

Unión Internacional de Telecomunicaciones

**UIT-R**

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Recomendación UIT-R P.840-7**  
(12/2017)

**Atenuación debida a las nubes y a la niebla**

**Serie P**  
**Propagación de las ondas radioeléctricas**



Unión  
Internacional de  
Telecomunicaciones

## 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
<b>BO</b>	Distribución por satélite
<b>BR</b>	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
<b>BS</b>	Servicio de radiodifusión (sonora)
<b>BT</b>	Servicio de radiodifusión (televisión)
<b>F</b>	Servicio fijo
<b>M</b>	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
<b>P</b>	<b>Propagación de las ondas radioeléctricas</b>
<b>RA</b>	Radioastronomía
<b>RS</b>	Sistemas de detección a distancia
<b>S</b>	Servicio fijo por satélite
<b>SA</b>	Aplicaciones espaciales y meteorología
<b>SF</b>	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
<b>SM</b>	Gestión del espectro
<b>SNG</b>	Periodismo electrónico por satélite
<b>TF</b>	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
<b>V</b>	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.840-7

**Atenuación debida a las nubes y a la niebla**

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2009-2012-2013-2017)

**Cometido**

En esta Recomendación se facilitan métodos para predecir la atenuación debida a las nubes y a la niebla en los trayectos Tierra-espacio.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a)* que es necesario dar pautas a los ingenieros para el diseño de los sistemas de telecomunicación Tierra-espacio en frecuencias superiores a 10 GHz;
- b)* que la atenuación debida a las nubes puede ser un factor importante, especialmente para los sistemas de microondas que funcionan en frecuencias muy superiores a 10 GHz o para los sistemas de baja disponibilidad;
- c)* que, para el cálculo de las series temporales de la atenuación total y los métodos de predicción espaciotemporal, se requiere una expresión analítica para las estadísticas de contenido total de la columna de agua líquida de nube;
- d)* que puede que no se disponga de los datos locales medidos del contenido total de la columna de agua líquida de nube,

*recomienda*

- 1** que, si no se dispone de los datos locales medidos del contenido total de la columna de agua líquida de nube, debe utilizarse el método descrito en el § 3.1 del Anexo 1 para la predicción de la atenuación debida a las nubes y la niebla;
- 2** que, si se dispone de los datos locales medidos del contenido total de la columna de agua líquida de nube, debe utilizarse el método descrito en el § 3.2 del Anexo 1 para el cálculo de la atenuación debida a las nubes;
- 3** que se utilice la información recogida en el § 4 del Anexo 1 para los cálculos globales de los efectos de propagación que se requieren, entre otros, para los modelos de canal espaciotemporal, que a su vez requieren una expresión analítica para las estadísticas de contenido total de la columna de agua líquida de nube.

## Anexo 1

### 1 Introducción

Para las nubes y la niebla compuestas totalmente de gotas minúsculas, generalmente inferiores a 0,01 cm, la aproximación de Rayleigh es válida para frecuencias de hasta 200 GHz, y la atenuación específica en el interior de una nube o de la niebla puede expresarse como:

$$\gamma_c(f, T) = K_l(f, T)M \quad \text{dB/km} \quad (1)$$

siendo:

- $\gamma_c$ : atenuación específica (dB/km) en la nube
- $K_l$ : coeficiente de la atenuación específica del agua líquida de nube ((dB/km)/(g/m<sup>3</sup>))
- $M$ : densidad de agua líquida en la nube o la niebla (g/m<sup>3</sup>)
- $f$ : frecuencia (GHz)
- $T$ : temperatura del agua líquida de la nube (K)

En frecuencias del orden de 100 GHz y superiores, la atenuación debida a la niebla puede ser significativa. La densidad de agua líquida en la niebla es típicamente de unos 0,05 g/m<sup>3</sup> en la niebla moderada (visibilidad del orden de 300 m) y de 0,5 g/m<sup>3</sup> en niebla espesa (visibilidad del orden de 50 m).

### 2 Coeficiente de atenuación específica del agua líquida de la nube

Para calcular el valor de  $K_l$  se puede utilizar un modelo matemático válido hasta frecuencias de 200 GHz basado en la dispersión de Rayleigh, que utiliza un modelo Debye doble para la permitividad dieléctrica  $\epsilon(f)$  del agua. Por tanto:

$$K_l(f, T) = \frac{0,819f}{\epsilon''(1+\eta^2)} \quad \text{(dB/km)/(g/m}^3\text{)} \quad (2)$$

donde  $f$  es la frecuencia (GHz), y:

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (3)$$

La permitividad dieléctrica compleja del agua viene dada por:

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (4)$$

$$\epsilon'(f) = \left[ \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{1 + (f/f_p)^2} \right] + \left[ \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{1 + (f/f_s)^2} \right] + \epsilon_2 \quad (5)$$

donde:

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3 (\theta - 1) \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 = 0,0671 \varepsilon_0 \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = 3,52 \quad (8)$$

$$\theta = 300 / T \quad (9)$$

y  $T$  es la temperatura del agua líquida (K).

Las frecuencias de relajación principal  $f_p$  y secundaria  $f_s$  son:

$$f_p = 20,20 - 146 (\theta - 1) + 316 (\theta - 1)^2 \quad (\text{GHz}) \quad (10)$$

$$f_s = 39,8f_p \quad (\text{GHz}) \quad (11)$$

### 3 Atenuación debida a las nubes a lo largo de trayectos oblicuos

Si no se dispone de los datos medidos a nivel local del contenido total de la columna de agua líquida de la nube,  $L$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$  o equivalencia en mm), debe utilizarse el método descrito en el § 3.1 para predecir la atenuación debida a las nubes a lo largo de trayectos oblicuos. Este método de predicción se basa en datos ERA-40 donde se utiliza el contenido total de la columna de agua líquida reducida a una temperatura fija de 273,15 K,  $L_{red}$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$  o, de forma equivalente, mm).

Si se dispone de los datos locales medidos del contenido total de la columna de agua líquida de nube,  $L$ , por otras fuentes, por ejemplo, de mediciones radiométricas, los productos de la observación de la Tierra o los productos numéricos meteorológicos, debe utilizarse el método del § 3.2 para calcular la atenuación debida a las nubes a lo largo de trayectos oblicuos.

#### 3.1 Distribución de la atenuación debida a las nubes a lo largo de trayectos oblicuos sobre la base de mapas digitales mundiales

La atenuación debida a las nubes a lo largo de trayectos oblicuos,  $A$ , para una probabilidad determinada,  $p$ , es:

$$A = \frac{L_{red} K_l}{\sin \theta} \quad \text{dB} \quad \text{para } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ \quad (12)$$

donde  $L_{red}$  es el contenido total de la columna de agua líquida de nube reducida a una temperatura de 273,15 K,  $L_{red}$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$  o el equivalente en mm) con la probabilidad  $p$ ,  $\varphi$  es el ángulo de elevación y  $K_l$  se calcula utilizando las ecuaciones (2) a (11) para una temperatura del agua de 273,15 K.

Los valores anuales del contenido total de la columna de agua líquida de nube reducida,  $L_{red}$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), que exceden los niveles de probabilidad 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 por ciento de un año promedio forman parte integrante de esta Recomendación y están disponibles en forma de mapas digitales.

Los valores mensuales del contenido total de la columna de agua líquida de nube reducida,  $L_{red}$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), que exceden los niveles de probabilidad durante el 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 y 99 por ciento de un mes promedio forman parte integrante de esta Recomendación y están disponibles en forma de mapas digitales.

Estos mapas digitales están disponibles en el archivo de Suplemento R-REC-P.840-7-Maps.zip.

Los datos corresponden a  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$  de longitud y a  $+90^\circ$  hasta  $-90^\circ$  de latitud, con una resolución de  $1,125^\circ$  tanto en latitud como en longitud.

Puede deducirse el contenido total de la columna de agua líquida de nube reducida en cualquier emplazamiento de la superficie terrestre mediante el siguiente método de interpolación:

- determinar 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 estadísticas anuales, y del conjunto: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 y 99% para las estadísticas mensuales;
- para las dos probabilidades  $p_{encima}$  y  $p_{debajo}$ , determinar el contenido de la columna total de agua líquida reducida de nube,  $L_{red1}$ ,  $L_{red2}$ ,  $L_{red3}$  y  $L_{red4}$  en los cuatro puntos más cercanos de la cuadrícula;
- determinar el contenido total de la columna de agua líquida reducida de nube  $L_{redencima}$  y  $L_{reddebajo}$  con las probabilidades  $p_{encima}$  y  $p_{debajo}$ , mediante una interpolación bilineal de los cuatro valores del contenido total de la columna de agua líquida reducida de nube  $L_{red1}$ ,  $L_{red2}$ ,  $L_{red3}$  y  $L_{red4}$  en los cuatro puntos de la cuadrícula, según lo descrito en la Recomendación UIT-R P.1144;
- determinar el contenido total de la columna de agua líquida reducida de nube,  $L_{red}$ , con la probabilidad deseada,  $p$ , interpolando  $L_{redencima}$  y  $L_{reddebajo}$  contra  $p_{encima}$  y  $p_{debajo}$  para  $p$  en una escala lineal  $L_{red}$  contra  $\log p$ .

### 3.2 Atenuación debida a las nubes a lo largo de trayectos oblicuos sobre la base de datos locales

La atenuación debida a las nubes a lo largo de trayectos oblicuos,  $A$ , es:

$$A = \frac{LK_1^*(f, 273,15)}{\text{sen } \varphi} \quad (\text{dB}) \quad \text{para } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ \quad (13)$$

donde  $L$  es el contenido total de la columna de agua líquida ( $\text{kg/m}^2$  o equivalente en mm),  $\varphi$  es el ángulo de elevación, y  $K_1^*$  se calcula como sigue:

$$K_1^*(f, T) = \frac{0,819 (1,9479,10^{-4} f^{2,308} + 2,9424 f^{0,7436} - 4,9451)}{\varepsilon'' (1 + \eta^2)} \quad (\text{dB/km})/(\text{g/m}^3) \quad (14)$$

donde  $\eta$  se obtiene en la ecuación (3),  $\varepsilon''$  se obtiene en la ecuación (4), y la temperatura del agua líquida  $T$  es 273,15 K.

### 4 Aproximación de $L_{red}$ mediante una distribución logarítmica normal

Puede obtenerse una aproximación de las estadísticas anuales del contenido total de la columna de agua líquida de nube reducida mediante una distribución logarítmica normal. Los parámetros de media de los mapas digitales,  $m$ , desviación standard,  $\sigma$ , y probabilidad contenido de la columna de agua líquida de la nube reducida distinta de cero,  $P_{clw}$  de la distribución logarítmica normal forman parte integrante de esta Recomendación.

Puede deducirse el contenido total de la columna de agua líquida de nube reducida en cualquier emplazamiento de la superficie terrestre mediante el siguiente método de interpolación:

- determinar los parámetros  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ,  $\sigma_4$ ,  $P_{CLW1}$ ,  $P_{CLW2}$ ,  $P_{CLW3}$  y  $P_{CLW4}$  en los cuatro puntos más próximos de la cuadrícula;

- b) determinar el contenido total de la columna de agua líquida de nube reducida  $L_{red1}$ ,  $L_{red2}$ ,  $L_{red3}$  y  $L_{red4}$  para la probabilidad deseada,  $p$ , en los cuatro puntos más próximos de la cuadrícula a partir de los parámetros  $m_1, m_2, m_3, m_4, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, P_{CLW1}, P_{CLW2}, P_{CLW3}$  y  $P_{CLW4}$  de la siguiente manera:

$$L_{red,i} = e^{m_i + \sigma_i Q^{-1}\left(\frac{P}{P_{CLWi}}\right)} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

donde:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (16)$$

- c) determinar el contenido total de la columna de agua líquida de nube reducida en el lugar deseado procediendo a una interpolación bilineal de los cuatro valores del contenido total de la columna de agua líquida de nube reducida  $L_{red1}$ ,  $L_{red2}$ ,  $L_{red3}$  y  $L_{red4}$  en los cuatro puntos de la cuadrícula, según se describe en la Recomendación UIT-R P.1144.
-