

RECOMENDACIÓN UIT-R P.452-10

Procedimiento de predicción para evaluar la interferencia en microondas entre estaciones situadas en la superficie de la tierra a frecuencias superiores a unos 0,7 GHz*

(Cuestión UIT-R 208/3)

(1970-1974-1978-1982-1986-1992-1994-1995-1997-1999-2001)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que debido a la congestión del espectro radioeléctrico, deben compartirse las bandas de frecuencias entre distintos servicios terrenales, entre sistemas del mismo servicio y entre sistemas de servicios terrenales y del servicio Tierra-espacio;
- b) que para que los sistemas compartan de forma satisfactoria las mismas bandas de frecuencias, es preciso establecer procedimientos de predicción de propagación de la interferencia que sean precisos y fiables así como aceptables para todas las partes implicadas;
- c) que es necesario efectuar predicciones sobre propagación de la interferencia para cumplir los objetivos de comportamiento en el «mes más desfavorable» y los objetivos de disponibilidad;
- d) que se necesitan métodos de predicción para aplicarlos a todos los tipos de trayecto y en todas las zonas del mundo,

recomienda

1 que, en frecuencias superiores a unos 0,7 GHz, se utilice el procedimiento que aparece en el Anexo 1 a la presente Recomendación para evaluar las pérdidas de propagación disponibles en los cálculos de interferencia en microondas entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra.

ANEXO 1

1 Introducción

La congestión del espectro radioeléctrico ha determinado la necesidad de compartir muchas bandas de frecuencias de microondas entre diferentes servicios radioeléctricos y entre las diferentes entidades de explotación de servicios radioeléctricos similares. Para garantizar la coexistencia satisfactoria de los sistemas terrenos y terreno-espaciales existentes, es importante estar en condiciones de predecir con una precisión razonable la interferencia potencial que pueda existir entre ellos, utilizando procedimientos y modelos de predicción aceptables a todas las partes implicadas, y de precisión y fiabilidad demostradas.

* En las páginas del sitio web relativas a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones pueden obtenerse dos programas informáticos del UIT-R (REC452 y SCAT) asociados con los procedimientos de predicción que se describen en esta Recomendación.

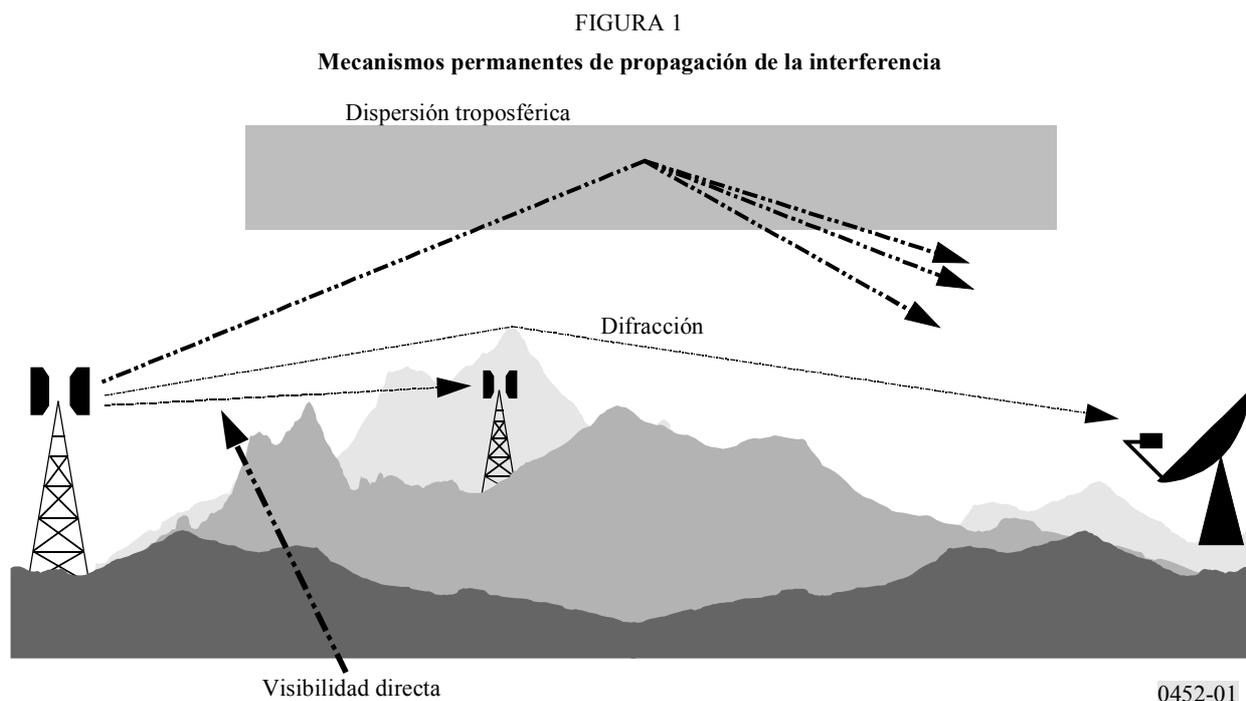
Pueden existir muchos tipos y combinaciones de trayectos de interferencia entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra y entre esas estaciones y las estaciones espaciales, siendo precisos métodos de predicción para cada situación. Este Anexo en particular aborda uno de los grupos de problemas de interferencia más importantes, a saber el de las situaciones en las que hay posibilidad de interferencia entre estaciones radioeléctricas de microondas ubicadas en la superficie de la Tierra.

El procedimiento de predicción que se detalla es adecuado para estaciones terrenales de enlace por microondas y para estaciones terrenas vía satélite que funcionan en la gama de frecuencias de unos 0,7 GHz a 30 GHz. El método incluye un amplio conjunto de modelos de propagación para asegurar que las predicciones abarcan todos los mecanismos de propagación significativos que puedan surgir. Se presentan métodos para analizar las características radiometeorológicas y topográficas del trayecto que permitan formular una predicción para cualquier tipo práctico de trayecto de interferencia que entre en el marco del procedimiento hasta una distancia límite de 10 000 km.

2 Mecanismos de propagación de la interferencia

La propagación de la interferencia en microondas puede presentarse mediante diversos mecanismos y el predominio de cualquiera de ellos depende de factores tales como el clima, el porcentaje de tiempo en cuestión, la distancia y la topografía del trayecto. En cualquier momento puede darse un único mecanismo o más de uno. A continuación se presentan los principales mecanismos de propagación de la interferencia.

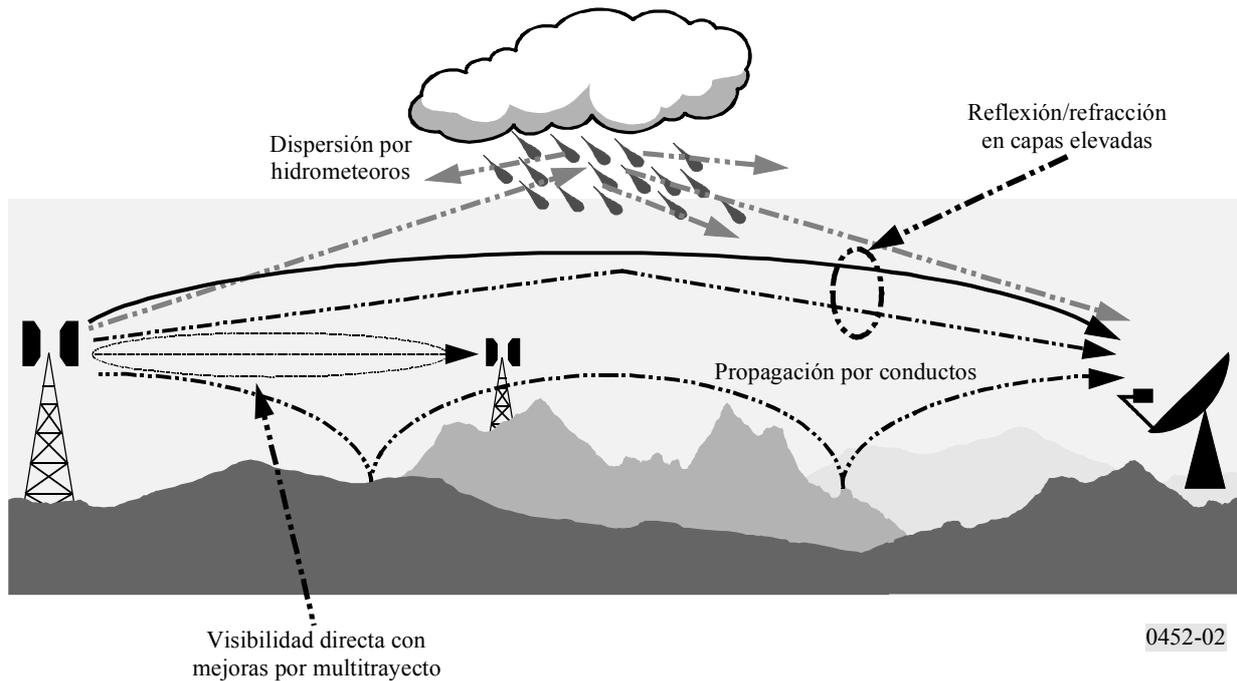
- *Visibilidad directa* (Fig. 1): El mecanismo más directo de propagación de la interferencia es aquel en que existe un trayecto de visibilidad mutua en condiciones atmosféricas de equilibrio. Sin embargo, puede surgir un problema adicional cuando la difracción del subtrayecto produce un ligero aumento del nivel de la señal. Además, en todos los trayectos, excepto en los más cortos (es decir, trayectos mayores de unos 5 km) los niveles de la señal pueden a menudo aumentar significativamente durante periodos cortos de tiempo debido a los efectos de propagación multitrayecto y de enfoque resultantes de la estratificación atmosférica (véase la Fig. 2).
- *Difracción* (Fig. 1): A partir de la situación de visibilidad directa y en condiciones normales, los efectos de difracción suelen ser dominantes cuando aparecen niveles significativos de la señal. Para los servicios en los que los problemas de anomalías de corta duración no son importantes, la exactitud del modelo de difracción determina a menudo la densidad de los sistemas de microondas que pueden implantarse. La capacidad de predicción de la difracción debe ser tal que permita incluir las situaciones de terreno liso, de obstáculos discretos y de terreno irregular (no estructurado).
- *Dispersión troposférica* (Fig. 1): Este mecanismo define el nivel de interferencia de fondo para trayectos más largos (por ejemplo, 100-150 km) en los que el campo de difracción se hace muy débil. No obstante, con excepción de algunos pocos casos especiales en los que intervienen estaciones terrenales sensibles o fuentes de interferencia de muy alta potencia (por ejemplo, sistemas de radar), la interferencia a través del mecanismo de dispersión troposférica tendrá un nivel demasiado reducido como para ser considerada significativa.
- *Propagación por conductos de superficie* (Fig. 2): Éste es el mecanismo de interferencia de corta duración más importante sobre el agua y en zonas de tierra costeras planas, y puede dar lugar a niveles de señal elevados en distancias largas (más de 500 km sobre el mar). Dichas señales pueden exceder el nivel equivalente de «espacio libre» en determinadas condiciones.



- *Reflexión y refracción en capas elevadas* (Fig. 2): El tratamiento de la reflexión y/o la refracción en capas de alturas de hasta algunos cientos de metros reviste gran importancia pues estos mecanismos pueden hacer que las señales superen las pérdidas de difracción del terreno muy netamente en situaciones favorables de geometría del trayecto. Una vez más, la repercusión puede ser significativa en distancias bastante largas (hasta 250-300 km).
- *Dispersión por hidrometeoros* (Fig. 2): La dispersión por hidrometeoros puede ser una fuente potencial de interferencia entre transmisores de enlaces terrenales y estaciones terrenas porque puede actuar prácticamente de forma omnidireccional y, por tanto, puede tener una repercusión más allá del trayecto de interferencia del círculo máximo. No obstante, los niveles de señal de interferencia son bastante reducidos y no suelen representar un problema significativo.

Un problema fundamental en la predicción de la interferencia (que además es común a todos los procedimientos de predicción troposférica) es la dificultad de establecer un conjunto coherente y unificado de métodos prácticos que abarquen una amplia gama de distancias y porcentajes de tiempo, es decir; para la atmósfera real en la que un mecanismo que predomina se mezcla gradualmente con otro a medida que cambian las condiciones meteorológicas y/o del trayecto. Especialmente en estas regiones de transición, puede producirse un nivel determinado de señal durante un porcentaje del tiempo total que se deba a la suma de los distintos mecanismos. En este procedimiento se ha mantenido deliberadamente el enfoque que establece la separación entre las predicciones de los niveles de interferencia para los distintos mecanismos de propagación, de modo que puedan combinarse en una predicción global para el trayecto.

FIGURA 2
Mecanismos de propagación anómala de la interferencia (corta duración)



3 Predicción de la interferencia en cielo despejado

3.1 Comentarios generales

El procedimiento utiliza cinco modelos de propagación para tratar los mecanismos de propagación en cielo despejado que se describen en el § 2. Estos modelos son los siguientes:

- *visibilidad directa* (que incluye las amplificaciones de la señal debidas a los efectos de propagación multitrayecto y de enfoque);
- *difracción* (que abarca los casos de tierra lisa, terreno irregular y subtrayecto);
- *dispersión troposférica*;
- *propagación anómala* (propagación por conductos y por reflexión/refracción en las capas);
- *variación altura-ganancia de los ecos parásitos* (cuando proceda).

Dependiendo del tipo de trayecto, que se determina mediante un análisis del perfil de éste, se aplican uno o más de estos modelos para la predicción de las pérdidas básicas de transmisión.

3.2 Formulación de una predicción

3.2.1 Resumen del procedimiento

Los pasos necesarios para realizar una predicción son los siguientes:

Paso 1: Datos de partida

Los datos básicos de partida necesarios para este procedimiento figuran en el Cuadro 1. Todo el resto de la información necesaria se deriva de estos datos básicos durante la ejecución del procedimiento.

CUADRO 1

Datos básicos de partida

Parámetro	Resolución preferida	Descripción
f	0,01	Frecuencia (GHz)
p	0,001	Porcentaje de tiempo requerido durante el cual no se rebasa la pérdida básica de transmisión
φ_t, φ_r	0,001	Latitud de la estación (grados)
ψ_t, ψ_r	0,001	Longitud de la estación (grados)
h_{tg}, h_{rg}	1	Altura del centro de la antena sobre el nivel del suelo (m)
h_{ts}, h_{rs}	1	Altura del centro de la antena sobre el nivel medio del mar (m)
G_t, G_r	0,1	Ganancia de la antena en la dirección del horizonte a lo largo del trayecto ortodrómico o del círculo máximo de interferencia (dBi)

NOTA 1 – Para distinguir entre las estaciones:

t : estación interferente

r : estación interferida.

Paso 2: Selección de una predicción de año medio o de mes más desfavorable

La elección de predicción anual o de «mes más desfavorable» viene dictada generalmente por los objetivos de calidad total (es decir, características y disponibilidad) del sistema radioeléctrico interferido en el extremo receptor del trayecto de interferencia. Como la interferencia es a menudo un problema bidireccional, puede ser necesario evaluar dos conjuntos de este tipo de objetivos de calidad, a fin de determinar el sentido de transmisión más desfavorable en el que deben basarse las pérdidas básicas de transmisión admisibles mínimas. En la mayoría de los casos, los objetivos de calidad se expresarán en términos de porcentaje de «cualquier mes» y por tanto, se necesitarán los datos del mes más desfavorable.

Los modelos de predicción de la propagación predicen la distribución anual de las pérdidas básicas de transmisión. Para las predicciones del año medio se utilizan directamente en el procedimiento de predicción los porcentajes de tiempo, p , para los que no se exceden valores particulares de pérdidas básicas de transmisión. Si se requieren predicciones del mes más desfavorable medio, debe calcularse el porcentaje de tiempo anual equivalente, p_w , del porcentaje de tiempo del mes más desfavorable, p_w , para la latitud del centro del trayecto, φ , utilizando:

$$p = 10^{\left(\frac{\log(p_w) + \log(G_L) - 0,186 \omega - 0,444}{0,816 + 0,078 \omega} \right)} \% \quad (1)$$

donde:

ω : fracción de trayecto sobre el agua (véase el Cuadro 3).

$$G_L = \begin{cases} \sqrt{1,1 + |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{para } |\varphi| \leq 45^\circ \\ \sqrt{1,1 - |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{para } |\varphi| > 45^\circ \end{cases} \quad (1a)$$

Si resulta necesario, se limitará el valor de p de forma que $12 p \geq p_w$.

Véase que la latitud φ (grados) se considera positiva en el hemisferio septentrional.

El resultado calculado representará entonces las pérdidas básicas de transmisión para el porcentaje de tiempo del mes más desfavorable requerido, p_w %.

Paso 3: Datos radiometeorológicos

El modelo de predicción utiliza tres parámetros radiometeorológicos para describir la variabilidad de las condiciones de propagación de fondo y anómala en los diferentes lugares del mundo.

- ΔN (unidades N/km), la proporción de variación del índice medio de refracción radioeléctrica a lo largo del primer kilómetro de la atmósfera, proporciona los datos en que basar el cálculo del radio efectivo de la Tierra apropiado para el análisis del perfil del trayecto y del obstáculo de difracción. Las Figs. 4 y 5 presentan, respectivamente, los mapas mundiales de valores de un año promedio ΔN y valores medios mensuales máximos para las predicciones del mes más desfavorable (véase que ΔN es positivo en este procedimiento).
- β_0 (%), el porcentaje de tiempo en el que pueden esperarse, en los primeros 100 m de una atmósfera baja, sobretasas de la variación de la refracción superiores a 100 unidades N/km en la atmósfera inferior, se utiliza para estimar la incidencia de la propagación anómala totalmente desarrollada en la latitud considerada. El valor de β_0 a utilizar es el adecuado para la latitud del centro del trayecto.
- N_0 (unidades N), refractividad de la superficie a nivel del mar, se utiliza únicamente en el modelo de dispersión troposférica como medida de la variabilidad con el emplazamiento del mecanismo de dispersión troposférica. La Fig. 6 muestra valores anuales de N_0 . Como el cálculo del trayecto de dispersión se basa en una geometría de trayecto determinada por los valores anuales o del mes más desfavorable de ΔN , ya no hay necesidad adicional de obtener los valores de N_0 correspondientes al mes más desfavorable. Los valores correctos de ΔN y N_0 vienen dados por los valores del centro del trayecto obtenidos a partir de los mapas adecuados.

La incidencia puntual de la propagación anómala, β_0 (%), en el centro del trayecto, se determina utilizando la expresión:

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi| + 1,67} \mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{para } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4,17 \mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{para } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (2)$$

donde:

φ : latitud del centro del trayecto (grados).

El parámetro μ_1 depende del grado en que el trayecto esté sobre la tierra (en el interior y/o costero) y sobre el agua, viniendo dado por:

$$\mu_1 = \left[10^{\frac{-d_{tm}}{16 - 6,6\tau}} + \left[10^{-(0,496 + 0,354\tau)} \right]^5 \right]^{0,2} \quad (3)$$

donde el valor de μ_1 debe limitarse a $\mu_1 \leq 1$,

con:

$$\tau = \left[1 - e^{-\left(4,12 \times 10^{-4} \times d_{lm}^{2,41}\right)} \right] \quad (3a)$$

donde:

d_{tm} : sección continua más larga sobre la tierra (interior + costera) del trayecto en el círculo máximo (km)

d_{lm} : sección continua más larga sobre la tierra (interior) del trayecto en el círculo máximo (km).

Las zonas radioclimáticas a utilizar para la obtención de d_{tm} y d_{lm} se definen en el Cuadro 2.

$$\mu_4 = \begin{cases} 10^{(-0,935 + 0,0176|\varphi|)\log \mu_1} & \text{para } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 10^{0,3 \log \mu_1} & \text{para } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (4)$$

CUADRO 2

Zonas radioclimáticas

Tipo de zona	Código	Definición
Tierra costera	A1	Zonas de tierra costeras y del litoral, es decir la tierra adyacente al mar hasta una altitud de 100 m con respecto al nivel medio del mar o del agua pero hasta una distancia de 50 km desde la zona marítima más próxima. Cuando no se dispone de datos precisos de 100 m, puede utilizarse un valor aproximado, por ejemplo, 300 pies
Tierra interior	A2	Tierra, a excepción de las zonas costeras y del litoral definidas en el punto anterior como «tierra costera»
Mar	B	Mares, océanos y otras grandes masas de agua (cuya cobertura equivalga a un círculo de al menos 100 km de diámetro)

Grandes masas de agua interiores

Una «gran» masa de aguas interiores, que se considera perteneciente a la Zona B, se define como aquella cuya superficie es al menos 7 800 km², pero excluyendo la superficie de ríos. Las islas situadas dentro de dichas masas de agua han de considerarse como si fueran agua en el cálculo de esta zona si tienen elevaciones inferiores a 100 m por encima del nivel medio del agua en más del 90% de su superficie. Las islas que no cumplan estos criterios deben considerarse como tierra a efectos del cálculo de la superficie de agua.

Grandes lagos interiores o zonas de tierras húmedas

Las grandes zonas interiores superiores a 7800 km² que contengan múltiples pequeños lagos o una red fluvial deben considerarse como Zona A1 «costera» por las administraciones cuando dicha zona comprenda más del 50% de agua y al mismo tiempo más del 90% de la tierra no alcanza los 100 m por encima del nivel medio del agua.

Las regiones climáticas pertenecientes a la Zona A1, las grandes masas de agua interiores y los grandes lagos y regiones húmedas interiores son difíciles de determinar de manera inequívoca. Por tanto, se invita a las administraciones a que inscriban en la Oficina de Radiocomunicaciones (BR) de la UIT estas regiones dentro de sus límites territoriales identificándolas como pertenecientes a una de estas categorías. En ausencia de la información registrada a este efecto, se considerará que todas las zonas terrestres pertenecen a la Zona climática A2.

Para lograr una máxima adaptación de los resultados entre administraciones, se recomienda vivamente que los cálculos según este procedimiento se basen en el mapa mundial digitalizado del UIT-R (IDWM) que está disponible en la BR de la UIT para entornos de ordenadores corporativos y personales.

Radio efectivo de la Tierra

El factor k_{50} del valor mediano del radio efectivo de la Tierra para el trayecto se determina utilizando la expresión:

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (5)$$

Suponiendo un radio real de la Tierra de 6371 km, el valor mediano del radio efectivo de la Tierra, a_e , puede determinarse de la siguiente manera:

$$a_e = 6371 \cdot k_{50} \quad \text{km} \quad (6)$$

Paso 4: Análisis del perfil del trayecto

Los valores de una serie de parámetros relacionados con el trayecto que son necesarios para el cálculo y que se indican en el Cuadro 3, deben obtenerse a través de un análisis inicial del perfil del trayecto basado en el valor de a_e que viene dado por la ecuación (6). En el Apéndice 2 figura información sobre la obtención, determinación y análisis del perfil del trayecto. Habiéndose analizado el perfil de este modo, el trayecto quedará también clasificado en una de las tres categorías geométricas indicadas en el Cuadro 4.

NOTA 1 – La determinación de valores de parámetros adicionales relacionados con el perfil, y que son necesarios específicamente para los cálculos de la difracción, se explica en la Recomendación UIT-R P.526.

Paso 5: Cálculo de predicciones de propagación

El Cuadro 4 indica, para cada tipo de trayecto, los modelos de propagación apropiados así como las condiciones en las que debe aplicarse cada uno de ellos, para obtener la predicción global correcta. Las ecuaciones necesarias para estas predicciones individuales figuran en los textos expuestos en el Cuadro 5. Una vez logrado esto para cada uno de los porcentajes de tiempo requeridos, la predicción queda concluida.

CUADRO 3

Parámetros resultantes del análisis del perfil de trayecto

Tipo de trayecto	Parámetro	Descripción
Transhorizonte	d	Distancia ortodrómica (esto es; siguiendo el círculo máximo) del trayecto (km)
Transhorizonte	d_{lt}, d_{lr}	Distancia desde las antenas de transmisión y de recepción a sus respectivos horizontes (km)
Transhorizonte	θ_t, θ_r	Ángulos de elevación de las antenas de transmisión y de recepción respecto del horizonte, respectivamente (mrad)
Transhorizonte	θ	Distancia angular del trayecto (mrad)
Todos	h_{ts}, h_{rs}	Altura del centro de la antena por encima del nivel medio del mar (m)
Transhorizonte	h_{te}, h_{re}	Alturas efectivas de las antenas sobre el terreno (m) (para definiciones véase el Apéndice 2)
Todos	$d_b^{(1)}$	Longitud agregada de las secciones del trayecto sobre el agua (km)
Todos	$\omega^{(1)}$	Fracción del trayecto total sobre el agua: $\omega = d_b / d \quad (7)$ siendo d la distancia ortodrómica (km) calculada utilizando la ecuación (34) Para trayectos realizados totalmente sobre tierra $\omega = 0$
Transhorizonte	$d_{ct}^{(1)}$	Distancia desde el primer terminal (fuente interferente) hasta la costa, a lo largo del trayecto ortodrómico de interferencia (km)
Transhorizonte	$d_{cr}^{(1)}$	Distancia correspondiente para la segunda estación (co-interferida) (km)

(1) Estos parámetros sólo se necesitan cuando el trayecto tiene una o más secciones sobre el agua.

Los valores exactos de d_{ct} y d_{cr} sólo tienen importancia si d_{ct} y $d_{cr} \leq 5$ km. Si, en cualquiera de los dos casos o en ambos, las distancias son eminentemente superiores a 5 km, sólo es necesario señalar la condición de >5 km. De hecho, sólo será necesaria la evaluación detallada de estos dos parámetros en algunos trayectos de interferencia.

CUADRO 4

Clasificaciones de los trayectos de interferencia y requisitos del modelo de propagación

Clasificación	Modelos necesarios
Visibilidad directa con la primera zona de Fresnel libre de obstáculos	Visibilidad directa (§ 4.2) Pérdidas de eco (§ 4.5 cuando proceda)
Visibilidad directa con difracción en subtrayecto, es decir; incursión del terreno en la 1ª zona de Fresnel	Visibilidad directa (§ 4.2) Difracción (§ 4.3) Pérdidas de eco (§ 4.3 cuando proceda)
Transhorizonte	Difracción (§ 4.3 para $d \leq 200$ km) Propagación por conductos/reflexión en las capas (§ 4.5 para $d > 20$ km) Dispersión troposférica (§ 4.4) Pérdidas de eco (§ 4.5 cuando proceda)

CUADRO 5

Métodos para obtener las predicciones generales

Tipo de trayecto	Actuación necesaria
Visibilidad directa	<p>La predicción se obtiene sumando las pérdidas de los modelos de visibilidad directa y de eco, es decir:</p> $L_b(p) = L_{b0}(p) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (8a)$ <p>siendo:</p> <p>$L_{b0}(p)$: pérdida de transmisión básica prevista no excedida durante el $p\%$ del tiempo del modelo de visibilidad directa</p> <p>A_{ht}, A_{hr}: pérdidas adicionales a considerar, debidas a los efectos de altura-ganancia manifestadas como ruidos eco local</p>
Visibilidad directa con difracción de subtrayecto	<p>La predicción se obtiene sumando las pérdidas de los modelos de visibilidad directa (subtrayecto) y de ecos, es decir:</p> $L_b(p) = L_{b0}(p) + L_{ds}(p) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (8b)$ <p>siendo:</p> <p>$L_{ds}(p)$: predicción para $p\%$ de tiempo que viene dada por el elemento de pérdidas de difracción del <i>subtrayecto</i> del modelo de difracción</p>
Transhorizonte	<p>La predicción general puede obtenerse aplicando el siguiente algoritmo auxiliar:</p> $L_b(p) = -5 \log (10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bd}} + 10^{-0,2L_{ba}}) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (8c)$ <p>donde $L_{bs}(p)$, $L_{bd}(p)$ y $L_{ba}(p)$ son las pérdidas individuales predichas para el $p\%$ de tiempo que dan respectivamente los modelos de difracción, de dispersión troposférica y de propagación por conductos y reflexión en las capas.</p> <p>NOTA 1 – Cuando no se haya propuesto un modelo para un trayecto (por no satisfacerse las condiciones del Cuadro 4) deben omitirse de la ecuación (8c) los términos correspondientes.</p>

4 Modelos de propagación en cielo despejado

4.1 Generalidades

Los procedimientos anteriores invocan uno o varios modelos de propagación diferentes para formular los componentes de la predicción general. Dichos modelos de propagación se presentan en este punto.

4.2 Propagación con visibilidad directa (incluidos los efectos a corto plazo)

La pérdida de transmisión básica $L_{b0}(p)$ no excedida durante el porcentaje de tiempo, $p\%$, que experimenta la propagación con visibilidad directa viene dada por:

$$L_{b0}(p) = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + E_s(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (9)$$

donde:

$E_s(p)$: corrección por los efectos de los trayectos múltiples y del enfoque:

$$E_s(p) = 2,6 (1 - e^{-d/10}) \log (p/50) \quad \text{dB} \quad (10)$$

A_g : absorción gaseosa total (dB):

$$A_g = [\gamma_o + \gamma_w(\rho)] d \quad \text{dB} \quad (11)$$

donde:

$\gamma_o, \gamma_w(\rho)$: atenuaciones específicas producidas por el aire seco y el vapor de agua, respectivamente, y se hallan mediante las ecuaciones de la Recomendación UIT-R P.676

ρ : densidad del vapor de agua:

$$\rho = 7,5 + 2,5 \omega \quad \text{g/m}^3 \quad (11a)$$

ω : fracción del trayecto total sobre el agua.

4.3 Difracción

La variabilidad temporal del exceso de pérdidas debidas al mecanismo de difracción se supone que es el resultado de cambios en el índice de variación global de la refractividad radioeléctrica atmosférica, es decir, que a medida que se reduce el porcentaje de tiempo, p , se supone que aumenta el factor del radio de la Tierra, $k(p)$. Este proceso se considera válido para $\beta_0 \leq p \leq 50\%$. Para porcentajes de tiempo inferiores a β_0 los niveles de señal están dominados por mecanismos de propagación anómala más que por las características de refractividad global de la atmósfera. Por tanto, para valores de p inferiores a β_0 , $k(p)$ tiene el valor $k(\beta_0)$.

El valor de radio efectivo de la Tierra a utilizar en los cálculos de la difracción viene dado por:

$$a(p) = 6371 \cdot k(p) \quad \text{km} \quad (12)$$

donde:

p : puede tomar los valores 50 o β_0

$k(50\%)$: viene dado por la ecuación (5)

$$k(\beta_0) = 3.$$

El exceso de pérdidas debidas a los efectos de difracción, $L_d(p)$ se calcula por el método descrito en el § 4.5 de la Recomendación UIT-R P.526, combinado con una distribución log-normal de las pérdidas entre el 50% y β_0 como sigue:

- para $p = 50\%$, $L_d(50\%)$ se calcula utilizando el método descrito en la Recomendación UIT-R P.526 para el radio efectivo mediano de la Tierra $a(50\%)$;
- para $p \leq \beta_0$, $L_d(\beta_0)$ se calcula utilizando el método descrito en la Recomendación UIT-R P.526 para el radio efectivo de la Tierra $a(\beta_0)$ utilizando los obstáculos en filo de cuchillo identificados para el caso 50% (valor de la mediana);
- para $\beta_0 < p < 50\%$ $L_d(p)$ viene dado por:

$$L_d(p) = L_d(50\%) - F_i(p) [L_d(50\%) - L_d(\beta_0)] \quad (13)$$

donde:

F_i : factor de interpolación basado en una distribución log-normal de las pérdidas de difracción en la gama $\beta_0 \% < p < 50\%$, que viene dado por:

$$F_i = I(p/100) / I(\beta_0/100) \quad (13a)$$

donde $I(x)$ es la función normal acumulativa inversa. El Apéndice 4 presenta una aproximación adecuada de $I(x)$ que puede utilizarse con confianza para $x < 0,5$.

NOTA 1 – Puede utilizarse el § 4.5 de la Recomendación UIT-R P.526 para el cálculo de las pérdidas de difracción a lo largo de un trayecto de visibilidad directa con obstrucción de subtrayecto o para un trayecto transhorizonte.

La pérdida básica de transmisión no excedida durante el $p\%$ del tiempo para un trayecto con difracción viene dada por:

$$L_{bd}(p) = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + L_d(p) + E_{sd}(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (14)$$

donde:

$E_{sd}(p)$: corrección por los efectos de propagación multitrayecto entre las antenas y los obstáculos del horizonte:

$$E_{sd}(p) = 2,6 \left(1 - e^{-(d_{lt} + d_{lr})/10} \right) \log \left(\frac{p}{50} \right) \quad \text{dB} \quad (14a)$$

A_g : absorción gaseosa determinada utilizando las ecuaciones (11) y (11a).

4.4 Dispersión troposférica (Notas 1 y 2)

NOTA 1 – Para porcentajes de tiempo muy inferiores al 50%, es difícil separar el modo real de dispersión troposférica de otros fenómenos de propagación secundaria que pueden dar lugar a efectos similares de propagación. El modelo de «dispersión troposférica» adoptado en esta Recomendación es por tanto una generalización empírica del concepto de dispersión troposférica que también abarca estos efectos de propagación secundaria. De esta manera se puede efectuar de manera coherente la predicción continua de las pérdidas básicas de transmisión en la gama de porcentajes de tiempo, p , que va desde el 0,001% al 50%, enlazando de este modo el modelo de propagación por conductos y de reflexión en capas durante pequeños porcentajes de tiempo con el «modo de dispersión» real, que es el adecuado para el débil campo residual excedido durante el porcentaje de tiempo más largo.

NOTA 2 – Este modelo de predicción de la dispersión troposférica se ha obtenido con fines de predicción de la interferencia y no es adecuado para el cálculo de las condiciones de propagación en los sistemas de reveladores radioeléctricos transhorizonte (radioenlaces transhorizonte) cuando éstos afecten a sus aspectos de calidad funcional durante tiempos superiores al 50% del de transmisión.

Las pérdidas básicas de transmisión debidas a la dispersión troposférica, $L_{bs}(p)$ (dB) no excedidas durante cualquier porcentaje de tiempo, p , inferior al 50%, vienen dadas por:

$$L_{bs}(p) = 190 + L_f + 20 \log d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1 [-\log(p/50)]^{0,7} \quad \text{dB} \quad (15)$$

siendo:

L_f : pérdidas dependientes de la frecuencia:

$$L_f = 25 \log f - 2,5 [\log(f/2)]^2 \quad \text{dB} \quad (15a)$$

L_c : pérdidas de acoplamiento en apertura al centro (dB):

$$L_c = 0,051 \cdot e^{0,055(G_t + G_r)} \quad \text{dB} \quad (15b)$$

N_0 : refractividad de la superficie a nivel del mar medida en el punto central de los trayectos, según la Fig. 6

A_g : absorción gaseosa derivada de la ecuación (11), utilizando $\rho = 3 \text{ g/m}^3$ para toda la longitud del trayecto.

4.5 Propagación por conductos y por reflexión en las capas

La predicción de las pérdidas básicas de transmisión, $L_{ba}(p)$ (dB), que se producen durante periodos de propagación anómala (propagación por conductos y por reflexión en las capas), se basa en la función siguiente:

$$L_{ba}(p) = A_f + A_d(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (16)$$

siendo:

A_f : pérdidas totales o pérdidas fijas de acoplamiento (excepto para las pérdidas de ecos locales) entre las antenas y la estructura de propagación anómala dentro de la atmósfera:

$$A_f = 102,45 + 20 \log f + 20 \log (d_{lt} + d_{lr}) + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{dB} \quad (17)$$

A_{st}, A_{sr} : pérdidas de difracción debidas al apantallamiento del emplazamiento para las estaciones interferente e interferida, respectivamente:

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log \left[1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2} \right] + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & \text{dB} \quad \text{para } \theta''_{t,r} > 0 \text{ mrad} \\ 0 & \text{dB} \quad \text{para } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ mrad} \end{cases} \quad (18)$$

donde:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \quad (18a)$$

A_{ct}, A_{cr} : correcciones del acoplamiento por conductos en la superficie sobre el mar, para las estaciones interferente e interferida, respectivamente:

$$A_{ct, cr} = -3 e^{-0,25 d_{ct, cr}^2} \left[1 + \text{tgh} (0,07(50 - h_{ts, rs})) \right] \quad \text{dB} \quad \text{para } \omega \geq 0,75$$

$$d_{ct, cr} \leq d_{lt, lr} \quad (19)$$

$$d_{ct, cr} \leq 5 \text{ km}$$

$$A_{ct, cr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{para todas las demas condiciones} \quad (19a)$$

Es útil señalar el conjunto limitado de condiciones para las que se necesita la ecuación (19).

$A_d(p)$: pérdidas dependientes del porcentaje de tiempo y de la distancia angular dentro del mecanismo de propagación anómala:

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{dB} \quad (20)$$

siendo:

γ_d : atenuación específica:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{dB/mrad} \quad (21)$$

θ' : distancia angular (corregida cuando proceda con la ecuación (22a) para poder aplicar el modelo de apantallamiento del emplazamiento de la ecuación (18)):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{mrad} \quad (22)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{mrad} \quad \text{para } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \\ 0,1 d_{lt,lr} & \text{mrad} \quad \text{para } \theta_{t,r} > 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \end{cases} \quad (22a)$$

$A(p)$: variabilidad del porcentaje de tiempo (distribución acumulada):

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad \text{dB} \quad (23)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \times e^{-(9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2) \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}} \quad (23a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \% \quad (24)$$

μ_2 : corrección por la geometría del trayecto:

$$\mu_2 = \left[\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^\alpha \quad (25)$$

El valor de μ_2 no excederá de 1.

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau \quad (25a)$$

donde:

$$\varepsilon = 3,5$$

τ : definida en la ecuación (3a)

y el valor de α no será inferior a $-3,4$

μ_3 : corrección por la rugosidad del terreno:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{para } h_m \leq 10 \text{ m} \\ \exp \left[-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6 d_i) \right] & \text{para } h_m > 10 \text{ m} \end{cases} \quad (26)$$

$$d_i = \min (d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (26a)$$

A_g : absorción gaseosa total determinada a partir de las ecuaciones (11) y (11a).

Los términos restantes se han definido en los Cuadros 1 y 2 y en el Apéndice 2.

4.6 Pérdidas de eco adicionales

4.6.1 Generalidades

En términos de protección contra la interferencia, puede obtenerse una ventaja considerable de las pérdidas de difracción adicionales que pueden insertarse en antenas localizadas bajo condiciones de eco local básico (edificios, vegetación, etc.). Este procedimiento permite añadir dichas pérdidas de

eco en uno o ambos extremos del trayecto, en aquellas situaciones en que el escenario de eco se conoce. Cuando hay dudas en cuanto a la naturaleza del ambiente generador de eco, no deben incluirse estas pérdidas adicionales.

Las pérdidas por ecos parásitos se denominan A_{ht} (dB) o A_{hr} (dB) para las estaciones interferente e interferida, respectivamente. La protección adicional disponible depende de la altura y, por tanto, su modelo es una función de altura-ganancia normalizada respecto a la altura nominal del generador de eco (u objeto reflectante). Se dispone de alturas nominales de generadores de eco para una serie de ellos.

La corrección se aplica a todas las predicciones de cielo despejado de esta Recomendación, es decir, para todos los modos de propagación y porcentajes de tiempo.

4.6.2 Categorías de eco

El Cuadro 6 indica las categorías de eco (o de superficie del terreno) definidas en la Recomendación UIT-R P.1058 a las que puede aplicarse la corrección de altura-ganancia. Se considera que la altura nominal del generador de eco, h_a (m), y la distancia respecto a la antena, d_k (km), son valores «promedio» más representativos del tipo de generador u objeto reflectante. No obstante, el modelo de corrección debe formarse con reservas reconociendo la incertidumbre que existe en cuanto a la altura real adecuada para cada una de las situaciones individuales. Cuando se conozcan de forma más precisa los parámetros del objeto reflectante, podrán sustituir directamente a los valores que se indican en el Cuadro 6.

Las alturas y distancias nominales del Cuadro 6 se aproximan a la altura característica, H_c , y a la separación horizontal, G_c , definidas en la Recomendación UIT-R P.1058. No obstante, se pretende que el modelo utilizado aquí para calcular las pérdidas adicionales debidas al apantallamiento por eco (o la superficie del terreno) dé estimaciones prudentes.

4.6.3 Modelo de altura-ganancia

Las pérdidas adicionales debidas a la protección respecto al eco local vienen dadas por la expresión:

$$A_h = 10,25 \times e^{-d_k} \left(1 - \operatorname{tgh} \left[6 \left(\frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right] \right) - 0,33 \quad (27)$$

siendo:

d_k : distancia (km) desde el punto nominal del eco a la antena (véase la Fig. 3)

h : altura de la antena (m) por encima del nivel local del suelo

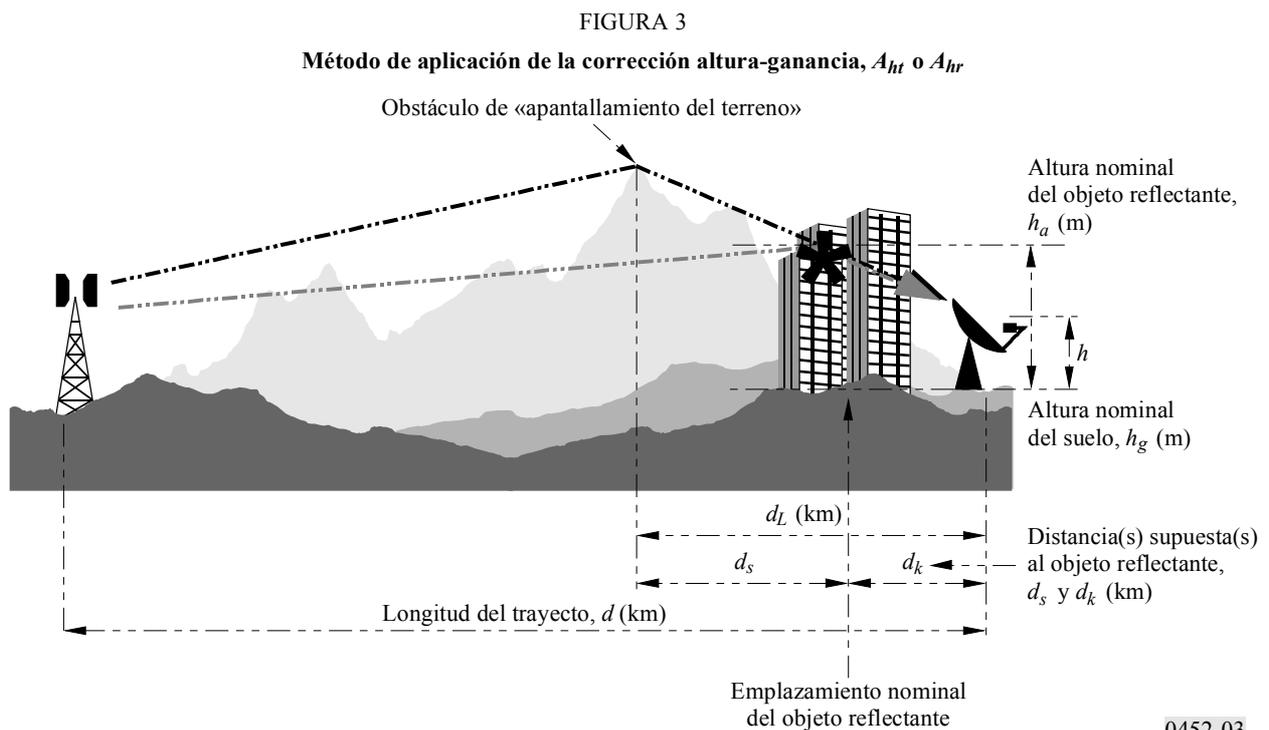
h_a : altura nominal del punto de eco (o reflectante) (m) por encima del nivel local del suelo.

CUADRO 6

Alturas y distancias nominales de objetos reflectantes (o generadores de eco)

Categoría de generador de eco (superficie del terreno)	Altura nominal, h_a (m)	Distancia nominal, d_k (km)
Campos de cultivo alto Parques Árboles dispersos de forma irregular Cultivos (separación uniforme) Casas dispersas	4	0,1
Centro de población rural	5	0,07
Árboles de hoja caduca (separación irregular) Árboles de hoja caduca (separación uniforme) Bosque de árboles diversos	15	0,05
Coníferas (separación irregular) Coníferas (separación uniforme)	20	0,05
Selva tropical húmeda	20	0,03
Entorno suburbano	9	0,025
Entorno suburbano denso	12	0,02
Entorno urbano	20	0,02
Entorno urbano denso	25	0,02
Zona industrial	20	0,05

No puede hablarse de pérdidas adicionales debidas al apantallamiento por objeto reflectante (o superficie del terreno) en las categorías no incluidas en el Cuadro 6.



4.6.4 Método de aplicación

El método de aplicación de la corrección altura-ganancia, A_{ht} o A_{hr} (dB) es directo y se indica en la Fig. 3.

Los pasos que hay que añadir al procedimiento básico de predicción son los siguientes:

Paso 1: Cuando se conoce el tipo de objeto reflectante o puede suponerse sin temor a error, se utiliza el procedimiento principal para calcular las pérdidas básicas de transmisión a la altura nominal, h_a , para el tipo adecuado de objeto reflectante, a partir del Cuadro 6. La longitud del trayecto que hay que utilizar es $d - d_k$ (km). No obstante, cuando $d \gg d_k$, esta corrección menor para d_k puede ignorarse sin problemas.

Paso 2: Cuando hay un obstáculo de «apantallamiento del terreno» que ofrezca protección al terminal, debe incluirse esta circunstancia en el cálculo básico, pero deben calcularse las pérdidas de apantallamiento (A_{st} o A_{sr} (dB)) a la altura h_a y la distancia d_s , y no a las de h y d_L como debe hacerse en caso contrario.

Paso 3: Una vez concluido el procedimiento principal, puede añadirse la corrección de altura-ganancia de la ecuación (27), tal como se indica en el Cuadro 5.

Paso 4: Cuando no se dispone de información de los objetos reflectantes, puede seguirse el cálculo básico utilizando las distancias d y d_L (si procede) y la altura h .

NOTA 1 – Las correcciones de altura-ganancia de los ecos deben añadirse en ambos extremos del trayecto, cuando convenga.

NOTA 2 – Cuando hay que aplicar la corrección de altura-ganancia en tierra y la corrección de acoplamiento de conducto en mar (A_{ct} o A_{cr} (dB)) (es decir cuando la antena está próxima al mar pero hay situaciones de ecos parásitos), pueden utilizarse a la vez las dos correcciones, ya que son complementarias y compatibles.

NOTA 3 – Si d no es significativamente mayor que d_k , este modelo no es adecuado.

4.7 Cálculo de pérdidas de transmisión

El método descrito en los § 4.2 a 4.6 *supra* da la pérdida de transmisión básica entre las dos estaciones. A fin de calcular el nivel de señal en una estación debido a la interferencia de la otra es necesario conocer la pérdida de transmisión, que tiene en cuenta las ganancias de antena de las dos estaciones situadas en la dirección del trayecto radioeléctrico, es decir la interferencia, entre ambas.

El siguiente procedimiento ofrece un método para calcular la pérdida de transmisión entre las dos estaciones terrenales. A modo de paso intermedio del método, también facilita una serie de fórmulas para calcular la longitud del trayecto ortodrómico y la distancia angular basada en las coordenadas geográficas de las estaciones, en contraposición con la obtención de dichas cantidades a partir del perfil del trayecto, como se presupone en el Cuadro 3.

La distancia angular del trayecto, θ , se calcula a partir de las coordenadas geográficas de las estaciones, utilizando:

$$\theta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \quad \text{rad} \quad (28)$$

La distancia ortodrómica, d , entre las estaciones es:

$$d = 6371 \cdot \theta \quad \text{km} \quad (29)$$

La marcación (dirección acimutal a partir del norte verdadero, en el sentido de las agujas del reloj) de la estación t a la estación r se calcula utilizando:

$$\alpha_{tr} = \arccos(\{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\theta)\} / \sin(\theta) \cos(\varphi_t)) \quad \text{rad} \quad (30)$$

Una vez aplicada la ecuación (30), si $\psi_t - \psi_r < 0$ entonces:

$$\alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \quad \text{rad} \quad (31)$$

Se calcula la marcación de la estación, r , a la estación, t , α_{rt} , por simetría a partir de las ecuaciones (30) y (31).

A continuación, supongamos que la dirección del haz principal (puntería) de la estación t es $(\varepsilon_t, \alpha_t)$ en (elevación, marcación), mientras que la dirección del haz principal de la estación r es $(\varepsilon_r, \alpha_r)$. A fin de obtener los ángulos de elevación del trayecto radioeléctrico, es decir la interferencia, en las estaciones t y r , ε_{pt} y ε_{pr} , respectivamente, es necesario distinguir entre el trayecto de visibilidad directa y el trayecto transhorizonte. Por ejemplo, para los trayectos de visibilidad directa,

$$\varepsilon_{pt} = [(h_r - h_t)/d] - [d/2a_e] \quad \text{rad} \quad (32a)$$

y

$$\varepsilon_{pr} = [(h_t - h_r)/d] - [d/2a_e] \quad \text{rad} \quad (32b)$$

donde h_t y h_r son las alturas de las estaciones por encima del nivel medio del mar (km), mientras que para los trayectos transhorizonte, los ángulos de elevación vienen dados por los respectivos ángulos del horizonte, es decir:

$$\varepsilon_{pt} = \theta_t \times 10^3 \quad \text{rad} \quad (33a)$$

y

$$\varepsilon_{pr} = \theta_r \times 10^3 \quad \text{rad} \quad (33b)$$

Téngase en cuenta que los ángulos del horizonte radioeléctrico, θ_t y θ_r , se definen, respectivamente en los § 5.1.1 y 5.1.3 del Apéndice 1.

Para calcular los ángulos a partir del eje de apuntamiento de las estaciones t y r , χ_t y χ_r , respectivamente, en la dirección del trayecto de la interferencia en las estaciones t y r , se recomienda utilizar:

$$\chi_t = \arccos(\cos(\varepsilon_t) \cos(\varepsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\varepsilon_t) \sin(\varepsilon_{pt})) \quad (34a)$$

y

$$\chi_r = \arccos(\cos(\varepsilon_r) \cos(\varepsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\varepsilon_r) \sin(\varepsilon_{pr})) \quad (34b)$$

Utilizando sus respectivos ángulos a partir del eje de apuntamiento, se obtienen las ganancias de antena para las estaciones t y r , G_t y G_r , respectivamente (dB). Si no se dispone de los diagramas de antena reales, la variación de la ganancia en función del ángulo se puede obtener en la información de la Recomendación UIT-R S.465.

Para obtener la pérdida de transmisión, L , se utiliza:

$$L = L_{b0}(p) - G_t - G_r \quad \text{dB} \quad (35)$$

En los casos de interferencia con cielo despejado, en los que la propagación radioeléctrica está dominada por la dispersión troposférica, los ángulos de elevación serán un poco mayores que los ángulos del horizonte radioeléctrico, θ_t y θ_r . El uso de dichos ángulos debería introducir errores despreciables, a menos que éstos también coincidan con las direcciones de apuntamiento de las respectivas estaciones.

5 Predicción de la interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros

Al contrario de lo que ocurre con los citados métodos de predicción de la interferencia con cielo despejado, el método de predicción de la interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros descrita a continuación expresa directamente la pérdida de transmisión, debido al hecho de que este método se basa en el conocimiento de las ganancias de las antenas interferente e interferida.

5.1 Introducción

Este modelo predice las estadísticas de la pérdida de transmisión de una señal interferente a partir de las estadísticas de intensidad de la lluvia (el soporte lógico correspondiente (SCAT) está disponible en la BR de la UIT). Se basa en dos hipótesis fundamentales:

- Sólo se produce dispersión en las células de lluvia con sección transversal circular cuyo diámetro depende de la intensidad de lluvia en el interior de la célula. Para cualquier configuración geométrica del enlace, se supone que una célula está en una posición fija que pretende representar el caso más desfavorable. Dentro de la célula de lluvia, la intensidad de lluvia, y por tanto la reflectividad, es constante hasta una altura de la lluvia cuyo valor medio depende de la latitud geográfica, pero con una distribución específica alrededor de esta media que refleja la variación anual de altura. Por encima de la altura de lluvia, se supone una disminución lineal de la reflectividad (dB).
- La atenuación se produce tanto dentro como fuera de la célula, pero sólo por debajo de la altura de la lluvia. Dentro de la célula, se supone bien conocida la dependencia de la atenuación específica con la intensidad de la lluvia.

El modelo es capaz de calcular el nivel de interferencia tanto para geometrías de trayecto largo (> 100 km) como de trayecto corto (de hasta algunos kilómetros) con ángulos de elevación arbitrarios en ambos terminales, así como para geometrías de dispersión lateral (no ortodrómicas o de círculo máximo), y con acoplamiento del lóbulo lateral. Dada la complejidad de la geometría del trayecto, está disponible, a modo de ejemplo, una implementación por ordenador.

La base física del método se presenta en el Apéndice 3. Se supone la intersección de un haz estrecho (por ejemplo de una estación terrena) con un haz ancho (por ejemplo de una estación terrenal).

En las pruebas comparativas respecto a mediciones directas y por radar, el método ha arrojado buenos resultados para diversas frecuencias y geometrías.

5.2 Fórmulas de las pérdidas de transmisión

Las pérdidas de transmisión, L (dB), producidas por la dispersión hidrometeorológica, para una determinada intensidad de lluvia, y altura de la lluvia pueden expresarse del siguiente modo:

$$L = 197 - 10 \log \eta_E + 20 \log d_T - 20 \log f - 10 \log z_R + 10 \log S + A_g - 10 \log C \quad \text{dB} \quad (36)$$

donde:

- η_E : eficacia de la antena (factor < 1) de la estación terrena
- d_T : distancia entre estaciones a través del volumen de dispersión (km)
- f : frecuencia (GHz)
- z_R : factor de reflectividad de la dispersión debida a la lluvia por unidad de volumen por debajo de la altura de la lluvia (parte superior) (mm^6/m^3):

$$z_R = 400 R(p)^{1,4} \quad \text{mm}^6/\text{m}^3 \quad (37)$$

$R(p)$: proporción de la lluvia puntual excedida durante el porcentaje de tiempo, p , en cuestión (con una integración de tiempo de 1 min)

S : margen de desviación permitida para la dispersión debida a la lluvia con respecto a la ley Rayleigh, en frecuencias superiores a 10 GHz (se supone que $S = 0$ por encima de la altura de la lluvia):

$$10 \log S = R(p)^{0,4} \times 10^{-3} \left[4 (f - 10)^{1,6} \left(\frac{1 + \cos \varphi_s}{2} \right) + 5 (f - 10)^{1,7} \left(\frac{1 - \cos \varphi_s}{2} \right) \right] \text{ dB para } f > 10 \text{ GHz} \quad (38a)$$

$$10 \log S = 0 \quad \text{dB para } f \leq 10 \text{ GHz} \quad (38b)$$

φ_s : ángulo de dispersión, es decir el ángulo entre las direcciones de propagación de las ondas que inciden y salen del volumen de dispersión (por ejemplo, $\varphi_s = 0^\circ$ para la dispersión directa y $\varphi_s = 180^\circ$ para la retrodispersión)

A_g : atenuación gaseosa debida al oxígeno y al vapor de agua, calculada utilizando las fórmulas de la Recomendación UIT-R P.676 y una densidad del vapor de agua de 7,5 g/m³

C : función de transferencia de la dispersión efectiva:

$$C = g_{T0} \int_{h_{min}}^{h_{max}} g_T(h) \zeta(h) A_T(h) A_E(h) \frac{1}{\text{sen } \varepsilon_E} dh \quad (39)$$

donde:

h_{min}, h_{max} : alturas mínima y máxima para la integración

g_{T0} : factor de ganancia en dirección axial de la antena de la estación terrenal

g_T : directividad de la antena (factor ≤ 1) de la estación terrenal considerada en la dirección del punto de integración (elemento de volumen)

ε_E : ángulo de elevación del haz de la estación terrena

$\zeta(h)$: función de reflectividad del volumen de dispersión, normalizada respecto a z_R (el valor por debajo de la altura de la lluvia):

$$\zeta(h) = 1 \quad \text{para } h \leq \text{altura de la lluvia} \quad (40a)$$

$$\zeta(h) = 10^{-0,65(h - h_R)} \quad \text{para } h > \text{altura de la lluvia} \quad (40b)$$

donde:

h_R : promedio de la altura de la lluvia como aparece en la Recomendación UIT-R P.839 (véase el Apéndice 3)

A_T, A_E : atenuación debida a la lluvia (factores ≤ 1) para los trayectos desde la estación terrenal al punto de integración y desde ahí hasta la estación terrena, respectivamente. La información contenida en el Apéndice 3 es necesaria para el cálculo de A_T y A_E .

La ecuación (36) supone el caso de máximo acoplamiento de polarización. Para un acoplamiento inferior a este ideal, se producirán pérdidas adicionales (véase el Apéndice 3).

Para calcular el total de pérdidas de transmisión, la integración de la ecuación (39) ha de realizarse a lo largo de la parte del haz de la antena de la estación terrena que está o bien dentro de la célula de lluvia, o dentro del haz de la antena de la estación terrenal (sombreado en la Fig. 9).

Se supone que el haz de la antena de la estación terrenal tiene una forma de campana de Gauss. La integración llega hasta los puntos de -18 dB en el diagrama de radiación de la antena, con respecto a la ganancia máxima hallada en el haz estrecho. Para obtener una expresión analítica de la integral, se hace una aproximación al diagrama de radiación de directividad de la antena de la estación terrenal, T , mediante una función gaussiana como la siguiente:

$$g_T(h) = \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{h - h_0}{\Delta h_{1/2}} \right)^2 \right] \quad (41)$$

donde $\Delta h_{1/2}$ es la diferencia de altura entre los dos puntos situados en el eje de la antena de la estación terrenal para el cual la función de directividad de la antena de la estación terrenal cae a 0,5 (puntos de -3 dB).

5.3 Distribución acumulativa de las pérdidas de transmisión

La distribución acumulativa (anual) de las pérdidas de transmisión debidas a la dispersión hidrometeorológica, se evalúa en dos etapas.

En la primera, se calculan las pérdidas de transmisión para cada combinación de proporción de lluvia con altura de la lluvia, como si hubiese una dependencia determinista de estos parámetros. Se supone que este valor de las pérdidas de transmisión sucede con la misma probabilidad que la combinación correspondiente de proporción de lluvia y altura de la lluvia, suponiendo la independencia estadística de estos dos parámetros.

En segundo lugar, se suman las probabilidades de todas las combinaciones de proporción de lluvia/altura de la lluvia que dan lugar a los mismos valores de pérdidas de transmisión, y así se obtiene la probabilidad total de producirse esas pérdidas de transmisión. La distribución acumulativa resultante se considera como distribución predicha aunque no exista una correlación biunívoca entre las combinaciones individuales de proporción de lluvia/altura de la lluvia y las pérdidas de transmisión.

5.4 Predicciones para el mes más desfavorable

En Europa, los factores de escala del mes más desfavorable, Q , para la dispersión hidrometeorológica se han situado alrededor de 3 para el 1% de tiempo; 4,5 para el 0,01% del tiempo y alrededor de 7 para el 0,001% del tiempo. Estas estimaciones se fundan en una cantidad limitada de datos a frecuencias de 11 GHz y superiores, y deben utilizarse con prudencia. Se constató que los valores medios estaban muy próximos a los factores de intensidad de la lluvia en Europa. Por ello, a falta de valores de Q medidos para la dispersión por la precipitación, se sugiere la utilización alternativa de los valores Q de intensidad de la lluvia (véanse en la Recomendación UIT-R P.841, los cuadros de valores de Q).

A título de ejemplo, sobre la base de los resultados para un trayecto de 131 km a 11 GHz en el Reino Unido, se superó la pérdida de transmisión de 141 dB durante ese 0,01% del tiempo en un periodo anual. Utilizando un factor Q de 4,5, las pérdidas de transmisión excedidas durante el 0,002% de la distribución anual, 139,3 dB, se producirían para el 0,01% del mes más desfavorable, lo que implica una disminución de las pérdidas de 1,7 dB.

En principio, los factores relativos al mes más desfavorable deben tener en cuenta la capa de fusión, pero los cálculos del modelo han sugerido que el efecto de interferencia de esta capa puede ser significativo si se centra en el volumen común de intersección de los principales haces durante un periodo de tiempo significativo, por ejemplo durante un «mes más desfavorable». El efecto depende de la frecuencia, y es más significativo en las frecuencias más bajas, como 4-6 GHz, y menos en las frecuencias altas. Se observó el efecto en las mediciones en un trayecto de 131 km a 11,2 GHz (clima de lluvia compuesto C, D, E) lo que indicó que la presencia de la capa de fusión en el verano aumentaba el nivel de interferencia en unos 2-3 dB, para porcentajes de tiempo comprendidos entre el 0,1% y el 0,01%, con respecto al aumento esperado sobre la estadística estacional hecha en ausencia de la capa de fusión. A 5 GHz, el aumento proporcional de la interferencia producida por la presencia de la capa de fusión sería de 3-4 dB. Los aumentos de la interferencia en el mes más desfavorable resultantes de la presencia de la capa de fusión serían ligeramente mayores que los de la estación más desfavorable.

APÉNDICE 1

AL ANEXO 1

Datos radiometeorológicos necesarios para el procedimiento de predicción con cielo despejado

1 Introducción

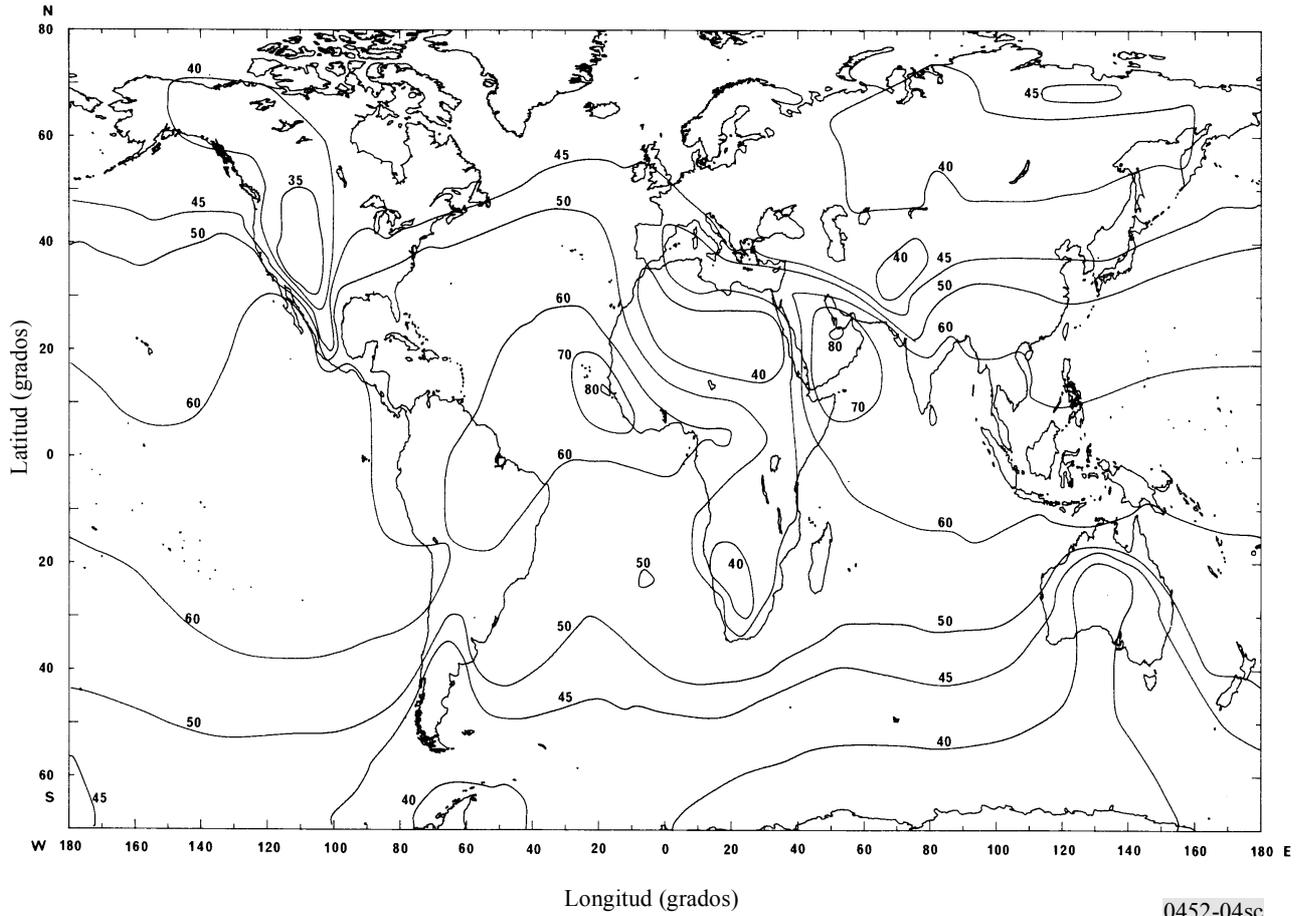
Los procedimientos de predicción con cielo despejado se basan en datos radiometeorológicos para proporcionar la variación básica de las predicciones con respecto a la localización. Estos datos vienen en forma de mapas que se incluyen en este Apéndice.

2 Mapas sobre la variación vertical de los datos de refracción radioeléctrica

En el procedimiento global, la radiometeorología del trayecto con cielo despejado se caracteriza para los mecanismos de interferencia continua (largo plazo) por el valor anual medio de ΔN (proporción de variación del índice de refracción en el primer kilómetro de la atmósfera), y para los mecanismos anómalos (a corto plazo) por el porcentaje de tiempo, $\beta_0\%$, en los cuales el gradiente de refracción de la capa inferior de la atmósfera es inferior a -100 unidades N/km. Estos parámetros proporcionan una base razonable sobre la cual establecer los modelos de los mecanismos de propagación con cielo despejado descritos en el § 2 del Anexo 1. Para algunas de estas cantidades, este Apéndice ofrece datos relativos a los cálculos anuales y a los del mes más desfavorable:

- la Fig. 4 proporciona datos de ΔN para un año promedio;
- la Fig. 5 proporciona los contornos asociados a los valores máximos de media mensual de ΔN .

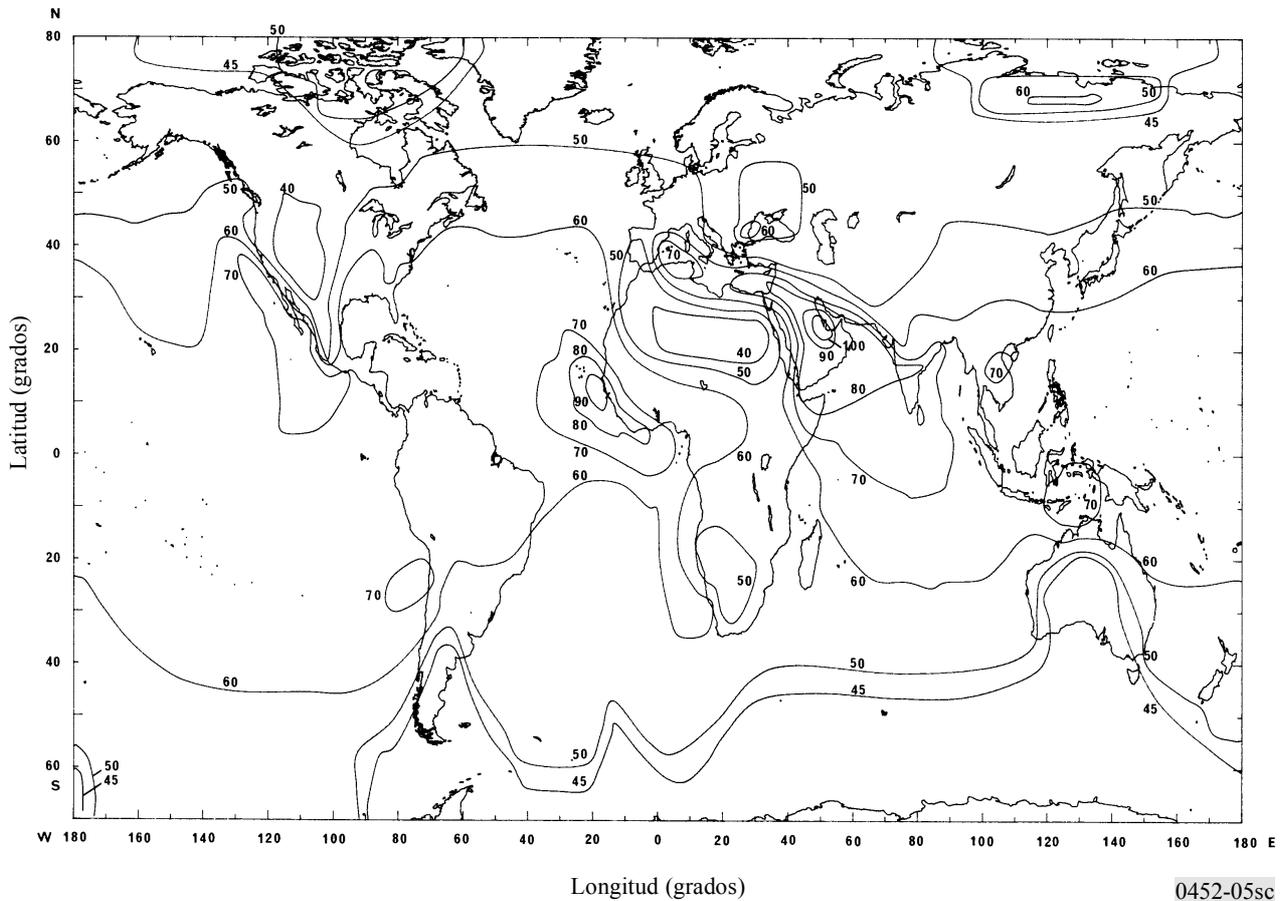
FIGURA 4
Valores anuales medios de ΔN



0452-04sc

FIGURA 5

Valores máximos de media mensual de ΔN (para la predicción del mes más desfavorable)



3 Mapa de refracción en la superficie, N_0

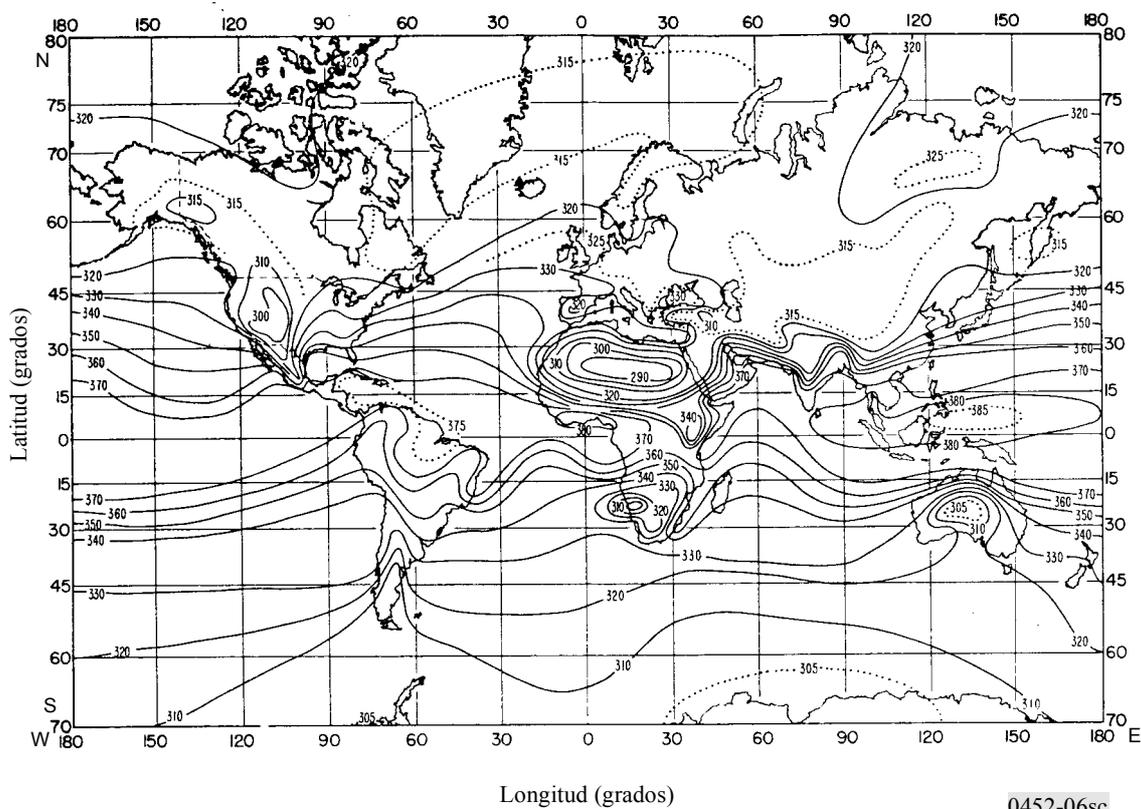
La Fig. 6 es un mapa de la refracción media en la superficie del mar, N_0 , para un modelo de dispersión troposférica.

4 Implementación de los mapas como base de datos informática

Para la informatización de los procedimientos, conviene digitalizar estos mapas y convertirlos así en bases de datos sencillas a las que se pueda acceder mediante soporte lógico.

Para los mapas de índices de refracción global, se sugiere convertir los contornos en parejas de datos correspondientes a $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de latitud y longitud. Para paliar discontinuidades en la predicción debidas a pequeños cambios de emplazamiento o distancia, los valores para cada pareja deberán obtenerse por interpolación entre contornos consecutivos en el mapa.

FIGURA 6
Refracción en la superficie del mar, N_0



APÉNDICE 2

AL ANEXO 1

Análisis del perfil de trayecto

1 Introducción

Para el análisis del perfil del trayecto, se necesita conocer el perfil del trayecto relativo a las elevaciones del terreno situadas por encima del nivel medio del mar. En el Cuadro 7 se presentan los parámetros que han de obtenerse del análisis del perfil del trayecto para establecer los modelos de propagación.

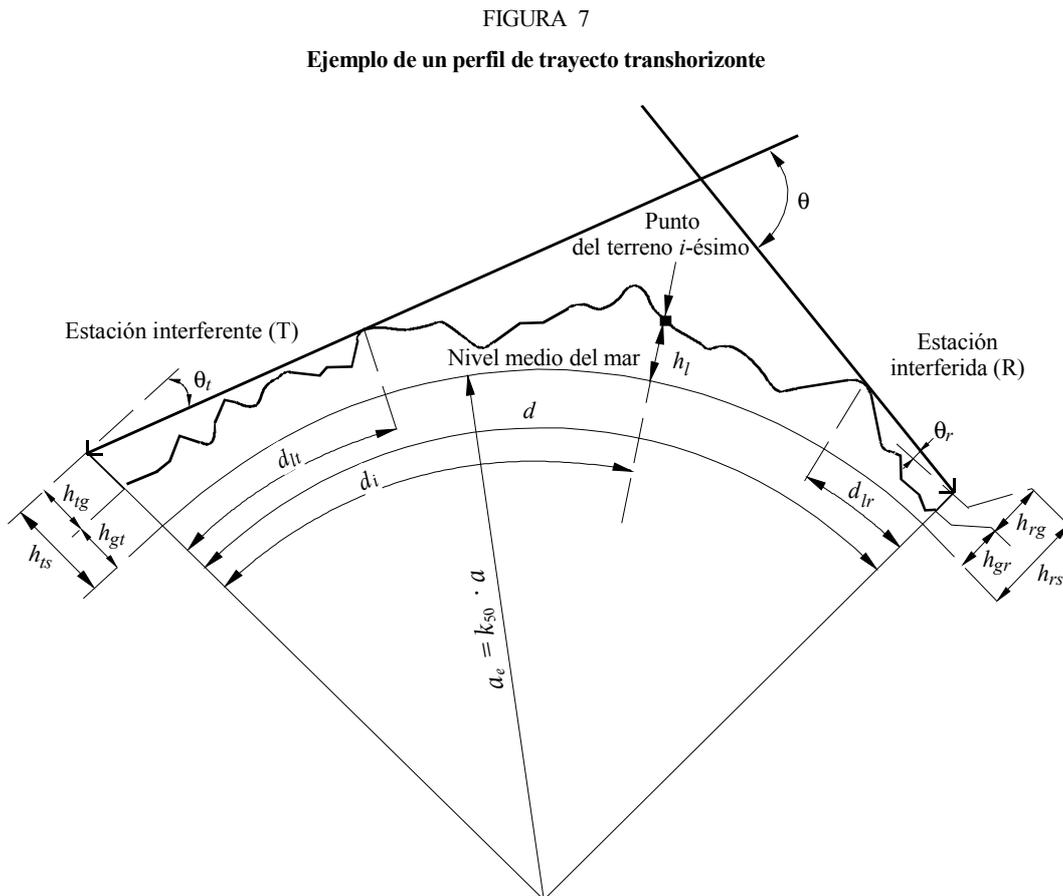
2 Construcción del perfil del trayecto

A partir de las coordenadas geográficas de las estaciones interferente (φ_t, ψ_t) e interferida (φ_r, ψ_r), se obtienen las elevaciones del terreno (por encima del nivel medio del mar) a lo largo del trayecto ortodrómico o del círculo máximo de una base de datos topográfica o de los correspondientes mapas de contorno a gran escala. La resolución preferida de distancias en el perfil es aquella que ofrece un número entero de pasos de aproximadamente 0,25 km. Pueden utilizarse otros

incrementos de distancia, hasta un máximo de 1 km aproximadamente, lo que disminuirá seguramente la precisión de la predicción. El perfil debe incluir las elevaciones del terreno en los emplazamientos de las estaciones interferente e interferida como puntos de comienzo y final. A las elevaciones a lo largo del trayecto se ha de añadir la curvatura de la Tierra, que se base en el valor de a_e hallado en la ecuación (6).

Aunque se consideran preferibles los puntos del perfil con separación uniforme, es posible utilizar el método de puntos del perfil con separación irregular. Ello puede resultar útil cuando el perfil se ha obtenido a partir de un mapa digital de los contornos de elevación del terreno. Sin embargo, debe señalarse que la Recomendación se ha elaborado a partir de pruebas realizadas utilizando puntos del perfil con separación uniforme; no se dispone de datos exactos sobre el efecto de los puntos separados de forma irregular.

Para los fines de esta Recomendación, el punto del perfil del trayecto en la estación interferente se considera como punto cero y el punto en la estación interferida como punto n . Así pues, el perfil de trayecto se compone de $n + 1$ puntos. La Fig. 7 ofrece un ejemplo de perfil de trayecto que muestra los diversos parámetros de las correspondientes elevaciones del terreno por encima del nivel medio del mar.



Nota 1 – El valor del ángulo θ_t representado será negativo.

0452-07

El Cuadro 7 define los parámetros utilizados u obtenidos durante el análisis del perfil de un trayecto.

CUADRO 7

Definiciones de los parámetros del perfil del trayecto

Parámetro	Descripción
a_e	Radio efectivo de la Tierra (km)
d	Distancia del trayecto por el círculo máximo (km) (o distancia ortodrómica)
d_i	Distancia por el círculo máximo al punto de terreno i -ésimo desde la estación interferente (km) (o distancia ortodrómica)
d_{ii}	Distancia incremental para los datos del perfil del trayecto regular (km)
f	Frecuencia (GHz)
λ	Longitud de onda (m)
h_{ts}	Altura de la antena interferente sobre el nivel medio del mar (snmm) (m)
h_{rs}	Altura de la antena interferida snmm (m)
θ_t	Ángulo de elevación del horizonte por encima de la horizontal local (mrad), medido desde la antena interferente
θ_r	Ángulo de elevación del horizonte por encima de la horizontal local (mrad), medido desde la antena interferida
θ	Distancia angular del trayecto (mrad)
h_{st}	Altura de la superficie de la Tierra lisa snmm en el emplazamiento de la estación interferente (m)
h_{sr}	Altura de la superficie de la Tierra lisa snmm en el emplazamiento de la estación interferida (m)
h_i	Altura del punto del terreno i -ésimo snmm (m) h_0 : altura del emplazamiento (suelo) de la estación interferente h_n : altura del emplazamiento (suelo) de la estación interferida
h_m	Rugosidad del terreno (m)
h_{te}	Altura efectiva de la antena interferente (m)
h_{re}	Altura efectiva de la antena interferida (m)

3 Longitud del trayecto

Con carácter general, la longitud del trayecto, d (km), puede hallarse a partir de los datos del perfil del trayecto:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km} \quad (42)$$

sin embargo, para datos del perfil del trayecto con pasos regularmente espaciados (o trayecto regular), el procedimiento se reduce a:

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (43)$$

donde d_{ii} es la distancia incremental del trayecto (km).

4 Clasificación del trayecto

El perfil del trayecto se clasificará a continuación dentro de una categoría geométrica entre tres posibles, basadas en un radio efectivo de la Tierra a_e . Las clasificaciones del trayecto de interferencia se señalan en el Cuadro 4.

4.1 Etapa 1 de clasificación: Comprobación de un trayecto transhorizonte

Un trayecto es transhorizonte si el ángulo de elevación del horizonte físico visto desde la antena interferente (con respecto a la horizontal del lugar) es mayor que el ángulo (de nuevo con respecto a la horizontal del lugar del interferente) subtendido por la antena interferida.

De este modo, la prueba de la condición de trayecto transhorizonte es:

$$\theta_{m\acute{a}x} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (44)$$

donde:

$$\theta_{m\acute{a}x} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (45)$$

θ_i : ángulo de elevación hasta la altura i -ésima del terreno

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (46)$$

donde:

h_i : altura del punto del terreno i -ésimo sobre el nivel medio del mar (snmm) (m)

h_{ts} : altura de la antena interferente snmm (m)

d_i : distancia desde el interferente al elemento de terreno i -ésimo (km)

$$\theta_{td} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} - \frac{10^3 d}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (47)$$

donde:

h_{rs} : altura de la antena interferida snmm (m)

d : distancia total del trayecto en el círculo máximo (km)

a_e : valor mediano del radio efectivo de la Tierra apropiado al trayecto (ecuación (6)).

Si se satisface la condición de la ecuación (44), puede realizarse el resto del análisis del perfil de trayecto requerido para trayectos transhorizonte (véase el § 5.1). En este caso ya no se necesitará la Etapa 2 para clasificar el trayecto.

Si no se cumple la condición de la ecuación (44), el trayecto será de visibilidad directa, con o sin invasión de la primera zona de Fresnel por el terreno.

4.2 Etapa 2: Comprobación de la visibilidad directa con difracción de subtrayecto (es decir, sin la primera zona de Fresnel completamente libre de obstáculos)

Un trayecto que no sea transhorizonte es de visibilidad directa con difracción de subtrayecto, si el ángulo de elevación por encima del horizonte físico, visto desde la antena interferente (con respecto a la horizontal local), y que contempla un despejamiento igual al radio del primer elipsoide de Fresnel en el punto del horizonte, es mayor que el ángulo (de nuevo con respecto a la horizontal del lugar del interferente) subtendido por la antena interferida.

El trayecto tiene difracción de subtrayecto si:

$$\theta_{f\acute{m}ax} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (48)$$

donde:

$$\theta_{f\acute{m}ax} = \underset{i=1}{\overset{n-1}{\text{m}\acute{a}\text{x}}} (\theta_{fi}) \quad (49)$$

Para concluir esta prueba es necesario por tanto un t\u00e9rmino adicional en la ecuaci\u00f3n (46) que contemple el primer elipsoide de Fresnel. El \u00a7 2 de la Recomendaci\u00f3n UIT-R P.526 ofrece el radio de este elipsoide, R_i (m) en cualquier punto del trayecto:

$$R_i = 17,392 \sqrt{\frac{d_i(d - d_i)}{d \cdot f}} \quad \text{m} \quad (50)$$

donde f es la frecuencia (GHz).

El radio apropiado R_i (m), se a\u00f1ade a cada altura del terreno, h_i (m), de la ecuaci\u00f3n (46), lo que da por resultado la ecuaci\u00f3n (51). Si existe despejamiento de la primera zona de Fresnel, θ_{fi} , el \u00e1ngulo de elevaci\u00f3n de la antena terminal (rad) hasta el punto i -\u00e9simo se obtiene de la ecuaci\u00f3n:

$$\theta_{fi} = \frac{(h_i + R_i) - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (51)$$

Si se cumple la condici\u00f3n de la ecuaci\u00f3n (48), puede realizarse el resto del an\u00e1lisis del perfil del trayecto requerido para casos de difracci\u00f3n en el subtrayecto.

Si no se cumple la condici\u00f3n de la ecuaci\u00f3n (48), el trayecto es de visibilidad directa y ya no se necesitar\u00e1 otro an\u00e1lisis del perfil del trayecto.

5 Obtenci\u00f3n de los par\u00e1metros a partir del perfil del trayecto

5.1 Trayectos transhorizonte

En el Cuadro 7 se encuentra la lista completa de par\u00e1metros del perfil del trayecto.

5.1.1 \u00c1ngulo de elevaci\u00f3n sobre el horizonte de la antena interferente, θ_t

El \u00e1ngulo de elevaci\u00f3n sobre el horizonte de la antena interferente es el \u00e1ngulo de elevaci\u00f3n m\u00e1ximo de la antena sobre el horizonte cuando se aplica la ecuaci\u00f3n (45) a las $n - 1$ alturas del perfil del terreno.

$$\theta_t = \theta_{m\acute{a}\text{x}} \quad \text{mrad} \quad (52)$$

determin\u00e1ndose $\theta_{m\acute{a}\text{x}}$ mediante la ecuaci\u00f3n (45).

5.1.2 Distancia al horizonte de la antena interferente, d_{lt}

La distancia al horizonte es la distancia m\u00ednima desde el transmisor en el que se calcula el \u00e1ngulo de elevaci\u00f3n m\u00e1ximo de la antena sobre el horizonte de acuerdo con la ecuaci\u00f3n (45).

$$d_{lt} = d_i \quad \text{km} \quad \text{para m}\acute{a}\text{x} (\theta_i) \quad (53)$$

5.1.3 Ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena interferida, θ_r

El ángulo de elevación de la antena receptora sobre el horizonte es el ángulo de elevación máximo sobre el horizonte de la antena cuando se aplica la ecuación (45) a las $n - 1$ alturas del perfil del terreno.

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (54)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3 (d - d_j)}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (55)$$

5.1.4 Distancia al horizonte de la antena interferida, d_{lr}

La distancia al horizonte es la distancia mínima desde el receptor para el que se calcula el ángulo de elevación máximo de la antena con respecto al horizonte según la ecuación (45).

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{para } \max (\theta_j) \quad (56)$$

5.1.5 Distancia angular θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (57)$$

5.1.6 Modelo de «Tierra lisa» y alturas efectivas de la antena

5.1.6.1 Generalidades

Para determinar las alturas efectivas de la antena y realizar una valoración apropiada de la irregularidad del trayecto es preciso obtener una superficie efectiva de «Tierra lisa» como plano de referencia sobre el cual se considera que existe el terreno rugoso del trayecto. Una vez obtenida ésta, pueden obtenerse los valores del parámetro de rugosidad del terreno (§ 5.1.6.4) y de las alturas efectivas de antena para las estaciones interferente e interferida.

5.1.6.2 Excepciones

Para los trayectos «marítimos» directos, es decir, para $\omega \geq 0,9$, y cuando los dos horizontes de antena caen en la superficie del mar, puede omitirse la obtención del cálculo de la superficie de Tierra lisa si se desea. En este caso, puede considerarse como plano de referencia un nivel medio del mar (o del agua) a lo largo de todo el trayecto, puede suponerse una rugosidad del terreno de 0 m, y las alturas efectivas de antena equivaldrán a las alturas reales por encima de la superficie del mar.

Para todos los demás trayectos es necesario aplicar el procedimiento de aproximación del terreno de Tierra lisa detallado en el § 5.1 y obtener las alturas efectivas de antena y la irregularidad del terreno como se indica en el § 5.1.6.4.

5.1.6.3 Obtención de la superficie de Tierra lisa

Una aproximación en línea recta de las alturas del terreno por encima del nivel medio del mar se obtendrá de la fórmula:

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \quad \text{m} \quad (58)$$

donde:

h_{si} : altura snmm (m), de la superficie ajustada por mínimos cuadrados y situada a una distancia d_i (km) de la fuente de interferencia

- h_{st} : altura snmm (m), de la superficie de la Tierra lisa en el origen del trayecto, es decir; en la estación interferente
- m : pendiente (m/km) de la superficie ajustada por mínimos cuadrados con respecto al nivel del mar.

Se dispone de métodos alternativos para los dos pasos siguientes del cálculo. Pueden utilizarse las ecuaciones (59a) y (60a) si los puntos del perfil están separados uniformemente. Las ecuaciones (59b) y (60b), más complicadas, deben utilizarse si los puntos del perfil no están separados de manera uniforme, y pueden utilizarse asimismo en el otro caso.

Para perfiles con puntos separados uniformemente:

$$m = \frac{\sum_{i=0}^n (h_i - h_a) \left(d_i - \frac{d}{2} \right)}{\sum_{i=0}^n \left(d_i - \frac{d}{2} \right)^2} \quad \text{m/km} \quad (59a)$$

Para cualquier perfil:

$$m = \left(\frac{1}{d^3} \right) \sum_{i=1}^n 3 (d_i - d_{i-1}) (d_i + d_{i-1} - d) (h_i + h_{i-1} - 2h_a) + (d_i - d_{i-1})^2 (h_i - h_{i-1}) \quad \text{m/km} \quad (59b)$$

donde:

- h_i : altura real snmm del punto i -ésimo del terreno (m)
- h_a : media de las alturas reales snmm del trayecto desde h_0 a h_n ambas inclusive (m), que viene dada por:

Para perfiles con puntos espaciados uniformemente:

$$h_a = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n h_i \quad \text{m} \quad (60a)$$

Para cualquier perfil se calcula una media ponderada:

$$h_a = \left(\frac{1}{2d} \right) \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) (h_i + h_{i-1}) \quad \text{m} \quad (60b)$$

La elevación de la superficie uniforme de la Tierra en la estación interferente, h_{st} , viene dada por:

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad \text{m} \quad (61)$$

y por tanto, la altura de la superficie de Tierra lisa en la estación interferida, h_{sr} , viene dada por:

$$h_{sr} = h_{st} + m \cdot d \quad \text{m} \quad (62)$$

Hay que realizar una corrección si las alturas de Tierra lisa se sitúan por encima de la altura real del terreno, es decir:

$$h_{st} = \text{mín} (h_{st}, h_0) \quad \text{m} \quad (63a)$$

$$h_{sr} = \text{mín} (h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (63b)$$

Si se modifica h_{st} o h_{sr} , o ambas, por las ecuaciones (63a) o (63b), entonces la pendiente, m , de la superficie de Tierra lisa también debe corregirse:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (64)$$

5.1.6.4 Rugosidad del terreno, h_m

El parámetro de irregularidad del terreno, h_m (m), es la altura máxima del terreno correspondiente a la superficie de Tierra lisa, en la sección del trayecto que se extiende entre los puntos del horizonte; comprendidos dichos puntos:

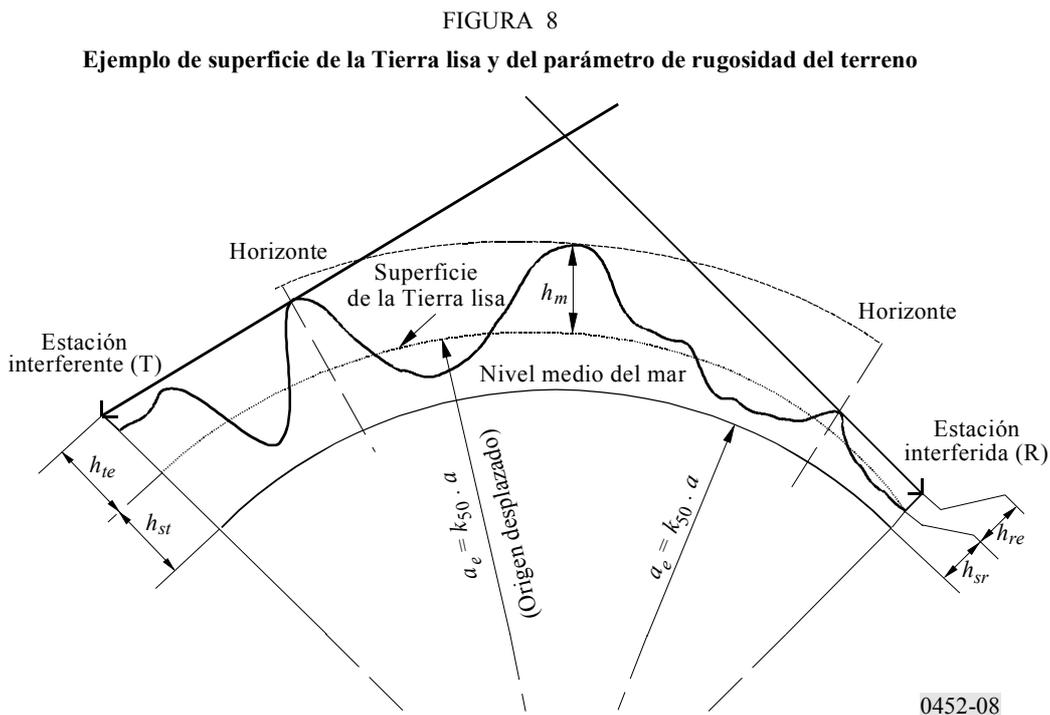
$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} \left[h_i - (h_{st} + m \cdot d_i) \right] \quad \text{m} \quad (65)$$

siendo:

i_{lt} : el índice del punto del perfil situado a la distancia d_{lt} del transmisor

i_{lr} : el índice del punto del perfil situado a la distancia d_{lr} del receptor.

En la Fig. 8 se ilustran la superficie de Tierra lisa y el parámetro h_m de rugosidad del terreno.



APÉNDICE 3

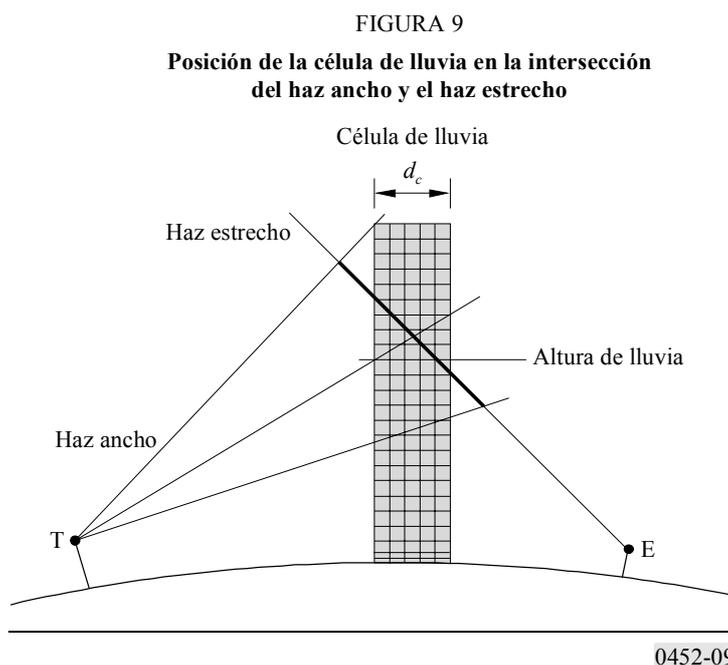
AL ANEXO 1

Base física del modelo de dispersión por hidrometeoros

Se supone que la dispersión se produce sólo en una célula de lluvia cilíndrica fija cuya sección transversal es circular. El diámetro de la célula, d_c , depende de la tasa de lluvia R (mm/h) y se calcula del siguiente modo:

$$d_c = 3,3 R^{-0,08} \quad \text{km} \quad (66)$$

Esta célula está centrada en la intersección (o punto de aproximación más cercano si los haces no se intersectan exactamente) de los dos ejes de antena (véase la Fig. 9). Ello es así como consecuencia de la inclusión de geometrías de trayecto corto. Dentro de la célula y para una intensidad de lluvia determinada, la reflectividad se considera constante hasta la altura de lluvia (o la altura del nivel de congelación). Por encima de la altura de lluvia disminuye a un ritmo de 6,5 dB/km. No se supone que la lluvia exterior a la célula de lluvia contribuya de forma significativa a la dispersión.



Se supone que la atenuación debida a la lluvia actúa sólo por debajo de la altura de ésta. Dentro de la célula se aplica la atenuación específica, γ_R , según la fórmula $\gamma_R = k R^\alpha$. Los coeficientes k y α dependen de la frecuencia, polarización y dirección de propagación (ángulo de elevación) de la onda y vienen dados en la Recomendación UIT-R P.838. Para la atenuación, Γ_R , fuera de la célula de lluvia (entre el borde de la célula y un punto a la distancia d) se supone una disminución exponencial del siguiente tipo:

$$\Gamma_R = \gamma_R r_m \frac{(1 - e^{-d/r_m})}{\cos \epsilon} \quad (67)$$

donde:

r_m : longitud escalar de atenuación de la lluvia, dada por:

$$r_m = 600 R^{-0,5} 10^{-(R+1)^{0,19}} \quad (68)$$

ε : ángulo de elevación.

La ecuación (67) es válida si todo el trayecto está debajo de la altura de lluvia. Si sólo una parte de éste (entre las distancias d_1 y d_2 al borde de la célula) se encuentra debajo de la altura de lluvia, entonces:

$$\Gamma_R = \gamma_R r_m \frac{(e^{-d_1/r_m} - e^{-d_2/r_m})}{\cos \varepsilon} \quad (69)$$

Para las partes del trayecto de propagación que se encuentran por encima de la altura de lluvia, se supone una atenuación debida a la lluvia igual a cero.

Como la longitud horizontal aumenta rápidamente con la disminución de proporción de lluvia, con proporción de lluvia inferiores a unos 10 mm/h, puede borrarse la distinción entre la lluvia en la célula y la lluvia circundante.

La altura de lluvia se considera una variable aleatoria, h_{RD} , con una función de distribución determinada. Es importante incluir explícitamente la variabilidad de la (cima de) altura de la lluvia, en el método de predicción. Dado que la atenuación debida a la lluvia actúa sólo debajo de h_{RD} , un volumen común justo por encima de h_{RD} puede determinar una pérdida de transmisión considerablemente menor (mayor señal de interferencia) que un volumen por debajo de h_{RD} a pesar de la disminución de la reflectividad por encima de h_{RD} . Sólo en el caso de un volumen suficientemente alto por encima de h_{RD} la disminución de reflectividad compensa la atenuación debida a la lluvia y las pérdidas de transmisión aumentan de nuevo. Si la altura de la lluvia está por encima del volumen de dispersión durante parte del año y por debajo de él, el resto, las estadísticas anuales de pérdidas de transmisión en los márgenes de baja probabilidad y bajas pérdidas pueden estar dominadas por la dispersión por la nieve y el hielo, lo que no se predeciría si se utilizase una altura de lluvia fija por encima del volumen de dispersión. Este efecto es más acusado para las frecuencias más altas, y puede ser despreciable para frecuencias inferiores a 11 GHz.

El valor medio de la distribución de h_{RD} es igual a la altura de lluvia media, h_R , como se indica en la Recomendación UIT-R P.839. La altura de lluvia media, h_R , varía según la latitud geográfica de la estación.

En el Cuadro 8 se presenta una función de distribución acumulativa para h_{RD} , pero si se dispone de valores a largo plazo obtenidos localmente, deben utilizarse éstos.

El procedimiento debe utilizarse con la distribución de la proporción de lluvia en la zona climática de lluvia pertinente que figura en la Recomendación UIT-R P.837, a menos que se disponga de una distribución de la proporción de lluvia medida en el lugar. Cada valor de proporción de lluvia arrojará su propio valor de pérdidas de transmisión, las cuales, en el caso de baja proporción de lluvia disminuyen a medida que ésta aumenta, a causa del aumento de reflectividad. Pero para un volumen común por debajo de la altura de lluvia, la atenuación debida a la lluvia también aumenta al aumentar la proporción de lluvia, y puede incluso superar la influencia de reflectividad creciente. De ahí que las pérdidas de transmisión mínimas (en un trayecto por debajo de la altura de lluvia) se determinen para una tasa de lluvia intermedia que disminuya a medida que aumente la frecuencia. Por ello, la conversión de las pérdidas de transmisión en función de la proporción de lluvia en una distribución acumulativa requiere un paso adicional en la predicción (véase el § 5.3).

CUADRO 8

Distribución acumulada de la altura de lluvia, con respecto al valor medio

Diferencia de altura de lluvia (km)	Probabilidad de exceso (%)
-2,125	100,0
-1,875	99,1
-1,625	96,9
-1,375	91,0
-1,125	80,0
-0,875	68,5
-0,625	56,5
-0,375	44,2
-0,125	33,5
0,0	28,5
0,125	24,0
0,375	16,3
0,625	10,2
0,875	6,1
1,125	3,4
1,375	1,8
1,625	0,9

Se utiliza una aproximación de «haz estrecho» en la que se supone que uno de los haces de antena (concretamente el de la estación terrena) es mucho más estrecho que el otro (en la proximidad de la intersección), y de este modo los efectos de la ganancia de antena y de anchura de banda se compensan. Sin embargo, debe incluirse la eficacia de la antena de haz estrecho, η_E (si no se da valor alguno, se utilizará un valor por defecto de 0,6).

Se supone que la antena de haz ancho tiene una distribución en forma de campana de Gauss. Para tener en cuenta el efecto del acoplamiento del lóbulo lateral, se simulan los lóbulos laterales de la antena de haz ancho mediante un segundo haz con distribución en forma de campana de Gauss mucho más pequeño y más ancho que el lóbulo principal y superpuesto a él. La ganancia del segundo haz está 1 dB por debajo del pico del lóbulo lateral mayor, y su anchura se elige de tal forma que, en la posición del lóbulo lateral mayor, su ganancia esté 3 dB por debajo de dicho pico. En otras palabras: la ganancia, g^* , y la anchura de los 2 haces laterales de potencia mitad, φ^* , en el diagrama del lóbulo lateral se definen mediante:

$$g^* = g - \left| \delta_g \right| - 1 \quad \text{dB} \quad (70)$$

$$\varphi^* = \sqrt{6} \delta\varphi = 2,45 \delta\varphi \quad (71)$$

donde:

- g : ganancia en dirección axial del lóbulo principal (dB)
- δ_g : ganancia relativa del lóbulo lateral más alto (dB, con relación a g)
- $\delta\varphi$: posición (ángulo fuera de eje) del lóbulo lateral mayor (grados).

La ganancia en el eje del lóbulo principal debe reducirse ligeramente para tener en cuenta el haz de lóbulo lateral superpuesto, de forma que la suma de las dos ganancias corresponda a la ganancia real de la antena.

Se supone que el acoplamiento de polarización de la ecuación (36) es máximo. En la práctica, la dispersión por lluvia es anisótropa y la polarización de la señal interferente dispersa puede ser diferente de la de la antena receptora. En general, la relación entre estas dos polarizaciones será compleja, en función de las polarizaciones de las antenas transmisora y receptora, de la geometría general del sistema y, en cierta medida, de la distribución de las partículas de dispersión. Si un cálculo preliminar de los casos de acoplamiento de haz principal a haz principal, indica la posibilidad de una situación de interferencia, sería posible en teoría evaluar el acoplamiento más exactamente teniendo en cuenta los parámetros arriba indicados.

APÉNDICE 4

AL ANEXO 1

Una aproximación a la función de distribución normal acumulativa inversa para $x \leq 0,5$

La siguiente aproximación a la función de distribución normal acumulativa inversa es válida para $0,000001 \leq x \leq 0,5$ y su error como máximo es 0,00054. Puede utilizarse con confianza para la función de interpolación en la ecuación (13a). Si $x < 0,000001$, lo que implica que $\beta_0 < 0,0001\%$, x debe fijarse a 0,000001. La función $I(x)$ viene entonces dada por:

$$I(x) = \xi(x) - T(x) \quad (72)$$

donde:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (72a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (72b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (72c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (72d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (72e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (72f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (72g)$$

$$D_3 = 0,001308 \quad (72h)$$