

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.1411-7
(09/2013)

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

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
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, 2014

© UIT 2014

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.1411-7

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)

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 trayecto 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.

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 900 MHz y 100 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 3 GHz,

recomienda

la conveniencia de adoptar 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

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 en el trayecto, 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

CUADRO 1 (Fin)

Entorno	Descripción y degradaciones de la propagación significativas
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"> – Típicamente calles anchas – 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

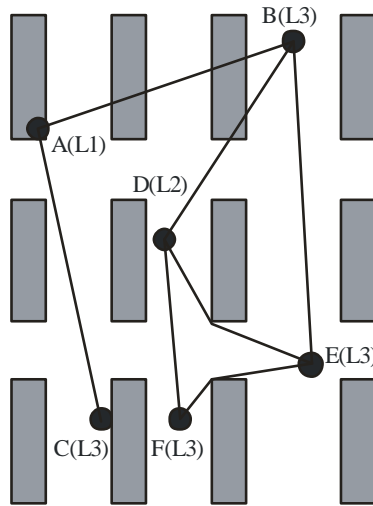
En esta Recomendación se pueden considerar tres niveles para la ubicación de las estaciones. A saber: 1) por encima de los tejados (definido como L1 en la Fig. 1); 2) por debajo de los tejados pero por encima del nivel de la cabeza (L2); y 3) al mismo nivel o por debajo del nivel de la cabeza (L3). De 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 a C) o NLoS (A 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, *non-line-of-sight*)

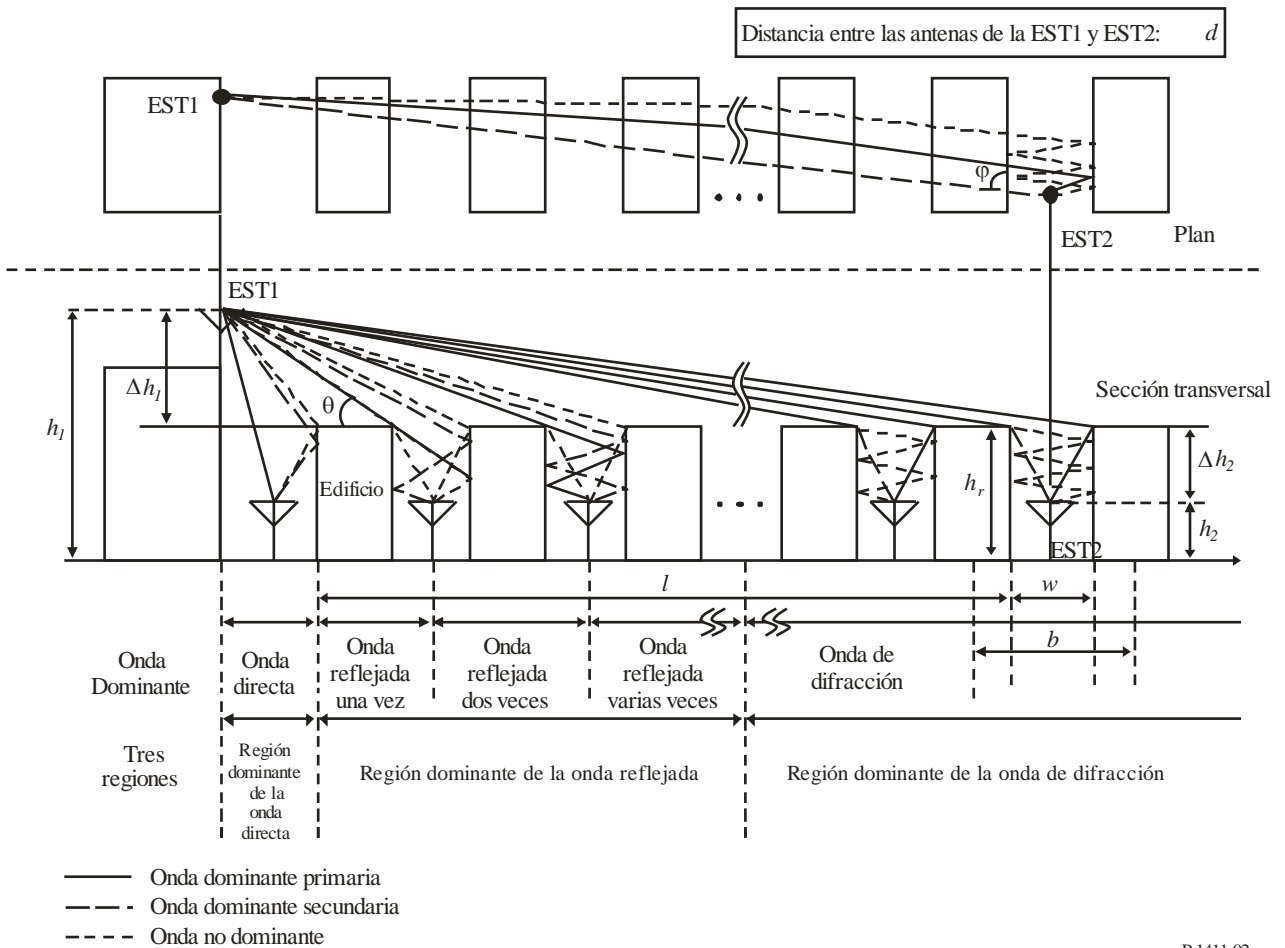
La Fig. 2 describe el caso típico NLoS (el enlace A-B de la Fig. 1). En adelante, este caso se denomina NLoS1.

FIGURA 1
Situaciones típicas de propagación en zonas urbanas



P.1411-01

FIGURA 2
Definición de los parámetros del caso NLoS1



P.1411-02

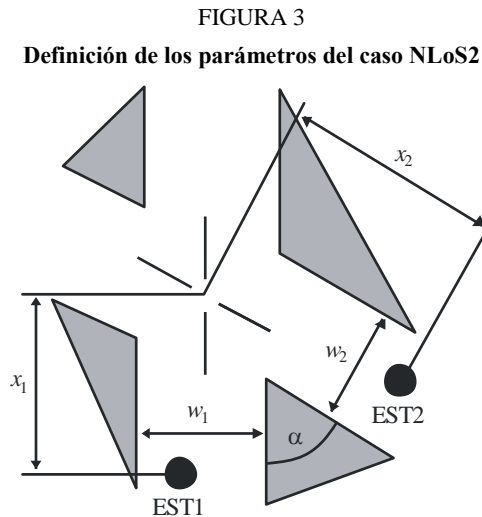
Los parámetros pertinentes de esta situación son:

- 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.



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, *line-of-sight*)

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 del trayecto

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 depende también de la gama de frecuencias. 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 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:

$$L_{LoS,l} = L_{bp} + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad (1)$$

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

$$R_{bp} \approx \frac{4h_1h_2}{\lambda} \quad (2)$$

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:

$$L_{LoS,u} = L_{bp} + 20 + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad (3)$$

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

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_1 h_2} \right) \right| \quad (4)$$

El margen de desvanecimiento del tramo superior es de 20 dB. En la ecuación (3), 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 en el espacio libre, el valor mediano $L_{LoS,m}$ viene dado por:

$$L_{LoS,m} = L_{bp} + 6 + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad (5)$$

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:

$$R_{bp} = 4 \frac{(h_1 - h_s)(h_2 - h_s)}{\lambda} \quad (6)$$

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 4 y 5 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 4

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 5

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 (1) y (3), viniendo dado L_{bp} por:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left\{ \frac{\lambda^2}{8\pi(h_1 - h_s)(h_2 - h_s)} \right\} \right| \quad (7)$$

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 básica de propagación 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:

$$L_{LoS,l} = L_s + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (8)$$

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

$$L_{LoS,u} = L_s + 20 + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (9)$$

La pérdida básica de propagación, L_s se define por:

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

Se ha determinado experimentalmente que el valor de R_s de las ecuaciones (8) a (10) es de 20 m.

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

$$L_{LoS,m} = L_s + 6 + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (11)$$

Propagación en ondas milimétricas

En frecuencias superiores a unos 10 GHz, la distancia al punto de inflexión R_{bp} en la ecuación (2) 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 2,2. También debe considerarse la atenuación debida a los gases atmosféricos y la debida a la lluvia.

La atenuación gaseosa puede calcularse a partir de la Recomendación UIT-R P.676 y la atenuación debida a la lluvia a partir de la Recomendación UIT-R P.530.

4.1.2 Situaciones NLoS

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

4.1.2.1 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).

$$L_{NLoS2} = -10 \log_{10} \left(10^{-L_r/10} + 10^{-L_d/10} \right) \quad \text{dB} \quad (12)$$

donde:

L_r : pérdidas de reflexión en el trayecto, definidas por:

$$L_r = 20 \log_{10} (x_1 + x_2) + x_1 x_2 \frac{f(\alpha)}{w_1 w_2} + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (13)$$

donde:

$$f(\alpha) = \frac{3,86}{\alpha^{3,5}} \quad \text{dB} \quad (14)$$

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

L_d : pérdidas de difracción en el trayecto, definidas por:

$$L_d = 10 \log_{10}[x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + 2D_a - 0,1 \left(90 - \alpha \frac{180}{\pi} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (15)$$

$$D_a = \left(\frac{40}{2\pi} \right) \left[\arctg \left(\frac{x_2}{w_2} \right) + \arctg \left(\frac{x_1}{w_1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad \text{dB} \quad (16)$$

4.1.2.2 Gama de frecuencias comprendida entre 2 y 16 GHz

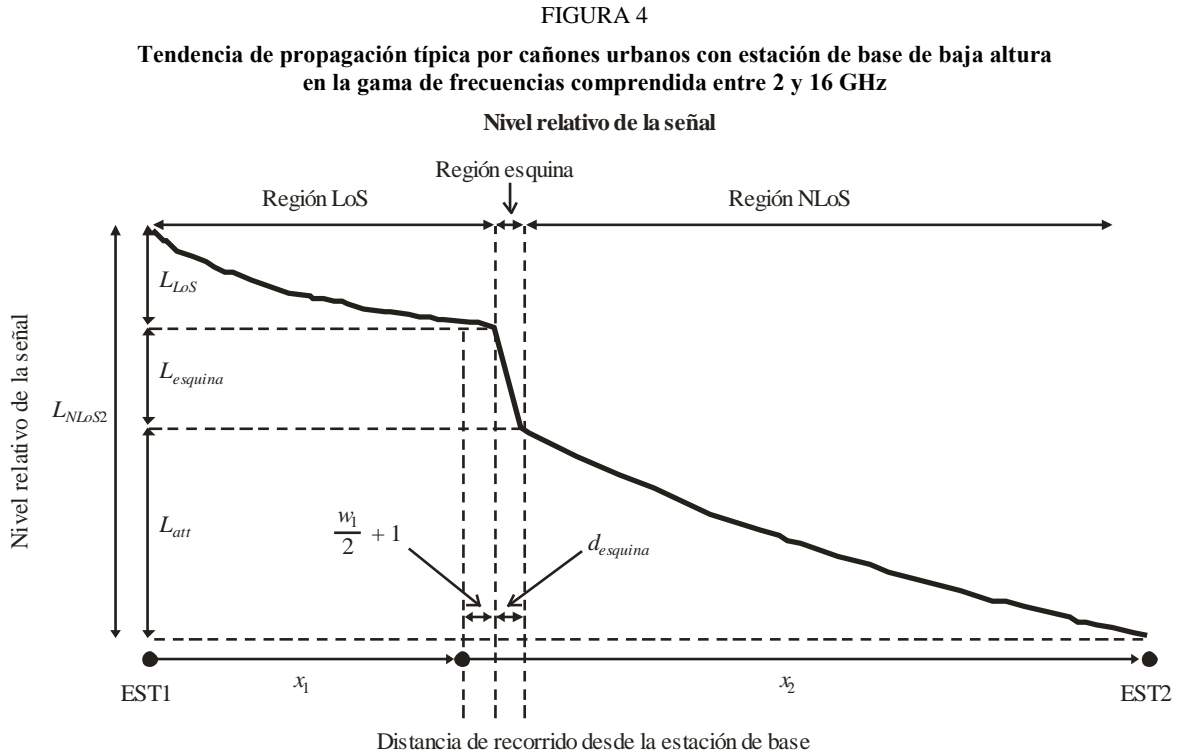
El modelo de propagación en las situaciones NLoS2 descrito en el § 3.1.2 con el ángulo de la esquina $\alpha = \pi/2$ rad se obtiene sobre la base de las mediciones efectuadas en la gama de frecuencias comprendida entre 2 y 16 GHz, donde $h_1, h_2 < h_r$ y w_2 es de hasta 10 m (o acera). Las características de las pérdidas de trayecto 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 total de trayecto, L_{NLoS2} , más allá de la región esquina ($x_2 > w_1/2 + 1$) se calcula de la siguiente manera:

$$L_{NLoS2} = L_{LoS} + L_c + L_{att} \quad (17)$$

$$L_c = \begin{cases} \frac{L_{esquina}}{\log_{10}(1 + d_{esquina})} \log_{10}(x_2 - w_1/2) & w_1/2 + 1 < x_2 \leq w_1/2 + 1 + d_{esquina} \\ L_{esquina} & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{esquina} \end{cases} \quad (18)$$

$$L_{att} = \begin{cases} 10\beta \log_{10} \left(\frac{x_1 + x_2}{x_1 + w_1/2 + d_{esquina}} \right) & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{esquina} \\ 0 & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{esquina} \end{cases} \quad (19)$$

donde L_{LoS} es la pérdida de trayecto de la calle LoS para $x_1 (> 20 \text{ m})$, calculada en el § 4.1. En la ecuación (18), $L_{esquina}$ 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 (19), β es 6 para ambos entornos.



En un entorno residencial, la pérdida de trayecto 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

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 50 m

h_2 : 1 a 3 m

f : 800 a 5 000 MHz

800 a 5 000 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 20 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 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.

4.2.1 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 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.

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

Las pérdidas en el espacio libre vienen dadas por:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log_{10} (d / 1\,000) + 20 \log_{10} (f) \quad (21)$$

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.

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(\Delta h_2) + L_{ori} \quad (22)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{para } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (23)$$

donde:

$$\Delta h_2 = h_r - h_2 \quad (24)$$

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 :

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_1^2} \quad (25)$$

donde (véase la Fig. 2):

$$\Delta h_1 = h_1 - h_r \quad (26)$$

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:

$$L_{msd} = \begin{cases} -\tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi}\right) \cdot (L1_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{para } l > d_s \text{ y } dh_{bp} > 0 \\ \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi}\right) \cdot (L2_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{para } l \leq d_s \text{ y } dh_{bp} > 0 \\ L2_{msd}(d) & \text{para } dh_{bp} = 0 \\ L1_{msd}(d) - \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta}\right) \cdot (L_{upp} - L_{mid}) - L_{upp} + L_{mid} & \text{para } l > d_s \text{ y } dh_{bp} < 0 \\ L2_{msd}(d) + \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta}\right) \cdot (L_{mid} - L_{low}) + L_{mid} - L_{low} & \text{para } l \leq d_s \text{ y } dh_{bp} < 0 \end{cases} \quad (27)$$

donde:

$$dh_{bp} = L_{upp} - L_{low} \quad (28)$$

$$\zeta = (L_{upp} - L_{low}) \cdot \upsilon \quad (29)$$

$$L_{mid} = \frac{(L_{upp} + L_{low})}{2} \quad (30)$$

$$L_{upp} = L1_{msd}(d_{bp}) \quad (31)$$

$$L_{low} = L2_{msd}(d_{bp}) \quad (32)$$

y

$$d_{bp} = |\Delta h_1| \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad (33)$$

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

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

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 $l \gg d_s$.)

$$L1_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d / 1\ 000) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad (34)$$

donde:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_1) & \text{para } h_1 > h_r \\ 0 & \text{para } h_1 \leq h_r \end{cases} \quad (35)$$

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

$$k_a = \begin{cases} 71,4 & \text{para } h_1 > h_r \text{ y } f > 2\ 000 \text{ MHz} \\ 73 - 0,8\Delta h_1 & \text{para } h_1 \leq h_r, f > 2\ 000 \text{ MHz y } d \geq 500\text{m} \\ 73 - 1,6\Delta h_1 d / 1\ 000 & \text{para } h_1 \leq h_r, f > 2\ 000 \text{ MHz y } d < 500\text{m} \\ 54 & \text{para } h_1 > h_r \text{ y } f \leq 2\ 000 \text{ MHz} \\ 54 - 0,8\Delta h_1 & \text{para } h_1 \leq h_r, f \leq 2\ 000 \text{ MHz y } d \geq 500\text{m} \\ 54 - 1,6\Delta h_1 d / 1\ 000 & \text{para } h_1 \leq h_r, f \leq 2\ 000 \text{ MHz y } d < 500\text{m} \end{cases} \quad (36)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_1 > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_1}{h_r} & \text{para } h_1 \leq h_r \end{cases} \quad (37)$$

$$k_f = \begin{cases} -8 & \text{para } f > 2\,000 \text{ MHz} \\ -4 + 0,7(f/925 - 1) & \text{para ciudades de tamaño medio o centros suburbanos} \\ -4 + 1,5(f/925 - 1) & \text{para centros metropolitanos y } f \leq 2\,000 \text{ MHz} \end{cases} \quad (38)$$

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:

$$L2_{msd}(d) = -10 \log_{10} (Q_M^2) \quad (39)$$

donde:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left(\frac{\Delta h_1}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{para } h_1 > h_r + \delta h_u \\ \frac{b}{d} & \text{para } h_1 \leq h_r + \delta h_u \text{ y } h_1 \geq h_r + \delta h_l \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right) & \text{para } h_1 < h_r + \delta h_l \end{cases} \quad (40)$$

y

$$\theta = \arctan \left(\frac{\Delta h_1}{b} \right) \quad (41)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_1^2 + b^2} \quad (42)$$

y

$$\delta h_u = 10^{-\log_{10} \left(\sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right) - \frac{\log_{10}(d)}{9} + \frac{10}{9} \log_{10} \left(\frac{b}{2,35} \right)} \quad (43)$$

$$\delta h_l = \frac{0,00023b^2 - 0,1827b - 9,4978}{(\log_{10}(f))^{2,938}} + 0,000781b + 0,06923 \quad (44)$$

4.2.2 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:

$$L_{NLoSI} = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) & \text{para } d < d_0 \quad (\text{Región dominante de onda directa}) \\ L_{0n} & \text{para } d_0 \leq d < d_{RD} \quad (\text{Región dominante de onda reflejada}) \\ 32,1 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_{RD}} \right) + L_{d_{RD}} & \text{para } d \geq d_{RD} \quad (\text{Región dominante de onda de difracción}) \end{cases} \quad (45)$$

donde:

$$L_{0n} = \begin{cases} L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d - d_k) & \text{cuando } d_k \leq d < d_{k+1} < d_{RD} \\ & (k = 0, 1, 2, \dots) \\ L_{d_k} + \frac{L_{d_{RD}} - L_{d_k}}{d_{RD} - d_k} \cdot (d - d_k) & \text{cuando } d_k \leq d < d_{RD} < d_{k+1} \end{cases} \quad (46)$$

$$d_k = \frac{1}{\text{sen } \varphi} \cdot \sqrt{B_k^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (47)$$

$$L_{d_k} = 20 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{4\pi d_{kp}}{0,4^k \cdot \lambda} \right\} \quad (48)$$

$$d_{RD}(f) = 0,625 \cdot (d_3 - d_1) \cdot \log_{10}(f) + 0,44 \cdot d_1 + 0,5 \cdot d_2 + 0,06 \cdot d_3 \quad (49)$$

(0,8 GHz ≤ f ≤ 20 GHz)

$$L_{d_{RD}} = L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d_{RD} - d_k) \quad (d_k \leq d_{RD} \leq d_{k+1}) \quad (50)$$

$$d_{kp} = \frac{1}{\text{sen } \varphi_k} \cdot \sqrt{A_k^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (51)$$

$$A_k = \frac{w \cdot (h_1 - h_2) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - h_2)} \quad (52)$$

$$B_k = \frac{w \cdot (h_1 - h_2) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - h_2)} - k \cdot w \quad (53)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{B_k}{A_k} \cdot \tan \varphi \right) \quad (54)$$

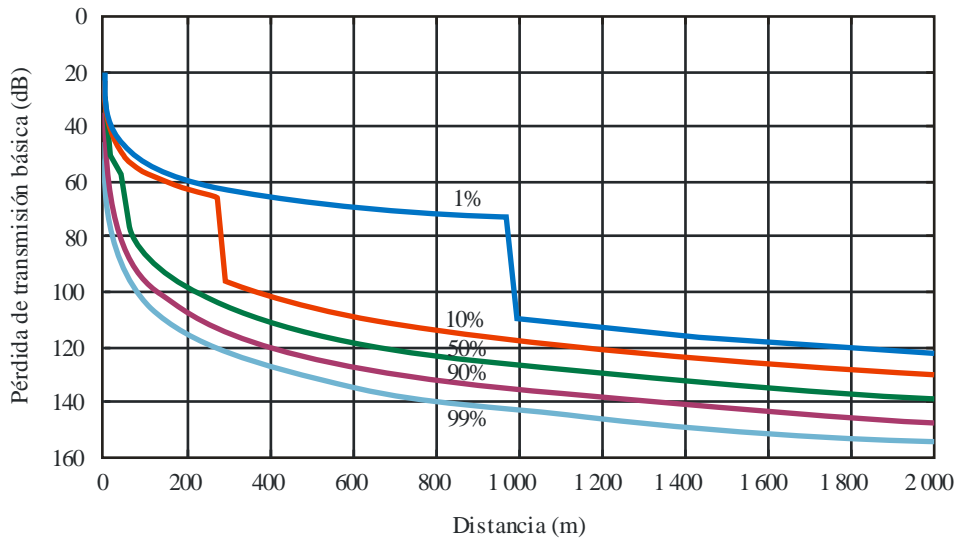
4.3 Modelos para la propagación entre terminales situados entre el nivel por debajo de la altura de los tejados y un nivel cercano a la calle

El objetivo del modelo descrito a continuación es calcular la pérdida básica de transmisión entre dos terminales de baja altura en entornos urbanos. 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. Incluye 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. 5 se observan las regiones LoS, NLoS y las correspondientes a la esquina, y la variabilidad estadística prevista por el modelo.

Se recomienda este modelo 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. También se recomienda con respecto al transmisor y al receptor, y es válido en la gama de frecuencias comprendida entre 300-3 000 MHz. Este modelo está basado en las mediciones efectuadas en la banda de ondas decimétricas 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 5

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.1411-05

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:

$$L_{LoS}^{mediano}(d) = 32,45 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10}(d/1000) \quad (55)$$

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

$$\Delta L_{LoS}(p) = 1,5624\sigma \left(\sqrt{-2 \ln(1 - p/100)} - 1,1774 \right) \quad \text{con } \sigma = 7 \text{ dB} \quad (56)$$

En el Cuadro 6 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:

$$L_{LoS}(d, p) = L_{LoS}^{mediano}(d) + \Delta L_{LoS}(p) \quad (57)$$

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

$$L_{NLoS}^{mediano}(d) = 9,5 + 45 \log_{10} f + 40 \log_{10}(d / 1000) + L_{urbano} \quad (58)$$

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:

$$\Delta L_{NLoS}(p) = \sigma N^{-1}(p/100) \quad \text{con } \sigma = 7 \text{ dB} \quad (59)$$

$N^{-1}(\cdot)$ 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 6 figuran otros valores de la corrección de emplazamiento NLoS para $p = 1, 10, 50, 90$ y 99%.

CUADRO 6

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:

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

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

$$\begin{aligned} d_{LoS}(p) &= 212[\log_{10}(p/100)]^2 - 64\log_{10}(p/100) && \text{si } p < 45 \\ d_{LoS}(p) &= 79,2 - 70(p/100) && \text{en otros casos} \end{aligned} \quad (61)$$

En el Cuadro 6 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 trayecto 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 $L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p)$:

$$L_{LoS} = L_{LoS}(d_{LoS}, p)$$

$$L_{NLoS} = L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p)$$

$$L(d, p) = L_{LoS} + (L_{NLoS} - L_{LoS})(d - d_{LoS}) / w$$

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.

4.4 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

Las pérdidas de entrada a los edificios corresponden al exceso de pérdidas debido a la presencia de un muro de edificio (incluyendo ventanas y otros elementos). Se definen por la diferencia entre los niveles de la señal en el exterior y en el interior del edificio a la misma altura. También ha de tenerse en cuenta el ángulo de incidencia. (Cuando la longitud del trayecto es inferior a unos 10 m, debe tenerse en cuenta la diferencia en las pérdidas en el espacio libre debidas al cambio de la longitud del trayecto para las dos mediciones, al determinar las pérdidas de entrada en el edificio. Para los emplazamientos de antena próximos al muro, también puede ser necesario considerar los efectos del campo cercano.) Se producen pérdidas adicionales por penetración en el edificio y la Recomendación UIT-R P.1238 da indicaciones al respecto. Se cree que, en el caso general, el modo de propagación dominante es aquel en el que la señal entra a un edificio de manera aproximadamente horizontal a través de la superficie de aquél (incluyendo las ventanas) y que para un edificio de construcción uniforme, las pérdidas de entrada en el edificio son independientes de la altura.

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.

Los resultados experimentales que representa el Cuadro 7 se obtuvieron en 5,2 GHz y a través del muro externo de un edificio de ladrillo y hormigón con ventanas de vidrio. El espesor del muro era de 60 cm y la relación ventana/muro era de 2:1, aproximadamente.

CUADRO 7

Ejemplo de pérdidas de entrada a un edificio

Frecuencia	Edificio residencial		Edificio de oficinas		Edificio comercial	
	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
5,2 GHz			12 dB	5 dB		

El Cuadro 8 muestra los resultados de las mediciones efectuadas en 5,2 GHz a través de un muro externo de bloques de piedra, con ángulos de incidencia comprendidos entre 0° y 75°. El muro tenía un espesor de 400 mm, con dos capas de bloques de 100 mm de espesor y un relleno blando entre ellas. Especialmente con ángulos de incidencia mayores, las pérdidas debidas al muro eran extremadamente sensibles a la posición del receptor, tal como muestra la gran desviación típica.

CUADRO 8

Pérdidas debidas a un muro de bloques de piedra con diversos ángulos de incidencia

Ángulo de incidencia (grados)	0	15	30	45	60	75
Pérdidas debidas al muro (dB)	28	32	32	38	45	50
Desviación típica (dB)	4	3	3	5	6	5

En la Recomendación UIT-R P.679 figura información adicional sobre pérdidas de entrada en edificios, principalmente para sistemas de satélite, que pueden ser adecuadas para la evaluación de la entrada en los edificios en relación con los sistemas terrenales.

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:

$$S_u = \exp(A \cdot L + B) \quad \text{ns} \quad (62)$$

donde A y B son coeficientes del valor eficaz de la dispersión del retardo y L es la pérdida en el trayecto (dB). En el Cuadro 9 se pueden ver los coeficientes típicos para distancias de 100 m a 1 km basados en mediciones realizadas en zonas urbanas.

CUADRO 9

Coeficientes típicos del valor eficaz de la dispersión del retardo

Condiciones de medición			Coeficientes del valor eficaz de la dispersión del retardo	
Zona	Frecuencia (GHz)	Alcance (m)	A	B
Urbana	3 650-3 750 MHz	100-1 000	0,031	2,091
	1 920-1 980 MHz, 2 110-2 170 MHz	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 10 se enumeran los valores medidos de la dispersión eficaz de retardo para las bandas de 1,9 GHz y 5,8 GHz en los casos donde la probabilidad acumulativa es del 50% y del 95%.

CUADRO 10
Típicos valores eficaces de la dispersión del retardo^{(1), (2)}

Condiciones de medición						Valor eficaz de la dispersión del retardo (ns)	
Zona	Caso	Frecuencia (GHz)	Altura de la antena		Alcance (m)	50%	95%
			h_1 (m)	h_2 (m)			
Urbana de construcción alta ⁽¹⁾		1,9-2,1	46	1,7	100-1 000	490	1490
Suburbana ⁽²⁾		2,5	12	1	200-1 000	158	469
Urbana de construcción muy alta ⁽¹⁾	LoS	2,5	100	2	100-1 000	208	461
	NLoS					407	513
Urbana ⁽¹⁾		3,7	60	2	100-1 000	232	408
			40	2	100-1 000	121	357
Suburbana ⁽¹⁾		3,7	20	2	100-1 000	125	542
		5,2	20	2,8	100-1 000	189	577
Suburbana ⁽²⁾		3,5	12	1	200-1 000	161	493
		5,8	12	1	200-1 000	168	415

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

⁽²⁾ Se utiliza un valor umbral de 20 dB para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo. Medidas con antenas directivas en el transmisor (Apertura del haz en el acimut de 120° a 5,8 GHz y de 30° a 2,5 GHz y a 3,5 GHz) y antenas omnidireccionales en el receptor. La resolución del tiempo de retardo es de 100 ns.

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 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 2,5 y 15,75 GHz a distancias comprendidas entre 50 y 400 m. 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:

$$a_s = C_a d^{\gamma_a} \quad \text{ns} \quad (63)$$

y una desviación típica que viene dada por:

$$\sigma_s = C_\sigma d^{\gamma_\sigma} \quad \text{ns} \quad (64)$$

donde C_a , γ_a , C_σ y γ_σ dependen de la altura de la antena y del entorno de propagación. El Cuadro 11 enumera algunos valores típicos de los coeficientes para distancias comprendidas entre 50 y 400 m basados en mediciones efectuadas en zonas urbanas y residenciales.

CUADRO 11

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

(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.

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

$$P(t) = P_0 + 50(e^{-t/\tau} - 1) \quad \text{dB} \quad (65)$$

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 :

$$\tau = 4 S + 266 \quad \text{ns} \quad (66)$$

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 directiva

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 directivas. El patrón de entrada suprime las ondas de llegada con retardo utilizando antenas directivas 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 directivas como antenas

transmisoras y receptoras. Por estos motivos, los sistemas inalámbricos emplean antenas directivas. En consecuencia, es importante entender el efecto de la directividad de la antena en modelos multirayecto.

Las características de dispersión del retardo multirayecto 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 12 se presenta la ecuación para calcular los coeficientes relativos a la abertura del haz a potencia mitad de la antena para la fórmula (64) para distancias de 10 a 500 m, a partir de las mediciones obtenidas 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 12

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.

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° .

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.

En el Cuadro 13 se muestran los coeficientes del valor eficaz medio de la dispersión angular que se obtuvieron.

CUADRO 13

**Coefficientes típicos para las características de distancia
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	13,98	LoS
Urbana	8,45	4,4	2,7	30	11	LoS
Urbana	8,45	4,4	2,7	41	18	NLoS

5.3 Número de componentes de la señal

Para el diseño de los sistemas de gran velocidad binaria con separación multitrayecto y técnicas de síntesis, es importante estimar el número de componentes de la señal (es decir, un componente predominante más los componentes multitrayecto) 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.

5.3.1 Entornos de propagación por encima de los tejados

El Cuadro 14 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 14

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

Tipo de entorno	Resolución del retardo temporal	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 ns	1,9-2,1	46	1,7	100-1 600	1	2	1	2	2	4
	20 ns	3,35	55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	13
	20 ns	8,45	55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	12
Suburbano	175 ns	2,5	12	1	200-1 500	1	2	1	2	2	4
	175 ns	3,5	12	1	200-1 500	1	2	1	2	1	5
	50 ns	3,67	40	2,7	0-5 000	1	2	1	3	3	5
	100 ns	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 15 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 15

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 (µs)							
			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

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

El Cuadro 16 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 16
Número máximo de componentes de la señal en entornos por debajo
de la altura de los tejados

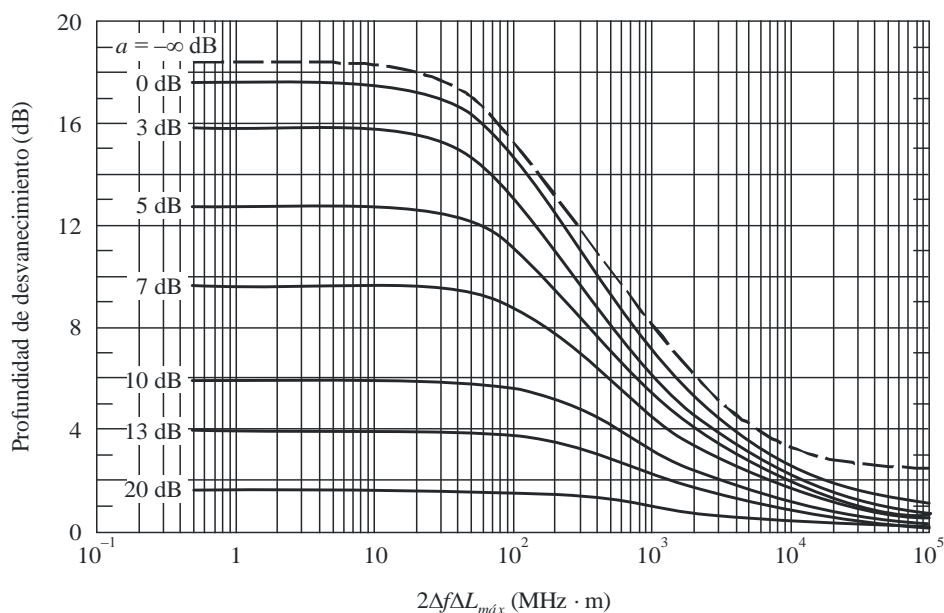
Tipo de entorno	Resolución del retardo temporal	Frecuencia (GHz)	Altura de la antena (m)		Alcance (m)	Número máximo de componentes					
			h_1	h_2		3 dB		5 dB		10 dB	
						80%	95%	80%	95%	80%	95%
Urbano	20 ns	3,35	4	1,6	0-200	2	3	2	4	5	6
					0-1 000	2	3	2	4	5	9
	20 ns	8,45	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	6
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

5.4 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. 6. $\Delta L_{m\acute{a}x}$ 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. 7. En esta figura, a se expresa en dB y es la relación de potencias 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 6

Relación entre la profundidad de desvanecimiento y $2\Delta f\Delta L_{m\acute{a}x}$

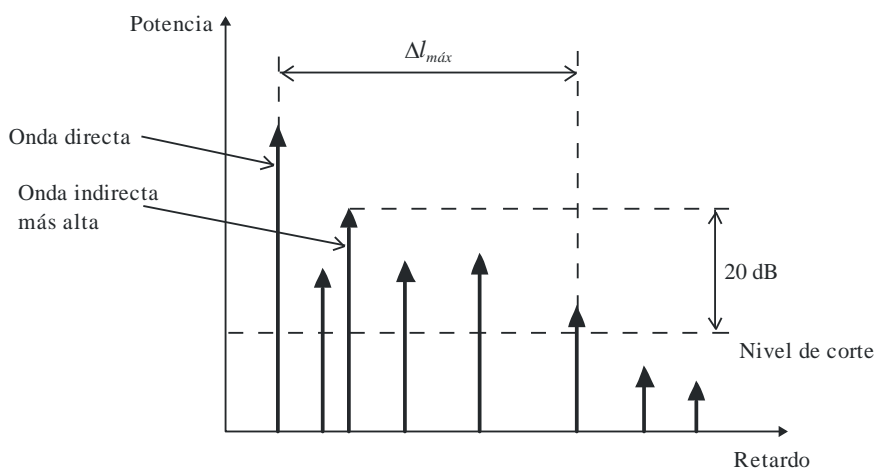


α : Rel. de potencias

P.1411-07

FIGURA 8

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



P.1411-08

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. De conformidad con la Recomendación UIT-R P.1406, esos valores medianos son compatibles con los valores en ondas decimétricas para zonas abiertas y urbanas respectivamente.

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 17. 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 17

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 (HRHD)	Por encima de 35%
	Densidad media (HRMD)	20 ~ 35%
	Densidad baja (HRLD)	Por debajo de 20%
Construcción baja (por debajo de 12 m)	Densidad alta (HRHD)	Por encima de 35%
	Densidad media (HRMD)	20 ~ 35%
	Densidad baja (HRLD)	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 $h_l > h_r$. Las definiciones de los parámetros f , d , h_r , h_l , Δh_l 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_l : $h_r + \Delta h_l$

Δh_l : 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.

$$P(h) = \frac{h}{\mu^2} \exp\left(-\frac{h^2}{2\mu^2}\right) \quad (67)$$

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 15 la reflexión y por 2 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 4 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 las edificios y de $\epsilon_r = 2,6$, $\sigma = 0,012$ S/m para los suelos.

En el Cuadro 18 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 18

**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 trayecto

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

$$PL = PL_0 + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + S \quad (\text{dB}) \quad (68)$$

$$PL_0 = -27,5 + 20 \cdot \log_{10}(f) \quad (\text{dB}) \quad (69)$$

siendo n el exponente de pérdida de trayecto. 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 trayecto para casos típicos de morfologías de 9 trayectos a partir de la modelación estadística en la banda de 3,705 GHz se resumen en el Cuadro 19. 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 19

Parámetros de pérdida de trayecto para morfologías de 9 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:

$$DS = A \cdot d^B \quad (\text{ns}) \quad (70)$$

En el Cuadro 20 se resumen los parámetros de dispersión del retardo para casos típicos de morfologías de 9 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 20

**Parámetros de dispersión del retardo para morfologías de 9 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:

$$ASD = \alpha \cdot d^{\beta} \quad (\text{grados}) \quad (71)$$

$$ASA = \gamma \cdot d^{\delta} \quad (\text{grados}) \quad (72)$$

En los Cuadros 21 y 22 se resumen los parámetros de ASD y de ASA para casos típicos en morfologías de 9 trayectos a partir de la modelación estadística en la banda de 3,705 GHz.

CUADRO 21

**Parámetros de ASD para morfologías de 9 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 22

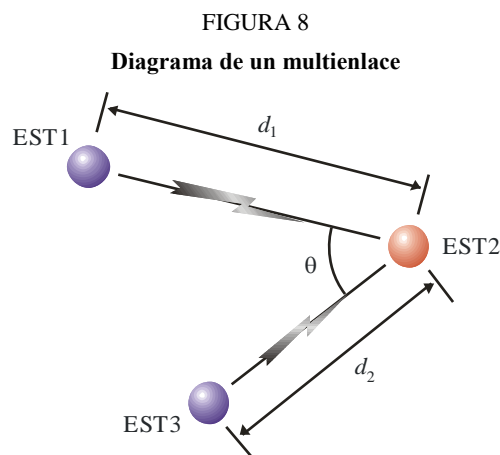
**Parámetros de ASA para morfologías de 9 trayectos
en la banda de 3,705 GHz**

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 Figura 8 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.



P.1411-08

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:

$$\tilde{d} = \log_{10} \frac{d_1}{d_2} \quad (73)$$

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:

$$0^\circ < \theta < 180^\circ, -0,3 \leq \tilde{d} \leq 0,3 \tag{74}$$

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:

$$\rho_{(DS,FK,DR,DAL)}(\theta) = A \cdot \exp(-\theta^2/B) \tag{75}$$

$$\rho_{DAS}(\theta) = A \cdot \ln(\theta) + B \tag{76}$$

En el Cuadro 23 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 23

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:

$$\rho_{(DS,FK,DR,DAL)}(\tilde{d}) = A \cdot \exp(-|\tilde{d}|/B) \quad (77)$$

$$\rho_{DAS}(\tilde{d}) = A \cdot |\tilde{d}| + B \quad (78)$$

En el Cuadro 24 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 24

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:

$$\rho_{(DS,FK,DR,DAL,DAS)}(\theta, \tilde{d}) = A \cdot \exp\left(-\frac{\theta^2}{B}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\tilde{d}^2}{C}\right) \quad (79)$$

En el Cuadro 25 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 25

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:

$$c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j) = \text{Real}\{E[(h_i(\tau_i) - \bar{h}_i(\tau_i))(h_j(\tau_j) - \bar{h}_j(\tau_j))^*]\} \quad (80)$$

donde (\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:

$$c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j) = \text{Real}\left\{ \frac{E[(h_i(\tau_i) - \bar{h}_i(\tau_i))(h_j(\tau_j) - \bar{h}_j(\tau_j))^*]}{\sqrt{E[(h_i(\tau_i) - \bar{h}_i(\tau_i))^2]} \sqrt{E[(h_j(\tau_j) - \bar{h}_j(\tau_j))^2]}} \right\} \quad (81)$$

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: $c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)$

$$\rho_{Fmáx} = \text{máx}\{c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)\} \quad (82)$$

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

$$\rho_{Fmín} = \min\{c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)\} \quad (83)$$

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

$$\rho_{Fstd} = \sqrt{\frac{1}{T_i T_j} \int (c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j) - c_{h_i h_j, media})^2 d\tau_i d\tau_j} \quad (84)$$

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:

$$\rho_F(\theta) = A \cdot \ln(\theta) + B \quad (85)$$

En el Cuadro 26 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 26

Coefficientes típicos de los modelos de correlación cruzada del desvanecimiento de corta 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
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:

$$\rho_F(\tilde{d}) = A \cdot \exp(-|\tilde{d}|/B) \quad (86)$$

En el Cuadro 27 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 27

**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	
					<i>media</i>	<i>desviación típica</i>	<i>media</i>	<i>desviación típica</i>
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	$7,1 \times 10^{-5}$