

Recomendación UIT-R P.1411-12

(08/2023)

Serie P: Propagación de las ondas radioeléctricas

Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 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, 2023

© UIT 2023

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.1411-12

Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz

(Cuestión UIT-R 211/3)

(1999-2001-2003-2005-2007-2009-2012-2013-2015-2017-2019-2021-2023)

Cometido

La presente Recomendación proporciona directrices sobre la propagación de corto alcance en exteriores en la gama de frecuencias comprendida entre 300 MHz y 100 GHz. Facilita además información sobre modelos de pérdida de transmisión básica para entornos con visibilidad directa (LoS) y sin visibilidad directa (NLoS), pérdidas de entrada en edificios, modelos multitrayecto para la propagación entre calles y por encima de los tejados, número de componentes de la señal, así como características de polarización y de desvanecimiento. Esta Recomendación puede utilizarse también en estudios de compatibilidad.

Palabras clave

Pérdida de transmisión básica, dispersión de retardo, propagación de corto alcance en exteriores en entornos con obstáculos

Abreviaturas/Glosario

ASA	dispersión angular de llegada (<i>angular spread of arrival</i>)
ASD	dispersión angular de partida (<i>angular spread of departure</i>)
DR	dispersión del retardo
DS	desvanecimiento debido a sombras
EHF	ondas milimétricas (<i>extremely high frequency</i>)
FK	factor K
GIS	Sistema de Información Geográfica (<i>geographic information system</i>)
HH	horizontal a horizontal
HPBW	haz a potencia mitad (<i>half-power-beamwidth</i>)
HRHD	construcción alta, densidad alta (<i>high rise high density</i>)
HRLD	construcción alta, densidad baja (<i>high rise low density</i>)
HRMD	construcción alta, densidad media (<i>high rise middle density</i>)
HV	horizontal a vertical
LoS	con visibilidad directa (<i>line-of-sight</i>)
LRHD	construcción baja, densidad alta (<i>low rise high density</i>)
LRLD	construcción baja, densidad baja (<i>low rise low density</i>)
LRMD	construcción baja, densidad media (<i>low rise middle density</i>)
MRHD	construcción media, densidad alta (<i>middle rise high density</i>)
MRLD	construcción media, densidad baja (<i>middle rise low density</i>)

MRMD	construcción media, densidad media (<i>middle rise middle density</i>)
NLoS	sin visibilidad directa (<i>non-line-of-sight</i>)
r.m.s.	valor cuadrático medio (<i>root mean square</i>)
RLAN	red radioeléctrica de área local (<i>radio local area network</i>)
SHF	ondas centimétricas (<i>super high frequency</i>)
UHF	ondas decimétricas (<i>ultra high frequency</i>)
VH	vertical a horizontal
VV	vertical a vertical
XPD	discriminación por polarización cruzada (<i>cross-polarization discrimination</i>)

Recomendaciones e Informes de la UIT conexos

Recomendación UIT-R P.1238

Recomendación UIT-R P.1407

Recomendación UIT-R P.2040

Informe UIT-R P.2406

NOTA – Debe utilizarse la revisión o edición más reciente de la Recomendación o el Informe.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que se están desarrollando múltiples aplicaciones nuevas de comunicaciones móviles y personales de corto alcance (distancia operativa inferior a 1 km);
- b) que hay una gran demanda de redes radioeléctricas de área local (RLAN) y sistemas de bucle local inalámbrico;
- c) que los sistemas de corto alcance que utilizan una potencia muy reducida pueden ofrecer ventajas para la prestación de servicios móviles en el entorno del bucle local inalámbrico;
- d) que el conocimiento de las características de propagación y de la interferencia procedente de múltiples usuarios en la misma zona es crucial para el diseño eficaz de los sistemas;
- e) que es necesario conocer y aprender los modelos generales (es decir, independientes del emplazamiento) para la planificación inicial del sistema y la evaluación de la interferencia, así como de los modelos determinísticos (o específicos del emplazamiento) para ciertas evaluaciones detalladas,

observando

- a) que la Recomendación UIT-R P.1238 ofrece directrices sobre la propagación en interiores en la gama de frecuencias comprendida entre 300 MHz y 450 GHz y que dicha Recomendación debe consultarse en las situaciones en que se presentan condiciones de propagación en interiores y en exteriores;
- b) que la Recomendación UIT-R P.1546 ofrece directrices sobre la propagación para los sistemas que funcionan en distancias de 1 km y superiores y en la gama de frecuencias comprendida entre 30 MHz y 6 GHz;
- c) que la Recomendación UIT-R P.2040 contiene directrices sobre los efectos de las propiedades de los materiales de construcción y las estructuras en la propagación de las ondas radioeléctricas;

d) que la Recomendación UIT-R P.2109 contiene modelos estadísticos de las pérdidas debidas a la penetración en edificios;

e) que el Informe UIT-R P.2406 proporciona información de base adicional sobre cómo se obtuvieron y derivaron los datos y modelos de medición en la Recomendación,

recomienda

que se utilicen la información y los métodos del Anexo 1 para calcular las características de propagación de los sistemas radioeléctricos de propagación en exteriores de corto alcance entre 300 MHz y 100 GHz, cuando sean aplicables.

Anexo 1

ÍNDICE

	<i>Página</i>
Anexo 1	3
1 Introducción.....	4
2 Entornos de funcionamiento físico y definición de los tipos de célula	5
3 Categorías de trayecto	6
3.1 Definición de situaciones de propagación	6
3.2 Requisitos de datos	9
4 Modelos de pérdidas de transmisión básicas	10
4.1 Modelos de propagación en el interior de cañones urbanos	10
4.2 Modelos de propagación por encima de los tejados	17
4.3 Modelos para la propagación entre terminales situados entre el nivel por debajo de la altura de los tejados y un nivel cercano a la calle	22
4.4 Parámetros por defecto para los cálculos de un emplazamiento general.....	30
4.5 Pérdidas adicionales.....	30
5 Modelos multitrayecto	31
5.1 Perfil de retardo	31
5.2 Perfil angular	36
5.3 Efecto del ancho de haz de la antena	37
5.4 Número de componentes de la señal	40
5.5 Características de desvanecimiento	43

6	Características de la polarización	44
7	Datos de propagación y métodos de predicción para el enfoque de la morfología del trayecto	45
7.1	Clasificación de la morfología del trayecto	45
7.2	Método de modelación estadística.....	45
7.3	Modelo de pérdida de transmisión básica.....	47
7.4	Modelo de dispersión del retardo	47
7.5	Modelo de dispersión angular.....	48
8	Modelo de correlación cruzada para canales multienlace	49
8.1	Definición de los parámetros	49
8.2	Correlación cruzada de los parámetros de tiempo y espacio de larga duración .	50
8.3	Correlación cruzada de los desvanecimientos de corta duración sobre el dominio del retardo.....	52
9	Características de propagación para entornos con gran efecto Doppler.....	54
9.1	Hipótesis para trenes de alta velocidad.....	54
9.2	Hipótesis para vehículos a alta velocidad	55

1 Introducción

La propagación por trayectos de longitud inferior a 1 km resulta principalmente afectada por las construcciones y los árboles, más que por las variaciones de la elevación del terreno. El efecto de los edificios predomina, pues la mayoría de los enlaces radioeléctricos de trayecto corto se da en las zonas urbanas y suburbanas. Lo más probable es que el terminal móvil vaya en manos de un peatón o esté situado en un vehículo.

Esta Recomendación define las categorías de los trayectos de propagación cortos y ofrece métodos para estimar las pérdidas de transmisión básicas, la dispersión del retardo, la dispersión angular y la correlación cruzada a lo largo de éstos.

Los modelos de propagación de estos métodos son simétricos, pues tratan los terminales radioeléctricos de ambos extremos de la misma manera. Desde el punto de vista del modelo, no importa cuál de los terminales es el transmisor y cuál es el receptor. Por lo tanto, se usan los términos «Estación 1» y «Estación 2» para nombrar, respectivamente, los terminales al inicio y al final del trayecto de propagación.

2 Entornos de funcionamiento físico y definición de los tipos de célula

Los entornos que describe esta Recomendación se clasifican únicamente desde un punto de vista de la propagación radioeléctrica. La propagación de las ondas radioeléctricas resulta influida por el entorno, es decir las estructuras y la altura de las construcciones, la utilización del terminal móvil (peatón/vehículo) y la posición de las antenas. Se identifican cinco entornos distintos que se consideran los más habituales. Por ejemplo, no se consideran las zonas con elevaciones, pues no son las habituales de las áreas metropolitanas. El Cuadro 1 enumera los cinco entornos. Reconociendo que hay una amplia variedad de entornos en cada categoría, no se pretende establecer un modelo de cada caso posible, sino ofrecer modelos de propagación que sean representativos de los entornos más frecuentes.

CUADRO 1

Entornos de funcionamiento físico – Degradaciones de la propagación

Entorno	Descripción y degradaciones de la propagación significativas
Urbano de construcción muy alta	<ul style="list-style-type: none"> – Valle urbano profundo con una gran actividad, caracterizado por avenidas con edificios de alta densidad y varias decenas de pisos, hecho que da como resultado un valle urbano profundo – Los edificios de alta densidad y los rascacielos se alternan, hecho que da como resultado trayectos de propagación con abundante dispersión sin visibilidad directa – Las hileras de edificios altos hacen posible la existencia de retardos muy largos de trayecto – El tráfico intenso y el elevado flujo de visitantes en la zona actúan como reflectores, lo que añade una deriva Doppler a las ondas reflejadas – Los árboles y las calles proporcionan un ensombrecimiento dinámico
Urbano de construcción alta	<ul style="list-style-type: none"> – Valle urbano, caracterizado por avenidas con edificios altos de varios pisos – La altura de los edificios reduce la probabilidad de una contribución significativa de la propagación que pasa por encima de los tejados – Las hileras de edificios altos hacen posible la existencia de largos retardos de trayecto – El gran número de vehículos en movimiento en la zona actúa como reflector, lo que añade una deriva Doppler a las ondas reflejadas
Urbano de construcción baja/Suburbano	<ul style="list-style-type: none"> – Las alturas de los edificios suelen ser inferiores a tres pisos, lo que hace probable la difracción por los tejados – Pueden producirse en ocasiones reflexiones y ensombrecimientos producidos por los vehículos en movimiento – Los efectos principales son: retardos grandes y pequeñas derivas Doppler
Zona residencial	<ul style="list-style-type: none"> – Construcciones de uno y dos pisos – Las calles suelen ser de doble dirección con vehículos estacionados a ambos lados – Es posible que haya vegetación densa a ligera – Tráfico motorizado generalmente ligero
Rural	<ul style="list-style-type: none"> – Pequeñas casas rodeadas de amplios jardines – Influencia de la altura del terreno (topografía) – Posibilidad de vegetación densa a ligera – Tráfico motorizado ocasionalmente elevado

Para cada uno de los cinco entornos distintos se consideran dos casos posibles de los móviles. De esta manera, se dividen los usuarios según se trate de peatones o de vehículos. Para estas dos aplicaciones la velocidad del móvil es bastante distinta, dando lugar a derivas Doppler diferentes. El Cuadro 2 muestra velocidades típicas para estos casos.

CUADRO 2

Entornos de funcionamiento físico – Velocidad típica del móvil

Entorno	Velocidad de los usuarios peatonales (m/s)	Velocidad de los usuarios en vehículos
Urbano de construcción muy alta/ Urbano de construcción alta	1,5	Velocidades típicas del centro de la ciudad del orden de 50 km/h (14 m/s)
Urbano de construcción baja/ Suburbano	1,5	Unos 50 km/h (14 m/s) En autopistas hasta 100 km/h (28 m/s)
Residencial	1,5	Unos 40 km/h (11 m/s)
Rural	1,5	80-100 km/h (22-28 m/s)

El tipo de mecanismo de propagación predominante depende también de la altura de la antena de la estación de base con relación a los edificios circundantes. El Cuadro 3 enumera los tipos de células típicos en la propagación en exteriores de trayecto corto.

CUADRO 3

Definición de tipos de célula

Tipo de célula	Radio de la célula	Posición típica de la antena de la estación de base
Microcélula	0,05 a 1 km	Exteriores; montada por encima del nivel medio de los tejados; las alturas de algunos edificios circundantes pueden ser superiores a la de la antena de la estación de base
Microcélula urbana densa	0,05 a 0,5 km	Exteriores; montada por debajo del nivel medio de los tejados
Picocélula	Hasta 50 m	Interiores o exteriores (montada por debajo del nivel máximo de los tejados)

(Obsérvese que en la Recomendación de la Comisión de Estudio 5 de Radiocomunicaciones no figura una definición explícita de «microcélula urbana densa».)

3 Categorías de trayecto**3.1 Definición de situaciones de propagación**

En esta Recomendación se pueden considerar tres niveles para la ubicación de las estaciones. A saber: 1) por encima de los tejados (definido como L1 en la Fig. 1); 2) por debajo de los tejados pero por encima del nivel de la cabeza (L2); y 3) al mismo nivel o por debajo del nivel de la cabeza (L3). De una manera detallada y en función de la ubicación de las estaciones, se pueden considerar seis tipos diferentes de enlace, pudiendo ser cada uno de ellos LoS o NLoS.

La Fig. 1 representa situaciones típicas de propagación en entornos urbanos o suburbanos. Cuando una estación (A) va montada por encima del nivel de los tejados y otra estación (B o C) está situada al nivel de la cabeza, la célula correspondiente es una microcélula. El trayecto puede ser LoS (A C) o NLoS (A B). La propagación entre las estaciones A y B se produce principalmente por encima de los tejados. Cuando una estación (D) va montada por debajo del nivel de los tejados, pero por encima del nivel de la cabeza y otra estación (E o F) está ubicada al nivel de la cabeza en un entorno urbano o suburbano, la célula correspondiente es un entorno de microcélulas o de picocélulas. En estos tipos de célula, la propagación se produce principalmente en el interior de calles o cañones urbanos. Para los enlaces móvil-móvil, puede suponerse que ambos extremos del enlace se encuentran al nivel de la cabeza. El trayecto puede ser LoS (B a E) o NLoS (E a F).

3.1.1 Propagación por encima de los tejados sin visibilidad directa (NLoS)

La Fig. 2 describe el caso típico NLoS (el enlace A-B de la Fig. 1). En adelante, este caso se denomina NLoS1.

FIGURA 1
Situaciones típicas de propagación en zonas urbanas

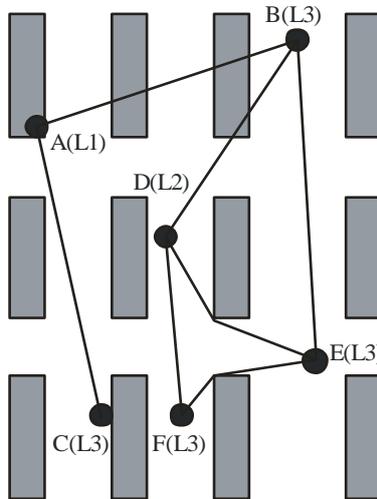
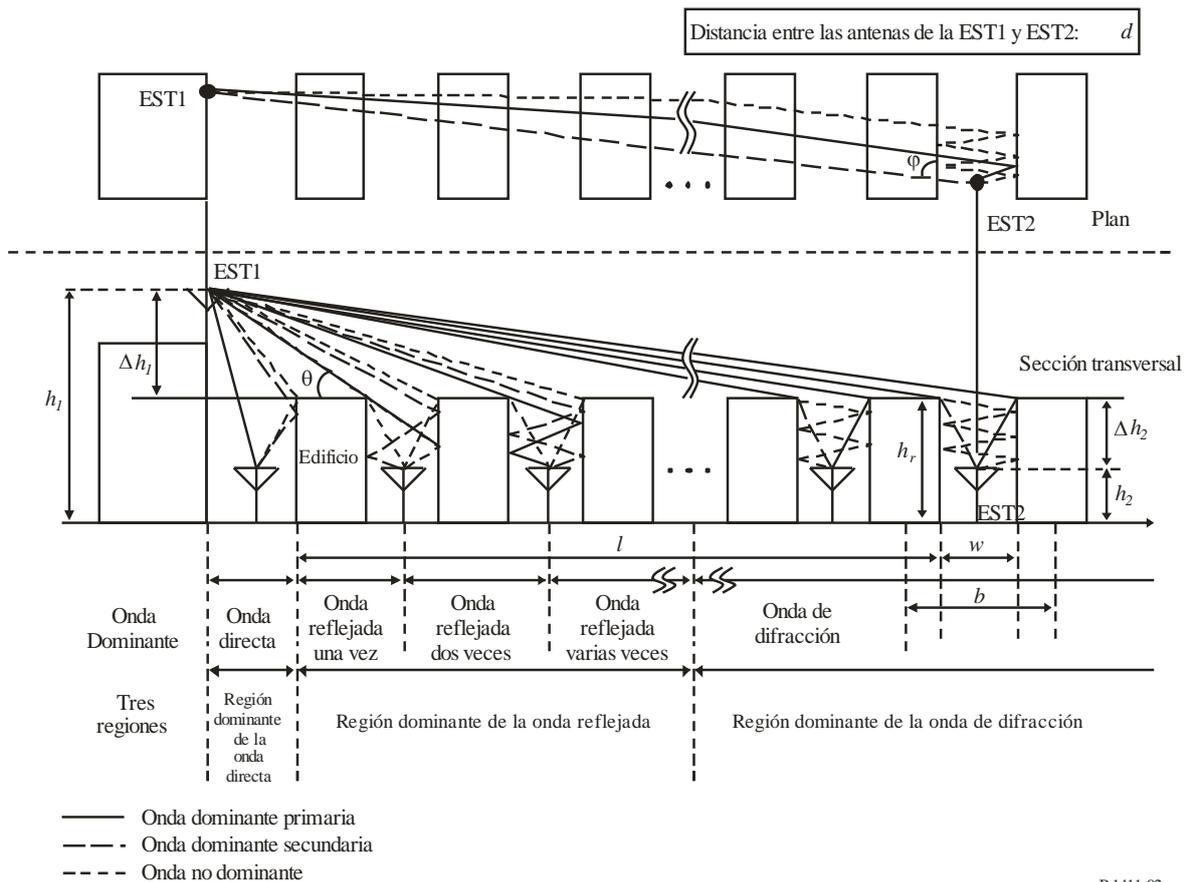


FIGURA 2
Definición de los parámetros del caso NLoS1



P.1411-02

Los parámetros pertinentes de esta situación son:

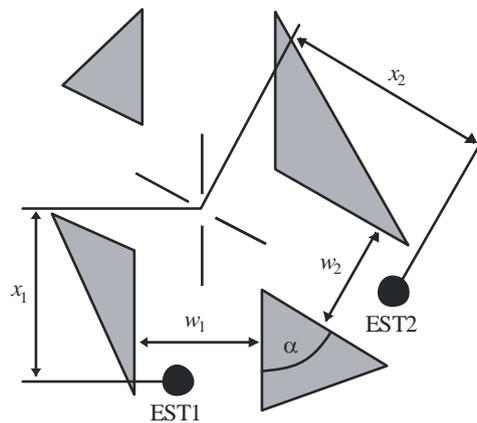
- h_r : altura media de los edificios (m)
- w : anchura de la calle (m)
- b : separación media entre edificios (m)
- φ : orientación de la calle respecto al trayecto directo (grados)
- h_1 : altura de la antena de la Estación 1 (m)
- h_2 : altura de la antena de la Estación 2 (m)
- l : longitud del trayecto cubierto por edificios (m)
- d : distancia desde la Estación 1 a la Estación 2.

El caso NLoS1 se da frecuentemente en entornos residenciales/rurales para todos los tipos de célula y predomina para las microcélulas en entornos urbanos de construcción baja/suburbanos. Los parámetros h_r , b y l pueden obtenerse de los datos de los edificios situados a lo largo de la línea entre las antenas. No obstante, la determinación de w y φ exige un análisis bidimensional de la zona circundante del móvil. Obsérvese que l no es necesariamente perpendicular a la orientación del edificio.

3.1.2 Propagación por cañones urbanos, NLoS

La Fig. 3 representa la situación de un caso típico de micro célula urbana densa NLoS (enlace D-E de la Fig. 1). En adelante, este caso se denomina NLoS2.

FIGURA 3
Definición de los parámetros del caso NLoS2



P.1411-03

Los parámetros pertinentes de esta situación son:

- w_1 : anchura de la calle en la posición de la Estación 1 (m)
- w_2 : anchura de la calle en la posición de la Estación 2 (m)
- x_1 : distancia entre la Estación 1 y el cruce de las calles (m)
- x_2 : distancia entre la Estación 2 y el cruce de las calles (m)
- α : ángulo de la esquina (rad).

NLoS2 es el tipo de trayecto predominante en entornos urbanos con edificios de construcción alta para todos los tipos de células y se da frecuentemente en microcélulas urbanas densas y picocélulas en entornos urbanos con edificios de construcción baja. La determinación de todos los parámetros del caso NLoS2 exige un análisis bidimensional de la zona circundante del móvil.

3.1.3 Trayectos con visibilidad directa (LoS)

Los trayectos A-C, D-F y B-E de la Fig. 1 son ejemplos de situaciones de LoS. Pueden aplicarse los mismos modelos para estos tipos de trayecto LoS.

3.2 Requisitos de datos

Para cálculos específicos del emplazamiento en zonas urbanas pueden utilizarse distintos tipos de datos. La información más precisa puede obtenerse a partir de datos de gran resolución cuando dicha información consiste en:

- estructuras de edificios;
- alturas relativas y absolutas de los edificios;
- información sobre la vegetación.

Los formatos de datos pueden ser escalares y vectoriales. La precisión del emplazamiento en los datos vectoriales debe ser del orden de 1 a 2 m. La resolución recomendada para los datos escalares es de 1 a 10 m. La precisión de la altura en ambos formatos de datos debe ser del orden de 1 a 2 m.

Si no se dispone de datos de gran resolución, se recomienda utilizar datos del terreno de baja resolución (50 m). Dependiendo de la definición de las clases del terreno (urbano denso, urbano, suburbano, etc.), pueden asignarse los parámetros requeridos a estas clases de terreno. Los datos pueden utilizarse junto con información vectorial de las calles a fin de obtener ángulos de orientación de éstas.

4 Modelos de pérdidas de transmisión básicas

Para los casos típicos de las zonas urbanas pueden aplicarse algunos algoritmos de tipo cerrado. Estos modelos de propagación pueden utilizarse para los cálculos específicos del emplazamiento o para los generales. El § 3.1 define las situaciones correspondientes de propagación. El tipo de modelo aplicable puede depender también de la gama de frecuencias, por ejemplo, ondas decimétricas (UHF), ondas centimétricas (SHF) y ondas milimétricas (EHF). Para los cálculos específicos del emplazamiento, han de aplicarse modelos distintos para la propagación en ondas decimétricas y milimétricas. En la gama de frecuencias de ondas decimétricas, se consideran situaciones LoS y NLoS. En el caso de propagación en ondas milimétricas, sólo se considera la LoS. En esta última gama de frecuencias se ha de considerar también la atenuación por el oxígeno y los hidrometeoros.

4.1 Modelos de propagación en el interior de cañones urbanos

4.1.1 Modelo de emplazamiento general

El modelo de emplazamiento general es aplicable cuando tanto la estación transmisora como la estación receptora están situadas por debajo de los tejados, independientemente de la altura de sus antenas. La pérdida de transmisión básica mediana se obtiene con la siguiente ecuación:

$$L_b(d, f) = 10\alpha \log_{10}(d) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f) \quad \text{dB} \quad (1)$$

Con una variable aleatoria gaussiana de media cero aditiva $N(0, \sigma)$ con una desviación típica σ (dB), donde:

- d : distancia en 3D directa entre las estaciones transmisora y receptora (m)
- f : frecuencia de funcionamiento (GHz)
- α : coeficiente asociado al incremento de la pérdida de transmisión básica con la distancia
- β : coeficiente asociado al valor de desplazamiento de la pérdida de transmisión básica
- γ : coeficiente asociado al incremento de la pérdida de transmisión básica con la frecuencia

Para las simulaciones Montecarlo urbana con construcciones altas y urbana con construcciones bajas/suburbanas NLoS, el exceso de pérdida de transmisión básica con respecto a la pérdida de transmisión básica en el espacio libre, LFS, L_{FS} , no será superior a $10 \log_{10}(10^{0,1A} + 1)$ (dB), siendo A una variable aleatoria con distribución normal $N(\mu, \sigma)$, $\mu = L_b(d, f) - L_{FS}$, $L_{FS} = 20 \log_{10}(4 \times 10^9 \pi d f / c)$, y c la velocidad de la luz en metros por segundo.

En el Cuadro 4 se indican los valores recomendados para los casos LoS (por ejemplo, D-F en la Fig. 1) y NLoS (por ejemplo, D-E en la Fig. 1) que se han de utilizar para la propagación por debajo de los tejados en entornos urbanos y suburbanos.

CUADRO 4

Coefficientes de pérdida de transmisión básica para la propagación por debajo de los tejados

Gama de frecuencias (GHz)	Gama de distancia (m)	Tipo de entorno	LoS/NLoS	α	β	γ	σ
0,8-82	5-660	Urbano, construcciones altas, Urbano, construcciones bajas/Suburbano	LoS	2,12	29,2	2,11	5,06
0,8-82	30-715	Urbano, construcciones altas	NLoS	4,00	10,2	2,36	7,60
10-73	30-250	Urbano, construcciones bajas/Suburbano	NLoS	5,06	-4,68	2,02	9,33
0,8-73	30-170	Residencial	NLoS	3,01	18,8	2,07	3,07

4.1.2 Modelo de emplazamiento específico para la situación LoS

Esta situación corresponde con los trayectos entre A y C, D y F, o B y E en la Fig. 1.

Propagación en ondas decimétricas

En la gama de frecuencias de las ondas decimétricas, las pérdidas básicas de transmisión, tal como se definen en la Recomendación UIT-R P.341, pueden caracterizarse por dos pendientes y un único punto de inflexión. El tramo inferior $L_{LoS,l}$ viene dado aproximadamente por:

$$L_{LoS,l} = L_{bp} + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad (2)$$

donde R_{bp} es la distancia al punto de inflexión, en metros, que viene dada por:

$$R_{bp} \approx \frac{4h_1h_2}{\lambda} \quad (3)$$

siendo λ la longitud de onda (m). El tramo inferior se basa en el modelo de reflexión de dos rayos en tierra plana.

El tramo superior $L_{LoS,u}$ viene dado aproximadamente por:

$$L_{LoS,u} = L_{bp} + 20 + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad (4)$$

L_{bp} es el valor de las pérdidas básicas de transmisión en el punto de inflexión que se define por:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_1 h_2} \right) \right| \quad (5)$$

El margen de desvanecimiento del tramo superior es de 20 dB. En la ecuación (4), el coeficiente de atenuación antes del punto de inflexión se fija en 2,5, dado que una distancia corta supone un escaso efecto de apantallamiento.

Con arreglo a la curva de pérdida de transmisión básica en el espacio libre, el valor mediano $L_{LoS,m}$ viene dado por:

$$L_{LoS,m} = L_{bp} + 6 + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad (6)$$

Propagación en ondas centimétricas hasta 15 GHz

En ondas centimétricas, para longitudes del trayecto de hasta 1 km aproximadamente, el tráfico rodado influirá en la altura equivalente de la calle y, por tanto, en la distancia del punto de inflexión. Esta distancia, R_{bp} se estima mediante la fórmula:

$$R_{bp} = 4 \frac{(h_1 - h_s)(h_2 - h_s)}{\lambda} \quad (7)$$

donde h_s es la altura equivalente de la calle debida a objetos tales como los vehículos y los peatones cercanos a la calzada. Así pues, h_s depende del tráfico de la calle. Los valores de h_s de los Cuadros 5 y 6 se obtienen a partir de mediciones diurnas y nocturnas, correspondientes a condiciones de tráfico intenso y ligero, respectivamente. El tráfico intenso corresponde al 10-20% de la calle cubierta con vehículos y al 0,2-1% de la acera ocupada por peatones. El tráfico ligero ocupa el 0,1-0,5% de la calle y menos del 0,001% de la acera. La calle tiene 27 m de ancho, incluyendo 6 m de aceras a cada lado.

CUADRO 5

Altura equivalente de la calle, h_s (tráfico intenso)

Frecuencia (GHz)	h_1 (m)	h_s (m)	
		$h_2 = 2,7$	$h_2 = 1,6$
3,35	4	1,3	(2)
	8	1,6	(2)
8,45	4	1,6	(2)
	8	1,6	(2)
15,75	4	1,4	(2)
	8	(1)	(2)

(1) El punto de inflexión está más allá de 1 km.

(2) No existe punto de inflexión.

CUADRO 6

Altura equivalente de la calle, h_s (tráfico ligero)

Frecuencia (GHz)	h_1 (m)	h_s (m)	
		$h_2 = 2,7$	$h_2 = 1,6$
3,35	4	0,59	0,23
	8	(1)	(1)
8,45	4	(2)	0,43
	8	(2)	(1)
15,75	4	(2)	0,74
	8	(2)	(1)

(1) No se tomaron medidas.

(2) El punto de inflexión está más allá de 1 km.

Cuando $h_1, h_2 > h_s$, los valores aproximados de los límites superior e inferior de la pérdida básica de transmisión para la banda de ondas centimétricas pueden calcularse utilizando las ecuaciones (2) y (4), viniendo dado L_{bp} por:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left\{ \frac{\lambda^2}{8\pi(h_1 - h_s)(h_2 - h_s)} \right\} \right| \quad (8)$$

Por otro lado, cuando $h_1 \leq h_s$ o $h_2 \leq h_s$ no hay punto de inflexión. Cuando dos terminales están próximos ($d < R_s$) la pérdida de transmisión básica es similar a la de la gama de ondas decimétricas. Cuando dos terminales están alejados entre sí, las características de propagación producen que el coeficiente de atenuación se eleve al cubo. Por tanto, el límite inferior aproximado para $d \geq R_s$ viene dado por:

$$L_{LoS,l} = L_s + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (9)$$

El límite superior aproximado para $d \geq R_s$ viene dado por:

$$L_{LoS,u} = L_s + 20 + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (10)$$

La pérdida de transmisión básica, L_s se define por:

$$L_s = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{2\pi R_s} \right) \right| \quad (11)$$

Se ha determinado experimentalmente que el valor de R_s de las ecuaciones (9) a (11) es de 20 m.

A partir de las mediciones, el valor mediano viene dado por:

$$L_{LoS,m} = L_s + 6 + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (12)$$

Propagación en ondas milimétricas

En frecuencias superiores a unos 10 GHz, la distancia al punto de inflexión R_{bp} en la ecuación (3) es muy superior al radio máximo previsto de la célula (500 m). Esto significa que no cabe esperar una ley de cuarta potencia en esta banda de frecuencias. Así pues, la tasa de disminución de la potencia con la distancia sigue de cerca la regla de las pérdidas en el espacio libre, con un exponente de pérdidas del trayecto aproximado de 1.9-2.2.

Con antenas direccionales, las pérdidas de transmisión básicas cuando los ejes de puntería de las antenas están alineados, vienen dadas por:

$$L_{LOS} = L_0 + 10n \log_{10} \frac{d}{d_0} + L_{gas} + L_{rain} \quad \text{dB} \quad (13)$$

siendo n el exponente de pérdidas de transmisión básicas, d la distancia entre la Estación 1 y la Estación 2 y L_0 las pérdidas de transmisión básicas para la distancia de referencia d_0 . Para la distancia de referencia d_0 igual a 1 m y suponiendo que las pérdidas por propagación en el espacio libre son $L_0 = 20 \log_{10} f - 28$, donde f se expresa en MHz. L_{gas} y L_{rain} , son la atenuación debida a los gases atmosféricos y a la lluvia, que pueden calcularse a partir de la Recomendación UIT-R P.676 y la Recomendación UIT-R P.530, respectivamente.

Los valores del exponente n de pérdidas de transmisión básicas se indican en el Cuadro 7.

CUADRO 7

Coefficientes de pérdidas de transmisión básicas direccionales para la propagación en ondas milimétricas

Frecuencia (GHz)	Tipo de entorno	Apertura del haz a media potencia (grados)		Exponente de pérdidas de transmisión básicas
		Tx Ant	Rx Ant	n
28	Urbano de construcción alta	30	10	2,21
	Urbano de construcción baja	30	10	2,06
60	Urbano de construcción baja	15,4	15,4	1,9

4.1.3 Modelo de emplazamiento específico para las situaciones NLoS

Esta situación corresponde con los trayectos entre D y E en la Fig. 1.

4.1.3.1 Gama de frecuencias entre 800 y 2 000 MHz

En las situaciones NLoS2 en las que ambas antenas están por debajo del nivel de los tejados, se ha de considerar las ondas de difracción y reflejadas en las esquinas de las calles (véase la Fig. 3).

$$L_{NLoS2} = 10 \log_{10} (10^{-L_r/10} + 10^{-L_d/10}) \quad \text{dB} \quad (14)$$

donde:

L_r : pérdidas de reflexión definidas por:

$$L_r = 20 \log_{10} (x_1 + x_2) + x_1 x_2 \frac{f(\alpha)}{w_1 w_2} + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (15)$$

donde:

$$f(\alpha) = \frac{3,86}{\alpha^{3,5}} \quad \text{dB} \quad (16)$$

donde $0,6 < \alpha \text{ [rad]} < \pi$.

L_d : pérdidas de difracción definidas por:

$$L_d = 10 \log_{10} [x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + 2D_a - 0,1 \left(90 - \alpha \frac{180}{\pi} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (17)$$

$$D_a = \left(\frac{40}{2\pi} \right) \left[\arctg \left(\frac{x_2}{w_2} \right) + \arctg \left(\frac{x_1}{w_1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad \text{dB} \quad (18)$$

4.1.3.2 Gama de frecuencias comprendida entre 2 y 38 GHz

El modelo de propagación en las situaciones NLoS2 descrito en el § 3.1.2 con el ángulo de la esquina $\alpha = \pi/2$ rad se obtiene sobre la base de las mediciones efectuadas en la gama de frecuencias comprendida entre 2 y 38 GHz, donde $h_1, h_2 < h_r$ y w_2 es de hasta 10 m (o acera). Las características de las pérdidas de transmisión básicas pueden dividirse en dos partes: la región de pérdidas en esquina y la región NLoS. Para $d_{esquina}$, la región de pérdidas en esquina se extiende desde el punto situado a 1 m por debajo del borde de la calle LoS en la calle NLoS. Las pérdidas en esquina, $L_{esquina}$, se expresan como la atenuación adicional con la distancia, $d_{esquina}$. La región NLoS se encuentra más allá de la región de pérdidas en esquina, donde se aplica un parámetro coeficiente (β). Ello se observa en la curva típica de la Fig. 4. Utilizando x_1, x_2 y w_1 , como se muestra en la Fig. 3, la pérdida de transmisión básica total, L_{NLoS2} , más allá de la región esquina ($x_2 > w_1/2 + 1$) se calcula de la siguiente manera:

$$L_{NLoS2} = L_{LoS} + L_s + L_{att} \quad (19)$$

$$L_c = \begin{cases} \frac{L_{esquina}}{\log_{10}(1 + d_{esquina})} \log_{10}(x_2 - w_1/2) & w_1/2 + 1 < x_2 \leq w_1/2 + 1 + d_{esquina} \\ L_{esquina} & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{esquina} \end{cases} \quad (20)$$

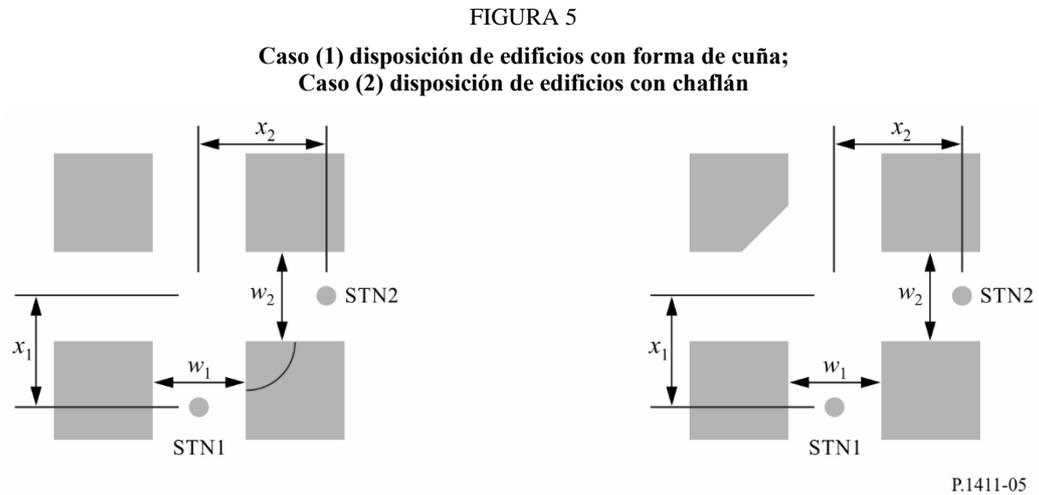
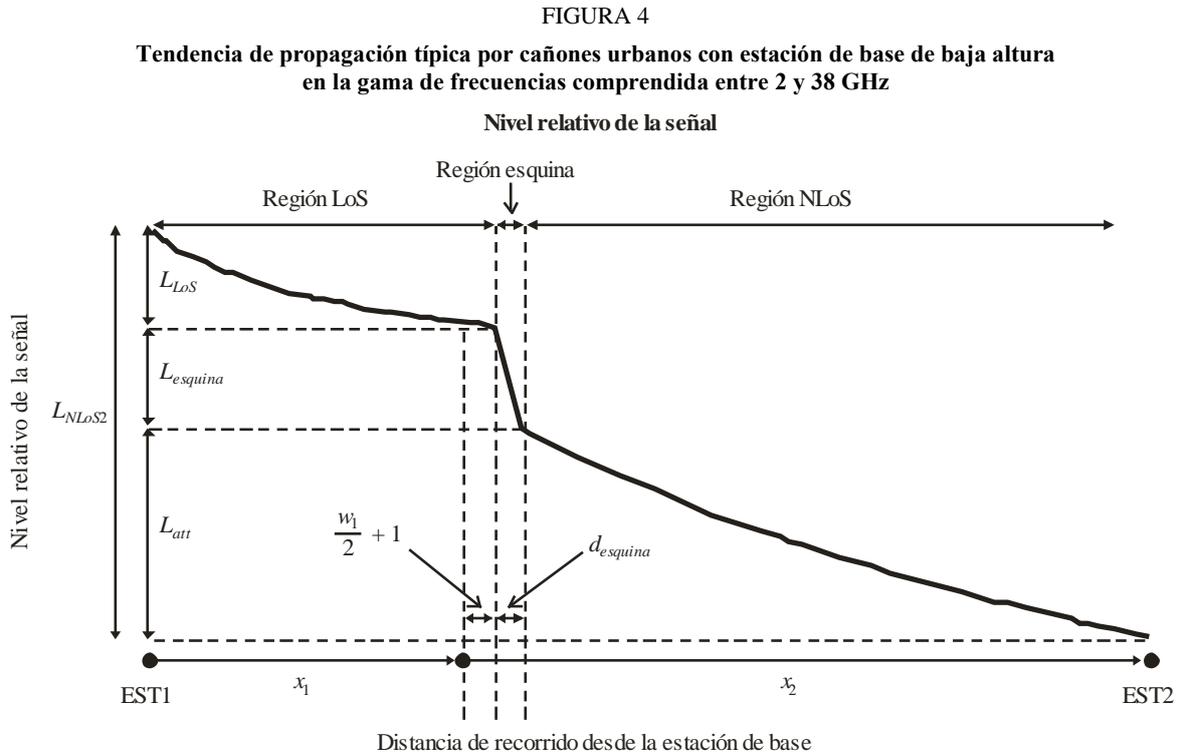
$$L_{att} = \begin{cases} 10\beta \log_{10} \left(\frac{x_1 + x_2}{x_1 + w_1/2 + d_{esquina}} \right) & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{esquina} \\ 0 & x_2 \leq w_1/2 + 1 + d_{esquina} \end{cases} \quad (21)$$

donde L_{LoS} es la pérdida de transmisión básica de la calle LoS para $x_1 (> 20 \text{ m})$, calculada en el § 4.1.2. En la ecuación (20), $L_{esquina}$ viene dada por 20 dB en un entorno urbano y 30 dB en un entorno residencial y $d_{esquina}$ es de 30 m en ambos entornos.

En la ecuación (21), $\beta = 6$ en entornos urbanos y residenciales con edificios con forma de cuña en las cuatro esquinas de la intersección, como se ilustra en el caso (1) de la Fig. 5. Si un edificio hace chaflán en la intersección en entornos urbanos, como se muestra en el caso (2) de la Fig. 5, β se calcula con la ecuación (22). La pérdida transmisión básica en el caso (2) difiere de la del caso (1) porque los trayectos de reflexión especular que causan los edificios con chaflán afectan notablemente a la pérdida de transmisión básica en la región NLoS.

$$\beta = 4,2 + (1,4 \log_{10} f - 7,8)(0,8 \log_{10} x_1 - 1,0) \quad (22)$$

donde f es la frecuencia en MHz.



En un entorno residencial, la pérdida de transmisión básica no aumenta monótonamente con la distancia y, por consiguiente, el parámetro del coeficiente puede ser inferior al valor correspondiente a un entorno urbano, debido a la presencia de callejones y huecos entre las viviendas.

Con una antena de estación de base alta en la pequeña macrocélula, los efectos de la difracción por encima de los tejados son más importantes. Por lo tanto, las características de la propagación no dependen de la pérdida en esquina.

4.2 Modelos de propagación por encima de los tejados

4.2.1 Modelo de emplazamiento general

Este modelo de emplazamiento general es aplicable cuando una de las estaciones está situada por encima de los tejados y la otra estación está situada por debajo de los tejados, independientemente de la altura de sus antenas. El modelo de emplazamiento general es idéntico al que la ecuación (1) describe para el modelo de emplazamiento general para la propagación por debajo de los tejados (en cañones urbanos).

En el Cuadro 8 se indican los valores recomendados para los casos LoS (por ejemplo, A-C en la Fig. 1) y NLoS (por ejemplo, A-B en la Fig. 1) que se han de utilizar para la propagación por encima de los tejados en entornos urbanos y suburbanos.

CUADRO 8
Coeficientes de pérdida de transmisión básica para la propagación
por encima de los tejados

Gama de frecuencias (GHz)	Gama de distancia (m)	Tipo de entorno	LoS/ NLoS	α	β	γ	σ
2,2-73	55-1 200	Urbano, construcciones altas, Urbano, construcciones bajas/ Suburbano	LoS	2,29	28,6	1,96	3,48
2,2-66,5	260-1 200	Urbano construcciones altas	NLoS	4,39	-6,27	2,30	6,89

4.2.2 Modelo de emplazamiento específico

Las señales NLoS pueden llegar a la estación por mecanismos de difracción o por trayectos múltiples que pueden ser el resultado de una combinación de mecanismos de difracción y de reflexión. En este punto se desarrollan modelos relativos a los mecanismos de difracción.

Propagación en zonas urbanas

Se definen modelos para los trayectos entre A (h_1) y B (h_2), y entre D (h_1) y B (h_2) descritos en la Fig. 1. Los modelos son válidos para:

h_1 : 4 a 55 m

h_2 : 1 a 3 m

f : 800 a 26 000 MHz
2 a 16 GHz para $h_1 < h_r$ y $w_2 < 10$ m (o banqueta)

d : 20 a 5 000 m.

(Véase que aunque el modelo es válido hasta para 5 km, esta Recomendación se aplica a distancias de hasta sólo 1 km.)

Propagación en zonas suburbanas

Se define el modelo para el trayecto entre A (h_1) y B (h_2) descrito en la Fig. 1. El modelo es válido para:

h_r : cualquier altura m

Δh_1 : 1 a 100 m

Δh_2 : 4 a 10 (menos de h_r) m

h_1 :	$h_r + \Delta h_1$ m
h_2 :	$h_r - \Delta h_2$ m
f :	0,8 a 38 GHz
w :	10 a 25 m
d :	10 a 5 000 m.

(Véase que aunque el modelo es válido hasta para 5 km, esta Recomendación se aplica a distancias de hasta sólo 1 km.)

Propagación en ondas milimétricas

La cobertura de la señal en ondas milimétricas se considera únicamente para situaciones de reflexión NLoS y LoS debido a las grandes pérdidas de difracción que se producen cuando los obstáculos hacen que el trayecto de propagación pase a NLoS. Para las situaciones NLoS, las reflexiones multitrayecto y la dispersión serán el método más probable de propagación de la señal. Las gamas de frecuencias (f) de hasta 26 GHz y 38 GHz son aplicables, respectivamente, para los modelos de propagación en zona urbana y suburbana (§ 4.2.2.1 y § 4.2.2.2).

4.2.2.1 Área urbana

El modelo de difracción multipantalla que se indica a continuación es válido si los tejados tienen aproximadamente la misma altura. Suponiendo que las alturas de los tejados difieren únicamente en una cantidad inferior al radio de la primera zona de Fresnel sobre el trayecto de longitud, l (véase la Fig. 2), la altura del tejado que se utiliza en el modelo es la altura media. Si las alturas de los tejados varían mucho más que el radio de la primera zona de Fresnel, el método que se prefiere consiste en utilizar los edificios más altos a lo largo del trayecto en un cálculo de difracción de filo de cuchillo, como se describe en la Recomendación UIT-R P.526 para sustituir el modelo de multipantalla.

En el modelo de las pérdidas de transmisión del caso NLoS1 (véase la Fig. 2) para los tejados de altura similar, las pérdidas de las antenas isotropas se expresan en forma de la suma de las pérdidas de transmisión básicas en el espacio libre, L_{bf} , las pérdidas de difracción entre el tejado y la calle, L_{rts} , y la reducción debida a la difracción de pantalla múltiple al pasar por líneas de edificios, L_{msd} .

En este modelo L_{bf} y L_{rts} son independientes de la altura de la antena de la estación, mientras que L_{msd} depende de si la antena de la estación está por debajo o por encima de las alturas de los edificios.

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

Las pérdidas de transmisión básicas en el espacio libre vienen dadas por:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log_{10}(d/1\,000) + 20 \log_{10}(f) \quad (24)$$

donde:

- d : longitud del trayecto (m)
- f : frecuencia (MHz).

El término L_{rts} describe el acoplamiento de la onda que se propaga a lo largo del trayecto multipantalla en la calle en las que está situada la estación móvil. Tiene en cuenta la anchura de la calle y su orientación.

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(\Delta h_2) + L_{ori} \quad (25)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\phi & \text{para } 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\phi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\phi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (26)$$

donde:

$$\Delta h_2 = h_r - h_2 \quad (27)$$

L_{ori} es el factor de corrección de la orientación de la calle que tiene en cuenta el efecto de la difracción entre el tejado y la calle en aquellas que no son perpendiculares a la dirección de propagación (véase la Fig. 2).

Las pérdidas de difracción de pantalla múltiple desde la Estación 1 debidas a la propagación que pasa por filas de edificios dependen de la altura de la antena de la Estación con relación a las alturas de los edificios y del ángulo de incidencia. Un criterio de incidencia rasante es el de la «distancia del campo establecido», d_s :

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_1^2} \quad (28)$$

donde (véase la Fig. 2):

$$\Delta h_1 = h_1 - h_r \quad (29)$$

Para el cálculo de L_{msd} , d_s se compara con la distancia l a lo largo de la que se extienden los edificios. Con objeto de eliminar toda discontinuidad entre los diferentes modelos utilizados cuando la longitud de los edificios es superior o inferior a la «distancia del campo establecido», en el cálculo de L_{msd} se utiliza el siguiente procedimiento.

La pérdida total del modelo de difracción de pantalla múltiple está dada por:

$$L_{msd} = \begin{cases} -\tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi}\right) \cdot (L1_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{para } l > d_s \text{ y } dh_{bp} > 0 \\ \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi}\right) \cdot (L2_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{para } l \leq d_s \text{ y } dh_{bp} > 0 \\ L2_{msd}(d) & \text{para } dh_{bp} = 0 \\ L1_{msd}(d) - \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta}\right) \cdot (L_{upp} - L_{mid}) - L_{upp} + L_{mid} & \text{para } l > d_s \text{ y } dh_{bp} < 0 \\ L2_{msd}(d) + \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta}\right) \cdot (L_{mid} - L_{low}) + L_{mid} - L_{low} & \text{para } l \leq d_s \text{ y } dh_{bp} < 0 \end{cases} \quad (30)$$

donde:

$$dh_{bp} = L_{upp} - L_{low} \quad (31)$$

$$\zeta = (L_{upp} - L_{low}) \cdot \upsilon \quad (32)$$

$$L_{mid} = \frac{(L_{upp} + L_{low})}{2} \quad (33)$$

$$L_{upp} = L1_{msd}(d_{bp}) \quad (34)$$

$$L_{low} = L2_{msd}(d_{bp}) \quad (35)$$

y

$$d_{bp} = |\Delta h_1| \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad (36)$$

$$\upsilon = [0,0417]$$

$$\chi = [0,1]$$

donde las pérdidas de cada modelo, $L1_{msd}(d)$ y $L2_{msd}(d)$, se definen en la forma siguiente:

Cálculo de $L1_{msd}$ para $l > d_s$

(Véase que este cálculo es más preciso cuando $l \gg d_s$.)

$$L1_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d/1\,000) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad (37)$$

donde:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_1) & \text{para } h_1 > h_r \\ 0 & \text{para } h_1 \leq h_r \end{cases} \quad (38)$$

es un término de pérdidas que depende de la altura de la antena:

$$k_a = \begin{cases} 71,4 & \text{para } h_1 > h_r \text{ y } f > 2\,000 \text{ MHz} \\ 73 - 0,8\Delta h_1 & \text{para } h_1 \leq h_r, f > 2\,000 \text{ MHz y } d \geq 500 \text{ m} \\ 73 - 1,6\Delta h_1 d / 1\,000 & \text{para } h_1 \leq h_r, f > 2\,000 \text{ MHz y } d < 500 \text{ m} \\ 54 & \text{para } h_1 > h_r \text{ y } f \leq 2\,000 \text{ MHz} \\ 54 - 0,8\Delta h_1 & \text{para } h_1 \leq h_r, f \leq 2\,000 \text{ MHz y } d \geq 500 \text{ m} \\ 54 - 1,6\Delta h_1 d / 1\,000 & \text{para } h_1 \leq h_r, f \leq 2\,000 \text{ MHz y } d < 500 \text{ m} \end{cases} \quad (39)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_1 > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_1}{h_r} & \text{para } h_1 \leq h_r \end{cases} \quad (40)$$

$$k_f = \begin{cases} -8 & \text{para } f > 2\,000 \text{ MHz} \\ -4 + 0,7(f/925 - 1) & \text{para ciudades de tamaño medio o centros suburbanos} \\ & \text{con una densidad de arbolado media y } f \leq 2\,000 \text{ MHz} \\ -4 + 1,5(f/925 - 1) & \text{para centros metropolitanos y } f \leq 2\,000 \text{ MHz} \end{cases} \quad (41)$$

Cálculo de $L2_{msd}$ para $l < d_s$

En este caso, se ha de hacer una nueva distinción, según las alturas relativas de la antena y los tejados:

$$L2_{msd}(d) = -10 \log_{10} \left(Q_M^2 \right) \quad (42)$$

donde:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left(\frac{\Delta h_1}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{para } h_1 > h_r + \delta h_u \\ \frac{b}{d} & \text{para } h_1 \leq h_r + \delta h_u \text{ y } h_1 \geq h_r + \delta h_l \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right) & \text{para } h_1 < h_r + \delta h_l \end{cases} \quad (43)$$

y

$$\theta = \arctan \left(\frac{\Delta h_1}{b} \right) \quad (44)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_1^2 + b^2} \quad (45)$$

y

$$\delta h_u = 10^{-\log_{10} \left(\sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right) - \frac{\log_{10}(d)}{9} + \frac{10}{9} \log_{10} \left(\frac{b}{2,35} \right)} \quad (46)$$

$$\delta h_l = \frac{0,00023b^2 - 0,1827b - 9,4978}{(\log_{10}(f))^{2,938}} + 0,000781b + 0,06923 \quad (47)$$

4.2.2.2 Área Suburbana

En la Fig. 2 se muestra un modelo de propagación para el caso de NLoS1 basado en la óptica geométrica. Esa figura indica que la composición de las ondas de llegada a la Estación 2 cambia según la distancia Estación 1-Estación 2. Una onda directa puede llegar a la Estación 2 únicamente cuando la distancia Estación 1-Estación 2 es muy corta. Las ondas reflejadas varias veces (1, 2 ó 3 veces), que tienen un nivel relativamente intenso, pueden llegar a la Estación 2 cuando la distancia entre la Estación 1 y la Estación 2 es relativamente corta. Cuando esa distancia es larga, las ondas reflejadas varias veces no pueden llegar a la Estación 2 y sólo las ondas reflejadas numerosas veces, de débil intensidad, aparte de las ondas de difracción de los tejados de los edificios, pueden hacerlo. Según estos mecanismos de propagación, la pérdida debida a la distancia entre antenas isotrópicas puede dividirse en tres regiones, según las ondas de llegada dominantes a la Estación 2: región dominante de onda directa, dirección dominante de onda reflejada y región dominante de onda de difracción. La pérdida en cada región, basada en la óptica geométrica, se expresa del modo siguiente:

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) & \text{para } d < d_0 \quad (\text{Región dominante de onda directa}) \\ L_{0n} & \text{para } d_0 \leq d < d_{RD} \quad (\text{Región dominante de onda reflejada}) \\ 32,1 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_{RD}} \right) + L_{d_{RD}} & \text{para } d \geq d_{RD} \quad (\text{Región dominante de onda de difracción}) \end{cases} \quad (48)$$

donde:

$$L_{0n} = \begin{cases} L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d - d_k) & \text{cuando } d_k \leq d < d_{k+1} < d_{RD} \\ & (k = 0, 1, 2, \dots) \\ L_{d_k} + \frac{L_{d_{RD}} - L_{d_k}}{d_{RD} - d_k} \cdot (d - d_k) & \text{cuando } d_k \leq d < d_{RD} < d_{k+1} \end{cases} \quad (49)$$

$$d_k = \sqrt{\left(\frac{B_k}{\text{sen } \varphi}\right)^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (50)$$

$$L_{d_k} = 20 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{4\pi d_{kp}}{0,4^k \cdot \lambda} \right\} \quad (51)$$

$$d_{RD}(f) = (0,25 \cdot d_3 + 0,25 \cdot d_4 - 0,16 \cdot d_1 - 0,35 \cdot d_2) \cdot \log_{10}(f) \\ + 0,25 \cdot d_1 + 0,56 \cdot d_2 + 0,10 \cdot d_3 + 0,10 \cdot d_4 \\ (0,8 \text{ GHz} \leq f \leq 38 \text{ GHz}) \quad (52)$$

$$L_{d_{RD}} = L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d_{RD} - d_k) \quad (d_k \leq d_{RD} \leq d_{k+1}) \quad (53)$$

$$d_{kp} = \sqrt{\left(\frac{A_k}{\text{sen } \phi_k}\right)^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (54)$$

$$A_k = \frac{w \cdot (h_1 - h_2) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - h_2)} \quad (55)$$

$$B_k = \frac{w \cdot (h_1 - h_2) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - h_2)} - k \cdot w \quad (56)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{A_k}{B_k} \cdot \tan \varphi \right) \quad (57)$$

4.3 Modelos para la propagación entre terminales situados entre el nivel por debajo de la altura de los tejados y un nivel cercano a la calle

El objetivo de los modelos descritos a continuación es calcular la pérdida básica de transmisión entre dos terminales de baja altura en entornos urbanos o residenciales. Esta situación está representada por los trayectos entre D y F, D y E, B y E, o E y F en la Fig. 1. El modelo de emplazamiento general en entornos urbanos se describe en § 4.3.1. El modelo específico entre calles se describe en § 4.3.2 y el modelo en entornos residenciales en § 4.3.3. Estos modelos se recomiendan para la propagación entre terminales de baja altura cuyas antenas estén a la altura aproximada de la calle y bien por debajo de la altura de los tejados, pero que, en cambio, no estén especificadas. Es recíproco respecto del transmisor y el receptor.

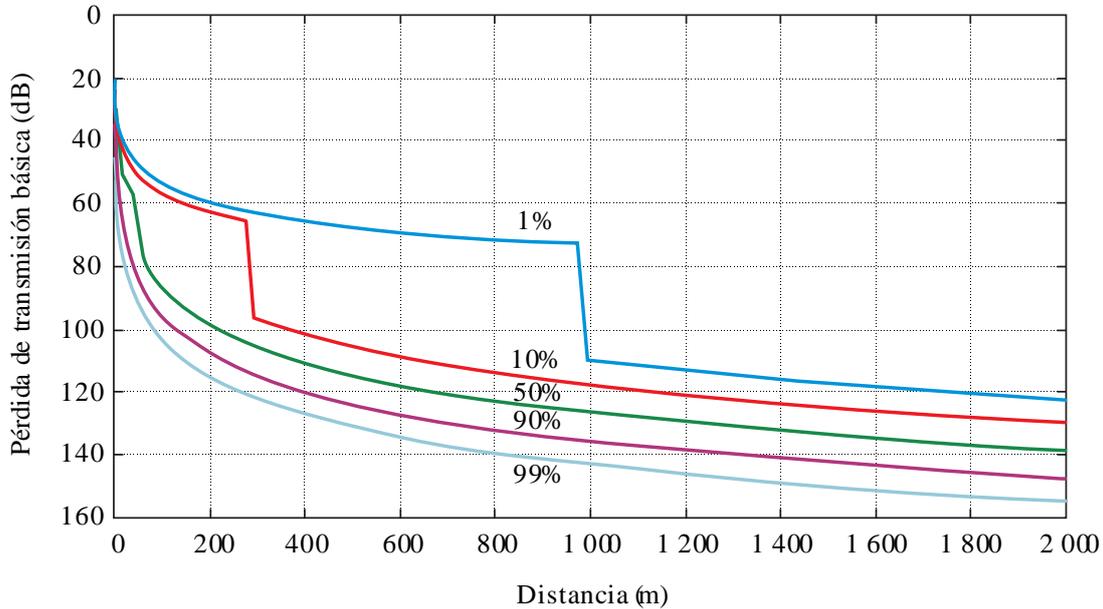
4.3.1 Modelo de emplazamiento general

El modelo comprende las regiones con LoS y NLoS, así como el establecimiento de un modelo de rápida disminución en el nivel de la señal observado en la esquina entre las regiones LoS y NLoS. El modelo comprende las estadísticas de la variabilidad de localización en ambas regiones y proporciona un modelo estadístico con respecto a la distancia desde la esquina entre las regiones LoS y NLoS. En

la Fig. 6 se observan las regiones LoS, NLoS y las correspondientes a la esquina, y la variabilidad estadística prevista por el modelo.

Este modelo es válido en la gama de frecuencias comprendida entre 300-3 000 MHz. Este modelo está basado en las mediciones efectuadas con alturas de antena comprendidas entre 1,9 y 3 m por encima del suelo, y a distancias entre el transmisor y el receptor de hasta 3 000 m.

FIGURA 6
Curvas de pérdida de transmisión básica no excedidas en el 1, 10, 50, 90 y 99% de los emplazamientos (frecuencia = 400 MHz, entorno suburbano)



P.1411-06

Los parámetros requeridos son la frecuencia f (MHz) y la distancia entre los terminales d (m).

Etapa 1: Calcular el valor mediano de la pérdida con LoS:

$$L_{LoS}^{mediano}(d) = 32,45 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10}(d/1\,000) \quad (58)$$

Etapa 2: Para el porcentaje de emplazamiento necesario, p (%), calcular la corrección de emplazamiento LoS:

$$\Delta L_{LoS}(p) = 1,5624\sigma(\sqrt{-2 \ln(1 - p/100)} - 1,1774) \quad \text{con } \sigma = 7 \text{ dB} \quad (59)$$

En el Cuadro 9 se facilitan otros valores de la corrección LoS para $p = 1, 10, 50, 90$ y 99% .

Etapa 3: Añadir la corrección de emplazamiento LoS al valor mediano de la pérdida LoS:

$$L_{LoS}(d, p) = L_{LoS}^{mediano}(d) + \Delta L_{LoS}(p) \quad (60)$$

Etapa 4: Calcular el valor mediano de la pérdida NLoS:

$$L_{NLoS}^{mediano}(d) = 9,5 + 45 \log_{10} f + 40 \log_{10}(d/1\,000) + L_{urbano} \quad (61)$$

L_{urbano} depende de la categoría urbana y corresponde a 0 dB para un entorno suburbano, 6,8 dB para un entorno urbano y 2,3 dB para un entorno urbano denso de construcciones altas.

Etapa 5: Para el porcentaje de emplazamiento requerido, p (%), añadir la corrección de emplazamiento NLoS:

$$\Delta L_{NLoS}(p) = \sigma N^{-1}(p/100) \quad \text{con } \sigma = 7 \text{ dB} \quad (62)$$

$N^{-1}(\cdot)$ es la función de distribución acumulativa normal inversa. Una aproximación de esta función, correcta para p entre 1 y 99%, viene dada por la función de variabilidad con las indicaciones $Q_i(x)$ de la Recomendación UIT-R P.1546. En el Cuadro 9 figuran otros valores de la corrección de emplazamiento NLoS para $p = 1, 10, 50, 90$ y 99%.

CUADRO 9

Cuadro de correcciones de variabilidad de emplazamiento LoS y NLoS

p (%)	ΔL_{LoS} (dB)	ΔL_{NLoS} (dB)	d_{LoS} (m)
1	-11,3	-16,3	976
10	-7,9	-9,0	276
50	0,0	0,0	44
90	10,6	9,0	16
99	20,3	16,3	10

Etapa 6: Añadir la corrección de emplazamiento NLoS al valor mediano de la pérdida NLoS:

$$L_{NLoS}(d, p) = L_{NLoS}^{mediano}(d) + \Delta L_{NLoS}(p) \quad (63)$$

Etapa 7: Para el porcentaje de localización requerido, p (%), calcular la distancia d_{LoS} para la cual la fracción LoS es igual a $F_{LoS} p$:

$$\begin{aligned} d_{LoS}(p) &= 212[\log_{10}(p/100)]^2 - 64\log_{10}(p/100) && \text{si } p < 45 \\ d_{LoS}(p) &= 79,2 - 70(p/100) && \text{en otros casos} \end{aligned} \quad (64)$$

En el Cuadro 9 se proporcionan los valores de d_{LoS} para $p = 1, 10, 50, 90$ y 99%. No se han efectuado pruebas de este modelo para $p < 0,1\%$. Los datos estadísticos fueron obtenidos en dos ciudades del Reino Unido y pueden ser distintos en otros países. Otra posibilidad es, si en un determinado caso se conoce la distancia a partir de la esquina, fijar $d_{LoS}(p)$ a esa distancia.

Etapa 8: La pérdida de transmisión básica en la distancia, d , viene dada por lo tanto como:

- Si $d < d_{LoS}$, entonces $L(d, p) = L_{LoS}(d, p)$
- Si $d > d_{LoS} + w$, entonces $L(d, p) = L_{NLoS}(d, p)$
- En otros casos, efectuar la interpolación lineal entre los valores $L_{LoS}(d_{LoS}, p)$ y $L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p)$:

$$\begin{aligned} L_{LoS} &= L_{LoS}(d_{LoS}, p) \\ L_{NLoS} &= L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p) \\ L(d, p) &= L_{LoS} + (L_{NLoS} - L_{LoS})(d - d_{LoS})/w \end{aligned}$$

Se introduce la anchura w para proporcionar una región de transición entre las regiones LoS y NLoS. Esta región de transición se observa en los datos y, generalmente, tiene una anchura de $w = 20$ m.

4.3.2 Modelo específico para entornos urbanos

Este modelo específico consta de LoS, NLoS con 1 giro y NLoS con 2 giros en entornos de calles cuadrículas rectilíneas. Este modelo se basa en datos medidos a frecuencias: 430, 750, 905, 1 834, 2 400, 3 705 y 4 860 MHz con alturas de antena entre 1,5 y 4,0 m por encima del suelo. La distancia máxima entre terminales es de 1 000 m.

4.3.2.1 Situación LoS

Esta situación se ilustra como el trayecto entre B y E, o D y F en la Fig. 1. Las pérdidas de propagación son idénticas a las de § 4.1.2.

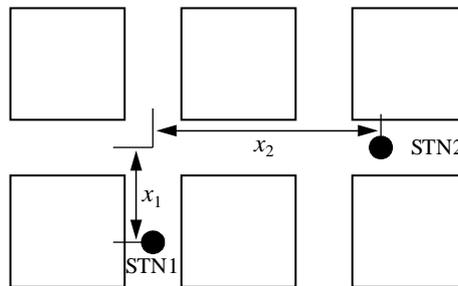
4.3.2.2 Situaciones NLoS

El caso NLoS corresponde a los trayectos E-F y D-E con altura de antena L2 y L3 en entornos urbanos.

Propagación NLoS con 1 giro

En la Fig. 7 se describe el caso de NLoS con 1 giro entre la Estación 1 y la Estación 2, debido a que hay una esquina entre las dos estaciones. La distancia entre la esquina y la Estación 1 es x_1 y la distancia entre la esquina y la Estación 2 es x_2 .

FIGURA 7
Enlace NLoS con 1 giro entre la Estación 1 y la Estación 2



P.1411-07

Las pérdidas de transmisión básicas en esta situación pueden calcularse mediante:

$$L_{1-Turn} = L_{LoS} + 10 \log_{10} \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} - 20 \log_{10} S_1 \text{ (dB)}, \quad x_2 > \max(S_1^2, d_{corner}) \quad (65)$$

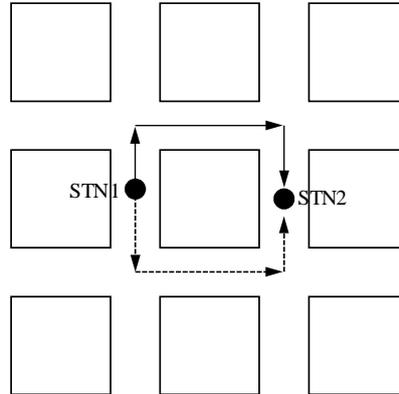
siendo L_{LoS} las pérdidas de transmisión básicas a la distancia $d = x_1 + x_2$, calculadas según § 4.1.1, y S_1 en parámetros de dispersión/difracción que viene dado por la siguiente expresión:

$$S_1 = (3,45 \times 10^4) f^{-0,46} \quad (66)$$

a una frecuencia de funcionamiento f expresada en Hz. La relación entre S_1 y f se obtiene por un ajuste por regresión de los datos medidos en el intervalo de frecuencias comprendido entre 430 MHz y 4 860 MHz. El parámetro d_{corner} es una variable ambiental determinada por la disposición de calles (ancho y longitud del intervalo LoS x_1) que representa el límite inferior de la gama de distancias válidas para la ecuación (65). Al igual que en el ejemplo de § 4.1.3.2, se puede utilizar 30 m para zonas urbanas. Las pérdidas de transmisión básicas para el intervalo de transición en la esquina, es decir $0 \leq x_2 \leq \max(S_1^2, d_{corner})$, puede determinarse por interpolación entre las pérdidas de transmisión básicas en el punto final LoS (es decir $x_2 = 0$) y el valor en $x_2 = \max(S_1^2, d_{corner})$.

Propagación NLoS con 2 giros

FIGURA 8
 Dos trayectos de viaje (línea continua y línea discontinua)
 para un enlace NLoS con dos giros



P.1411-08

A diferencia de los enlaces LoS y NLoS con 1 giro, para el enlace NLoS con dos giros resulta posible crear múltiples trayectos de viaje, como se muestra en la Fig. 8. Así, la ganancia de potencia de la señal recibida (de la Estación 1 a la 2) se calcula considerando todos los trayectos con 2 giros. Dado que la ganancia de la potencia recibida y las pérdidas de transmisión básicas están inversamente relacionadas y son logarítmicas, la ganancia de potencia recibida puede expresarse así:

$$\frac{1}{10^{L_{2-Turn}/10}} = \sum_n \frac{1}{10^{L_{2-Turn,n}/10}} \quad (67)$$

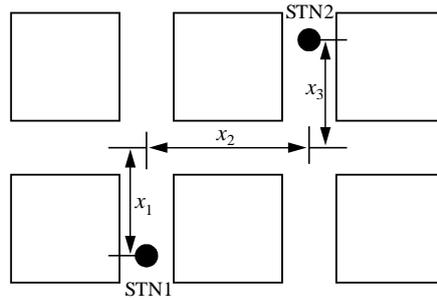
siendo L_{2-Turn} las pérdidas totales entre la Estación 1 y la Estación 2, y $L_{2-Turn,n}$ las pérdidas de transmisión básicas a lo largo del n-ésimo trayecto con dos giros. Por consiguiente,

$$L_{2-Turn} = -10 \log_{10} \sum_n \frac{1}{10^{L_{2-Turn,n}/10}} \quad \text{dB} \quad (68)$$

A fin de calcular las pérdidas de transmisión básicas en el n-ésimo trayecto, es decir, $L_{2-Turn,n}$ en (68), consideremos la situación NLoS con dos giros ilustrada en la Fig. 9. Este trayecto de enlace se caracteriza por tres distancias: x_1 , x_2 y x_3 , siendo:

- x_1 la distancia entre la Estación 1 y la primera esquina,
- x_2 la distancia entre la primera y la segunda esquina,
- x_3 la distancia entre la segunda esquina y la Estación 2.

FIGURA 9
Enlace NLoS con dos giros entre la Estación 1 y la Estación 2



P.1411-09

Así, las pérdidas de transmisión básicas de propagación entre la Estación 1 y la 2 se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_{2-Turn,n} = L_{LoS} + 10 \log_{10} \frac{x_{1,n} x_{2,n} x_{3,n}}{x_{1,n} + x_{2,n} + x_{3,n}} - 20 \log_{10} S_1 - 20 \log_{10} S_2 \quad x_{3,n} > \max(S_2^2, d_{corner}) \quad (69)$$

siendo L_{LoS} las pérdidas en el trayecto de distancia $d=x_{1,n}+x_{2,n}+x_{3,n}$, calculadas según § 4.1.2. S_1 es un parámetro de dispersión/difracción correspondiente al primer giro y calculado mediante (66), y S_2 es el parámetro que representa el efecto de la segunda esquina, que viene dado por:

$$S_2 = 0,54 f^{0,076} \quad (70)$$

Al igual que S_1 , la relación entre S_2 y f (en Hz) se obtiene por un ajuste de regresión de los datos medidos a frecuencias comprendidas entre 430 MHz y 4 860 MHz. La distancia d_{corner} se determina de manera análoga al caso NLoS con 1 giro. Las pérdidas en el intervalo de transición entre esquinas, es decir, $0 \leq x_{3,n} \leq \max(S_2^2, d_{corner})$, también se pueden determinar mediante interpolación entre las pérdidas en el trayecto en el punto que termina NLoS con un giro (es decir, $x_{3,n}=0$) y el punto $x_{3,n}=\max(S_2^2, d_{corner})$.

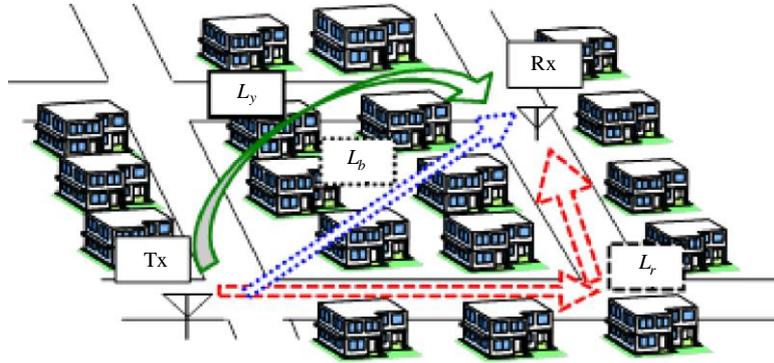
4.3.3 Modelo específico para entornos residenciales

En la Fig. 10 se describe el modelo de propagación que predice las pérdidas en todo el trayecto L entre dos terminales de baja altura en entornos residenciales, como se representa en la ecuación (71) utilizando pérdidas en el trayecto a lo largo de una calle L_r , las pérdidas en el trayecto entre casas L_b , y las pérdidas de transmisión básicas por encima de los tejados L_v . Los valores L_r , L_b y L_v se calculan, respectivamente, mediante las ecuaciones (72)-(74), (75), y (76)-(81). Las zonas aplicables son las regiones LoS y NLoS que tienen zonas con dos o más esquinas. Las pérdidas en el trayecto a lo largo de la calle L_r predominan a distancias relativamente cerca del transmisor, donde sólo hay unas pocas esquinas, mientras que las pérdidas en el trayecto entre casas L_b son predominantes a medida que aumenta la distancia entre terminales, ya que L_r aumenta con el número de esquinas. Las pérdidas de transmisión básicas por encima de los tejados L_v se convierte en predominante a distancias relativamente lejanas del trasmisor, donde L_b aumenta debido al apantallamiento múltiple de edificios y casas.

Este modelo se recomienda para frecuencias comprendidas en la gama 2-26 GHz. La distancia máxima entre terminales d es de 1 000 m. El ángulo aplicable a la carretera oscila de 0-90 grados. La gama aplicable a la altura de la antena del terminal es de 1,2 m a h_{Bmin} , siendo h_{Bmin} la altura del edificio más bajo en la zona (normalmente unos 6 m para una vivienda unifamiliar en una zona residencial).

FIGURA 10

Modelo de propagación para trayectos entre terminales a una altura inferior a la de los tejados



P.1411-10

$$L = -10 \log(1/10^{(L_r/10)} + 1/10^{(L_b/10)} + 1/10^{(L_y/10)}) \quad (71)$$

$$L_r = \begin{cases} L_{rbc} & (\text{antes de la esquina}) \\ L_{rac} & (\text{después de la esquina}) \end{cases} \quad (72)$$

$$L_{rbc} = 20 \log(4\pi d / \lambda) \quad (73)$$

$$L_{rac} = L_{rbc} + \sum_i (7,18 \log(\theta_i) + 0,97 \log(f) + 6,1) \cdot \left\{ 1 - \exp(-3,72 \cdot 10^{-5} \theta_i x_{1i} x_{2i}) \right\} \quad (74)$$

$$L_b = 20 \log(4\pi d / \lambda) + 30,6 \log(d / R) + 6,88 \log(f) + 5,76 \quad (75)$$

$$L_y = 20 \log(4\pi d / \lambda) + L_1 + L_2 + L_c \quad (76)$$

$$L_1 = 6,9 + 20 \log\left(\sqrt{(v_1 - 0,1)^2 + 1} + v_1 - 0,1\right) \quad (77)$$

$$L_2 = 6,9 + 20 \log\left(\sqrt{(v_2 - 0,1)^2 + 1} + v_2 - 0,1\right) \quad (78)$$

$$v_1 = (h_{bTx} - h_{Tx}) \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)} \quad (79)$$

$$v_2 = (h_{bRx} - h_{Rx}) \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right)} \quad (80)$$

$$L_c = 10 \log \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right] \quad (81)$$

Los parámetros pertinentes de este modelo son:

- d : distancia entre dos terminales (m)
- λ : longitud de onda (m)
- f : frecuencia (GHz)
- θ_i : ángulo en la calle con la i -ésima esquina (grados)

- x_{1i} : distancia en la calle del transmisor a la i -ésima esquina (m)
- x_{2i} : distancia en la calle de la i -ésima esquina al receptor (m)
- R : distancia visible media (m)
- h_{bTx} : altura del edificio más cercano desde el transmisor en la dirección del receptor (m)
- h_{bRx} : altura del edificio más cercano desde el receptor en la dirección del transmisor (m)
- h_{Tx} : altura de la antena del transmisor (m)
- h_{Rx} : altura de la antena del receptor (m)
- a : distancia entre el transmisor y el edificio más cercano desde el transmisor (m)
- b : distancia entre los edificios más cercanos del transmisor al receptor (m)
- c : distancia entre el receptor y el edificio más cercano desde el receptor (m).

Las Figs. 11 y 12 siguientes describen respectivamente la geometría y los parámetros. La distancia visible media R se calcula mediante las ecuaciones (82)-(85). En estas ecuaciones, n es la densidad de edificios (edificios/km²), m es la altura media de los edificios de menos de tres plantas (m), l es la altura del edificio más bajo, que suele ser de 6 (m) y l_3 es la altura de un edificio de tres plantas, que normalmente es de 12 (m).

$$R = \frac{1\ 000\gamma}{nw_p(1-e^{-\gamma})} \exp\left[\frac{h_{Rx}-l}{m-l}\right] \quad (82)$$

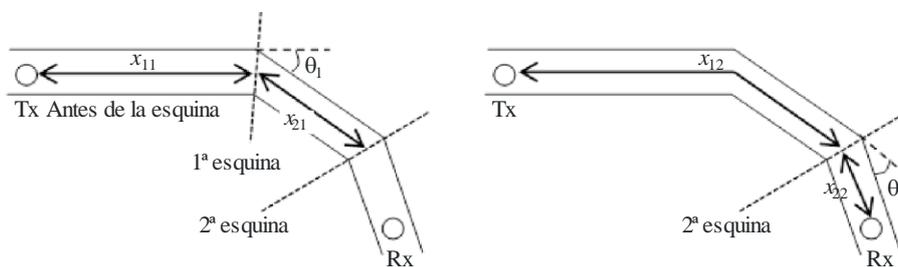
$$w_p = \frac{4}{\pi} w_0 \left\{ 1 - \frac{\alpha(1-e^{-\delta\gamma})}{\delta^2(1-e^{-\gamma})} \exp[-\beta h_{Rx}] \right\} \quad (83)$$

$$\gamma = \frac{l_3 - h_{Rx}}{m - l}, \quad \delta = 1 + \beta(m - l) \quad (84)$$

$$w_0 = 15 [m], \quad \alpha = 0,55, \quad \beta = 0,18 [m^{-1}] \quad (85)$$

FIGURA 11

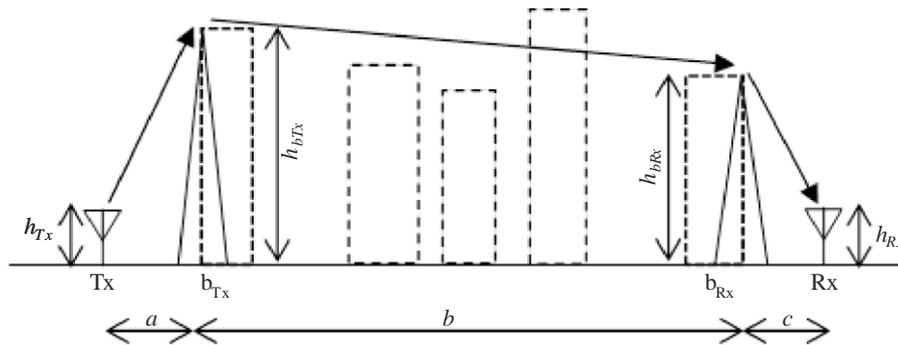
Geometría de calles y parámetros (ejemplo de dos esquinas)



P.1411-11

FIGURA 12

Vista lateral de la geometría de edificios y parámetros



P.1411-12

4.4 Parámetros por defecto para los cálculos de un emplazamiento general

Si no se conocen los datos sobre la estructura de los edificios y las avenidas (situaciones de emplazamiento general), se recomiendan los valores por defecto siguientes:

$$h_r = 3 \times (\text{número de pisos}) + \text{altura del tejado (m)}$$

altura del tejado = 3 m para tejados con inclinación

= 0 m para azoteas planas

$$w = b/2$$

$$b = 20 \text{ a } 50 \text{ m}$$

$$\varphi = 90^\circ.$$

4.5 Pérdidas adicionales

4.5.1 Influencia de la vegetación

Los efectos de la vegetación (principalmente los árboles) en la propagación son importantes para las predicciones de los trayectos cortos en exteriores. Pueden identificarse dos mecanismos principales de propagación:

- propagación a través de los árboles (no alrededor ni por encima);
- propagación sobre los árboles.

El primer mecanismo predomina para las geometrías en las que ambas antenas están por debajo de la copa de los árboles y la distancia a través de ellas es pequeña, mientras que el segundo predomina para aquellas geometrías en las que una antena está por encima de las copas de los árboles. La atenuación resulta muy afectada por la dispersión multitrayecto debida a la difracción de la energía de la señal sobre las estructuras de los árboles y a través de éstas. Para la propagación a través de los árboles, la Recomendación UIT-R P.833 indica la atenuación específica en la vegetación. Para las situaciones en que la propagación se efectúa sobre los árboles, la difracción es el modo principal de propagación sobre los flancos de los árboles que están más próximos a la antena baja. Puede establecerse en forma sencilla un modelo de este modo de propagación utilizando un modelo de propagación ideal en filo de cuchillo (véase la Recomendación UIT-R P.526), aunque con este modelo se puede subestimar la intensidad de campo, porque no tiene en cuenta la dispersión múltiple que producen las copas de los árboles, mecanismo del que puede establecerse un modelo mediante la teoría de transferencia de radiación.

4.5.2 Pérdidas de entrada a los edificios

Deben considerarse las pérdidas de entrada en el edificio al evaluar la cobertura radioeléctrica entre un sistema exterior y un terminal interior. También es importante la consideración de los problemas de interferencia entre los sistemas exteriores y los interiores.

En las Recomendaciones UIT-R P.2109 y UIT-R P.2040 figuran definiciones, modelos teóricos y resultados empíricos.

5 Modelos multitrayecto

La Recomendación UIT-R P.1407 ofrece una descripción de la propagación multitrayecto y la definición de términos.

5.1 Perfil de retardo

5.1.1 Dispersión del retardo en entornos de propagación por encima de los tejados

Se han obtenido las características de la dispersión del retardo multitrayecto para los casos LoS y NLoS en un entorno urbano de construcciones altas para microcélulas (como se definen en el Cuadro 3), sobre la base de datos medidos en las bandas 1 920-1 980 MHz, 2 110-2 170 MHz y 3 650-3 750 MHz utilizando antenas omnidireccionales. El valor eficaz mediano de la dispersión del retardo S en este entorno, está dado por:

$$S_u = \exp(A \cdot L + B) \quad \text{ns} \quad (86)$$

donde A y B son coeficientes del valor eficaz de la dispersión del retardo y L es la pérdida de transmisión básica (dB). En el Cuadro 10 se pueden ver los coeficientes típicos para distancias de 100 m a 1 km basados en mediciones realizadas en zonas urbanas.

CUADRO 10

Coefficientes típicos del valor eficaz de la dispersión del retardo

Condiciones de medición			Coeficientes del valor eficaz de la dispersión del retardo	
Zona	Frecuencia (MHz)	Alcance (m)	A	B
Urbana	3 650-3 750	100-1 000	0,031	2,091
	1 920-1 980, 2 110-2 170	100-1 000	0,038	2,3

Las distribuciones de las características del retardo multitrayecto para la banda de 3,7 GHz se obtuvieron mediante mediciones en un entorno urbano con antenas de la Estación 1 de 40 y 60 m de altura y una antena de la Estación 2 de 2 m. Las distribuciones de las características del retardo multitrayecto para las bandas de 3,7 GHz y 5,2 GHz se obtuvieron mediante mediciones en un entorno suburbano con una antena de la Estación 1 de 20 m de altura y antenas de la Estación 2 de 2,0 m y 2,8 m de altura. En el Cuadro 11 se enumeran los valores medidos de la dispersión eficaz de retardo para las bandas de 1,9 GHz y 73 GHz en los casos donde la probabilidad acumulativa es del 50% y del 95%. A menos que se indique lo contrario, para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo se ha utilizado un nivel umbral de 20 dB.

CUADRO 11

Típicos valores eficaces de la dispersión del retardo

Condiciones de la medición										Valor eficaz de la dispersión del retardo (ns)	
Zona	Caso	f (GHz)	h_1 (m)	h_2 (m)	Alcance (m)	Ancho del haz Tx (grados)	Ancho del haz Rx (grados)	Resolución del retardo temporal (ns)	Polarización	50%	95%
Urbana de construcción muy alta	LoS	2,5	100	2	100-1 000	ULA ⁽⁴⁾	UCA ⁽⁵⁾	10	VV	208 ⁽¹⁾	461 ⁽¹⁾
	NLoS	2,5	100	2	100-1 000	ULA ⁽⁴⁾	UCA ⁽⁵⁾	10	Dual ⁽⁶⁾	407 ⁽¹⁾	513 ⁽¹⁾
Urbana de construcción alta	LoS	3,7	60	2	100-1 000	omni	omni	10	VV	232 ⁽¹⁾	408 ⁽¹⁾
			40	2	100-1 000	omni	omni	10	VV	121 ⁽¹⁾	357 ⁽¹⁾
		25,5-28,5	20	1,6	54-142	33	omni	0,5	VV	2,2 ⁽²⁾	6,9 ⁽²⁾
									HV	9,8 ⁽²⁾	28,1 ⁽²⁾
		51-57	18,2	1,6	50-180	56,3	18,4	0,5	VV/HH	1,6 ⁽²⁾	40,2 ⁽²⁾
									VH/HV	2,7 ⁽²⁾	37,9 ⁽²⁾
	VV/HH								7,5 ⁽³⁾	92,1 ⁽³⁾	
	67-73	18,2	1,6	50-180	40	14,4	0,5	VH/HV	4,8 ⁽³⁾	81,9 ⁽³⁾	
								VV/HH	1,7 ⁽²⁾	31,3 ⁽²⁾	
								VV/HH	6 ⁽³⁾	78,7 ⁽³⁾	
	NLoS	67-73	20	1,6	54-142	40	omni	0,5	VV	2	9,8
		1,9-2,1	46	1,7	100-1 000	omni	omni	16,6	VV	490 ⁽¹⁾	1490 ⁽¹⁾
NLoS	25,5-28,5	20	1,6	61-77	33	omni	0,5	VV	74,5	159,1	
	Suburbana	LoS	2,5	12	1	200-1 000	30	omni	100	VV	158
3,5			12	1	200-1 000	30	omni	100	VV	161	493
3,7			20	2	100-1 000	omni	omni	10	VV	125 ⁽¹⁾	542 ⁽¹⁾
5,2			20	2,8	100-1 000	omni	omni	18,3	VV	189 ⁽¹⁾	577 ⁽¹⁾
5,8			12	1	200-1 000	120	omni	100	VV	168	415

⁽¹⁾ Se utiliza un valor umbral de 30 dB para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo.

⁽²⁾ La antena receptora rota 360 grados. Se indican los valores de cuando el eje de puntería de la antena receptora está alineado en dirección del transmisor.

⁽³⁾ La antena receptora rota 360 grados en intervalos de 5 grados. El valor representa una dispersión del retardo direccional cuando el eje de puntería de la antena receptora no está alineado en dirección del transmisor.

⁽⁴⁾ Sistema de antenas lineal uniforme.

⁽⁵⁾ Sistema de antenas circular uniforme.

⁽⁶⁾ Valor medio de VV, VH, HV y HH.

5.1.2 Dispersión del retardo en entornos de propagación por debajo de la altura de los tejados

5.1.2.1 Caso de antena omnidireccional

Se han obtenido las características de la dispersión del retardo multitrayecto para el caso de antena omnidireccional LoS en un entorno urbano y en un entorno residencial de construcciones altas para microcélulas urbanas densas y picocélulas (como se definen en el Cuadro 3) sobre la base de datos medidos a frecuencias comprendidas entre 0,781 y 28,5 GHz. El valor eficaz de la dispersión del retardo, S , a una distancia de d m sigue una distribución normal con un valor medio dado por:

$$a_s = C_a d^{\gamma_a} \quad \text{ns} \quad (87)$$

y una desviación típica que viene dada por:

$$\sigma_s = C_\sigma d^{\gamma_\sigma} \quad \text{ns} \quad (88)$$

donde C_a , γ_a , C_σ y γ_σ dependen de la altura de la antena y del entorno de propagación. El Cuadro 12 enumera algunos valores típicos de los coeficientes para distancias comprendidas entre 50 y 400 m basados en mediciones efectuadas en zonas urbanas y residenciales. Los valores de los coeficientes a 28,5 GHz se tomaron de las mediciones realizadas a distancias de 5-38 m en una zona residencial.

CUADRO 12

Coefficientes típicos para las características de distancia del valor eficaz de la dispersión del retardo en casos de antena omnidireccional

Condiciones de medición				a_s		σ_s	
Zona	f (GHz)	h_1 (m)	h_2 (m)	C_a	γ_a	C_σ	γ_σ
Urbana ⁽¹⁾	0,781	5	5	1 254,3	0,06	102,2	0,04
Urbana ⁽²⁾	2,5	6,0	3,0	55	0,27	12	0,32
	3,35-15,75	4,0	2,7	23	0,26	5,5	0,35
			1,6	10	0,51	6,1	0,39
	3,35-8,45	0,5					
8,05	5	2,5	0,97	0,78	1,42	0,52	
Residencial ⁽²⁾	3,35	4,0	2,7	2,1	0,53	0,54	0,77
	3,35-15,75		1,6	5,9	0,32	2,0	0,48
Residencial ⁽³⁾	28,5	2,5	1,6	3,58	0,68	0,17	0,42

- (1) Se utiliza un valor umbral de 20 dB para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo.
- (2) Se utiliza un valor umbral de 30 dB para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo.
- (3) Se utiliza un valor umbral de 25 dB para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo.

De los datos medidos a 2,5 GHz, se vio que la forma media del perfil de retardo era:

$$P(t) = P_0 + 50(e^{-t/\tau} - 1) \quad \text{dB} \tag{89}$$

donde:

- P_0 : potencia de cresta (dB)
- τ : factor de disminución

y t se expresa en ns.

De los datos medidos, puede estimarse τ para un valor eficaz de la dispersión del retardo, S :

$$\tau = 4 S + 266 \quad \text{ns} \tag{90}$$

Una relación lineal entre τ y S sólo es válida para el caso de LoS.

A partir del mismo conjunto de mediciones se han podido caracterizar también las propiedades instantáneas del perfil de retardo. La energía que llega en los primeros 40 ns tiene una distribución de Rice con un factor K de 6 a 9 dB, aproximadamente, mientras que la energía que llega más tarde tiene una distribución de Rayleigh o de Rice con un factor K de hasta unos 3 dB. (Véase la Recomendación UIT-R P.1057 para las definiciones de distribuciones de probabilidad.)

5.1.2.2 Caso de antena direccional

En sistemas de acceso inalámbrico fijo y comunicaciones entre los puntos de acceso de sistemas de red inalámbrica en malla, las antenas direccionales se emplean como antenas transmisoras y receptoras. A continuación se presenta un efecto típico de la utilización de antenas direccionales. El patrón de entrada suprime las ondas de llegada con retardo utilizando antenas direccionales como antenas transmisoras y receptoras. En consecuencia, la dispersión del retardo se reduce. Además, la potencia recibida aumenta con la ganancia de antena si se emplean antenas direccionales como antenas transmisoras y receptoras. Por estos motivos, los sistemas inalámbricos emplean antenas direccionales. En consecuencia, es importante entender el efecto de la directividad de la antena en modelos multitrayecto.

Cabe esperar que los sistemas de radiocomunicaciones en ondas milimétricas utilicen antenas direccionales con polarización única o doble. En el Cuadro 13 figuran los valores eficaces de la dispersión del retardo obtenidos entre 25 y 73 GHz utilizando antenas con polarización doble o una única antena polarizada en la Estación 1 y en la Estación 2. Para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo se utilizó un valor umbral de 20 dB.

CUADRO 13
Valores eficaces típicos de la dispersión del retardo

Condiciones de la medición										Valor eficaz de la dispersión del retardo (ns)	
Zona	Caso	f (GHz)	h_1 (m)	h_2 (m)	Distancia (m)	Ancho del haz Tx (grados)	Ancho del haz Rx (grados)	Resolución del retardo (ns)	Polarización	50%	95%
Urbana de construcciones bajas	LoS	25,5-28,5	3	1,6	18-140	33	Omni	0,5	VV	3,5	43,6
									HV	8,7	57
		28	4	1,5	100-400	30	10	2	VV	1,9 ⁽¹⁾	5,9 ⁽¹⁾
									VV/HH	1,5 ⁽¹⁾	5 ⁽¹⁾
		29,3-31,5	3	1,3	6-60	35	35	0,45	VH/HV	6 ⁽¹⁾	14,3 ⁽¹⁾
									VV	1,2 ⁽¹⁾	4,8 ⁽¹⁾
		38	4	1,5	50-400	30	10	2	VV/HH	0,74 ⁽¹⁾	3 ⁽¹⁾
									VH/HV	1,7 ⁽¹⁾	7,5 ⁽¹⁾
									VV/HH	11,2 ⁽²⁾	72,9 ⁽²⁾
									VH/HV	8,5 ⁽²⁾	40,9 ⁽²⁾
		51-57	3	1,6	11-180	56,3	18,4	0,5	VV	0,6 ⁽¹⁾	1,2 ⁽¹⁾
									VV	6,6 ⁽²⁾	40,7 ⁽²⁾
		58,7-63,1	2,4	1,5	20-200	15,4	15,4	0,22	VV/HH	0,6 ⁽¹⁾	3,5 ⁽¹⁾
									VH/HV	1,6 ⁽¹⁾	5,9 ⁽¹⁾
		67-73	3	1,6	11-180	40	14,4	0,5	VV/HH	8,9 ⁽²⁾	80 ⁽²⁾
									VH/HV	5 ⁽²⁾	39,8 ⁽²⁾
	VV								2,6	36	
	VV								2,6	36	
	NLoS	25,5-28,5	3	1,6	40-84	33	Omni	0,5	VV	13,4	30,3
									VV	48,5 ⁽³⁾	112,4 ⁽³⁾
VV									25,9 ⁽³⁾	75,0 ⁽³⁾	
VV									10	23,7	

CUADRO 13 (fin)

Condiciones de la medición										Valor eficaz de la dispersión del retardo (ns)	
Zona	Caso	f (GHz)	h ₁ (m)	h ₂ (m)	Distancia (m)	Ancho del haz Tx (grados)	Ancho del haz Rx (grados)	Resolución del retardo (ns)	Polarización	50%	95%
Residencial	NLoS	25,5-28,5	3	1,6	37-167	33	Omni	0,5	VV	5,3	13,6
		67-73	3	1,6	37-167	40	Omni	0,5	HV	9,1	15,5
Urbana de construcciones muy altas	LoS	28	4	1,5	50-350	30	10	2	VV	1,7 ⁽¹⁾	7,8 ⁽¹⁾
		38	4	1,5	20-350	30	10	2	VV	1,6 ⁽¹⁾	7,4 ⁽¹⁾
	NLoS	28	4	1,5	90-350	30	10	2	VV	67,2 ⁽³⁾	177,9 ⁽³⁾
		38	4	1,5	90-350	30	10	2	VV	57,9 ⁽³⁾	151,6 ⁽³⁾

- ⁽¹⁾ La antena receptora rota a 360 grados en la medición. El valor representa la dispersión del retardo direccional cuando el eje de puntería de la antena receptora está alineado en dirección del transmisor.
- ⁽²⁾ La antena receptora rota a 360 grados en intervalos de 5 grados en la medición. El valor representa la dispersión del retardo direccional cuando el eje de puntería de la antena receptora no está alineado en dirección del transmisor.
- ⁽³⁾ La antena receptora rota a 360 grados en la medición. El valor representa la dispersión del retardo direccional independientemente del alineamiento de la antena.

5.1.3 Dispersión del retardo en la propagación entre terminales situados a nivel de calle

Las características multitrayecto de la dispersión del retardo entre terminales situados a nivel de calle se han obtenido a partir de los datos medidos. En el Cuadro 14 se indican los valores eficaces de la dispersión del retardo medidos para casos en los que la probabilidad acumulativa es del 50% y 95%. La distribución de las características multitrayecto del retardo para los casos LoS y NLoS a distancias de 1 a 250 m se han obtenido a partir de las medidas tomadas en zonas urbanas de construcciones muy altas, altas y bajas en la banda de frecuencias de 3,7 GHz.

CUADRO 14

Valores eficaces característicos de la dispersión del retardo

Condiciones de medida						Dispersión del retardo, valor eficaz (ns)	
Zona	Caso	Frecuencia (GHz)	Altura de antena		Gama (m)	50%	95%
			h ₁ (m)	h ₂ (m)			
Urbana de construcciones muy altas ⁽¹⁾	LoS	3,7	1,9	1,9	1-250	29	87
	NLoS					247	673
Urbana de construcciones altas ⁽¹⁾	LoS					24	153
	NLoS					145	272
Urbana de construcciones bajas ⁽¹⁾	LoS					15	131
	NLoS					64	89

- ⁽¹⁾ Se ha utilizado un valor umbral de 20 dB para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo.

5.2 Perfil angular

5.2.1 Distribución angular para entornos de propagación por debajo de la altura de los tejados

El valor eficaz de la dispersión angular, tal como se define en la Recomendación UIT-R P.1407 en la dirección de acimut en un entorno de microcélula urbana densa o de picocélula en una zona urbana, se obtuvo mediante mediciones efectuadas en la frecuencia de 8,45 GHz. La estación de base receptora tenía una antena parabólica con una anchura de haz a potencia mitad de 4 grados.

También se efectuaron mediciones en un entorno de microcélula urbana densa en una zona urbana. Los coeficientes de dispersión angular se basan en las mediciones realizadas en zonas urbanas para distancias de 10~1 000 m en situaciones de visibilidad directa y a una frecuencia de 0,781 GHz. Para calcular el perfil angular se emplea un sistema lineal de antenas omnidireccionales de cuatro elementos junto con el método de Bartlett para la conformación de haces.

También se efectuaron mediciones en entorno urbano de construcciones bajas y en entorno residencial con condiciones LoS y NLoS a 28,5 GHz. Se obtuvieron los coeficientes del valor eficaz de la dispersión angular en la dirección de acimut y la dirección de elevación.

En el Cuadro 15 se muestran los coeficientes del valor eficaz medio de la dispersión angular que se obtuvieron.

CUADRO 15

Valores eficaces característicos de la dispersión angular

Condiciones de medición				Media (grados)	Desviación típica (grados)	Observaciones
Zona	f (GHz)	h_1 (m)	h_2 (m)			
Urbana	0,781	5	1,5	28,15 ⁽¹⁾	13,98	LoS
Urbana	8,45	4,4	2,7	30 ⁽¹⁾	11	LoS
Urbana	8,45	4,4	2,7	41 ⁽¹⁾	18	NLoS
Urbana	28,5	2,5	1,6	28,48 ⁽¹⁾ 5,15 ⁽²⁾	8,68 1,93	LoS
Urbana	28,5	2,5	1,6	33,05 ⁽¹⁾ 6,31 ⁽²⁾	10,52 2,84	NLoS
Residencial	28,5	2,5	1,6	20,47 ⁽¹⁾ 7,61 ⁽²⁾	7,18 8,31	LoS

⁽¹⁾ Dispersión angular en la dirección de acimut.

⁽²⁾ Dispersión angular en la dirección de elevación.

5.2.2 Dispersión angular en la propagación entre terminales situados a nivel de calle

Las características multitrayecto de la dispersión angular entre terminales situados a nivel de calle se han obtenido a partir de los datos medidos. En el Cuadro 16 se indican los valores eficaces de la dispersión angular medidos para casos en los que la probabilidad acumulativa es del 50% y 95%. La distribución de las características acimutales multitrayecto para los casos LoS y NLoS a distancias de 1 a 250 m se han obtenido a partir de las medidas tomadas en zonas urbanas de construcciones muy altas, altas y bajas en la banda de frecuencias de 3,7 GHz. A fin de obtener el perfil angular, se utilizó un sistema de antenas circular uniforme de ocho elementos, tanto en el transmisor como en el receptor.

CUADRO 16
Valores eficaces característicos de la dispersión angular

Condiciones de medida						Dispersión angular, valor eficaz (grados)	
Zona	Caso	Frecuencia (GHz)	Altura de antena		Gama (m)	50%	95%
			h_1 (m)	h_2 (m)			
Urbana de construcciones muy altas ⁽¹⁾	LoS	3,7	1,9	1,9	1-250	17	46
	NLoS					31	50
Urbana de construcciones altas ⁽¹⁾	LoS					12	37
	NLoS					33	61
Urbana de construcciones bajas ⁽¹⁾	LoS					12	40
	NLoS					25	55

⁽¹⁾ Se ha utilizado un valor umbral de 20 dB para calcular el valor eficaz de la dispersión angular.

5.3 Efecto del ancho de haz de la antena

Cabe esperar que los sistemas de radiocomunicaciones por ondas milimétricas utilicen antenas muy direccionales y/o diversas técnicas de conformación del haz con grandes sistemas de antenas para superar pérdidas de propagación relativamente elevadas y establecer enlaces de comunicación fiables. Como los componentes de la propagación por trayectos múltiples tienen ángulos de incidencia diferentes, los componentes que quedan fuera del ancho del haz de las antenas se filtran espacialmente si se utilizan antenas direccionales, a fin de reducir la dispersión del retardo y la dispersión angular.

5.3.1 Pérdida de potencia recibida debida al ancho de haz de la antena

Cuando las señales se reciben con un determinado ancho de haz de antena, el número de componentes de la señal multitrayecto se reduce en comparación con el de una antena receptora omnidireccional, lo que genera una pérdida de potencia adicional que puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$L^{\text{beamforming}}(d, f, W_\phi) = L^{\text{omni}}(d, f) + \Delta L(W_\phi) \quad (\text{dB}) \quad (91)$$

Siendo L^{omni} una pérdida de transmisión básica omnidireccional y donde ΔL puede calcularse así:

$$\Delta L(W_\phi) = \eta \left(\frac{1}{W_\phi} - \frac{1}{360^\circ} \right) \quad (\text{dB}), \quad 10^\circ \leq W_\phi \leq 360^\circ \quad (92)$$

Siendo W_ϕ el ancho de haz a potencia mitad (HPBW) de una antena dirección (conformación del haz). En el Cuadro 17 se indican los valores de η , que se obtienen de las mediciones realizadas a 28 GHz y 38 GHz en entornos urbanos con construcciones altas.

CUADRO 17

Constante η para la pérdida de potencia adicional debida a la conformación de haces con ancho W_ϕ

Entorno	Frecuencia (GHz)	Tipo de enlace	η
Urbano con construcciones altas	28	LOS	17,70
		NLOS	64,03
	38	LOS	16,44
		NLOS	46,49

5.3.2 Características de la dispersión del retardo y la dispersión angular

Las características de dispersión del retardo multitrayecto para casos de antena directiva LoS en un entorno urbano de construcción alta para microcélulas y picocélulas urbanas densas (de acuerdo con la definición que figura en el Cuadro 3) se elaboraron a partir de los datos medidos en la banda de 5,2 GHz a distancias de 10 a 500 m. Las antenas se configuraron de modo que la dirección de la ganancia máxima de una de las antenas estaba orientada hacia la otra. En el Cuadro 18 se presenta la ecuación para calcular los coeficientes relativos a la abertura del haz a potencia mitad de la antena para la fórmula (87) para distancias de 10 a 500 m en una zona urbana. Estas ecuaciones dependen únicamente de la abertura del haz a potencia mitad de la antena y son efectivas para cualquier anchura de la vía.

CUADRO 18

Coefficientes típicos para las características de distancia del valor eficaz de la dispersión del retardo en casos de antena directiva

Condiciones de medición				a_s	
Zona	f (GHz)	h_1 (m)	h_2 (m)	C_a	γ_a
Urbana	5,2	3,5	3,5	$9,3 + 1,5\log(\theta)$	$3,3 \times 10^{-2} + 4,6\theta \times 10^{-2}$

NOTA 1 – Se utiliza un valor umbral de 20 dB para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo.

Aquí, θ representa la abertura del haz a potencia mitad de la antena de la antena transmisora y de la receptora en radianes. Nótese que θ debe tener un valor de 2π cuando se aplica la antena omnidireccional tanto a la antena transmisora como a la receptora.

Los métodos de predicción del retardo por trayectos múltiples y la dispersión angular con respecto al ancho del haz de la antena se han definido a partir de mediciones en entornos urbanos y residenciales típicos a 28, 28,5 y 38 GHz. Para calcular la dispersión angular y del retardo a partir de anchos de haz de antena estrechos y anchos, se combinaron en los dominios de potencia, retardo y ángulo las respuestas impulsivas de canal obtenidas mediante un sistema de antenas de bocina o rotando una antena de bocina de haz estrecho.

El valor eficaz de la dispersión del retardo, DS , depende del ancho de haz a potencia mitad de la antena θ (grados):

$$DS(\theta) = \alpha \times \log_{10} \theta \quad \text{ns} \quad (93)$$

donde α es un coeficiente del valor eficaz de la dispersión del retardo y la gama de θ se define como $1^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$. En el Cuadro 19 se indican los valores típicos de los coeficientes y la desviación típica, σ , en función de cada condición de la medición. Los coeficientes de la dispersión del retardo representan los casos en que los ejes de puntería de las antenas estaban alineados para lograr la potencia receptora máxima en los casos LoS y NLoS, respectivamente.

CUADRO 19

Coefficientes típicos para el valor eficaz de la dispersión del retardo

Condiciones de la medición								Coeficientes del valor eficaz de la dispersión del retardo	
f (GHz)	Entorno	Caso	h_1 (m)	h_2 (m)	Alcance (m)	Ancho del haz Tx (grados)	Ancho del haz Rx (grados)	α	σ (ns)
28	Urbano con construcciones bajas	LoS	4	1,5	20-400	30	10 ⁽²⁾	2,32 ⁽¹⁾	5,83
		NLoS			20-300			35,1 ⁽¹⁾	43
	Urbano con construcciones muy altas	LoS			40-300			3,67 ⁽¹⁾	7,07
		NLoS			80-340			43,19 ⁽¹⁾	38,62
28,5	Urbano con construcciones bajas	LoS	2,5	1,6	6-26	omni	45 ⁽³⁾	5,64	3,28
		NLoS			58-112			12,13	4,55
	Residencial	LoS			5-38			3,98	2,47
38	Urbano con construcciones bajas	LoS	4	1,5	20-400	30	10 ⁽²⁾	2,14 ⁽¹⁾	7,3
		NLoS			20-200			30,01 ⁽¹⁾	35,51
	Urbano con construcciones muy altas	LoS			20-340			1,61 ⁽¹⁾	3,15
		NLoS			80-210			26,93 ⁽¹⁾	27,95

(1) El valor es válido cuando el rango de θ es $10^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$.

(2) La antena de bocina de 10 grados se rotó alrededor de 360 grados en el receptor.

(3) En el receptor se utilizó un sistema de 16 antenas de bocina, cada una de ellas con un ancho de haz acimutal de 45° .

El valor eficaz de la dispersión angular, AS , depende del ancho de haz de potencia mitad de la antena θ (grados):

$$AS(\theta) = \alpha \times \theta^\beta \quad \text{grados} \quad (94)$$

donde α y β son coeficientes del valor eficaz de la dispersión angular y la gama de θ se define como $10^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$. En el Cuadro 20 se indican los valores típicos de los coeficientes y la desviación típica, σ , en función de cada condición de la medición. Los coeficientes de la dispersión angular representan los casos en que los ejes de puntería de las antenas están alineados para obtener la máxima potencia receptora en los casos LoS y NLoS, respectivamente.

CUADRO 20

Coeficientes típicos para el valor eficaz de la dispersión angular

Condiciones de la medición								Coeficientes para el valor eficaz de la dispersión angular		
f (GHz)	Entorno	Caso	h_1 (m)	h_2 (m)	alcance (m)	Ancho del haz Tx (grados)	Ancho del haz Rx (grados)	α	β	σ (grados)
28	Urbano con construcciones bajas	LoS	4	1,5	20-400	30	10 ⁽¹⁾	1,84	0,39	2,1
		NLoS			20-300			0,42	0,84	3,42
	Urbano con construcciones muy altas	LoS			40-300			1,98	0,34	1,45
		NLoS			80-340			0,38	0,89	2,47
38	Urbano con construcciones bajas	LoS	4	1,5	20-400	30	10 ⁽¹⁾	1,76	0,36	1,5
		NLoS			20-200			0,33	0,91	3,39
	Urbano con construcciones muy altas	LoS			20-340			1,7	0,38	1,95
		NLoS			80-210			0,23	1,03	3,3

⁽¹⁾ La antena de bocina de 10 grados se rotó alrededor de 360 grados en el receptor.

5.4 Número de componentes de la señal

Para el diseño de los sistemas de gran velocidad binaria con separación multirayecto y técnicas de síntesis, es importante estimar el número de componentes de la señal (es decir, un componente predominante más los componentes multirayecto) que llegan al receptor. El número de componentes de la señal puede representarse partiendo del perfil de retardo, como el número de crestas cuyas amplitudes están dentro de A dB de la cresta más alta y por encima del nivel mínimo de ruido, tal como se define en la Recomendación UIT-R P.1407.

5.4.1 Entornos de propagación por encima de los tejados

El Cuadro 21 muestra los resultados correspondientes al número de componentes de la señal, para entornos de propagación por encima de los tejados, obtenidos a partir de mediciones efectuadas para casos diferentes en relación con el tipo de entornos, las bandas de frecuencias y las alturas de la antena.

CUADRO 21

Número máximo de componentes de la señal para entornos por encima de los tejados

Tipo de entorno	Resolución del retardo temporal (ns)	Frecuencia (GHz)	Altura de la antena (m)		Alcance (m)	Número máximo de componentes					
			h_1	h_2		3 dB		5 dB		10 dB	
						80%	95%	80%	95%	80%	95%
Urbano	200	1,9-2,1	46	1,7	100-1 600	1	2	1	2	2	4
	20	3,35	55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	13
	20	8,45	55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	12
Suburbano	175	2,5	12	1	200-1 500	1	2	1	2	2	4
	175	3,5	12	1	200-1 500	1	2	1	2	1	5
	50	3,67	40	2,7	0-5 000	1	2	1	3	3	5
	100	5,8	12	1	200-1 500	1	2	3	5	4	5

Con respecto a las mediciones descritas en el § 5.1.1, en el Cuadro 22 se facilita la ventana de retardo temporal diferencial para los cuatro componentes principales con respecto al primer componente de llegada y su amplitud relativa.

CUADRO 22

Ventana de retardo temporal diferencial para los cuatro componentes principales con respecto al primer componente de llegada y su amplitud relativa

Tipo de entorno	Resolución del retardo temporal	Frecuencia (GHz)	Altura de la antena (m)		Alcance (m)	Exceso de retardo temporal (μ s)							
			h_1	h_2		1°		2°		3°		4°	
						80%	95%	80%	95%	80%	95%	80%	95%
Urbano	200 ns	1,9-2,1	46	1,7	100-1 600	0,5	1,43	1,1	1,98	1,74	2,93	2,35	3,26
Potencia relativa con respecto al componente más sólido (dB)						0	0	-7,3	-9	-8,5	-9,6	-9,1	-9,8

5.4.2 Entornos de propagación por debajo de la altura de los tejados

El Cuadro 23 muestra los resultados correspondientes al número de componentes de la señal, para entornos de propagación por debajo de los tejados, obtenidos a partir de mediciones efectuadas para casos diferentes en relación con el tipo de entornos, las bandas de frecuencias y las alturas de la antena.

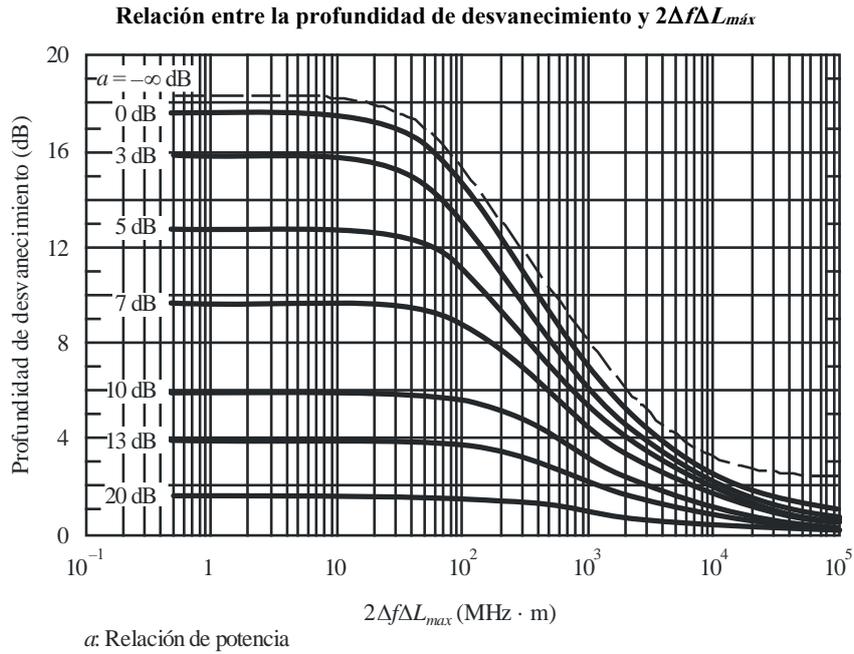
CUADRO 23
Número máximo de componentes de la señal en entornos
por debajo de la altura de los tejados

Tipo de entorno	Resolución del retardo temporal (ns)	Frecuencia (GHz)	Altura de la antena (m)		Alcance (m)	Número máximo de componentes					
			h_1	h_2		3 dB		5 dB		10 dB	
						80%	95%	80%	95%	80%	95%
Urbano	20	3,35	4	1,6	0-200	2	3	2	4	5	6
					0-1 000	2	3	2	4	5	9
	20	8,45	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	6
					0-1 000	1	2	2	4	4	8
	20	15,75	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	5
					0-1 000	2	3	2	4	6	10
Residencial	20	3,35	4	2,7	0-480	2	2	2	2	2	3

5.5 Características de desvanecimiento

La profundidad de desvanecimiento, que se define como la diferencia entre el valor del 50% y el valor del 1% de la probabilidad acumulativa de los niveles de la señal recibidos, se expresa como una función del producto ($2\Delta f\Delta L_{m\acute{a}x}$ MHz·m) de la anchura de banda recibida $2\Delta f$ MHz y la máxima diferencia en las longitudes del trayecto de propagación $\Delta L_{m\acute{a}x}$ m, tal y como se muestra en la Fig. 13. $\Delta L_{m\acute{a}x}$ es la máxima diferencia en las longitudes del trayecto de propagación entre los componentes cuyo nivel es mayor que el umbral, siendo éste 20 dB menor que el nivel más alto de las ondas indirectas, como se indica en la Fig. 14. En esta figura, a se expresa en dB y es la relación de potencia entre la suma de ondas directas y la suma de ondas indirectas; $a = -\infty$ dB representa un caso NLoS. Cuando $2\Delta f\Delta L_{m\acute{a}x}$ es menor que 10 MHz·m, los niveles de la señal recibida, en situaciones con LoS o NLoS, obedecen a las distribuciones de Rayleigh y Nakagami-Rice, lo que corresponde a una región de desvanecimiento de banda estrecha. Cuando es mayor que 10 MHz·m, corresponde a una región de desvanecimiento de banda ancha, en la que la profundidad de desvanecimiento disminuye y los niveles de la señal recibida no obedecen a las distribuciones de Rayleigh ni de Nakagami-Rice.

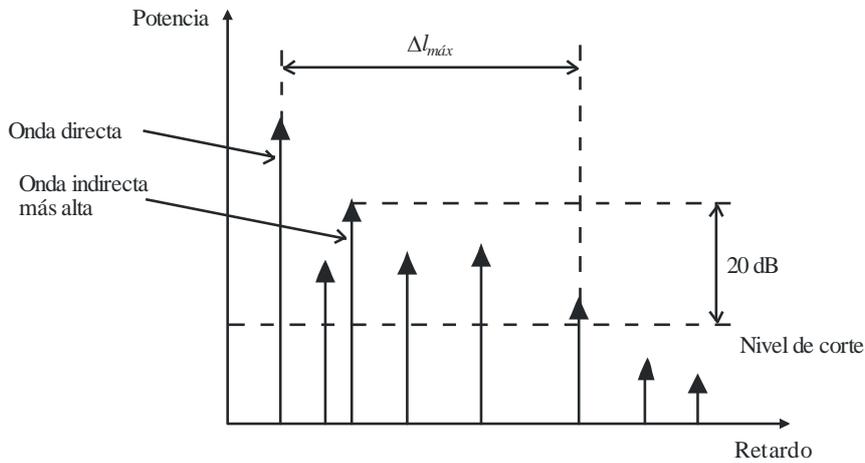
FIGURA 13



P.1411-13

FIGURA 14

Modelo para calcular $\Delta L_{m\acute{a}x}$



P.1411-14

6 Características de la polarización

La discriminación por polarización cruzada (XPD), tal como se define en la Recomendación UIT-R P.310, establece una diferencia entre zonas LoS y NLoS en un entorno microcelular urbano denso de ondas centimétricas. Las mediciones indican un valor mediano de discriminación por polarización cruzada de 13 dB para los trayectos LoS y de 8 dB para los trayectos NLoS, y una desviación típica de 3 dB para los trayectos LoS y de 2 dB para los trayectos NLoS en ondas centimétricas. Los valores XPD medianos en ondas centimétricas para zonas abiertas y urbanas son coherentes con los valores en ondas decimétricas de la Recomendación UIT-R P.1406. En el Informe UIT-R P.2406 la XPD medida para las bandas de ondas milimétricas 51-57 GHz y 67-73 GHz en un entorno urbano con construcciones bajas tiene un valor mediano de 16 dB para el

componente LoS con una varianza de 3 dB y de 9 dB en los trayectos NLoS con una varianza de 6 dB.

7 Datos de propagación y métodos de predicción para el enfoque de la morfología del trayecto

7.1 Clasificación de la morfología del trayecto

En zonas habitadas, a excepción de las zonas rurales, la morfología del trayecto para canales inalámbricos puede dividirse en 9 categorías, tal y como se muestra en el Cuadro 24. La clasificación se basa íntegramente en el entorno real de propagación de ondas, al analizar la altura de las construcciones y la distribución de la densidad para distintos emplazamientos representativos a partir de la base de datos del Sistema de Información Geográfica (GIS).

CUADRO 24

Clasificación de la morfología de los trayectos para el canal MIMO

Morfología del trayecto		Densidad
Construcción alta (por encima de 25 m)	Densidad alta (HRHD)	Por encima de 35%
	Densidad media (HRMD)	20 ~ 35%
	Densidad baja (HRLD)	Por debajo de 20%
Construcción media (12 m ~ 25 m)	Densidad alta (MRHD)	Por encima de 35%
	Densidad media (MRMD)	20 ~ 35%
	Densidad baja (MRLD)	Por debajo de 20%
Construcción baja (por debajo de 12 m)	Densidad alta (LRHD)	Por encima de 35%
	Densidad media (LRMD)	20 ~ 35%
	Densidad baja (LRLD)	Por debajo de 20%

7.2 Método de modelación estadística

Por lo general, las mediciones dan unos datos muy limitados y que no son exhaustivos. Por lo tanto, para morfologías específicas y frecuencias de funcionamiento concretas, puede emplearse el método que se expone a continuación para calcular los parámetros para el modelo del canal MIMO. Las mediciones de las características de canal para 9 morfologías típicas en la banda de 3,705 GHz han mostrado una buena concordancia estadística cuando han sido comparadas con el método de modelación.

Los modelos se definen para una situación de $h_1 > h_r$. Las definiciones de los parámetros f , d , h_r , h_1 , Δh_1 y h_2 se ofrecen en la Fig. 2, y B_d representa la densidad de la construcción. El enfoque de la morfología de los trayectos es válido para:

- f : 800 a 6 000 MHz
- d : 100 a 800 m
- h_r : 3 a 60 m
- h_1 : $h_r + \Delta h_1$
- Δh_1 : hasta 20 m
- h_2 : 1 a 3 m

B_d : 10 a 45%.

En la modelación estadística, los edificios se generan de manera totalmente aleatoria. Es bien sabido que la distribución de la altura del edificio h concuerda estadísticamente con el parámetro μ por efecto de la distribución $P(h)$ de Rayleigh.

$$P(h) = \frac{h}{\mu^2} \exp\left(\frac{-h^2}{2\mu^2}\right) \quad (95)$$

Para calcular los parámetros estadísticos de la distribución de Rayleigh para una morfología determinada, se recomienda utilizar la base de datos disponible del GIS. En lo que respecta a los emplazamientos horizontales de los edificios, puede asumirse que su distribución es uniforme.

El cálculo de la propagación por ondas se realiza para cada distribución de un edificio utilizando el método de trazado de rayos. Para la simulación, se recomienda multiplicar por quince la reflexión y por dos la difracción. También es importante la penetración en edificios. Se recomienda fijar adecuadamente el umbral de potencia del receptor para tener en cuenta dicha penetración. Para obtener los parámetros del modelo, deben llevarse a cabo simulaciones para un número suficiente de casos de cada morfología. Se recomienda multiplicar al menos por cuatro el número de casos. En cada uno de ellos, en la región de cálculo debe haber un número suficiente de receptores para que los datos obtenidos sean estadísticamente significativos. Se recomienda que haya al menos 50 receptores disponibles en cada 10 m de subintervalo de distancia. La altura de la antena de transmisión y de la antena receptora debe fijarse en unos valores adecuados. Se recomiendan unos valores de la constante dieléctrica y de la conductividad de $\epsilon_r = 7,0$, $\sigma = 0,015$ S/m para los edificios y de $\epsilon_r = 2,6$, $\sigma = 0,012$ S/m para los suelos.

En el Cuadro 25 se proporcionan los valores de los parámetros para casos típicos de distribución de la altura de la construcción. El tamaño de los edificios es de 30×20 m², 25×20 m², y 20×20 m² para las construcciones altas, medias y bajas, y su densidad, del 40%, 30%, y 20% para las densidades alta, media y baja.

CUADRO 25

**Parámetros de la distribución de la altura de las construcciones
para la modelación estadística**

Morfología del trayecto	Parámetro μ de Rayleigh	Intervalo de distribución de la altura de las construcciones (m)	Altura media de la construcción (m)
HRHD	18	12,3~78,6	34,8
HRMD		12,5~70,8	34,4
HRLD		13,2~68,0	34,2
MRHD	10	7,3~41,2	19,5
MRMD		7,2~39,0	19,6
MRLD		7,4~40,4	19,4
LRHD	6	2,1~23,1	9,1
LRMD		2,5~22,2	9,4
LRLD		2,5~23,5	9,5

7.3 Modelo de pérdida de transmisión básica

En la presente Recomendación, el modelo de pérdida de transmisión básica viene dado por:

$$L_b = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + S \quad (\text{dB}) \quad (96)$$

$$L_0 = -27,5 + 20 \cdot \log_{10}(f) \quad (\text{dB}) \quad (97)$$

siendo n el exponente de pérdida de transmisión básica. S es una variable aleatoria que representa la dispersión aleatoria alrededor de la línea de regresión cuando la distribución es normal, y la desviación típica de S se denota como σ_s . Las unidades de f y d son MHz y metros, respectivamente.

Los parámetros de pérdida de transmisión básica para casos típicos de morfologías de nueve trayectos a partir de la modelación estadística en la banda de 3,705 GHz se resumen en el Cuadro 26. Los valores del Cuadro sirven para todos los receptores situados a una altura de 2 m a lo largo del trayecto, a una distancia de 100 m a 800 m.

CUADRO 26

Parámetros de pérdida de transmisión básica para morfologías de nueve trayectos en la banda de 3,705 GHz

Morfología del trayecto	Altura de la antena transmisora (m)	Densidad media de las construcciones (%)	n	σ_s
HRHD	50	40	3,3	9,3
HRMD	50	30	2,9	6,3
HRLD	50	20	2,5	3,6
MRHD	30	40	2,8	4,7
MRMD	30	30	2,6	4,9
MRLD	30	20	2,3	2,7
LRHD	20	40	2,4	1,3
LRMD	20	30	2,3	1,8
LRLD	20	20	2,2	1,8

7.4 Modelo de dispersión del retardo

También puede modelarse el valor eficaz de dispersión del retardo en función de la distancia. El valor eficaz de dispersión del retardo en trayectos dominantes NLoS para distancias de 100 m a 800 m puede modelarse como un modelo dependiente de la distancia que viene dado por:

$$DS = A \cdot d^B \quad (\text{ns}) \quad (98)$$

En el Cuadro 27 se resumen los parámetros de dispersión del retardo para casos típicos de morfologías de nueve trayectos a partir de la modelación estadística en la banda de 3,705 GHz. La altura de los receptores es de 2 m, y los valores extremos se eliminan para obtener los parámetros ajustados.

CUADRO 27

**Parámetros de dispersión del retardo para morfologías de nueve trayectos
en la banda de 3,705 GHz**

Morfología del trayecto	Altura de la antena transmisora (m)	Densidad media de las construcciones (%)	Dispersión del retardo (ns)	
			A	B
HRHD	50	40	237	0,072
HRMD	50	30	258	0,074
HRLD	50	20	256	0,11
MRHD	30	40	224	0,095
MRMD	30	30	196	0,12
MRLD	30	20	172	0,19
LRHD	20	40	163	0,18
LRMD	20	30	116	0,23
LRLD	20	20	90	0,29

7.5 Modelo de dispersión angular

La dispersión angular de partida (ASD) y de llegada (ASA) a lo largo de los trayectos, a una distancia de 100 m a 800 m, puede calcularse como un modelo dependiente de la distancia que viene dado por:

$$ASD = \alpha \cdot d^{\beta} \quad (\text{grados}) \quad (99)$$

$$ASA = \gamma \cdot d^{\delta} \quad (\text{grados}) \quad (100)$$

En los Cuadros 28 y 29 se resumen los parámetros de ASD y de ASA para casos típicos en morfologías de nueve trayectos a partir de la modelación estadística en la banda de 3,705 GHz.

CUADRO 28

**Parámetros de ASD para morfologías de nueve trayectos
en la banda de 3,705 GHz**

Morfología del trayecto	Altura de la antena transmisora (m)	Densidad media de las construcciones (%)	α	β
HRHD	50	40	107	-0,13
HRMD	50	30	116	-0,18
HRLD	50	20	250	-0,31
MRHD	30	40	115	-0,22
MRMD	30	30	232	-0,33
MRLD	30	20	264	-0,37
LRHD	20	40	192	-0,33
LRMD	20	30	141	-0,29
LRLD	20	20	113	-0,24

CUADRO 29

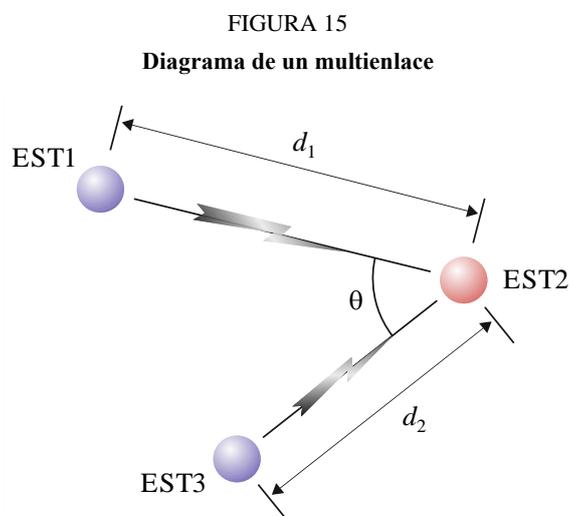
**Parámetros de ASA para morfologías de nueve trayectos
en la banda de 3,705 GHz**

Morfología del trayecto	Altura de la antena transmisora (m)	Densidad media de las construcciones (%)	γ	δ
HRHD	50	40	214	-0,27
HRMD	50	30	147	-0,17
HRLD	50	20	140	-0,14
MRHD	30	40	127	-0,15
MRMD	30	30	143	-0,16
MRLD	30	20	132	-0,13
LRHD	20	40	109	-0,09
LRMD	20	30	124	-0,11
LRLD	20	20	94	-0,06

8 Modelo de correlación cruzada para canales multienlace

8.1 Definición de los parámetros

Se ha desarrollado un modelo de correlación cruzada de canales multienlace en un entorno residencial, basado en las mediciones realizadas, en la banda de frecuencias de 3,7 GHz, a distancias comprendidas entre 50 y 600 m. En la Fig. 15 se muestra el diagrama geométrico de un canal multienlace. Para el modelizado geométrico del canal multienlace se usan dos parámetros: el ángulo de separación y la distancia relativa.



El ángulo de separación θ es el ángulo formado por el enlace directo EST1-EST2 y el otro enlace directo EST3-EST2. La distancia relativa \tilde{d} se define como:

$$\tilde{d} = \log_{10} \frac{d_1}{d_2} \quad (101)$$

donde d_1 y d_2 representan la distancia entre la Estación 1 y la Estación 2, y entre la Estación 3 y la Estación 2, respectivamente. Cuando la Estación 1 está a la misma distancia de la Estación 2 y de la Estación 3, se tiene el valor $\tilde{d} = 0$.

Las gamas de valores θ y de \tilde{d} son:

$$0^\circ < \theta < 180^\circ, \quad -0,3 \leq d \leq 0,3 \quad (102)$$

8.2 Correlación cruzada de los parámetros de tiempo y espacio de larga duración

Los parámetros de tiempo y espacio de larga duración, para el modelo de correlación cruzada, incluyen:

- Desvanecimiento debido a sombras (DS)
- Factor K (FK)
- Dispersión del retardo (DR)
- Dispersión del ángulo de llegada (DAL)
- Dispersión del ángulo de salida (DAS).

Las siguientes ecuaciones definen los modelos de correlación cruzada de los parámetros de espacio y tiempo de larga duración entre el enlace EST1-EST2 y el enlace EST2-EST3.

Los modelos de correlación cruzada (ρ) de DS, FK, DR, DAL y DAS entre dos enlaces, con respecto al ángulo de separación se definen como:

$$\rho_{(DS,FK,DR,DAL)}(\theta) = A \cdot \exp(-\theta^2 / B) \quad (103)$$

$$\rho_{DAS}(\theta) = A \cdot \ln(\theta) + B \quad (104)$$

En el Cuadro 30 se muestran los coeficientes típicos de cada modelo de correlación cruzada con respecto al ángulo de separación, obtenidos sobre la base de las mediciones realizadas en entornos residenciales típicos a 3,7 GHz.

CUADRO 30

Coefficientes típicos de los modelos de correlación cruzada de los parámetros de espacio y tiempo de larga duración con respecto al ángulo de separación

Parámetro	Área	Frecuencia (GHz)	Altura antena		Coeficientes de correlación cruzada			
			h_1 y h_3 (m)	h_2 (m)	A		B	
					media	desviación típica	media	desviación típica
Desvanecimiento debido a sombras	Residencial	3,7	25	2	0,749	$4,3 \times 10^{-2}$	619	89
Factor K					0,295	$4,9 \times 10^{-3}$	2 129	6
Dispersión del retardo					0,67	$7,0 \times 10^{-2}$	1 132	119
Dispersión del ángulo de llegada					0,582	$2,1 \times 10^{-3}$	1 780	484
Dispersión del ángulo de salida					-0,0989	$9,2 \times 10^{-4}$	0,483	0,016

Los modelos de correlación cruzada (ρ) de DS, FK, DR, DAL y DAS entre dos enlaces, con respecto a la distancia relativa, se definen como:

$$\rho_{(DS,FK,DR,DAL)}(\tilde{d}) = A \cdot \exp(-|\tilde{d}| / B) \tag{105}$$

$$\rho_{DAS}(\tilde{d}) = A \cdot |\tilde{d}| + B \tag{106}$$

En el Cuadro 31 se muestran los coeficientes típicos de cada modelo de correlación cruzada con respecto a la distancia relativa, obtenidos sobre la base de las mediciones realizadas en entornos residenciales típicos a 3,7 GHz.

CUADRO 31

Coefficientes típicos de los modelos de correlación cruzada de los parámetros de espacio y tiempo de larga duración con respecto a la distancia relativa

Parámetro	Área	Frecuencia (GHz)	Altura antena		Coeficientes de correlación cruzada			
			h_1 y h_3 (m)	h_2 (m)	A		B	
					media	desviación típica	media	desviación típica
Desvanecimiento debido a sombras	Residencial	3,7	25	2	0,572	$1,4 \times 10^{-2}$	0,38	$4,9 \times 10^{-2}$
Factor K					0,429	$2,8 \times 10^{-3}$	0,27	$7,1 \times 10^{-3}$
Dispersión del retardo					0,663	$4,6 \times 10^{-2}$	0,38	$1,6 \times 10^{-1}$
Dispersión del ángulo de llegada					0,577	$1,1 \times 10^{-2}$	0,38	$2,1 \times 10^{-2}$
Dispersión del ángulo de salida					0,51	$1,9 \times 10^{-1}$	0,196	$4,2 \times 10^{-2}$

Los modelos de correlación cruzada (ρ) de DS, FK, DR, DAL y DAS entre dos enlaces, con respecto al ángulo de separación y a la distancia relativa se definen como:

$$\rho_{(DS,FK,DR,DAL,DAS)}(\theta, \tilde{d}) = A \cdot \exp\left(-\frac{\theta^2}{B}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\tilde{d}^2}{C}\right) \quad (107)$$

En el Cuadro 32 se muestran los coeficientes típicos del modelo de correlación cruzada con respecto al ángulo de separación y a la distancia relativa, obtenidos sobre la base de las mediciones realizadas en entornos residenciales típicos a 3,7 GHz.

CUADRO 32

Coefficientes típicos de los modelos de correlación cruzada de los parámetros de espacio y tiempo de larga duración con respecto al ángulo de separación y a la distancia relativa

Parámetro	Área	Frecuencia (GHz)	Altura antena		Coeficientes de correlación cruzada					
			h_1 y h_3 (m)	h_2 (m)	A		B		C	
					media	desviación típica	media	desviación típica	media	desviación típica
Desvanecimiento debido a sombras	Residencial	3,7	25	2	0,53	$7,1 \times 10^{-3}$	29,31	4,6	0,42	$9,2 \times 10^{-2}$
Factor K					0,28	$6,4 \times 10^{-2}$	22,48	5,9	0,21	$4,2 \times 10^{-2}$
Dispersión del retardo					0,46	$9,2 \times 10^{-2}$	29,31	3,7	0,21	$7,1 \times 10^{-5}$
Dispersión del ángulo de llegada					0,49	$4,9 \times 10^{-2}$	29,31	0,15	0,21	$2,1 \times 10^{-2}$
Dispersión del ángulo de salida					0,34	$6,4 \times 10^{-2}$	29,31	2,5	0,21	$2,1 \times 10^{-2}$

8.3 Correlación cruzada de los desvanecimientos de corta duración sobre el dominio del retardo

La correlación cruzada de la respuesta impulsiva del enlace EST1-EST2 $h_i(\tau_i)$ al retardo τ_i y de la respuesta impulsiva del enlace EST3-EST2 al retardo τ_j , se puede calcular como:

$$c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j) = \text{Real}\{E[(h_i(\tau_i) - \bar{h}_i(\tau_i))(h_j(\tau_j) - \bar{h}_j(\tau_j))^*]\} \quad (108)$$

donde $\bar{(\bullet)}$ representa la expectativa del argumento dado. Hay que notar que para el cálculo de la correlación cruzada, sólo se consideran como componentes las muestras de retardo de la respuesta al impulso del canal con una potencia dentro de la gama dinámica (5 dB). Además, los coeficientes de correlación cruzada, con valores entre -1 y 1 , se obtienen por normalización, es decir:

$$c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j) = \text{Real}\left\{\frac{E[(h_i(\tau_i) - \bar{h}_i(\tau_i))(h_j(\tau_j) - \bar{h}_j(\tau_j))^*]}{\sqrt{E[(h_i(\tau_i) - \bar{h}_i(\tau_i))^2]} \sqrt{E[(h_j(\tau_j) - \bar{h}_j(\tau_j))^2]}}\right\} \quad (109)$$

Para la modelización de la correlación cruzada del desvanecimiento de corta duración $c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)$, se consideran los tres parámetros siguientes:

- El máximo de la correlación cruzada del desvanecimiento de corta duración: $c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)$

$$\rho_{Fm\acute{a}x} = \acute{m}ax\{c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)\} \tag{110}$$

– El mínimo de la correlación cruzada del desvanecimiento de corta duración: $c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)$

$$\rho_{Fmın} = mın\{c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)\} \tag{111}$$

– La desviación típica de la correlación cruzada del desvanecimiento de corta duración: $c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)$

$$\rho_{Fstd} = \sqrt{\frac{1}{T_i T_j} \int (c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j) - c_{h_i h_j, media})^2 d\tau_i d\tau_j} \tag{112}$$

donde T_i y T_j representan la duración de τ_i y τ_j , respectivamente, $c_{h_i h_j, media}$ representa el valor medio de la correlación cruzada, Es cercano a cero con una pequeña varianza, independientemente de los valores del ángulo de separación y de la distancia relativa.

Los modelos de correlación cruzada (ρ_F) del desvanecimiento de pequeña escala entre dos enlaces con respecto al ángulo de separación vienen dados por:

$$\rho_F(\theta) = A \cdot \ln(\theta) + B \tag{113}$$

En el Cuadro 33 se muestran los coeficientes típicos de cada modelo de correlación cruzada con respecto al ángulo de separación, obtenidos sobre la base de las mediciones realizadas en entornos residenciales típicos a 3,7 GHz.

CUADRO 33

Coefficientes típicos de los modelos de correlación cruzada del desvanecimiento de corta duración con respecto al ángulo de separación

Parámetro	rea	Frecuencia (GHz)	Altura antena		Coeficientes de correlación cruzada			
			h_1 y h_3 (m)	h_2 (m)	A		B	
					media	desviación típica	media	desviación típica
Máximo	Residencial	3,7	25	2	$-1,09 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$	0,635	$3,5 \times 10^{-3}$
Mínimo					$1,62 \times 10^{-2}$	$6,4 \times 10^{-4}$	-0,659	$1,1 \times 10^{-2}$
Desviación típica					$-9,71 \times 10^{-3}$	$7,1 \times 10^{-5}$	0,417	$7,1 \times 10^{-5}$

El modelo de correlación cruzada del desvanecimiento rápido entre dos enlaces con respecto a la distancia relativa viene dado por:

$$\rho_F(\tilde{d}) = A \cdot \exp(-|\tilde{d}|/B) \tag{114}$$

En el Cuadro 34 se muestran los coeficientes típicos de cada función de correlación cruzada con respecto a la distancia relativa, obtenidos sobre la base de las mediciones realizadas en entornos residenciales típicos a 3,7 GHz.

CUADRO 34

Coefficientes típicos del modelo de correlación cruzada del desvanecimiento de corta duración con respecto a la distancia relativa

Parámetro	Área	Frecuencia (GHz)	Altura antena		Coeficientes de correlación cruzada			
			h_1 y h_3 (m)	h_2 (m)	A		B	
					media	desviación típica	media	desviación típica
Máximo	Residencial	3,7	25	2	0,628	$2,8 \times 10^{-3}$	5,1	$7,1 \times 10^{-5}$
Mínimo					-0,626	$5,7 \times 10^{-3}$	3,75	$1,0 \times 10^{-1}$
Desviación típica					0,401	$7,1 \times 10^{-4}$	5,1	$7,1 \times 10^{-5}$

9 Características de propagación para entornos con gran efecto Doppler

La distancia a la que puede calcularse el perfil del retardo de potencia medio y los correspondientes parámetros del canal, como el valor eficaz de la dispersión del retardo, guarda relación con la velocidad del vehículo y el ancho de banda de medición.

9.1 Hipótesis para trenes de alta velocidad

En las hipótesis de trenes de alta velocidad, los trenes viajan a altas velocidades, lo que da lugar a grandes desplazamientos Doppler correspondientes a velocidades de unos 200 km/h (55 m/s) o más debido a los dispersores y a cortas distancias en las que las propiedades estocásticas del enlace pueden considerarse estacionarias. En la gama de frecuencias de ondas milimétricas pueden producirse desplazamientos Doppler significativamente mayores y distancias estacionarias más cortas que las bandas de frecuencias inferiores, incluso cuando el tren va a una menor velocidad.

Los enlaces de radiocomunicaciones a trenes consisten en enlaces directos en los que la antena se encuentra en el interior del tren o en enlaces de retransmisión donde la antena se encuentra en el techo del tren. Se han analizado las medidas del canal de radiocomunicaciones tomadas a lo largo de la línea de ferrocarril en Pekín (China) a 2 650 MHz y 1 890 MHz utilizando la resolución de 18 MHz del código Gold transmitido por la red de radiocomunicaciones o una sonda del canal de 50 MHz de ancho de banda a 2 350 MHz, con el fin de calcular la distancia a la que el canal puede considerarse estacionario y los correspondientes parámetros del canal. Además, se realizaron medidas del canal a lo largo de una vía de tren de prueba en Osong (Corea) a 28 GHz utilizando una sonda del canal de 500 MHz de ancho de banda, las cuales se analizaron para estimar la distancia estacionaria y los correspondientes parámetros del canal.

Hay diversos casos especiales que tener en cuenta en el caso de trenes, en particular viaductos (puente para la vía férrea), zanjas (estructura estrecha semicerrada cubierta con vegetación en paredes escarpadas a ambos lados de la vía férrea), terrenos escabrosos, estaciones de tren y túneles.

En el Cuadro 35 se indica la distancia a la que el canal se considera estacionario en los casos de viaducto, zanja y túnel para enlaces directos y enlaces de retransmisión con la correspondiente distancia media.

CUADRO 35

Distancia estacionaria para casos de tren de alta velocidad

Caso de medición	Tipo de cobertura	Frecuencia (MHz)	Velocidad del tren (km/h)	Distancia estacionaria (m)	Distancia media (m)
Viaducto	Enlace directo	2 650 ⁽¹⁾	285	3,4-5	4,2
	Enlace de retransmisión	1 890 ⁽¹⁾	285	1,9-3,5	2,8
		28 000 ⁽³⁾	170	0,05-0,24	0,11
Zanja	Enlace de retransmisión	2 350 ⁽²⁾	200	0,51	0,51
Túnel		28 000 ⁽³⁾	170	0,06-0,39	0,17

⁽¹⁾ El ancho de banda de medición era de 18 MHz.

⁽²⁾ El ancho de banda de medición era de 50 MHz.

⁽³⁾ El ancho de banda de medición era de 500 MHz.

Las medidas se utilizaron para calcular los valores eficaces de la dispersión del retardo para un umbral de 20 dB, y un pequeño factor de escala K que se indica en el Cuadro 36 para los casos de viaducto y zanja.

CUADRO 36

Valor eficaz de la dispersión del retardo y factor K para casos de tren de alta velocidad

Condiciones de medida						Dispersión del retardo, valor eficaz (ns)		Factor K (dB)	
Caso	Tipo de cobertura	Frecuencia (MHz)	Altura de la antena		Gama (m)	50%	95%	50%	95%
			h_1 (m)	h_2 (m)					
Viaducto	Enlace directo	2 650	30	10	200-1 000	101	210	4	9
	Enlace de retransmisión	1 890	30	10	200-1 000	29	120	8	15
		28 000	5	4,2	1-450	22,4	104,3	14,5	16,3
Zanja	Enlace de retransmisión	2 350	14	3	100-1 000	38	171	4	11
Túnel	Enlace de retransmisión	28 000	5	4,2	1-450	70,4	190,5	10,6	13,3

9.2 Hipótesis para vehículos a alta velocidad

En autopistas los vehículos pueden circular en torno a 100 km/h (27,8 m/s). Muchos de esos vehículos a alta velocidad actúan como dispersores en movimiento que generan fuertes efectos Doppler.

Al igual que los trenes de alta velocidad, los enlaces radioeléctricos en la hipótesis de comunicación vehículo a infraestructura pueden ser directos o de retransmisión en función de si la antena está dentro del vehículo o encima de él, respectivamente. En la hipótesis de comunicación vehículo a vehículo, existen casos en los que los vehículos circulan en la misma dirección y en los que otros vehículos en

carriles opuestos se desplazan frente a frente o pasan por detrás. Los desplazamientos Doppler con una velocidad relativa de ± 200 km/h pueden generarse cuando el vehículo receptor avanza a una velocidad de 100 km/h y el vehículo transmisor se mueve en sentido contrario a la misma velocidad.

En el Cuadro 37 se muestra la distancia a la que el canal se considera estacionario para un radioenlace en una autopista.

Las mediciones se realizaron en una autopista de Yeosu, República de Corea, a 5,9 GHz (con un ancho de banda de 100 MHz) y a 28 GHz (con un ancho de banda de 500 MHz). Cabe señalar que las mediciones en esas dos bandas de frecuencias se efectuaron de manera separada e independiente.

CUADRO 37

Distancia estacionaria para casos de vehículos de alta velocidad

Caso de medición	Tipo de cobertura	Frecuencia (GHz)	Velocidad del vehículo (km/h)	Distancia estacionaria (m)	Distancia media (m)
Vehículo a infraestructura	Enlace de retransmisión	5,9 ⁽¹⁾	100	0,38-1,68	0,86
		28 ⁽²⁾	100	0,06-0,25	0,12
Vehículo a vehículo	Enlace de retransmisión	5,9 ^{(1), (3)}	100	0,13-1,20	0,30

⁽¹⁾ Ancho de banda de medición: 100 MHz.

⁽²⁾ Ancho de banda de medición: 500 MHz.

⁽³⁾ El emisor y el receptor se desplazan en direcciones opuestas, respectivamente.

En la medición a 5,9 GHz el umbral era de 20 dB. En la medición a 28 GHz el umbral para el valor eficaz de la dispersión de retardo era de 25 dB. El valor eficaz de la dispersión de retardo con pequeños factores de escala K se muestra en el Cuadro 38.

CUADRO 38

Valor eficaz de la dispersión del retardo y factor K para casos de vehículos de alta velocidad

Condiciones de medición						Valor eficaz de la dispersión del retardo (ns)		Factor K (dB)	
Caso	Tipo de cobertura	Frecuencia (MHz)	Altura de antena		Distancia (m)	50%	95%	50%	95%
			h_1 (m)	h_2 (m)					
Vehículo a infraestructura	Enlace de retransmisión	5,9	7	1,7	30-1 000	13	552	7,5	15,7
		28	11	2	100-500	6,3	293,5	10,2	13,1
Vehículo a vehículo	Enlace de retransmisión	5,9 ⁽¹⁾	1,7	1,7	30-1 000	19	742	8,60	16,2

⁽¹⁾ El emisor y el receptor se desplazan en direcciones opuestas, respectivamente.