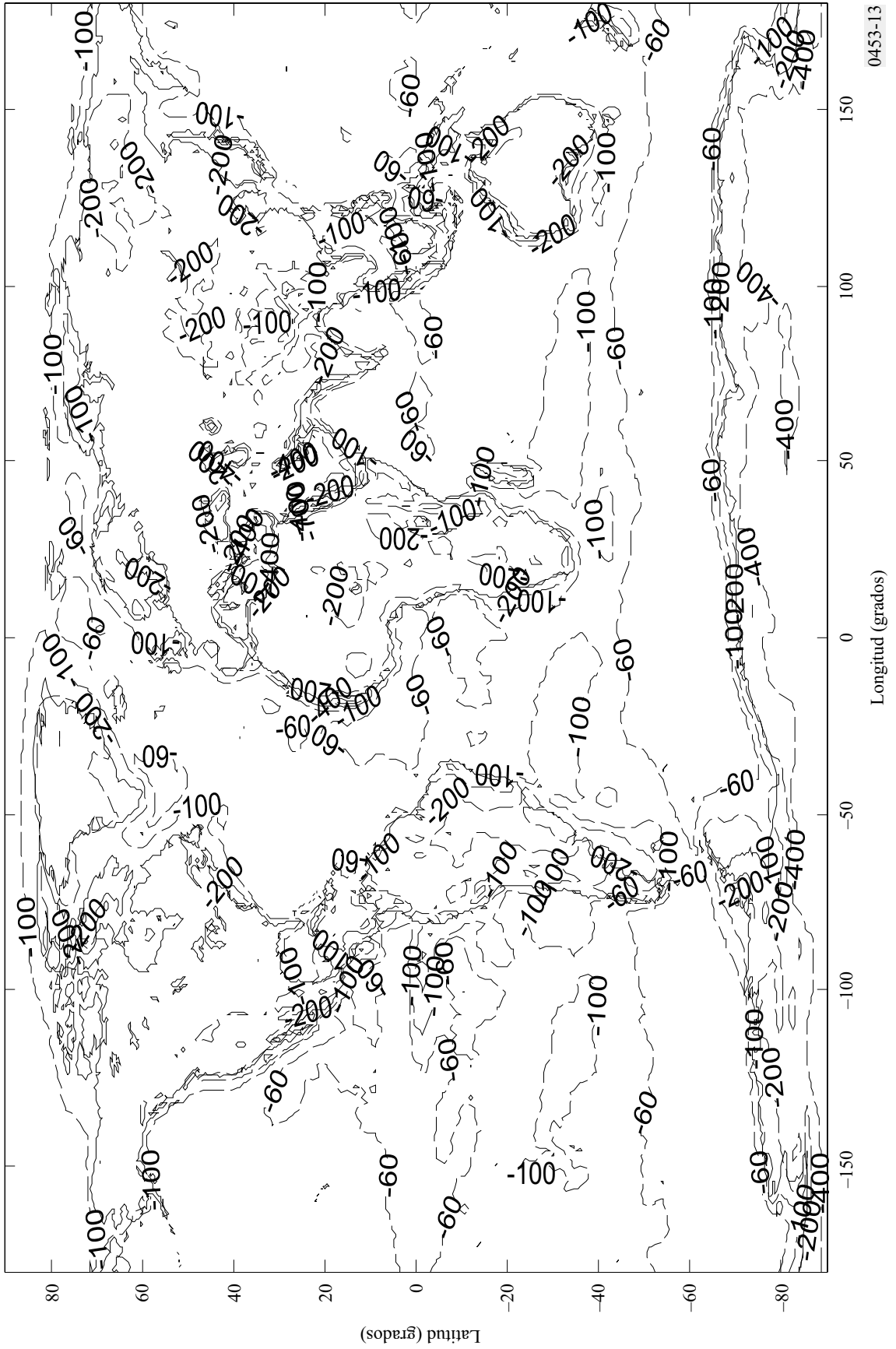


FIGURA 14  
Gradiente de refractividad no rebasado durante el 50% del año medio en los 65 m más bajos de la atmósfera

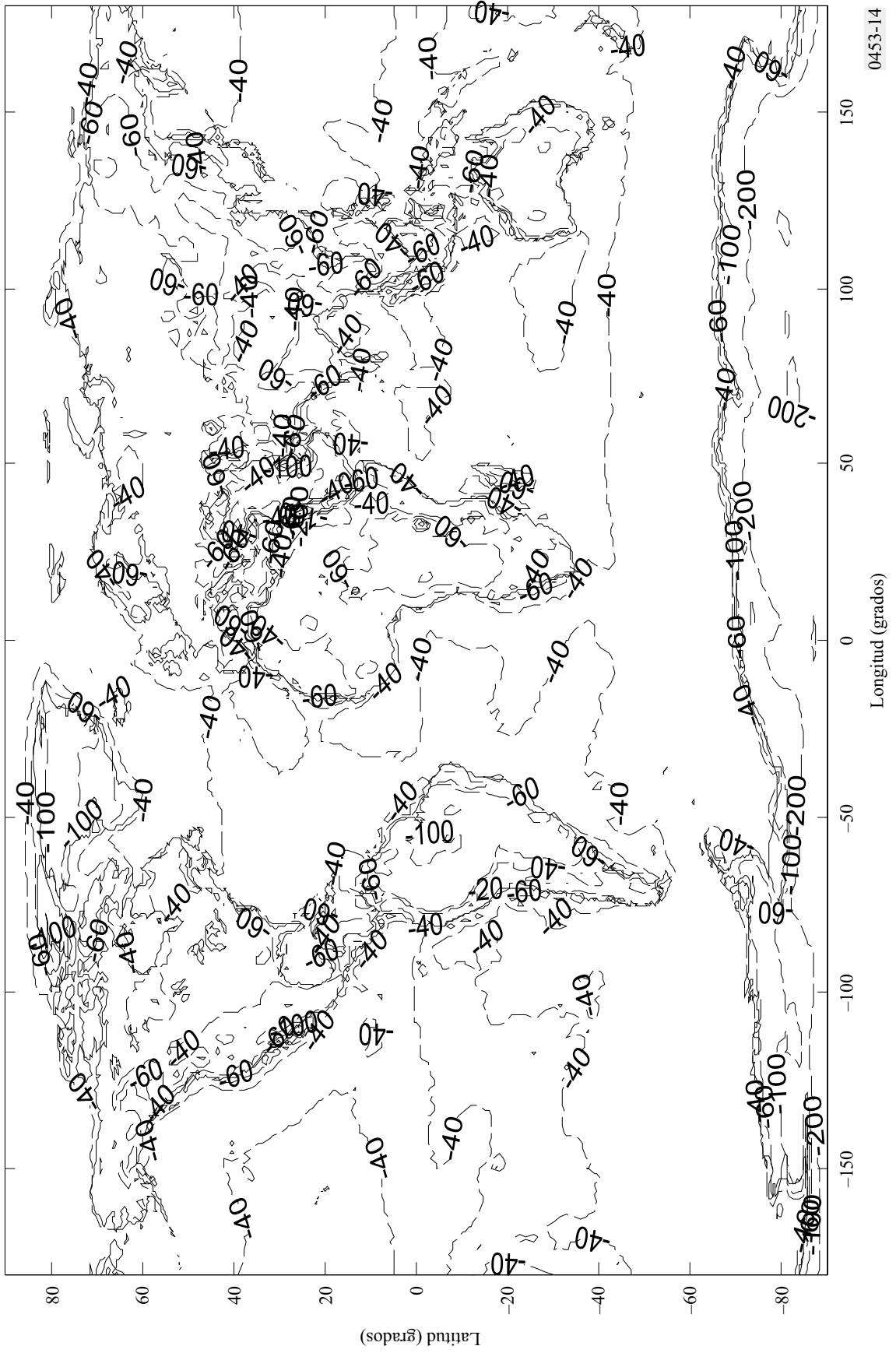
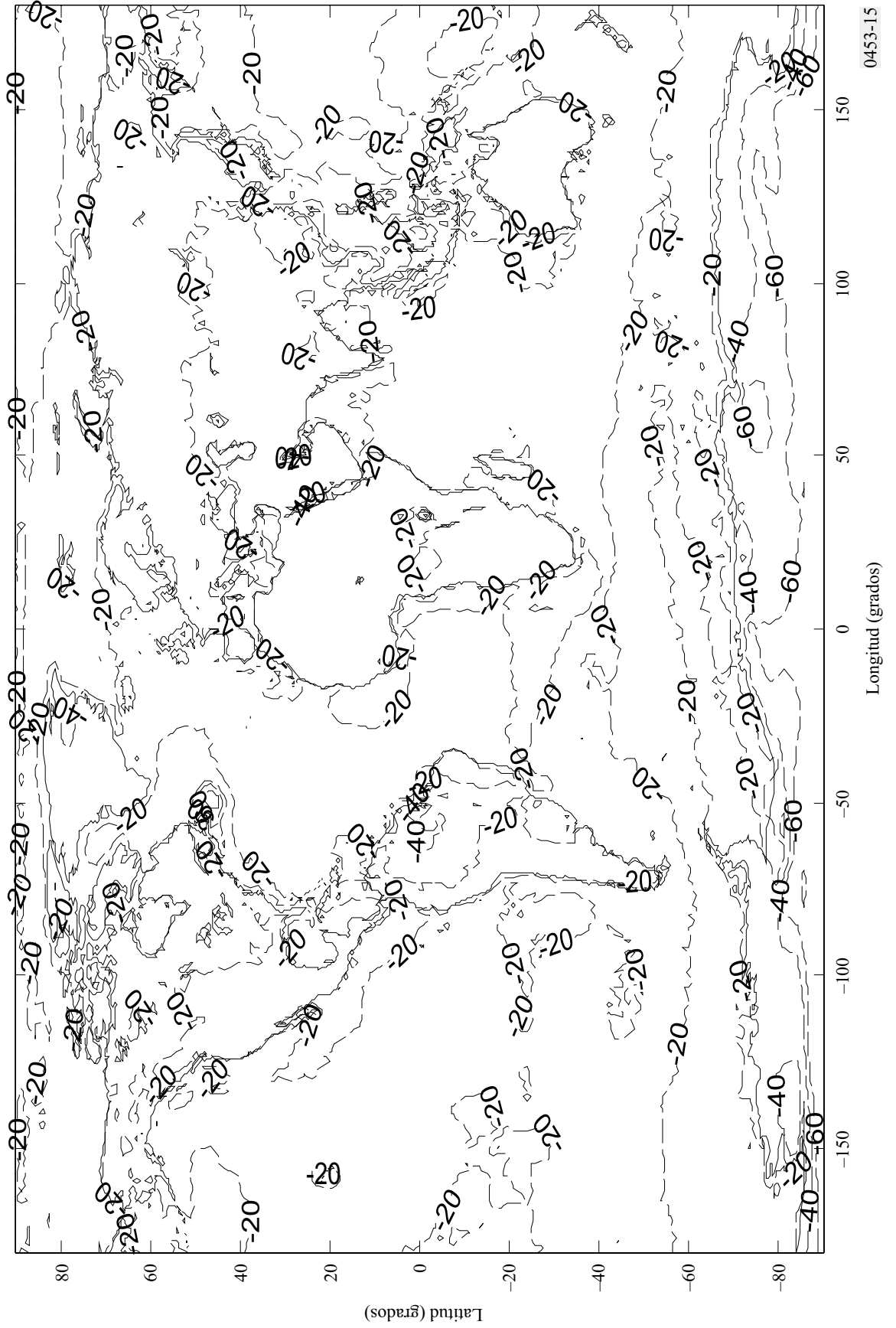
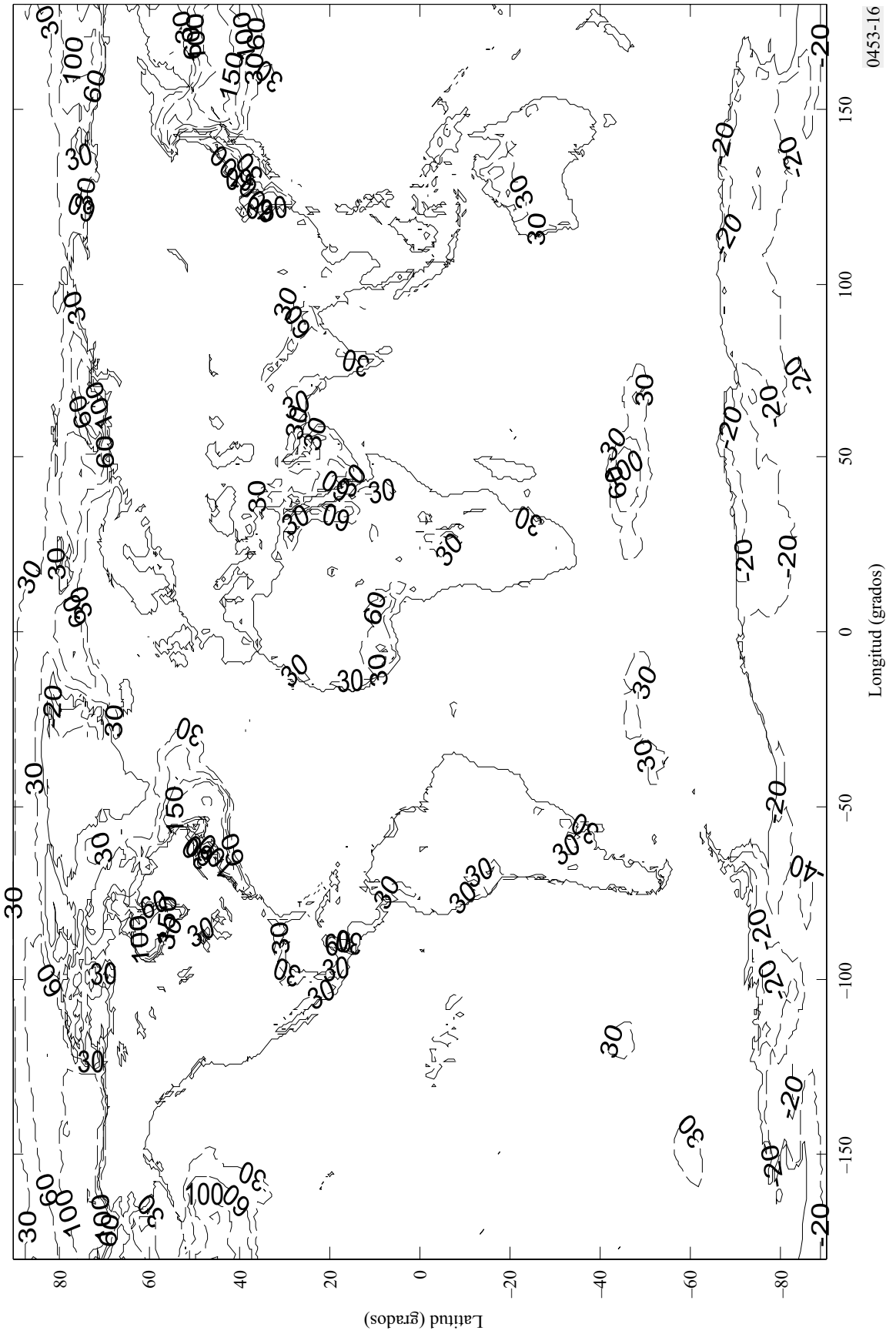


FIGURA 15  
Gradiente de refractividad no rebasado durante el 90% del año medio en los 65 m más bajos de la atmósfera



0453-15

FIGURA 16  
Gradiente de refractividad no rebasado durante el 99% del año medio en los 65 m más bajos de la atmósfera



0453-16



#### 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:

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

donde:

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

$$k_1 = 30.$$

La ecuación (11) 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 (9).

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

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

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 (12) 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:

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

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 (13) 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:

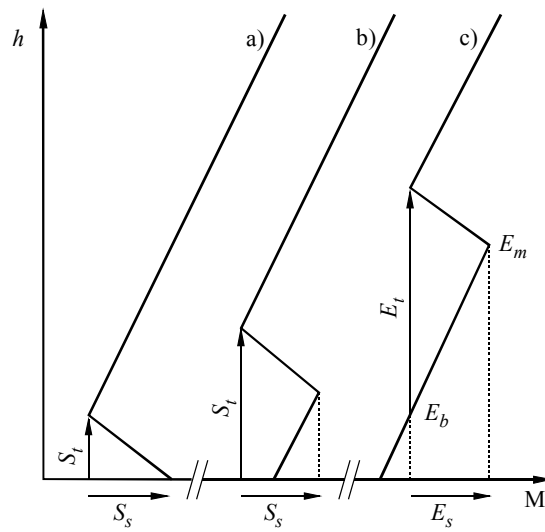
$$M(h) = N(h) + 157h \quad (\text{unidades M}) \quad (14)$$

donde  $h$  (km) es la altura.

La Fig. 17 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 17

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



0453-17

Para facilitar la consulta, en las Figs. 18 a 25 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  $0^\circ$  a  $360^\circ$  en longitud y de  $+90^\circ$  a  $-90^\circ$  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 18  
Nombre del fichero: S\_OCCURRENCE.TXT

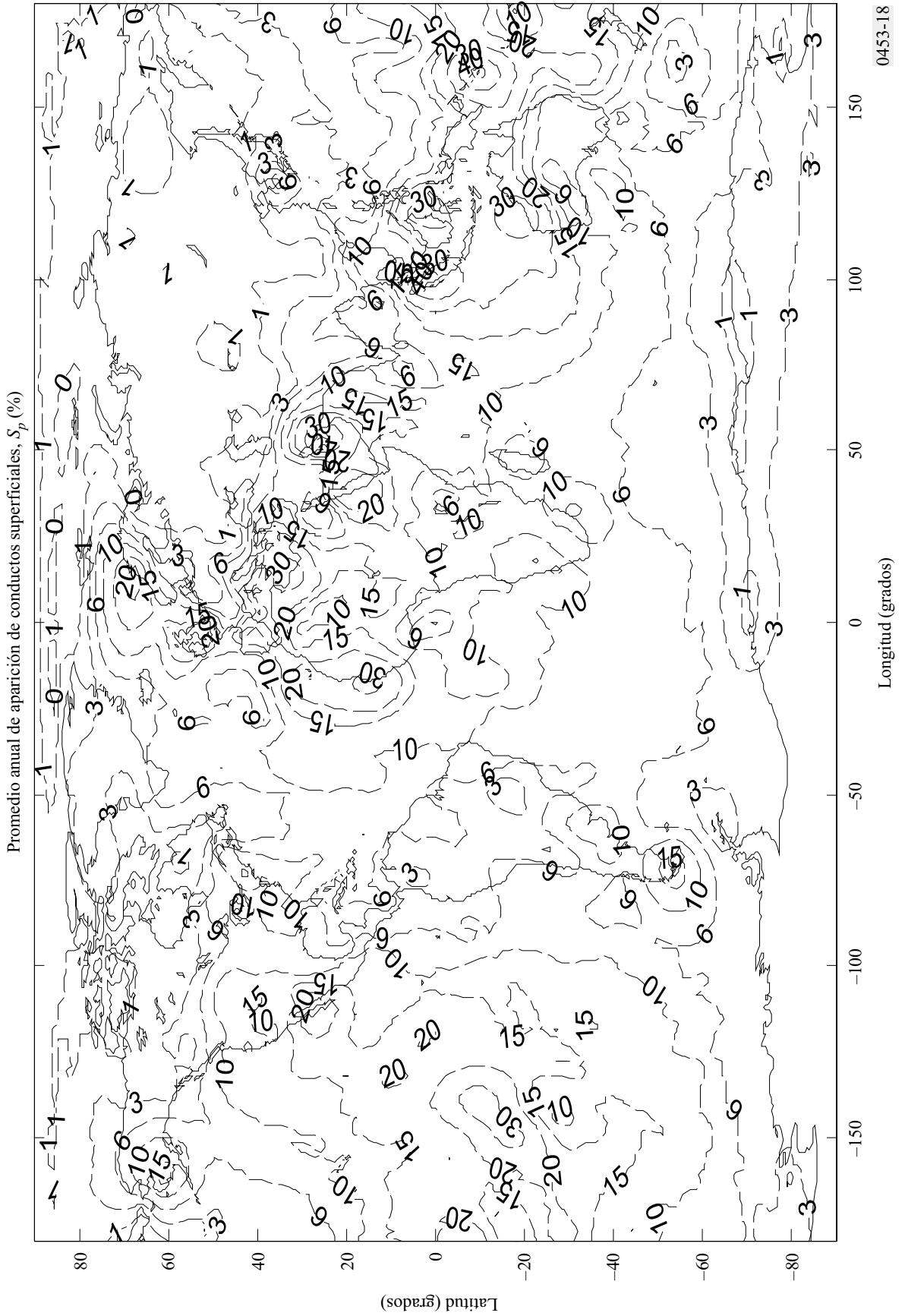


FIGURA 19  
Nombre del fichero: S\_STRENGTH.TXT

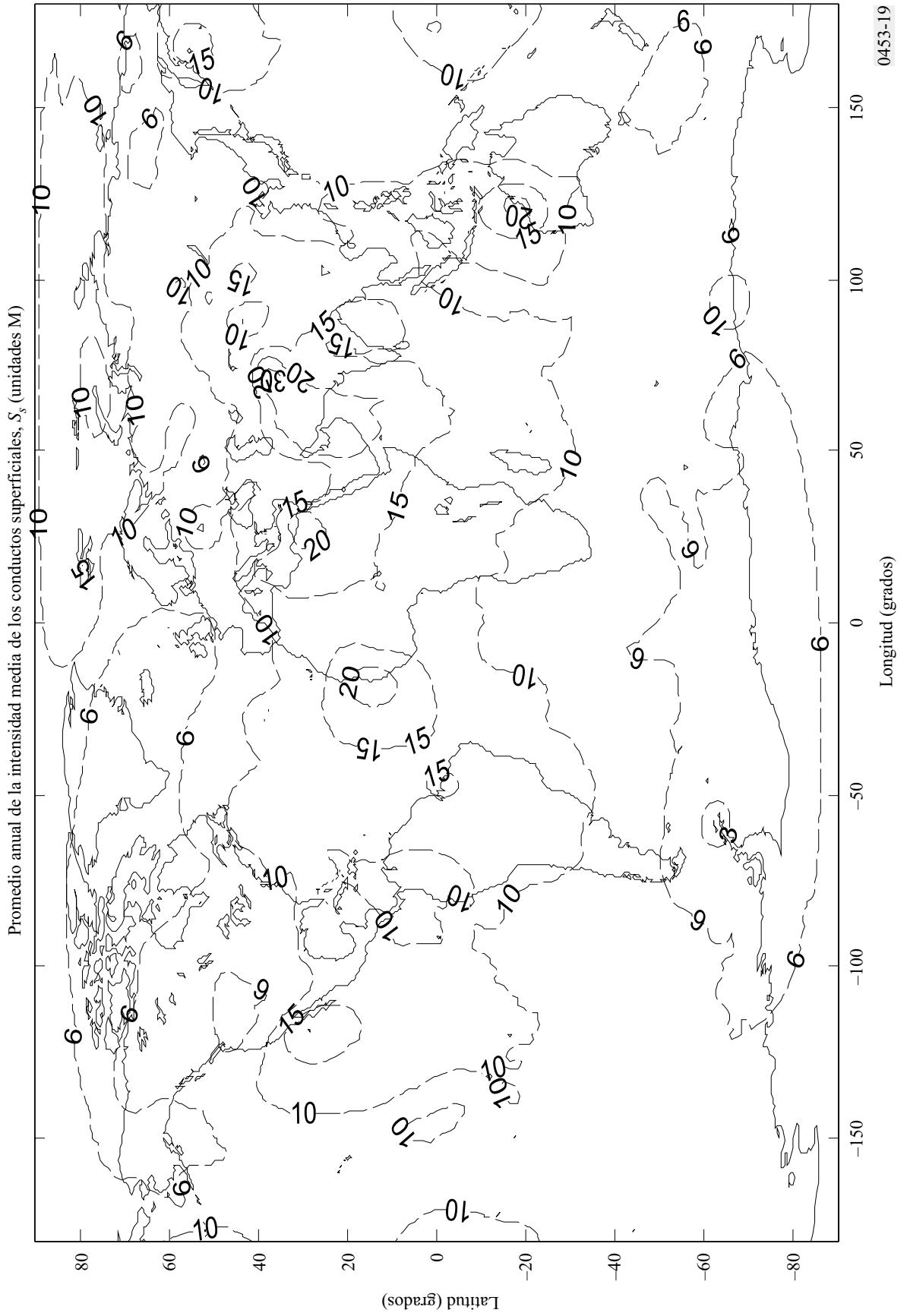


FIGURA 20  
Nombre del fichero: S\_THICKNESS.TXT

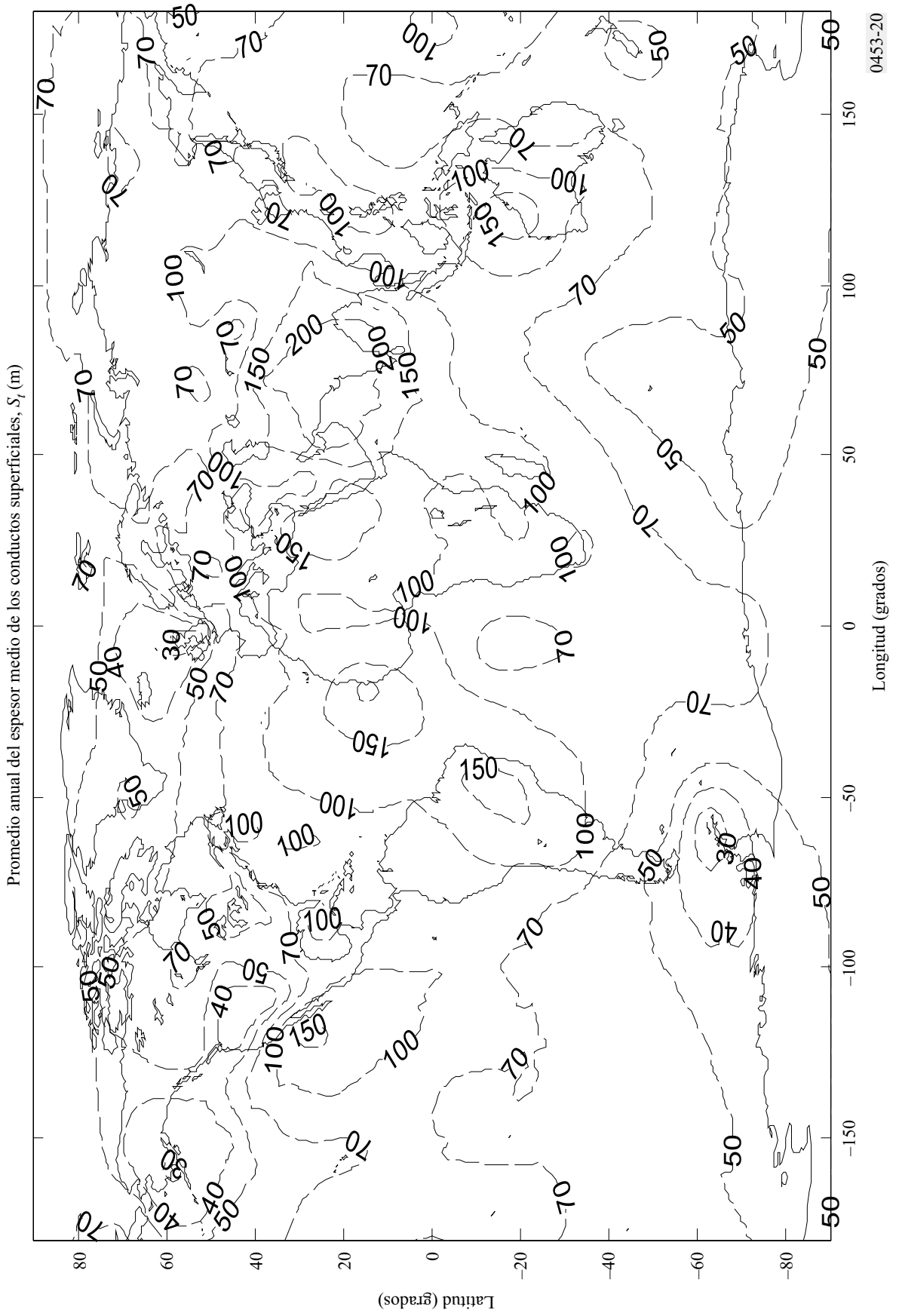


FIGURA 21  
Nombre del fichero: E\_OCCURRENCE.TXT

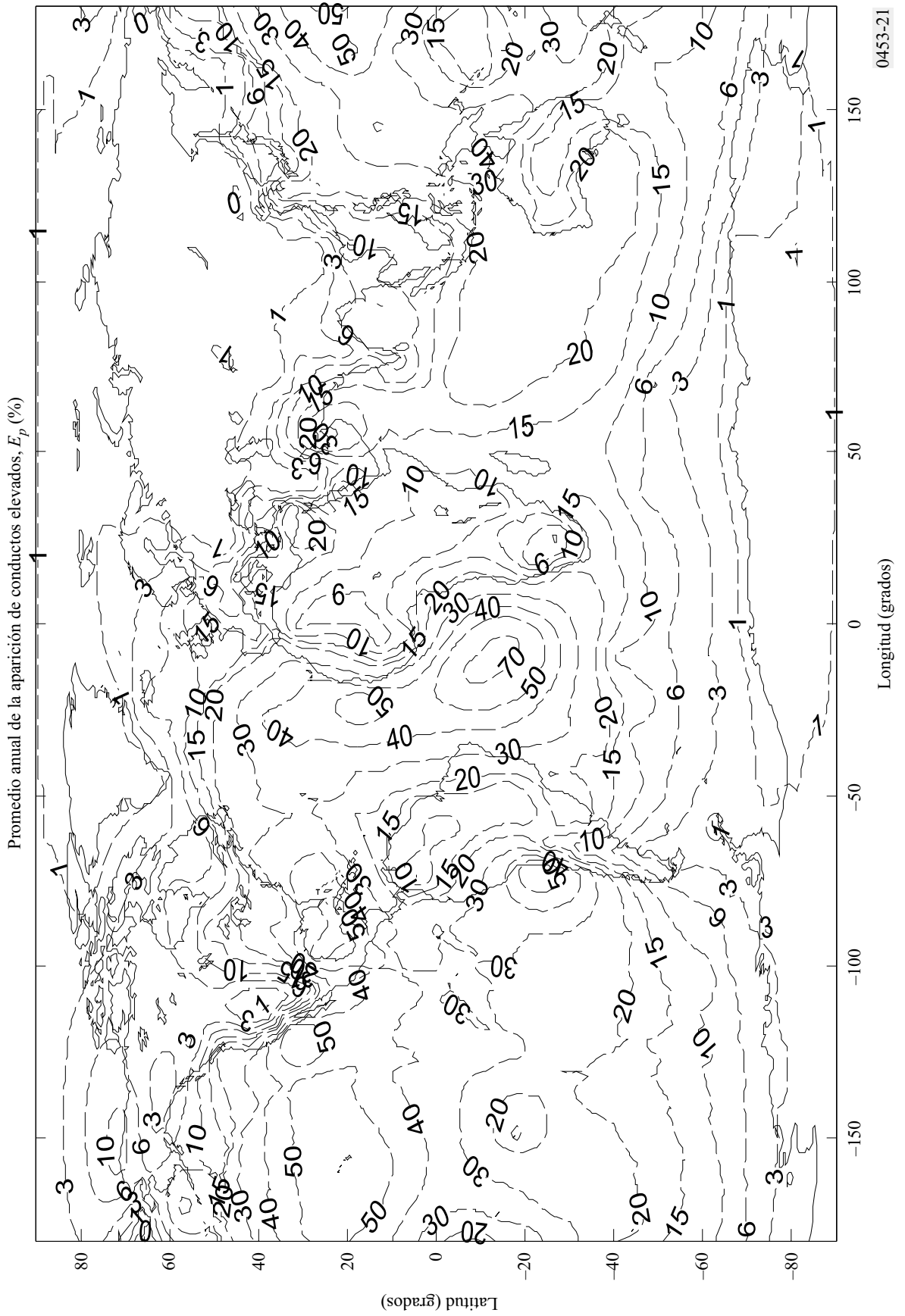


FIGURA 22  
Nombre del fichero: E\_STRENGTH.TXT

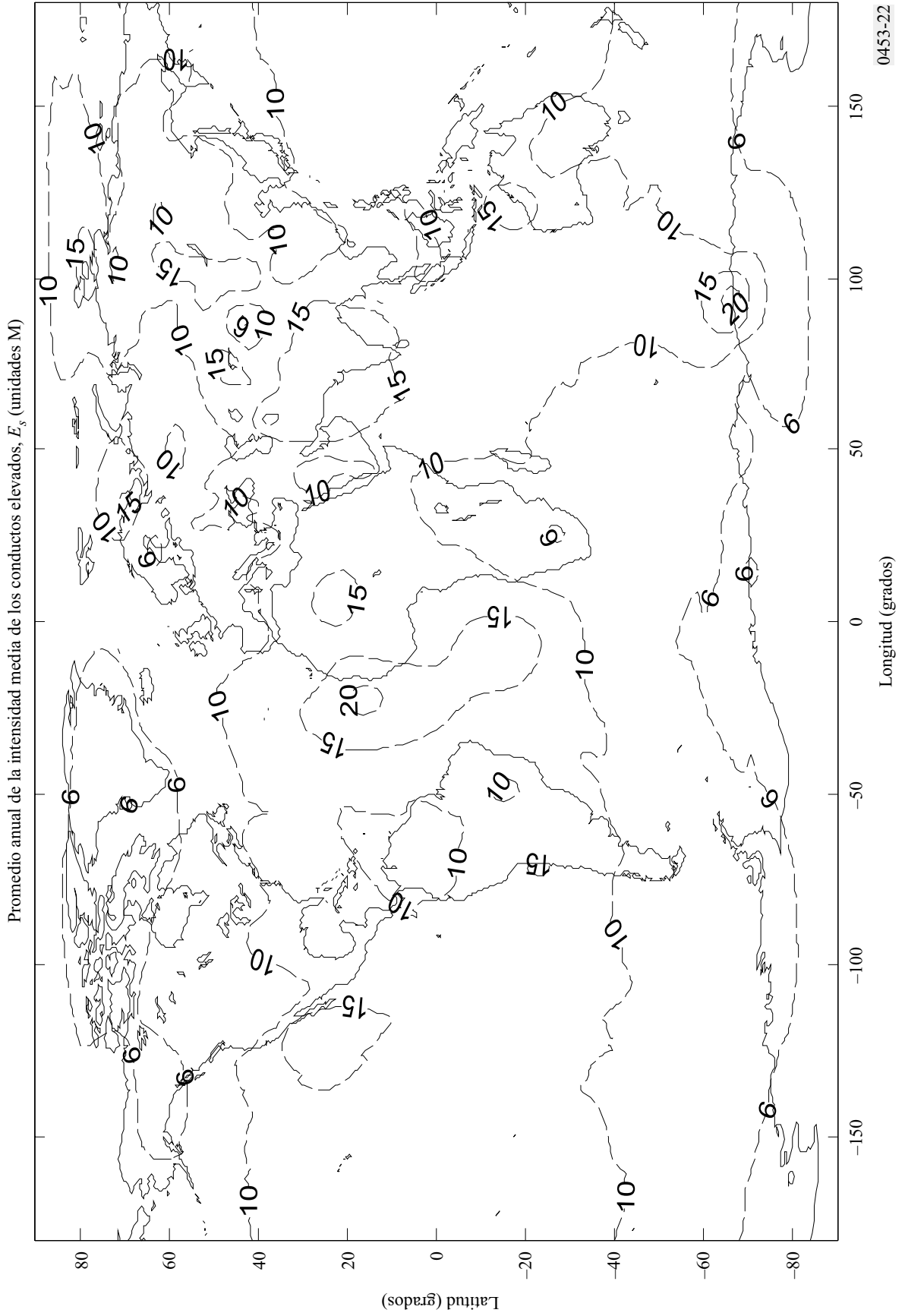
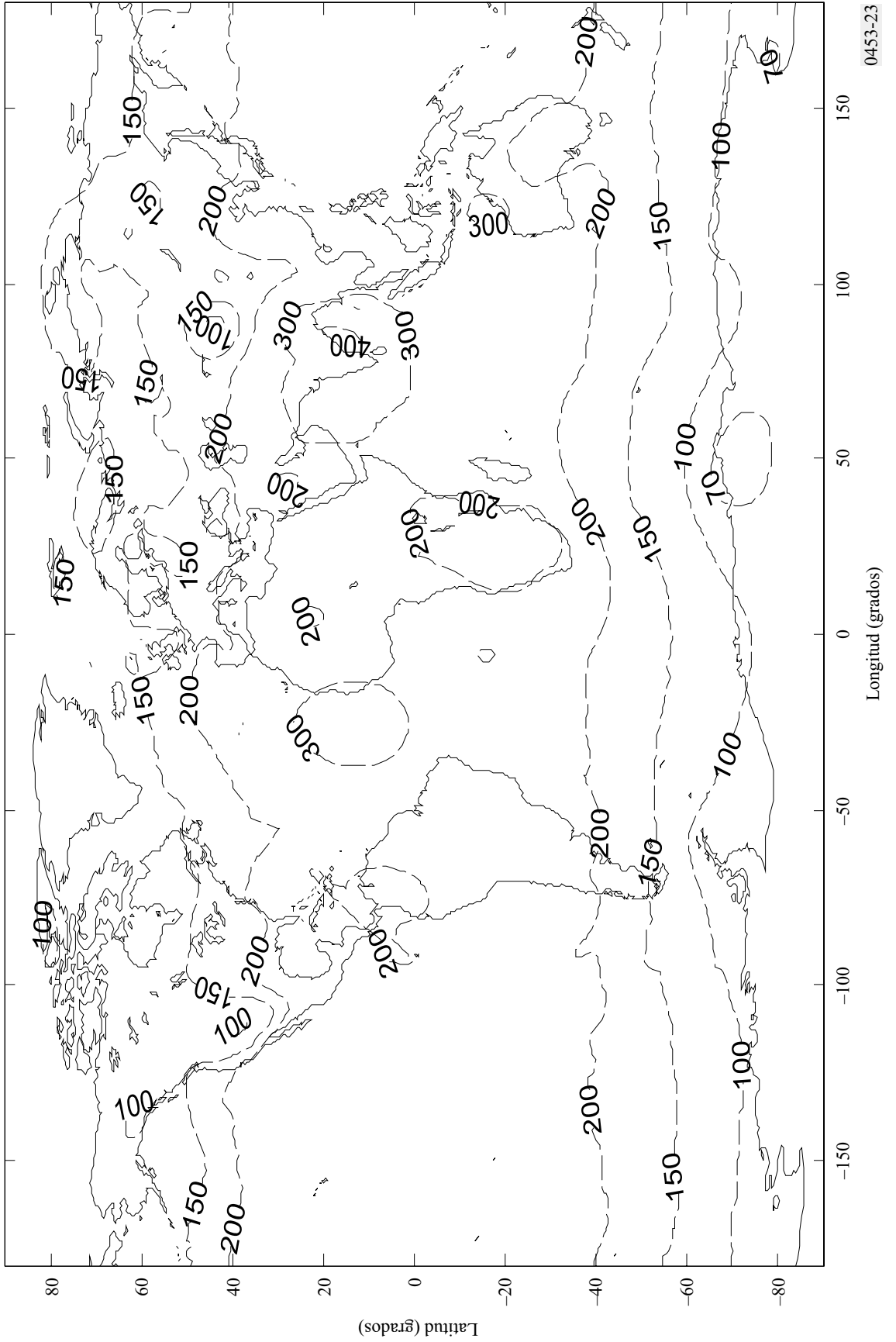




FIGURA 23

Nombre del fichero: E\_THICKNESS.TXT

Promedio anual del espesor medio de los conductos elevados,  $E_t$  (m)



0453-23

FIGURA 24  
Nombre del fichero: E\_BASE.TXT

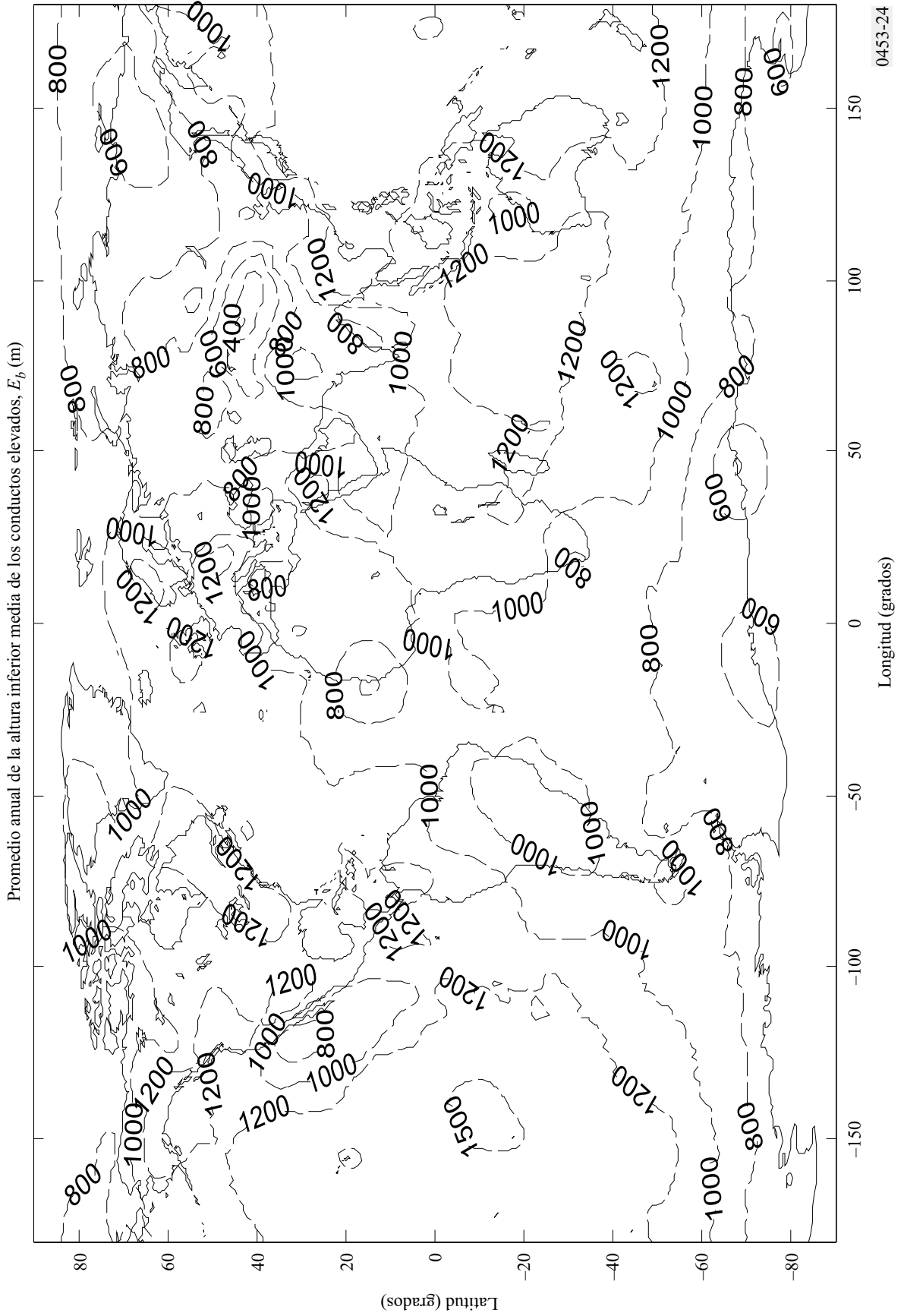


FIGURA 25  
Nombre del fichero: E\_MAX\_M.TXT

