

Recomendación UIT-R P.1812-7

(08/2023)

Serie P: Propagación de las ondas radioeléctricas

**Método de predicción de la propagación
específico del trayecto para servicios
terrenales punto a zona en la gama de
frecuencias de 30 MHz a 6 GHz**



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.1812-7

Método de predicción de la propagación específico del trayecto para servicios terrenales punto a zona en la gama de frecuencias de 30 MHz a 6 GHz

(Cuestión UIT-R 203/3)

(2007-2009-2012-2013-2015-2019-2021-2023)

Cometido

En la presente Recomendación se describe un método de predicción de la propagación adaptado a los servicios terrenales punto a zona en la gama de frecuencias comprendida entre 30 MHz y 6 GHz. Predice los niveles de señal en la mediana de la distribución por trayectos múltiples rebasados durante un porcentaje de tiempo, $p\%$, donde $1\% \leq p \leq 50\%$, y en un porcentaje dado de ubicaciones, $p_L\%$, donde $1\% \leq p_L \leq 99\%$. El método proporciona un análisis detallado basado en el perfil del terreno.

Conviene utilizar el método para realizar predicciones en sistemas de radiocomunicaciones que emplean circuitos terrenales con trayectos que van desde 0,25 km hasta unos 3 000 km de longitud, con los dos terminales ubicados a una altura de hasta unos 3 km sobre el suelo. No conviene utilizar el método para predecir la propagación en circuitos radioeléctricos aire-suelo ni espacio-Tierra.

Esta Recomendación es un complemento a la Recomendación UIT-R P.1546.

Palabras clave

Trayectos de propagación específica a gran distancia, trayectos/circuitos troposféricos, predicciones de la pérdida básica de transmisión, variabilidad temporal y de emplazamientos

Abreviaciones/Glosario

amsl	Sobre el nivel medio del mar (<i>above mean sea level</i>)
IDWM	Mapa mundial digitalizado de la UIT (<i>ITU digitized world map</i>)
LoS	Con visibilidad directa (<i>line-of-sight</i>)
NLoS	Sin visibilidad directa (<i>non-line-of-sight</i>)
P-P	Punto a punto
TDT	Televisión digital terrenal
UHF	Ondas decimétricas (<i>ultra-high frequency</i>)
VHF	Ondas métricas (<i>very high frequency</i>)

Recomendaciones relacionadas de la UIT, Informes

Recomendación UIT-R P.452

Recomendación UIT-R P.528

Recomendación UIT-R P.530

Recomendación UIT-R P.617

Recomendación UIT-R P.844

Recomendación UIT-R P.1144

Recomendación UIT-R P.1406

Recomendación UIT-R P.1411

Recomendación UIT-R P.1546

Recomendación UIT-R P.2001

Recomendación UIT-R P.2040

NOTA – Debe utilizarse la última revisión/edición de la Recomendación/Informe.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) la necesidad de facilitar directrices a los ingenieros para la planificación de los servicios de radiocomunicaciones terrenales en las bandas de ondas métricas y decimétricas;
- b) la importancia de determinar la distancia geográfica mínima entre las estaciones que trabajan en canales que utilizan las mismas frecuencias o en canales adyacentes, a fin de evitar la interferencia inaceptable debida a la propagación terrenal a gran distancia,

observando

- a) que la Recomendación UIT-R P.528 proporciona directrices sobre la predicción de la pérdida básica de transmisión de punto a zona para el servicio móvil aeronáutico en la gama de frecuencias 100 MHz a 30 GHz;
- b) que la Recomendación UIT-R P.452 proporciona directrices para la evaluación detallada de la interferencia en microondas entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias superiores a unos 0,1 GHz;
- c) que la Recomendación UIT-R P.617 proporciona directrices sobre la predicción de la pérdida de propagación punto a punto en sistemas de radioenlaces transhorizonte en frecuencias superiores a 30 MHz y distancias de entre 100 y 1 000 km;
- d) que la Recomendación UIT-R P.1411 proporciona directrices sobre la predicción para servicios de exteriores de corto alcance (hasta 1 km);
- e) que la Recomendación UIT-R P.530 proporciona directrices sobre la predicción de la pérdida de propagación punto a punto en sistemas terrenales con visibilidad directa;
- f) que la Recomendación UIT-R P.1546 proporciona directrices sobre la predicción de intensidades de campo punto a zona en las bandas de ondas métricas y decimétricas, basándose principalmente en análisis estadísticos de datos experimentales;
- g) que la Recomendación UIT-R P.2001 contiene un modelo propagación terrenal de gran alcance, en la gama de frecuencias de 30 MHz a 50 GHz, incluidas las estadísticas sobre incremento y desvanecimiento de la señal, apropiado para su aplicación en el método de Monte Carlo;
- h) que la Recomendación UIT-R P.2040 ofrece orientación sobre los efectos de las propiedades de los materiales de construcción y las estructuras de la propagación de ondas radioeléctricas,

recomienda

que se adopte el procedimiento indicado en el Anexo 1 para la evaluación detallada de los niveles de las señales punto a zona asociadas a estos servicios.

NOTA – Los trayectos de propagación a larga distancia también pueden tener lugar en las bandas de ondas métricas a través de la ionosfera. Estos modos están descritos en la Recomendación UIT-R P.844.

Anexo 1

ÍNDICE

	<i>Página</i>
Anexo 1	3
1 Introducción.....	5
2 Elementos del modelo del método de predicción de la propagación	6
3 Parámetros de entrada.....	6
3.1 Datos básicos de entrada.....	6
3.2 Perfil del trayecto radioeléctrico.....	7
3.3 Zonas radioclimáticas	9
3.4 Distancias de los terminales a la costa.....	10
3.5 Parámetros radiometeorológicos básicos.....	10
3.6 El efecto de la propagación por conductos	11
3.7 Radio efectivo de la Tierra	12
3.8 Parámetros calculados a partir del análisis del perfil del trayecto.....	12
4 Procedimiento de predicción	13
4.1 Generalidades	13
4.2 Propagación con visibilidad directa (incluidos los efectos a corto plazo).....	13
4.3 Propagación por difracción.....	14
4.4 Propagación por dispersión troposférica	21
4.5 Propagación por conductos y por reflexión en capas	22
4.6 Pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo y para el 50% de las ubicaciones	24
4.7 Pérdidas por variabilidad de las ubicaciones	26
4.8 Pérdidas debidas a la penetración en edificios	27
4.9 Pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo en el $p_L\%$ de ubicaciones	27
4.10 Intensidad de campo rebasada durante el $p\%$ del tiempo en el $p_L\%$ de las ubicaciones	28
Adjunto 1 al Anexo 1 – Análisis del perfil del trayecto.....	28
1 Introducción.....	28
2 Construcción del perfil del trayecto.....	29

	<i>Página</i>
3 Longitud del trayecto.....	30
4 Clasificación del trayecto	31
5 Deducción de parámetros a partir del perfil del trayecto.....	31
5.1 Ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena transmisora por encima de la horizontal local, θ_t	32
5.2 Distancia al horizonte de la antena transmisora, d_{lt}	32
5.3 Ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena receptora por encima de la horizontal local, θ_r	32
5.4 Distancia al horizonte de la antena receptora, d_{lr}	32
5.5 Distancia angular θ (mrad)	33
5.6 Modelo de «Tierra lisa» y alturas efectivas de la antena.....	33
Adjunto 2 al Anexo 1 – Una aproximación a la función de distribución normal acumulativa complementaria inversa	36
Adjunto 3 al Anexo 1 – Método alternativo para calcular la pérdida de difracción de Tierra esférica L_{bulls}	37

1 Introducción

Se recomienda aplicar el método de predicción de la propagación descrito en el presente anexo para la evaluación detallada de los niveles de señal apropiados relativos a los servicios terrenales punto a zona en la gama de frecuencias de 30 MHz a 6 000 MHz. El método predice el nivel de señal (es decir, la intensidad de campo eléctrico) rebasado durante un porcentaje dado, $p\%$, de un año medio, donde $1\% \leq p \leq 50\%$, y en $p_L\%$ de ubicaciones, donde $1\% \leq p_L \leq 99\%$. Por consiguiente, el método se puede utilizar para predecir tanto la zona de servicio y la disponibilidad para un nivel de señal deseado (cobertura) como la reducción de esta zona y de la disponibilidad ocasionada por señales no deseadas, cocanal y/o de canal adyacente (interferencia).

El modelo de propagación de este método es simétrico, en el sentido de que en él se tratan de la misma forma los dos terminales radioeléctricos. Desde el punto de vista del modelo, no importa cuál de los terminales es el transmisor y cuál el receptor. No obstante, por ser conveniente para la descripción del modelo, se utilizan los términos «transmisor» y «receptor» para indicar los terminales situados al inicio y al final del trayecto radioeléctrico, respectivamente.

El método se describe en primer lugar en términos del cálculo de las pérdidas de transmisión básicas (dB) no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo para los valores medianos de los emplazamientos. Los elementos de variabilidad del emplazamiento se caracterizan a continuación estadísticamente con respecto a los emplazamientos del receptor además de los elementos de pérdidas debidas a la penetración en edificios de la Recomendación UIT-R P.2040. Posteriormente, se establece un procedimiento para convertir a intensidad de campo eléctrico (dB(μ V/m)) la potencia radiada aparente de 1 kW.

Se pretende que este método se aplique principalmente en sistemas que utilizan antenas de baja ganancia. No obstante, si se emplean antenas de alta ganancia, la variación de la precisión afecta solamente el elemento de dispersión troposférica del método general y las predicciones no cambian mucho. Por ejemplo, aun con antenas de 40 dBi en ambos extremos del enlace, las señales de dispersión troposférica se sobreestiman en tan sólo 1 dB aproximadamente.

El método es adecuado para realizar predicciones en sistemas de radiocomunicaciones que emplean circuitos terrenales con trayectos que van desde 0,25 km hasta unos 3 000 km de longitud, con los dos terminales ubicados a una altura de hasta unos 3 km sobre el suelo. No conviene utilizar el método para predecir la propagación en circuitos radioeléctricos aire-suelo ni espacio-Tierra.

El método de predicción de la propagación de este anexo es específico del trayecto. Las predicciones punto a zona realizadas utilizando este método consisten en una serie de muchas predicciones punto a punto (P-P) (es decir, de punto transmisor a multipunto receptor) distribuidas uniformemente en zonas de servicio teóricas. El número de puntos debe ser lo suficientemente grande como para garantizar que los valores previstos de las pérdidas de transmisión básicas o de las intensidades de campo así obtenidos sean estimaciones razonables de los valores medianos, con respecto a las ubicaciones, de las cantidades correspondientes para las zonas elementales que representan.

Por tanto, se supone que quienes utilizan esta Recomendación pueden especificar los perfiles detallados del terreno (es decir, las elevaciones sobre el nivel medio del mar) en función de la distancia a lo largo de los trayectos de círculo máximo (es decir, curvas geodésicas) entre los terminales, para muchas ubicaciones diferentes de los terminales (puntos de recepción). Lo que esta suposición implica, para la mayoría de las aplicaciones prácticas de este método de predicción de la cobertura punto a zona y de la interferencia, es que se debe contar con una base de datos digital de las elevaciones del terreno, que se pueda consultar introduciendo la latitud y longitud con respecto a datos geodésicos coherentes y de la que se puedan extraer los perfiles del terreno por medios automatizados. Si no se dispone de estos perfiles detallados del terreno, es preferible que se utilice la Recomendación UIT-R P.1546 para realizar las predicciones.

En vista de lo anterior, el elemento de variabilidad con la ubicación de esta Recomendación y el elemento del modelo de pérdidas debidas a la penetración en edificios de la Recomendación UIT-R P.2040 se caracterizan utilizando las estadísticas de distribuciones log-normal respecto a las ubicaciones del receptor. Aunque esta caracterización estadística del problema de propagación punto a zona pareciera hacer que, considerado en su conjunto, el modelo sea asimétrico (es decir, no recíproco), los usuarios de esta Recomendación deben tener presente que la variabilidad con la ubicación puede, en principio, aplicarse en cualquiera de los dos extremos del trayecto (es decir, en cualquiera de los dos terminales) o incluso en ambos (es decir, en el transmisor y en el receptor). No obstante, la corrección de la variabilidad con la ubicación sólo tiene sentido si se desconoce la ubicación exacta de alguno de los terminales y se necesita una representación estadística de las posibles ubicaciones de dicho terminal. Es poco probable que surjan situaciones en las que tenga sentido aplicar esto respecto a la ubicación del transmisor. Si se conocen exactamente las ubicaciones de los dos terminales y se utiliza este procedimiento en el modo punto a punto, la presente Recomendación se puede aplicar sólo con $p_L = 50\%$.

Lo anterior también es válido respecto a las pérdidas debidas a la penetración en edificios. El razonamiento es algo más complicado que para la variabilidad con la ubicación, debido a que la corrección mediana de las pérdidas debidas a la penetración es diferente de cero. Si el transmisor se encuentra dentro de un edificio, los usuarios de la Recomendación también deben añadir, en el extremo del transmisor, las pérdidas debidas a la penetración en el edificio a las pérdidas de transmisión básicas, pero deben ser conscientes de que la utilización de valores medianos de las pérdidas presentados pueden conducir a error si el transmisor no se encuentra en una ubicación «mediana».

2 Elementos del modelo del método de predicción de la propagación

El método de predicción de la propagación considera los siguientes elementos:

- visibilidad directa (LoS);
- difracción (abarca los casos de Tierra lisa, terreno irregular y subtrayectos);
- dispersión troposférica;
- propagación anómala (propagación por conductos y reflexión/refracción en capas);
- variabilidad con la ubicación;
- pérdidas debidas a la penetración en edificios (de la Recomendación UIT-R P.2040).

3 Parámetros de entrada

3.1 Datos básicos de entrada

En el Cuadro 1 se describen los datos básicos de entrada, que definen los terminales radioeléctricos, la frecuencia y el porcentaje de tiempo y las ubicaciones para las que se hacen las predicciones.

Las latitudes y longitudes de las dos estaciones se consideran datos básicos de entrada puesto que son necesarios para determinar el perfil del trayecto. Se deben obtener los parámetros radiometeorológicos correspondientes a una sola ubicación relacionada con el trayecto radioeléctrico y se debe seleccionar el centro del trayecto de los trayectos largos. Si se está prediciendo la zona de cobertura del transmisor, conviene obtener los parámetros radiometeorológicos de su ubicación.

CUADRO 1

Datos básicos de entrada

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo	Descripción
f	GHz	0,03	6,0	Frecuencia (GHz)
p	%	1,0	50,0	Porcentaje medio anual en que se rebasa el nivel de señal calculado
p_L	%	1	99	Porcentaje de ubicaciones para las que se rebasa el nivel de señal calculado
φ_t, φ_r	grados	-80	+80	Latitud del transmisor, receptor
ψ_t, ψ_r	grados	-180,0	180,0	Longitud del transmisor, receptor (positiva = al Este de Greenwich)
h_{tg}, h_{rg}	m	1	3 000	Altura del centro de la antena sobre el nivel del suelo
Polarización				Polarización de la señal, por ejemplo, vertical u horizontal
w_s	m	1	100	Ancho de la calle. Debe usarse el valor de 27, salvo que se disponga de valores locales específicos

La polarización en el Cuadro 1 no es un parámetro con un valor numérico. La información se usa en el § 4.3.3 en relación con las ecuaciones (29a), (29b) y (30).

3.2 Perfil del trayecto radioeléctrico

Los perfiles de trayecto utilizados en el método que se describe a continuación requieren datos específicos del trayecto relativos a las alturas del terreno y además a las categorías de ocupación del suelo específicas del trayecto (cobertura del terreno) o a las alturas de la superficie específicas del trayecto a lo largo del trayecto. Por alturas del terreno nos referimos a la tierra llana para diferenciarlas de las alturas de la superficie que incluyen las estructuras naturales o artificiales situadas sobre el terreno.

A fin de poder aplicar el método de predicción de la propagación es necesario contar previamente con un perfil del trayecto radioeléctrico. En principio, está compuesto por tres conjuntos, todos ellos con el mismo número de valores, n , así:

$$d_i : \text{distancia del } i\text{-ésimo punto del perfil al transmisor (km)} \quad (1a)$$

$$h_i : \text{altura de terreno del } i\text{-ésimo punto del perfil sobre el nivel del mar (m)} \quad (1b)$$

$$g_i : \text{altura de la superficie del } i\text{-ésimo punto del perfil sobre el nivel del mar (m)} \quad (1c)$$

donde:

$$i : 1, 2, 3, \dots, n = \text{índice del punto del perfil}$$

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

La altura de la ocupación del suelo no debe añadirse a las alturas del terreno en el transmisor y el receptor. Así, g_1 es la altura del terreno en el transmisor en metros sobre el nivel del mar y g_n es la altura del terreno en el receptor en metros sobre el nivel del mar.

Ha de haber al menos un punto del perfil intermedio entre el transmisor y el receptor. De esta forma, n deberá ser ≥ 3 . 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_1 es cero y que h_1 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.

Podrían utilizarse dos métodos de cálculo del perfil para obtener la altura de la superficie g_i , que se señalan en las secciones siguientes. El primero utiliza datos relativos a la ocupación del terreno para determinar una altura representativa de la ocupación del suelo que puede añadirse a las alturas del terreno, mientras que el segundo utiliza datos relativos a la altura de la superficie, cuyas alturas comprenden obstáculos sin distinción explícita entre terreno y obstáculo.

3.2.1 Datos relativos al terreno y la ocupación del terreno

Este método incluye:

- 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. Es importante señalar que la pérdida por difracción puede sobreestimarse si las alturas del terreno h_i , incluyen las estructuras naturales o artificiales situadas sobre el terreno. Si se dispone de datos precisos sobre las alturas de la superficie, podría conseguirse una mejor estimación de la pérdida por propagación utilizando el método de cálculo del perfil explicado en el § 3.2.2 o podrían explorarse otras técnicas, como el trazado de rayos en 3D, en la que se contemplaría el efecto de la difracción alrededor de los edificios.

En este método se estima el perfil de la altura de la superficie utilizando las alturas del terreno con la adición de las alturas representativas del obstáculo sobre la base de las categorías de obstáculos en cada punto del perfil.

Las alturas de la superficie g_i están determinadas por:

$$g_i = \begin{cases} h_i + \text{altura representativa de la ocupación del suelo para el } i\text{-ésimo punto del perfil (m)} & \text{para } i = 2, \dots, n - 1 \\ h_1 & \text{para } i = 1 \\ h_n & \text{para } i = n \end{cases} \quad (1d)$$

Cuando se utiliza este método, la separación de perfiles no debe ser inferior a 30 m.

La «altura representativa de la ocupación del suelo» que se menciona en la ecuación (1c) 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 de la ocupación del suelo 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 2 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 2

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 (1c) para $i = 2$ a $n-1$
Agua/mar	0
Abierta/rural	0
Suburbana	10
Urbana/árboles/bosque	15
Urbana densa	20

3.2.2 Datos relativos al terreno y la superficie

En este método se obtiene el perfil de la altura de la superficie directamente a partir de los datos sobre la altura de la superficie.

Las alturas de superficie g_i están determinadas por:

$$g_i = \begin{cases} \text{altura de la superficie del } i\text{-ésimo punto del perfil sobre el nivel del mar (m)} & \text{para } i = 2, \dots, n-1 \\ h_1 & \text{para } i = 1 \\ h_n & \text{para } i = n \end{cases} \quad (1e)$$

Dado que los datos sobre la altura de la superficie deben utilizarse con una resolución similar a la separación de perfiles, cuando se utiliza este método, la separación inferior a 10 m podría dar lugar a una sobrestimación de la pérdida de transmisión básica, dado que los datos describirán los obstáculos individuales. Las numerosas pruebas llevadas a cabo han demostrado que la utilización de una separación de perfiles superior a 50 m no ofrece ventajas con respecto al método descrito en el § 3.2.1.

3.3 Zonas radioclimáticas

También es necesario saber qué partes del trayecto atraviesan las zonas radioclimáticas descritas en el Cuadro 3.

A efectos de referencia, la administración podría utilizar los contornos de las costas indicados en el mapa mundial digitalizado de la UIT (IDWM, *ITU Digitized World Map*) que está disponible en la página web de la Oficina de Radiocomunicaciones (BR) en <https://www.itu.int/pub/R-SOFT-IDWM/es>. Si todos los puntos del trayecto se encuentran al menos a 50 km del mar o de otras grandes masas de agua, se aplica sólo la categoría tierra interior.

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

CUADRO 3

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
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)

3.4 Distancias de los terminales a la costa

Si el trayecto cruza una zona tipo B, son necesarios otros dos parámetros, d_{ct} , d_{cr} , que representan, respectivamente, la distancia del transmisor y del receptor a la costa (km), en dirección del otro terminal. Si el terminal se encuentra en un barco o en una plataforma marina, la distancia es cero.

3.5 Parámetros radiometeorológicos básicos

El procedimiento de predicción requiere dos parámetros radiometeorológicos para describir la variabilidad de la refractividad atmosférica:

- ΔN (unidades N/km), el gradiente medio de refractividad radioeléctrica a lo largo del primer km de la atmósfera, proporciona los datos en que se basa el cálculo del radio efectivo de la Tierra apropiado para el análisis del perfil del trayecto y del obstáculo de difracción. Cabe señalar que en este procedimiento ΔN toma un valor positivo.
- 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 del mecanismo de dispersión troposférica.

En el caso de no disponer de mediciones locales, estas cantidades se pueden obtener de los mapas de los productos digitales integrales proporcionados por esta Recomendación. Los mapas están incluidos en los ficheros DN50.txt y N050.txt respectivamente. Los gama de los datos de longitud son de 0° a 360° y los de latitud de +90° a -90°, con una resolución de 1,5° en ambos casos. Los datos se emplean conjuntamente con los ficheros de datos LAT.txt y LON.txt que contienen las latitudes y las longitudes de las entradas correspondientes (puntos de la rejilla) de los ficheros DN50.txt y N050.txt. Para una ubicación diferente a los puntos de rejilla, los parámetros de la ubicación deseada pueden obtenerse mediante interpolación bilineal sobre los valores de los cuatro puntos de la rejilla más próximos, como se describe en la Recomendación UIT-R P.1144.

CUADRO 4
Productos digitales integrales

Nombre del fichero	Origen	Latitud			Longitud		
		De (grados)	A (grados)	Separación (grados)	De (grados)	A (grados)	Separación (grados)
DN50.txt	P.453	90	-90	1,5	0	360	1,5
N050.txt	P.453	90	-90	1,5	0	360	1,5
LAT.txt	P.453	90	-90	1,5	0	360	1,5
LON.txt	P.453	90	-90	1,5	0	360	1,5

Estos mapas digitales se han obtenido a partir del análisis de los datos globales de ascensos de radiosondas en un periodo de diez años (1983-1992).

Los mapas digitales se encuentran en el fichero zip [R-REC-P.1812-7-202308-I!!!ZIP-E.zip](#).

3.6 El efecto de la propagación por conductos

El grado en que mejoran los niveles de las señales por efecto de la propagación anómala, en particular por la propagación por conductos, se cuantifica mediante el parámetro β_0 (%), que es el porcentaje de tiempo en el que pueden esperarse, en los primeros 100 m de la baja atmósfera, unos valores del gradiente de refractividad superiores a 100 unidades N/km. β_0 se calcula de la siguiente forma.

Se determina el parámetro μ_1 , que depende de la proporción del trayecto sobre tierra (tierra interior o tierra costera) y sobre mar:

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

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

y

$$\tau = 1 - \exp\left(-0,000412d_{tm}^{2,41}\right) \quad (3)$$

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

d_m : sección continua más larga sobre la tierra (interior) del trayecto en el círculo máximo (km).

En el Cuadro 3 figuran las zonas radioclimáticas que han de utilizarse para calcular d_{tm} y d_{lm} . Si todos los puntos se encuentran al menos a 50 km del mar o de cualquier otra gran masa de agua, se aplica sólo la categoría de tierra interior y d_{tm} y d_{lm} son iguales a la longitud del trayecto, d .

Se determina el parámetro μ_4 , que depende de μ_1 y de la latitud del centro del trayecto dada en grados:

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

donde:

φ : latitud del centro del trayecto (grados).

Por último, se determina β_0 :

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi| + 1,67} \mu_1 \mu_4 & \% & \text{para } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4,17 \mu_1 \mu_4 & \% & \text{para } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (5)$$

3.7 Radio efectivo de la Tierra

El valor mediano del factor radio efectivo de la Tierra, k_{50} , del trayecto viene dado por:

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (6)$$

El valor medio del gradiente de la refractividad radioeléctrica, ΔN , puede obtenerse del mapa digital integral DN50.txt, utilizando la latitud y longitud del centro del trayecto en representación de todo el trayecto.

El valor mediano del radio efectivo de la Tierra, a_e , viene dado por:

$$a_e = k_{50} a \quad \text{km} \quad (7a)$$

donde $a = 6\,371$ km es el radio físico promedio de la Tierra.

El radio efectivo de la Tierra rebasado durante un tiempo β_0 , a_β , viene dado por:

$$a_\beta = k_\beta a \quad \text{km} \quad (7b)$$

donde $k_\beta = 3,0$ es un valor estimativo del factor radio efectivo de la Tierra rebasado durante un tiempo β_0 .

El radio efectivo de la Tierra general se define con $a_p = a_e$ para el 50% del tiempo, y $a_p = a_\beta$ para el $\beta_0\%$ del tiempo.

3.8 Parámetros calculados a partir del análisis del perfil del trayecto

Los valores de una serie de parámetros relacionados con el trayecto que son necesarios para el cálculo y que se indican en el Cuadro 5, 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 (7a). En el Adjunto 1 al presente anexo figura información sobre la obtención, determinación y análisis del perfil del trayecto.

4 Procedimiento de predicción

4.1 Generalidades

Este punto describe el procedimiento general de predicción. Primero se evalúan las pérdidas de transmisión básicas, L_b (dB), no rebasadas durante el porcentaje requerido de tiempo anual, $p\%$, para el 50% de las ubicaciones, conforme a lo descrito en los § 4.2 a 4.6 (es decir, las pérdidas básicas de transmisión debidas a la propagación de visibilidad directa, propagación por difracción, propagación por dispersión troposférica, propagación por reflexión en conductos/capas y la combinación de estos mecanismos de propagación a fin de predecir las pérdidas de transmisión básicas, respectivamente). En los § 4.7 y 4.8, se describen métodos que tienen en cuenta los efectos de la variabilidad con la ubicación y las pérdidas debidas a la penetración en edificios. Por último, en el § 4.10 se indica la relación entre las pérdidas básicas de transmisión y la intensidad de campo (dB μ V/m) para una potencia radiada aparente de 1 kW.

CUADRO 5

Valores de parámetros que han de calcularse a partir del análisis del perfil del trayecto

Parámetro	Descripción
d	Distancia del trayecto a lo largo del círculo máximo (km)
d_{lt}, d_{lr}	Distancia de las antenas de transmisión y de recepción a sus horizontes respectivos (km)
θ_t, θ_r	Ángulos de elevación de las antenas de transmisión y de recepción con relación al horizonte, respectivamente (mrad)
θ	Distancia angular del trayecto (mrad)
h_{ts}, h_{rs}	Altura del centro de la antena sobre el nivel medio del mar (m)
h_{tc}, h_{rc}	h_{ts} y h_{rs} , respectivamente
h_{te}, h_{re}	Alturas efectivas de las antenas sobre el terreno (m) para el modelo de propagación por conductos y reflexión en capas y según se establece en el Adjunto 1 al Anexo 1
d_b	Longitud combinada de las secciones del trayecto sobre el agua (km)
ω	Fración del trayecto total sobre el agua: $\omega = d_b/d$ donde d es la distancia del círculo máximo (km) calculada utilizando la ecuación (73). Para trayectos realizados totalmente sobre tierra: $\omega = 0$.

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

Todo lo que sigue a continuación debe evaluarse tanto para los trayectos transhorizonte como de visibilidad directa.

Las pérdidas de transmisión básicas debidas a la propagación en el espacio libre vienen dadas por:

$$L_{bfs} = 92,4 + 20 \log f + 20 \log(d_{fs}) \quad \text{dB} \quad (8)$$

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 del trayecto a lo largo del círculo máximo (km)

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

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

Las correcciones de los efectos de propagación multitrayecto y de enfoque para los porcentajes de tiempo p y β_0 vienen dadas respectivamente por:

$$E_{sp} = 2,6 \left[1 - \exp\left(-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10}\right) \right] \log\left(\frac{p}{50}\right) \quad \text{dB} \quad (9a)$$

$$E_{s\beta} = 2,6 \left[1 - \exp\left(-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10}\right) \right] \log\left(\frac{\beta_0}{50}\right) \quad \text{dB} \quad (9b)$$

Se determinan las pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el porcentaje de tiempo $p\%$, debidas a la propagación con visibilidad directa (independientemente de si el trayecto es en realidad o no de visibilidad directa), utilizando la siguiente expresión:

$$L_{b0p} = L_{bfs} + E_{sp} \quad \text{dB} \quad (10)$$

Se calculan las pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el porcentaje de tiempo $\beta_0\%$, debidas a la propagación con visibilidad directa (independientemente de si el trayecto es en realidad o no de visibilidad directa), utilizando la siguiente expresión:

$$L_{b0\beta} = L_{bfs} + E_{s\beta} \quad \text{dB} \quad (11)$$

4.3 Propagación por difracción

La pérdida 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.

El método arroja un valor estimativo de las pérdidas por difracción para todos los tipos de trayecto, incluidos los trayectos por mar, por tierra interior y por tierra costera; independientemente de si el trayecto es liso o abrupto, y de si existe visibilidad directa o transhorizonte.

El método por difracción se utiliza siempre para el radio efectivo mediano de la Tierra. Si sólo se requiere una predicción general para $p = 50\%$, no es necesario proseguir con los cálculos de la difracción.

En el caso general en que $p < 50\%$, debe efectuarse el cálculo por difracción por segunda vez para un factor del radio efectivo de la Tierra igual a 3. Este segundo cálculo proporciona una estimación de las pérdidas por difracción no rebasadas durante el $\beta_0\%$ del tiempo, donde β_0 viene dado por la ecuación (5).

Se calculan a continuación las pérdidas por difracción no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo, donde $1\% \leq p \leq 50\%$, utilizando el procedimiento de limitación o interpolación descrito en el § 4.3.5.

El método emplea una aproximación de las pérdidas por difracción para una sola arista afilada como función de parámetro adimensional, v , expresadas mediante:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad (12)$$

Obsérvese que $J(-0,78) \approx 0$, lo que define el límite inferior para el que se debe utilizar esta aproximación. Para $v \leq -0,78$ se debe fijar $J(v)$ a cero.

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

En el § 4.3.1 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 § 4.3.2 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 § 4.3.1.

En el § 4.3.3 se describe cómo se emplean conjuntamente los métodos descritos en el § 4.3.1 y en el § 4.3.2 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 § 4.3.4 se describe el cálculo completo para las pérdidas por difracción no rebasadas durante un porcentaje de tiempo $p\%$ determinado.

4.3.1 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 del i -ésimo punto del perfil son d_i km y g_i m sobre el nivel del mar, respectivamente, i adopta valores de 1 a n , siendo n el número de puntos de perfil, y la longitud del trayecto completo es d km. 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 de a_p vienen definidos en § 4.3.5.

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

$$S_{tim} = \max \left[\frac{g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{tc}}{d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (13)$$

donde el índice del perfil i adopta valores situados entre 2 y $n-1$.

Se calcula la pendiente de la línea que va del transmisor al receptor, suponiendo un trayecto LoS:

$$S_{tr} = \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \quad \text{m/km} \quad (14)$$

Ahora, deben considerarse dos casos.

Caso 1. El trayecto de difracción es LoS

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

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

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{tc}(d - d_i) + h_{rc}d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (15)$$

donde el índice del perfil i adopta valores situados entre 2 y $n-1$.

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

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{dB} \quad (16)$$

donde la función J viene dada por la ecuación (12) para un valor de v_b mayor que $-0,78$, y es cero de otro modo.

Caso 2. El trayecto de difracción es transhorizonte

Si $S_{im} \geq S_{tr}$, el trayecto de difracción es transhorizonte.

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

$$S_{rim} = \max \left[\frac{g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{rc}}{d - d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (17)$$

donde el índice del perfil i adopta valores situados entre 2 y $n-1$.

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

$$d_{bp} = \frac{h_{rc} - h_{tc} + S_{rim}d}{S_{tim} + S_{rim}} \quad \text{km} \quad (18)$$

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

$$v_b = \left[h_{tc} + S_{tim}d_{bp} - \frac{h_{tc}(d - d_{bp}) + h_{rc}d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_{bp}(d - d_{bp})}} \quad (19)$$

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

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{dB} \quad (20)$$

Para L_{uc} calculado según la ecuación (16) o la (20), la pérdida por difracción debida a la construcción de Bullington para el trayecto viene ahora dada por:

$$L_{bull} = L_{uc} + \left[1 - \exp\left(\frac{-L_{uc}}{6}\right) \right] (10 + 0,02d) \quad \text{dB} \quad (21)$$

4.3.2 Pérdida por difracción de la Tierra esférica

La pérdida por difracción de la Tierra esférica para alturas reales de antena h_{tesph} y h_{resph} (m), L_{dsph} , se calcula de la manera siguiente.

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

$$d_{los} = \sqrt{2a_p} \left(\sqrt{0,001h_{tesph}} + \sqrt{0,001h_{resph}} \right) \quad \text{km} \quad (22)$$

Los valores que deben utilizarse para a_p están en el § 4.3.5. Las alturas efectivas de antena h_{tesph} y h_{resph} están definidas en las ecuaciones (38a) y (38b).

Si $d \geq d_{los}$, se calcula la pérdida por difracción utilizando el método descrito en el § 4.3.3 *infra* para $a_{dft} = a_p$ para obtener L_{dft} , y se fija L_{dsph} igual a L_{dft} . 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:

$$h_{se} = \frac{\left(h_{tesph} - 500 \frac{d_{se1}^2}{a_p} \right) d_{se2} + \left(h_{resph} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_{se1}}{d} \quad \text{m} \quad (23)$$

donde:

$$d_{se1} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{km} \quad (24a)$$

$$d_{se2} = d - d_{se1} \quad \text{km} \quad (24b)$$

$$b = 2 \sqrt{\frac{m_c + 1}{3m_c}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m_c}{(m_c + 1)^3}} \right) \right\} \quad (24c)$$

donde la función arcos devuelve un ángulo en radianes

$$c = \frac{h_{tesph} - h_{resph}}{h_{tesph} + h_{resph}} \quad (24d)$$

$$m_c = \frac{250d^2}{a_p (h_{tesph} + h_{resph})} \quad (24e)$$

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

$$h_{req} = 17,456 \sqrt{\frac{d_{se1} d_{se2} \lambda}{d}} \quad \text{m} \quad (25)$$

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:

$$a_{em} = 500 \left(\frac{d}{\sqrt{h_{tesph}} + \sqrt{h_{resph}}} \right)^2 \quad \text{km} \quad (26)$$

Se utiliza el método en el § 4.3.3 para $a_{dft} = a_{em}$ para 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:

$$L_{dsph} = \left[1 - \frac{h_{se}}{h_{req}} \right] L_{dft} \quad \text{dB} \quad (27)$$

4.3.3 Parte correspondiente al primer término de la pérdida 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 § 4.3.2 *supra* para dar con el primer término de la pérdida por difracción L_{dft} para un valor determinado del radio efectivo de la Tierra a_{dft} . El valor de a_{dft} que debe usarse se proporciona en el § 4.3.2.

Se determinan las propiedades eléctricas del terreno típicas para la tierra, con un valor de la permisividad relativa $\epsilon_r = 22,0$ y un valor de la conductividad $\sigma = 0,003$ S/m y se calcula L_{dft} utilizando las ecuaciones (29) a (36) 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 permisividad relativa $\epsilon_r = 80,0$ y un valor de la conductividad $\sigma = 5,0$ S/m y se calcula L_{dft} utilizando las ecuaciones (29) a (36) y el resultado recibe el nombre de L_{dftsea} .

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

$$L_{dft} = \omega L_{dftsea} + (1 - \omega) L_{dftland} \quad \text{dB} \quad (28)$$

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:

$$K_H = 0,036 (a_{dft} f)^{-1/3} \left[(\epsilon_r - 1)^2 + \left(\frac{18\sigma}{f} \right)^2 \right]^{-1/4} \quad \text{(horizontal)} \quad (29a)$$

y

$$K_V = K_H \left[\epsilon_r^2 + \left(\frac{18\sigma}{f} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{(vertical)} \quad (29b)$$

Si el vector de polarización contiene componentes horizontal y vertical, como en los casos circular u oblicua, se descompone en las dos componentes horizontal y vertical y se calcula cada una independientemente para combinar los resultados en una suma de vectores de la amplitud de campo. En la práctica, esta descomposición no será generalmente necesaria porque por encima de 300 MHz se puede usar un valor de 1 para β_{dft} en la ecuación (30).

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

$$\beta_{dft} = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4} \quad (30)$$

donde K es K_H o K_V , según la polarización.

Distancia normalizada:

$$X = 21,88\beta_{dft} \left(\frac{f}{a_{dft}^2} \right)^{1/3} d \quad (31)$$

Alturas normalizadas del transmisor y el receptor:

$$Y_t = 0,9575\beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{tesph} \quad (32a)$$

$$Y_r = 0,9575\beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{resph} \quad (32b)$$

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

$$F_X = \begin{cases} 11+10\log(X) - 17,6X & \text{para } X \geq 1,6 \\ -20\log(X) - 5,6488X^{1,425} & \text{para } X < 1,6 \end{cases} \quad (33)$$

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

$$G(Y) = \begin{cases} 17,6(B-1,1)^{0,5} - 5\log(B-1,1) - 8 & \text{para } B > 2 \\ 20\log(B+0,1B^3) & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (34)$$

donde:

$$B = \beta_{dft} Y \quad (35)$$

Se limita $G(Y)$ de modo que $G(Y) \geq 2 + 20\log K$.

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

$$L_{dft} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{dB} \quad (36)$$

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

Se utiliza el método descrito en el § 4.3.1 para la altura del perfil del trayecto (g_i) y la altura de las antenas (h_{tc} , h_{rc}). Se establece la pérdida por difracción resultante 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 (21).

En el Adjunto 3 a este Anexo se proporciona un método alternativo para calcular L_{bulls} sin utilizar el análisis del perfil del terreno.

Se utiliza el método descrito en § 4.3.1 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:

$$h'_{tc} = h_{tc} - h_{std} \quad \text{m} \quad (37a)$$

$$h'_{rc} = h_{rc} - h_{srd} \quad \text{m} \quad (37b)$$

siendo la altura de la Tierra lisa en el transmisor y el receptor, h_{std} y h_{srd} , la que se da en el § 5.6.2 del Adjunto 1 al presente Anexo. Se establece la pérdida 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 (21).

Se utiliza el método descrito en § 4.3.2 para calcular la pérdida por difracción de la Tierra esférica L_{dsph} para una longitud del trayecto real de d km y con:

$$h_{iesph} = h'_{ic} \quad \text{m} \quad (38a)$$

$$h_{resph} = h'_{rc} \quad \text{m} \quad (38b)$$

La pérdida por difracción para el trayecto general viene dada ahora por:

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \quad \text{dB} \quad (39)$$

4.3.5 Pérdida por difracción no rebasada durante un porcentaje de tiempo $p\%$

Se utiliza el método descrito en § 4.3.4 para calcular la pérdida por difracción L_d para el valor mediano del radio efectivo de la Tierra $a_p = a_e$, que viene dado por la ecuación (7a). Se establece la pérdida por difracción mediana $L_{d50} = L_d$.

Si $p = 50\%$ la pérdida por difracción no rebasada durante un porcentaje de tiempo $p\%$, L_{dp} , viene dada por L_{d50} .

Si $p < 50\%$, la pérdida de difracción no superada durante un porcentaje de tiempo $p\%$, L_{dp} , se calcula de la manera siguiente.

Se emplea el método descrito en § 4.3.4 para calcular la pérdida por difracción L_d para el radio efectivo de la Tierra no rebasada durante un porcentaje de tiempo $\beta_0\%$, $a_p = a_\beta$ tal y como viene dada por la ecuación (7b). Se establece la pérdida por difracción no rebasada 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 una distribución log-normal de pérdidas por difracción en la gama $\beta_0\% \leq p \leq 50\%$, que viene dada por:

$$F_i = \begin{cases} 0 & \text{si } p = 50\% \\ \frac{I(p/100)}{I(\beta_0/100)} & \text{si } \beta_0\% < p < 50\% \\ 1 & \text{si } 1\% \leq p \leq \beta_0\% \end{cases} \quad (40)$$

donde $I(x)$ es la distribución normal acumulativa complementaria inversa en función de la probabilidad x . En el Adjunto 2 del presente anexo figura una aproximación de $I(x)$ fiable para $x \leq 0,5$.

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

$$L_{dp} = L_{d50} + (L_{d\beta} - L_{d50}) F_i \quad \text{dB} \quad (41)$$

F_i se define en la ecuación (40), 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:

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{dB} \quad (42)$$

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:

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB} \quad (43)$$

donde L_{b0p} se calcula según la ecuación (10).

4.4 Propagación por dispersión troposférica

Se recomienda utilizar el siguiente procedimiento paso a paso para realizar una estimación de las pérdidas de transmisión básicas debidas a la dispersión troposférica $L_{bs}(p)$, no rebasadas durante el porcentaje de tiempo p . El procedimiento hace uso de los siguientes parámetros del enlace: longitud de trayecto de círculo máximo d (km), frecuencia f (MHz), ganancia de la antena transmisora G_t (dBi), ganancia de la antena receptora G_r (dBi), ángulo de elevación al horizonte θ_t (mrad) en el transmisor y ángulo de elevación al horizonte θ_r (mrad) en el receptor.

Paso 1: Obtener la refractividad de la superficie a nivel del mar media anual N_0 y la tasa media de variación del índice de refracción radioeléctrica ΔN del volumen común del enlace en cuestión utilizando los mapas digitales correspondientes (véase el Anexo 1, § 3.5). Las coordenadas de la superficie de la Tierra que corresponden al volumen común pueden obtenerse con arreglo al método indicado en la Recomendación UIT-R P.2001, § 3.9.

Paso 2: Se calcula el ángulo de dispersión θ (distancia angular) en mrad mediante la ecuación (82). El valor de θ se limita de forma que $\theta \geq 10^{-6}$.

Paso 3: Se calcula la pérdida de acoplamiento entre la antena y el medio, L_c , a partir de la ecuación:

$$L_c = 0,07 \exp[0,055(G_t + G_r)] \quad \text{dB} \quad (44)$$

donde G_t y G_r son las ganancias de antena.

Paso 4: Se calcula la pérdida de transmisión básica asociada con la dispersión troposférica no superada durante el $p\%$ del tiempo a partir de la ecuación:

$$L_{bs}(p) = F + 22 \log_{10} f + 35 \log_{10} \theta + 17 \log_{10} d + L_c - Y_p \quad \text{dB} \quad (44a)$$

donde:

$$F = 0,18 \cdot N_0 \cdot \exp\left(-\frac{h_s}{h_b}\right) - 0,23\Delta N \quad \text{dB} \quad (44b)$$

$$Y_p = \begin{cases} 0,035N_0 \exp(-h_0/h_b) \cdot (-\log_{10}(p/50))^{0,67} & p < 50 \\ -0,035N_0 \exp(-h_0/h_b) \cdot (-\log_{10}[(100-p)/50])^{0,67} & p \geq 50 \end{cases} \quad (44c)$$

$$h_0 = \frac{h_{ts}}{1000} + \frac{d \operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen}(\theta/1000)} \left[\frac{d \operatorname{sen} \beta}{2a_e \operatorname{sen}(\theta/1000)} + \operatorname{sen}(\theta_t/1000) \right] \quad (45)$$

$$\beta = \frac{d}{2a_e} + \frac{\theta_r}{1000} + \frac{h_{rs} - h_{ts}}{1000d} \quad (45a)$$

con:

- d : distancia del trayecto a lo largo del círculo máximo (km)
- a_e : radio efectivo mediano de la Tierra (km)
- h_{ts} : altura de la antena transmisora sobre el nivel medio del mar (m)
- h_{rs} : altura de la antena receptora sobre el nivel medio del mar (m)
- h_s : altura del terreno sobre el nivel medio del mar en la ubicación geográfica del volumen común (km)
- h_b : altura de escala (km) que puede determinarse por método estadístico para diferentes climas. A título de referencia, la media mundial de la altura de escala puede definirse por $h_b = 7,35$ km.

Para evitar subestimar la pérdida por dispersión troposférica en trayectos cortos, L_{bs} se limita de forma que:

$$L_{bs} \geq L_{bfs} \quad \text{dB} \quad (45b)$$

Donde la pérdida de transmisión básica debida a la propagación en el espacio libre L_{bfs} viene dada por la ecuación (8).

4.5 Propagación por conductos y por reflexión en capas

Las pérdidas de transmisión básicas relacionadas con la propagación por conductos/reflexión en capas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo, L_{ba} (dB), vienen dadas por:

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

donde:

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

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

A_{lf} : corrección empírica que tiene en cuenta la atenuación creciente con longitud de onda en la propagación por conductos

$$A_{lf}(f) = \begin{cases} 45,375 - 137,0f + 92,5f^2 & \text{dB para } f < 0,5 \text{ GHz} \\ 0 & \text{dB para } f \geq 0,5 \text{ GHz} \end{cases} \quad (47a)$$

A_{st}, A_{sr} : pérdidas por difracción debidas al apantallamiento del emplazamiento para las estaciones transmisora y receptora, respectivamente:

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

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 transmisora y receptora, respectivamente:

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

$$A_{ct, cr} = \begin{cases} -3 \exp \left(-0,25 d_{ct, cr}^2 \right) \left\{ 1 + \text{tgh} \left[0,07 (50 - h_{ts, rs}) \right] \right\} & \text{dB para } \omega \geq 0,75 \\ & d_{ct, cr} \leq d_{lt, lr} \\ & d_{ct, cr} \leq 5 \text{ km} \\ 0 & \text{dB para todas las demás condiciones} \end{cases} \quad (49)$$

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:

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

siendo:

γ_d : atenuación específica:

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

θ' : distancia angular (corregida cuando proceda con la ecuación (48a)) para poder aplicar el modelo de apantallamiento del emplazamiento de la ecuación (46):

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

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

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

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

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \exp \left[- (9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2) \cdot 10^{-6} d^{1,13} \right] \quad (53a)$$

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

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.

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

donde:

$$\varepsilon = 3,5$$

τ : definida en la ecuación (3) y el valor de α no podrá estar por debajo de $-3,4$

μ_3 : corrección por la rugosidad del terreno:

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

y:

$$d_l = \text{mín} (d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (56a)$$

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

4.6 Pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo y para el 50% de las ubicaciones

Debe aplicarse el siguiente procedimiento a los resultados de los cálculos anteriores, para todos los trayectos, con fin de calcular las pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo para el 50% de las ubicaciones. A fin de evitar discontinuidades ilógicas desde el punto de vista físico en las pérdidas de transmisión básicas teóricas previstas, deben combinarse los anteriores modelos para obtener valores modificados de dichas pérdidas de transmisión básicas y lograr una predicción global para el $p\%$ del tiempo y 50% de las ubicaciones.

Se calcula el factor de interpolación, F_j , a fin de tomar en cuenta la distancia angular del trayecto:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left[1,0 + \operatorname{tgh} \left(3,0 \xi \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right] \quad (57)$$

donde:

- Θ : parámetro fijo que determina la gama de ángulos abarcados por la combinación correspondiente; se fija en 0,3 mrad
- ξ : parámetro fijo que determina la pendiente de la combinación al final de la gama; se fija en 0,8
- θ : distancia angular del trayecto (mrad) definida en el Cuadro 7.

Se calcula el factor de interpolación, F_k , a fin de tomar en cuenta la distancia del círculo máximo:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left[1,0 + \operatorname{tgh} \left(3,0 \kappa \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right] \quad (58)$$

donde:

- d : longitud del trayecto de círculo máximo definida en el Cuadro 3 (km)
- d_{sw} : parámetro fijo que determina la gama de distancias abarcadas por la combinación correspondiente; se fija en 20
- κ : parámetro fijo que determina la pendiente de la combinación a los extremos de la gama; se fija en 0,5.

Se calculan las pérdidas de transmisión básicas mínimas teóricas, L_{minb0p} (dB), correspondientes a la propagación con visibilidad directa y a la difracción de subtrayectos sobre el mar:

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{para } p < \beta_0 \quad \text{dB} \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50})F_i & \text{para } p \geq \beta_0 \quad \text{dB} \end{cases} \quad (59)$$

donde:

- L_{b0p} : pérdidas de transmisión básicas con visibilidad directa teóricas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo, dadas por la ecuación (10)
- $L_{b0\beta}$: pérdidas de transmisión básicas con visibilidad directa teóricas no rebasadas durante el $\beta_0\%$ dadas por la ecuación (11)
- L_{dp} : pérdidas por difracción no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo, dadas por la ecuación (41)
- L_{bd50} : valor mediano de las pérdidas de transmisión básicas causadas por la difracción, dadas por la ecuación (42)
- F_i : factor de interpolación de la difracción dado por la ecuación (40).

Se calculan las pérdidas de transmisión básicas mínimas teóricas, L_{minbap} (dB), relativas a las mejoras de las señales con visibilidad directa y transhorizonte:

$$L_{minbap} = \eta \ln \left[\exp\left(\frac{L_{ba}}{\eta}\right) + \exp\left(\frac{L_{b0p}}{\eta}\right) \right] \quad \text{dB} \quad (60)$$

donde:

L_{ba} : pérdidas de transmisión básicas de propagación por conductos/reflexión en capas, no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo, dadas por la ecuación (46)

L_{b0} : pérdidas de transmisión básicas con visibilidad directa teóricas, no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo, dadas por la ecuación (10)

$$\eta = 2,5.$$

Se calculan las pérdidas de transmisión básicas teóricas, L_{bda} (dB), correspondientes a la difracción y a la visibilidad directa o a las mejoras de propagación por conductos/reflexión en capas:

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{para } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap})F_k & \text{para } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (61)$$

donde:

L_{bd} : pérdidas de transmisión básicas, correspondientes a la difracción, no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo, calculadas a partir de la ecuación (43)

L_{minbap} : pérdidas de transmisión básicas teóricas relativas a la propagación con visibilidad directa y a las mejoras de la señal transhorizonte, calculadas a partir de la ecuación (60)

F_k : factor de interpolación dado por la ecuación (58), de conformidad con el valor de la distancia del círculo máximo, d .

Se calculan las pérdidas de transmisión básicas modificadas, L_{bam} (dB), que tienen en cuenta la difracción y la visibilidad directa o las mejoras correspondientes a la propagación por conductos/reflexión en capas:

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda})F_j \quad \text{dB} \quad (62)$$

donde:

L_{bda} : pérdidas de transmisión básicas teóricas correspondientes a la difracción y a la visibilidad directa o a las mejoras debidas a la propagación por conductos/reflexión en capas, dadas por la ecuación (61)

L_{minb0p} : pérdidas de transmisión básicas mínimas teóricas correspondientes a la propagación con visibilidad directa y a la difracción de subtrayectos sobre el mar, dadas por la ecuación (59)

F_j : factor de interpolación dado por la ecuación (57), de conformidad con el valor de la distancia angular del trayecto, θ .

Se calculan las pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo en el 50% de las ubicaciones L_{bc} (dB), mediante:

$$L_{bc} = -5 \log(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bam}}) \quad \text{dB} \quad (63)$$

donde:

- L_{bs} : pérdidas de transmisión básicas debidas a la dispersión troposférica, no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo, dadas por la ecuación (44)
- L_{bam} : pérdidas de transmisión básicas modificadas teniendo en cuenta la difracción y la visibilidad directa o las mejoras debidas a la propagación por conductos/reflexión en capas, dadas por la ecuación (62).

4.7 Pérdidas por variabilidad de las ubicaciones

En la presente Recomendación, y por lo general, la variabilidad con la ubicación se refiere a las estadísticas espaciales de las variaciones debidas a la ocupación del suelo en las inmediaciones. Esto representa un resultado útil a escalas sustancialmente mayores que la de las variaciones debidas a la ocupación del suelo y cuando las variaciones del trayecto son insignificantes dentro de esas distancias. Dado que la variabilidad con las ubicaciones se define para excluir las variaciones debidas a la propagación por trayectos múltiples, ésta no depende de la anchura de banda del sistema.

En la planificación de los sistemas radioeléctricos, también será necesario tener en cuenta los efectos que producen los trayectos múltiples. La incidencia de estos efectos variará con los sistemas, dependiendo de la anchura de banda, la modulación y el sistema de codificación. En la Recomendación UIT-R P.1406 se ofrecen directrices para modelar estos efectos.

Del extenso análisis de los datos se deduce que la distribución de la intensidad de campo media local debido a variaciones en la ocupación del suelo es aproximadamente log-normal.

Los valores de la desviación típica dependen de la resolución de la predicción y de la frecuencia. Estudios empíricos han mostrado una dispersión. Los valores representativos, que se refieren al 50º percentil de la distribución de la desviación típica de la variabilidad de la ubicación se obtienen mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_L = (0,024f + 0,52)w_a^{0,28} \quad \text{dB} \quad (64)$$

donde:

- f : frecuencia requerida (GHz)
- w_a : resolución de la predicción (m).

La resolución de la predicción es el ancho de la zona cuadrada sobre la que se aplica la variabilidad. El porcentaje de las ubicaciones, $p_L\%$, puede variar entre el 1% y el 99%. Este modelo no es válido para porcentajes de ubicaciones inferiores al 1% ni mayores al 99%.

Se considera que los valores que figuran en el Cuadro 6 son adecuados para la planificación de los servicios de televisión digital terrenal (TDT). Resultaron equivalentes al 93er percentil de la función de distribución acumulada de medición para la altura de una antena instalada encima del tejado para una zona de 100×100 m.

CUADRO 6

Valores de desviación típica de la variabilidad con la ubicación utilizados en ciertas situaciones de planificación

	Desviación típica (dB)		
	100 MHz	600 MHz	2 000 MHz
Radiodifusión, TDT	5,5	5,5	5,5

Cuando el receptor/móvil se encuentra en tierra y en exteriores pero su altura sobre el suelo es mayor o igual a la altura representativa de la ocupación del suelo, cabe esperar que la variabilidad con la ubicación disminuya de forma monótona a medida que aumenta la altura hasta que, en algún punto, se desvanezca. En la presente Recomendación la variación con la altura de la variabilidad de la ubicación, $u(h)$, viene dada por:

$$\begin{aligned} u(h) &= 1 && \text{para } 0 \leq h < R \\ u(h) &= 1 - \frac{(h-R)}{10} && \text{para } R \leq h < R+10 \\ u(h) &= 0 && \text{para } R+10 \leq h \end{aligned} \quad (65)$$

donde R (m) es la altura de la ocupación del suelo representativa en la ubicación del receptor/móvil. Por tanto, para un receptor/móvil ubicado en exteriores, al calcular los valores de las pérdidas de transmisión básicas para valores de $p_L\%$ diferentes de 50%, la desviación típica de la variabilidad con la ubicación, σ_L , de la ecuación (64) o el Cuadro 6, debe multiplicarse por la función de variación con la altura, $u(h)$, de la ecuación (65).

4.8 Pérdidas debidas a la penetración en edificios

Las definiciones, los modelos teóricos y las referencia a resultados empíricos relativos a las pérdidas por penetración en edificios figuran en la Recomendación UIT-R P.2040.

El valor de la variación de la intensidad de campo para la recepción en interiores es la combinación de la variación en exteriores, σ_L , y la variación debida a la atenuación del edificio, σ_{be} (véase la Recomendación UIT-R P.2040). Lo más probable es que esas variaciones no estén correlacionadas. La desviación típica para la recepción en interiores, σ_i puede, por tanto, calcularse como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones típicas individuales.

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_{be}^2} \quad \text{dB} \quad (66)$$

donde σ_L es la desviación típica de la variabilidad con la ubicación, de la ecuación (64) o del Cuadro 6.

4.9 Pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo en el $p_L\%$ de ubicaciones

Para calcular el porcentaje de ubicaciones deseado, el valor mediano de las pérdidas, L_{loc} , y la desviación típica, σ_{loc} , vienen dados por:

$$L_{loc} = 0 \quad (\text{exteriores}) \quad \text{dB} \quad (67a)$$

$$L_{loc} = L_{be} \quad (\text{interiores}) \quad \text{dB} \quad (67b)$$

y:

$$\sigma_{loc} = u(h) \cdot \sigma_L \quad (\text{exteriores}) \quad \text{dB} \quad (68a)$$

$$\sigma_{loc} = \sigma_i \quad (\text{interiores}) \quad \text{dB} \quad (68b)$$

donde los valores medianos de las pérdidas por penetración en el edificio, L_{be} , son los que figuran en la Recomendación UIT-R P.2040, la función de altura, $u(h)$, es la de la ecuación (65) y las desviaciones típicas, σ_L y σ_i , son las dadas en la ecuación (64) (o en el Cuadro 6) y en la ecuación (66), respectivamente.

Las pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo en el $p_L\%$ de ubicaciones, L_b (dB), son:

$$L_b = \text{máx} \left[L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I \left(\frac{p_L}{100} \right) \sigma_{loc} \right] \quad \text{dB} \quad (69)$$

donde:

- L_{b0p} : pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo en el 50% de las ubicaciones, relacionadas con la visibilidad directa y teniendo en cuenta las mejoras a corto plazo, dadas por la ecuación (10)
- L_{bc} : pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo en el 50% de las ubicaciones, incluidos los efectos de las pérdidas por ocupación del suelo en la ubicación del terminal, dadas por la ecuación (63)
- L_{loc} : valor mediano de las pérdidas dependientes de la ubicación, dadas por las ecuaciones (67a) y (67b)
- $I(x)$: distribución normal acumulativa complementaria inversa expresada como una función de probabilidad, x . En el Adjunto 2 de este anexo se presenta una aproximación de $I(x)$ que puede utilizarse para $0,000001 \leq x \leq 0,999999$
- σ_{loc} : desviación típica combinada (es decir, la correspondiente a las pérdidas por penetración en edificios y a la variabilidad con la ubicación), dada por las ecuaciones (68a) y (68b).

El porcentaje de ubicaciones, $p_L\%$, puede variar entre el 1% y el 99%. Este modelo no es válido para porcentajes de ubicaciones inferiores a 1% ni superiores al 99%.

4.10 Intensidad de campo rebasada durante el $p\%$ del tiempo en el $p_L\%$ de las ubicaciones

La intensidad de campo normalizada a 1 kW de potencia radiada aparente rebasada durante el $p\%$ del tiempo en el $p_L\%$, de las ubicaciones, E_p dB($\mu\text{V}/\text{m}$), puede calcularse como sigue:

$$E_p = 199,36 + 20 \log(f) - L_b \quad \text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}) \quad (70)$$

donde:

- L_b : pérdidas de transmisión básicas no rebasadas durante el $p\%$ del tiempo en el $p_L\%$ de ubicaciones, calculadas conforme a la ecuación (69)
- f : frecuencia requerida (GHz).

Adjunto 1 al Anexo 1

Análisis del perfil del trayecto

1 Introducción

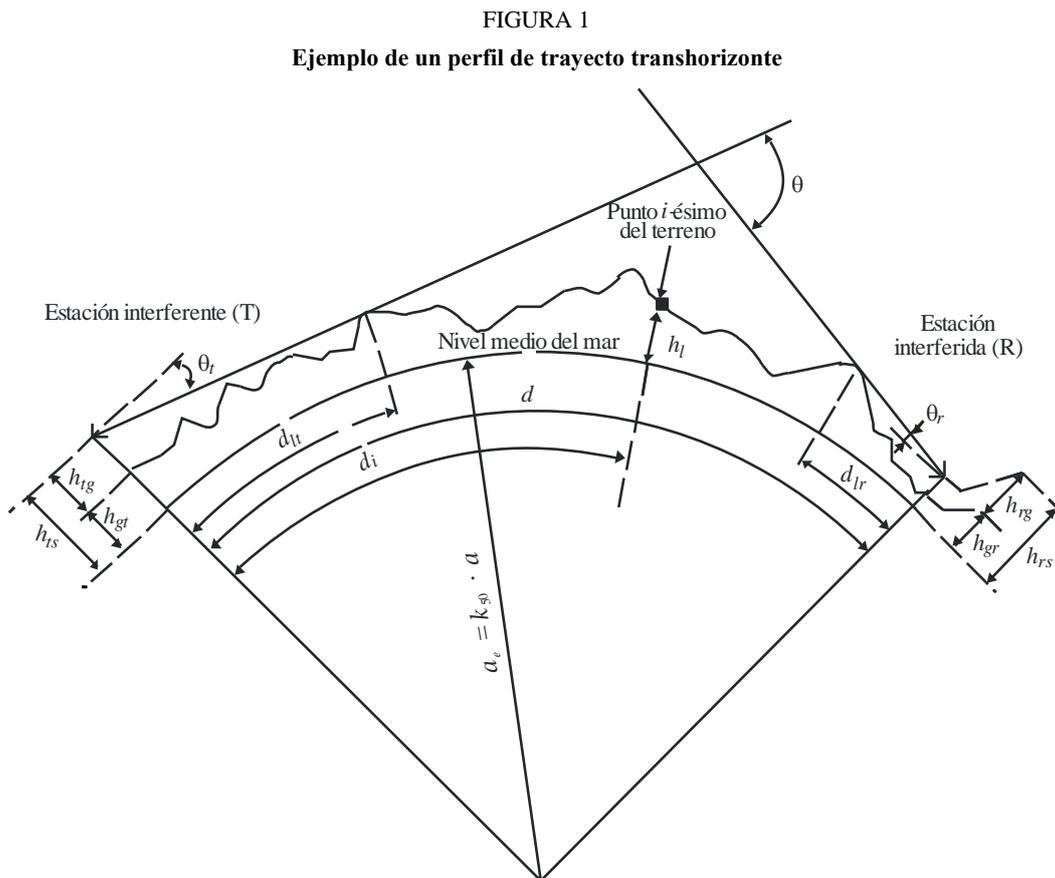
Para el análisis del perfil del trayecto, se necesita conocer el perfil del trayecto respecto a las elevaciones del terreno situadas por encima del nivel medio del mar. En el Cuadro 7 se presentan los parámetros que han de obtenerse del análisis del perfil del trayecto para establecer los modelos de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

2 Construcción del perfil del trayecto

Ha de determinarse las elevaciones del terreno (sobre el nivel medio del mar) a lo largo del trayecto de círculo máximo, a partir de una base de datos topográfica o de los apropiados mapas de contorno a gran escala, con base en las coordenadas geográficas de las estaciones transmisora (φ_t, ψ_t) y receptora (φ_r, ψ_r). La resolución de distancia del perfil debe ser la mejor posible, a fin de que se registren las características significativas del terreno. Normalmente es adecuado un incremento de la distancia de 30 m a 1 km. En general, conviene utilizar incrementos de distancia mayores para trayectos más largos. El perfil debe incluir las elevaciones del terreno de los emplazamientos de las estaciones transmisora y receptora en los puntos inicial y final. En las siguientes ecuaciones se tiene en cuenta la curvatura de la Tierra, si es necesario, basándose en el valor de a_e calculado mediante la ecuación (7a).

Aunque se consideran preferibles los puntos del perfil con separación uniforme, es posible utilizar el método empleando 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 presente 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 la presente Recomendación, se considera que el punto del perfil del trayecto ubicado en la estación transmisora es el punto 1, y que el punto ubicado en la estación receptora es el punto n . Por lo tanto, el perfil del trayecto está compuesto por n puntos. En la Fig. 1 se presenta un ejemplo de un perfil de terreno de elevaciones del terreno sobre el nivel medio del mar, en el que se muestran los diversos parámetros relativos al terreno real.



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

En el Cuadro 7 se definen los parámetros utilizados o deducidos en el análisis del perfil del trayecto.

CUADRO 7

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 de círculo máximo (km)
d_i	Distancia de círculo máximo entre el i -ésimo punto del perfil y el transmisor
d_{ii}	Distancia incremental para los datos regulares (es decir, con separación uniforme) del perfil del trayecto (km)
f	Frecuencia (GHz)
λ	Longitud de onda (m)
h_{ts}	Altura de la antena transmisora (m) sobre el nivel medio del mar (snmm)
h_{rs}	Altura de la antena receptora (m) (snmm)
θ_t	Para los trayectos transhorizonte, el ángulo de elevación del horizonte por encima de la horizontal local (mrad), medido desde la antena transmisora. Para los trayectos con visibilidad directa, es el ángulo de elevación de la antena receptora
θ_r	Para los trayectos transhorizonte, el ángulo de elevación del horizonte por encima de la horizontal local (mrad), medido desde la antena receptora. Para los trayectos con visibilidad directa, es el ángulo de elevación de la antena transmisora
θ	Distancia angular del trayecto (mrad)
h_{st}	Altura de la superficie de la Tierra lisa (snmm) en el emplazamiento de la estación transmisora (m)
h_{sr}	Altura de la superficie de la Tierra lisa (snmm) en el emplazamiento de la estación receptora (m)
h_i	Altura del i -ésimo punto del terreno snmm (m) h_t : altura del transmisor sobre el suelo h_n : altura del receptor sobre el suelo
h_m	Rugosidad del terreno (m)
h_{te}	Altura efectiva de la antena transmisora (m)
h_{re}	Altura efectiva de la antena receptora (m)

3 Longitud del trayecto

Puede hallarse la longitud del trayecto utilizando la geometría de círculo máximo (sobre la base del radio físico promedio de la Tierra a) a partir de las coordenadas geográficas de las estaciones transmisora (φ_t, ψ_t) y receptora (φ_r, ψ_r). La longitud del trayecto puede obtenerse también a partir del perfil del trayecto. Para los casos generales, la longitud del trayecto, d (km), se puede calcular a partir de los datos del perfil del trayecto:

$$d = d_n \quad \text{km} \quad (71)$$

En el caso de datos de perfil de trayecto con espaciamiento uniforme, también se cumple que:

$$d_i = (i-1)d_{ii} \quad \text{km} \quad (72)$$

para $i = 1, \dots, n$, 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_t y d_{tr} , y los ángulos de elevación θ_t y θ_r (véase *infra*).

Debe utilizarse el perfil del trayecto para determinar si se trata de un trayecto con visibilidad directa o transhorizonte, basado en el valor mediano del radio efectivo de la Tierra, a_e , expresado en la ecuación (7a).

Se trata de un trayecto transhorizonte si el ángulo físico de elevación sobre el horizonte, visto desde la antena transmisora (con respecto a la horizontal local) es mayor que el ángulo (también con respecto a la horizontal local del transmisor) subtendido por la antena receptora.

Por tanto, la prueba de si se trata de un trayecto transhorizonte es:

$$\theta_{m\acute{a}x} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (73)$$

donde:

$$\theta_{m\acute{a}x} = \max_{i=2}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (74)$$

θ_i : ángulo de elevación del i -ésimo punto del terreno

$$\theta_i = 1000 \arctg \left(\frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (75)$$

donde:

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

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

d_i : distancia desde el transmisor al i -ésimo elemento del terreno (km).

$$\theta_{td} = 1000 \arctg \left(\frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (76)$$

donde:

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

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

a_e : radio efectivo de la Tierra apropiado para el trayecto (ecuación (7a)).

5 Deducción de parámetros a partir del perfil del trayecto

Los parámetros que han de deducirse del trayecto son los que figuran en el Cuadro 7.

5.1 Ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena transmisora por encima de la horizontal local, θ_t

El ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena transmisora relativo a la horizontal local viene dado por:

$$\theta_t = \text{máx} (\theta_{\text{máx}}, \theta_{td}) \quad \text{mrad} \quad (77)$$

en que $\theta_{\text{máx}}$ se determina de acuerdo con la ecuación (74). Así, para un trayecto LoS, se considera que el ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena transmisora es el ángulo de elevación de la línea que va a la antena receptora.

5.2 Distancia al horizonte de la antena transmisora, d_{lt}

La distancia al horizonte es la mínima distancia desde el transmisor para la que se calcula el máximo ángulo de elevación de la antena con respecto al horizonte, según la ecuación (74).

$$d_{lt} = d_i \quad \text{km} \quad \text{para máx} (\theta_i) \quad (78)$$

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

$$v_{\text{máx}} = \text{máx} \left\{ \left[h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (78a)$$

donde el índice de perfil i toma valores entre 2 y $n-1$, y C_e es la curvatura efectiva de la Tierra como se define en § 4.3.1 del Anexo 1.

5.3 Ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena receptora por encima de la horizontal local, θ_r

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

$$\theta_r = 1000 \arctg \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (79)$$

En caso contrario, θ_r viene dado por:

$$\theta_r = \text{máx}_{j=2}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (80)$$

$$\theta_j = 1000 \arctg \left[\frac{h_j - h_{rs}}{10^3 (d - d_j)} - \frac{d - d_j}{2a_e} \right] \quad \text{mrad} \quad (80a)$$

5.4 Distancia al horizonte de la antena receptora, d_{lr}

Distancia al horizonte de la antena receptora (80).

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{para máx} (\theta_j) \quad (81)$$

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

$$d_{lr} = d - d_{lt} \quad \text{km} \quad (81a)$$

5.5 Distancia angular θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_i + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (82)$$

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

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 § 5.6.1 se calcula una superficie de Tierra lisa para el perfil, a partir del cual se obtienen las alturas de esta superficie en los terminales, h_{st} y h_{sr} .

En el § 5.6.2, h_{st} , y h_{sr} se utilizan para calcular las alturas modificadas de la Tierra lisa en los terminales, h_{std} y h_{srd} , que se utilizan en el § 4.3.4 del Anexo 1 para calcular las alturas efectivas de las antenas en el modelo de difracción. Dependiendo del perfil, los valores de h_{std} y h_{srd} pueden diferir de los de h_{st} y h_{sr} .

En el § 5.6.3, h_{st} y h_{sr} se utilizan para calcular la altura efectiva de las antenas, h_{te} y h_{re} , así como el parámetro de rugosidad del terreno, h_m , necesarios para el modelo de propagación por conductos y por reflexión en las capas descrito en § 4.5 del Anexo 1.

5.6.1 Obtención de la superficie de Tierra lisa

Se calcularán las alturas de la Tierra lisa en los terminales, h_{st} y h_{sr} , mediante la siguiente fórmula:

$$v_1 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (83)$$

$$v_2 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (84)$$

$$h_{st} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (85)$$

$$h_{sr} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (86)$$

donde:

h_{st} : altura snmm (m), de la superficie de la Tierra lisa en el origen del trayecto, es decir del transmisor

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

5.6.2 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:

$$h_{obs} = \text{máx}(H_i) \quad \text{m} \quad (87a)$$

$$\alpha_{obt} = \text{máx} \left(\frac{H_i}{d_i} \right) \quad \text{mrad} \quad (87b)$$

$$\alpha_{obr} = \text{máx} \left[\frac{H_i}{(d - d_i)} \right] \quad \text{mrad} \quad (87c)$$

donde:

$$H_i = h_i - \frac{[h_{tc}(d - d_i) + h_{rc}d_i]}{d} \quad \text{m} \quad (87d)$$

y el índice del perfil i adopta unos valores situados entre 2 y $n-1$.

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:

$$h_{stp} = h_{st} \quad \text{m masl} \quad (88a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad \text{m masl} \quad (88b)$$

en caso contrario:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad \text{m masl} \quad (88c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad \text{m masl} \quad (88d)$$

donde:

$$g_t = \frac{\alpha_{obt}}{(\alpha_{obt} + \alpha_{obr})} \quad (88e)$$

$$g_r = \frac{\alpha_{obr}}{(\alpha_{obt} + \alpha_{obr})} \quad (88f)$$

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_1 entonces:

$$h_{std} = h_1 \quad \text{m masl} \quad (89a)$$

en caso contrario:

$$h_{std} = h_{stp} \quad \text{m masl} \quad (89b)$$

Si h_{srp} es mayor que h_n entonces:

$$h_{srd} = h_n \quad \text{m masl} \quad (89c)$$

en caso contrario:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad \text{m masl} \quad (89d)$$

5.6.3 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:

$$h_{st} = \text{mín} (h_{st}, h_1) \quad \text{m} \quad (90a)$$

$$h_{sr} = \text{mín} (h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (90b)$$

La pendiente, m , de la superficie de Tierra lisa viene dada por:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (91)$$

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:

$$h_{te} = h_{tg} + h_1 - h_{st} \quad \text{m} \quad (92a)$$

$$h_{re} = h_{rg} + h_n - h_{sr} \quad \text{m} \quad (92b)$$

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:

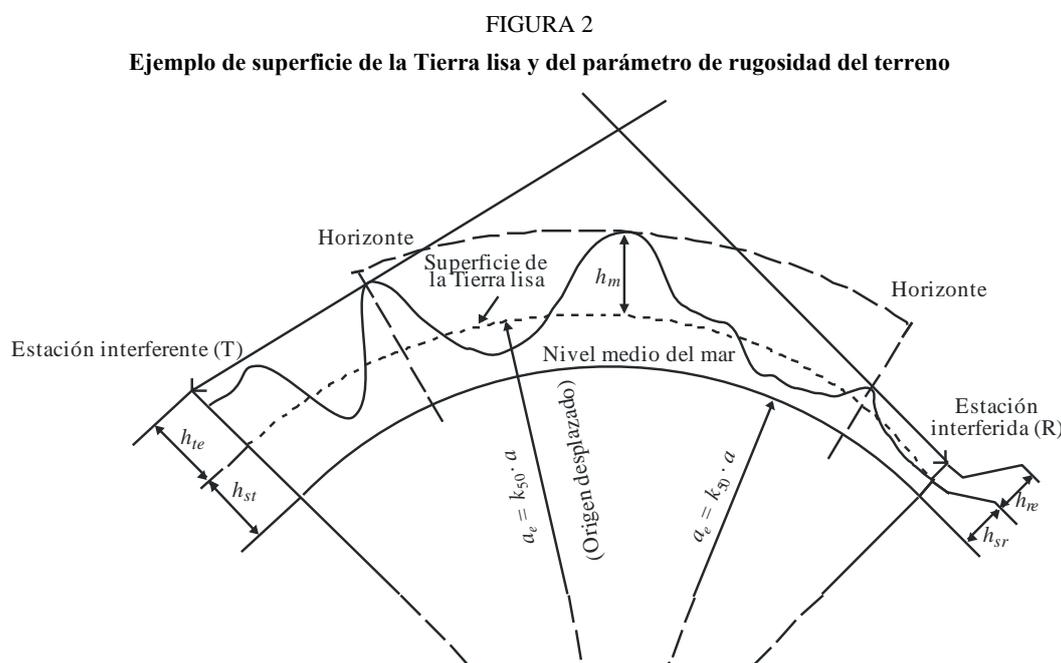
$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + md_i)] \quad \text{m} \quad (93)$$

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. 2 se ilustran la superficie de Tierra lisa y el parámetro h_m de rugosidad del terreno.



Adjunto 2 al Anexo 1

Una aproximación a la función de distribución normal acumulativa complementaria inversa

La siguiente aproximación a la función de distribución normal acumulativa complementaria inversa es válida para $0,000001 \leq x \leq 0,999999$ y tiene un margen de error máximo de 0,00054. Si $x < 0,000001$, lo que implica que $\beta_0 < 0,0001\%$, x debe fijarse a 0,000001. Algo similar se cumple si $x > 0,999999$. Esta aproximación es fiable en la función de interpolación de las ecuaciones (40) y (59) y en la ecuación (69). No obstante, en la última de estas ecuaciones, el valor de x debe limitarse a $0,01 \leq x \leq 0,99$.

La función $I(x)$ viene dada por:

$$I(x) = T(x) - \xi(x) \quad \text{para } 0,000001 \leq x \leq 0,5 \quad (94a)$$

y, por simetría:

$$I(x) = \xi(1-x) - T(1-x) \quad \text{para } 0,5 < x \leq 0,999999 \quad (94b)$$

donde:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (95a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 T(x) + C_1) T(x)] + C_0}{[(D_3 T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (95b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (95c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (95d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (95e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (95f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (95g)$$

$$D_3 = 0,001308 \quad (95h)$$

Adjunto 3 al Anexo 1

Método alternativo para calcular la pérdida de difracción de Tierra esférica L_{bulls}

En este Adjunto se ofrece un método alternativo para calcular L_{bulls} sin utilizar el análisis del perfil del terreno.

Si $d < d_{los}$ (LoS), calcular el parámetro de difracción para la altura libre de obstáculos más pequeña h_{se} (ecuación (23)) entre el trayecto de la Tierra curva y el rayo entre las antenas con la distancia d_{se1} (ecuación (24a)):

$$v_{\max} = -h_{se} \cdot \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_{se1}(d-d_{se1})}} \quad (96)$$

La pérdida en una arista aguda para este punto se obtiene mediante:

$$L_{us} = J(v_{\max}) \quad \text{dB} \quad (97)$$

Si $d \geq d_{los}$ (sin visibilidad directa (NLOS)), encuentre la mayor pendiente de la línea que separa a la antena de transmisión del trayecto de Tierra curva.

$$S_{tm} = 500C_e d - 2\sqrt{500C_e h_{tesph}} \quad \text{m/km} \quad (98)$$

Luego encuentre la mayor pendiente de la línea que separa a la antena de recepción del trayecto de Tierra curva.

$$S_{rm} = 500C_e d - 2\sqrt{500C_e h_{resph}} \quad \text{m/km} \quad (99)$$

Use estas dos pendientes para calcular el punto de Bullington como:

$$d_s = \frac{h_{resph} - h_{tesph} + S_{rm}d}{S_{tm} + S_{rm}} \quad \text{km} \quad (100)$$

Calcule el parámetro de difracción v_s para el punto de Bullington:

$$v_s = \left[h_{tesph} + S_{tm}d_s - \frac{h_{tesph}(d-d_s) + h_{resph}d_s}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_s(d-d_s)}} \quad (101)$$

La pérdida en arista aguda para el punto de Bullington se obtiene mediante:

$$L_{us} = J(v_s) \quad \text{dB} \quad (102)$$

Para L_{us} calculado usando o bien la ecuación (97) o la ecuación (102), la pérdida de difracción de Bullington para el trayecto liso se obtiene mediante la fórmula:

$$L_{bulls} = L_{us} + \left(1 - \exp\left(\frac{-L_{us}}{6}\right) \right) (10 + 0,02d) \quad (103)$$