

Recomendación UIT-R P.452-18

(08/2023)

Serie P: Propagación de las ondas radioeléctricas

**Procedimiento de predicción para
evaluar la interferencia entre estaciones
situadas en la superficie de la Tierra a
frecuencias superiores a unos 100 MHz**



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 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 <https://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

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

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

Publicación electrónica
Ginebra, 2024

© UIT 2024

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.452-18

Procedimiento de predicción para evaluar la interferencia entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias superiores a unos 100 MHz

(Cuestión UIT-R 208/3)

(1970-1974-1978-1982-1986-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2013-2015-2021-2023)

Cometido

En esta Recomendación se describe un método de predicción para evaluar la interferencia entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias desde unos 0,1 GHz a 50 GHz, teniendo en cuenta los mecanismos de interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros y en cielo despejado.

Palabras clave

Difracción, dispersión debida a los hidrometeoros, dispersión troposférica, interferencia, productos de datos digitales, propagación por conductos

Abreviaturas/Glosario

IDWM Mapa mundial digitalizado de la UIT (*ITU Digitized World Map*)

LoS Visibilidad directa (*line-of-sight*)

Snmm Sobre el nivel medio del mar

Recomendaciones e Informes de la UIT conexos

Recomendación UIT-R S.465

Recomendación UIT-R S.580

Recomendación UIT-R P.676

Recomendación UIT-R F.699

Recomendación UIT-R P.837

Recomendación UIT-R P.838

Recomendación UIT-R P.839

Recomendación UIT-R P.1058

Recomendación UIT-R P.1144

Recomendación UIT-R F.1245

Recomendación UIT-R F.1336

NOTA – Debe utilizarse la edición/revisión más reciente de cada Recomendación/Informe.

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 la interferencia que sean precisos y fiables así como aceptables para todas las partes implicadas;
- c) que las predicciones sobre propagación se aplican a los procedimientos de predicción de la interferencia a menudo necesarios 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

que, en frecuencias superiores a unos 100 MHz, se utilice el procedimiento de predicción de la interferencia que aparece en el Anexo 1 a la presente Recomendación para evaluar las pérdidas de propagación disponibles en trayectos de señal no deseados entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra.

Anexo 1

ÍNDICE

	<i>Página</i>
1	Introducción..... 3
2	Mecanismos de propagación de la interferencia..... 4
3	Predicción de la interferencia en cielo despejado..... 6
3.1	Comentarios generales (Pool: deajo este punto como está, porque, si no, no tiene sentido pasar del 3 al 3.2) 6
3.2	Formulación de una predicción 6
4	Modelos de propagación en cielo despejado 13
4.1	Propagación con visibilidad directa (incluidos los efectos a corto plazo)..... 13
4.2	Difracción 14
4.3	Dispersión troposférica..... 21
4.4	Propagación por conductos y por reflexión en las capas 22
4.5	Predicción general 24
4.6	Cálculo de pérdidas de transmisión 25
5	Predicción de la interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros 27
5.1	Base teórica de la pérdida de transmisión debida a la dispersión por hidrometeoros 28
5.2	Parámetros de entrada del modelo 29

5.3 Pasos para aplicar el algoritmo de dispersión por hidrometeoros	32
Adjunto 1 al Anexo 1 – Datos radiometeorológicos necesarios para el procedimiento de predicción con cielo despejado.....	46
1 Introducción.....	46
2 Mapas sobre la variación vertical de los datos de refracción radioeléctrica y la refracción en la superficie.....	46
Adjunto 2 al Anexo 1 – Análisis del perfil de trayecto.....	47
1 Introducción.....	47
2 Construcción del perfil del trayecto.....	47
3 Longitud del trayecto.....	49
4 Clasificación del trayecto	49
5 Obtención de los parámetros a partir del perfil del trayecto.....	50
5.1 Trayectos transhorizonte y trayectos con visibilidad directa.....	50
Adjunto 3 al Anexo 1 – Una aproximación a la función de distribución normal acumulativa inversa para $x \leq 0,5$	55

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 terrenales y Tierra-espacio existentes, es importante estar en condiciones de predecir con una precisión razonable la interferencia potencial que pueda existir entre ellos, utilizando predicciones de propagación y modelos de predicción aceptables a todas las partes implicadas, y de precisión y fiabilidad demostradas.

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 tipos de problemas de interferencia más importantes, a saber el de las situaciones en las que hay posibilidad de interferencia entre estaciones radioeléctricas ubicadas en la superficie de la Tierra.

Los modelos indicados en esta Recomendación se aplican bajo la hipótesis de que el transmisor interferente y el receptor interferido funcionan dentro de la capa de superficie de la atmósfera. El uso de alturas de antena extremadamente elevadas para simular funcionamientos tales como los sistemas aeronáuticos no son adecuados para estos modelos. El procedimiento de predicción se ha probado para estaciones de radiocomunicaciones que funcionan en la gama de frecuencias de unos 0,1 GHz a 50 GHz.

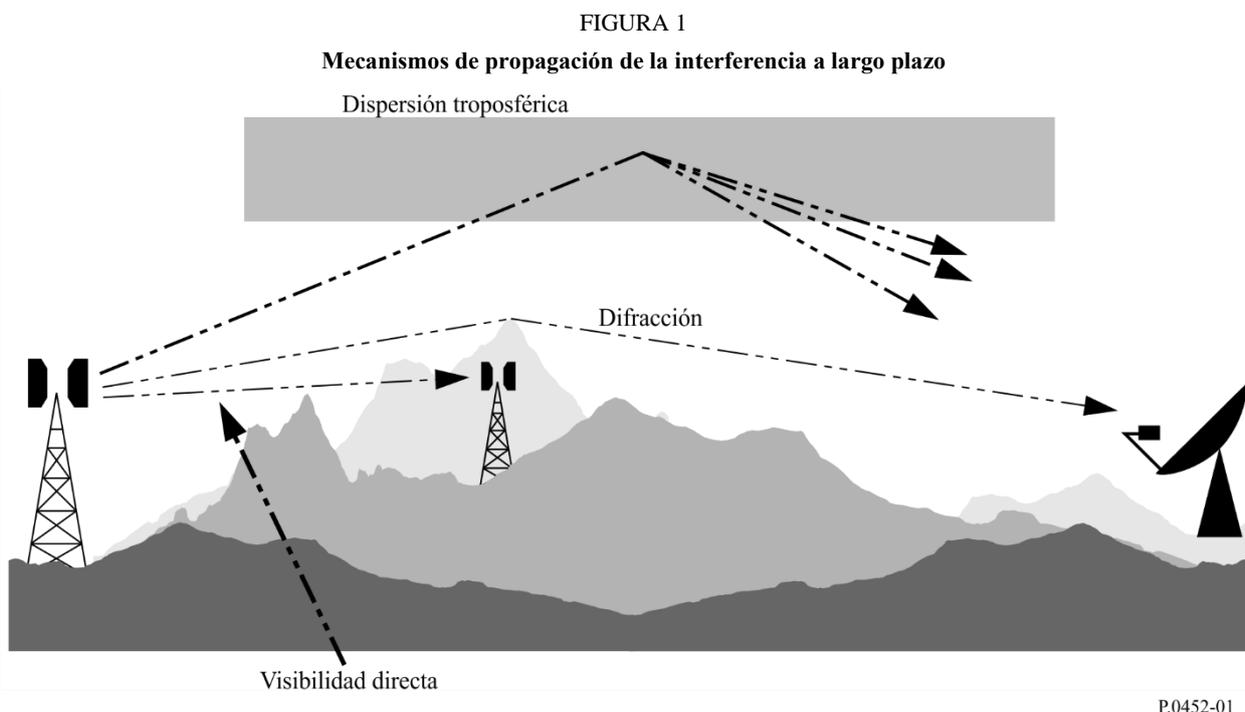
Los modelos de esta Recomendación están diseñados para calcular pérdidas de propagación no rebasadas durante porcentajes de tiempo en la gama $0,001 \leq p \leq 50\%$. Esta hipótesis no implica que las máximas pérdidas aparezcan con $p = 50\%$.

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.

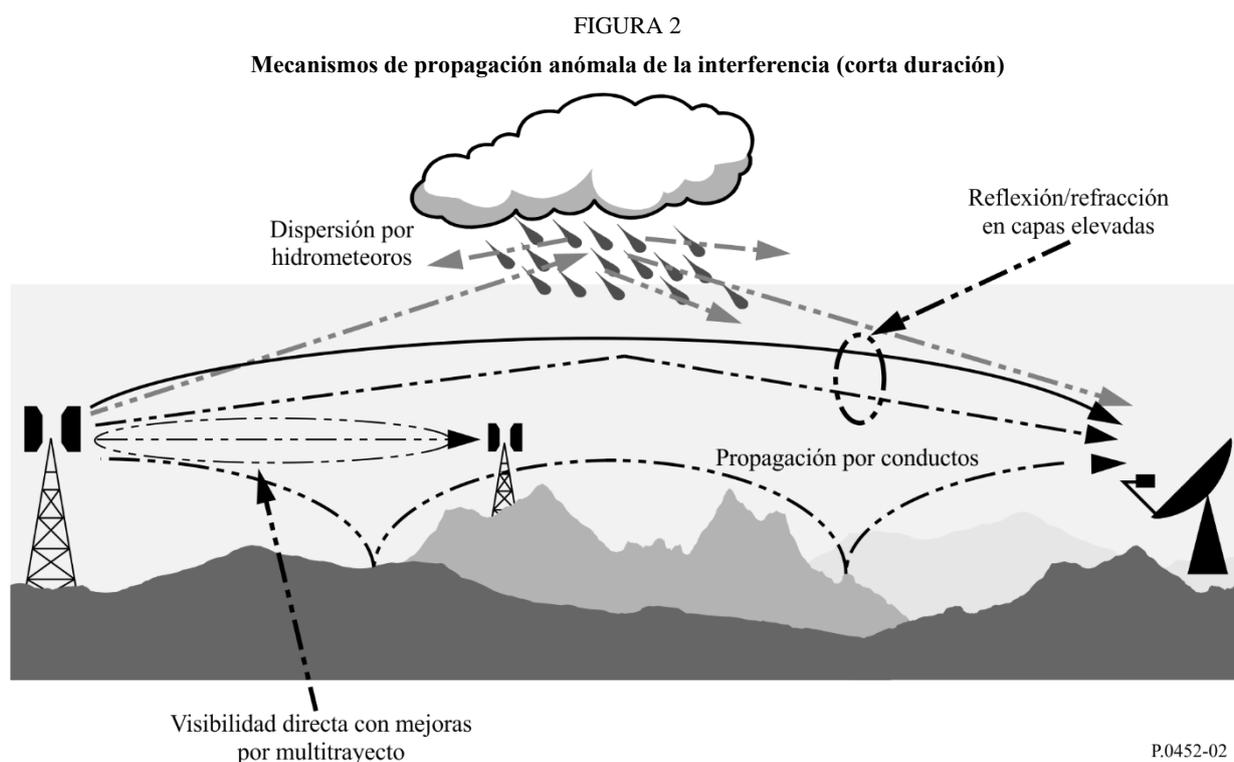
2 Mecanismos de propagación de la interferencia

La propagación de la interferencia 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 transmisión 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 que pueden implantarse. La capacidad de predicción de la difracción debe ser tal que permita incluir las situaciones de terreno liso, de obstáculos discretos, de terreno irregular (no estructurado) y de ocupación del suelo.
- *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): Este es el mecanismo de propagación de corta duración más importante que puede cursar interferencia 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. El enfoque aplicado en este procedimiento ha consistido en definir métodos totalmente distintos para la predicción de la interferencia debida a la dispersión por hidrometeoros y en cielo despejado, según se describen respectivamente en los § 4 y 5.

El método correspondiente al cielo despejado consiste en usar modelos distintos para la difracción, la reflexión en capas/por conductos, y la dispersión troposférica. Los tres modelos se aplican en cada caso, independientemente de que el trayecto sea con visibilidad directa o transhorizonte. Luego se combinan los resultados en una predicción global utilizando una técnica de fusión que asegura para cualquier distancia de trayecto y porcentaje de tiempo dados que la amplificación de la señal en el modelo de línea de visibilidad directa teórico equivalente es la más alta que se puede alcanzar.

3 Predicción de la interferencia en cielo despejado

3.1 Comentarios generales (Pool: dejo este punto como está, porque, si no, no tiene sentido pasar del 3 al 3.2)

Los tres modelos independientes utilizan el método del cielo despejado, pero luego se combinan los resultados obtenidos, procedimiento en el cual se tienen en cuenta los cuatro tipos básicos de propagación:

- *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, ocupación del suelo y subtrayecto);
- *dispersión troposférica*;
- *propagación anómala* (propagación por conductos y por reflexión/refracción en las capas).

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)
Pol	No disponible	Señal; por ejemplo, vertical u horizontal

NOTA 1 – Para distinguir entre las estaciones:

t : estación interferente

r : estación interferida.

La polarización del Cuadro 1 no es un parámetro con un valor numérico. La información se utiliza en el § 4.2.2.1 en conexión con las ecuaciones (30a), (30b) y (31).

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 , del porcentaje de tiempo del mes más desfavorable, p_w , para la latitud del centro del trayecto, φ , utilizando:

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

donde:

ω : fracción de trayecto sobre el agua (véase el Cuadro 4).

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

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 de la 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. Obsérvese 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 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. 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:

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

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_{lm} : 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.

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

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 7 800 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, los cálculos según este procedimiento deben basarse en el mapa mundial digitalizado de la UIT (IDWM) que está disponible en la BR. Si todos los puntos del trayecto se encuentran al menos a 50 km del mar o de otras masas importantes de agua, sólo se aplica a la categoría de aguas interiores.

Si la información sobre la zona se almacena en puntos sucesivos a lo largo del trayecto radioeléctrico, debe suponerse que los cambios se producen a medio camino de los puntos con distintos códigos de zona.

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 físico promedio de la Tierra de $a = 6\,371$ km, el valor mediano del radio efectivo de la Tierra, a_e , puede determinarse de la siguiente manera:

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

El radio efectivo de la Tierra rebasado durante el $\beta_0\%$ del tiempo, a_β , queda determinado por:

$$a_\beta = k_\beta a \quad \text{km} \quad (6b)$$

donde $k_\beta = 3,0$ es una estimación del factor del radio efectivo de la Tierra excedido durante el $\beta_0\%$ del tiempo.

El radio efectivo de la Tierra, a_p , se afijará al valor a_e durante el 50% del tiempo y al valor a_β durante el $\beta_0\%$ del tiempo en los § 4.2.1 y 4.2.2.

Paso 4: Perfil del trayecto radioeléctrico

Los perfiles de trayecto utilizados en el método que se describe a continuación requieren datos específicos del trayecto relativos al terreno (tierra llana) y a las categorías de ocupación del suelo específicas del trayecto (cobertura del terreno) a lo largo del trayecto. Este método comprende:

- la elaboración de un perfil del terreno utilizando las alturas reales del terreno;
- con base en las categorías de ocupación del suelo, la adición de las alturas representativas de la ocupación del suelo al perfil del terreno.

Si se aplica este método para calcular la pérdida por difracción utilizando el perfil del terreno sin la ocupación del suelo, dicha pérdida se subestimarán en entornos obstruidos, a diferencia de lo que sucede con la representación combinada de terreno y ocupación del suelo. Este método se ha elaborado y validado con datos digitales del terreno, combinando tales datos con las categorías de ocupación del suelo estadísticamente representativas, en lugar de utilizar de forma directa datos sobre la superficie del terreno, cuyas alturas comprenden obstáculos sin distinción explícita entre terreno y obstáculo. Es importante señalar que la pérdida por difracción puede sobreestimarse si los perfiles del terreno incluyen datos sobre la superficie del terreno. Si se dispone de datos precisos sobre la superficie del terreno, podrían considerarse otras técnicas, como el trazado de rayos en 3D, en la que se contemplaría el efecto de la difracción alrededor de los edificios, para obtener una estimación más precisa de las pérdidas por propagación.

A fin de poder aplicar el método de predicción de la propagación es necesario contar previamente con un perfil del trayecto radioeléctrico. El perfil debe contener información sobre la altura del terreno (tierra llana) y las altura de la ocupación del suelo (cobertura del terreno) a lo largo del trayecto.

Conviene almacenar la información en tres matrices con el mismo número de valores $n + 1$, como se indica a continuación:

$$d_i : \text{distancia del } i\text{-ésimo punto del perfil al transmisor (km)} \quad (6c)$$

$$h_i : \text{altura de terreno del } i\text{-ésimo punto del perfil sobre el nivel del mar (m)} \quad (6d)$$

$$g_i = \begin{cases} h_i + \text{ altura representativa de la ocupación del suelo para el } i\text{-ésimo punto del perfil (m)} & \text{para } i = 1, \dots, n - 1 \\ h_0 & \text{para } i = 0 \\ h_n & \text{para } i = n \end{cases} \quad (6e)$$

donde:

$$i : 0, 1, 2, \dots, n = \text{índice del punto del perfil}$$

$$n + 1 : \text{número de puntos en el perfil.}$$

Ha de haber al menos un punto del perfil intermedio entre el transmisor y el receptor. De esta forma, n deberá ser ≥ 2 . Un número tan pequeño de puntos sólo es adecuado para trayectos cortos, del orden de 1 km o menos.

Cabe señalar que el primer punto del perfil se encuentra en el transmisor. Esto significa que d_0 es cero y que h_0 es la elevación del terreno en el emplazamiento del transmisor, en metros sobre el nivel del mar. De la misma forma, el n -ésimo punto del perfil se encuentra en el receptor, por lo que d_n es la longitud del trayecto en km y h_n es la elevación del terreno en el emplazamiento del receptor, en metros sobre el nivel del mar.

No se da ninguna distancia específica entre puntos de perfil. Suponiendo que los perfiles procedan de conjuntos de datos digitales sobre la elevación del terreno y la ocupación del suelo (obstáculos), la distancia adecuada será, típicamente, similar a la separación entre puntos de los conjuntos de datos de origen de resolución similar entre sí. No es necesario que los puntos del perfil sean equidistantes, pero es deseable que la distancia que los separa sea similar en todo el perfil y no sea inferior a 30 m.

Los conjuntos utilizados para los cálculos comprenden las distancias, d_i , las alturas del terreno, h_i , determinadas mediante la ecuación (6d), y las alturas del terreno con las alturas representativas de la ocupación del suelo, g_i , obtenidas mediante la ecuación (6e). La altura representativa de la ocupación del suelo no debe añadirse a las alturas del terreno en el transmisor y el receptor, ni cuando la distancia desde el transmisor o el receptor sea inferior a 50 m. Así, g_0 es la altura del terreno en el transmisor en metros sobre el nivel del mar, g_n es la altura del terreno en el receptor en metros sobre el nivel del mar y g_i es la altura del terreno en metros sobre el nivel del mar para todos los puntos a una distancia igual o inferior a 50 m con respecto al transmisor o al receptor.

La «altura representativa de la ocupación del suelo» que se menciona en la ecuación (6e) se refiere a la información de altura estadística relacionada con la clasificación de la ocupación del suelo, por ejemplo, vegetación o construcciones, es decir, un único valor de altura asignado a la superficie del suelo/clase de ocupación. La inclusión de las alturas representativas de los obstáculos en un perfil se basa en la hipótesis de que las alturas h_i representan la superficie desnuda de la Tierra. Si el trayecto radioeléctrico pasa por una zona boscosa o una urbanización donde existe difracción u obstrucción de un subtrayecto, en general la altura efectiva del perfil será superior ya que la señal radioeléctrica viajará por encima de los obstáculos. Así, puede obtenerse una representación más adecuada del perfil añadiendo alturas a fin de tener en cuenta los obstáculos.

La adición adecuada no es necesariamente de orden físico, como por ejemplo la altura de los tejados en el caso de las construcciones. Cuando existen huecos entre obstáculos, como se aprecia en la onda radioeléctrica, una parte de la energía podrá viajar entre ellos en lugar de por encima de ellos. En esta tesitura, la presencia de obstáculos podría aumentar la pérdida por difracción, pero no tanto como para elevar el perfil hasta la altura de los obstáculos físicos.

Esto se aplica en especial a zonas urbanas de edificios altos. Las categorías como «zona urbana densa» o «zona urbana de edificios altos» suelen estar vinculadas a construcciones de 30 m o más de altura. Sin embargo, en algunas zonas de edificios altos hay grandes espacios entre dichas construcciones, y cabe la posibilidad de que haya trayectos de pérdida baja que pasen alrededor de los edificios en lugar de hacerlo por encima de los tejados. En estos casos, puede ser apropiado utilizar valores más pequeños de las alturas representativas en lugar de las alturas físicas de la ocupación del suelo.

En el otro extremo, incluso en zonas calificadas como «abiertas» o «rurales», no es habitual que el terreno esté totalmente desnudo, es decir, que no haya objetos que puedan influir en las pérdidas por propagación. Así, en muchos casos podrían ser adecuados valores pequeños de las alturas representativas en vez de cero.

Así, la altura representativa de la ocupación del suelo no sólo depende de la altura física típica de los obstáculos, sino también de la distancia horizontal entre los objetos y de los huecos que existen entre ellos. No hay una norma aceptada sobre qué entiende en términos físicos cada país por las distintas categorías de ocupación del suelo, por ejemplo «urbana». Donde esté disponible, debe utilizarse información de la altura representativa del obstáculo basada en estadísticas locales de la altura de los obstáculos o en otras fuentes. El Cuadro 3 sugiere una serie de valores por defecto para las alturas representativas de la ocupación del suelo que pueden usarse en ausencia de información específica de la región/país.

CUADRO 3

Valores por defecto para las alturas de la ocupación del suelo

Categoría de la ocupación del suelo	Altura representativa de la ocupación del suelo (m)
	Añadir al perfil de la ecuación (6e) para $i = 1$ a $n-1$
Agua/mar	0
Abierta/rural	0
Suburbana	10
Urbana/árboles/bosque	15
Urbana densa	20

Los valores de una serie de parámetros relacionados con el trayecto que son necesarios para el cálculo y que se indican en el Cuadro 4, 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 (6a). En el Adjunto 2 del Anexo 1 figura información sobre la obtención, determinación y análisis del perfil del trayecto.

CUADRO 4

Parámetros resultantes del análisis del perfil de trayecto

Parámetro	Descripción
d	Distancia del trayecto a lo largo del círculo máximo (km)
d_{lt}, d_{lr}	Distancia desde las antenas de transmisión y de recepción a sus respectivos horizontes (km).
θ_t, θ_r	Para un trayecto transhorizonte, los ángulos de elevación de las antenas de transmisión y de recepción respecto del horizonte, respectivamente (mrad). Para un trayecto de visibilidad directa, cada uno se fija al ángulo de elevación del otro terminal
θ	Distancia angular del trayecto (mrad)
h_{ts}, h_{rs}	Altura del centro de la antena sobre el nivel medio del mar (m)
h_{te}, h_{re}	Alturas efectivas de las antenas sobre el terreno (m) para el modelo de reflexión en capas/por conductos (para definiciones véase el Adjunto 2 del Anexo 1). Téngase en cuenta que se utilizan los mismos nombres para las alturas efectivas en el modelo de difracción, pero h_{te} y h_{re} tiene definiciones diferentes en el modelo de difracción. Véase las ecuaciones (39a) y (39b)
d_b	Longitud combinada de las secciones del trayecto sobre el agua (km)
ω	Fracción del trayecto total sobre el agua: $\omega = dB/d \quad (7)$ siendo d la distancia de círculo máximo (km) calculada utilizando la ecuación (134). Para trayectos realizados totalmente sobre tierra $\omega = 0$
$d_{ct,cr}$	Distancia sobre tierra desde las antenas transmisora y receptora hasta la costa, a lo largo del trayecto de círculo máximo de la interferencia (km). Se fija en cero en el caso de un terminal ubicado en un barco o en una plataforma marítima d_{ct}

4 Modelos de propagación en cielo despejado

La pérdida de transmisión básica, L_b , (dB), no rebasada durante el porcentaje de tiempo anual requerido, p , se evalúa tal como se describe en los siguientes subpárrafos.

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

Lo siguiente debería evaluarse tanto para los trayectos con visibilidad directa como transhorizonte.

Pérdida de transmisión básica debida a la propagación en el espacio libre y la atenuación por gases atmosféricos:

$$L_{bfs_g} = 92,4 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d_{fs} + A_g(d_{fs}) \quad \text{dB} \quad (8)$$

donde:

f : frecuencia (GHz)

d_{fs} : distancia entre las antenas de transmisión y recepción (km):

$$d_{fs} = \sqrt{d^2 + \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{1000}\right)^2} \quad (8a)$$

d : distancia total del trayecto de círculo máximo (km)

h_{ts} : altura de la antena de transmisión sobre el nivel del mar (m)

h_{rs} : altura de la antena de recepción sobre el nivel del mar (m)

A_g : absorción gaseosa total (dB):

$$A_g(d_{fs}) = [\gamma_0 + \gamma_w(\rho)] \cdot d_{fs} \quad \text{dB} \quad (9)$$

donde:

$\gamma_0, \gamma_w(\rho)$: 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:

$$\rho = 7,5 + 2,5\omega \quad \text{g/m}^3 \quad (9a)$$

ω : fracción del trayecto total sobre el agua.

Correcciones por los efectos del enfoque y el multitrayecto en los porcentajes de tiempo p y β_0 :

$$E_{sp} = 2,6 [1 - \exp(-0,1 \{d_{lt} + d_{lr}\})] \log_{10} (p / 50) \quad \text{dB} \quad (10a)$$

$$E_{s\beta} = 2,6 [1 - \exp(-0,1 \{d_{lt} + d_{lr}\})] \log_{10} (\beta_0 / 50) \quad \text{dB} \quad (10b)$$

Pérdida de transmisión básica no rebasada durante el porcentaje de tiempo, $p\%$, debido a la propagación con visibilidad directa:

$$L_{b0p} = L_{bfs_g} + E_{sp} \quad \text{dB} \quad (11)$$

Pérdida de transmisión básica no rebasada durante el porcentaje de tiempo, $\beta_0\%$, debido a la propagación con visibilidad directa (independientemente de si el trayecto es en realidad o no de visibilidad directa):

$$L_{b0\beta} = L_{bfs_g} + E_{s\beta} \quad \text{dB} \quad (12)$$

4.2 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 lo tanto, se supone que la pérdida de difracción no rebasada para $p < \beta_0\%$ es la misma que en el caso $p = \beta_0\%$ del tiempo.

Teniendo esto en cuenta, en el caso general en que $p < 50\%$ el cálculo de la difracción debe realizarse dos veces, en primer lugar para el valor mediano del factor del radio efectivo de la Tierra k_{50} (ecuación (5)) y en el segundo lugar para el valor límite del factor del radio efectivo de la Tierra k_β igual a 3. Este segundo cálculo proporciona una estimación de las pérdidas por difracción no rebasadas durante el $\beta_0\%$ del tiempo, obteniéndose β_0 de la ecuación (2).

La pérdida por difracción L_{dp} no rebasada durante el $p\%$ del tiempo, para $0,001\% \leq p \leq 50\%$, se calcula mediante un procedimiento de limitación o interpolación descrito en el § 4.2.4.

El modelo de difracción permite calcular los siguientes valores que se requieren en el § 4.5:

L_{dp} : pérdida de difracción no rebasada durante el tiempo $p\%$

L_{bd50} : pérdida de transmisión básica media asociada a la difracción

L_{bd} : pérdida de difracción básica asociada a la difracción no rebasada durante el $p\%$ del tiempo.

Las pérdidas por difracción se calcula mediante un método que combina la construcción de Bullington y la difracción en una Tierra esférica. La parte del método correspondiente a la construcción de Bullington amplía la construcción básica de Bullington para controlar la transición entre las condiciones de espacio libre y las obstruidas. Esta parte del método se emplea dos veces: para el perfil real del trayecto y para un trayecto liso de altura cero con altura modificada de la antena, lo que se conoce como altura efectiva de la antena. La altura efectiva de la antena también se emplea para calcular la pérdida por difracción en una Tierra esférica. El resultado final se obtiene mediante una combinación de las tres pérdidas calculadas de acuerdo con el método anterior. Para un trayecto perfectamente liso, la pérdida final por difracción será el resultado del modelo de Tierra esférica.

Este método permite hacer una estimación de la pérdida de difracción para todos los tipos de trayecto, con inclusión de trayectos sobre mar o sobre superficies interiores o litorales costeros, e independientemente del hecho de que la superficie sea plana o accidentada y de si la propagación es con visibilidad directo o transhorizonte.

En este método se utiliza asimismo de manera generalizada una aproximación de la pérdida de difracción en un solo filo de cuchillo como una función del parámetro adimensional, v , determinada por:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log_{10} \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad (13)$$

Cabe señalar que $J(-0,78) \approx 0$, y que esto define el límite inferior al cual se debe utilizar esta aproximación. $J(v)$ se fija en cero para $v < -0,78$.

El cálculo de la difracción total se describe en las subsecciones siguientes:

En el § 4.2.1 se describe la parte correspondiente a la construcción de Bullington del método de difracción. Para cada cálculo de la difracción para un radio efectivo de la Tierra determinado, se emplea este método dos veces. La segunda vez, se modifican las alturas de las antenas y se asigna un valor de cero a todas las alturas de los perfiles.

En el § 4.2.2 se describe la parte correspondiente a la difracción en la Tierra esférica del modelo de difracción, que se emplea con las mismas alturas de antenas que en la segunda utilización de la parte correspondiente a la construcción de Bullington, en el § 4.2.1.

En el § 4.2.3 se describe cómo se emplean conjuntamente los métodos descritos en el § 4.2.1 y en el § 4.2.2 para efectuar el cálculo completo de la difracción para un radio efectivo de la Tierra determinado. Por la manera como se utilizan las partes correspondientes a la construcción de Bullington y a la Tierra esférica, el cálculo completo se conoce como modelo «delta-Bullington».

En el § 4.2.4 se describe el cálculo completo para las pérdidas por difracción no rebasadas durante un porcentaje de tiempo $p\%$ determinado.

4.2.1 La parte correspondiente a la construcción de Bullington del cálculo de la difracción

En las ecuaciones siguientes, las pendientes se calculan en m/km en relación con la línea base que une el nivel del mar en el transmisor con el nivel del mar en el receptor. La distancia y la altura (incluida la altura de la ocupación del suelo representativa) del i -ésimo punto del perfil son d_i kilómetros y g_i metros sobre el nivel del mar, respectivamente, i adopta valores de 0 a $n + 1$, siendo n el número de puntos de perfil, y la longitud del trayecto completo es d kilómetros. Por razones de conveniencia, los terminales situados al inicio y al final del perfil reciben el nombre de transmisor y receptor, y su altura sobre el nivel del mar en metros es h_{ts} y h_{rs} , respectivamente. La curvatura efectiva de la Tierra C_e km^{-1} viene dada por $1/a_p$, donde a_p es el radio efectivo de la Tierra en

kilómetros. La longitud de onda en metros se representa mediante λ . Los valores que deben utilizarse para a_p están en el § 4.2.4.

Es necesaria cautela cerca de los terminales para garantizar que la adición de las alturas representativas de la ocupación del suelo local no generen un incremento irrealista en los ángulos de elevación con respecto al horizonte, según se ven desde cada antena.

Se determina el perfil intermedio con la mayor pendiente de la línea que va del transmisor al punto.

$$S_{tim} = \max \left[\frac{g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (14)$$

donde el índice del perfil i adopta valores situados entre 1 y $n - 1$.

Se calcula la pendiente de la línea que va del transmisor al receptor, suponiendo un trayecto con visibilidad directa (LoS):

$$S_{tr} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} \quad \text{m/km} \quad (15)$$

Ahora, deben considerarse dos casos.

Caso 1. El trayecto es LoS

Si $S_{tim} < S_{tr}$, el trayecto es LoS.

Se determina el punto intermedio del perfil con el mayor parámetro de difracción v :

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (16)$$

donde el índice del perfil i adopta valores situados entre 1 y $n - 1$.

En este caso, la pérdida en filo de cuchillo para el punto de Bullington viene dada por:

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{dB} \quad (17)$$

donde la función J viene dada por la ecuación (13) para un valor de v_b mayor que $-0,78$, y es cero de otro modo.

Caso 2. El trayecto es transhorizonte

Si $S_{tim} \geq S_{tr}$, el trayecto es transhorizonte.

Se determina el punto intermedio del perfil con la mayor pendiente de la línea que va del receptor al punto.

$$S_{rim} = \max \left[\frac{g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{rs}}{d - d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (18)$$

donde el índice del perfil i adopta valores situados entre 1 y $n - 1$.

Se calcula la distancia del punto de Bullington desde el transmisor:

$$d_{bp} = \frac{h_{rs} - h_{ts} + S_{rim}d}{S_{tim} + S_{rim}} \quad \text{km} \quad (19)$$

Se calcula el parámetro de difracción, v_b , para el punto de Bullington:

$$v_b = \left[h_{ts} + S_{tim} d_{bp} - \frac{h_{ts}(d-d_{bp}) + h_{rs} d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_{bp}(d-d_{bp})}} \quad (20)$$

En este caso, la pérdida en filo de cuchillo para el punto de Bullington viene dada por:

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{dB} \quad (21)$$

Para L_{uc} calculado según la ecuación (17) o la (21), las pérdidas por difracción debida a la construcción de Bullington para el trayecto viene ahora dada por:

$$L_{bull} = L_{uc} + [1 - \exp(-L_{uc}/6)](10+0,02 d) \quad \text{dB} \quad (22)$$

4.2.2 Pérdida por difracción de la Tierra esférica

Las pérdidas por difracción de la Tierra esférica para alturas de antena h_{te} y h_{re} (m), L_{dsph} , se calcula de la manera siguiente.

Se calcula la distancia marginal de LoS para un trayecto liso:

$$d_{los} = \sqrt{2a_p} \cdot (\sqrt{0,001h_{te}} + \sqrt{0,001h_{re}}) \quad \text{km} \quad (23)$$

Los valores que deben utilizarse para a_p están en el § 4.2.4. Las alturas efectivas de antena h_{te} y h_{re} están definidas en las ecuaciones (39a) y (39b).

Si $d \geq d_{los}$, se calcula la pérdida por difracción utilizando el método descrito en el § 4.2.2.1 *infra* para $a_{dfi} = a_p$ a fin de obtener L_{dfi} , y se fija L_{dsph} igual a L_{dfi} . No se necesitan más cálculos para la difracción de la Tierra esférica.

De no ser así, se continúa de la manera siguiente:

Se calcula la altura libre de obstáculos más pequeña entre el trayecto de la Tierra curva y el rayo entre las antenas, h_{se} , que viene dado por:

$$h_{se} = \frac{\left(h_{te} - 500 \frac{d_{se1}^2}{a_p} \right) d_{se2} + \left(h_{re} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_{se1}}{d} \quad \text{m} \quad (24)$$

donde:

$$d_{se1} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{km} \quad (25a)$$

$$d_{se2} = d - d_{se1} \quad \text{km} \quad (25b)$$

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right\} \quad (25c)$$

donde la función arccos devuelve un ángulo en radianes:

$$c = \frac{h_{te} - h_{re}}{h_{te} + h_{re}} \quad (25d)$$

$$m = \frac{250d^2}{a_p(h_{te} + h_{re})} \quad (25e)$$

Se calcula el trayecto libre de obstáculos requerido para una pérdida por difracción de cero, h_{req} , que viene dado por:

$$h_{req} = 17,456 \sqrt{\frac{d_{se1} \cdot d_{se2} \cdot \lambda}{d}} \quad \text{m} \quad (26)$$

Si $h_{se} > h_{req}$, la pérdida por difracción de la Tierra esférica L_{dsph} son cero. No se necesitan más cálculos de la difracción de la Tierra esférica.

De no ser así, se continúa de la manera siguiente:

Se calcula el radio efectivo modificado de la Tierra, a_{em} , que proporciona un LoS marginal a una distancia d que viene dada por:

$$a_{em} = 500 \left(\frac{d}{\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}}} \right)^2 \quad \text{km} \quad (27)$$

Se utiliza el método en el § 4.2.2.1 para $a_{dft} = a_{em}$ a fin de obtener L_{dft} .

Si L_{dft} es negativo, la pérdida por difracción de la Tierra esférica L_{dsph} es cero, y no se necesitan más cálculos de la difracción de la Tierra esférica.

De no ser así, se continúa de la manera siguiente:

Se calcula la pérdida por difracción de la Tierra esférica por interpolación:

$$L_{dsph} = [1 - h_{se}/h_{req}]L_{dft} \quad \text{dB} \quad (28)$$

4.2.2.1 Parte correspondiente al primer término de las pérdidas por difracción de la Tierra esférica

En esta subsección se ofrece el método para calcular la difracción de la Tierra esférica utilizando solamente el primer término de la serie de residuos. Forma parte del método global de difracción descrito en el § 4.2.2 a fin de determinar con el primer término de la pérdida por difracción L_{dft} para un valor concreto del radio efectivo de la Tierra a_{dft} . El valor de a_{dft} que debe usarse se proporciona en el § 4.2.2.

Se determinan las propiedades eléctricas del terreno típicas para la tierra, con un valor de la permitividad relativa $\epsilon_r = 22,0$ y un valor de la conductividad $\sigma = 0,003$ S/m y se calcula L_{dft} utilizando las ecuaciones (30) a (37) y el resultado recibe el nombre de $L_{dftland}$.

Se establecen las propiedades eléctricas del terreno típicas para el mar, con un valor de la permitividad relativa $\epsilon_r = 80,0$ y un valor de la conductividad $\sigma = 5,0$ S/m y se calcula L_{dft} utilizando las ecuaciones (30) a (37) y el resultado recibe el nombre de L_{dftsea} .

El primer término de las pérdidas por difracción de la Tierra esférica viene dado ahora por:

$$L_{dft} = \omega L_{dftsea} + (1 - \omega)L_{dftland} \quad \text{dB} \quad (29)$$

siendo ω la fracción del trayecto sobre el mar.

Se empieza el cálculo, que debe realizarse dos veces, de la manera anteriormente descrita:

Factor normalizado de admitancia en la superficie para polarización horizontal y vertical:

$$K_H = 0,036 (a_{dft} f)^{-1/3} \left[(\epsilon_r - 1)^2 + (18 \sigma / f)^2 \right]^{-1/4} \quad (\text{horizontal}) \quad (30a)$$

y:

$$K_V = K_H \left[\epsilon_r^2 + (18 \sigma / f)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{vertical}) \quad (30b)$$

Si el vector de polarización contiene las componentes horizontal y vertical, por ejemplo circular o inclinada, se descompone en dichas componentes horizontal y vertical, se calcula cada una por separado a partir de las ecuaciones (30a) y (30b) y se combinan los resultados por un vector suma de la amplitud del campo. En la práctica, esta descomposición no será normalmente necesaria debido a que por encima de 300 MHz puede utilizarse un valor 1 para β_{dft} en la ecuación (31).

Se calcula el parámetro de polarización/superficie de la Tierra:

$$\beta_{dft} = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4} \quad (31)$$

donde K es K_H o K_V , según la polarización.

Distancia normalizada:

$$X = 21,88 \beta_{dft} \left(\frac{f}{a_{dft}^2} \right)^{1/3} d \quad (32)$$

Alturas normalizadas del transmisor y el receptor:

$$Y_t = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{te} \quad (33a)$$

$$Y_r = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{re} \quad (33b)$$

Se calcula el término de distancia, que viene dado por:

$$F_X = \begin{cases} 11 + 10 \log_{10}(X) - 17,6X & \text{para } X \geq 1,6 \\ -20 \log_{10}(X) - 5,6488X^{1,425} & \text{para } X < 1,6 \end{cases} \quad (34)$$

Se define una función de la altura normalizada, que viene dada por:

$$G(Y_{t/r}) = \begin{cases} 17,6(B_{t/r} - 1,1)^{0,5} - 5 \log_{10}(B_{t/r} - 1,1) - 8 & \text{para } B_{t/r} > 2 \\ 20 \log_{10}(B_{t/r} + 0,1B_{t/r}^3) & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (35)$$

donde:

$$B_t = \beta_{dft} Y_t \quad (36a)$$

$$B_r = \beta_{dft} Y_r \quad (36b)$$

Si $G(Y)$ es menor que $2 + 20 \log_{10} K$, se limita el valor de $G(Y)$ de modo que $G(Y) = 2 + 20 \log_{10} K$.

El primer término de la pérdida por difracción de la Tierra esférica viene ahora dado por:

$$L_{dfi} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{dB} \quad (37)$$

4.2.3 Modelo completo de pérdida por difracción «delta-Bullington»

Se utiliza el método descrito en § 4.2.1 para la altura del perfil del trayecto (g_i) y la altura de las antenas. Se establecen las pérdidas por difracción resultantes de acuerdo con la parte correspondiente a la construcción de Bullington para el trayecto real, $L_{bulla} = L_{bull}$, tal y como viene dado en la ecuación (22).

Se utiliza el método descrito en § 4.2.1 por segunda vez, con todas las alturas del perfil, g_i , con un valor de cero, y la altura modificada de la antena que viene dada por:

$$h'_{ts} = h_{ts} - h_{std} \quad \text{m (snmm)} \quad (38a)$$

$$h'_{rs} = h_{rs} - h_{srd} \quad \text{m (snmm)} \quad (38b)$$

siendo la altura de la Tierra lisa en el transmisor y el receptor, h_{std} y h_{srd} , la que se da en el § 5.1.6.3 del Adjunto 2. Se establecen las pérdidas por difracción resultante de acuerdo con la parte correspondiente a la construcción de Bullington para este trayecto liso, $L_{bulls} = L_{bull}$, tal y como viene dado en la ecuación (22).

Se utiliza el método descrito en § 4.2.2 para calcular las pérdidas por difracción de la Tierra esférica L_{dsph} para una longitud del trayecto real de d km y con:

$$h_{te} = h'_{ts} \quad \text{m (snmm)} \quad (39a)$$

$$h_{re} = h'_{rs} \quad \text{m (snmm)} \quad (39b)$$

Las pérdidas por difracción para el trayecto general vienen dadas ahora por:

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \quad \text{dB} \quad (40)$$

4.2.4 Pérdidas por difracción no rebasadas durante un porcentaje de tiempo $p\%$

Se utiliza el método descrito en § 4.2.3 a fin de calcular las pérdidas por difracción L_d para el valor del radio efectivo de la Tierra $a_p = a_\beta$, que viene dado por la ecuación (6a). Se establece las pérdidas por difracción mediana $L_{d50} = L_d$.

Si $p = 50\%$ las pérdidas por difracción no rebasadas durante un porcentaje de tiempo $p\%$, L_{dp} , vienen dadas por L_{d50} , y así se completa el cálculo de la difracción.

Si $p < 50\%$, se procede de la manera siguiente.

Se emplea el método descrito en § 4.2.3 para calcular las pérdidas por difracción L_d para el radio efectivo de la Tierra $a_p = a_\beta$ indicado en la ecuación (6b). Se establecen las pérdidas por difracción no rebasadas para el β_0 del tiempo $L_{d\beta} = L_d$.

La utilización de los dos valores posibles del radio efectivo de la Tierra la determina un factor de interpolación, F_i , basado en la distribución log normal de pérdidas por difracción en la gama $\beta_0\% < p \leq 50\%$, que viene dado por:

$$F_i = \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad \text{si } 50\% > p > \beta_0\% \quad (41a)$$

$$= 1 \quad \text{si } \beta_0\% \geq p \quad (41b)$$

donde $I(x)$ es la función normal acumulativa complementaria inversa. En el Adjunto 3 del presente Anexo figura una aproximación de $I(x)$ fiable para $x < 0,5$.

Las pérdidas por difracción, L_{dp} , no rebasadas durante el $p\%$ de tiempo vienen dadas ahora por:

$$L_{dp} = L_{d50} + F_i (L_{d\beta} - L_{d50}) \quad \text{dB} \quad (42)$$

donde L_{d50} y $L_{d\beta}$ se han definido anteriormente y F_i se define en las ecuaciones (41a) y (41b), dependiendo de los valores de p y β_0 .

El valor mediano de las pérdidas de transmisión básicas correspondientes a la difracción, L_{bd50} , viene dado por:

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{dB} \quad (43)$$

donde L_{bfs} se calcula conforme a la ecuación (8).

Las pérdidas de transmisión básicas correspondientes a la difracción no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo son:

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB} \quad (44)$$

donde L_{b0p} se calcula según la ecuación (11).

4.3 Dispersión troposférica

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} (dB) no excedidas durante cualquier porcentaje de tiempo, p , inferior al 50%, vienen dadas por:

$$L_{bs} = 190 + L_f + 20 \log_{10} d + 0,573\theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1[-\log_{10} (p/50)]^{0,7} \quad \text{dB} \quad (45)$$

siendo:

L_f : pérdidas dependientes de la frecuencia:

$$L_f = 25 \log_{10} f - 2,5 [\log_{10} (f/2)]^2 \quad \text{dB} \quad (45a)$$

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

$$L_c = 0,051 \cdot e^{0,055(G_t + G_r)} \quad \text{dB} \quad (45b)$$

- N_0 : refractividad de la superficie a nivel del mar medida en el punto central de los trayectos, según los mapas del Adjunto 1 del Anexo 1
- A_g : absorción gaseosa derivada de la ecuación (9), utilizando $\rho = 3 \text{ g/m}^3$ para toda la longitud del trayecto.

4.4 Propagación por conductos y por reflexión en las capas

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

$$L_{ba} = A_f + A_d(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (46)$$

siendo:

- A_f : pérdidas totales fijas de acoplamiento entre las antenas y la estructura de propagación anómala dentro de la atmósfera:

$$A_f = 102,45 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} (d_{lt} + d_{lr}) + A_{lf} + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{dB} \quad (47)$$

- A_{lf} : corrección empírica para tener en cuenta el aumento de la atenuación con la longitud de onda en la propagación por conductos

$$A_{lf}(f) = 45,375 - 137,0 \cdot f + 92,5 \cdot f^2 \quad \text{dB} \quad \text{si } f < 0,5 \text{ GHz} \quad (47a)$$

$$A_{lf}(f) = 0,0 \text{ dB} \quad \text{en otro caso}$$

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

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log_{10} \left[1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2} \right] + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & \text{dB para } \theta''_{t,r} > 0 \text{ mrad} \\ 0 & \text{dB para } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ mrad} \end{cases} \quad (48)$$

donde:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \quad (48a)$$

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

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

$$d_{ct, cr} \geq d_{lt, lr} \quad (49)$$

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

$$A_{ct, cr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{para todas las demás condiciones} \quad (49a)$$

Es útil señalar el conjunto limitado de condiciones para las que se necesita la ecuación (49).

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

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{dB} \quad (50)$$

siendo:

γ_d : atenuación específica:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{dB/mrad} \quad (51)$$

θ' : distancia angular (corregida cuando proceda con la ecuación (52a) para poder aplicar el modelo de apantallamiento del emplazamiento de la ecuación (48)):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{mrad} \quad (52)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{para } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \\ 0,1 d_{lt,lr} & \text{para } \theta_{t,r} > 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \end{cases} \quad (52a)$$

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

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log_{10} \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad (53)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log_{10} \beta)^{1,012}} \times e^{-(9,51 - 4,8 \log_{10} \beta + 0,198 (\log_{10} \beta)^2) \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}} \quad (53a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \% \quad (54)$$

μ_2 : corrección por la geometría del trayecto:

$$\mu_2 = \left[\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^\alpha \quad (55)$$

El valor de μ_2 no excederá de 1.

Las alturas efectivas de las antenas h_{te} y h_{re} están definidas en la ecuación (156).

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau \quad (55a)$$

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:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{para } h_m \leq 10 \text{ m} \\ \exp \left[-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6 d_i) \right] & \text{para } h_m > 10 \text{ m} \end{cases} \quad (56)$$

$$d_l = \text{mín}(d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (57)$$

A_g : absorción gaseosa total determinada a partir de las ecuaciones (9) y (9a).

Los términos restantes se han definido en los Cuadros 1 y 2 y en el Adjunto 2 del Anexo 1.

4.5 Predicción general

El procedimiento que se describe a continuación debería aplicarse a los resultados de los cálculos precedentes para todos los trayectos.

Calcular el factor de interpolación, F_j , para tener en cuenta los parámetros de pendiente:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \tanh \left(3,0 \xi \frac{(S_{tim} - S_{tr})}{\Theta} \right) \right) \quad (58)$$

donde:

ξ : parámetro ajustable fijado actualmente en 0,8

$(S_{tim} - S_{tr})$: parámetros de pendiente definidos en las ecuaciones (14) y (15), con la excepción de que en la ecuación (14) se utiliza h_i en lugar de g_i .

Θ : parámetro ajustable fijado actualmente en 0,3.

Calcular un factor de interpolación, F_k , para tener en cuenta la distancia del círculo máximo del trayecto:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \tanh \left(3,0 \kappa \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right) \quad (59)$$

donde:

d : longitud del trayecto sobre el círculo máximo (km) (definido en el Cuadro 4)

d_{sw} : parámetro fijo que determina la gama de distancia de la correspondiente combinación, se fija en 20

κ : parámetro fijo que determina la pendiente de aproximación en los extremos de la gama; se fija en 0,5.

Calcular la pérdida de transmisión básica mínima teórica, $L_{mín0p}$ (dB) correspondiente a la propagación con visibilidad directa y la difracción del subtrayecto sobre el mar.

$$L_{mín0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{para } p < \beta_0 \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{para } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad \text{dB} \quad (60)$$

donde:

L_{b0p} : pérdida de transmisión básica con visibilidad directa teórica no excedida durante el $p\%$ del tiempo, está dada por la ecuación (11)

$L_{b0\beta}$: pérdida de transmisión básica con visibilidad directa teórica no excedida durante el $\beta\%$ del tiempo, está dada por la ecuación (12)

L_{dp} : pérdida por difracción no excedida durante el $p\%$ del tiempo, calculada utilizando el método descrito en el § 4.2

F_i : factor de interpolación de la difracción, dado por la ecuación (41).

Calcular la pérdida de transmisión básica mínima teórica, $L_{\min bap}$ (dB), correspondiente a la visibilidad directa y las mejoras de la señal transhorizonte:

$$L_{\min bap} = \eta \ln \left(\exp \left(\frac{L_{ba}}{\eta} \right) + \exp \left(\frac{L_{b0p}}{\eta} \right) \right) \quad \text{dB} \quad (61)$$

donde:

L_{ba} : pérdida de transmisión básica por conductos y por reflexión en capas no excedida durante el $p\%$ del tiempo, está dada por ecuación (36)

L_{b0p} : pérdida de transmisión básica con visibilidad directa teórica, no excedida durante el $p\%$ del tiempo, está dada por la ecuación (11)

$$\eta = 2,5.$$

Calcular la pérdida de transmisión básica teórica, L_{bda} (dB), asociada a la difracción y a la visibilidad directa o las mejoras por conductos y por reflexión en capas:

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{para } L_{\min bap} > L_{bd} \\ L_{\min bap} + (L_{bd} - L_{\min bap})F_k & \text{para } L_{\min bap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (62)$$

donde:

L_{bd} : pérdida de transmisión básica para la difracción no excedida durante el $p\%$ del tiempo a partir de la ecuación (44)

F_k : factor de interpolación dado por la ecuación (59) de conformidad con el valor de la distancia del trayecto de círculo máximo, d .

Calcular la pérdida de transmisión básica modificada, L_{bam} (dB), que tiene en cuenta la difracción y la visibilidad directa o las mejoras por conductos y por reflexión en capas.

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{\min b0p} - L_{bda})F_j \quad \text{dB} \quad (63)$$

Calcular la pérdida de transmisión básica final no excedida durante el $p\%$ del tiempo, L_b (dB), según queda determinada por:

$$L_b = -5 \log_{10}(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bam}}) \quad \text{dB} \quad (64)$$

4.6 Cálculo de pérdidas de transmisión

El método descrito en los § 4.1 a 4.5 anteriores 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. Cuando se conoce el ángulo de incidencia de las ondas radioeléctricas, puede utilizarse la ganancia de la antena en dirección de ese ángulo de incidencia.

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 4.

El ángulo subtendido por el trayecto con vértice en el centro de la Tierra, δ se calcula a partir de las coordenadas geográficas de las estaciones, utilizando:

$$\delta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \quad \text{rad} \quad (65)$$

La distancia de círculo máximo d , entre las estaciones es:

$$d = 6\,371 \cdot \delta \quad \text{km} \quad (66)$$

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:

$$\alpha_{tr} = \arccos(\{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\delta)\} / \sin(\delta) \cos(\varphi_t)) \quad \text{rad} \quad (67)$$

Una vez aplicada la ecuación (67), si $\psi_t - \psi_r > 0$ entonces:

$$\alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \quad \text{rad} \quad (68)$$

Se calcula la marcación de la estación, r , a la estación, t , α_{rt} , por simetría a partir de las ecuaciones (67) y (68).

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:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{h_r - h_t}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (69a)$$

y:

$$\varepsilon_{pr} = \frac{h_t - h_r}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (69b)$$

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:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\theta_t}{1\,000} \quad \text{rad} \quad (70a)$$

y:

$$\varepsilon_{pr} = \frac{\theta_r}{1\,000} \quad \text{rad} \quad (70b)$$

Téngase en cuenta que los ángulos del horizonte radioeléctrico θ_t y θ_r (mrad), se introducen por primera vez en el Cuadro 4 y se definen, respectivamente en los § 5.1.1 y 5.1.3 del Adjunto 1 al Anexo 1.

Para calcular los ángulos con respecto al eje de puntería 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:

$$\chi_t = \arccos(\cos(\varepsilon_t) \cos(\varepsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\varepsilon_t) \sin(\varepsilon_{pt})) \quad (71a)$$

y:

$$\chi_r = \arccos(\cos(\varepsilon_r) \cos(\varepsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\varepsilon_r) \sin(\varepsilon_{pr})) \quad (71b)$$

Utilizando sus respectivos ángulos con respecto al eje de puntería, 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:

$$L = L_b(p) - G_t - G_r \quad \text{dB} \quad (72)$$

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

En frecuencias superiores a 5 GHz, donde las dimensiones de los hidrometeoros son semejantes o superiores a las longitudes de onda, la interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros puede tener una marcada influencia. 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 debida a los hidrometeoros que se describe a continuación expresa directamente las pérdidas de transmisión entre dos estaciones, ya que exige conocer los diagramas de radiación de las antenas interferente e interferida para cada estación.

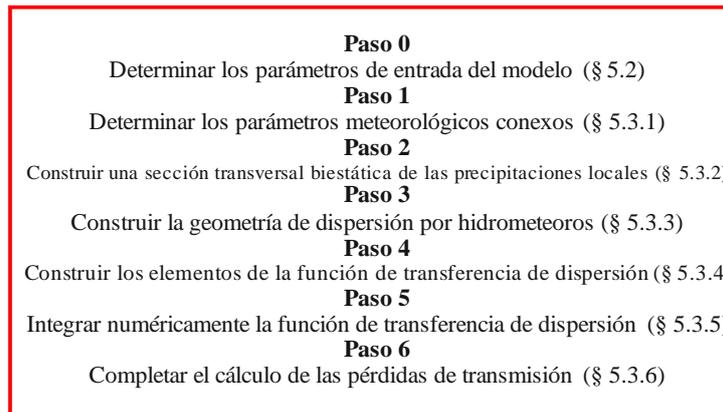
El método es bastante general y puede utilizarse con cualquier diagrama de radiación de antena que proporcione un método de determinación de la ganancia de antena para cualquier ángulo con respecto al eje de puntería de la misma. Pueden utilizarse todos los diagramas de radiación como los que aparecen en las Recomendaciones UIT-R F.699, UIT-R F.1245, UIT-R S.465 y UIT-R S.580, así como otros diagramas más complejos basados en las funciones de Bessel y diagramas medidos reales, si se dispone de ellos. El método también puede utilizarse con antenas unidireccionales o sectoriales, como las que se caracterizan en la Recomendación UIT-R F.1336, cuyas ganancias vienen generalmente determinadas a partir del ángulo vertical con respecto al eje de puntería (es decir, la elevación relativa al ángulo de máxima ganancia).

El método también es general en el sentido de que no está restringido a ninguna geometría en particular, siempre que se disponga de los diagramas de radiación de antena. Por consiguiente, incluye los acoplamientos haz principal a haz principal y lóbulo lateral a haz principal, y las geometrías de dispersión de círculo máximo y dispersión lateral. El método puede calcular los niveles de interferencia para geometrías de trayectos largos (> 100 km) y de trayectos cortos (hasta unos pocos kilómetros) con ángulos de elevación y acimutales arbitrarios en cualquiera de las estaciones. Por lo tanto, la metodología es adecuada para un amplio caso de hipótesis y servicios, incluida la determinación de la interferencia por dispersión debida a la lluvia entre dos estaciones terrenales, entre una estación terrenal y una estación terrena y entre dos estaciones terrenales que funcionen en bandas de frecuencias atribuidas bidireccionalmente. La metodología se basa en una fórmula matemática que describe las pérdidas de transmisión debidas a la dispersión por hidrometeoros entre dos estaciones. La fórmula de la pérdida de transmisión sólo tiene en cuenta la dispersión simple debida a las gotas de lluvia. No se considera la dispersión múltiple por los valores de atenuación más elevados atribuidos tanto a los gases atmosféricos como a las precipitaciones. Además, la dispersión por hidrometeoros puede ignorarse si se dan las siguientes condiciones:

- ausencia de precipitaciones entre las dos estaciones;
- frecuencia inferior a 5 GHz;
- los anchos de banda de canal de las dos estaciones no se solapan, pues es improbable que el mecanismo cause interferencia en el canal adyacente;
- los haces principales de las antenas de la estación son paralelos entre ellos (78), y
- el ángulo de estrabismo con respecto al eje de una estación (79) es superior al ancho de haz.

La metodología que se expone a continuación calcula la pérdida por dispersión debida a hidrometeoros en un caso de acoplamiento entre dos haces principales. Sin embargo, puede adaptarse para calcular las pérdidas por dispersión debidas a hidrometeoros en caso de acoplamiento entre un haz principal y un lóbulo lateral o entre un lóbulo lateral y un haz principal. Para ello deben sustituirse las características del haz principal de la antena de la estación en cuestión por las características del lóbulo lateral. En tal caso, todos los parámetros del lóbulo lateral sustituirán a los parámetros correspondientes del haz principal sustituido. Por ejemplo, al sustituir un haz principal por un lóbulo lateral, el ángulo de dispersión (78) y los ángulos de estrabismo (79) se medirán con respecto al eje de puntería del lóbulo lateral utilizado.

FIGURA 3

Diagrama de flujo del algoritmo de dispersión por hidrometeoros

P.0452-03

5.1 Base teórica de la pérdida de transmisión debida a la dispersión por hidrometeoros

Según la ecuación del radar biestático, la pérdida de transmisión, (dB), debida a la dispersión por hidrometeoros entre dos estaciones, teniendo la Estación 1 una polarización q ($q = v, h$) y la Estación 2 una polarización p ($p = v, h$), es

$$L_{pq} = 73,4399 + 20 \log_{10} f - 10 \log_{10} C_{pq} \quad \text{dB} \quad (73)$$

donde:

f : frecuencia (GHz)

C_{pq} : función de transferencia de dispersión, incluida la integración en un volumen de de célula de lluvia ($\text{m}^{-1}\text{km}^{-1}$)

$$C_{pq} = \iiint \frac{G_1 G_2 \sigma_{pq}}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp(-c[\mathcal{K}_{atm} + \mathcal{K}_{rain}]) \zeta(h) dV \quad (74)$$

NOTA – Más adelante, en las ecuaciones (132) y (133) se facilita una expresión numérica de esta integral.

$G_{1,2}$: ganancias lineares de la Estación 1 y la Estación 2, respectivamente

$r_{A1,2}$: distancia del elemento de integración dV con respecto a la Estación 1 y la Estación 2 (km)

σ_{pq} : sección transversal biestática de las gotas de lluvia por volumen unitario § 5.3.4.4 (m^2m^{-3})

c : ($c = 0,23026$) constante para convertir la atenuación en dB a neperios

\mathcal{K}_{atm} : atenuación debida a los gases atmosféricos a lo largo del trayecto entre el transmisor y el receptor (dB) pasando a través del elemento de integración; § 5.3.4.2

\mathcal{K}_{rain} : atenuación debida a la lluvia a lo largo del trayecto entre el transmisor y el receptor (dB) pasando a través del elemento de integración; § 5.3.4.3

$\zeta(h)$: dependencia de la altura de la reflectividad del radar:

$$\zeta(h) = \begin{cases} 1 & \text{para } h \leq h_R \\ 10^{-0,65(h-h_R)} & \text{para } h > h_R \end{cases} \quad (75)$$

h_R : altura de la lluvia (km);

dV : volumen del elemento de integración diferencial (km³).

5.2 Parámetros de entrada del modelo

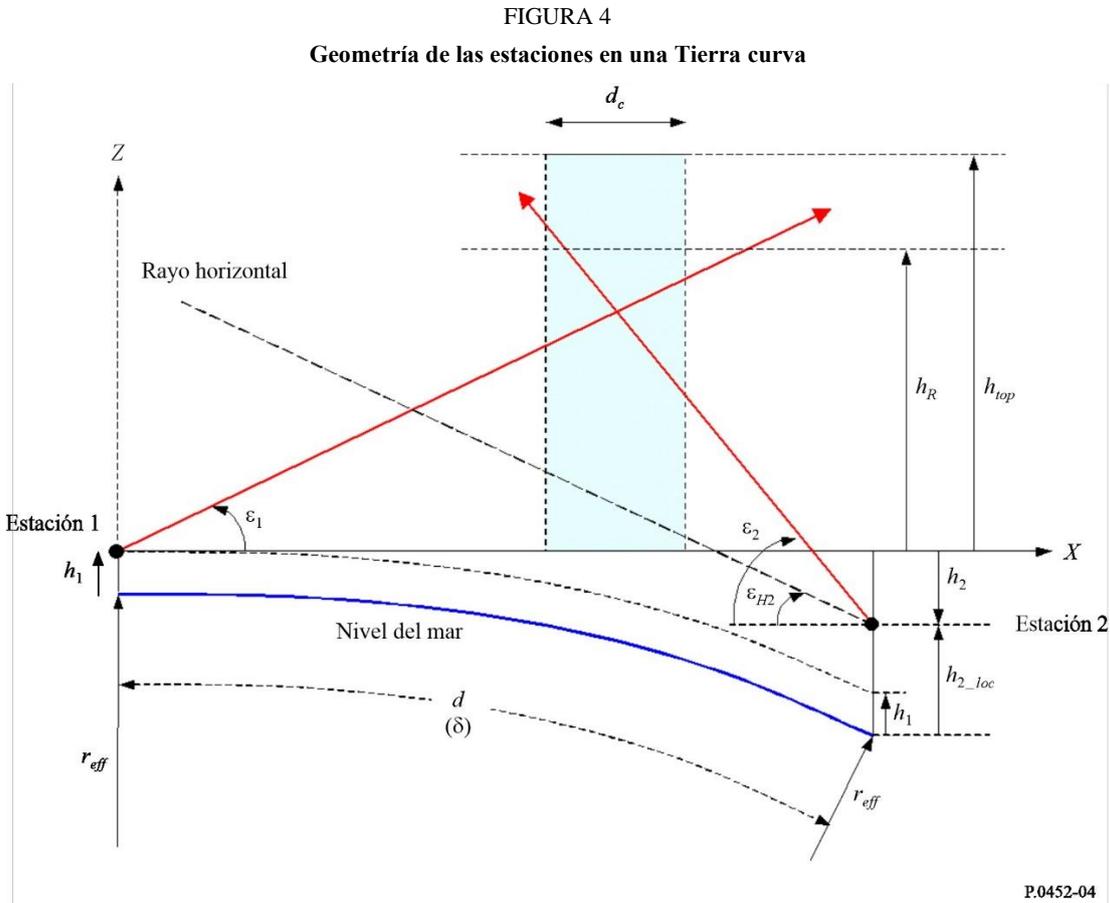
CUADRO 5

Lista de parámetros de entrada
(el sufijo 1 denota los parámetros correspondientes a la Estación 1; el sufijo 2 denota los parámetros correspondientes a la Estación 2)

Parámetro	Unidad	Descripción
d	km	Distancia del trayecto de círculo máximo
f	GHz	Frecuencia
h_{1_loc}, h_{2_loc}	km	Alturas locales por encima del nivel medio del mar de la Estación 1, Estación 2
G_1, G_2	dB	Ganancia de cada antena como función del ángulo de puntería de la antena y de la polarización de la antena
BW_1, BW_2	rad	Ancho de haz de la antena. El ancho del haz puede referirse a los haces principales o a los lóbulos laterales, en función del acoplamiento requerido.
$p_R(R)$		Distribución de probabilidad de la intensidad de lluvia
M	dB	Desadaptación de polarización entre sistemas
P	hPa	Presión de superficie (por defecto, 1 013,25 hPa)
$p_h(h)$		Distribución de probabilidad de la altura de la lluvia
T	°C	Temperatura de superficie (por defecto, 15° C)
$\alpha_{1_loc}, \alpha_{2_loc}$	rad	Marcaciones locales de la Estación 1 desde la Estación 2 y de la Estación 2 desde la Estación 1, en sentido de las agujas de reloj
$\epsilon_{H1_loc}, \epsilon_{H2_loc}$	rad	Ángulos del horizonte local para la Estación 1 y la Estación 2
ρ	g/m ³	Densidad del vapor de agua en superficie (por defecto, 8 g/m ³)
τ	grados	Ángulo de polarización del enlace (0° para la polarización horizontal, 90° para la polarización vertical)
Lat_1,2 Lon_1,2	grados	Latitud y longitud para la Estación 1 y la Estación 2
R_p		Porcentaje que no ha de rebasarse

5.2.1 Parámetros geométricos del enlace

Además de los parámetros de entrada anteriores, también pueden considerarse como parámetros de entrada los parámetros geométricos del enlace. De no facilitarse, esos parámetros se calculan y guardan para un uso futuro.



5.2.1.1 Ejes de puntería de la antena de la estación (haces principales)

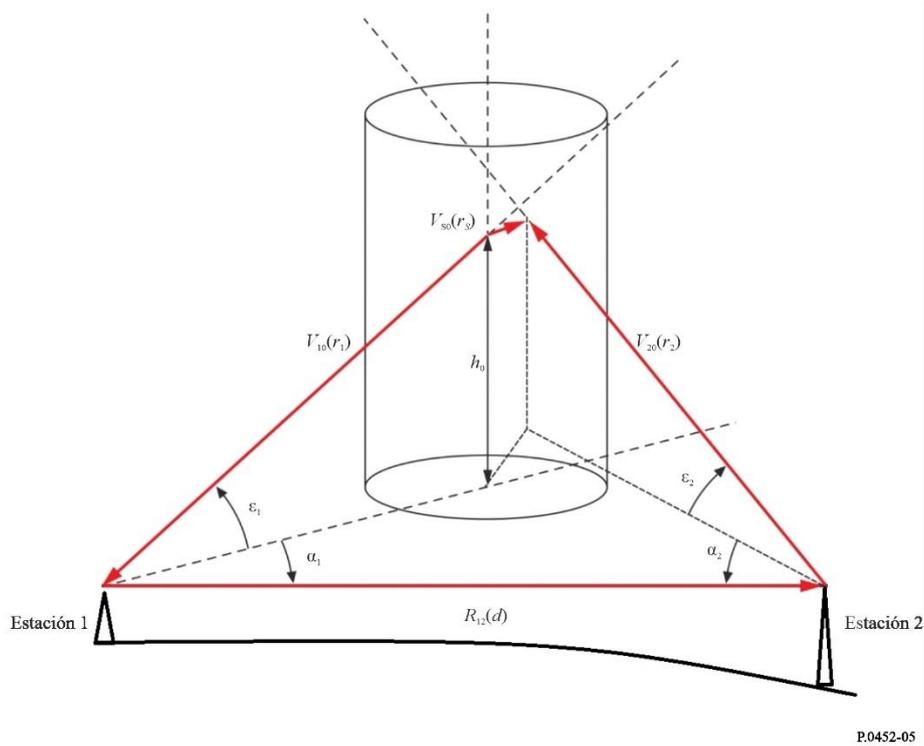
En la Fig. 5 se muestra la configuración geométrica del enlace de dispersión por hidrometeoros utilizando las coordenadas cartesianas de la Estación 1 como coordenadas comunes. En esas coordenadas, la Estación 1 está situada en el origen (0, 0, 0) siendo el plano x - y el plano horizontal, con el eje x apuntando hacia la Estación 2 y el eje z apuntando hacia arriba en sentido vertical. El eje de puntería de la antena de la Estación 1 se obtiene mediante el vector unitario V_{10} :

$$V_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_1 \\ \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \varepsilon_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ y_{10} \\ z_{10} \end{bmatrix} \quad (76)$$

En la ecuación (76), $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1_loc}$, y $\alpha_1 = \alpha_{1_loc}$ con ε_{1_loc} y α_{1_loc} son los ángulos de elevación y acimut locales del eje de puntería de la antena de la Estación 1.

FIGURA 5

Diagrama de la geometría del enlace de dispersión por hidrometeoros en el caso general de la dispersión lateral



El eje de puntería de la antena de la Estación 2 está representado por el vector de longitud unitaria \mathbf{V}_{20} :

$$\mathbf{V}_{20} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_2 \cos \alpha_2 \\ \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_2 \\ \sin \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon_{2_loc} \sin \delta - \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \cos \delta \\ -\cos \varepsilon_{2_loc} \sin \alpha_{2_loc} \\ \sin \varepsilon_{2_loc} \cos \delta + \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{20} \\ y_{20} \\ z_{20} \end{bmatrix} \quad (77a)$$

Los ángulos ε_2 y α_2 son los ángulos de elevación y acimut de la Estación 2 con respecto a la Estación 1 en el marco común, y ε_{2_loc} y α_{2_loc} son los ángulos correspondientes en el marco local de la antena de la Estación 2. Además, δ es el ángulo subtendido por ambas estaciones en el centro de la Tierra ($\delta = d/r_{eff}$, $r_{eff} = a_e = k_{50}a$ es el radio efectivo (mediano) de la Tierra, a es el radio medio de la Tierra, a (como se determina en la ecuación (6a)) y k_{50} (determinado en la ecuación (5)) es el factor de radio mediano). Cuando el valor de δ es pequeño, puede ignorarse la curvatura de la Tierra y ε_2 y α_2 son iguales a ε_{2_loc} y $\alpha_{2_loc} + \pi$, respectivamente.

El vector de la Estación 1 a la Estación 2 es:

$$\mathbf{V}_{12} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{R}_{12} = \mathbf{V}_{12} \quad (77b)$$

5.2.1.2 Ángulo de dispersión del haz principal

El ángulo de dispersión del haz principal, φ_{ms} , es el ángulo entre los dos haces principales de la antena (ejes de puntería) y se determina a partir del producto escalar de los dos vectores unitarios \mathbf{V}_{10} y \mathbf{V}_{20} :

$$\varphi_{ms} = \cos^{-1}(-\mathbf{V}_{20} \cdot \mathbf{V}_{10}) = \cos^{-1}(-\{\cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2\}) \quad (78)$$

Si $\varphi_{ms} < 0,001$ rad, los dos haces de antena son aproximadamente paralelos o colineales. Si los haces de la antena son aproximadamente paralelos, el acoplamiento por dispersión debida a la lluvia es despreciable y no es necesario calcular la dispersión por hidrometeoros.

5.2.1.3 Ángulos de estrabismo con respecto al eje

El ángulo de estrabismo con respecto al eje, $\psi_{1,2}$, en la Estación 1 o la Estación 2 del punto más próximo en el eje del haz principal de la otra estación se obtiene con la ecuación

$$\Psi_{1,2} = \tan^{-1} \left(\frac{r_s}{r_{1,2}} \right) \quad (79)$$

Las distancias r_1 , r_2 y r_s pueden obtenerse de la ecuación (80), donde (x_{10}, y_{10}, z_{10}) y (x_{20}, y_{20}, z_{20}) son respectivamente las componentes de los vectores unitarios V_{10} y V_{20} .

$$\begin{bmatrix} r_s \\ r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s0} & x_{10} & -x_{20} \\ y_{s0} & y_{10} & -y_{20} \\ z_{s0} & z_{10} & -z_{20} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ h_2 \end{bmatrix}, \quad h_2 = h_{2_loc} - h_{1_loc} - d \frac{\delta}{2} \text{ km} \quad (80)$$

En la ecuación (80), h_2 es la altura de la Estación 2 por encima del plano de referencia.

El operador $[]^{-1}$ es el operador de matriz inversa. A su vez, x_{s0} , y_{s0} y z_{s0} son las componentes del vector unitario V_{s0} resultado del producto vectorial de los vectores unitarios V_{10} y V_{20} .

$$V_{s0} = \frac{V_{20} \times V_{10}}{\text{sen } \varphi_{ms}} = \frac{1}{\text{sen } \varphi_{ms}} \begin{bmatrix} y_{20}z_{10} - z_{20}y_{10} \\ z_{20}x_{10} - x_{20}z_{10} \\ x_{20}y_{10} - y_{20}x_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s0} \\ y_{s0} \\ z_{s0} \end{bmatrix} \quad (81)$$

Si el ángulo de estrabismo es inferior al ancho de haz de 3 dB de la antena en cuestión, es posible el acoplamiento entre haces principales y es necesario calcular la dispersión por hidrometeoros.

5.3 Pasos para aplicar el algoritmo de dispersión por hidrometeoros

Si se determina que es necesario calcular la pérdida de transmisión debida a la dispersión por hidrometeoros, deberán seguirse los siguientes pasos del algoritmo para obtener la pérdida de transmisión.

5.3.1 Paso 1: determinar los parámetros meteorológicos

Los parámetros meteorológicos que necesita el algoritmo son los siguientes:

- Atenuación atmosférica específica;
- Atenuación debida a la lluvia específica;
- Estructura de la célula de lluvia; y
- Altura de la lluvia.

A continuación se detalla cada parámetro.

5.3.1.1 Atenuación atmosférica específica, γ_{atm}

La atenuación atmosférica específica, γ_{atm} , se necesita para obtener la atenuación debida a los gases atmosféricos, \mathcal{K}_{atm} , a lo largo del trayecto de propagación entre el transmisor y el receptor, pasando a través del volumen de dispersión (véase el § 5.3.3). La atenuación atmosférica específica puede obtenerse a partir del Anexo 1 de la Recomendación UIT-R P.676 en términos de temperatura, presión y perfil de densidad del vapor de agua en la atmósfera.

5.3.1.2 Atenuación debida a la lluvia específica, γ_R

El modelo de predicción de la atenuación debida a la lluvia específica de esta Recomendación difiere del de la Recomendación UIT-R P.838 y sólo debe utilizarse para los fines indicados en el § 5 para la predicción de la interferencia debida a la dispersión por hidrometeoros. Es necesario señalar esta diferencia porque el modelo de predicción de la atenuación debida a la lluvia específica de la Recomendación UIT-R P.838 está previsto para gotas de lluvia esferoides oblongas, mientras que el modelo de dispersión por hidrometeoros está previsto para gotas de lluvia esféricas. Esta diferencia influye en las fórmulas de la atenuación debida a la lluvia específica de las ecuaciones (82) a (87) y las fórmulas de la sección transversal biestática de las gotas de lluvia de las ecuaciones (123a) a (123d). Además, el modelo de atenuación debida a la lluvia específica de la Recomendación UIT-R P.838 no contempla la dependencia de la temperatura, mientras que la atenuación debida a la lluvia específica y la sección transversal biestática aquí contempladas sí dependen de la temperatura.

La atenuación debida a la lluvia específica, γ_R , se necesita para calcular la atenuación debida a la lluvia, \mathcal{K}_{rain} , a lo largo del trayecto de propagación entre el transmisor y el receptor pasando a través del volumen de dispersión, y se expresa en términos de intensidad de lluvia, R , con la ecuación:

$$\gamma_{R1,2} = \kappa_{1,2} R^{\alpha_{1,2}} \quad (\text{dB/km}) \quad (82)$$

Los coeficientes $\kappa_{1,2}$ y $\alpha_{1,2}$ son funciones de la frecuencia f (GHz), y la temperatura de las gotas de lluvia se obtiene con las ecuaciones (83) a (85).

$$\alpha_{1,2} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 + a_6 x^6 \quad (83)$$

$$\kappa_{1,2} = \exp(b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3 + b_4 x^4 + b_5 x^5) \quad (84)$$

$$x = \ln(f) \quad (85)$$

Los coeficientes a_m de la ecuación (83) y b_n de la ecuación (84) dependen de la temperatura T (°C).

La dependencia de la temperatura de cada uno de los coeficientes a_n y b_n puede expresarse de la siguiente manera:

$$a_m = c_0^m + c_1^m T + c_2^m T^2, \quad m = 0,1,2,3,4,5,6 \quad (86)$$

$$b_m = d_0^m + d_1^m T + d_2^m T^2, \quad m = 0,1,2,3,4,5 \quad (87)$$

En los Cuadros 6 y 7 se facilitan los valores de c_i^m y d_i^m ($i = 0,1,2$).

5.3.1.3 Estructura de la célula de lluvia

La célula de lluvia tiene una simetría cilíndrica dentro de la sección transversal horizontal, donde se supone que la intensidad de la lluvia decae exponencialmente a medida que se aleja del centro de la célula de lluvia, y puede expresarse de la siguiente manera:

$$R(\rho) = R_m \exp(-\rho/\rho_0) \quad \text{mm/hr} \quad (88)$$

donde ρ es la distancia radial desde el centro de la célula de lluvia, R_m es la intensidad de lluvia de cresta en el centro, y ρ_0 es una «distancia característica» con respecto al centro de la célula, a saber:

$$\rho_0 = \frac{10^{-1,5} \log_{10} R_m}{\ln\left(\frac{R_m}{0,4}\right)} \quad \text{km}, \quad R_m > 0,4 \text{ mm/hr} \quad (89)$$

5.3.1.4 Altura de la lluvia

La altura de la lluvia anual media por encima del nivel del mar, h_R , que oscila entre 4 y 5 km, puede obtenerse a partir de la altura de la isoterma de 0 °C, h_{iso} .

$$h_R = h_{iso} + 0,36 \quad \text{km} \quad (90)$$

La altura de la isoterma de 0 °C anual media por encima del nivel del mar, h_{iso} , puede calcularse utilizando la Recomendación UIT-R P.839-4 [R-REC-P.839-4-201309-I!!ZIP-E](#)

5.3.2 Paso 2: Construir una sección transversal biestática de las gotas de lluvia locales

La sección transversal biestática de las gotas de lluvia, η_1 , en el marco local de las gotas de lluvia simétricas puede expresarse de la siguiente manera en términos de ángulo de dispersión φ_s .

$$\eta_1(\varphi) = \exp\{u_0 + u_1(\text{sen } 0,5\varphi_s)^2 + u_2(\text{sen } 0,5\varphi_s)^4 + u_3(\text{sen } 0,5\varphi_s)^6\} \quad (91)$$

Los coeficientes u_i 's ($i = 0,1,2,3$) de la ecuación (91) están relacionados con la intensidad de la lluvia como se muestra en la ecuación (92)

$$\begin{aligned} u_i &= a_0^i + a_1^i \ln(R) + a_2^i \{\ln(R)\}^2, & i = 0, 1 \\ u_i &= a_0^i + a_1^i \ln(R) + a_2^i \{\ln(R)\}^2 + a_3^i \{\ln(R)\}^3, & i = 2, 3 \end{aligned} \quad (92)$$

Además, la dependencia de cada uno de los coeficientes a_n^i 's de la ecuación (92) con respecto a la frecuencia f puede consignarse en un polinomio algebraico de sexto grado.

$$a_n^i = \sum_{m=0}^7 b_{n,m}^i f^m, \quad i = 0,1,2,3 \text{ y } n = 0,1,2,3 \quad (93)$$

Además, cada uno de los coeficientes $b_{n,m}^i$'s de la ecuación (93) está relacionado con la temperatura T como se muestra en la ecuación (94).

$$b_{n,m}^i = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 \quad (94)$$

En los Cuadros 8 a 21 se facilitan los valores de los coeficientes c_0 's, c_1 's y c_2 's.

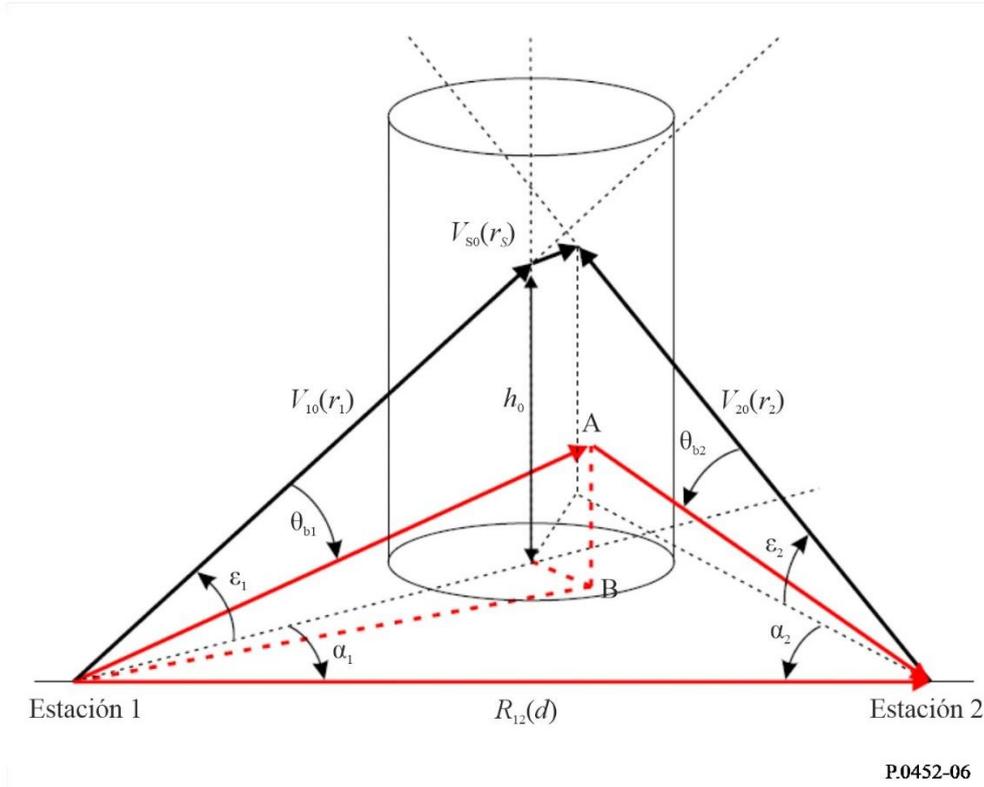
5.3.3 Paso 3: Construir una geometría de dispersión por hidrometeoros

La geometría de dispersión por hidrometeoros se construye (con la aproximación de Tierra plana) construyendo una célula de lluvia cuyo eje vertical se interseca con el eje del haz principal de la Estación 1 en el punto 0 (x_0, y_0, h_0), como se muestra en la Figura 6.

$$\begin{aligned} x_0 &= r_1 \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_1 \\ y_0 &= r_1 \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \\ h_0 &= r_1 \sin \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (95)$$

La distancia r_1 de la ecuación (95) puede obtenerse a partir de la ecuación (80). Al construir la geometría de dispersión por hidrometeoros, el centro de la célula de lluvia puede variar en función de las hipótesis que minimizan los valores de las pérdidas de transmisión, maximizando por consiguiente la potencia interferente dispersa. Un punto A (x, y, h) dentro de la célula representa un elemento de integración arbitrario y un punto B es la proyección del punto A en el plano en el suelo (véase la Fig. 6).

FIGURA 6
Geometría de dispersión por hidrometeoros



P.0452-06

Para facilitar la integración de la función de transferencia de dispersión de la ecuación (74), las coordenadas cartesianas del elemento de integración A (x, y, h) se convierten a coordenadas cilíndricas (ρ, φ, z).

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \rho \cos \varphi \\ y &= y_0 + \rho \sin \varphi \\ h &= h_0 + z \\ dV &= \rho \, d\rho \, d\varphi \, dz \end{aligned} \quad (96)$$

El centro de las coordenadas cilíndricas es el punto 0 (x_0, y_0, h_0), donde el eje vertical de la célula de lluvia se interseca con el eje de puntería de la Estación 1. Dentro de las coordenadas cilíndricas, las distancias, $r_{A1,2}$, entre la Estación 1 y la Estación 2 y el elemento de integración en A (ρ, φ, z) pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} r_{A1} &= r'_1 D_{A1}, \quad D_{A1} = \sqrt{1 + \{\rho^2 + z^2 + 2\rho d'_1 \cos(\alpha_1 - \varphi) + 2h_0 z\}/(r'_1)^2} \\ r'_1 &= \sqrt{(d'_1)^2 + h_0^2}, \quad d'_1 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \\ \alpha_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{y_0}{x_0}\right) \\ r_{A2} &= r'_2 D_{A2} \\ D_{A2} &= \sqrt{1 + \{\rho^2 + z^2 + 2\rho d'_2 \cos(\alpha_2 - \varphi) + 2(h_0 - h_2)z\}/(r'_2)^2} \\ r'_2 &= \sqrt{(d'_2)^2 + (h_0 - h_2)^2}, \quad d'_2 = \sqrt{(x_0 - d)^2 + y_0^2} \end{aligned} \quad (97)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{y_0}{x_0 - d} \right)$$

Los vectores de posición, $\mathbf{R}_{A1,2}(\rho, \varphi, z)$, se obtienen de la siguiente manera

$$\mathbf{R}_{A1}(\rho, \varphi, z) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi \\ y_0 + \rho \sen \varphi \\ h_0 + z \end{bmatrix} = r_{A1} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_{A1} \cos \alpha_{A1} \\ \cos \varepsilon_{A1} \sen \alpha_{A1} \\ \sen \varepsilon_{A1} \end{bmatrix} \quad (98a)$$

$$\mathbf{R}_{A2}(\rho, \varphi, z) = \begin{bmatrix} x - d \\ y \\ h - h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi - d \\ y_0 + \rho \sen \varphi \\ h_0 + z - h_2 \end{bmatrix} = r_{A2} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_{A2} \cos \alpha_{A2} \\ \cos \varepsilon_{A2} \sen \alpha_{A2} \\ \sen \varepsilon_{A2} \end{bmatrix} \quad (98b)$$

siendo

$$|\mathbf{R}_{A1}| = \sqrt{(x_0 + \rho \cos \varphi)^2 + (y_0 + \rho \sen \varphi)^2 + (h_0 + z)^2} = r_{A1} \quad (99a)$$

y

$$|\mathbf{R}_{A2}| = \sqrt{(x_0 + \rho \cos \varphi - d)^2 + (y_0 + \rho \sen \varphi)^2 + (h_0 + z - h_2)^2} = r_{A2} \quad (99b)$$

Además, los ángulos de elevación, $\varepsilon_{A1,2}$, de los vectores de posición $\mathbf{R}_{A1,2}(\rho, \varphi, z)$ se obtienen mediante

$$\varepsilon_{A1} = \tan^{-1} \left(\frac{h_0 + z}{d_{B1}} \right) \quad (100a)$$

$$\varepsilon_{A2} = \tan^{-1} \left(\frac{(h_0 - h_2) + z}{d_{B2}} \right) \quad (100b)$$

donde:

$$d_{B1} = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{d_1'^2 + \rho^2 + 2\rho d_1' \cos(\alpha_1 - \varphi)}$$

y

$$d_{B2} = \sqrt{(x - d)^2 + y^2} = \sqrt{d_2'^2 + \rho^2 + 2\rho d_2' \cos(\alpha_2 - \varphi)} \quad (101)$$

Cabe señalar que $r_{A1} = \sqrt{d_{B1}^2 + (h_0 + z)^2}$ y $r_{A2} = \sqrt{d_{B2}^2 + (h_0 - h_2 + z)^2}$. Además, al obtener (100a) y (100b) se utilizan, respectivamente, los extremos derechos de las ecuaciones (98a) y (98b) junto con la ecuación (101)

Los ángulos acimutales, $\alpha_{A1,2}$, de los vectores de posición $\mathbf{R}_{A1,2}(\rho, \varphi, z)$ son:

$$\begin{aligned} \alpha_{A1} &= \tan^{-1} \left(\frac{y_0 + \rho \sen \varphi}{x_0 + \rho \cos \varphi} \right) \\ \alpha_{A2} &= \tan^{-1} \left(\frac{y_0 + \rho \sen \varphi}{x_0 - d + \rho \cos \varphi} \right) \end{aligned} \quad (102)$$

A partir de la ecuación (96), la integral de la función de transferencia de dispersión de la ecuación (74) puede reducirse a:

$$C_{pq} = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho_{\max}} \mathcal{F}(\rho, \varphi, z) \rho d\rho d\varphi dz \quad (103)$$

$$\mathcal{F}(\rho, \varphi, z) = \frac{G_1(\theta_{A1})G_2(\theta_{A2})\sigma_{pq}\exp(-c\mathcal{K}(A))\zeta(h)}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \quad (104)$$

$\mathcal{K}(A)$ es la atenuación entre la Estación 1 y la Estación 2 pasando por el punto A con

$$\mathcal{K}(A) = \mathcal{K}_{atm}(A) + \mathcal{K}_{rain}(A) \quad (105)$$

En la ecuación (105), $\mathcal{K}_{atm}(A)$ y $\mathcal{K}_{rain}(A)$, son la atenuación debida a los gases atmosféricos y a la lluvia, respectivamente, entre la Estación 1 y la Estación 2 pasando por el punto A.

Para los límites de integración de la ecuación (103), las alturas mínima y máxima, z_{min} y z_{max} , se determinan a partir de los anchos de haz de la Estación 1 y la Estación 2.

$$z_{1m\acute{a}x} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_1 + 0,5BW_1) - h_0 \quad (106)$$

$$z_{1m\acute{i}n} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_1 - 0,5BW_1) - h_0 \quad (107)$$

$$z_{2m\acute{a}x} = \sqrt{(x_0 - d)^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_2 + 0,5BW_2) - h_0 \quad (108)$$

$$z_{2m\acute{i}n} = \sqrt{(x_0 - d)^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_2 - 0,5BW_2) - h_0 \quad (109)$$

$$z_{m\acute{a}x} = \text{mín}\{\text{máx}(z_{1m\acute{a}x}, z_{2m\acute{a}x}), h_R\} \quad (110)$$

$$z_{m\acute{i}n} = \text{mín}(z_{1m\acute{i}n}, z_{2m\acute{i}n}) \quad (111)$$

BW_1 y BW_2 son, respectivamente, el ancho de haz de la Estación 1 y la Estación 2 en radianes. Para determinar ρ_{max} el límite de integración en $d\rho$ se obtiene con la ecuación (112).

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}\{\rho_1 + \rho_2\} \quad \text{km} \quad (112)$$

$$\rho_1 = x_0 - \frac{d}{1 + \tan(\epsilon_1 + 0,5BW_1) \cot(\epsilon_2 - 0,5BW_2)} \quad \text{km} \quad (113)$$

$$\rho_2 = (d - x_0) - \frac{d}{1 + \tan(\epsilon_2 + 0,5BW_2) \cot(\epsilon_1 - 0,5BW_1)} \quad \text{km} \quad (114)$$

Las intensidades de campo cercano de las antenas dependen de las especificidades de los equipos físicos, que pueden desconocerse a la hora de realizar el análisis de interferencia. Conviene suponer que el orden de magnitud de la intensidad de campo será aproximadamente igual al del principio de la región de campo lejano. Esta aproximación coincide con las mediciones reales de las intensidades de campo cercano.

El ángulo de dispersión, φ_s , entre la Estación 1 y el punto de integración A es:

$$\varphi_s = \cos^{-1} \left(-\frac{r_{A1}}{r_{A2}} + \frac{d(x_0 + \rho \cos \varphi) + h_2(h_0 + z)}{r_{A1}r_{A2}} \right) \quad (115)$$

5.3.4 Paso 4: Construir los elementos de la función de transferencia de dispersión

5.3.4.1 Ganancias de antena

Las ganancias de antena, G_1 y G_2 , en el elemento de integración $A(\rho, \varphi, z)$ pueden obtenerse introduciendo los valores de los ángulos de puntería con respecto al eje, $\theta_{A1,2}$, en el diagrama de ganancia correspondiente a los parámetros de entrada del Cuadro 6. El ángulo de puntería con respecto al eje θ_{A1} es el ángulo entre el vector unitario V_{A1} , que va de la Estación 1 al elemento de integración, y la dirección del eje principal de la Estación 1. Este ángulo se obtiene con la fórmula:

$$\theta_{A1} = \cos^{-1}\{\cos \epsilon_1 \cos \epsilon_{A1} \cos(\alpha_1 - \alpha_{A1}) + \text{sen } \epsilon_1 \text{ sen } \epsilon_{A1}\} \quad (116)$$

El ángulo de puntería con respecto al eje θ_{A2} es el ángulo entre el vector unitario V_{A2} , que va de la Estación 2 al elemento de integración, y el haz principal de la Estación 2, y se obtiene con la fórmula:

$$\theta_{A2} = \cos^{-1}\{\cos \epsilon_2 \cos \epsilon_{A2} \cos(\alpha_2 - \alpha_{A2}) + \text{sen } \epsilon_2 \text{ sen } \epsilon_{A2}\} \quad (117)$$

5.3.4.2 Atenuación atmosférica

La atenuación, \mathcal{K}_{atm} , debida a la absorción por los gases atmosféricos a lo largo de los trayectos de propagación hasta el elemento de integración situado en el punto $A(\rho, \varphi, z)$ puede calcularse a partir de la atenuación atmosférica específica, γ_{atm} , facilitada en § 5.3.1.1.

Dividir las distancias de propagación, $r_{A1,2}$, en $N_{1,2}$ intervalos de longitud $\Delta h_{t1,2}/\sin \epsilon_{A1,2}$ lleva a los siguientes sumatorios; los intervalos se definen en § 5.3.4.3.

$$\mathcal{K}_{atm} = \sum_{t1=1}^{N_1} \frac{\gamma_{atm}(t1)\Delta h_{t1}}{\sin \epsilon_{A1}} + \sum_{t2=1}^{N_2} \frac{\gamma_{atm}(t2)\Delta h_{t2}}{\sin \epsilon_{A2}} \approx \sum_{t1=1}^{N_1} \frac{\gamma_{atm}(t1)r_{A1}}{N_1} + \sum_{t2=1}^{N_2} \frac{\gamma_{atm}(t2)r_{A2}}{N_2} \quad (118)$$

5.3.4.3 Atenuación debida a la lluvia

Al igual que la atenuación debida a los gases atmosféricos, la atenuación, \mathcal{K}_{rain} , a lo largo de los trayectos de propagación hasta el elemento de integración situado en el punto $A(\rho, \varphi, z)$ puede calcularse a partir de la atenuación debida a la lluvia específica, $\gamma_{R1,2}$, facilitada en el § 5.3.1.2.

Dividir las distancias de propagación, $r_{A1,2}$, en $N_{1,2}$ intervalos de longitud $\Delta h_{t1,2}/\sin \epsilon_{A1,2}$ genera los siguientes sumatorios.

$$\mathcal{K}_{rain} = \sum_{t1=1}^{N_1} \frac{\gamma_{R1}(t1)\Delta h_{t1}}{\sin \epsilon_{A1}} + \sum_{t2=1}^{N_2} \frac{\gamma_{R2}(t2)\Delta h_{t2}}{\sin \epsilon_{A2}} \quad (119)$$

En primer lugar, se parametriza el trayecto de propagación con el parámetro t en el intervalo (0,1) entre el punto (0,0,0) y el punto de integración A:

$$s(t) = \mathbf{R}_{A1}t + (0,0,0) = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi \\ y_0 + \rho \sin \varphi \\ h_0 + z \end{bmatrix} t \quad (120)$$

$$|\mathbf{R}_{A1}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{(x_0 + \rho \cos \varphi)^2 + (y_0 + \rho \sin \varphi)^2 + (h_0 + z)^2} \quad (121)$$

Así, para N_1 puntos de integración el factor $\frac{\Delta h_{t1}}{\sin \epsilon_{A1}} = \frac{r_{A1}}{N_1}$

En segundo lugar, se parametriza el trayecto de propagación con el parámetro t en el intervalo (0,1) entre el punto $(d, d \sin \alpha_1, h_{2_loc})$ y el punto de integración A:

$$s(t) = \mathbf{R}_{A2}t + \begin{bmatrix} d \\ d \sin \alpha_1 \\ h_{2_loc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi - d \\ y_0 + \rho \sin \varphi + d \sin \alpha_1 \\ h_0 + z - h_2 \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} d \\ d \sin \alpha_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad (122)$$

Así, para N_2 puntos de integración el factor $\frac{\Delta h_{t2}}{\sin \epsilon_{A1}} = \frac{r_{A2}}{N_2}$.

5.3.4.4 Sección transversal biestática en el marco común

En el elemento de integración, $A(\rho, \varphi, z)$, las secciones transversales biestáticas de las gotas de lluvia locales, η_1 , de la ecuación (91) pueden utilizarse para formular las secciones transversales biestáticas en el marco común, σ_{pq} 's.

$$\sigma_{vv} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \cos \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} + \sin \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} \}^2 \quad (123a)$$

$$\sigma_{vh} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \cos \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} - \sin \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} \}^2 \quad (123b)$$

$$\sigma_{hv} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \sin \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} - \cos \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} \}^2 \quad (123c)$$

$$\sigma_{hh} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \sin \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} + \cos \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} \}^2 \quad (123d)$$

Los ángulos α_{vi} y α_{vS} son los ángulos que rotan alrededor de las polarizaciones verticales incidente, \hat{v}_i , y dispersa, \hat{v}_S , en sentido contrario a las agujas del reloj perpendicularmente al plano de dispersión del § 5.3.3. El plano de dispersión de la gota de lluvia es el plano formado por la dirección incidente y dispersa.

El ángulo α_{vi} se obtiene mediante

$$\alpha_{vi} = \tan^{-1} \left\{ \frac{(h_0+z)((x_0+\rho \cos \varphi)(x_0-d+\rho \cos \varphi) + (y_0+\rho \sin \varphi)^2) - d_{B1}^2(h_0-h_2+z)}{r_{A1}d(y_0+\rho \sin \varphi)} \right\} \quad (124)$$

El ángulo de rotación α_{vS} es

$$\alpha_{vS} = \cos^{-1} \{ -\sin \alpha_{vi} (\hat{h}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) + \cos \alpha_{vi} (\hat{v}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) \} \quad (125)$$

con

$$(\hat{h}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{\{(h_0-h_2)+z\}(y_0+\rho \sin \varphi)}{d_{B1}d_{B2}r_{A2}} d \quad (126)$$

$$(\hat{h}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{1}{d_{B1}\sqrt{1+(h_0+z-h_2)^2}} \left(-(y_0 + \rho \sin \varphi) + \frac{(x_0+\rho \cos \varphi)}{d_{B2}(h_0+z-h_2)} \right) \quad (127)$$

y

$$(\hat{v}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{d_{B1}^2 r_{A2}^2 + \{(h_0-h_2)+z\} \{h_2 d_{B1}^2 - (h_0+z)(x_0+\rho \cos \varphi) d\}}{r_{A1} d_{B1} r_{A2} d_{B2}} \quad (128)$$

$$(\hat{v}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{1}{1+(h_0+z-h_2)^2} \left(1 + \frac{1}{d_{B1}^2(h_0+z-h_1)^2} + \frac{d_{B2}^2 r_2^2}{(h_0+z-h_2)^2} \right) \quad (129)$$

5.3.5 Paso 5: Integración de la función de transferencia de dispersión

La integración de la función de transferencia de dispersión (ecuación (103)) puede realizarse utilizando cualquier técnica de integración numérica adecuada, como la técnica de cuadratura Legendre-Gauss.

5.3.5.1 Integración por cuadratura Legendre-Gauss

Cuando se aplica la cuadratura Legendre-Gauss, se utilizan las siguientes variables

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\rho_{\max}}{2} (\chi + 1) \\ \varphi &= \pi(\eta + 1) \\ z &= \frac{(z_{\max} - z_{\min})}{2} \varsigma + \frac{(z_{\max} + z_{\min})}{2} \end{aligned} \quad (131)$$

con $-1 \leq \chi, \eta, \varsigma \leq 1$.

Con la introducción de la ecuación (131) en las ecuaciones (103-104) y la utilización de la cuadratura Legendre-Gauss se obtiene:

$$C_{pq} = \sum_{n=1}^{M_3} \mathcal{H}_n \quad (132)$$

$$\mathcal{H}_n = \frac{\pi(z_{\max} - z_{\min}) d_c^2}{4} w_n \sum_{i=1}^{M_1} w_i \sum_{j=1}^{M_2} w_j \mathcal{F}_{ijn}(\chi_i, \eta_j, \varsigma_n) \quad (133)$$

Nota: $\mathcal{F}_{ijn}(\chi_i, \eta_j, \varsigma_n) \rightarrow \mathcal{F}(\rho, \varphi, z)$ según la ecuación (104).

M_1, M_2 y M_3 son los números totales de los puntos de integración. Además, χ_i ($i = 1, \dots, M_1$), η_j ($j = 1, \dots, M_2$), y ζ_n ($n = 1, \dots, M_3$) son nodos cuadráticos gaussianos, y w_i, w_j y w_n son las ponderaciones correspondientes de UIT-R P.1144.

El procedimiento de integración con las ecuaciones (131) y (133) es el siguiente:

- 1) Determinar los puntos de cuadratura gaussianos χ_i ($i = 1, \dots, M_1$) y η_j ($j = 1, \dots, M_2$); y sus correspondientes ponderaciones, w_i y w_j , de § 5.3.7.
- 2) Introducir los puntos de cuadratura gaussianos en la ecuación (131) para calcular los radios ρ_i 's, los ángulos acimutales φ_j 's y las alturas z_n 's dentro del volumen de integración.
- 3) Comenzar con la capa inferior dentro de la célula de lluvia ($n = 1$) con el nodo de cuadratura ζ_1 y la ponderación w_1 .
- 4) Utilizar los radios, ángulos acimutales y alturas (ρ_i, φ_j, z_1) resultantes para calcular los valores de los parámetros necesarios en las ecuaciones (97) a (102).
- 5) Para cada punto, utilizar los valores anteriores para determinar los ángulos de puntería con respecto al eje (ecuaciones (116) y (117)) y, por ende, la ganancia de cada antena, las secciones transversales biestáticas, las ecuaciones (123a) a (123d), la atenuación atmosférica (ecuación (118)) y la atenuación debida a la lluvia (ecuación (119)).
- 6) Utilizar los resultados del paso 5) al calcular la correspondiente función $\mathcal{F}_{ij1}(\chi_i, \eta_j, \zeta_1)$ de la ecuación (104).
- 7) Multiplicar cada función $\mathcal{F}_{ij1}(\chi_i, \eta_j, \zeta_1)$ por las correspondientes ponderaciones gaussianas (w_i, w_j y w_1).
- 8) Sumar todos los valores de $\mathcal{F}_{ij1}(\chi_i, \eta_j, \zeta_1)$ y multiplicar el resultado por $\frac{\pi(z_{\max} - z_{\min})d_c^2}{4}$ para obtener \mathcal{H}_1 como en la ecuación (133) con $n = 1$.
- 9) Repetir los pasos 1 a 8 incrementando el orden de n de 1 ($n = 1, \dots, M_3$) para obtener los valores de todos los \mathcal{H}_n ($n = 1, \dots, M_3$), como se indica en la ecuación (133).
- 10) Sumar todos los valores de \mathcal{H}_n ($n = 1, \dots, M_3$) y dividir el resultado entre $(r_1 r_2')^2$ para obtener el valor de la función de transferencia de dispersión, C_{pq} , como se indica en la ecuación (132).

5.3.6 Cuadros para la cláusula 5.3.1.2

CUADRO 6

Valores de los coeficientes c_i^m ($i = 0, 1, 2$) de la ecuación (86)

m	c_0^m	c_1^m	c_2^m
0	0,86481	0,0025984	-3,2727e-05
1	-0,32507	-0,025593	0,00040852
2	0,70075	0,041632	-0,00084479
3	-0,4162	-0,023144	0,00063446
4	0,11971	0,0054147	-0,00022071
5	-0,018495	-0,00049312	3,6339e-05
6	0,0012143	8,1571e-06	-2,2949e-06

CUADRO 7

Valores de los coeficientes d_i^m ($i = 0, 1, 2$) de la ecuación (87)

m	d_0	d_1	d_2
0	-9,2859	-0,026677	7,4162e-05
1	1,5977	-0,021172	0,001127
2	0,45627	-0,0010862	-0,0014558
3	-0,15347	0,016763	0,00066036
4	0,040141	-0,0062665	-0,00012758
5	-0,0049951	0,00064387	8,9007e-06

5.3.7 Cuadros para la cláusula 5.3.2

CUADRO 8

Valores de los coeficientes $c_0^{0,0,m}$, $c_1^{0,0,m}$ y $c_2^{0,0,m}$ para $b_{0,m}^0$ de la ecuación (94) en caso de a_0^0 de u_0 de la ecuación (92)

m	c_0	c_1	c_2
0	-23,033	-0,019039	-1,3511e-07
1	1,0988	0,0057909	-1,8732e-05
2	-0,053826	-0,00051258	2,8893e-06
3	0,0017167	2,0326e-05	-1,5242e-07
4	-3,3231e-05	-4,2625e-07	3,8089e-09
5	3,7396e-07	4,9297e-09	-4,969e-11
6	-2,2438e-09	-2,9763e-11	3,2787e-13
7	5,5409e-12	7,3317e-14	-8,6497e-16

CUADRO 9

Valores de los coeficientes $c_0^{0,1,m}$, $c_1^{0,1,m}$ y $c_2^{0,1,m}$ para $b_{1,m}^0$ de la ecuación (94) en caso de a_1^0 de u_0 de la ecuación (92)

m	$c_0^{0,1,m}$	$c_1^{0,1,m}$	$c_2^{0,1,m}$
0	1,758	0,0078061	-0,00019642
1	-0,034774	-0,0010409	4,8582e-05
2	0,0031934	1,2441e-05	-3,9051e-06
3	-0,00014758	1,6661e-06	1,5195e-07
4	3,3014e-06	-7,0142e-08	-3,2085e-09
5	-3,8772e-08	1,1439e-09	3,7652e-11
6	2,3188e-10	-8,5799e-12	-2,3101e-13
7	-5,5887e-13	2,4612e-14	5,779e-16

CUADRO 10

Valores de los coeficientes $c_0^{0,2,m}$, $c_1^{0,2,m}$ y $c_2^{0,2,m}$ para $b_{2,m}^0$ de la ecuación (94) en caso de a_2^0 de u_0 de la ecuación (92)

m	$c_0^{0,2,m}$	$c_1^{0,2,m}$	$c_2^{0,2,m}$
0	-0,051224	0,00081531	1,1534e-05
1	0,0011587	-0,00031961	-2,3173e-06
2	-8,8754e-05	3,5484e-05	1,4933e-07
3	9,6328e-07	-1,6609e-06	-4,7112e-09
4	5,927e-08	3,9523e-08	8,0972e-11
5	-1,6618e-09	-5,0408e-10	-7,7464e-13
6	1,5626e-11	3,2862e-12	3,8749e-15
7	-5,0972e-14	-8,6057e-15	-7,8859e-18

CUADRO 11

Valores de los coeficientes $c_0^{1,0,m}$, $c_1^{1,0,m}$ y $c_2^{1,0,m}$ para $b_{0,m}^1$ de la ecuación (94) en caso de a_0^1 de u_1 de la ecuación (92)

m	$c_0^{1,0,m}$	$c_1^{1,0,m}$	$c_2^{1,0,m}$
0	0,28927	0,037271	-0,00010078
1	-0,11742	-0,011059	6,6665e-05
2	0,010231	0,00093297	-8,6068e-06
3	-0,00041831	-3,5477e-05	4,2065e-07
4	8,8529e-06	7,2358e-07	-1,0192e-08
5	-1,0313e-07	-8,2014e-09	1,3111e-10
6	6,2591e-10	4,8736e-11	-8,5865e-13
7	-1,5469e-12	-1,1849e-13	2,2546e-15

CUADRO 12

Valores de los coeficientes $c_0^{1,1,m}$, $c_1^{1,1,m}$ y $c_2^{1,1,m}$ para $b_{1,m}^1$ de la ecuación (94) en caso de a_1^1 de u_1 de la ecuación (92)

m	$c_0^{1,1,m}$	$c_1^{1,1,m}$	$c_2^{1,1,m}$
0	-0,2317	-0,005093	0,00045796
1	0,020016	-0,00076558	-0,00011298
2	0,00060157	0,00020785	9,1237e-06
3	-9,7303e-05	-1,2384e-05	-3,5392e-07
4	3,2711e-06	3,3064e-07	7,4324e-09
5	-5,0187e-08	-4,5084e-09	-8,6694e-11
6	3,6714e-10	3,0694e-11	5,2868e-13
7	-1,0386e-12	-8,2853e-14	-1,3148e-15

CUADRO 13

Valores de los coeficientes $c_0^{1,2,m}$, $c_1^{1,2,m}$ y $c_2^{1,2,m}$ para $b_{2,m}^1$ de la ecuación (94) en caso de a_2^1 de u_1 de la ecuación (92)

m	$c_0^{1,2,m}$	$c_1^{1,2,m}$	$c_2^{1,2,m}$
0	-0,036841	-0,0025519	-2,6162e-05
1	0,012953	0,00084793	5,2688e-06
2	-0,001305	-8,5265e-05	-3,3134e-07
3	5,9518e-05	3,7912e-06	9,6604e-09
4	-1,454e-06	-8,7204e-08	-1,4711e-10
5	1,91e-08	1,085e-09	1,1752e-12
6	-1,2719e-10	-6,9419e-12	-4,3973e-15
7	3,3748e-13	1,7914e-14	5,0804e-18

CUADRO 14

Valores de los coeficientes $c_0^{2,0,m}$, $c_1^{2,0,m}$ y $c_2^{2,0,m}$ para $b_{0,m}^2$ de la ecuación (94) en caso de a_0^2 de u_2 de la ecuación (92)

m	$c_0^{2,0,m}$	$c_1^{2,0,m}$	$c_2^{2,0,m}$
0	-0,0022144	-0,0014792	0,00030493
1	-0,008123	-0,00055742	-8,8598e-05
2	0,0018507	0,00015755	8,3245e-06
3	-8,484e-05	-8,944e-06	-3,572e-07
4	1,9127e-06	2,323e-07	7,9876e-09
5	-2,2827e-08	-3,1221e-09	-9,6893e-11
6	1,4148e-10	2,1074e-11	6,0585e-13
7	-3,5797e-13	-5,6545e-14	-1,5317e-15

CUADRO 15

Valores de los coeficientes $c_0^{2,1,m}$, $c_1^{2,1,m}$ y $c_2^{2,1,m}$ para $b_{1,m}^2$ de la ecuación (94) en caso de a_1^2 de u_2 de la ecuación (92)

m	$c_0^{2,1,m}$	$c_1^{2,1,m}$	$c_2^{2,1,m}$
0	-0,048207	-0,019603	3,8001e-06
1	-0,00041118	0,0045669	-1,0444e-05
2	0,0016887	-0,00031651	1,7242e-06
3	-0,00011195	1,0267e-05	-1,0534e-07
4	3,0478e-06	-1,776e-07	2,9975e-09
5	-4,1397e-08	1,6755e-09	-4,3294e-11
6	2,8014e-10	-8,0718e-12	3,0902e-13
7	-7,5246e-13	1,5353e-14	-8,6683e-16

CUADRO 16

Valores de los coeficientes $c_0^{2,2,m}$, $c_1^{2,2,m}$ y $c_2^{2,2,m}$ para $b_{2,m}^2$ de la ecuación (94) en caso de a_2^2 de u_2 de la ecuación (92)

m	$c_0^{2,2,m}$	$c_1^{2,2,m}$	$c_2^{2,2,m}$
0	-0,1208	-0,0018073	-7,7431e-05
1	0,039712	0,00099445	2,2037e-05
2	-0,0039312	-0,00012817	-2,1388e-06
3	0,00017579	6,5734e-06	9,7426e-08
4	-4,0495e-06	-1,669e-07	-2,3253e-09
5	5,0716e-08	2,2341e-09	3,0006e-11
6	-3,2704e-10	-1,512e-11	-1,9832e-13
7	8,496e-13	4,0796e-14	5,2636e-16

CUADRO 17

Valores de los coeficientes $c_0^{2,3,m}$, $c_1^{2,3,m}$ y $c_2^{2,3,m}$ para $b_{3,m}^2$ de la ecuación (94) en caso de a_3^2 de u_2 de la ecuación (92)

m	$c_0^{2,3,m}$	$c_1^{2,3,m}$	$c_2^{2,3,m}$
0	0,02176	0,0005804	9,4104e-06
1	-0,0067089	-0,00020457	-2,5829e-06
2	0,0006556	2,156e-05	2,4395e-07
3	-2,966e-05	-9,9711e-07	-1,0876e-08
4	6,9633e-07	2,3723e-08	2,5604e-10
5	-8,7919e-09	-3,0371e-10	-3,2742e-12
6	5,6633e-11	1,9905e-12	2,15e-14
7	-1,462e-13	-5,2428e-15	-5,6776e-17

CUADRO 18

Valores de los coeficientes $c_0^{3,0,m}$, $c_1^{3,0,m}$ y $c_2^{3,0,m}$ para $b_{0,m}^3$ de la ecuación (94) en caso de a_0^3 de u_3 de la ecuación (92)

m	$c_0^{3,0,m}$	$c_1^{3,0,m}$	$c_2^{3,0,m}$
0	-0,046298	-0,0057663	-0,00018642
1	0,01272	0,0017156	4,8813e-05
2	-0,0010278	-0,0001572	-4,0434e-06
3	3,4667e-05	6,2343e-06	1,5655e-07
4	-6,1228e-07	-1,3209e-07	-3,2237e-09
5	5,8573e-09	1,5529e-09	3,65e-11
6	-2,9595e-11	-9,5349e-12	-2,1505e-13
7	6,2019e-14	2,3843e-14	5,1597e-16

CUADRO 19

Valores de los coeficientes $c_0^{3,1,m}$, $c_1^{3,1,m}$ y $c_2^{3,1,m}$ para $b_{1,m}^3$ de la ecuación (94) en caso de a_1^3 de u_3 de la ecuación (92)

m	$c_0^{3,1,m}$	$c_1^{3,1,m}$	$c_2^{3,1,m}$
0	-0,15558	-0,0042536	-9,7633e-05
1	0,047606	0,0017754	3,2832e-05
2	-0,0046542	-0,00020881	-3,4242e-06
3	0,00020312	1,0088e-05	1,6314e-07
4	-4,6089e-06	-2,4592e-07	-4,0092e-09
5	5,6717e-08	3,2014e-09	5,2747e-11
6	-3,5983e-10	-2,1241e-11	-3,5329e-13
7	9,2209e-13	5,6467e-14	9,4664e-16

CUADRO 20

Valores de los coeficientes $c_0^{3,2,m}$, $c_1^{3,2,m}$ y $c_2^{3,2,m}$ para $b_{2,m}^3$ de la ecuación (94) en caso de a_2^3 de u_3 de la ecuación (92)

m	$c_0^{3,2,m}$	$c_1^{3,2,m}$	$c_2^{3,2,m}$
0	0,11087	0,0061252	5,7319e-05
1	-0,029622	-0,0017355	-1,5993e-05
2	0,0025942	0,00016036	1,5228e-06
3	-0,00010795	-6,8539e-06	-6,7714e-08
4	2,3816e-06	1,5498e-07	1,5828e-09
5	-2,8856e-08	-1,9149e-09	-2,0088e-11
6	1,8081e-10	1,2223e-11	1,3102e-13
7	-4,5761e-13	-3,1539e-14	-3,4402e-16

CUADRO 21

Valores de los coeficientes $c_0^{3,3,m}$, $c_1^{3,3,m}$ y $c_2^{3,3,m}$ para $b_{3,m}^3$ de la ecuación (94) en caso de a_3^3 de u_3 de la ecuación (92)

m	$c_0^{3,3,m}$	$c_1^{3,3,m}$	$c_2^{3,3,m}$
0	-0,015838	-0,00071563	-6,1847e-06
1	0,0042926	0,00019142	1,6456e-06
2	-0,00039171	-1,6809e-05	-1,5321e-07
3	1,6946e-05	6,9046e-07	6,7237e-09
4	-3,8371e-07	-1,5112e-08	-1,5611e-10
5	4,6824e-09	1,8183e-10	1,9738e-12
6	-2,9185e-11	-1,1361e-12	-1,2841e-14
7	7,3004e-14	2,8813e-15	3,3644e-17

Adjunto 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 Adjunto.

2 Mapas sobre la variación vertical de los datos de refracción radioeléctrica y la refracción en la superficie

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. El valor medio de la refracción en la superficie a nivel del mar, N_0 , se utiliza para el cálculo del modelo de dispersión troposférica.

Si no se dispone de datos sobre mediciones locales, estas cantidades pueden obtenerse de los mapas en los productos digitales integrales proporcionados por esta Recomendación en el fichero zip [R-REC-P.452-17-202310-I!!ZIP-E.zip](#). Estos mapas digitales se obtuvieron tras el análisis de un conjunto de datos mundiales recopilados durante diez años (1983-1992) de las radiosondas. Los mapas figuran en los ficheros DN50.txt y N050.txt, respectivamente. Los datos abarcan desde 0° a 360° en longitud y de $+90^\circ$ a -90° en latitud, con una resolución de $1,5^\circ$ en ambas. Estos datos se utilizan junto con los ficheros de datos LAT.txt y LON.txt que contienen, respectivamente, las latitudes y longitudes de las inscripciones correspondientes (puntos de la cuadrícula) en los ficheros DN50.txt y N050.txt. Para un emplazamiento distinto de los puntos de la cuadrícula, se puede calcular el parámetro en el emplazamiento deseado llevando a cabo una interpolación bilineal en los valores de los cuatro puntos de la cuadrícula más cercanos, tal como describe la Recomendación UIT-R P.1144.

Adjunto 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 22 se presentan los parámetros que han de obtenerse del análisis del perfil del trayecto para establecer los modelos de propagación.

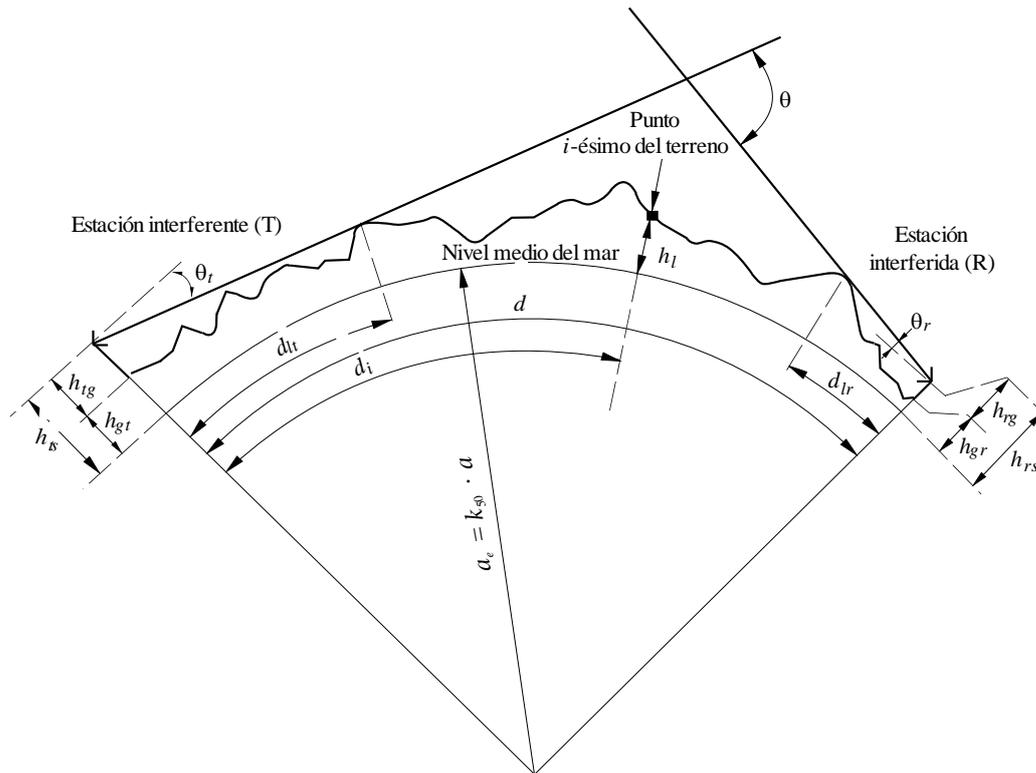
2 Construcción del perfil del trayecto

A partir de las coordenadas geográficas de las estaciones interferente (φ_i, ψ_i) e interferida (φ_r, ψ_r), se obtienen las elevaciones del terreno (por encima del nivel medio del mar) a lo largo del trayecto de círculo máximo a partir de una base de datos topográfica o de los correspondientes mapas de contorno a gran escala. La distancia entre puntos del perfil debería reflejar en la medida de lo posible las características más importantes del terreno. Se considera adecuado un incremento típico de la distancia entre 30 m y 1 km. En general, resulta apropiado utilizar incrementos de distancia superiores cuando se trate de trayectos más largos. El perfil debería incluir como puntos de partida y de llegada las elevaciones del terreno en los emplazamientos de las estaciones interferente e interferida. Las siguientes ecuaciones toman en consideración la curvatura de la Tierra cuando resulta necesario, sobre la base del valor de a_e hallado en la ecuación (6a).

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.

FIGURA 7
Ejemplo de un perfil de trayecto transhorizonte



P0452-11

Nota a la Fig. 7: El valor del ángulo θ , representado será negativo.

El Cuadro 22 define los parámetros utilizados u obtenidos durante el análisis del perfil de un trayecto.

CUADRO 22

Definiciones de los parámetros del perfil del trayecto

Parámetro	Descripción
a	Radio físico promedio de la Tierra (6 371 km)
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 i -ésimo punto de terreno desde la estación interferente (km)
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	Para un trayecto transhorizonte, ángulo de elevación del horizonte por encima de la horizontal local (mrad), medido desde la antena interferente. Para un trayecto con visibilidad directa, éste debe ser el ángulo de elevación de la antena interferida

CUADRO 22 (fin)

Parámetro	Descripción
θ_r	Para un trayecto transhorizonte, ángulo de elevación del horizonte por encima de la horizontal local (mrad), medido desde la antena interferida. Para un trayecto con visibilidad directa, éste debe ser el ángulo de elevación de la antena interferente
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 <i>i</i> -ésimo punto del terreno (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

La longitud del trayecto puede calcularse utilizando la geometría de círculo máximo (sobre la base del radio físico promedio de la Tierra a) de las coordenadas geográficas de las estaciones interferente (φ_i, ψ_i) e interferida (φ_r, ψ_r). De otro modo, la longitud del trayecto se puede hallar a partir de un perfil de trayecto. Con carácter general, la longitud del trayecto, d (km), puede hallarse a partir de los datos del perfil del trayecto:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km} \quad (134)$$

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

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (135)$$

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

4 Clasificación del trayecto

El trayecto debe clasificarse en transhorizonte o con visibilidad directa únicamente para determinar las distancias d_{tr} y d_{tr} , y los ángulos de elevación θ_t y θ_r (véase *infra*).

El perfil del trayecto debe utilizarse para determinar si el trayecto es transhorizonte o con visibilidad directa, sobre la base del radio efectivo medio de la Tierra de a_e , según figura en la ecuación (6a).

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) abarcado por la antena interferida.

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

$$\theta_{m\acute{a}x} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (136)$$

donde:

$$\theta_{m\acute{a}x} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (137)$$

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

$$\theta_i = 1000 \arctan \left(\frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (138)$$

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)

$$\theta_{td} = 1000 \arctan \left(\frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (139)$$

donde:

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

d : distancia total del trayecto de círculo máximo (km)

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

5 Obtención de los parámetros a partir del perfil del trayecto

5.1 Trayectos transhorizonte y trayectos con visibilidad directa

En el Cuadro 22 se encuentra la lista completa de parámetros del perfil del trayecto.

5.1.1 Ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena interferente, θ_t

El ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena interferente es el ángulo de elevación máximo de la antena sobre el horizonte cuando se aplica la ecuación (137) a las $n - 1$ alturas del perfil del terreno.

$$\theta_t = \max(\theta_{m\acute{a}x}, \theta_{td}) \quad \text{mrad} \quad (140)$$

determinándose $\theta_{m\acute{a}x}$ mediante la ecuación (137). Así, para un trayecto con visibilidad directa, se considera que el ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena interferente es el ángulo de elevación de la línea que va a la antena interferida.

5.1.2 Distancia al horizonte de la antena interferente, d_H

La distancia al horizonte es la distancia mínima desde el transmisor en el que se calcula el ángulo de elevación máximo de la antena sobre el horizonte de acuerdo con la ecuación (137).

$$d_{lt} = d_i \quad \text{km} \quad \text{para máx } (\theta_i) \quad (141)$$

Para un trayecto con visibilidad directa, el índice i debe ser el valor que da el parámetro máximo de difracción v :

$$v_{m\acute{a}x} = \text{máx} \left\{ \left[h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts} (d - d_i) + h_{rs} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (141a)$$

donde el índice de perfil i toma valores entre 1 y $n - 1$, y C_e es la curvatura efectiva de la Tierra como se define en el § 4.2.1 del Anexo 1.

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 (137) a las $n - 1$ alturas del perfil del terreno.

Para un trayecto con visibilidad directa, θ_r viene dado por:

$$\theta_r = 1000 \arctan \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (142a)$$

En caso contrario, θ_r viene dado por:

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (142b)$$

$$\theta_j = 1000 \arctan \left(\frac{h_j - h_{rs}}{10^3 (d - d_j)} - \frac{d - d_j}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (143)$$

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 (142b).

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{para máx } (\theta_j) \quad (144)$$

Para un trayecto con visibilidad directa, d_{lr} viene dado por:

$$d_{lr} = d - d_{lt} \quad \text{km} \quad (144a)$$

5.1.5 Distancia angular θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (145)$$

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

5.1.6.1 Aspectos generales

Una superficie de «Tierra lisa» se obtiene a partir del perfil para calcular la altura efectiva de las antenas en el caso del modelo por difracción y evaluar la rugosidad del trayecto requerida por el modelo de propagación por conductos y por reflexión en las capas. Las definiciones de altura efectiva de la antena son distintas en uno y otro caso.

En el § 5.1.6.2 se describe cómo calcular la altura no corregida de la superficie de la Tierra lisa en el transmisor y en el receptor, h_{st} y h_{sr} , respectivamente.

En el § 5.1.6.3 se describe la obtención de las alturas modificadas de la Tierra lisa en la transmisión y la recepción, h_{std} y h_{srd} , que se utilizan en el § 4.2.3 del Anexo 1 para calcular las alturas efectivas de las antenas para el modelo de difracción.

En el § 5.1.6.4 se describe el cálculo de las alturas efectivas h_{te} y h_{re} y el parámetro de rugosidad del terreno, h_m , para el modelo de propagación por conductos.

5.1.6.2 Obtención de la superficie de Tierra lisa

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

$$h_{si} = [(d - d_i)h_{st} + d_i h_{sr}] / d \quad \text{m} \quad (146)$$

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

h_{sr} : altura snmm (m), de la superficie de la Tierra lisa en la estación del receptor.

Se evalúa h_{st} y h_{sr} como sigue haciendo uso de las ecuaciones (147) – (150):

$$v_1 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (147)$$

donde:

h_i : altura real del i -ésimo punto del terreno (m)

d_i : distancia de la fuente interferente al i -ésimo elemento del terreno (km).

$$v_2 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (148)$$

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

$$h_{st} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (149)$$

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

$$h_{sr} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (150)$$

5.1.6.3 Altura de la superficie de la Tierra lisa para el modelo por difracción

Se determina la mayor altura de los obstáculos situados por encima del trayecto en línea recta desde el transmisor hasta el receptor h_{obs} , y los ángulos de elevación sobre el horizonte α_{obt} , α_{obr} , basados todos ellos en la geometría de la Tierra plana, según:

$$h_{obs} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i\} \quad \text{m} \quad (151a)$$

$$\alpha_{obt} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i/d_i\} \quad \text{mrad} \quad (151b)$$

$$\alpha_{obr} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i/(d-d_i)\} \quad \text{mrad} \quad (151c)$$

$$\alpha_{obr} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i/(d-d_i)\} \quad \text{mrad} \quad (151c)$$

donde:

$$H_i = h_i - [h_{ts}(d-d_i) + h_{rs}d_i]/d \quad \text{m} \quad (151d)$$

Se calculan los valores provisionales para las alturas de la superficie lisa en los extremos transmisor y receptor del trayecto:

Si h_{obs} es menor o igual a cero, entonces:

$$h_{stp} = h_{st} \quad (\text{m}) \text{ snmm} \quad (152a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad (\text{m}) \text{ snmm} \quad (152b)$$

en caso contrario:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad (\text{m}) \text{ snmm} \quad (152c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad (\text{m}) \text{ snmm} \quad (152d)$$

donde:

$$g_t = \alpha_{obt}/(\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (152e)$$

$$g_r = \alpha_{obr}/(\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (152f)$$

Se calculan los valores finales para las alturas de la superficie lisa en los extremos transmisor y receptor del trayecto, tal y como lo requiere el modelo por difracción:

Si h_{stp} es mayor que h_0 entonces:

$$h_{std} = h_0 \quad (\text{m}) \text{ snmm} \quad (153a)$$

en caso contrario:

$$h_{std} = h_{stp} \quad (\text{m}) \text{ snmm} \quad (153b)$$

Si h_{srp} es mayor que h_n entonces:

$$h_{srd} = h_n \quad (\text{m}) \text{ snmm} \quad (153c)$$

en caso contrario:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad (\text{m}) \text{ snmm} \quad (153d)$$

5.1.6.4 Parámetros para el modelo de propagación por conductos y por reflexión en las capas

Se calculan las alturas de la Tierra lisa en los extremos transmisor y receptor, tal y como lo requiere el factor de rugosidad que viene dado por:

$$h_{st} = \text{mín}(h_{st}, h_0) \quad \text{m} \quad (154a)$$

$$h_{sr} = \text{mín} (h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (154b)$$

Si se modifica h_{st} o h_{sr} , o ambas, por las ecuaciones (154a) o (154b) entonces la pendiente, m , de la superficie de Tierra lisa también debe corregirse:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (155)$$

Las alturas efectivas de los terminales para el modelo de propagación por conductos y por reflexión en las capas, h_{te} y h_{re} , vienen dadas por:

$$\begin{aligned} h_{te} &= h_{tg} + h_0 - h_{st} & \text{m} \\ h_{re} &= h_{rg} + h_n - h_{sr} & \text{m} \end{aligned} \quad (156)$$

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:

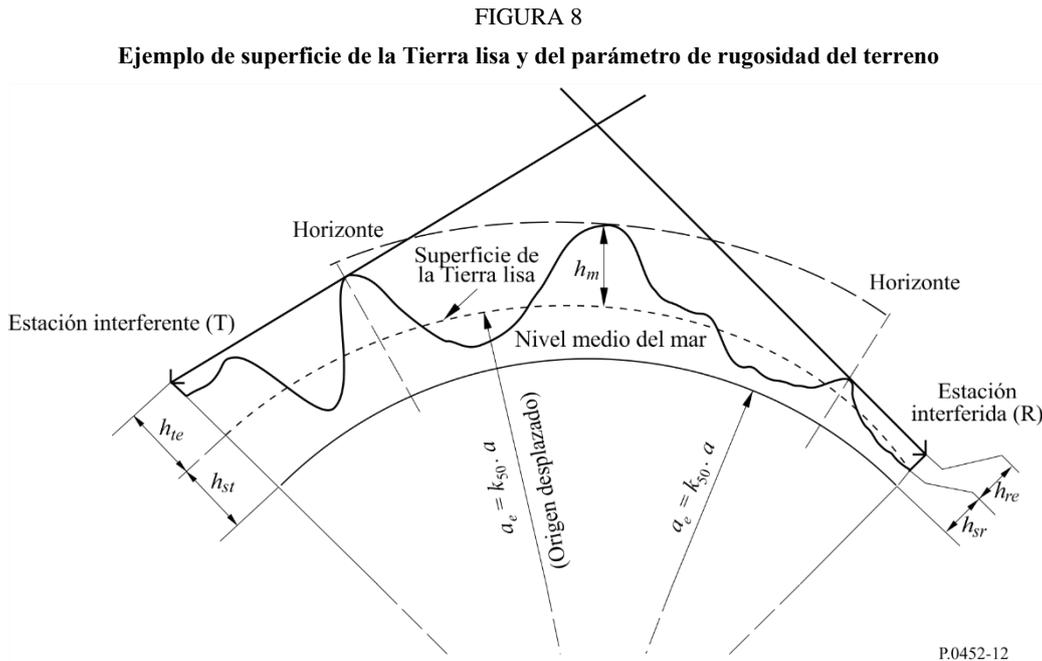
$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{m} \quad (157)$$

donde:

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

i_{lr} : 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.



Adjunto 3 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 en la expresión de la función de interpolación en la ecuación (41). 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:

$$I(x) = \xi(x) - T(x) \quad (158)$$

donde:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (158a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (158b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (158c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (158d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (158e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (158f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (158g)$$

$$D_3 = 0,001308 \quad (158h)$$