

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1239*

CARACTERÍSTICAS IONOSFÉRICAS DE REFERENCIA DEL UIT-R**

(Cuestiones UIT-R 212/3 y UIT-R 223/3)

(1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

a) que para el diseño de circuitos radioeléctricos en ondas decamétricas, la planificación de los servicios y la selección de las bandas de frecuencias son necesarios métodos de predicción y datos ionosféricos de referencia a largo plazo,

recomienda

1 que para predecir las características ionosféricas se haga uso de las fórmulas contenidas en el Anexo 1.

ANEXO 1

Características ionosféricas**1 Introducción**

Se proporcionan las expresiones para calcular el valor mediano mensual de foF2, M(3000)F2, foE, foF1, h'F y h'F,F2 y los valores mediano mensual, decilo superior y decilo inferior de foEs y fbEs. También se incluyen representaciones de los porcentajes de aparición de la capa F difusa. Mediante estas fórmulas se obtienen valores para cualquier localización, mes y hora del día a distintas épocas solares. En el caso de foE y foF1, se facilitan fórmulas empíricas en términos del ángulo cenital del Sol. Para otras características ionosféricas se aplica una técnica de confección de mapas numéricos basada en las funciones de Fourier ortogonales.

2 Funciones de correspondencia

La forma general de la función numérica $\Omega(\lambda, \theta, T)$ es la serie de tiempo de Fourier:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = a_0(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H [a_j(\lambda, \theta) \cos jT + b_j(\lambda, \theta) \sen jT] \quad (1)$$

donde:

Ω : característica ionosférica a describir

λ : latitud geográfica ($-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$)

θ : longitud geográfica Este ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)
(θ (grados) al Este del meridiano de Greenwich)

T : tiempo universal (UTC) en grados de ángulo ($-180^\circ \leq T \leq 180^\circ$)

H : número máximo de armónicos utilizado para representar la variación diurna.

* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2000 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

** Los programas de computador asociados con los procedimientos de predicción y los datos descritos en la presente Recomendación están disponibles en las páginas del sitio web del UIT-R relativas a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones.

Los coeficientes de Fourier $a_j(\lambda, \theta)$ y $b_j(\lambda, \theta)$ varían en función de las coordenadas geográficas y están representados por series de la forma:

$$a_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta), \quad j = 0, 1, 2, \dots, H \tag{2a}$$

$$b_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta), \quad j = 1, 2, \dots, H \tag{2b}$$

La elección de las funciones $G_k(\lambda, \theta)$ se determina especificando los números enteros k ($k_0, k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m; k_m = K$), siendo i el orden en longitud. Por consiguiente, un mapa numérico puede representarse más explícitamente como sigue:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = \sum_{k=0}^K U_{0,k} G_k(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H \left[\cos j T \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta) + \sin j T \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta) \right] \tag{3}$$

En las ecuaciones (2a), (2b) y (3), $U_{2j,k}$ y $U_{2j-1,k}$ pueden expresarse en la forma $U_{s,k}$ donde s corresponde a $2j$ o a $2j - 1$.

En la técnica de establecimiento de mapas numéricos, se ha utilizado la inclinación magnética modificada:

$$X = \text{arc tg} \left(\frac{I}{\sqrt{\cos \lambda}} \right) \tag{4}$$

donde I es la inclinación magnética y λ es la latitud geográfica. Como X es función de la latitud y de la longitud geográficas, no se modifica la expresión de $\Omega(\lambda, \theta, T)$ de la ecuación (3). El Cuadro 1 muestra las funciones geográficas $G_k(\lambda, \theta)$.

CUADRO 1

Funciones geográficas $G_k(\lambda, \theta)$

(X es función de λ y de θ , m es el orden máximo en longitud)

$$q_0 = k_0; \quad q_i (i = 1, m) = \frac{k_i - k_{i-1} - 2}{2}$$

k	Variación principal en latitud	k	Primer orden en longitud	k	Segundo orden en longitud	...	k	m orden en longitud
0	1	$k_0 + 1$	$\cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 1$	$\cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 1$	$\cos^m \lambda \cos m \theta$
1	$\text{sen } X$	$k_0 + 2$	$\cos \lambda \text{sen } \theta$	$k_1 + 2$	$\cos^2 \lambda \text{sen } 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 2$	$\cos^m \lambda \text{sen } m \theta$
2	$\text{sen}^2 X$	$k_0 + 3$	$\text{sen } X \cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 3$	$\text{sen } X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 3$	$\text{sen } X \cos^m \lambda \cos m \theta$
.		$k_0 + 4$	$\text{sen } X \cos \lambda \text{sen } \theta$	$k_1 + 4$	$\text{sen } X \cos^2 \lambda \text{sen } 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 4$	$\text{sen } X \cos^m \lambda \text{sen } m \theta$
.		.		.			.	
.		.		.			.	
k_0	$\text{sen}^{q_0} X$	$k_1 - 1$	$\text{sen}^{q_1} X \cos \lambda \cos \theta$	$k_2 - 1$	$\text{sen}^{q_2} X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_m - 1$	$\text{sen}^{q_m} X \cos^m \lambda \cos m \theta$
		k_1	$\text{sen}^{q_1} X \cos \lambda \text{sen } \theta$	k_2	$\text{sen}^{q_2} X \cos^2 \lambda \text{sen } 2 \theta$	...	k_m	$\text{sen}^{q_m} X \cos^m \lambda \text{sen } m \theta$

Para determinar la inclinación magnética modificada y la girofrecuencia, necesarias para evaluar los mapas numéricos, se ha utilizado un modelo de campo magnético de la Tierra de 1960, basado en un análisis armónico esférico de sexto orden. Debe considerarse dicha época con preferencia a cualquier otra de interés, porque es la que se emplea para generar los valores de los coeficientes numéricos.

La inducción magnética F_x , F_y y F_z (gauss) a lo largo del Norte geográfico, el Este y direcciones verticalmente descendentes viene dada respectivamente por:

$$F_x = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n x_n^m \left[g_n^m \cos m \theta + h_n^m \operatorname{sen} m \theta \right] R^{n+2} \quad (5a)$$

$$F_y = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n y_n^m \left[g_n^m \operatorname{sen} m \theta - h_n^m \cos m \theta \right] R^{n+2} \quad (5b)$$

$$F_z = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n z_n^m \left[g_n^m \cos m \theta + h_n^m \operatorname{sen} m \theta \right] R^{n+2} \quad (5c)$$

donde:

$$x_n^m = \frac{d}{d\varphi} (P_{n,m}(\cos \varphi)) \quad (6a)$$

$$y_n^m = m \cdot \frac{P_{n,m}(\cos \varphi)}{\operatorname{sen} \varphi} \quad (6b)$$

$$z_n^m = - (n + 1) P_{n,m}(\cos \varphi) \quad (6c)$$

con:

φ : colatitud Norte ($= 90^\circ - \lambda$), donde λ es la latitud geográfica (grados) (positivos en el hemisferio Norte, $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$)

$P_{n,m}(\cos \varphi)$: función de Legendre asociada, definida como:

$$P_{n,m}(\cos \varphi) = \operatorname{sen}^m \varphi \left[\cos^{n-m} \varphi - \frac{(n-m)(n-m-1)}{2(2n-1)} \cos^{n-m-2} \varphi + \frac{(n-m)(n-m-1)(n-m-2)(n-m-3)}{(2)(4)(2n-1)(2n-3)} \cos^{n-m-4} \varphi + \dots \right] \quad (7)$$

$g^{m,n}$ y $h^{m,n}$: coeficientes numéricos para el modelo de campo (gauss)

R : factor de escala dependiente de la altura, cuya fórmula es:

$$R = \frac{6371,2}{6371,2 + h_r} \quad (8)$$

donde:

h_r : altura a la que se evalúa el campo (que se supone de 300 km).

El campo magnético total, F , será:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (9)$$

La inclinación magnética, I y la girofrecuencia, f_H (MHz) se determinan a partir de:

$$I = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (10)$$

y:

$$f_H = 2,8 F \quad (11)$$

3 Predicción de foF2 y M(3000)F2

Los mapas numéricos de la capa F2 se basan en sondeos de incidencia vertical de la ionosfera realizados por un gran número de estaciones terrenas de todo el mundo. Los juegos de coeficientes numéricos que definen las variaciones diurnas y geográficas de la mediana mensual de foF2 y M(3000)F2 se basan en una relación lineal con la actividad solar. Los coeficientes son los valores de $U_{s,k}$ (véanse las ecuaciones (2) y (3)) que definen la función $\Omega(\lambda, \theta, T)$, del mapa numérico de la característica indicada por el mes y el nivel de actividad solar considerados. Se dispone de coeficientes para cada mes del año y para dos niveles de actividad solar, $R_{12} = 0$ y $R_{12} = 100$. R_{12} es la media móvil para doce meses del número mensual de manchas solares y se utiliza como índice del nivel de actividad solar.

La mayoría de las veces conviene suponer una relación lineal de R_{12} con foF2 y M(3000)F2. Sin embargo, la relación entre foF2 y R_{12} deja de ser lineal para un nivel de actividad solar función de la ubicación geográfica, la hora del día y la estación. La mayor desviación con respecto a la relación lineal se presenta con valores de R_{12} superiores a 150 aproximadamente. Si R_{12} es mayor de 150, se reduce el error suponiendo que ese valor más elevado es en realidad 150. La relación entre M(3000)F2 y R_{12} deberá ser lineal para la gama de valores que va hasta $R_{12} = 150$. Para valores mayores de R_{12} , se tomará el valor de M(3000)F2 obtenido para $R_{12} = 150$.

4 Predicción de foE

El método para predecir la mediana mensual de foE se basa en todos los datos de 55 estaciones ionosféricas publicados en los años 1944-1973.

foE (MHz) se expresa mediante:

$$(\text{foE})^4 = A B C D \quad (12)$$

donde:

A: factor de actividad solar que viene dado por:

$$A = 1 + 0,0094 (\Phi - 66) \quad (13)$$

Φ : mediana mensual del flujo radioeléctrico solar observado en 10,7 cm, expresado en unidades de $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. Con fines de predicción resulta adecuado aproximar Φ por una estimación de Φ_{12} , valor suavizado (12 meses) de Φ (véase la Recomendación UIT-R P.371)

B: factor de variación estacional que viene dado por:

$$B = \cos^m N \quad (14)$$

donde:

$$N = \lambda - \delta = 80^\circ$$

λ : latitud geográfica, que se considera positiva en el hemisferio Norte

δ : declinación solar que se considera positiva para declinaciones septentrionales.

El exponente m es una función de la latitud geográfica λ :

$$m = -1,93 + 1,92 \cos \lambda \quad \text{para } |\lambda| < 32^\circ \quad (15a)$$

o:

$$m = 0,11 - 0,49 \cos \lambda \quad \text{para } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (15b)$$

C: factor principal de latitud, que viene dado por:

$$C = X + Y \cos \lambda \quad (16a)$$

donde:

$$X = 23, Y = 116 \quad \text{para } |\lambda| < 32^\circ \quad (16b)$$

o:

$$X = 92, Y = 35 \quad \text{para } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (16c)$$

D : factor para tener en cuenta la hora del día:

Caso 1: $\chi \leq 73^\circ$

$$D = \cos^p \chi \quad (17a)$$

donde χ es el ángulo cenital solar (grados). Para $|\lambda| \leq 12^\circ$, $p = 1,31$; para $|\lambda| > 12^\circ$, $p = 1,20$.

Caso 2: $73^\circ < \chi < 90^\circ$

$$D = \cos^p (\chi - \delta\chi) \quad (17b)$$

donde:

$$\delta\chi = 6,27 \times 10^{-13} (\chi - 50)^8 \quad \text{grados} \quad (17c)$$

el valor p es el mismo que en el Caso 1.

Caso 3: $\chi \geq 90^\circ$

El valor de D durante la noche, para $\chi \geq 90^\circ$, es el mayor de los dos siguientes:

$$D = (0,072)^p \exp(-1,4 h) \quad (17d)$$

o:

$$D = (0,072)^p \exp(25,2 - 0,28 \chi) \quad (17e)$$

siendo h el número de horas después del ocaso ($\chi = 90^\circ$). En condiciones de invierno polar, cuando el Sol no sale, se debe utilizar la ecuación (17e). p tiene el mismo valor que en el primer caso.

El valor mínimo de foE, viene dado por:

$$(\text{foE})_{\text{mínima}}^4 = 0,004 (1 + 0,021 \Phi)^2 \quad (18)$$

donde Φ puede aproximarse por una estimación de Φ_{12} .

Por la noche, si el valor de foE calculado por las ecuaciones (12) a (17e) es inferior al calculado por la ecuación (18) debe tomarse este último valor.

Las pruebas destinadas a comprobar la precisión del método descrito han permitido determinar una desviación típica media de 0,11 MHz para una base de datos correspondiente a más de 80 000 comparaciones horarias para las 55 estaciones consideradas.

5 Predicción de foF1

Las expresiones para calcular el valor mediano mensual de foF1 se basan en datos recogidos de 1954 a 1966 en 39 estaciones ionosféricas situadas en ambos hemisferios.

foF1 (MHz) se expresa mediante:

$$\text{foF1} = f_s \cos^n \chi \quad (19)$$

donde:

$$\begin{aligned} f_s &= f_{s_0} + 0,01 (f_{s_{100}} - f_{s_0}) R_{12} \\ f_{s_0} &= 4,35 + 0,0058 \lambda - 0,000120 \lambda^2 \\ f_{s_{100}} &= 5,35 + 0,0110 \lambda - 0,000230 \lambda^2 \\ n &= 0,093 + 0,00461 \lambda - 0,0000540 \lambda^2 + 0,00031 R_{12} \end{aligned}$$

siendo λ la latitud geomagnética (grados) que es positiva en ambos hemisferios, y que viene dada por:

$$\lambda = \left| \arcsen [\text{sen } g_0 \cdot \text{sen } g + \cos g_0 \cdot \cos g \cdot \cos (\theta_0 - \theta)] \right|$$

donde:

g : latitud geográfica de la posición de interés

g_0 : latitud geográfica del polo Norte geomagnético ($78,3^\circ$ N)

θ : longitud geográfica de la posición de interés

θ_0 : longitud geográfica del polo Norte geomagnético ($69,0^\circ$ W).

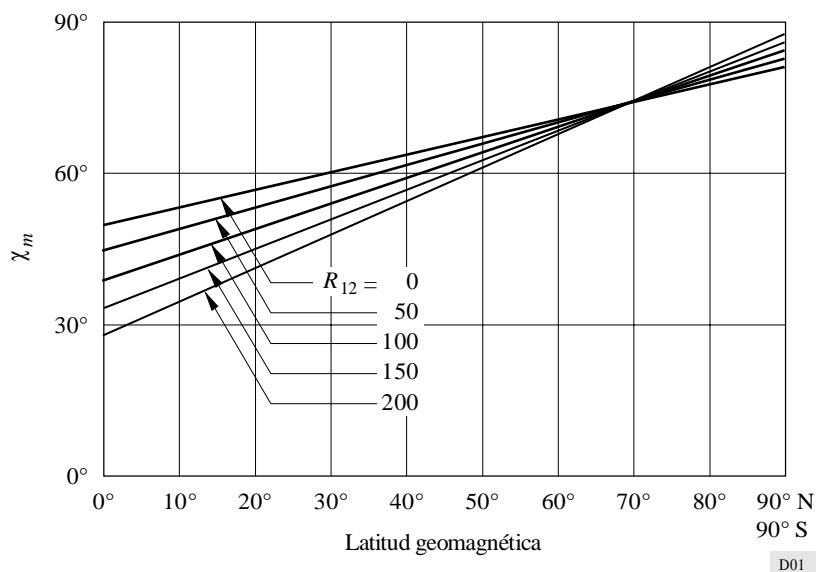
El ángulo cenital máximo del Sol en que está presente la capa F1 viene dado por las siguientes expresiones (véanse también las Figs. 1 y 2):

$$\chi_m = \chi_0 + 0,01 (\chi_{100} - \chi_0) R_{12} \quad \text{grados} \quad (20)$$

donde:

$$\begin{aligned} \chi_0 &= 50,0 + 0,348 \lambda \\ \chi_{100} &= 38,7 + 0,509 \lambda \end{aligned}$$

FIGURA 1
Variación de χ_m en función de la latitud geomagnética y de R_{12}



6 Predicción foEs y fbEs

Se ha elaborado un juego de coeficientes numéricos que definen las variaciones diurnas, geográficas y mensuales de los valores medianos y los decilos superior e inferior de foEs para un año de mínima actividad solar y un año de máxima actividad solar, así como un juego de coeficientes numéricos que dan las variaciones de las medianas y los decilos inferior y superior de fbEs (frecuencia de apantallamiento de la capa E esporádica) para un año de mínima actividad solar.

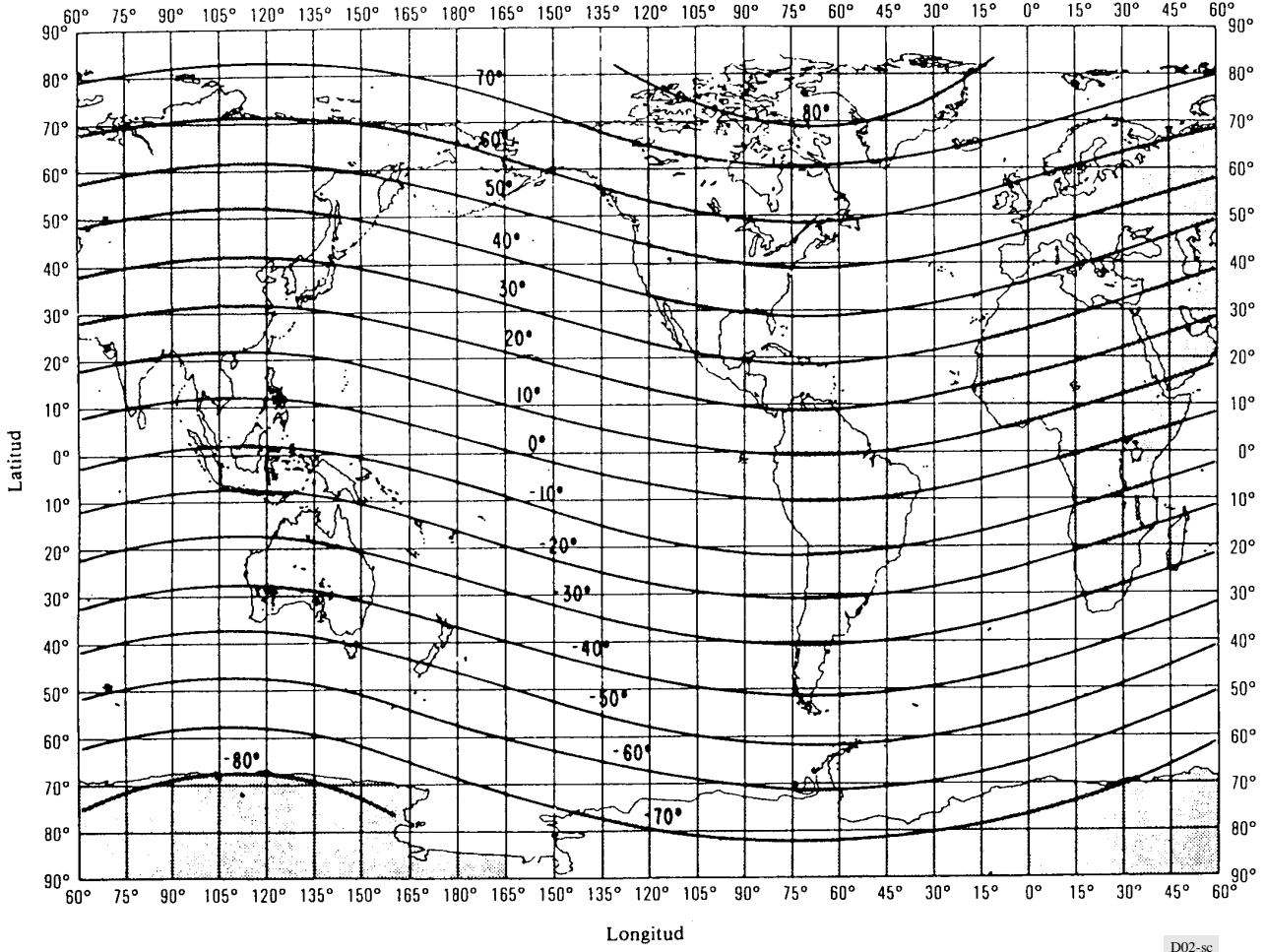
7 Predicción de h'F y h'F,F2

Para años de máxima y mínima actividad solar se han confeccionado mapas numéricos mensuales de la mediana mensual h'F, que es la mínima altura virtual observada de reflexión de las señales de incidencia vertical en la capa F (normalmente en la capa F2 por la noche y en la capa F1 durante el día). Se han elaborado igualmente para años de máxima y mínima actividad solar mapas numéricos de h'F,F2, que es la mínima altura virtual observada de reflexión de las señales de incidencia vertical en la capa F, durante la noche y durante el día la capa F2.

8 Predicción del porcentaje de aparición de la capa F difusa

El porcentaje de aparición de la capa F difusa se ha determinado a partir de datos ionosféricos mensuales obtenidos por la red mundial de estaciones de sondeos ionosféricos con incidencia vertical, para un año de elevada actividad solar y otro año de baja actividad solar; los valores se han representado numéricamente mediante una técnica cartográfica.

FIGURA 2
 Latitudes geomagnéticas



D02-sc

9 Programas de computador y datos de referencia disponibles

Los procedimientos descritos en este Anexo se realizan con los programas de computador WOMAP y HRMNTH. Para ubicaciones situadas en una determinada zona geográfica el programa WOMAP muestra los valores de la característica ionosférica seleccionada para un Tiempo Universal, mes y época solar concretos. El programa complementario HRMNTH muestra las características ionosféricas elegidas para una ubicación y años determinados, en función del Tiempo Universal, y para cada mes y época solar asociada.