

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.681-10
(12/2017)

**Datos de propagación necesarios
para el diseño de sistemas de
telecomunicaciones móviles
terrestres Tierra-espacio**

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, 2018

© UIT 2018

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.681-10*

Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicaciones móviles terrestres Tierra-espacio

(Cuestión UIT-R 207/3)

(1990-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2009-2015-2016-2017)

Cometido

En la presente Recomendación se indican los diversos parámetros de propagación necesarios al planificar el servicio móvil terrestre por satélite (SMTS) Tierra-espacio.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para la planificación adecuada de los sistemas móviles terrestres Tierra-espacio es necesario disponer de datos de propagación y métodos de predicción adecuados;
- b) que se recomiendan los métodos de la Recomendación UIT-R P.618 para la planificación de los sistemas de telecomunicaciones Tierra-espacio;
- c) que es necesario desarrollar aún más los métodos de predicción para la aplicación específica a los sistemas móviles terrestres por satélite con el fin de ofrecer la precisión adecuada en todas las regiones del mundo y para todas las condiciones de explotación;
- d) que, sin embargo, se dispone de métodos que permiten obtener una precisión suficiente para muchas aplicaciones,

recomienda

que se adopten los métodos indicados en el Anexo 1 para la planificación de los sistemas de telecomunicaciones móviles terrestres Tierra-espacio, además de los métodos señalados en la Recomendación UIT-R P.618.

Anexo 1**1 Introducción**

Los efectos de propagación en el servicio móvil terrestre por satélite (SMTS) difieren de los del servicio fijo por satélite (SFS) debido, fundamentalmente, a la mayor importancia de las irregularidades del terreno. En el SFS normalmente es posible introducir una discriminación frente a los efectos de trayectos múltiples, sombra por obstáculos y ocultación haciendo uso de antenas muy directivas ubicadas en emplazamientos sin obstrucciones. Por consiguiente, en general el SMTS ofrece unos porcentajes de disponibilidad del enlace más reducidos que los del SFS. La gama de disponibilidad de interés fundamental para los diseñadores de sistemas normalmente oscila entre el 80% y el 99%.

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 4 de Radiocomunicaciones.

El presente Anexo se refiere a los datos y modelos necesarios específicamente para predecir las degradaciones de la propagación en los enlaces del SMTS, incluyendo los efectos troposféricos e ionosféricos, la propagación por trayectos múltiples, la ocultación y la sombra por obstáculos. Los resultados presentados en este Anexo se basan en medidas realizadas entre 870 MHz en la banda de ondas decimétricas y 20 GHz.

2 Efectos troposféricos

2.1 Atenuación

Las pérdidas de señal en la troposfera vienen causadas por los gases atmosféricos, la lluvia, la niebla y las nubes. Salvo para ángulos de elevación bajos, la atenuación troposférica es despreciable en frecuencias inferiores a 1 GHz y es generalmente baja hasta unos 10 GHz. Por encima de 10 GHz, la atenuación en algunos trayectos puede alcanzar valores importantes en periodos significativos. Existen varios métodos de predicción para estimar la atenuación debida a la absorción gaseosa (Recomendación UIT-R P.676) y a la lluvia (Recomendación UIT-R P.618). La atenuación causada por la niebla y las nubes generalmente es despreciable para frecuencias de hasta 10 GHz.

2.2 Centelleo

Las variaciones irregulares en el nivel de la señal recibida y en el ángulo de llegada están provocadas por la turbulencia troposférica y la propagación atmosférica por trayectos múltiples. La magnitud de estos efectos aumenta con la frecuencia y al disminuir el ángulo de elevación del trayecto, salvo en el caso de las fluctuaciones en el ángulo de llegada causadas por la inestabilidad, que son independientes de la frecuencia. La anchura de haz de la antena también afecta a la magnitud de estos centelleos. Estos efectos alcanzan su valor máximo durante el verano. En la Recomendación UIT-R P.618 aparece un método de predicción.

3 Efectos ionosféricos

En la Recomendación UIT-R P.531 se indican los efectos ionosféricos en los trayectos Tierra-espacio. En los Cuadros 1 y 2 de la Recomendación UIT-R P.680 figuran los valores de los efectos ionosféricos para frecuencias en la gama de 0,1 a 10 GHz.

4 Sombra por obstáculos

4.1 Modelo de sombra causada por árboles al borde del camino

Se han utilizado mediciones acumulativas de la distribución del desvanecimiento a 870 MHz, 1,6 GHz y 20 GHz para desarrollar el modelo empírico de sombra por obstáculos situados al borde del camino ampliado. La arboleda al borde del camino se representa por el porcentaje de sombra óptica causada por los árboles al borde del camino para un ángulo de elevación del trayecto de 45° en dirección de la fuente de la señal. El modelo es válido cuando este porcentaje está comprendido entre 55% y 75%.

4.1.1 Cálculo del desvanecimiento debido a la sombra por obstáculos de árboles situados al borde del camino

El procedimiento siguiente permite calcular la sombra por obstáculos (árboles) situados al borde del camino para frecuencias entre 800 MHz y 20 GHz, ángulos de elevación del trayecto de 7° a 60° y porcentajes de distancia recorrida de 1% a 80%. El modelo empírico corresponde a una condición de propagación media, siendo conducido el vehículo por ambos carriles de circulación de la

carretera (incluidos los carriles más próximos y alejados de los árboles al borde del camino). Las distribuciones del desvanecimiento previstas se aplican a carreteras y a caminos rurales donde el aspecto general del trayecto de propagación es, la mayor parte del tiempo, ortogonal a las líneas de árboles al borde del camino y de los postes telefónicos y de energía eléctrica, y se supone que la causa predominante del desvanecimiento de la señal del SMTS es la sombra causada por la obstrucción de los árboles (véase la Recomendación UIT-R P.833).

Los parámetros requeridos son los siguientes:

- f : frecuencia (GHz)
- θ : ángulo de elevación (grados) del trayecto hacia el satélite
- p : porcentaje de la distancia recorrida durante la cual se produce el desvanecimiento.

Paso 1: Calcular la distribución del desvanecimiento a 1,5 GHz, válido para los porcentajes de distancia recorrida de $20\% \geq p \geq 1\%$ y para el ángulo deseado de elevación del trayecto, $60^\circ \geq \theta \geq 20^\circ$:

$$A_L(p, \theta) = -M(\theta) \ln(p) + N(\theta) \quad (1)$$

donde:

$$M(\theta) = 3,44 + 0,0975 \theta - 0,002 \theta^2 \quad (2)$$

$$N(\theta) = -0,443 \theta + 34,76 \quad (3)$$

Paso 2: Convertir la distribución del desvanecimiento a 1,5 GHz, válido para $20\% \geq p \geq 1\%$, a la frecuencia deseada, f (GHz), donde $0,8 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$:

$$A_{20}(p, \theta, f) = A_L(p, \theta) \exp \left\{ 1,5 \left[\frac{1}{\sqrt{f_{1,5}}} - \frac{1}{\sqrt{f}} \right] \right\} \quad (4)$$

Paso 3: Calcular la distribución del desvanecimiento para los porcentajes de distancia recorrida de $80\% \geq p > 20\%$ y para la gama de frecuencias de $0,85 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$, como sigue:

$$\begin{aligned} A(p, \theta, f) &= A_{20}(20\%, \theta, f) \frac{1}{\ln 4} \ln \left(\frac{80}{p} \right) && \text{para } 80\% \geq p > 20\% \\ &= A_{20}(p, \theta, f) && \text{para } 20\% \geq p > 1\% \end{aligned} \quad (5)$$

Paso 4: Para ángulos de elevación del trayecto en la gama $20^\circ > \theta \geq 7^\circ$, se supone que la distribución del desvanecimiento tiene el mismo valor que con $\theta = 20^\circ$.

En la Fig. 1 se representa el incremento (rebasamiento) del desvanecimiento a 1,5 GHz en función de los ángulos de elevación entre 10° y 60° para una familia de curvas de igual porcentaje entre 1% y 50%.

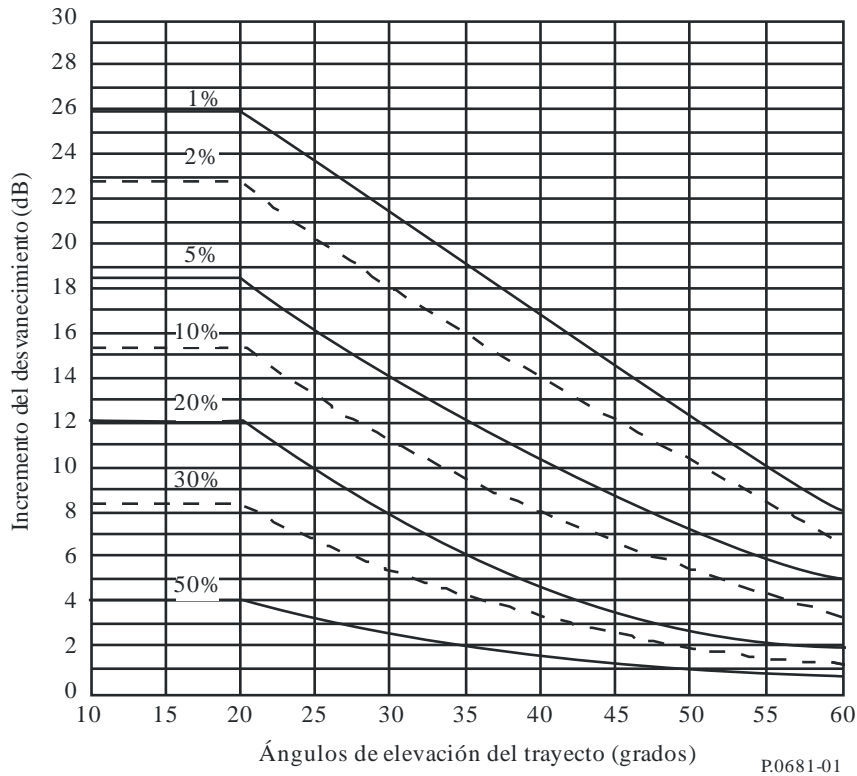
4.1.1.1 Ampliación a ángulos de elevación > 60°

El modelo de sombra por obstáculos situados al borde del camino a las frecuencias de 1,6 GHz y 2,6 GHz puede ampliarse para ángulos de elevación superiores a 60° , con el procedimiento siguiente:

- se aplican las ecuaciones (1) a (5) para un ángulo de elevación de 60° a las frecuencias citadas;
- se efectúa la interpolación lineal entre el valor calculado para el ángulo de 60° y los valores de desvanecimiento para un ángulo de elevación de 80° que figuran en el Cuadro 1;
- se efectúa la interpolación lineal entre los valores del Cuadro 1 y un valor de 0° a 90° .

FIGURA 1

Desvanecimiento a 1,5 GHz debido a la sombra por obstáculos situados al borde del camino en función del ángulo de elevación del trayecto



CUADRO 1

Incremento del desvanecimiento (dB) para 80° de elevación

p (%)	Sombra por árboles	
	1,6 GHz	2,6 GHz
1	4,1	9,0
5	2,0	5,2
10	1,5	3,8
15	1,4	3,2
20	1,3	2,8
30	1,2	2,5

4.1.1.2 Aplicación del modelo de sombra por obstáculos situados al borde del camino a los sistemas móviles por satélite con satélites no geoestacionarios (no OSG)

El método de predicción anterior se obtuvo y se aplica a las geometrías del SMTS en las que el ángulo de elevación es constante. Para los sistemas no OSG, en los que el ángulo de elevación varía, puede calcularse la disponibilidad del enlace de la siguiente manera:

- se calcula el porcentaje de tiempo, para cada ángulo de elevación (o gama de ángulos de elevación) durante el cual el terminal verá el vehículo espacial;
- para un margen de propagación determinado (la ordenada de la Fig. 1), se halla el porcentaje de indisponibilidad en cada ángulo de elevación;

- c) para cada ángulo de elevación, se multiplican los resultados de a) y b) y se divide por 100, con lo que se obtiene el porcentaje de indisponibilidad del sistema en esta elevación;
- d) se suman todos los valores de indisponibilidad obtenidos en c) para lograr la indisponibilidad total del sistema.

Si la antena utilizada en el terminal móvil no tiene un diagrama isótropo, ha de sustraerse la ganancia de antena, para cada ángulo de elevación, del margen de desvanecimiento de b) anterior.

En el caso de constelaciones de satélite con visibilidad múltiple, que emplean la diversidad de trayecto al satélite (donde se conmuta al trayecto menos degradado), puede efectuarse un cálculo aproximado suponiendo que se utiliza el vehículo espacial que ofrece el mayor ángulo de elevación.

4.1.2 Modelo de distribución de la duración del desvanecimiento

El diseño óptimo de los receptores del SMTS depende del conocimiento de las estadísticas asociadas a los tiempos de desvanecimiento, que pueden representarse en unidades de distancia recorridas (m) o (s). Las medidas del tiempo de desvanecimiento han dado como resultado el establecimiento del siguiente modelo empírico, válido para una duración del desvanecimiento en distancia $dd \geq 0,02$ m.

$$P(FD > dd | A > A_q) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(dd) - \ln(\alpha)}{\sqrt{2} \sigma} \right] \right) \quad (6)$$

donde $P(FD > dd | A > A_q)$ representa la probabilidad de que el tiempo de desvanecimiento en distancia, FD , rebase la distancia, dd (m), con la condición de que la atenuación, A , rebase el valor A_q . El término «erf» se refiere a la función error, σ es la desviación típica de $\ln(dd)$, y $\ln(\alpha)$ es el valor medio de $\ln(dd)$. El primer miembro de la ecuación (6) se determinó calculando el porcentaje de «casos de duración» que rebasan dd respecto al número total de casos para los cuales $A > A_q$. Los datos se obtuvieron a partir de medidas efectuadas en Estados Unidos de América y Australia. El mejor ajuste de los valores de regresión obtenido de estas medidas corresponden a $\alpha = 0,22$ y $\sigma = 1,215$.

En la Fig. 2 se representa P , expresado en porcentaje, p , en función de dd para un valor umbral de 5 dB.

El modelo de la ecuación (6) se basa en mediciones efectuadas con un ángulo de elevación de 51° y es aplicable a sombras entre moderadas e intensas (porcentaje de sombra óptica entre 55% y 90%). Las pruebas efectuadas a 30° y 60° pusieron de manifiesto una dependencia moderada del ángulo de elevación: cuanto menor es éste, mayor es el tiempo de desvanecimiento para un porcentaje fijo. Por ejemplo, el tiempo de desvanecimiento con 30° resultó ser aproximadamente el doble que el tiempo de desvanecimiento con 60° , al mismo nivel de porcentaje.

4.1.3 Modelo de distribución del tiempo sin desvanecimiento

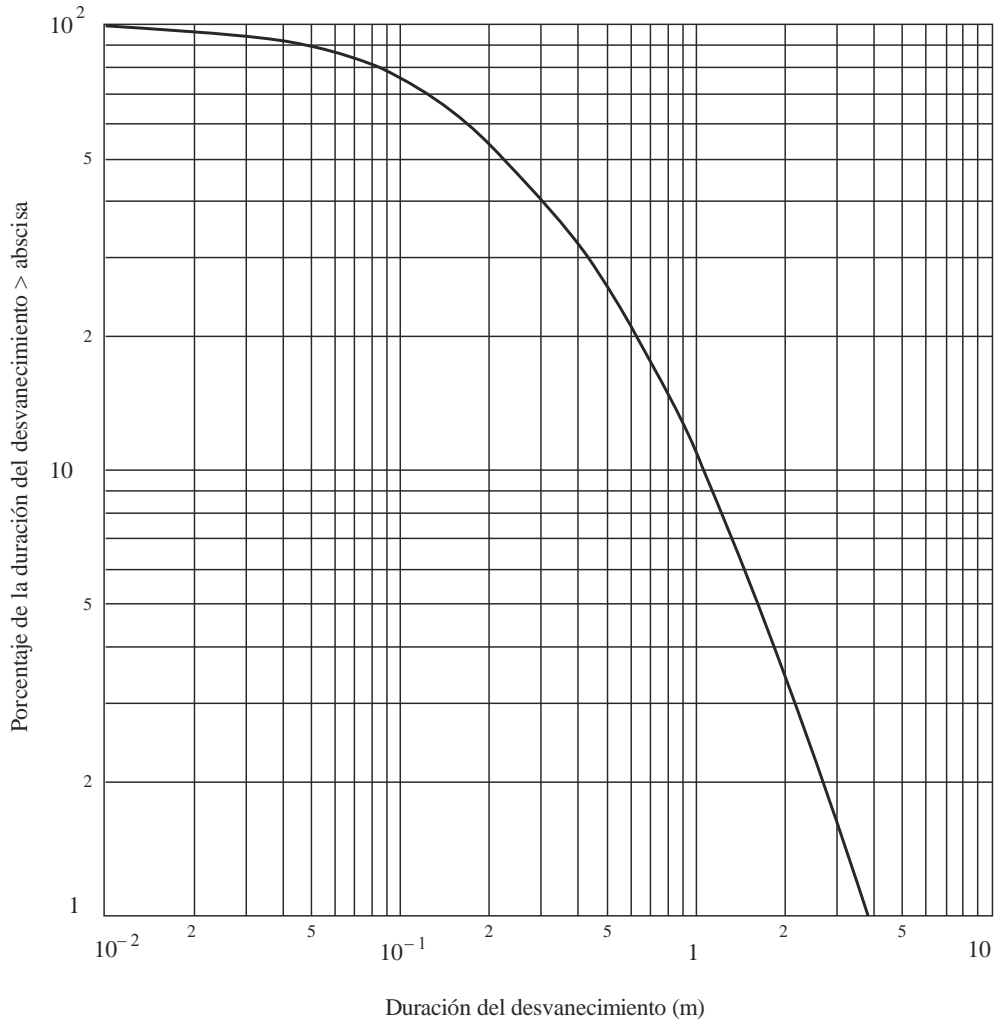
Un tiempo sin desvanecimiento en distancia, dd , se define como la distancia en la cual los niveles de desvanecimiento son inferiores a un valor umbral de desvanecimiento especificado. El modelo de duración del tiempo sin desvanecimiento viene dado por:

$$p(NFD > dd | A < A_q) = \beta (dd)^{-\gamma} \quad (7)$$

siendo $p(NFD > dd | A < A_q)$ la probabilidad en porcentaje de que una distancia continua sin desvanecimiento, NFD , rebase la distancia, dd , con la condición de que el desvanecimiento sea menor que el valor umbral, A_q . En el Cuadro 2 aparecen los valores de β y γ para trayectos con sombra moderada y extrema, es decir, con porcentajes de sombra óptica de 55%-75% y 75%-90%, respectivamente. Se ha utilizado un umbral de desvanecimiento de 5 dB para A_q .

FIGURA 2

Ajuste óptimo de la distribución acumulativa de los desvanecimientos para una sombra por árboles que bordean el camino, con un umbral de 5 dB



P0681-02

CUADRO 2

Valores de regresión del tiempo sin desvanecimiento para un umbral de desvanecimiento de 5 dB con un ángulo de elevación del trayecto de 51°

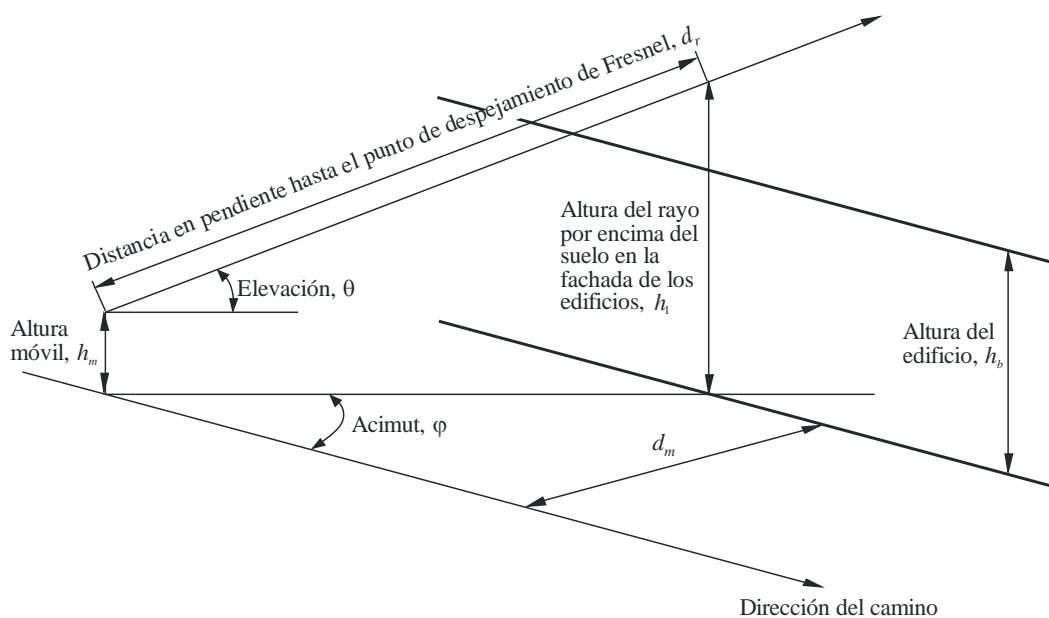
Nivel de sombra	β	γ
Moderado	20,54	0,58
Extremo	11,71	0,8371

4.2 Modelo de sombra causada por edificios situados al borde del camino

Se puede establecer un modelo de la sombra causada por los edificios situados al borde del camino en una zona urbana suponiendo una distribución Rayleigh de las alturas de esos edificios. En la Fig. 3 se muestra la representación geométrica.

FIGURA 3

Representación geométrica del modelo de sombra causada por edificios situados al borde del camino



P0681-03

El porcentaje de probabilidad de bloqueo debido a los edificios viene dado por:

$$p = 100 \exp \left[- (h_1 - h_2)^2 / 2h_b^2 \right] \quad \text{para } h_1 > h_2 \quad (8)$$

donde:

h_1 : altura del rayo por encima del suelo en la fachada de los edificios, dada por:

$$h_1 = h_m + (d_m \operatorname{tg} \theta / \operatorname{sen} \varphi) \quad (8a)$$

h_2 : distancia de despejamiento de Fresnel necesaria por encima de los edificios, dada por:

$$h_2 = C_f (\lambda d_r)^{0,5} \quad (8b)$$

h_b : altura más común de los edificios (modal)

h_m : altura del móvil por encima del suelo

θ : ángulo de elevación del rayo hacia el satélite por encima de la horizontal

φ : ángulo de acimut del rayo con respecto a la dirección de la calle

d_m : distancia del móvil a la fachada de los edificios

d_r : distancia en pendiente del móvil a la posición a lo largo del rayo que supera en sentido vertical la fachada de los edificios, dada por:

$$d_r = d_m / (\operatorname{sen} \varphi \cdot \operatorname{cos} \theta) \quad (8c)$$

C_f : despejamiento requerido como una fracción de la primera zona de Fresnel

λ : longitud de onda

y donde $h_1, h_2, h_b, h_m, d_m, d_r$ y λ son unidades autocohérentes, y $h_1 > h_2$.

Se señala que las ecuaciones (8a), (8b) y (8c) son válidas para $0 < \theta < 90^\circ$ y para $0 < \varphi < 180^\circ$. No se deberán utilizar los valores límite reales.

En la Fig. 4 se muestran ejemplos de sombra causada por edificios situados al borde del camino calculados utilizando las expresiones anteriores para:

$$h_b = 15 \text{ m}$$

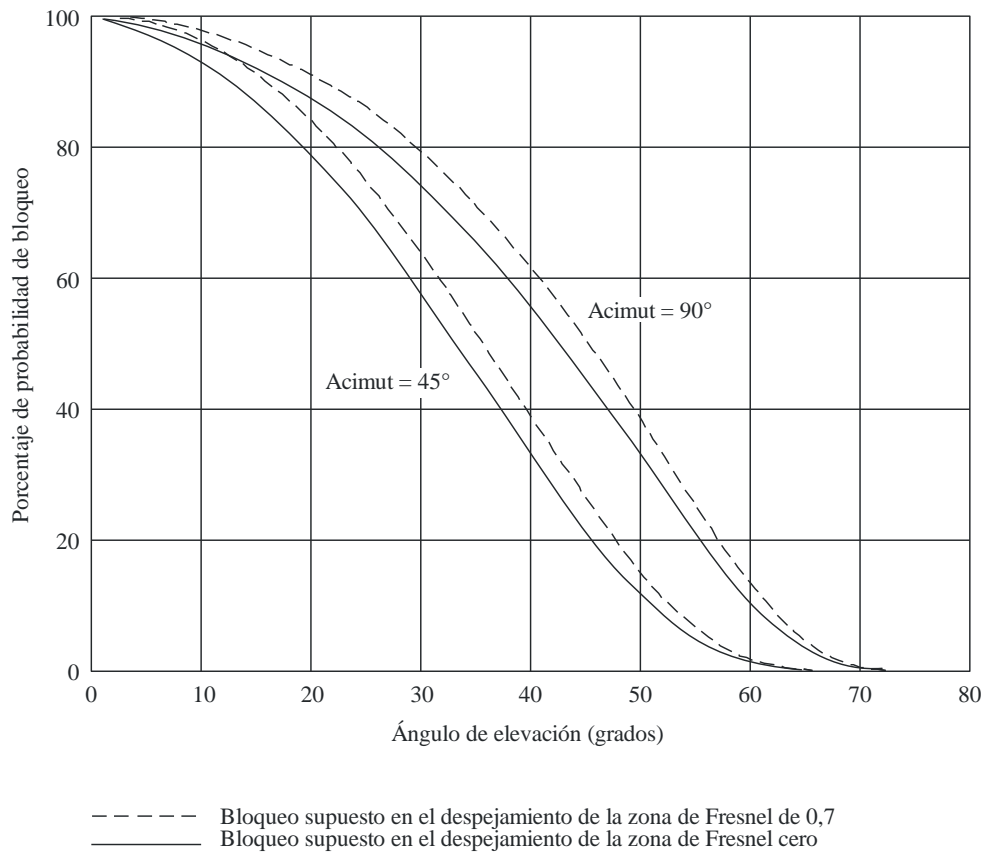
$$h_m = 1,5 \text{ m}$$

$$d_m = 17,5 \text{ m}$$

$$\text{frecuencia} = 1,6 \text{ GHz.}$$

FIGURA 4

Ejemplos de sombra causada por edificios situados al borde del camino
(véanse en el texto los valores de los parámetros)



P.0681-04

En la Fig. 4, son aplicables las líneas de puntos cuando se considera que existe bloqueo si el rayo tiene un despejamiento inferior a 0,7 de la primera zona de Fresnel en sentido vertical por encima del frente del edificio. Son aplicables las líneas de trazo continuo cuando se considera que sólo existe bloqueo en el caso de falta de visibilidad directa.

Aunque el modelo indica que no existe bloqueo en los ángulos de elevación más altos del trayecto, los usuarios deberán tener presente que puede producirse un bloqueo y sombra ocasional debida a pasos elevados, objetos que sobresalen, ramas de árboles, etc.

4.3 Consideración especial para el caso de terminales portátiles (ocultación del usuario)

Cuando se utilizan terminales portátiles, la cabeza o el cuerpo del operador en el campo próximo de la antena hace que cambie el diagrama de ésta. En el caso de los sistemas de satélite que no son de órbita baja (OSG, de órbita terrestre alta (HEO) e ICO), se espera que el usuario del terminal portátil coopere, es decir, que se sitúe de forma que se evite la ocultación provocada por la cabeza (o el cuerpo) y por el entorno. Para los sistemas de órbita terrestre baja (LEO) no puede adoptarse esta hipótesis. La influencia de la cabeza (o del cuerpo) puede evaluarse incluyendo el diagrama de antena modificado (que hay que medir) en el cálculo de la disponibilidad del enlace tal como se presentó en el § 4.1.1.2. Suponiendo que los ángulos acimutales para los que se ve el satélite están distribuidos uniformemente, puede aplicarse un diagrama de elevación con promedios de acimut. También pueden promediarse los pequeños movimientos de la cabeza o de la mano que dan lugar a pequeñas variaciones del ángulo de elevación aparente.

En relación con este efecto, se efectuó en Japón un experimento en condiciones reales. La Fig. 5a muestra la geometría de la cabeza humana y una antena utilizada en el experimento. El ángulo de elevación del satélite es de 32° y la frecuencia de la señal de éste es de 1,5 GHz. La ganancia de la antena es de 1 dBi y su longitud es de 10 cm. La Fig. 5b muestra la variación del nivel relativo de la señal en función del ángulo acimutal φ de la Fig. 5a. Puede verse en la Fig. 5b que la reducción máxima del nivel de la señal debida a la ocultación del usuario es de unos 6 dB cuando el equipo se encuentra en la región apantallada por la cabeza humana.

Los resultados de la Fig. 5b sólo tienen un fin ilustrativo, pues los datos corresponden a un solo ángulo de elevación y a un solo diagrama de antena, y no se tienen en cuenta los posibles efectos de reflexión especular que pueden desempeñar un papel significativo en un entorno de equipo portátil en el que hay poca directividad.

En la Recomendación UIT-R P.679 pueden hallarse datos de propagación relacionados con la pérdida de entrada de señal para recepción dentro de edificios y vehículos, de interés particular en el caso de terminales portátiles.

4.4 Modelización de los efectos de obstrucción causada por los edificios utilizando funciones de enmascaramiento de calles

Los efectos de bloqueo causado por los edificios también se pueden cuantificar utilizando funciones de enmascaramiento (MKF, *masking functions*) de calles que indiquen los acimuts y los ángulos de elevación para los cuales el enlace se puede o no completar. Las funciones de este tipo se han obtenido frecuentemente de estudios fotogramétricos o por medio de técnicas de trazado de rayos. El concepto de MKF puede aplicarse a casos simplificados para producir una serie limitada de funciones de enmascaramiento y, por tanto, poder realizar evaluaciones aproximadas y rápidas de la disponibilidad combinada en diferentes configuraciones de múltiples satélites.

Una determinada zona urbana podría describirse, en primera aproximación, por un ángulo de enmascaramiento, (MKA, *masking angle*) (grados).

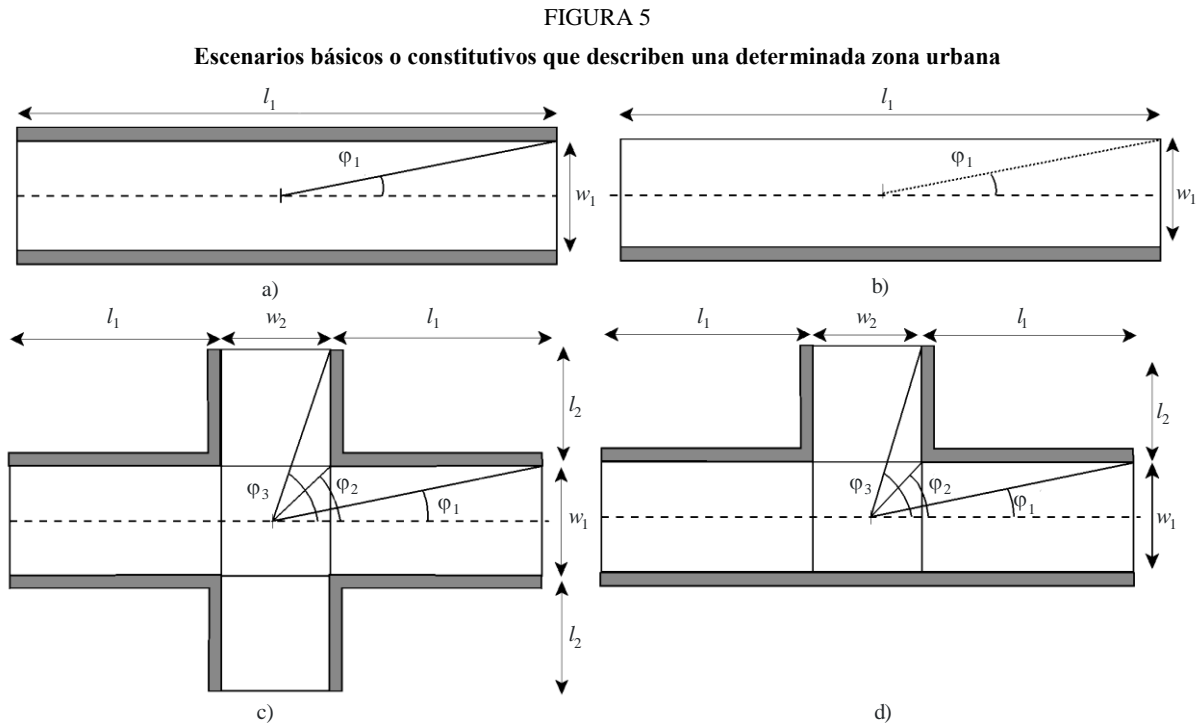
El MKA se define como el ángulo de elevación del satélite para incidencia rasante con los tejados de los edificios cuando el enlace es perpendicular a la calle o, en términos matemáticos:

$$MKA = \arctg \left(\frac{h}{w/2} \right) \quad \text{grados} \quad (9)$$

donde:

- h : altura media del edificio
- w : anchura media de la calle.

Además, puede suponerse que una zona urbana con un determinado MKA está formada por una combinación de unas pocas configuraciones típicas (escenarios básicos o constitutivos) a saber, una calle o cañón urbano (scy), un cruce (scr), una bocacalle (T-j) y una calle con edificios a un solo lado (sw), cada una con una determinada probabilidad de aparición (véase la Fig. 5). De manera similar podría definirse un vector de trayecto mixto \vec{M} que indique para una determinada zona urbana, las probabilidades de que se encuentre con cada uno de los escenarios básicos \vec{M} (w_{scy} , w_{scr} , w_{T-j} , w_{sw}), con $\sum w_i = 1$. Los datos necesarios para este modelo, es decir, el MKA, se pueden obtener de la observación del entorno o de planos de la ciudad.



P.0681-05

Si se determinan las probabilidades de disponibilidad para estos cuatro escenarios constitutivos, la disponibilidad general podría calcularse aproximadamente como la suma ponderada de las disponibilidades en cada caso:

$$a_T = w_{scy} a_{scy} + w_{scr} a_{scr} + w_{T-j} a_{T-j} + w_{sw} a_{sw} \tag{10}$$

Las MKF para estos cuatro escenarios básicos se han construido mediante una geometría sencilla y suponiendo que el usuario está en el centro (véase la Fig. 5). Considérese un modelo de propagación sencillo, del tipo todo o nada, o visibilidad directa-sin visibilidad directa (como en el § 4.2 para el caso de despejamiento nulo de la zona de Fresnel), las MKF de los cuatro escenarios urbanos constitutivos se representan en la Fig. 6, donde en ordenadas se representan los ángulos de elevación y en abscisas los ángulos acimutales o, más bien, las orientaciones de las calles, ξ , con respecto al enlace. El plano medio superior indica acimut positivo y el inferior corresponde a acimut negativo. Una MKF indica las regiones en el hemisferio celeste en las que se puede completar el enlace (sin sombra) o no (con sombra). Los contornos que delimitan las zonas «prohibidas» en las MKF se definen mediante segmentos y puntos. Los casos más significativos se ilustran en la Fig. 6 y pueden expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$S_A: \theta = \text{tg}^{-1} \left(h / \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \phi} + 1\right)} \right) \tag{11a}$$

$$P_A: \left(\varphi_A = 90^\circ; \theta_A = \text{tg}^{-1}\left(\frac{h}{w/2}\right) \right) \quad (11b)$$

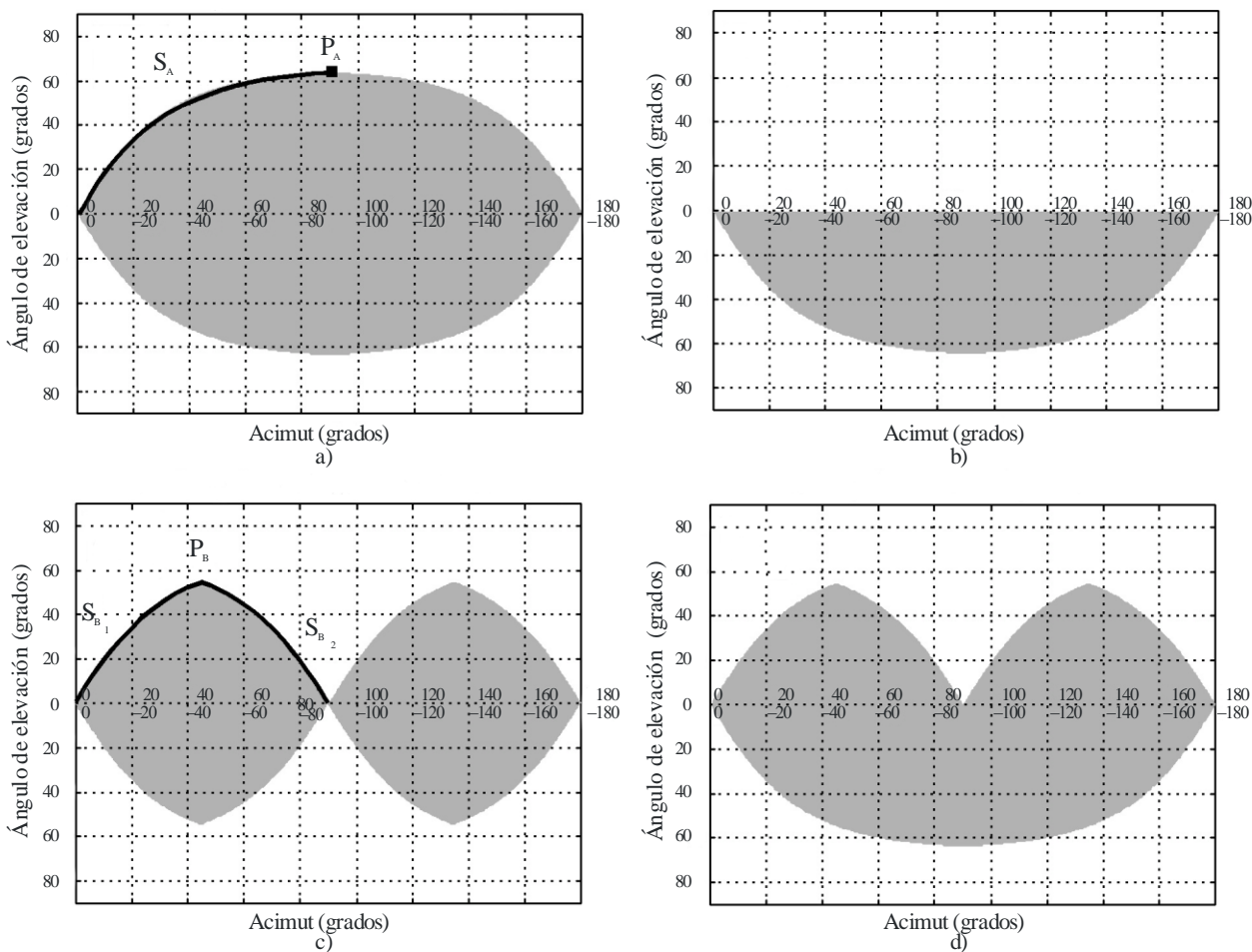
$$S_{B_1}: \theta = \text{tg}^{-1}\left(h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \varphi} + 1\right)} \right) \quad (11c)$$

$$S_{B_2}: \theta = \text{tg}^{-1}\left(h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2(90^\circ - \varphi)} + 1\right)} \right) \quad (11d)$$

$$P_B: \left(\varphi_B = \text{tg}^{-1}\left(\frac{w_1}{w_2}\right); \theta_2 = \text{tg}^{-1}\left(h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \varphi_B} + 1\right)} \right) \right) \quad (11e)$$

FIGURA 6

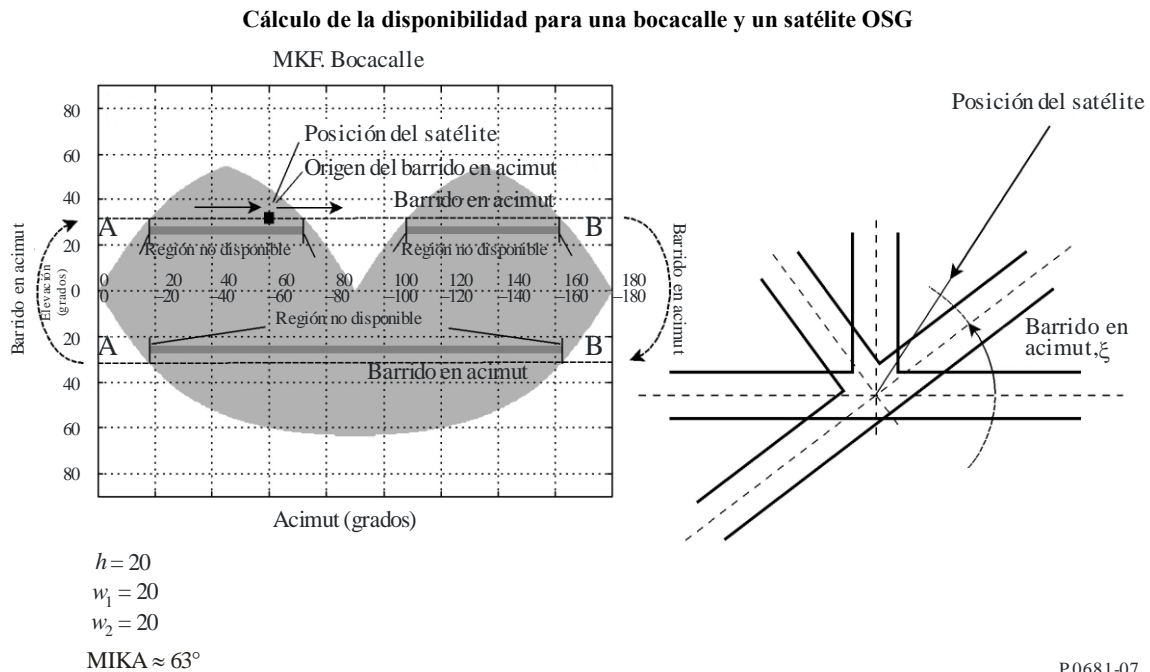
MKF de a) una calle, b) una calle con edificios en un solo lado, c) un cruce y d) una bocacalle



$h = 20$
 $w_1 = 20$
 $w_2 = 20$
 $\text{MIKA} \approx 63^\circ$

La disponibilidad correspondiente a un determinado escenario básico y a un determinado satélite OSG se puede calcular teniendo en cuenta todas las posibles orientaciones de calle, ξ , con respecto al enlace usuario-satélite. En la Fig. 7 se muestra la posición de un satélite OSG con respecto a una bocacalle. En ese caso concreto todas las orientaciones posibles se pueden describir barriendo todos los puntos en la línea A-B correspondientes a un ángulo de elevación constante y todas las posibles orientaciones de la calle. La disponibilidad viene dada por la fracción de la línea recta A-B en la parte sin sombra de la MKF. De manera similar, se puede dibujar sobre una MKF una trayectoria de órbita de satélite no OSG. La disponibilidad total se puede calcular en este caso teniendo en cuenta todas las orientaciones de calle posibles con respecto a todas las direcciones de los posibles enlaces usuario-satélite.

FIGURA 7



5 Modelos de trayectos múltiples para condiciones de visibilidad directa en medios despejados

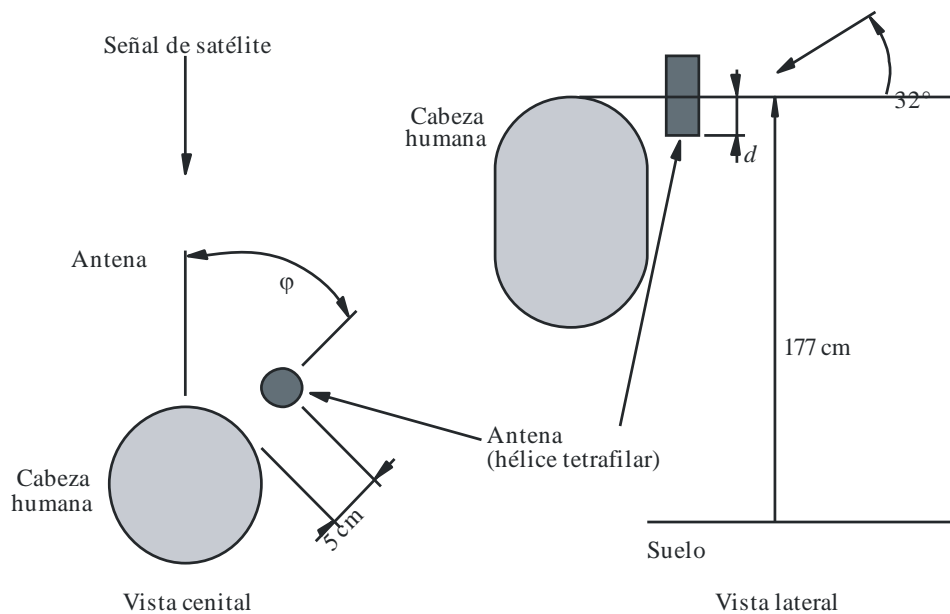
En muchos casos, el terminal móvil tiene una línea de visibilidad directa en medios despejados (sombra despreciable) hasta el satélite de servicio móvil. Aun en esas circunstancias, la señal puede sufrir degradaciones debidas a la propagación por trayectos múltiples causada por el terreno. El terminal móvil recibe una suma vectorial de la señal de visibilidad directa y de varias señales de trayectos múltiples. Estas últimas pueden sumarse de manera constructiva o destructiva dando lugar, respectivamente, a un incremento de la señal o a un desvanecimiento. Las características de la señal propagada por trayectos múltiples dependen de las secciones transversales de dispersión de los reflectores multitrayecto, de su número, de las distancias a la antena de recepción, de las polarizaciones del campo y del diagrama de ganancia de la antena de recepción.

Los modelos de degradación por trayectos múltiples presentados en los puntos siguientes se basan en medidas efectuadas con una antena de las siguientes características:

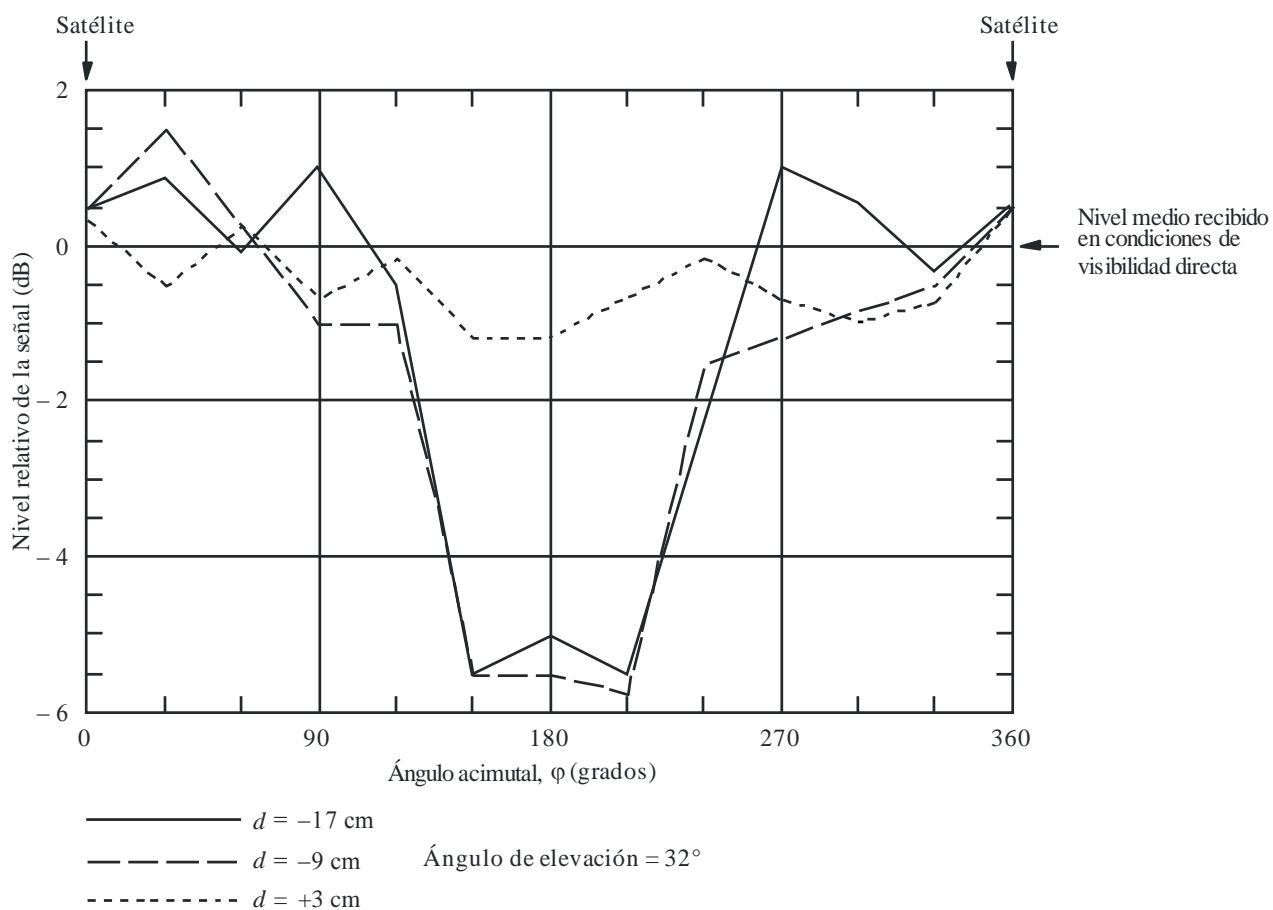
- omnidireccional en acimut;
- variación de la ganancia inferior a 3 dB entre 15° y 75° de elevación;
- por debajo del horizonte, la ganancia de antena se reduce por lo menos 10 dB (ángulos de elevación negativos).

FIGURA 8

a) Geometría de la cabeza humana y de una antena



b) Desvanecimiento a 1,5 GHz debido a la sombra por obstáculos situados al borde del camino en función del ángulo de elevación del trayecto



5.1 Trayectos múltiples en entorno montañoso

La distribución de los valores del desvanecimiento debidos a trayectos múltiples, en terreno montañoso, puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$p = a A^{-b} \quad (12)$$

para:

$$1\% < p < 10\%$$

siendo:

p : porcentaje de la distancia en la que se incrementa el desvanecimiento

A : incremento del desvanecimiento (dB).

Los parámetros de ajuste de la curva, a y b , aparecen en el Cuadro 3 para 1,5 GHz y 870 MHz. Obsérvese que este modelo es válido cuando el efecto de sombra es despreciable.

CUADRO 3

Parámetros de ajuste óptimo de la distribución del desvanecimiento acumulado debido a trayectos múltiples en terreno montañoso

Frecuencia (GHz)	Elevación = 30°			Elevación = 45°		
	a	b	Gama (dB)	a	b	Gama (dB)
0,87	34,52	1,855	2-7	31,64	2,464	2-4
1,5	33,19	1,710	2-8	39,95	2,321	2-5

En la Fig. 9 aparecen las curvas de distribución del desvanecimiento acumulado para ángulos de elevación del trayecto de 30° y 45° a 1,5 GHz y a 870 MHz.

5.2 Trayectos múltiples en un ambiente de árboles que bordean el camino

Diversos experimentos llevados a cabo a lo largo de caminos bordeados de árboles en Estados Unidos de América han demostrado que el desvanecimiento por trayectos múltiples es relativamente insensible a la elevación del trayecto en la gama de 30° a 60°. Se ha elaborado el siguiente modelo a partir de los datos medidos:

$$p = u \exp(-vA) \quad (13)$$

para:

$$1\% < p < 50\%$$

siendo:

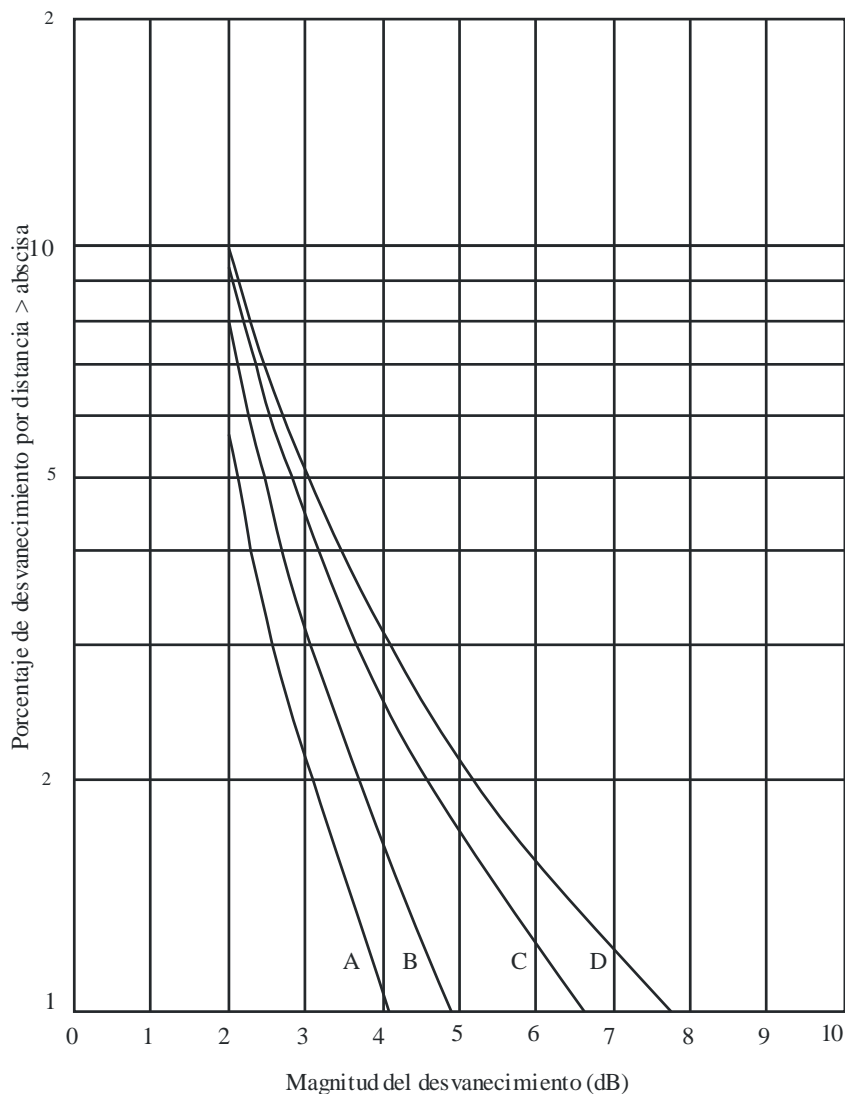
p : porcentaje de la distancia por encima de la cual se rebasa el desvanecimiento (se incrementa el desvanecimiento)

A : valor (dB) del incremento del desvanecimiento.

Cabe observar que este modelo supone una sombra despreciable. Los parámetros de ajuste de la curva, u y v , aparecen en el Cuadro 4.

FIGURA 9

Ajuste óptimo de las distribuciones del desvanecimiento acumulado para desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples en terreno montañoso



Curvas A: 870 MHz, 45°
 B: 1,5 GHz, 45°
 C: 870 MHz, 45°
 D: 1,5 GHz, 45°

P.0681-09

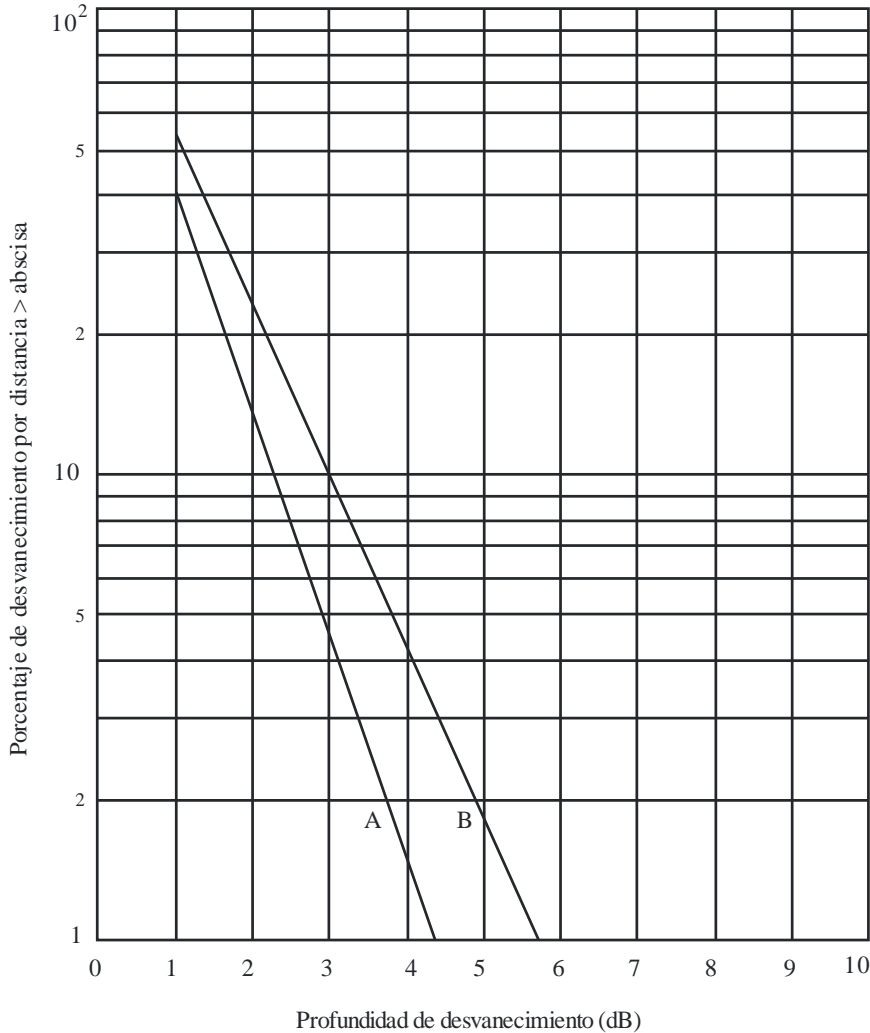
CUADRO 4

Parámetros de ajuste exponencial óptimo de las distribuciones del desvanecimiento acumulado para el caso de trayectos múltiples en caminos bordeados de árboles

Frecuencia (GHz)	<i>u</i>	<i>v</i>	Gama de desvanecimiento (dB)
0,870	125,6	1,116	1-4,5
1,5	127,7	0,8573	1-6

En la Fig. 10 se representan las curvas de las distribuciones del desvanecimiento acumulado para 1,5 GHz y para 870 MHz. Para ángulos de elevación más pequeños (5° a 30°) puede producirse un aumento en el desvanecimiento debido a los trayectos múltiples, ya que para estos ángulos pueden recibirse efectos de dispersión desde lugares situados a mayor distancia (en terrenos relativamente llanos).

FIGURA 10
Ajuste óptimo de las distribuciones del desvanecimiento acumulativo para desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples en caminos bordeados de árboles



Curvas A: 870 MHz
 B: 1,5 GHz

P.0681-10

6 Modelo estadístico para condiciones de propagación mixtas

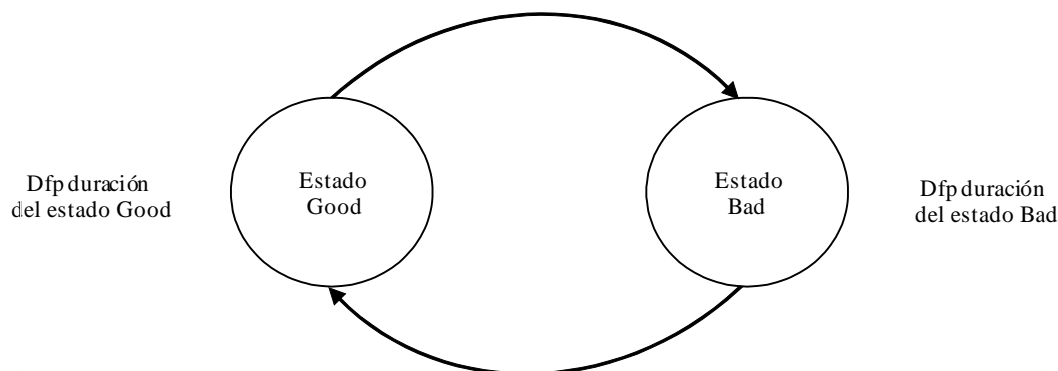
En los § 4.1 y 5 figuran modelos aplicables a condiciones específicas, a saber, condiciones de apantallamiento causado por obstáculos situados al borde del camino y condiciones de visibilidad directa en medios despejados en regiones montañosas y en entornos con árboles situados al borde del camino. En entornos de propagación reales del SMTS, tales como zonas rurales, boscosas, urbanas y suburbanas, puede producirse una combinación de condiciones de propagación diferente. La función de distribución acumulativa (FDA) de niveles de señal en esas condiciones mixtas se puede calcular mediante el modelo mejorado de dos estados, a saber, el estado GOOD, que

comprende condiciones de apantallamiento leve, y el estado BAD, que corresponde a condiciones de apantallamiento más elevadas (en adelante denominado «modelo estadístico»). Partiendo de estas mismas hipótesis analíticas, se pueden generar estocásticamente series temporales/espaciales de la envolvente compleja del nivel de potencia de la señal (en adelante denominado «modelo generativo»). En los § 6.1 y 6.2 se describen paso a paso los métodos para poner en práctica los modelos estadístico y generativo, respectivamente. Los dos modelos son válidos para el SMTS de banda estrecha en el que la respuesta en frecuencia del canal afecta por igual a todas las frecuencias dentro de la anchura de banda de la señal (canales no selectivos de frecuencia).

Las variaciones de larga duración en la señal recibida se pueden describir por una cadena semi Markov, que consta de dos estados distintos, GOOD y BAD (véase la Fig. 11). Se considera que la duración de cada estado obedece a una distribución log-normal. La señal en los estados Good y Bad obedece a una distribución de Loo. En la distribución de Loo se considera que la señal recibida es la suma de dos componentes: la señal del trayecto directo y la señal recibida por trayectos múltiples difusa. Se considera que la amplitud media del trayecto directo presenta una distribución normal y que la componente difusa de trayectos múltiples obedece a una distribución de Rayleigh. La desviación típica de la amplitud del trayecto directo y la potencia de trayectos múltiples están relacionados linealmente con la amplitud del trayecto directo medio.

FIGURA 11

Método de la cadena semi Markov de 2 estados



P.0681-11

Para la síntesis estocástica de la envolvente compleja del canal, se debe considerar una longitud de correlación fija para la amplitud del trayecto directo y un espectro Doppler fijo para la componente difusa de múltiples trayectos. Entre dos eventos sucesivos (que necesariamente pertenecen a estados diferentes), debe tenerse en cuenta una determinada longitud de transición durante la cual la potencia de la componente difusa de múltiples trayectos aumenta/disminuye linealmente. Se debe hacer caso omiso de esas transiciones en la predicción estadística de la envolvente compleja del canal.

Las principales características de este modelo son:

- 1) Se suponen dos estados: Good y Bad, que no se corresponden necesariamente con la visibilidad directa o sin visibilidad directa.
- 2) La duración del estado se caracteriza por una distribución log-normal:

$$p_{\lognormal}(x) = \frac{1}{\sigma_i x \sqrt{\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (14)$$

siendo:

- $i = G$ para el estado Good
- $i = B$ para el estado Bad
- μ_G y σ_G : desviación media y típica para el estado Good
- μ_B y σ_B : desviación media y típica para el estado Bad

- 3) El desvanecimiento dentro de cada estado se describe mediante una distribución Loo, en la que el trío de parámetros Loo no son fijos:

$$\text{Desvanecimiento} \sim \text{Loo}(M_{Ai}, \Sigma_{Ai}, MP_i),$$

siendo:

- $i = G$ para el estado Good
- $i = B$ para el estado Bad
- M_{Ai} : media de la señal directa
- Σ_{Ai} : desviación típica de la señal directa
- MP_i : media de los trayectos múltiples

con:

$$\begin{aligned} M_{Ai} &= \text{normal}(\mu_{M_A}, \sigma_{M_A}) \\ \Sigma_{Ai} &= g_{1i}M_{Ai} + g_{2i} \\ MP_i &= h_{1i}M_{Ai} + h_{2i} \end{aligned}$$

La función densidad de probabilidad de Loo es:

$$p_{Loo}(x) = \frac{x \times 8.686}{\Sigma_{Ai} \sigma_i^2 \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{a} \exp \left[-\frac{(20 \log_{10}(a) - M_{Ai})^2}{2\Sigma_{Ai}^2} - \frac{x^2 - a^2}{2\sigma_i^2} \right] I_0 \left(\frac{xa}{\sigma_i^2} \right) da \quad (15)$$

siendo

- a : amplitud de la señal directa
- $2\sigma_i^2$: potencia media recibida por trayectos múltiples, $MP_i = 10 \log(2\sigma_i^2)$ dB

- 3) La longitud de la transición $L_{trans,i}$ entre un evento GOOD y uno BAD depende de la diferencia de valores $M_{A,i}$, a saber $\Delta M_{A,i} = |M_{A,i \text{ GOOD}} - M_{A,i \text{ BAD}}|$:

$$L_{trans,i} = f_1 \times \Delta M_{A,i} + f_2 \quad (16)$$

A fin de no tener en cuenta valores no realistas de M_A en el estado GOOD y BAD, se deben considerar gamas de probabilidad limitadas:

- 5% – 95% para el estado GOOD
- $[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$ para el estado BAD.

A fin de tener en cuenta los valores realistas de la duración de los eventos en el estado GOOD y BAD, se deben considerar la mínima longitud posible del evento:

- $dur_{mínG}$ para el estado GOOD
- $dur_{mínB}$ para el estado BAD.

En los modelos estadístico y generativo se deben utilizar los siguientes parámetros.

CUADRO 5
Parámetros del modelo

Parámetro	Descripción
$(\mu, \sigma)_{G,B}$	Desviación media y típica de la distribución log-normal supuesta para la duración de los eventos (m)
$dur_{\min G,B}$	Mínima duración posible de los eventos (m)
$(\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}})$	Parámetros de la distribución $M_{AG,B}$ (siendo M_A el valor medio de la amplitud del trayecto directo A para el evento) (dB) $\Sigma_{AG,B}$
$MP = h_{1G,B} M_A + h_{2G,B}$	Potencia de trayectos múltiples, $MP_{G,B}$, (un polinomio de 1° orden para cada estado), (dB)
$\Sigma_{AG,B} = g_{1G,B} M_A + g_{2G,B}$	Desviación típica de A, $\Sigma_{AG,B}$, (un polinomio de 1° orden para cada estado)
$L_{corrG,B}^*$	Distancia de correlación de la amplitud del trayecto directo (m)
$f_1 \Delta M_A + f_2$	Longitud de la transición, L_{trans} (un solo polinomio de 1° orden), (m)
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	Gama de probabilidades que se ha de considerar para la distribución $M_{A,B}$

NOTA – G se refiere al estado GOOD y B al estado BAD.

* Sólo para modelos generativos.

6.1 Predicción de las estadísticas de desvanecimientos para un solo enlace de satélites

El procedimiento que figura a continuación permite la estimación de estadísticas de desvanecimiento totales de un enlace de propagación del SMTS para frecuencias superiores a 30 GHz con ángulos de elevación de 20° a 90°. No obstante, los valores de los parámetros propuestos que aquí se indican limitan la gama de frecuencias aplicables de 1,5 a 20 GHz en zonas urbanas y suburbanas. Se supone que la ganancia de la antena de recepción es de unos 5 dBi para frecuencias inferiores a 5 GHz y de 19 dBi para frecuencias por encima de 10 GHz.

NOTA – El método de predicción estadística se ha simplificado respecto del método de síntesis de series temporales (§ 6.2) para proporcionar un valor aproximado de las estadísticas del desvanecimiento, del factor Rice y de la potencia total. Para obtener valores más precisos, se deben calcular estadísticas a partir de las series temporales sintetizadas a lo largo de 100 km.

Parámetros:

- frecuencia (Hz);
- ambiente;
- ángulo de elevación.

Paso 0: Determinar $(\mu, \sigma)_{G,B}$, $(\mu_{M_A}, \sigma_{M_A})_{G,B}$, $(g_1, g_2)_{G,B}$, $(h_1, h_2)_{G,B}$, $(dur_{\min})_{G,B}$, (f_1, f_2) , $p_{M,\min}$ y $p_{M,\max}$ a partir de los parámetros que figuran en el Cuadro del Anexo 2. Considerar la tabla correspondiente al ángulo de elevación y la frecuencia más próximos a los valores de entrada.

Paso 1: Calcular la duración media en los estados GOOD y BAD, respectivamente $\langle dur \rangle_G$ y $\langle dur \rangle_B$, y la longitud media de la transición, $\langle dur \rangle_T$:

$$\langle dur \rangle_{G,B} = \exp\left(\mu_{G,B} + \frac{\sigma_{G,B}^2}{2}\right) \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\log dur_{\min,B,G} - (\mu_{G,B} + \sigma_{G,B}^2)}{\sigma_{G,B}}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\log dur_{\min,B,G} - \mu_{G,B}}{\sigma_{G,B}}\right)} \quad (17a)$$

$$\langle dur \rangle_T = f_1 \times \left(\mu_{M_A,G} - \mu_{M_A,B} - \sigma_{M_A,B}^2 \times \frac{p_N(M_{A,\min}; \mu_{M_A,B}, \sigma_{M_A,B}) - p_N(M_{A,\max}; \mu_{M_A,B}, \sigma_{M_A,B})}{F_N(M_{A,\max}; \mu_{M_A,B}) - F_N(M_{A,\min}; \mu_{M_A,B}, \sigma_{M_A,B})} \right) + f_2 \quad (17b)$$

Siendo:

$p_N(x; \mu, \sigma)$ y $F_N(x; \mu, \sigma)$ respectivamente la función densidad de probabilidad y la función distribución acumulativa de una distribución normal cuya media μ y desviación típica σ se definen en la Recomendación UIT-R P.1057.

$$M_{A,mín,B} = \mu_{M_{A,B}} + \sqrt{2}\sigma_{M_{A,B}} \operatorname{erf}^{-1}(2p_{B,mín} - 1) \quad (18a)$$

$$M_{A,máx,B} = \mu_{M_{A,B}} + \sqrt{2}\sigma_{M_{A,B}} \operatorname{erf}^{-1}(2p_{B,máx} - 1) \quad (18b)$$

Paso 2: Calcular la probabilidad de los estados GOOD y BAD p_G y p_B :

$$p_G = \frac{\langle dur \rangle_G + \langle dur \rangle_T}{\langle dur \rangle_G + \langle dur \rangle_B + 2\langle dur \rangle_T} \quad (19a)$$

$$p_B = \frac{\langle dur \rangle_B + \langle dur \rangle_T}{\langle dur \rangle_G + \langle dur \rangle_B + 2\langle dur \rangle_T} \quad (19b)$$

Paso 3: Calcular $P(x \leq x_0 | GOOD)$ y $P(x \leq x_0 | BAD)$ la distribución acumulativa del nivel de la señal x en los estados GOOD y BAD, del modo siguiente:

$$P(x \leq x_0 | estado) = \frac{2.7647}{\sigma_{M_A} \left(F_N(M_{A,max}; \mu_{M_A}, \sigma_{M_A}) - F_N(M_{A,min}; \mu_{M_A}, \sigma_{M_A}) \right)} \int_{M_{A,min}}^{M_{A,max}} \int_0^{x_0} \int_{a_{min}}^{a_{max}} \frac{x}{a(g_1 M_A + g_2) 10^{\frac{h_1 M_A + h_2}{10}}} \times \exp \left(-\frac{(M_A - \mu_{M_A})^2}{2\sigma_{M_A}^2} - \frac{(20 \log_{10} a - M_A)^2}{2(g_1 M_A + g_2)^2} - \frac{x^2 + a^2}{10^{\frac{h_1 M_A + h_2}{10}}} \right) I_0 \left(\frac{2ax}{10^{\frac{h_1 M_A + h_2}{10}}} \right) da dx dM_A \quad (20a)$$

siendo

Parámetro	Estado GOOD	Estado BAD
$M_{A,mín}$	$\mu_{M_{A,G}} - 1,645 \times \sigma_{M_{A,G}}$	$M_{A,mín,B}$
$M_{A,máx}$	$\mu_{M_{A,G}} + 1,645 \times \sigma_{M_{A,G}}$	$M_{A,máx,B}$
$a_{mín}$	$10^{\frac{(1-3g_1)M_A - 3g_2}{20}}$	
$a_{máx}$		

Obsérvese que σ_{M_A} puede ser igual a cero (como por ejemplo en los buenos estados de entornos rurales y suburbanos para $f = 10 - 20$ GHz). En tal caso, M_A no está distribuida aleatoriamente, lo que cambia la expresión de CDF (sólo se integra para M_a). Así, la distribución acumulativa se convierte en (con: $M_A = \mu_{M_A}$).

$$P(x \leq x_0 | estado) = \frac{2 \times 8,686}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} \int_{a_{min}}^{a_{max}} \frac{x}{a(g_1 M_A + g_2) 10^{\frac{h_1 M_A + h_2}{10}}} \times \exp \left(-\frac{(20 \log_{10} a - M_A)^2}{2(g_1 M_A + g_2)^2} - \frac{x^2 + a^2}{10^{\frac{h_1 M_A + h_2}{10}}} \right) I_0 \left(\frac{2ax}{10^{\frac{h_1 M_A + h_2}{10}}} \right) da dx \quad (20b)$$

Paso 4: Calcular $P(x \leq x_0)$ la distribución acumulativa del nivel de la señal x , así:

$$P(x \leq x_0) = p_G \times P(x \leq x_0 | GOOD) + p_B \times P(x \leq x_0 | BAD) \quad (21)$$

Paso 5: Calcular $P(K \leq K_0|GOOD)$ y $P(K \leq K_0|BAD)$ la distribución acumulativa del factor Rice (dB) K en los estados GOOD y BAD, mediante la siguiente expresión:

Si $\sigma_{M_A} \neq 0$

$$P(K \leq K_0|estado) = \frac{\int_{M_{A,min}}^{M_{A,max}} \exp\left(\frac{-(M_A - \mu_{M_A})^2}{2\sigma_{M_A}^2}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{K_0 - ((1 - h_1)M_A - h_2)}{(g_1 M_A + g_2)\sqrt{2}}\right)\right] dM_A}{\sigma_{M_A} \left(F_N(M_{A,max}; \mu_{M_A}, \sigma_{M_A}) - F_N(M_{A,min}; \mu_{M_A}, \sigma_{M_A})\right) 2\sqrt{2\pi}} \quad (22a)$$

Si $\sigma_{M_A} = 0$,

$$P(K \leq K_0|estado) = \frac{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{K_0 - ((1 - h_1)M_A - h_2)}{(g_1 M_A + g_2)\sqrt{2}}\right)}{2} \quad (22b)$$

Paso 6: Calcular $P(K \leq K_0)$ la distribución acumulativa del factor Rice K , del modo siguiente:

$$P(K \leq K_0) = p_G \times P(K \leq K_0|GOOD) + p_B \times P(K \leq K_0|BAD) \quad (23)$$

Paso 7: Calcular $P(p_t \leq p_{t,0}|GOOD)$ y $P(p_t \leq p_{t,0}|BAD)$ la distribución acumulativa de la potencia total p_t (potencia del trayecto directo más potencia difusa de trayectos múltiples) en los estados GOOD y BAD del modo siguiente:

Para $h_1 \geq 0$:

$$\text{Si } \frac{10 \log p_{t,0} - h_2}{h_1} < M_{A,min}, P(p_t \leq p_{t,0}|estado) = 0 \quad (24a)$$

Si $\frac{10 \log p_{t,0} - h_2}{h_1} \geq M_{A,min}$ y $\sigma_{M_A} \neq 0$

$$P(p_t \leq p_{t,0}|estado) = \frac{\int_{M_{A,min}}^{\min\{M_{A,max}, \frac{10 \log p_{t,0} - h_2}{h_1}\}} \exp\left(\frac{-(M_A - \mu_{M_A})^2}{2\sigma_{M_A}^2}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{10 \log\left(p_{t,0} - 10^{-\frac{h_1 M_A + h_2}{10}}\right) - M_A}{(g_1 M_A + g_2)\sqrt{2}}\right)\right] dM_A}{\sigma_{M_A} \left(F_N(M_{A,max}; \mu_{M_A}, \sigma_{M_A}) - F_N(M_{A,min}; \mu_{M_A}, \sigma_{M_A})\right) 2\sqrt{2\pi}} \quad (24b)$$

Para $h_1 < 0$:

$$\text{Si } \frac{10 \log p_{t,0} - h_2}{h_1} > M_{A,max}, P(p_t \leq p_{t,0}|estado) = 0 \quad (24c)$$

Si $\frac{10 \log p_{t,0} - h_2}{h_1} \leq M_{A,max}$, y $\sigma_{M_A} \neq 0$

$$P(p_t \leq p_{t,0}|estado) = \frac{\int_{\max\{M_{A,min}, \frac{10 \log p_{t,0} - h_2}{h_1}\}}^{M_{A,max}} \exp\left(\frac{-(M_A - \mu_{M_A})^2}{2\sigma_{M_A}^2}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{10 \log\left(p_{t,0} - 10^{-\frac{h_1 M_A + h_2}{10}}\right) - M_A}{(g_1 M_A + g_2)\sqrt{2}}\right)\right] dM_A}{\sigma_{M_A} \left(F_N(M_{A,max}; \mu_{M_A}, \sigma_{M_A}) - F_N(M_{A,min}; \mu_{M_A}, \sigma_{M_A})\right) 2\sqrt{2\pi}} \quad (24d)$$

Si $\sigma_{M_A} = 0$,

$$P(p_t \leq p_{t,0} | estado) = \frac{1 + \operatorname{erf} \left(\frac{10 \log \left(p_{t,0}^{-10} \frac{h_1 M_A + h_2}{10} \right) - M_A}{(\theta_1 M_A + \theta_2) \sqrt{2}} \right)}{2} \quad (24e)$$

Paso 8: Calcular $P(p_t \leq p_{t,0})$ la distribución acumulativa de la potencia total p_t así:

$$P(p_t \leq p_{t,0}) = p_G \times P(p_t \leq p_{t,0} | GOOD) + p_B \times P(p_t \leq p_{t,0} | BAD) \quad (25)$$

Las Figs. 12, 13 y 14 muestran ejemplos de cálculo de la FDA para parámetros urbanos y suburbanos (Europa) a ángulos de elevación 30° y 60° y a frecuencias comprendidas entre 1,5 y 3 GHz.

FIGURA 12

Ejemplos calculados del desvanecimiento profundo en zonas urbanas y suburbanas a ángulos de elevación de 30° y 60° (Europa; 1,5-3 GHz; ganancia de la antena < 5 dBi)

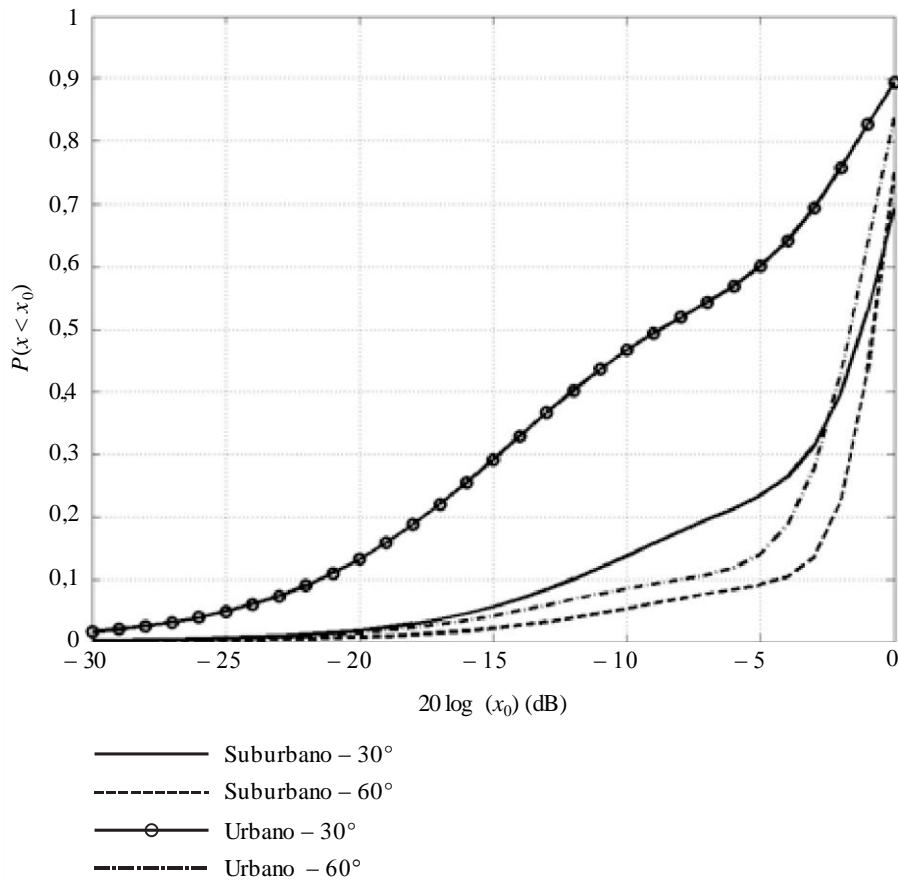


FIGURA 13

Ejemplos calculados del desvanecimiento del factor Rice en zonas urbanas y suburbanas a ángulos de elevación de 30° y 60° (Europa; 1,5-3 GHz; ganancia de la antena < 5 dBi)

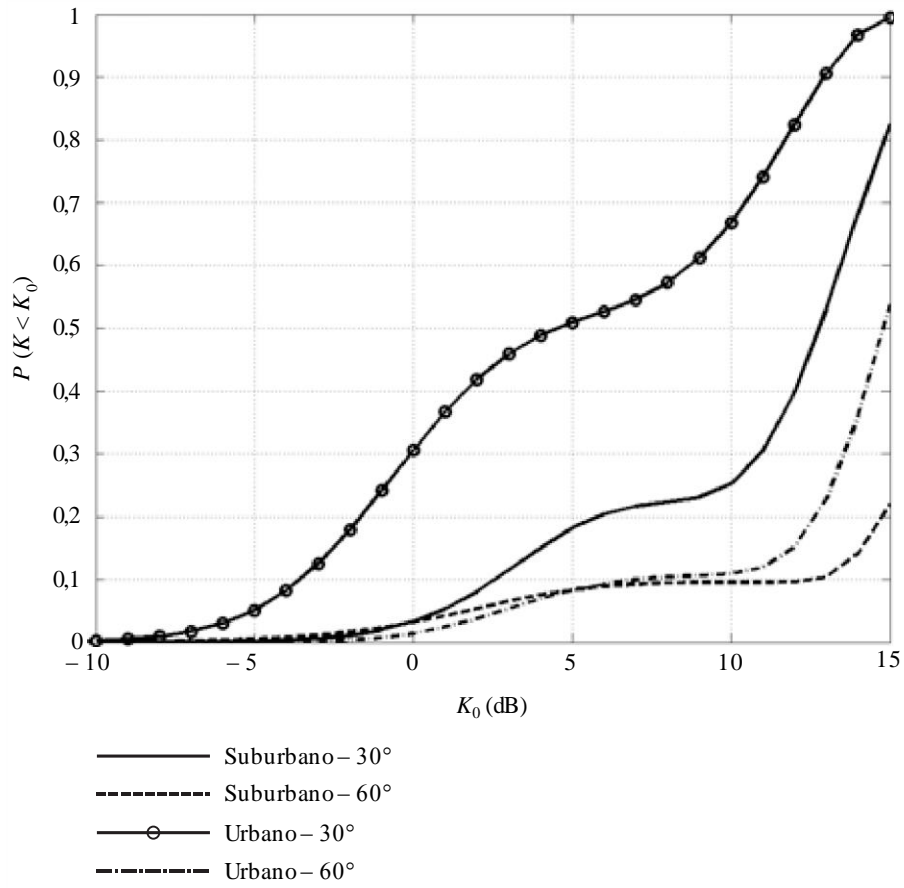
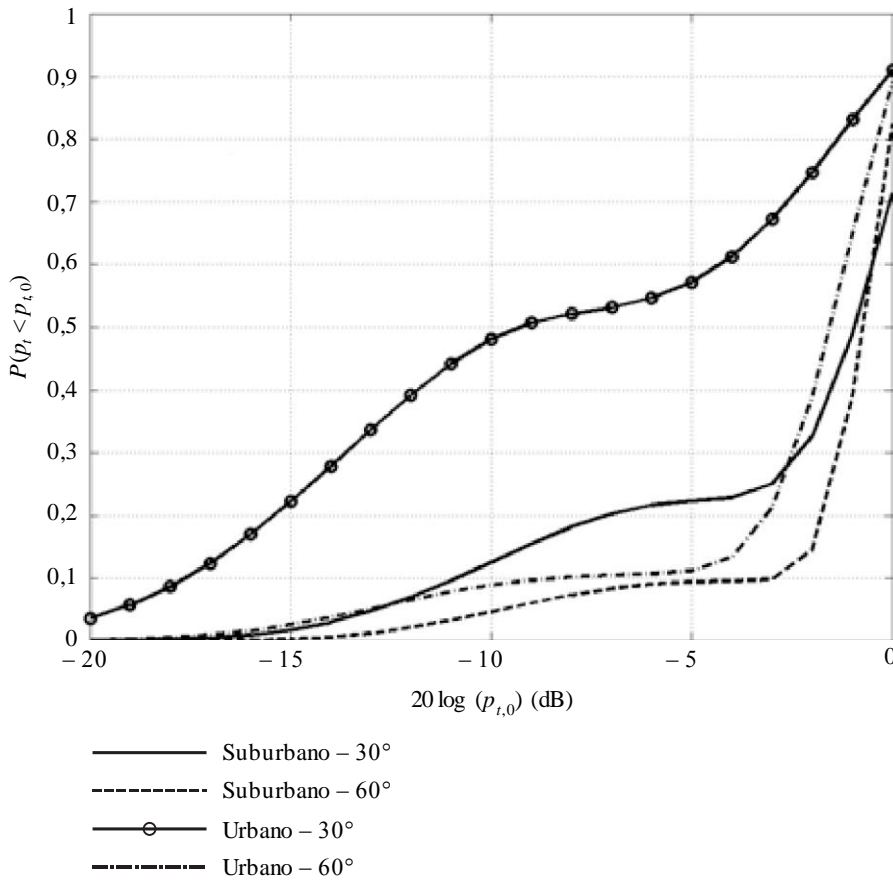


FIGURA 14

Ejemplos calculados del desvanecimiento de la potencia total en zonas urbanas y suburbanas a ángulos de elevación de 30° y 60° (Europa; 1,5-3 GHz; ganancia de la antena < 5 dBi)



P.0681-4

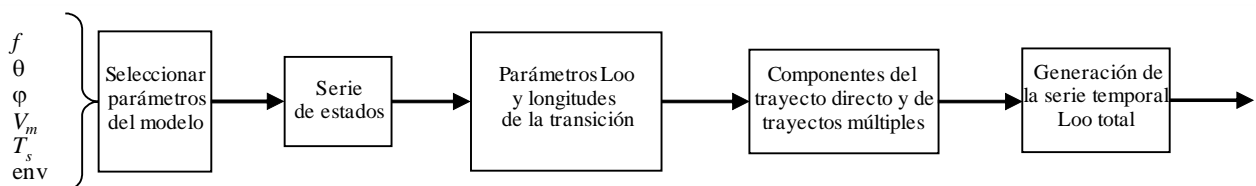
6.2 Síntesis de series temporales de la envolvente compleja del desvanecimiento

El cálculo del rendimiento de receptores del SMTS requiere la síntesis estocástica de series temporales realistas de la envolvente compleja del canal. Debe utilizarse el modelo de 2 estados semi-Markov para simular las variaciones en el tiempo del SMTS del canal en el caso de un solo satélite OSG.

La Fig. 15 muestra el diagrama de bloques del simulador para generar series temporales/espaciales de la envolvente de potencia recibida.

FIGURA 15

Diagrama de bloques del simulador



P.0681-5

A continuación se describe paso a paso la generación de series temporales de la envolvente compleja de potencia:

Entradas:

- frecuencia f (Hz);
- ángulo de elevación θ ($^\circ$);
- acimut/orientación de la ruta φ ($^\circ$);
- entorno;
- tiempo de muestreo T_s (s);
- velocidad del móvil v_m (m.s $^{-1}$).

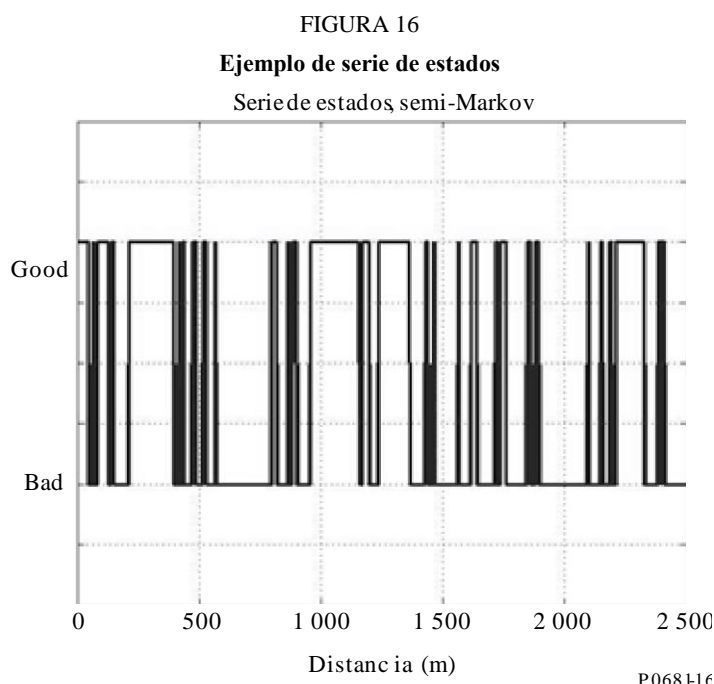
Paso 0: Seleccionar los parámetros del modelo $(\mu, \sigma)_{G,B}$, $(\mu_{MA}, \sigma_{MA})_{G,B}$, $(g_1, g_2)_{G,B}$, $(h_1, h_2)_{G,B}$, $(dur_{min})_{G,B}$, $(L_{corr})_{G,B}$, f_1 , f_2 , $conf_{B,min}$, $conf_{B,máx}$ en función de las entradas. Considerar el cuadro correspondiente al ángulo de elevación y frecuencia más próximos a los valores de entrada. En el Cuadro 5 se muestra un ejemplo de parámetros del modelo.

Paso 1: Generación de la serie de estados. La serie de estados consiste en series de eventos Good y Bad. La duración de cada evento se genera con una distribución log-normal. Si se obtiene un valor inferior a dur_{min} , se deben obtener aleatoriamente nuevos valores hasta que se obtenga un valor mayor que el valor del parámetro.

$$State_duration_G \sim \text{lognormal}(\mu_G, \sigma_G)$$

$$State_duration_B \sim \text{lognormal}(\mu_B, \sigma_B)$$

La Fig. 16 muestra un ejemplo de una serie de estados, en la que los eventos Good y Bad tienen duraciones diferentes.



Paso 2: Generar el trío de parámetros Loo (M_A, Σ_A, MP) para cada estado y las longitudes de la transición (L_{trans}) entre estados. Si se obtiene un valor M_A fuera de la gama $[\mu_{MA,G} - 1,645\sigma_{MA,G}; \mu_{MA,G} + 1,645\sigma_{MA,G}]$ para el estado GOOD y fuera de la gama $[\mu_{MA,B} + \sqrt{2}\sigma_{MA,B} \text{erf}^{-1}(2p_{B,min} - 1); \mu_{MA,B} + \sqrt{2}\sigma_{MA,B} \text{erf}^{-1}(2p_{B,máx} - 1)]$ para el estado BAD, se deben obtener aleatoriamente nuevos valores hasta que se obtenga uno dentro de esta gama.

CUADRO 6

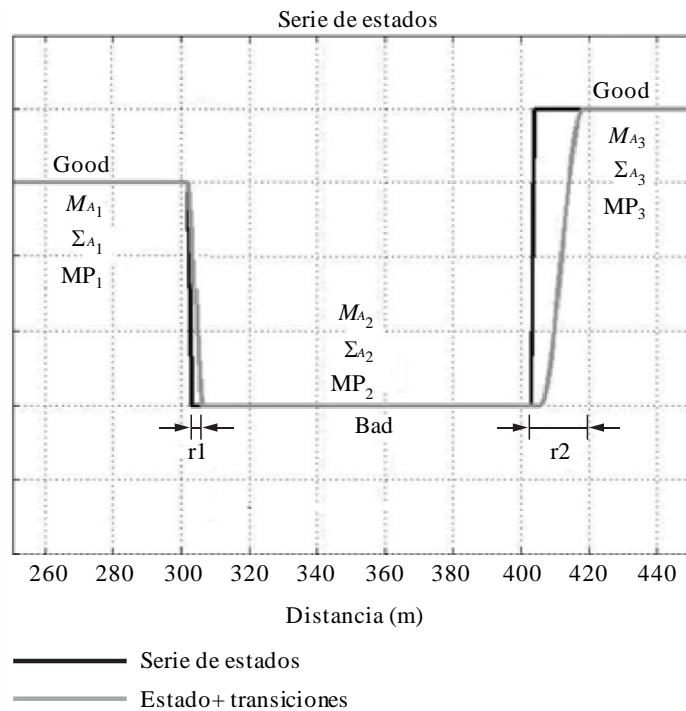
Eventos Good	Eventos Bad
$M_{AGi} = \text{Normal}(\mu_{M_{A,G}}, \sigma_{M_{A,G}})$	$M_{ABi} = \text{Normal}(\mu_{M_{A,B}}, \sigma_{M_{A,B}})$
$\Sigma_{AGi} = g_{1G} * M_{AGi} + g_{2G}$	$\Sigma_{ABi} = g_{1B} * M_{ABi} + g_{2B}$
$MP_{Gi} = h_{1G} * M_{AGi} + h_{2G}$	$MP_{Bi} = h_{1B} * M_{ABi} + h_{2B}$

Añadir las longitudes de la transición L_{trans} entre estados (véase la Fig. 17):

$$L_{trans} = f_1 / M_{Ai} - M_{Ai+1} / + f_2 \quad (m) \quad (26)$$

FIGURA 17

Ejemplo del trío de parámetros Loo para cada estado e inserción de las longitudes de la transición entre estados



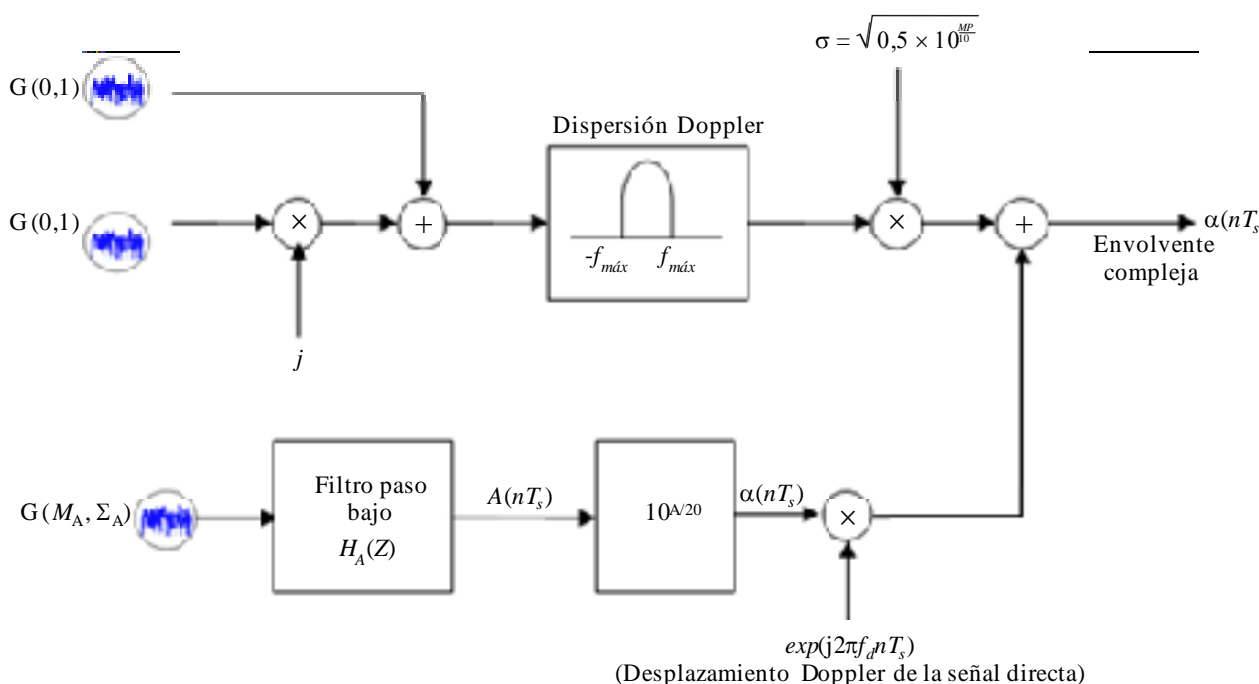
P0681-17

Paso 3: Genera series temporales totales de Loo.

Las variaciones de la señal compleja pueden producirse utilizando un generador de series temporales Loo. En la Fig. 18 se muestra un diagrama. Los parámetros del circuito se actualizan para la generación de series temporales en cada estado.

Durante la transición, los parámetros Loo obtenidos para los estados GOOD y BAD alrededor de la transición se interpolan linealmente (dB).

FIGURA 18
 Generador de series temporales Loo



P06811

La entrada de más arriba genera las variaciones rápidas de trayectos múltiples y la de abajo las variaciones lentas de la señal directa.

En la entrada de arriba, dos series gaussianas de desviación típica unitaria y media cero en cuadratura se hacen pasar por un filtro Doppler de energía unitaria. A la salida del filtro Doppler, la serie compleja resultante se multiplica por σ , siendo $2\sigma^2$ el valor eficaz o cuadrático medio de las variaciones de múltiples trayectos.

La entrada de abajo realiza la simulación de las variaciones de fase y de amplitud de la señal directa. En primer lugar, se genera una distribución gaussiana de media M_A (dB) y desviación típica Σ_A (dB). En segundo lugar la serie, en unidades de dB, se convierte a unidades lineales.

En tercer lugar, se introducen variaciones de fase en la señal directa. Estas variaciones se suponen lineales y que general una línea espectral Doppler constante que depende de la velocidad relativa entre el satélite y el móvil y del ángulo de incidencia, acimut y elevación, respecto de la trayectoria del móvil.

La frecuencia de la línea espectral Doppler viene dado por:

$$f_d = (f \times v_m / c) \cos\phi \cdot \cos\theta \tag{27}$$

Las variaciones rápidas obedecen a la dispersión Doppler debida principalmente al movimiento del terminal. Dependiendo del diagrama de la antena, para generar las variaciones rápidas debe utilizarse un modelo Jakes.

El filtro Jakes se define así:

$$\begin{cases} S(f) = \frac{K}{\pi f_m \sqrt{1 - (f/f_m)^2}} & \text{for } |f| < f_m \\ S(f) = 0 & \text{for } |f| \geq f_m \end{cases} \tag{28}$$

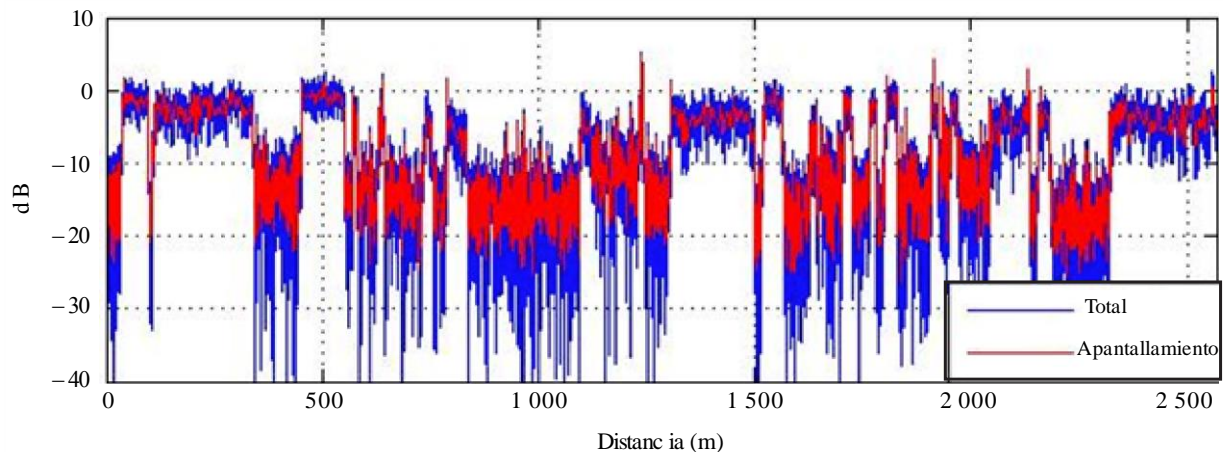
siendo $f_m = v_m \times f/c$ y K un parámetro de normalización que garantiza que el filtrado no altera la potencia del proceso.

La amplitud de la señal directa está sujeta a variaciones más lentas que las debidas a trayectos múltiples resultantes del apantallamiento. En esta implementación, la velocidad de cambio de las variaciones lentas se caracteriza por la longitud de correlación, L_{corrG} para estados Good o L_{corrB} para estados Bad. Sea $v_m T_s$ distancia de muestreo de los trayectos múltiples, la serie temporal del apantallamiento correlacionado se genera mediante el siguiente filtro paso bajo numérico:

$$H_A(Z) = \frac{\sqrt{1-\rho_s^2}}{1-\rho_s Z^{-1}} \quad \text{con} \quad \rho_s = \exp\left(\frac{-v_m T_s}{L_{corr}}\right) \quad (29)$$

La Fig. 19 muestra un ejemplo de serie temporal generada (convertida en serie espacial).

FIGURA 19
Ejemplo de serie espacial generada



P.0681-9

7 Modelo físico-estadístico de banda ancha para condiciones de propagación mixtas

En § 6 se describe un modelo estadístico de banda estrecha para el SMTS en distintos entornos. En el caso del SMTS de banda ancha con un canal de propagación por trayectos múltiples en el que cada frecuencia dentro de la banda de la señal se ve afectada por el canal de manera diferente (canales selectivos de frecuencia), resulta más conveniente utilizar un modelo generativo que aplique un filtro lineal transversal cuyo resultado sea la suma de las versiones retrasada, atenuada y con desplazamiento de fase de la señal de entrada (modelo de banda ancha). Las definiciones de los términos relacionados con la propagación por trayectos múltiples figuran en la Recomendación UIT-R P.1407.

El modelo está concebido para aquellas situaciones en las que un satélite transmite desde una posición conocida a un receptor situado en tierra, y para las que puede calcularse el ángulo de elevación ε y el acimut φ respecto a la orientación y posición del receptor. El modelo sirve para frecuencias comprendidas entre 1 y 2 GHz y para sistemas de anchura de banda de hasta 100 MHz. El modelo se basa en parámetros deterministas y estocásticos y es capaz de generar vectores que incluyen series temporales complejas de la envolvente de la señal directa y de las reflexiones, con los correspondientes vectores de retardo en el trayecto. Los parámetros que determinan el comportamiento estocástico del modelo se obtienen de las medidas realizadas en un determinado caso. La geometría del modelo se basa en la representación del entorno sintético.

El modelo del canal consta de una combinación de las siguientes partes (concebidas para la simulación realista de la propagación en muchos escenarios de propagación de interés, y comprobado ulteriormente mediante el análisis empírico basado en datos medidos):

- Sombra de la señal directa:
 - módulo fachada del edificio;
 - módulo árbol;
 - módulo poste de la luz.
- Módulo reflexiones.

En la Fig. 20 se ilustra la estructura del modelo, incluidas las señales de entrada, intermedias y de salida que varían con el tiempo:

$v_u(t)$: velocidad del usuario

$hd_u(t)$: dirección del usuario

$el_s(t)$: elevación del satélite

$az_s(t)$: acimut del satélite

$x_u(t)$: posición del usuario en el eje x (los ejes y y z se consideran constantes)

$az_u(t)$: acimut del usuario

$y_i(t)$: señales de salida, donde cada i está relacionada con la señal directa y los reflectores.

En la Fig. 21 se ilustran los mecanismos de propagación considerados en el modelo y el entorno sintético.

La estructura del modelo es válida para diversos casos: vehículo urbano, peatón urbano, vehículo suburbano y peatón suburbano. El modelo fue elaborado a partir de medidas de casos urbanos y suburbanos realizadas en Múnich (Alemania) y sus alrededores. En el sitio web de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones figura un programa informático que aplica el modelo. En el Informe relativo al modelo físico-estadístico del SMTS de banda ancha, disponible en el sitio web de la Comisión de Estudio del UIT-R, se da una descripción exhaustiva de la aplicación y utilización del modelo.

FIGURA 20
Estructura del modelo

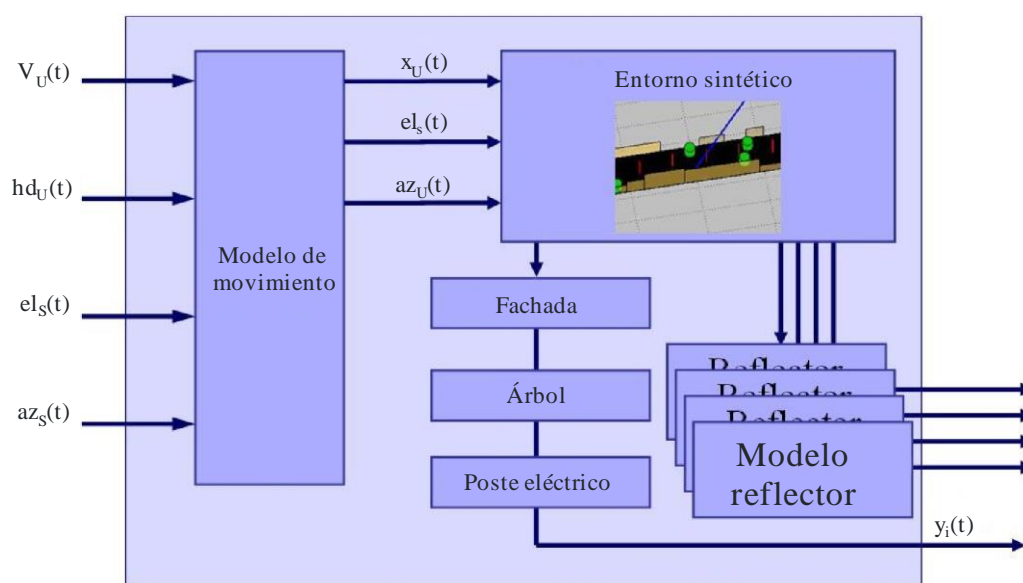
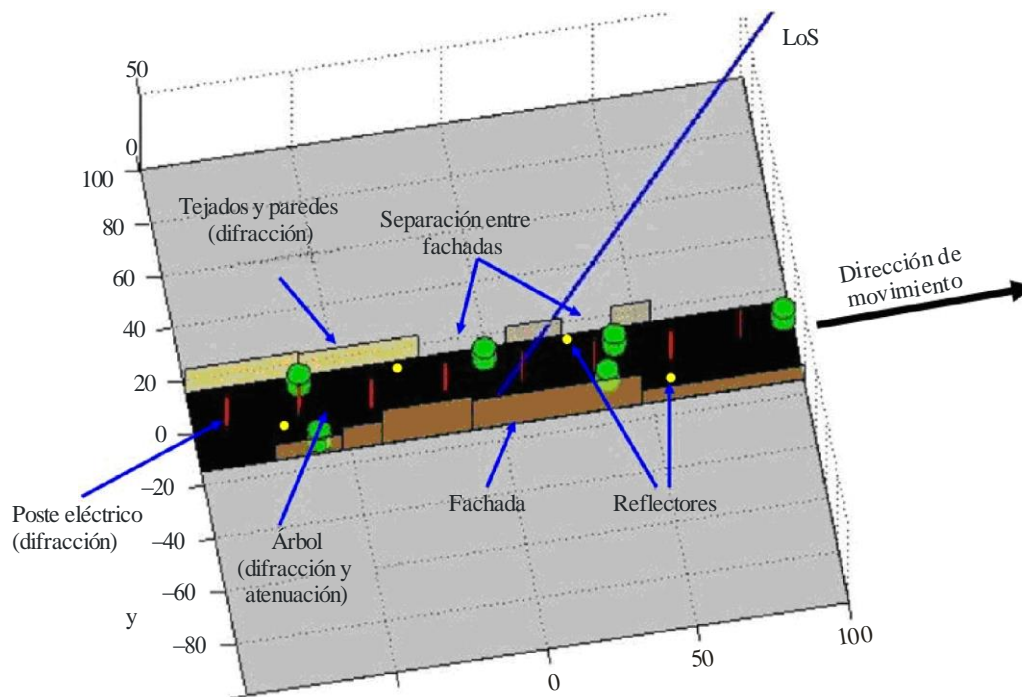


FIGURA 21

Mecanismos de propagación y entorno sintético



P.0681-21

7.1 Parámetros del modelo

Para cada muestra deben indicarse algunos valores de los parámetros del modelo:

- elevación del satélite
- acimut del satélite
- velocidad del usuario
- dirección del usuario.

Obsérvese que la velocidad máxima del usuario está limitada por la frecuencia de muestreo de la respuesta a impulsos del canal:

$$v < \frac{c_0 f_{samp}}{2f_c} \quad (30)$$

siendo:

- f_{samp} : frecuencia de muestreo
- f_c : frecuencia de la portadora
- c_0 : velocidad de la luz.

Se recomienda tomar un factor de sobremuestreo razonable, por ejemplo 4.

7.2 Resultados del modelo

El modelo genera como resultado un vector de N retardos de trayecto τ_i y N valores complejos $A_i(t)$ para cada instante. La respuesta ante impulsos del canal equivalente en la banda de base viene dada por la siguiente expresión:

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (31)$$

siendo t y τ los ejes del tiempo y de retardo, respectivamente. Obsérvese que los retardos en el trayecto $\tau_i(t)$ varían con el tiempo y pueden llegar a tener cualquier valor.

7.3 Utilización de los resultados del modelo

Sea $s(t)$ la señal transmitida en la banda de base equivalente; la señal recibida $r(t)$ puede calcularse siguiendo el procedimiento habitual, esto es mediante la convolución de la señal transmitida con la respuesta del canal a los impulsos:

$$r(t) = s(t) * h(t, \tau) \quad (32)$$

Las respuestas del canal a los impulsos que se obtienen como resultado de aplicar el modelo se actualiza a una velocidad que viene dada por $f_{s\text{amp}}$.

8 Modelo de propagación del canal satélite de banda ancha a interior

En el § 7 se describe un modelo físico-estadístico para simulaciones de banda ancha que puede aplicarse a casos terrestre-móvil. En esta cláusula se describe un modelo de simulación que puede simular la propagación de un satélite de banda ancha a interior para la evaluación de algoritmos de recepción. Concretamente, el modelo soporta simulaciones para comunicaciones y para estimar el tiempo de llegada, necesario en el ámbito del posicionamiento. Al igual que en el § 7, el modelo facilita los parámetros de un filtro transversal lineal que puede utilizarse para simular canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia. Las definiciones de los términos relacionados con la propagación por trayectos múltiples figuran en la Recomendación UIT-R P.1407.

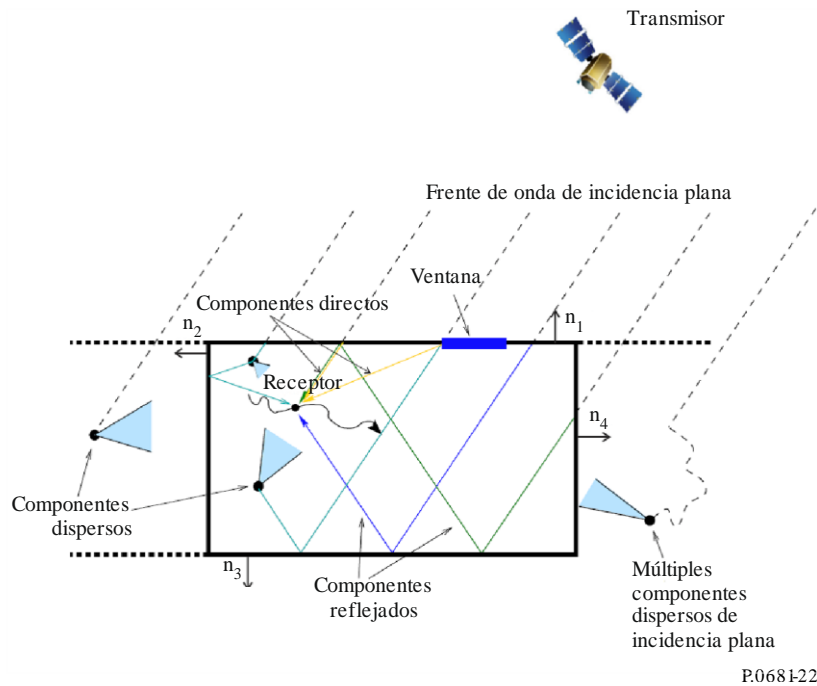
El modelo de canal permite simular la propagación de las ondas electromagnéticas desde un transmisor en un satélite a un receptor ubicado dentro de un inmueble. Se ha escogido un método de simulación físico-estadístico, es decir, en el que partes del canal de propagación de las ondas se simulan utilizando métodos determinísticos específicos, mientras que otras contribuciones se calculan a partir de estadísticas modelizadas a partir de mediciones. Las mediciones para este método se realizaron con una frecuencia portadora de 1,51 GHz y un ancho de banda de señal de 100 MHz. Se supone que el transmisor y el entorno son estáticos o cuasi-estáticos, mientras que la posición del receptor puede variar con una trayectoria arbitraria dentro de un escenario que representa una habitación dentro de un edificio. El resultado será una serie de retardos y amplitudes complejas para los distintos componentes de los trayectos múltiples, que pueden utilizarse en una estructura de filtro transversal lineal. Los parámetros de los componentes de trayectos múltiples obtenidos varían coherentemente en función de la posición del receptor, de manera que se soporta una simulación espacialmente coherente.

El modelo de canal tiene los siguientes componentes para simular el canal de propagación, como se muestra en la Fig. 22:

- Componentes directos: componentes representativos de los trayectos múltiples, que pasan a través de los muros exteriores antes de que la antena del receptor los reciba directamente. Estos componentes se basan en cálculos determinísticos realizados utilizando la estructura del escenario.
- Componentes reflejados: componentes representativos de los trayectos múltiples que se reflejan en los muros interiores del escenario. El retardo y el ángulo de incidencia de estos componentes se simula utilizando cálculos determinísticos, mientras que la amplitud compleja es una variable estocástica.
- Componentes dispersos: componentes representativos de los trayectos múltiples de manera totalmente estocástica. Todos los parámetros de estos componentes se simulan como variables aleatorias que representan la interacción de la onda electromagnética con objetos internos, como los muebles, por ejemplo.

FIGURA 22

Visión general de los componentes individuales simulados
en el modelo de canal satélite a interior



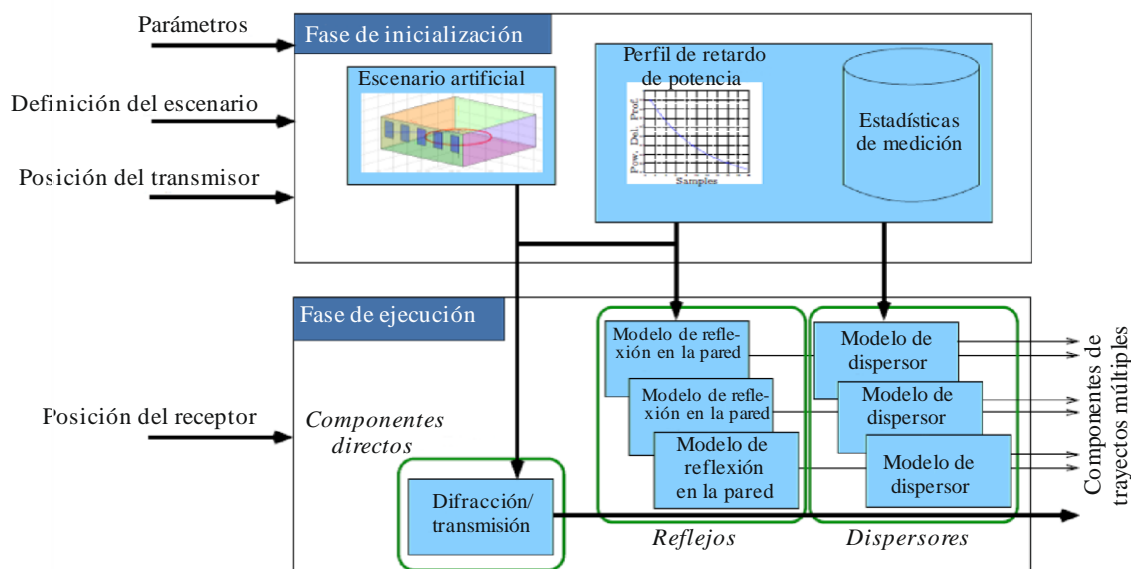
Como se muestra en la Fig. 23, el modelo se divide en la fase de inicialización y la fase de ejecución. Durante la fase de inicialización, se inicializan los componentes estocásticos dentro del modelo de canal para que la fase de ejecución se base de manera totalmente determinística en las variables aleatorias obtenidas. Por consiguiente, la respuesta impulsiva del canal dependerá únicamente de la posición del receptor. Para simular una trayectoria del receptor determinada, durante la fase de ejecución el usuario deberá solicitar el modelo de canal repetidamente desde cada nueva posición del receptor en una estructura en bucle. Para alimentar el modelo de canal en la fase de inicialización se necesita una descripción del escenario, la frecuencia portadora, el ancho de banda de la simulación, la posición del transmisor y la dispersión (valor eficaz (r.m.s.)) del retardo. Opcionalmente pueden introducirse algunos componentes dispersos. En términos de los parámetros de propagación, la descripción del escenario comprende los factores de transmisión perpendicular de los materiales que forman los muros y el cristal de la ventana. Los valores para el coeficiente de transmisión perpendicular y la dispersión (r.m.s.) del retardo pueden utilizarse utilizando las Recomendaciones UIT-R P.1238 y UIT-R P.2040, donde también pueden encontrarse directamente.

El método recomendado puede encontrarse en un programa informático disponible en el fichero suplementario R-REC-P.681-10-201712-I!!!ZIP.

En el Informe UIT-R P.2145 puede encontrarse una descripción completa del modelo de canal y de su aplicación. Durante la fase de ejecución el usuario debe facilitar las posiciones del receptor en una estructura de bucle.

FIGURA 23

**Visión general de los componentes simulados
en el modelo de canal satélite a interior**



P.0681-23

8.1 Alcance del modelo de simulación

El modelo de banda ancha puede simular el escenario de propagación de un satélite de banda ancha a interior para la evaluación de algoritmos de recepción. Concretamente, el modelo soporta simulaciones para las comunicaciones y para la estimación del tiempo de llegada, necesarias en el ámbito del posicionamiento.

8.2 Aplicabilidad del modelo

La aplicabilidad del modelo es limitada a causa de las partes estocásticas obtenidas de los datos medidos. En su forma actual, el modelo del canal tiene los siguientes límites:

- Gama de frecuencias: 1 GHz a 2 GHz y un ancho de banda de señal de hasta 100 MHz
- Polarización: polarización circular
- Entorno: habitaciones exteriores en entornos de oficina típicos.

Debido al enfoque de la modelización, el modelo satélite de banda ancha a interior tiene las siguientes limitaciones:

- Transmisor estático: el transmisor debe permanecer estático o cuasi-estático durante el periodo de simulación.
- Geometría de la habitación: una habitación con, al menos, un muro de cara al transmisor.
- Entorno estático: el entorno es estático y el receptor es el único objeto en movimiento.
- Reflejos exteriores inapreciables: se desprecian los reflejos exteriores que puedan causar otros edificios de altura similar en las cercanías.

8.3 Parámetros de entrada

Durante la fase de inicialización, el modelo de canal de satélite de banda ancha a interior necesita los siguientes parámetros de entrada:

Ancho de banda	Ancho de banda de señal en Hz
Frecuencia portadora	Frecuencia portadora en Hz
Dispersión del retardo mediada en el espacio	Dispersión del retardo en segundos. La dispersión del retardo se obtiene mediando el perfil de retardo de potencia en el espacio simulado. Este parámetro define la pendiente del perfil de retardo de potencia mediado en el espacio exponencialmente decreciente. La fórmula y los valores para hallar el valor de la dispersión del retardo pueden encontrarse en la Recomendación UIT-R P.1238
Posición del transmisor	Posición tridimensional del transmisor, en metros, en el sistema de coordenadas de referencia simulado en el escenario
Escenario	Define el plano de la habitación necesario para la parte determinística física del modelo de canal. Además, incorpora los coeficientes de transmisión perpendicular que representan los materiales de los muros y las ventanas. Los valores correspondientes pueden calcularse utilizando el método para un bloque de una sola capa de la Recomendación UIT-R P.2040
Número de componentes dispersos	Parámetro optativo para modificar el número de componentes dispersos en la simulación. El valor por defecto es 10 000. Los valores deben ser superiores a 1 000

Durante la fase de ejecución del modelo de canal de satélite de banda ancha a interior se necesitan los siguientes parámetros de entrada:

Posición del receptor	Posición tridimensional del receptor, en metros, en el mismo sistema de coordenadas utilizado para la posición del transmisor y el escenario. Para simular una trayectoria del receptor determinada, el usuario deberá solicitar repetidamente la rutina del simulador de canal desde cada nueva posición del receptor en una estructura de bucle
-----------------------	---

8.4 Parámetros de salida

El modelo facilita la respuesta impulsiva del canal (CIR) $h(\tau, x_r)$ calculada a partir de la posición del receptor, x_r , facilitada al usuario como:

$$h(\tau, x_r) = \sum_{l=0}^{L(x_r)-1} \tilde{\alpha}_l(x_r) \delta(\tau - \tilde{\tau}_l(x_r)), \quad (33)$$

donde:

- $L(x_r)$ es el número de trayectos visibles desde la posición del receptor, x_r .
- $\tilde{\alpha}_l(x_r)$ es la amplitud compleja del trayecto. Incluye el retardo en fase.
- $\tilde{\tau}_l(x_r)$ es el retardo, en segundos, del trayecto normalizado al tiempo de propagación en la línea de visibilidad directa.

9 Diversidad de satélites

En los puntos anteriores se han examinado los enlaces por satélite individual. A fin de mejorar la disponibilidad, los sistemas de satélites múltiples pueden utilizar una diversidad de enlaces. Este punto trata la combinación/conmutación de señales a partir de varios satélites. Se examinan dos casos, a saber, el caso sin correlación en el que se supone que los efectos de sombra que afectan a las señales recibidas de los satélites visibles no están correlacionados, y el caso con correlación en el que existe un grado de correlación dado. En ambas situaciones se supone que las variaciones de la señal originadas por múltiples trayectos no están correlacionadas.

9.1 Caso sin correlación

Con el modelo del § 6 se pueden evaluar los efectos de la diversidad de satélites en el caso de constelaciones de satélites con visibilidad múltiple (es decir, con conmutación al trayecto con menos perturbaciones). Para sistemas OSG, las probabilidades de aparición de cada estado en cada enlace por satélite, es decir, P_{GOODn} y P_{BADn} (siendo $n = 1, 2, \dots, N$, donde N es el número de satélites visibles) depende de la elevación de cada satélite θ_n . Las probabilidades de que aparezcan esos estados tras la diversidad con selección de estado, $P_{GOOD:div}$ y $P_{BAD:div}$ vienen dadas por:

$$P_{GOOD:div} = 1 - \prod_{n=1}^N [1 - P_{GOODn}(\theta_n)] \quad (34a)$$

$$P_{BAD:div} = 1 - P_{GOOD:div} \quad (34b)$$

En el caso de no OSG tales como las LEO y las órbitas terrestres medias (MEO), las probabilidades de aparición de los diversos estados en cada enlace por satélite varían con el tiempo, ya que dependen de la elevación del satélite que a su vez varía con el tiempo. Las probabilidades medias de aparición de los estados, es decir, $\langle P_{GOOD:div} \rangle$ y $\langle P_{BAD:div} \rangle$, una vez que ha actuado la diversidad de satélites del instante t_1 al instante t_2 son las siguientes:

$$\langle P_{i:div} \rangle = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P_{i:div}(t) dt \quad (i=GOOD, BAD) \quad (35)$$

9.2 Caso con correlación

En muchos casos, las sombras que afectan a dos enlaces que cuentan con un ángulo de separación dado presentan cierto grado de correlación que debe cuantificarse para realizar estimaciones más precisas sobre la disponibilidad general que cabe esperar de un sistema de satélites múltiples. Para ello se emplea el coeficiente de sombra de correlación cruzada. Este parámetro puede tomar valores que oscilan entre ± 1 de tendencia positiva, cercanos al $+1$, en el caso de ángulo de separación pequeño a incluso valores negativos para separaciones mayores.

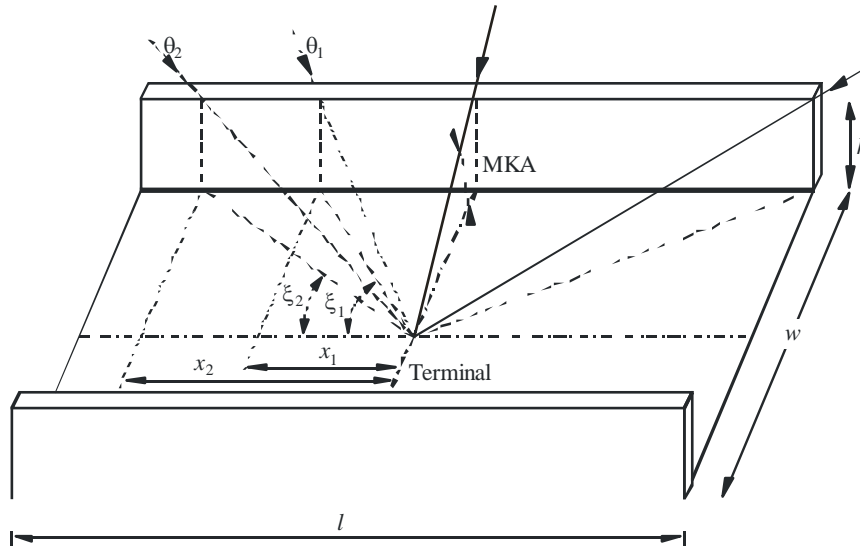
9.2.1 Cuantificación del coeficiente de sombra de correlación cruzada en zonas urbanas

A continuación se describe un modelo sencillo de tres segmentos utilizado para cuantificar el coeficiente de correlación cruzada entre los casos de sombra de zonas urbanas. Se emplea la geometría de la zona urbana canónica, a saber el «cañón urbano». El objetivo es determinar el coeficiente de correlación cruzada $\rho(\gamma)$, siendo γ la separación angular entre dos enlaces satélite a móvil separados en las calles, que se describen en términos MKA.

La representación geométrica viene indicada en la Fig. 24, donde:

- θ_1 y θ_2 : ángulos de elevación del satélite
- w : anchura media de las calles
- h : altura media de los edificios
- l : longitud de la calle considerada.

FIGURA 24
Geometría de cañón urbano



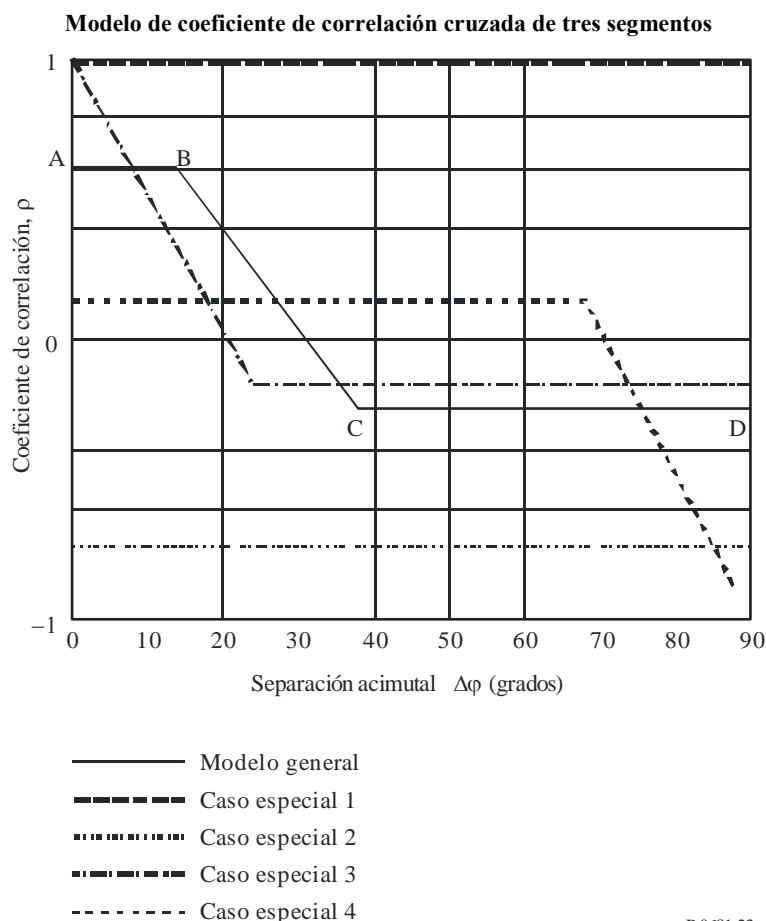
P.0681-22

La separación angular entre dos enlaces, γ , puede definirse en términos de ángulos más convenientes: las elevaciones de los dos satélites, θ_i y θ_j , y su separación acimutal, $\Delta\phi$; es decir, el coeficiente de correlación cruzada de la sombra puede expresarse mediante $\rho(\theta_i, \theta_j, \Delta\phi)$.

Los resultados típicos obtenidos con este modelo se representan esquemáticamente en la Fig. 25 que muestra un comportamiento general con un modelo de tres segmentos definidos por los puntos A, B, C y D. Además de este modelo general, existen diversos casos especiales en los que coinciden dos o más de los cuatro puntos.

La Fig. 24 muestra que, en general, suele existir un lóbulo principal de valores positivos y decrecientes de correlación cruzada para una separación acimutal pequeña (típicamente $\Delta\phi < 30^\circ$) mientras que, para valores más elevados de $\Delta\phi$, el coeficiente tiende a estabilizarse a un valor negativo constante. El lóbulo presentará los máximos de mayor valor cuando los dos satélites se encuentren en elevaciones similares. A medida que la diferencia de las elevaciones aumenta ($\theta_i \gg \theta_j$), el lóbulo mostrará un máximo muy inferior.

FIGURA 25



P.0681-23

También se han identificado los casos especiales de este modelo de tres segmentos: el caso especial 1 se da cuando ambos satélites se encuentran por encima del MKA para toda separación acimutal. En este caso, el coeficiente de correlación toma un valor positivo constante de +1 para todo $\Delta\phi$. No es un caso relevante ya que en esta situación no es necesaria la diversidad de satélites. El caso especial 2 aparece cuando un satélite siempre se encuentra por encima del MKA y el otro siempre está por debajo (excepto en ambos extremos del conducto). En este caso, el coeficiente de correlación adopta un valor negativo constante. El caso especial 3 ocurre cuando los dos satélites se encuentran en la misma elevación. En esta situación, el lóbulo de correlación empieza a disminuir a partir de un valor máximo +1 (es decir, satélites coubicados). Este caso especial se aplica a sistemas basados en satélites OSG, muy separados en acimut, pero con elevaciones muy similares. Por último, el caso especial 4 se da con satélites cuyas elevaciones son muy distintas ($\theta_i \gg \theta_j$). En este caso, el lóbulo de correlación se extiende a lo largo de una gama de separaciones acimutales mucho más amplia pero muestra valores de correlación positivos pequeños.

Cabe destacar que, habida cuenta de la geometría de la situación (conducto callejero) y de que se supone que el usuario se encuentra en medio de la calle, los valores de correlación son simétricos para los cuatro cuadrantes $\Delta\phi$: por este motivo sólo se muestra un cuadrante en la Fig. 25.

En el modelo (véase la Fig. 24) se utilizan los siguientes datos de entrada: elevaciones del satélite, θ_1 y θ_2 (grados), altura media del edificio, h (m), anchura media de la calle, w (m), y longitud de la calle que se considera, l (m). Se aconseja utilizar un valor elevado para este último parámetro, por ejemplo, $l \geq 200$ m. Además, se supone que $\theta_2 \geq \theta_1$. La resolución de la separación acimutal del modelo, $\Delta\phi$, es 1° y es válida para todas las bandas de frecuencia, si bien es más precisa en las bandas por encima de unos 10 GHz.

Para calcular los valores del coeficiente de correlación cruzada y las separaciones acimutales correspondientes a los puntos del modelo A, B, C y D deberán seguirse los siguientes pasos:

Paso 1: Calcular los valores auxiliares x_1 , x_2 , M_1 y M_2 y los ángulos ξ_1 y ξ_2 (véase la Fig. 24):

$$x_1 = \sqrt{\left(\frac{h}{\operatorname{tg} \theta_1}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad \text{y} \quad x_2 = \sqrt{\left(\frac{h}{\operatorname{tg} \theta_1}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad (36)$$

- Si $(x_{1,2})^2 < 0$ se va al Paso 6. Esta situación surge cuando el satélite 1 y/o 2 siempre se encuentran en condiciones de visibilidad directa para toda separación acimutal.
- Si $x_{1,2} > l/2$, se obtiene $x_{1,2} = l/2$. Esta situación se da cuando existe visibilidad para el satélite 1 y/o 2 solamente a ambos extremos de la calle.

$$\xi_1 = \text{redondeado} \left(\arctg \frac{w/2}{x_1} \right) \quad \text{y} \quad \xi_2 = \text{redondeado} \left(\arctg \frac{w/2}{x_2} \right) \quad (37)$$

$$M_1 = \frac{\xi_1 + 0,5}{90} \quad \text{y} \quad M_2 = \frac{\xi_2 + 0,5}{90} \quad (38)$$

donde «redondeado» significa redondeado al valor entero más próximo (grados).

Paso 2: Cálculo de la información auxiliar relacionada con los puntos del modelo A y D.

Para el punto A:

$$N_{11} = 4\xi_1 + 2 \quad N_{00} = 360 - 4\xi_2 - 2 \quad N_{01} = 4(\xi_2 - \xi_1) \quad N_{10} = 0 \quad (39)$$

Para el punto D:

- Si $\xi_1 + \xi_2 \leq 90$,

$$N_{11} = 0 \quad N_{00} = 360 - 4\xi_1 - 4\xi_2 - 4 \quad N_{01} = 4\xi_2 + 2 \quad N_{10} = 4\xi_1 + 2 \quad (40a)$$

- Si $\xi_1 + \xi_2 > 90$,

$$N_{11} = 4\xi_1 + 4\xi_2 + 4 - 360 \quad N_{00} = 0 \quad N_{01} = 360 - 4\xi_1 - 2 \quad N_{10} = 360 - 4\xi_2 - 2 \quad (40b)$$

Paso 3: Cálculo del coeficiente de correlación cruzada en los puntos A y D:

$$\rho_{A,D} = \frac{1}{359} \frac{N_{11}(1-M_1)(1-M_2) + N_{00}(0-M_1)(0-M_2) + N_{10}(1-M_1)(0-M_2) + N_{01}(0-M_1)(1-M_2)}{\sigma(\theta_1)\sigma(\theta_2)} \quad (41)$$

$$\sigma^2(\theta_1) = \frac{(4\xi_1 + 2)(1-M_1)^2 + (360 - 4\xi_1 - 2)(0-M_1)^2}{359} \quad (42a)$$

$$\sigma^2(\theta_2) = \frac{(4\xi_2 + 2)(1-M_2)^2 + (360 - 4\xi_2 - 2)(0-M_2)^2}{359} \quad (42b)$$

Paso 4: En el punto B el coeficiente de correlación es el mismo que en el punto A y su separación acimutal, $\Delta\phi$, viene dada por:

$$\text{Acimut}_{\text{punto B}} = \xi_2 - \xi_1 \quad \text{grados} \quad (43)$$

Paso 5: En el punto C el coeficiente de correlación es el mismo que en el punto D y su separación acimutal, $\Delta\phi$, viene dada por:

$$- \quad \text{Si } \xi_1 + \xi_2 \leq 90, \quad \text{Acimut}_{\text{punto C}} = \xi_1 - \xi_2 \quad \text{grados} \quad (44a)$$

$$- \quad \text{Si } \xi_1 + \xi_2 > 90, \quad \text{Acimut}_{\text{punto C}} = 180 - \xi_1 - \xi_2 \quad \text{grados} \quad (44b)$$

Paso 6: En este caso, para una o ambas elevaciones, siempre existen condiciones de visibilidad directa. El coeficiente de correlación se calcula de forma ligeramente distinta a la del Paso 3:

- Si ambos satélites son siempre visibles, el coeficiente de correlación cruzada es constante e igual a +1 para todo $\Delta\phi$.
- Si uno de los satélites siempre es visible, el coeficiente de correlación cruzada también es constante y viene dado por:

$$\rho = \left(\frac{N_{11}}{180} - 1 \right) \quad (45)$$

donde $N_{11} = 4\xi_1 + 2$, y ξ_1 se calcula como en el Paso 1.

9.2.2 Cálculos de la disponibilidad

Una vez determinado el coeficiente de correlación cruzada, es posible calcular la mejora de disponibilidad introducida por el uso de la diversidad de satélites. Aquí se indican las expresiones para calcular la disponibilidad del sistema en el caso de diversidad de dos satélites. Habida cuenta de los márgenes normalmente pequeños (o de las gamas de control de potencia) empleados en los sistemas de satélites del servicio móvil terrestre, solamente es necesario examinar los efectos de sombra. Se trata de una hipótesis de trabajo razonable ya que los sucesos de disponibilidad corresponderán a los enlaces en condiciones de visibilidad directa en las que las variaciones creadas por múltiples trayectos son de tipo Rice y, por consiguiente, bastante pequeñas. En el caso de condiciones de sombra (fuerte o ligero), los enlaces se encontrarán en un estado de interrupción incluso si los múltiples trayectos dan lugar a una mejora significativa de la señal.

Dados dos enlaces con una cierta separación angular y probabilidades de indisponibilidad p_1 y p_2 , y un coeficiente de correlación cruzada de sombra ρ , la improbabilidad de disponibilidad general después de la diversidad de satélites viene dada por:

$$p_0 = \rho \sqrt{p_1(1-p_1)} \sqrt{p_2(1-p_2)} + p_1 p_2 \quad (46)$$

y la probabilidad de la disponibilidad será de $1 - p_0$. Los valores válidos de ρ en la ecuación (46) se limitan a aquellos que dan valores no negativos para p_0 . Las probabilidades p_1 y p_2 , para zonas urbanas pueden calcularse mediante el modelo dado en el § 4.2.

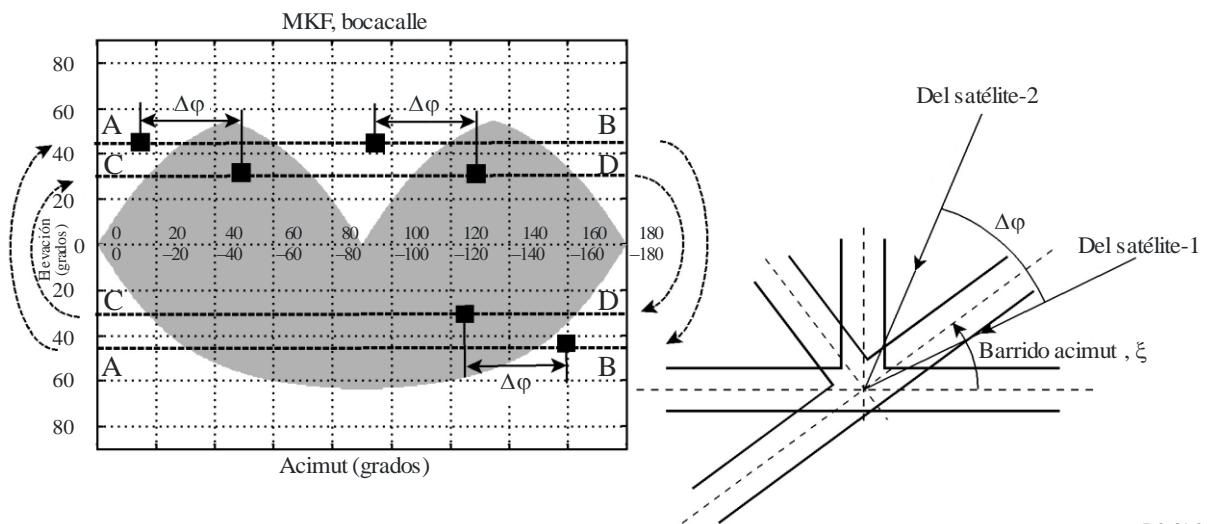
Los cálculos generales para un intervalo de tiempo dado o para un periodo de constelación entero requieren el cálculo de las medias ponderadas en todas las posiciones (acimutal y elevaciones) de los dos satélites con respecto al terminal de usuario.

9.3 Modelización de los efectos producidos por diversos satélites utilizando MKF

Las MKF definidas en el § 4.4 pueden utilizarse para calcular las disponibilidades de múltiples satélites. La posible correlación parcial de los efectos de obstrucción entre los diversos enlaces ya se tiene en cuenta en la propia geometría de las máscaras. En la Fig. 26 se muestra un ejemplo de cálculo de la disponibilidad de un sistema formado por dos satélites OSG. Las líneas A-B y C-D indican los trayectos de barrido que se han de seguir para calcular la disponibilidad combinada. La línea A-B indica el barrido para un acimut de 360° y un ángulo de elevación θ_1 correspondiente al satélite-1 y la línea C-D indica un barrido para un acimut de 360° y un ángulo de elevación θ_2 correspondiente al satélite-2. A fin de tener en cuenta las posibles correlaciones cruzadas de obstrucción, el barrido de 360° se debe realizar manteniendo una separación acimutal $\Delta\phi$, entre los dos satélites.

La utilización de las MKF de calles también se puede aplicar a múltiples satélites OSG y al caso de constelaciones de satélites no OSG. En este último caso, el estudio consistiría en la iteración del cálculo de los barridos de orientación de calle de 360° durante un número suficientemente elevado de configuraciones instantáneas de la constelación de satélites. En este contexto, por configuración instantánea se entiende cada una de las posiciones instantáneas (ángulos acimutales y de elevación) de los distintos satélites por encima de un mínimo ángulo de elevación de funcionamiento, θ_{min} . Si se define un intervalo adecuado, ΔT , y un periodo de observación, T_{obs} , se puede calcular la disponibilidad como la media temporal, ponderada según la orientación de calle, de los resultados obtenidos para cada configuración instantánea. Unos valores de $\Delta T = 1 \text{ min}$ y $T_{obs} = \text{periodo de constelación}$ proporcionan los resultados adecuados.

FIGURA 26
Cálculo de la disponibilidad total del sistema para una constelación de satélites OSG con respecto a una bocacalle



Anexo 2

1 Introducción

A continuación se indican los parámetros de entrada para los modelos estadísticos y generativos descritos en § 6 del Anexo 1, para diversas gamas de frecuencias y entornos. Los conjuntos de parámetros disponibles se resumen en los Cuadros 7 a 10.

Los parámetros se presentan mediante el formato del Cuadro 7.

CUADRO 7

Formato de los parámetros de entrada

Frecuencia/entorno/ángulo de elevación (grados)		
Información	Detalles útiles acerca de la zona o del dispositivo utilizado para caracterizar el canal	
	Good	Bad
$(\mu, \sigma)_{G,B}$	μ_G, σ_B	μ_B, σ_B
$dur_{\min G,B}$	$dur_{\min B}$	$dur_{\min B}$
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	$\mu_{M_A^G}, \sigma_{M_A^B}$	$\mu_{M_A^B}, \sigma_{M_A^B}$
$MP_{G,B}$	h_{1B}, h_{2B}	h_{1B}, h_{2B}
$\sum_{AG,B}$	g_{1G}, g_{2G}	g_{1B}, g_{2B}
$L_{corrG,B}^*$	L_{corrG}	L_{corrB}
$f_1 \Delta M_A + f_2$	f_1, f_2	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	Gama de probabilidades a considerar para la distribución M_{AB}	

NOTA – G se refiere al estado GOOD y B al estado BAD.

* Sólo para el modelo generativo.

CUADRO 8

Parámetros del modelo para frecuencias comprendidas entre 1,5 y 3 GHz

Entorno	Ángulo de elevación (grados)				
	20	30	45	60	70
Urbano	20	30	45	60	70
Suburbano	20	30	45	60	70
Aldea	20	30	45	60	70
Rural boscoso	20	30	45	60	70
Residencial	20	30	–	60	70

CUADRO 9

**Parámetros del modelo para frecuencias
comprendidas entre 3 y 5 GHz**

Entorno	Ángulo de elevación (grados)				
	20	30	45	60	70
Urbano	20	30	45	60	70
Suburbano	20	30	45	60	70
Aldea	20	30	45	60	70
Rural boscoso	20	30	45	60	70
Residencial	20	30	–	60	70

CUADRO 10

**Parámetros del modelo para frecuencias comprendidas
entre 10 y 20 GHz**

Entorno	Ángulo de elevación (grados)
Suburbano	34
Rural	34

2 Frecuencias entre 1,5 y 3 GHz

2.1 Entorno urbano

2,2 GHz/Urbano/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,0042 1,2049	3,689 0,9796
$dur_{\min G,B}$	3,9889	10,3114
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-3,3681 3,3226	-18,1771 3,2672
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,1739 -11,5966	1,1411 4,0581
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,0036 1,3230	-0,2502 -1,2528
$L_{corrG,B}$	0,9680	0,9680
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0870 2,8469	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2.2 GHz/Urbano/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,7332 1,1030	2,7582 1,2210
$dur_{\min G,B}$	7,3174	5,7276
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-2,3773 2,1222	-17,4276 3,9532
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,0941 -13,1679	0,9175 -0,8009
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2811 0,9323	-0,1484 0,5910
$L_{corrG,B}$	1,4731	1,4731
$f_1\Delta M_A+f_2$	0,1378 3,3733	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Urbano/45°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,0639 1,6980	2,9108 1,2602
$dur_{\min G,B}$	10,0	6,0
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,8225 1,1317	-15,4844 3,3245
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,0481 -14,7450	0,9434 -1,7555
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,4643 0,3334	-0,0798 2,8101
$L_{corrG,B}$	1,7910	1,7910
$f_1\Delta M_A+f_2$	0,0744 2,1423	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Urbano/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,8135 1,5962	2,0211 0,6568
$dur_{\min G,B}$	10,0	1,9126
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,5872 1,2446	-14,1435 3,2706
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,5168 -17,4060	0,6975 -7,5383
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1953 0,5353	0,0422 3,2030
$L_{corrG,B}$	1,7977	1,7977
$f_1\Delta M_A+f_2$	-0,1285 5,4991	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Urbano/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	4,2919 2,4703	2,1012 1,0341
$dur_{\min G,B}$	118,3312	4,8569
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,8434 0,5370	-12,9383 1,7588
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-4,7301 -26,5687	2,5318 16,8468
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,5192 1,9583	0,3768 8,4377
$L_{corrG,B}$	2,0963	2,0963
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,0826 2,8824	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2.2 Entorno suburbano

2,2 GHz/Suburbano/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,2201 1,2767	2,2657 1,3812
$dur_{\min G,B}$	2,2914	2,5585
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-2,7191 1,3840	-13,8808 2,5830
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,3037 -13,0719	1,0136 0,5158
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1254 0,7894	-0,1441 0,7757
$L_{corrG,B}$	0,9290	0,9290
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,2904 1,0324	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Suburbano/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,0138 1,4161	2,4521 0,7637
$dur_{\min G,B}$	8,3214	5,9087
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-0,7018 1,2107	-11,9823 3,4728
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,6543 -14,6457	0,6200 -7,5485
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1333 0,8992	-0,1644 0,2762
$L_{corr G,B}$	1,7135	1,7135
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,1091 3,3000	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Suburbano/45°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	4,5857 1,3918	2,2414 0,7884
$dur_{\min G,B}$	126,8375	4,3132
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-1,1496 1,0369	-10,3806 2,3543
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,2148 -17,8462	0,0344 -14,2087
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,0729 1,0303	0,0662 3,5043
$L_{corr G,B}$	3,2293	3,2293
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,5766 0,7163	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Suburbano/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,4124 1,4331	1,9922 0,7132
$dur_{\min G,B}$	19,5431	3,1213
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-0,7811 0,7979	-12,1436 3,1798
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-2,1102 -19,7954	0,4372 -8,3651
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2284 0,2796	-0,2903 -0,6001
$L_{corr G,B}$	2,0215	2,0215
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,4097 8,7440	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Suburbano/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	4,2919 2,4703	2,1012 1,0341
$dur_{\min G,B}$	118,3312	4,8569
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-1,8434 0,5370	-12,9383 1,7588
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-4,7301 -26,5687	2,5318 16,8468
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,5192 1,9583	0,3768 8,4377
$L_{corr G,B}$	2,0963	2,0963
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,0826 2,8824	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2.3 Entorno aldea

2,2 GHz/Aldea/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,7663 1,1211	2,2328 1,3788
$dur_{\min G,B}$	6,5373	2,8174
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-2,5017 2,3059	-15,2300 5,0919
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,0238 -11,4824	0,9971 0,8970
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2735 1,3898	-0,0568 1,9253
$L_{corr G,B}$	0,8574	0,8574
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0644 2,6740	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Aldea/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,4246 1,3025	1,8980 1,0505
$dur_{\min G,B}$	5,4326	2,4696
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-2,2284 1,4984	-15,1583 4,0987
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,3431 -14,0798	0,9614 0,3719
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2215 1,0077	-0,0961 1,3123
$L_{corrG,B}$	0,8264	0,8264
$f_1\Delta M_A+f_2$	-0,0576 3,3977	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Aldea/45°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,8402 1,4563	1,8509 0,8736
$dur_{\min G,B}$	10,4906	2,6515
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,2871 0,6346	-12,6718 3,1722
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,0222 -16,7316	0,8329 -3,9947
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,3905 0,4880	-0,0980 1,3381
$L_{corrG,B}$	1,4256	1,4256
$f_1\Delta M_A+f_2$	-0,0493 5,3952	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Aldea/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,7630 1,2854	1,7192 1,1420
$dur_{\min G,B}$	17,6726	2,5981
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,5364 0,6115	-9,5399 2,0732
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,1418 -17,8032	-0,4454 -16,8201
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2120 0,7819	0,0609 2,5925
$L_{corrG,B}$	0,8830	0,8830
$f_1\Delta M_A+f_2$	-0,8818 10,1610	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Aldea/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	4,0717 1,2475	1,5673 0,5948
$dur_{\min G,B}$	30,8829	2,1609
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,3340 0,6279	-8,3686 2,5603
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-1,6253 -19,7558	0,1788 -9,5153
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,4438 0,6355	-0,0779 1,1209
$L_{corrG,B}$	1,5633	1,5633
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,3483 5,1244	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2.4 Entorno rural boscoso

2,2 GHz/Rural boscoso/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,1597 1,3766	1,9587 1,5465
$dur_{\min G,B}$	2,0744	1,3934
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,8065 1,5635	-10,6615 2,6170
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,9170 -12,1228	0,8440 -1,4804
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,0348 0,9571	-0,1069 1,6141
$L_{corrG,B}$	0,8845	0,8845
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0550 2,6383	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Rural boscoso/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,5579 1,2444	2,3791 1,1778
$dur_{\min G,B}$	3,5947	2,2800
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,3214 1,6645	-10,4240 2,4446
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-1,0445 -14,3176	0,6278 -4,8146
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1656 0,7180	-0,0451 2,2327
$L_{corrG,B}$	1,0942	1,0942
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0256 3,8527	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Boscoso/45°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,1803 1,3427	2,5382 1,1291
$dur_{mínG,B}$	6,7673	3,3683
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,9902 1,0348	-10,2891 2,3090
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,4235 -16,8380	0,3386 -9,7118
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1095 0,6893	-0,0460 2,1310
$L_{corrG,B}$	2,3956	2,3956
$f_1\Delta M_A+f_2$	0,2803 4,0004	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Rural boscoso/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,9322 1,3234	2,1955 1,1115
$dur_{mínG,B}$	5,7209	1,6512
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,6153 1,1723	-9,9595 2,2188
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-1,4024 -16,9664	0,2666 -9,0046
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2516 0,5353	-0,0907 1,4730
$L_{corrG,B}$	1,7586	1,7586
$f_1\Delta M_A+f_2$	0,1099 4,2183	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Rural boscoso/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,8768 1,4738	1,8445 0,8874
$dur_{mínG,B}$	16,0855	2,9629
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,7818 0,7044	-6,7769 2,1339
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-2,9566 -20,0326	-0,3723 -14,9638
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2874 0,4050	-0,1822 0,1163
$L_{corrG,B}$	1,6546	1,6546
$f_1\Delta M_A+f_2$	-0,3914 6,6931	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

2.5 Entorno residencial

2,2 GHz/Residencial/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,5818 1,7310	1,7136 1,1421
$dur_{\min G,B}$	9,2291	1,6385
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,8449 1,3050	-10,8315 2,2642
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,3977 -12,3714	0,8589 -2,4054
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,0984 1,3138	-0,1804 0,8553
$L_{corr G,B}$	1,1578	1,1578
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0994 2,4200	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Residencial/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,2810 1,4200	1,8414 0,9697
$dur_{\min G,B}$	14,4825	2,7681
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,3799 1,0010	-11,1669 2,4724
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,8893 -16,4615	-0,1030 -13,7102
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2432 0,6519	-0,1025 1,7671
$L_{corr G,B}$	1,9053	1,9053
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0196 3,9374	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Residencial/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,255 1,287	3,277 1,260
$dur_{mínG,B}$	6,47	7,81
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	0 0,30	-2,32 2,06
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-2,024 -19,454	-1,496 -22,894
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,273 0,403	-0,361 -0,119
$L_{corrG,B}$	3,84	3,84
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-1,591 12,274	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

2,2 GHz/Residencial/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	4,3291 0,7249	3,4534 0,9763
$dur_{mínG,B}$	27,3637	8,9481
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-0,1625 0,3249	-1,6084 0,5817
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,6321 -21,5594	-0,3976 -22,7905
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,1764 0,4135	-0,0796 0,1939
$L_{corrG,B}$	1,6854	1,6854
$f_1 \Delta M_A + f_2$	3,0127 6,2345	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

3 Frecuencias entre 3 y 5 GHz

3.1 Entorno urbano

3,8 GHz/Urbano/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,5467 1,0431	3,6890 0,9796
$dur_{\min G,B}$	5,2610	10,3114
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-2,7844 2,6841	-19,4022 3,2428
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,1757 -12,9417	0,9638 -0,9382
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2044 1,5866	0,0537 4,5670
$L_{corrG,B}$	1,4243	1,4243
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,1073 1,9199	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Urbano/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,0158 1,2348	2,2627 1,4901
$dur_{\min G,B}$	4,5491	2,0749
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-3,7749 2,2381	-17,9098 2,9828
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,1564 -15,1531	0,8250 -2,5833
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,0343 1,0602	-0,0741 2,1406
$L_{corrG,B}$	0,8999	0,8999
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,2707 -0,0287	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Urbano/45°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,3005 1,6960	2,6314 1,1210
$dur_{\min G,B}$	10,0	6,0
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,4466 1,1472	-15,3926 3,2527
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,1550 -13,6861	0,9509 -1,2462
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,1666 1,2558	0,0363 4,4356
$L_{corrG,B}$	1,6424	1,6424
$f_1\Delta M_A+f_2$	0,2517 -0,3512	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Urbano/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,4546 1,9595	1,8892 0,8982
$dur_{\min G,B}$	10,0	1,9126
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,6655 0,8244	-14,4922 3,4941
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,4887 -17,2505	0,4501 -9,6935
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,3373 0,3285	0,1202 4,8329
$L_{corrG,B}$	2,3036	2,3036
$f_1\Delta M_A+f_2$	0,0025 1,4949	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Urbano/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,8354 2,4631	1,5170 1,1057
$dur_{\min G,B}$	67,5721	3,6673
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,0455 0,2934	-14,2294 5,4444
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-3,0973 -20,7862	0,0908 -15,8022
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,0808 0,8952	0,0065 3,1520
$L_{corrG,B}$	2,2062	2,2062
$f_1\Delta M_A+f_2$	0,0755 2,1426	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3.2 Entorno suburbano

3,8 GHz/Suburbano/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,8194 1,6507	2,5873 1,3919
$dur_{\min G,B}$	11,1083	4,4393
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-4,8136 1,9133	-17,0970 2,9350
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,4500 -17,9227	0,8991 -2,4082
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1763 0,8244	0,0582 4,0347
$L_{corrG,B}$	1,2571	1,2571
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0727 2,8177	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Suburbano/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,9226 1,3840	2,7375 0,6890
$dur_{\min G,B}$	6,7899	7,7356
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-1,9611 1,8460	-15,3022 2,9379
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,2329 -15,0063	0,5146 -8,9987
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,0334 1,3323	0,0880 4,4692
$L_{corrG,B}$	1,6156	1,6156
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,1281 2,3949	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Suburbano/45°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	4,3019 0,8530	2,3715 1,3435
$dur_{\min G,B}$	36,1277	9,5511
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,2730 0,9286	-5,6373 2,9302
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,2050 -17,5670	-0,7188 -21,0513
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,0074 0,7490	-0,2896 -0,3951
$L_{corrG,B}$	1,1191	1,1191
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,9586 10,8084	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Suburbano/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,8958 1,7061	1,9128 0,6869
$dur_{\min G,B}$	13,9133	2,9398
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,1987 1,0492	-13,1811 2,6228
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-1,6501 -18,9375	0,6911 -6,0721
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1369 0,4477	0,0598 3,7220
$L_{corrG,B}$	3,0619	3,0619
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,0419 5,8920	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Suburbano/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	4,1684 1,0766	1,4778 0,7033
$dur_{\min G,B}$	42,0185	1,8473
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	0,1600 0,5082	-10,2225 1,8417
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-3,4369 -18,1632	0,3934 -9,6284
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-1,1144 0,9703	-0,1331 0,7223
$L_{corrG,B}$	2,5817	2,5817
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,1129 4,0555	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3.3 Entorno: aldea

3,8 GHz/Aldea/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,0262 1,2355	1,9451 1,4293
$dur_{\min G,B}$	2,2401	1,9624
$\mu_{M_{A,GB}}, \sigma_{M_{A,GB}}$	-3,1324 1,8929	-16,5697 4,0368
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,4368 -15,1009	1,0921 1,6440
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,0423 1,2532	-0,0325 2,4452
$L_{corrG,B}$	0,8380	0,8380
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0590 1,5623	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Aldea/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,4504 1,1061	1,7813 1,2802
$dur_{\min G,B}$	2,3941	2,1484
$\mu_{M_{A,GB}}, \sigma_{M_{A,GB}}$	-1,8384 1,7960	-15,4143 4,5579
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,5582 -14,4416	0,8549 -2,2415
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,4545 0,8188	-0,0761 1,6768
$L_{corrG,B}$	0,9268	0,9268
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,0330 2,7056	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Aldea/45°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,2910 1,4229	1,2738 1,1539
$dur_{\min G,B}$	2,8605	0,7797
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-0,0018 1,1193	-12,1063 2,9814
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-1,2023 -14,0732	0,6537 -4,5948
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1033 0,9299	-0,0815 1,6693
$L_{corr G,B}$	0,9288	0,9288
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0002 1,9694	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Aldea/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,0956 1,3725	1,0920 1,2080
$dur_{\min G,B}$	8,1516	0,7934
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-0,5220 1,0950	-12,1817 3,3604
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,0831 -16,8546	1,1006 0,5381
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,0411 1,1482	-0,0098 2,4287
$L_{corr G,B}$	1,2251	1,2251
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,0530 2,7165	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Aldea/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,9982 1,3320	1,4165 0,4685
$dur_{\min G,B}$	28,3220	2,5168
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-1,3403 0,7793	-11,9560 1,5654
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,4861 -19,5316	0,5663 -6,8615
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,2356 0,7178	-0,2903 -1,2715
$L_{corr G,B}$	1,4378	1,4378
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,0983 3,9005	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3.4 Entorno rural boscoso

3,8 GHz/Rural boscoso/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,0294 1,4280	2,0290 1,5493
$dur_{\min G,B}$	1,7836	1,5269
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-3,2536 1,6159	-14,3363 2,7753
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,5718 -16,1382	0,8186 -2,9963
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,0805 0,9430	-0,0822 1,7660
$L_{corrG,B}$	1,0863	1,0863
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,1263 1,4478	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Rural boscoso/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,1218 1,4895	2,2051 1,5741
$dur_{\min G,B}$	2,4539	2,1289
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,5431 1,8811	-12,8884 3,0097
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,7288 -14,1626	0,6635 -4,6034
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1241 0,9482	-0,0634 2,3898
$L_{corrG,B}$	1,3253	1,3253
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0849 1,6324	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Rural boscoso/45°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,1803 1,3427	2,4017 1,1315
$dur_{mínG,B}$	6,7673	3,5668
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	0,0428 1,6768	-11,3173 2,7467
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-0,9948 -14,4265	0,2929 -9,7910
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1377 1,0077	-0,0387 2,6194
$L_{corrG,B}$	2,0419	2,0419
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,1894 2,1378	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Rural boscoso/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,4961 1,4379	2,2113 1,1254
$dur_{mínG,B}$	3,7229	1,9001
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-1,0828 1,0022	-12,3044 2,3641
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-1,2973 -16,6791	0,5456 -6,4660
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1187 0,6254	-0,0443 2,3029
$L_{corrG,B}$	1,9038	1,9038
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,1624 1,8417	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Rural boscoso/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,8382 1,3804	2,1470 1,0038
$dur_{mínG,B}$	6,8051	1,9195
$\mu_{M_A GB}, \sigma_{M_A GB}$	-0,8923 0,9455	-11,5722 2,3437
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	-1,3425 -17,5636	0,3459 -9,5399
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,1210 0,6444	-0,0275 2,6238
$L_{corrG,B}$	2,1466	2,1466
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0593 2,8854	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

3.5 Entorno residencial

3,8 GHz/Residencial/20°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,9050 1,7236	2,1969 0,9865
$dur_{\min G,B}$	10,7373	2,2901
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-1,4426 1,2989	-14,4036 3,0396
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,4875 -13,5981	0,5813 -6,9790
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,1343 1,8247	-0,0911 2,1475
$L_{corrG,B}$	1,2788	1,2788
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,2334 0,7612	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Residencial/30°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,7334 1,6971	1,8403 0,9268
$dur_{\min G,B}$	10,2996	1,8073
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,9996 1,0752	-12,9855 2,8149
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,3407 -14,8465	0,3553 -9,9284
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	-0,0413 1,2006	0,0501 3,8667
$L_{corrG,B}$	1,7072	1,7072
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,0443 2,2591	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Residencial/60°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	3,4044 1,3980	2,5534 1,7143
$dur_{minG,B}$	10,4862	4,7289
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	0,4640 0,7060	-2,3787 0,8123
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,3710 -19,6032	-2,3834 -24,6987
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,0332 0,5053	0,0172 0,7237
$L_{corrG,B}$	1,8017	1,8017
$f_1 \Delta M_A + f_2$	3,1149 3,5721	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

3,8 GHz/Residencial/70°		
Información	Ganancia de la antena < 5 dBi/Medidas tomadas con un helicóptero en una ciudad normal de tamaño medio y sus alrededores en Francia	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	2,9223 1,0267	2,5188 1,3166
$dur_{minG,B}$	7,3764	7,2801
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,1628 0,5104	-2,3703 1,5998
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0,1590 -20,4767	-1,0228 -22,4769
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0,1137 0,4579	-0,0986 0,2879
$L_{corrG,B}$	1,3531	1,3531
$f_1 \Delta M_A + f_2$	-0,0538 5,1204	
$[p_{B,mín}, p_{B,máx}]$	[0,1; 0,9]	

4 Frecuencias entre 10 y 20 GHz

4.1 Entorno rural

11,7 GHz/Rural/34°		
Información	Ganancia de la antena = 19 dBi/Medidas tomadas con un satélite alrededor de una ciudad grande de Alemania	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	1,7663 1,9350	-0,4722 1,7232
$dur_{\min G,B}$	0,9	0,8
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	0,05 0	-16 10,4
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0 -40,25	0,87 -14,26
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0 0,39	-0,21 0
$L_{corrG,B}$	0,5	0,5
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,088 1,21	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,9]	

4.2 Entorno suburbano

11,7 GHz/Suburbano/34°		
Información	Ganancia de la antena = 19 dBi/Medidas tomadas con un satélite alrededor de una ciudad grande de Alemania	
Parámetro	GOOD	BAD
$\mu_{G,B}, \sigma_{G,B}$	1,0125 1,6944	-0,8026 1,288
$dur_{\min G,B}$	1,5	1,1
$\mu_{M_A^{GB}}, \sigma_{M_A^{GB}}$	-0,02 0	-5,4 7,3
$h_{1G,B}, h_{2G,B}$	0 -38,17	0,69 -15,97
$g_{1G,B}, g_{2G,B}$	0 0,39	-0,21 0
$L_{corrG,B}$	0,5	0,5
$f_1 \Delta M_A + f_2$	0,036 0,80	
$[p_{B,\min}, p_{B,\max}]$	[0,1; 0,6]	