

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.833-10
(09/2021)

Atenuación debida a la vegetación

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

Prólogo

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

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <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, 2022

© UIT 2022

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.833-10

Atenuación debida a la vegetación

(Cuestión UIT-R 202/3)

(1992-1994-1999-2001-2003-2005-2007-2012-2013-2016-2021)

Cometido

En esta Recomendación se presentan varios modelos que permitirán al lector evaluar el efecto de la vegetación en las señales de ondas radioeléctricas. Se presentan modelos aplicables a diversos tipos de vegetación para varias geometrías de trayecto adaptadas para calcular la atenuación de las señales que pasan a través de la vegetación. La Recomendación contiene también datos medidos de la dinámica del desvanecimiento debido a la vegetación y características de la dispersión del retardo.

Palabras clave

Vegetación, atenuación, dinámica del desvanecimiento, dispersión de propagación, sistemas terrenales, sistemas Tierra-espacio

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

que la atenuación debida a la vegetación puede ser importante en diversas aplicaciones prácticas,

recomienda

que se utilice el contenido del Anexo 1 para evaluar la atenuación debida a la vegetación con diversos modelos para la gama de frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 100 GHz.

Anexo 1**1 Introducción**

En ciertos casos, la atenuación debida a la vegetación puede ser importante, tanto para los sistemas terrenales como para los sistemas Tierra-espacio. Pero la gran diversidad de condiciones y tipos de follaje dificultan la elaboración de un procedimiento de predicción general. Además, existe una falta de datos experimentales convenientemente verificados.

Los modelos que se describen a continuación se aplican a gamas de frecuencias específicas y a diferentes tipos de geometría de los trayectos.

2 Obstrucción en zonas boscosas

2.1 Trayecto terrenal con un terminal en zona boscosa

Para un trayecto radioeléctrico terrenal, uno de cuyos terminales está situado en un bosque o en una zona similar de vegetación extensa, la pérdida adicional debida a la vegetación puede describirse en base a dos parámetros:

- el índice de atenuación específica (dB/m) debida fundamentalmente a la dispersión de energía fuera del trayecto radioeléctrico, que se mediría en un trayecto muy corto;
- la atenuación adicional total máxima debida a la vegetación en un trayecto radioeléctrico (dB) limitada por el efecto de otros mecanismos, entre ellos, la propagación de ondas de superficie por encima del medio vegetal y la dispersión dentro del mismo.

En la Fig. 1, el transmisor está fuera de la zona boscosa y el receptor está a una cierta distancia, d , dentro de la misma. La atenuación excesiva, A_{ev} , debida a la presencia de la vegetación viene dada por:

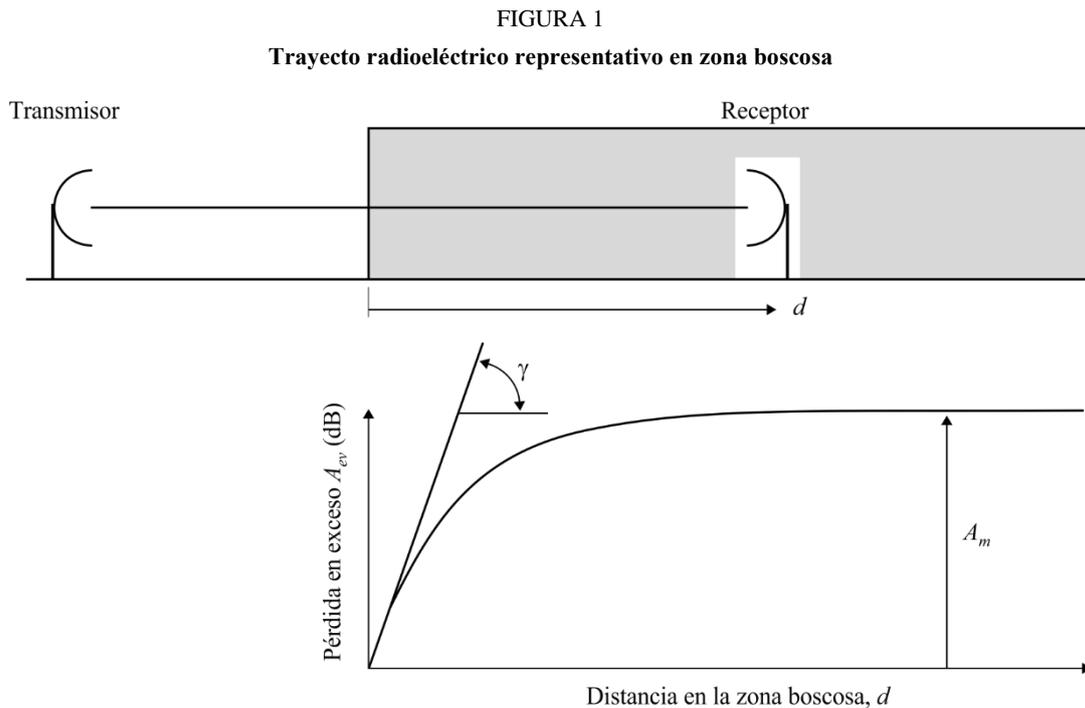
$$A_{ev} = A_m [1 - \exp (- d \gamma / A_m)] \quad (1)$$

siendo:

d : longitud del trayecto dentro de la zona boscosa (m)

γ : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)

A_m : atenuación máxima cuando un terminal está dentro de una zona de vegetación de un tipo y profundidad específicos (dB).

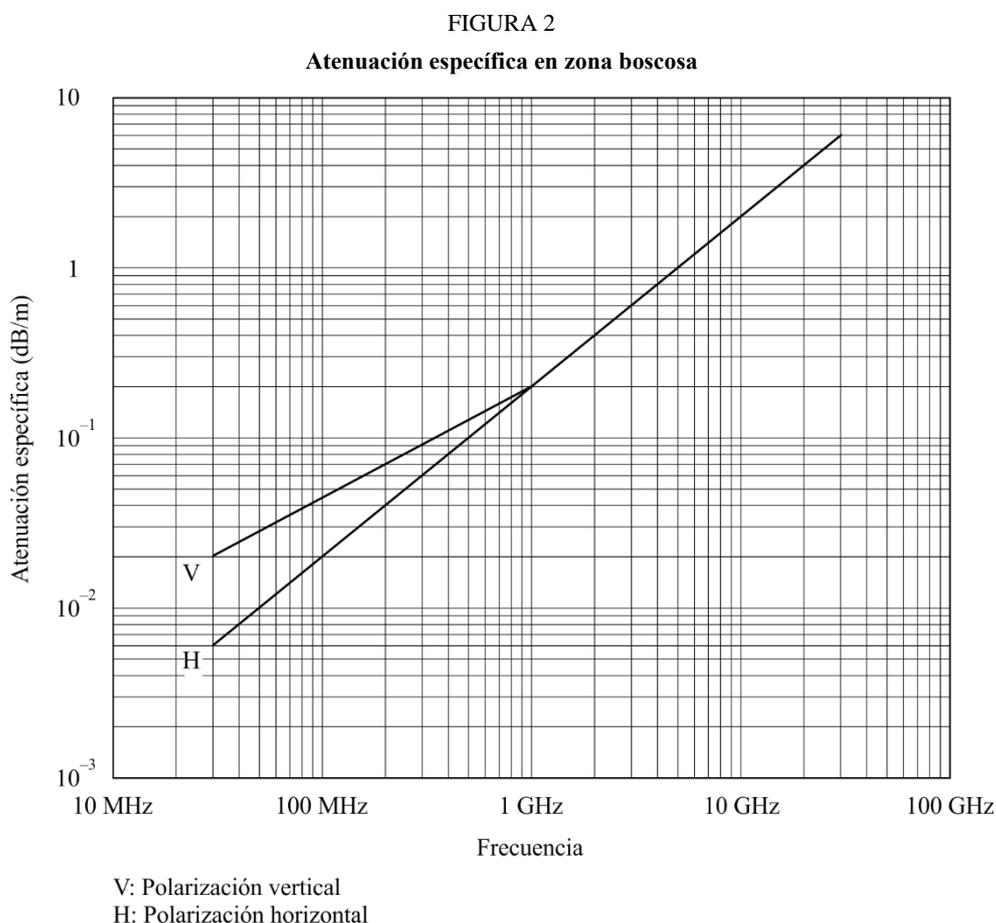


Es importante observar que en la definición de exceso de atenuación, A_{ev} , se incluye el exceso debido a todos los demás mecanismos, y no sólo la pérdida en espacio abierto. Por consiguiente, si la geometría del trayecto radioeléctrico de la Fig. 1 fuese de tal forma que el despejamiento total de Fresnel del terreno no existiera, A_{ev} sería el exceso de atenuación producido tanto en espacio abierto como por la pérdida por difracción. De igual forma, si la frecuencia fuera suficientemente alta como para que la absorción gaseosa resultara significativa, A_{ev} sería también el exceso producido por la absorción gaseosa.

Debe observarse asimismo que, A_m , es equivalente a la pérdida por ocupación del suelo observada frecuentemente en el caso de terminales obstruidos por alguna forma de cobertura del terreno u ocupación del suelo.

El valor de la atenuación específica debida a la vegetación, γ dB/m, depende de la especie y la densidad de dicha vegetación. En la Fig. 2 se proporcionan valores aproximados en función de la frecuencia.

En la Fig. 2 se muestran valores típicos de atenuación específica obtenidos a partir de diferentes mediciones en la gama de frecuencias que va de 30 MHz a 30 GHz aproximadamente en zona boscosa. Por debajo de 1 GHz las señales polarizadas verticalmente tienen tendencia a experimentar una atenuación superior a la que experimentan las polarizadas horizontalmente, aunque esto se debe a la dispersión causada por los troncos de los árboles.



Se hace hincapié en que la atenuación debida a la vegetación varía ampliamente debido a la naturaleza irregular del medio y a la gran variedad de especies, densidades y condiciones de humedad que se da en la práctica. Los valores que se muestran en la Fig. 2 deben considerarse únicamente como ejemplos.

A frecuencias del orden de 1 GHz, la atenuación específica en zonas de árboles con hojas es normalmente un 20% superior (dB/m) que en las zonas de árboles sin hojas. También puede haber variaciones de la atenuación debido al movimiento del follaje, por ejemplo a causa del viento.

El valor de la atenuación máxima, A_m , limitada por la dispersión de la onda de superficie, depende del tipo y la densidad de la vegetación, así como del diagrama de radiación de la antena del terminal que se encuentra dentro de la vegetación y de la distancia en vertical entre la antena y el punto más alto de la vegetación.

Se llevaron a cabo mediciones en la gama frecuencias 105-2 200 MHz en vegetación mixta de coníferas y árboles de hoja caduca (bosques mixtos) cerca de San Petersburgo (Rusia) en trayectos de diversas longitudes que oscilaban entre unos cuantos centenares de metros y 7 km con varias especies de árboles de una altura media de 16 m.

El valor medio de los resultados coincidió con la ecuación (1) con las constantes para la atenuación específica y máxima indicadas en el Cuadro 1.

CUADRO 1

Parámetro	Frecuencia (MHz) y polarización				
Frecuencia (MHz)	105,9 Horizontal	466,475 Oblicua	949,0 Oblicua	1 852,2 Oblicua	2 117,5 Oblicua
γ (dB/m)	0,04	0,12	0,17	0,30	0,34
A_m (dB)	9,4	18,0	26,5	29,0	34,1

La dependencia de la frecuencia de A_m (dB):

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (2)$$

donde f es la frecuencia (MHz), se ha obtenido mediante diversos experimentos:

- Mediciones en la gama de frecuencias 900-1 800 MHz realizadas en un parque con árboles tropicales en Río de Janeiro (Brasil) con una altura media de los árboles de 15 m. Se obtuvieron valores de $A_1 = 0,18$ dB y $\alpha = 0,752$. La altura de la antena receptora era de 2,4 m.
- Mediciones en la gama de frecuencias 900-2 200 MHz realizadas en un bosque cerca de Mulhouse (Francia) en trayectos de longitudes diferentes, desde unos pocos cientos de metros hasta 6 km con diversos tipos de árboles de altura media de 15 m. Se obtuvieron valores de $A_1 = 1,15$ dB y $\alpha = 0,43$. La antena receptora en el bosque era un monopolo de $\lambda/4$ montada sobre un vehículo a una altura de 1,6 m y la antena transmisora era un dipolo de $\lambda/2$ con una altura de 25 m. La desviación típica de las mediciones fue de 8,7 dB. Se observaron unas variaciones según la estación del año de 2 dB a 900 MHz y de 8,5 dB a 2 200 MHz.
- Mediciones en la gama de frecuencias 105,9-2 117,5 MHz realizadas en dos zonas de parque boscoso con vegetación de coníferas y árboles de hoja caduca (bosque mixto) en San Petersburgo (Rusia) con una altura de los árboles de 12 a 16 m y una distancia media entre ellos de 2 a 3 m, lo que corresponde a una densidad de 20-10 árboles/100 m². Se obtuvieron valores de $A_1 = 1,37$ dB y $\alpha = 0,42$. Para recibir la señal se utilizó una antena dipolo de un

cuarto de longitud de onda situada a 1,5 m sobre el nivel del suelo. La distancia entre el receptor y la antena del transmisor era de 0,4 a 7 km, y los trayectos para las mediciones se eligieron de forma que hubiese visibilidad directa entre esas antenas sin ningún obstáculo intermedio sino únicamente la zona boscosa. Se llevaron a cabo diferentes fases del experimento en condiciones meteorológicas similares: tiempo seco, velocidad del viento de 0 a 7 m/s.

- Mediciones realizadas en el sur de Inglaterra a una profundidad de 200 m a través de zonas boscosas con vegetación de coníferas y árboles de hoja caduca resultaron en un valor de A_m de 46 dB a la frecuencia de 3 605 MHz. Las mediciones se realizaron con antenas direccionales a 2 m y 10 m sobre el nivel del suelo. Los efectos multitrayecto se promediaron para centenas de mediciones realizadas a lo largo de cinco trayectos. Las mediciones se tomaron en verano y en invierno, pero no se observó una variación estacional considerable.

2.2 Trayectos oblicuos de satélite, aeronave u otra plataforma por encima de la superficie de la Tierra

2.2.1 Modelo de emplazamiento específico

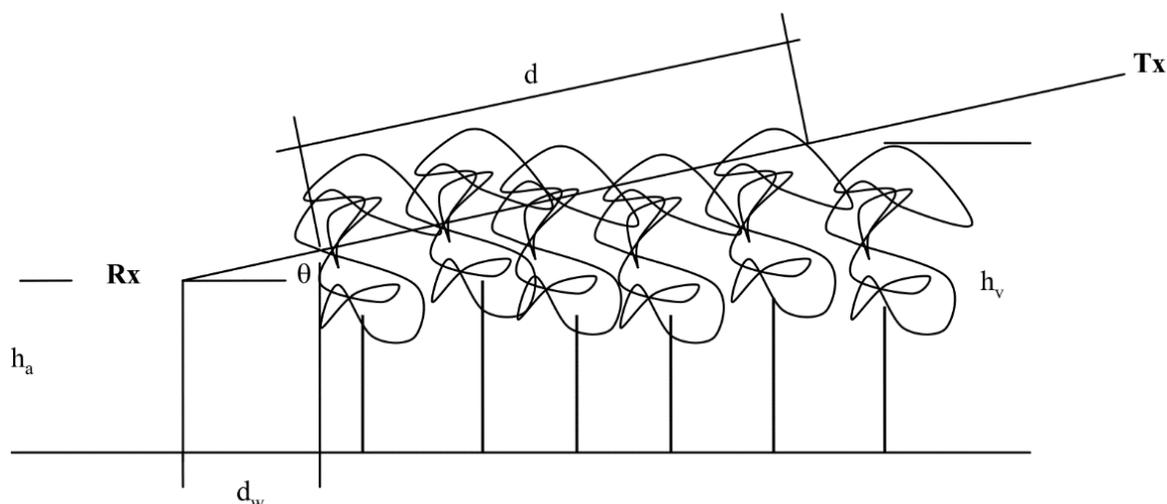
Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa:

En la Fig. 3, el transmisor (Tx) y receptor (Rx) se encuentran fuera de la zona boscosa. Los parámetros pertinentes son los siguientes:

- longitud del trayecto sobre la vegetación, d ;
- altura media de los árboles, h_v ;
- altura de la antena Rx sobre el suelo, h_a ;
- elevación del trayecto radioeléctrico, θ ;
- distancia de la antena al borde de la zona boscosa, d_w .

FIGURA 3

Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa con una longitud de trayecto sobre la vegetación, d , una altura media de los árboles h_v , una altura de la antena Rx sobre el suelo, h_a , una elevación del trayecto radioeléctrico θ , y una distancia de la antena al borde de la zona boscosa, d_w



Para describir las pérdidas de atenuación, L a lo largo del trayecto de propagación sobre la vegetación horizontal y oblicuo, se propone el siguiente modelo:

$$L(\text{dB}) = A f^B d^C (\theta + E)^G \quad (3)$$

donde:

- f : frecuencia (MHz)
- d : profundidad de la vegetación (m)
- θ : elevación (grados)

A, B, C, E y G : parámetros determinados de manera empírica.

Un ajuste a las mediciones realizadas en bosques de pinos en Austria dio como resultado:

$$L(\text{dB}) = 0,25 f^{0,39} d^{0,25} \theta^{0,05} \quad (4)$$

CUADRO 2

Tipo de árbol	A	B	C	E	G
Pino de Austria	0,25	0,39	0,25	0	0,05

La vegetación varía en función de las estaciones. En el siguiente modelo se indica la pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales.

$$L_{veg}(\text{dB}) = A f^B \log_{10}(d) (\theta + E)^G - 4 \quad (5)$$

donde:

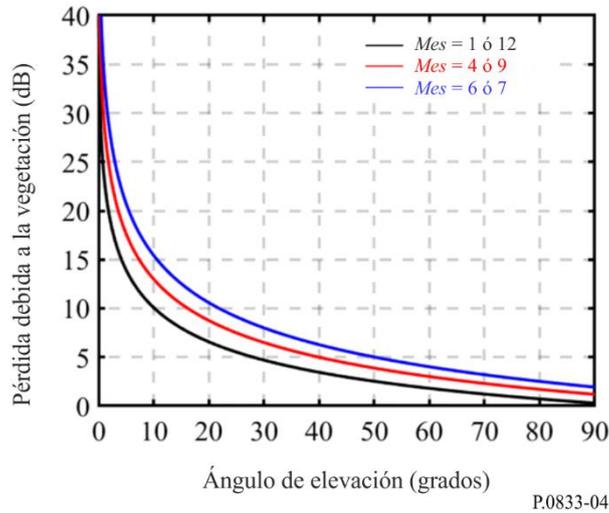
- f : frecuencia (MHz)
- d : profundidad de la vegetación (m)
- θ : elevación (grados)
- kh : $|mes - 6,5|$ (En el hemisferio sur, se utiliza $kh = 6 - |mes - 6,5|$ en lugar de la fórmula de la izquierda)
- Mes : mes (1, 2, 3, ..., 12)
- B : $(0,302\ 81 - 0,003624\ kh)(f / 1\ 000)^{(0,001\ 311\ 8 - 0,026\ 236\ kh)}$
- A, E y G : parámetros determinados de manera empírica.

CUADRO 3

Tipo de árbol	A	E	G
Cedro de Japón	1,87	0,01	-0,12
Enebro de Kenya	1,5	0,01	-0,12

En la Fig. 4 se muestra un ejemplo de la pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales en diferentes meses para 2 GHz.

FIGURA 4
 Pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales para 2 GHz



2.2.2 Modelo de emplazamiento general

El siguiente modelo estadístico se puede utilizar como modelo de emplazamiento general:

$$L(\text{dB}) = A \cdot f^B \cdot \log_{10}(d) \cdot (\theta + E)^G - 4 \cdot (p / 100) + 0,4 \tag{6}$$

donde:

f : frecuencia (MHz)

θ : ángulo de elevación (grados)

d : $243(p/100)(\theta + 1)^{-0,93047} + 1$

kh : $5,5 - 5p/100$ [Nota – La función está determinada por el tipo de vegetación como el bosque latifoliado y caducifolio.]

B : $(0,30281 - 0,003624kh)(f/1000)^{(0,0013118 - 0,026236kh)}$

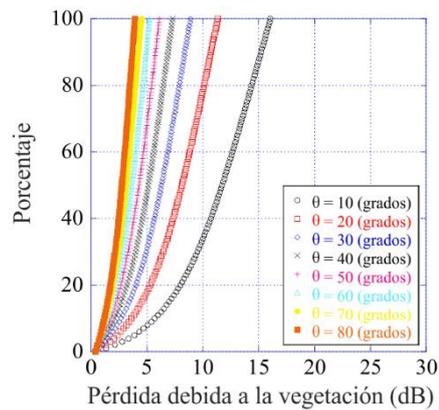
A, E y G : parámetros empíricos.

A, E y G se determinan para cada zona. Por ejemplo, se pueden utilizar los valores del cedro de Japón en el Cuadro 3 para un bosque latifoliado y caducifolio como el de Japón.

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de la pérdida debida a la vegetación calculada mediante el modelo estadístico en diferentes ángulos de elevación para 2 GHz.

FIGURA 5

Pérdida debida a la vegetación calculada mediante el modelo estadístico para 2 GHz



P.0833-05

3 Obstrucción por un solo obstáculo vegetal

3.1 A 1 GHz o por debajo de 1 GHz

La ecuación (1) no se aplica a trayectos radioeléctricos obstruidos por un solo obstáculo vegetal cuando ambos terminales están fuera del medio vegetal, como por ejemplo un trayecto que pase por la copa de un árbol aislado. En ondas métricas y decimétricas, cuando la atenuación específica tiene valores relativamente bajos, y en especial cuando la parte vegetal del trayecto radioeléctrico es relativamente corta, esta situación puede simularse de forma aproximada en términos de atenuación específica y de límite máximo de pérdida total en exceso:

$$A_{et} = d \gamma \quad (7)$$

donde:

d : longitud del trayecto a través de la copa del árbol (m)

γ : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)

$A_{et} \leq$ el exceso de atenuación más bajo para otros trayectos (dB).

La restricción del valor máximo para A_{et} es necesaria porque si la atenuación específica es suficientemente alta, existirá un trayecto con menor pérdida que rodee la zona de vegetación. Puede calcularse un valor aproximado de atenuación mínima para otros trayectos, como si la copa del árbol fuera una delgada pantalla de difracción de anchura finita utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526.

Se hace hincapié en que la ecuación (7), con el límite máximo de A_{et} , es únicamente una aproximación. En general, tenderá a sobrestimar el exceso de pérdida debido a la vegetación. Por consiguiente, es la más útil para una evaluación aproximada de la pérdida adicional a la hora de planificar un determinado servicio. Si se utiliza para una señal no deseada, la fórmula puede dar lugar a una subestimación significativa de la interferencia resultante.

3.2 Por encima de 1 GHz

Para trayectos terrenales debe aplicarse el método basado en la teoría TER descrita en el § 3.2.1 para calcular el efecto de un solo árbol.

Para trayectos oblicuos, debe aplicarse el método basado en la teoría de múltiple dispersión descrita en el § 3.2.2 para calcular el efecto de un solo árbol.

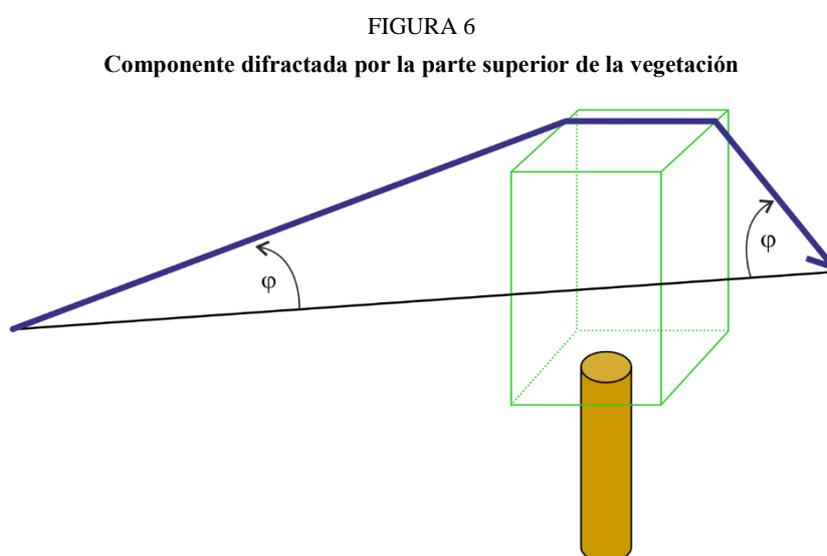
3.2.1 Trayecto terrenal

Para realizar una estimación del campo total, se calculan en primer lugar las componentes de difracción, las reflejadas en el suelo y las de dispersión por la vegetación y a continuación se combinan.

Las componentes difractadas se componen de aquellas que lo son por la parte superior de la vegetación y las que se difractan por los lados de dicha vegetación. Estas componentes y la componente reflejada en el suelo se determinan aplicando las Recomendaciones UIT-R. La componente que atraviesa la vegetación o dispersada por la misma se calcula utilizando un modelo basado en la teoría de transferencia de energía radiada (TER).

3.2.1.1 Cálculo de la componente difractada por la parte superior de la vegetación

Las pérdidas de difracción, L_{top} , experimentadas por el trayecto de la señal difractado por la vegetación, pueden considerarse como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble con la geometría representada en la Fig. 6.



P.0833-06

Se calcula de la forma siguiente:

$$L_{top} = L_{top_diff} + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (8)$$

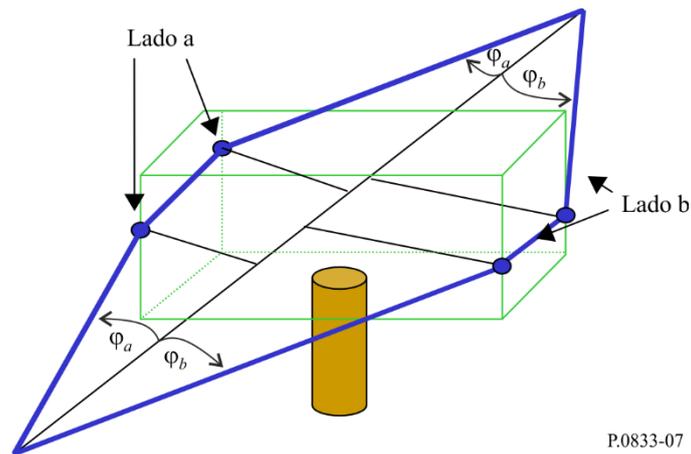
donde $G_{Tx}(\varphi)$ y $G_{Rx}(\varphi)$ son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda difractada emitida por la antena transmisora y que llega a la antena receptora, respectivamente. L_{top_diff} son las pérdidas de difracción total calculadas utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526 para bordes doblemente aislados.

3.2.1.2 Cálculo de la componente difractada lateral

Las pérdidas de difracción, L_{sidea} y L_{sideb} , experimentadas por la señal difractada en torno a la vegetación pueden tratarse nuevamente como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble, con la geometría definida en la Fig. 7.

FIGURA 7

Componentes difractados en torno de la vegetación



P.0833-07

Las pérdidas se calculan utilizando las ecuaciones (9) y (10):

$$L_{sidea} = L_{diff_sidea} + G_{Tx}(\varphi_a) + G_{Rx}(\varphi_a) \quad (9)$$

y

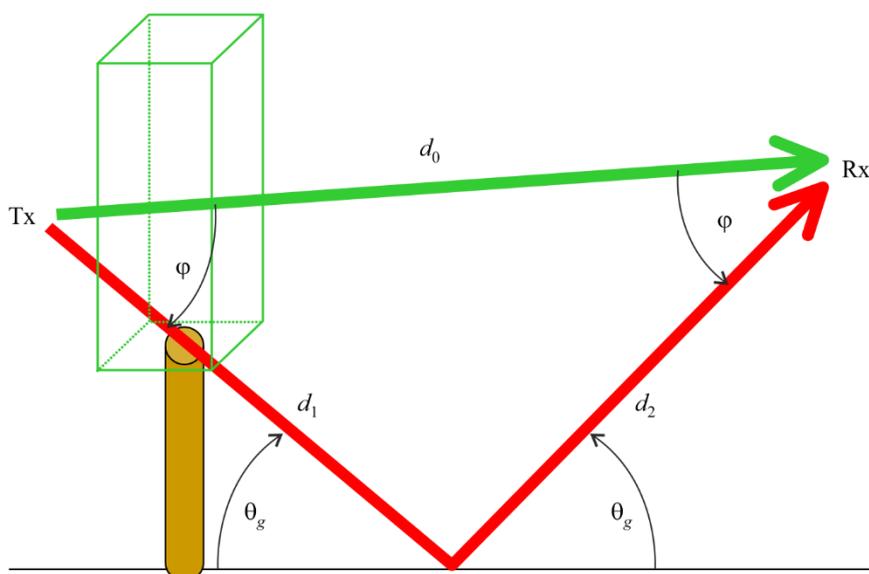
$$L_{sideb} = L_{diff_sideb} + G_{Tx}(\varphi_b) + G_{Rx}(\varphi_b) \quad (10)$$

donde $G_{Tx}(\varphi_{a,b})$ y $G_{Rx}(\varphi_{a,b})$ son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda difractada emitida por la antena transmisora y recibida por la antena receptora, para los lados a y b, respectivamente. L_{diff_sidea} y L_{diff_sideb} son las pérdidas de difracción totales en torno a cada lado y se han determinado utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526 para dos aristas aisladas.

3.2.1.3 Cálculo de la componente reflejada en el suelo

Se supone que el trayecto es lo suficientemente corto como para que la onda reflejada en el suelo pueda modelarse mediante la geometría ilustrada en la Fig. 8.

FIGURA 8
Componente reflejada en el suelo



P.0833-08

Para calcular las pérdidas experimentadas en el receptor por la onda reflejada en el suelo, puede determinarse el coeficiente de reflexión, R_0 , de la señal reflejada en el suelo con un determinado ángulo rasante, θ_g . Se trata de un método normalizado que se describe en la Recomendación UIT-R P.1238. Los valores de permitividad y conductancia se obtienen de la Recomendación UIT-R P.527.

Las pérdidas experimentadas por la onda reflejada en el suelo, L_{ground} , vienen dadas por la expresión:

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (11)$$

donde $G_{Rx}(\varphi)$ y $G_{Tx}(\varphi)$ son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda reflejada emitida por la antena transmisora y recibida por la antena receptora, respectivamente.

3.2.1.4 Cálculo de la componente que pasa a través de la vegetación o dispersada

Para realizar predicciones precisas de la atenuación en exceso debida a la vegetación el usuario necesita partir de los siguientes parámetros para aplicarlos a la ecuación TER (ecuación (12)):

- α : relación entre la potencia dispersada hacia adelante y la potencia total
- β : anchura de haz de la función de fase (grados)
- $\sigma\tau$: coeficiente combinado de absorción y dispersión
- W : albedo
- $\Delta\gamma_R$: anchura de haz de la antena de recepción (grados)
- d : distancia a la vegetación (m).

Dados los siguientes parámetros de partida: frecuencia (GHz), tamaño de hoja típico de la vegetación que va a modelarse e índice de la superficie de hoja (LAI) de las tres especies, pueden obtenerse los valores más próximos de α , β , W y $\sigma\tau$ a partir de los Cuadros de los parámetros RET (Cuadros 5 a 8). Si no se dispone de estos parámetros se toma la aproximación más cercana a la especie indicada en los Cuadros.

Estos cuatro parámetros que aparecen en los Cuadros, junto con la frecuencia y $\Delta\gamma_{3\text{dB}}$, la anchura de haz a 3 dB de la antena receptora, se utilizan en el modelo RET.

La atenuación debida a la dispersión a través de la vegetación, L_{scat} , viene dada por:

$$L_{\text{scat}} = -10 \log_{10} \left(e^{-\tau} + \frac{\Delta\gamma_R^2}{4} \cdot \{ [e^{-\hat{\tau}} - e^{-\tau}] \cdot \bar{q}_M + e^{-\tau} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha W \tau)^m [\bar{q}_m - \bar{q}_M] \} \right. \\ \left. + \frac{\Delta\gamma_R^2}{2} \cdot \left\{ -e^{-\hat{\tau}} \cdot \frac{1}{P_N} + \sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N [A_k e^{-\frac{\hat{\tau}}{s_k}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\mu_N}{s_k}}] \right\} \right) \quad (12)$$

donde:

$\Delta\gamma_R = 0,6 \cdot \Delta\gamma_{3\text{dB}}$: anchura de haz a 3 dB de la antena receptora

m : el orden del primer término I_1 no cambiará significativamente para $m > 10$ (por consiguiente en la mayoría de los casos $M = 10$)

$\tau = (\sigma_a + \sigma_s) \cdot z$: densidad óptica τ en función de la distancia z .

$$\bar{q}_m = \frac{4}{\Delta\gamma_R^2 + m\beta_S^2}$$

$$\beta_S = 0,6 \cdot \beta$$

$$P_N = \text{sen}^2 \left(\frac{\pi}{2N} \right) \quad (13)$$

$$\hat{\tau} = (1 - \alpha W) \tau$$

Los coeficientes de atenuación s_k se determinan mediante la ecuación característica:

$$\frac{\hat{W}}{2} \cdot \sum_{n=0}^N \frac{P_n}{1 - \frac{\mu_n}{s}} = 1$$

donde:

$$P_n = \text{sen} \left(\frac{\pi}{N} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi}{N} \right), (n = 1, \dots, N-1), \text{ y } \hat{W} = \frac{(1-\alpha)W}{1-\alpha W} \quad (14)$$

siendo N un número entero impar elegido como un compromiso teniendo en cuenta el tiempo de cálculo. Valores elevados de N aumentarán enormemente este tiempo de cálculo. Se ha considerado que unos valores razonables serían $11 \leq N \leq 21$. El término de la izquierda de la ecuación (12) será igual a 1 para valores de s , que representan las raíces de esta ecuación. Se obtendrán $N + 1$ raíces, para las que se aplica la siguiente expresión:

$$S_{0, \dots, \frac{N}{2}} = -S_{N, \dots, \frac{N+1}{2}}$$

Los factores de amplitud, A_k , se determinan mediante un sistema de ecuaciones lineales que viene dado por:

$$\sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \frac{A_k}{1-\frac{\mu_n}{s_k}} = \frac{\delta_n}{P_N} \quad \text{para } n = \frac{N+1}{2} \dots N \quad (15)$$

donde:

$$\mu_n = -\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right)$$

$$\delta_n = 0 \quad \text{para } n \neq N$$

y

$$\delta_n = 1 \quad \text{para } n = N$$

3.2.1.5 Combinación de los componentes individuales

Las pérdidas totales, L_{total} , experimentadas por una señal que se propaga a través de árboles vienen dadas por la combinación de los términos de pérdidas:

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{\left(\frac{-L_{sidea}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{sideb}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{top}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{ground}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{scat}}{10}\right)} \right\} \quad (16)$$

CUADRO 4
Parámetros de la vegetación

	Castaño de indias	Arce plateado		Plátano común		Tilo común		Arce blanco	
	Con hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas
LAI		1,691		1,930		1,475		1,631	0,483
Tamaño de la hoja (m)	0,300	0,150		0,250		0,100		0,150	

	Ginkgo	Cerezo japonés	Arce tridente	Pino coreano	Cedro del Himalaya	Plátano americano	Secuoya China
	Con hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas
LAI	2,08	1,45	1,95				
Tamaño de la hoja (m)	0,1 × 0,055	0,05 × 0,08	0,07 × 0,085	0,001 × 0,1	0,001 × 0,046	0,22 × 0,16	0,035 × 0,078

Cerezo japonés:	<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i>
Tilo común:	<i>Tilia x. Europaea</i>
Secuoya china:	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>
Ginkgo:	<i>Ginkgo biloba</i>
Castaño de indias:	<i>Aesculus hippocastanum</i> L
Cedro del Himalaya:	<i>Cedrus deodara</i>
Plátano común:	<i>Plantanus hispanica muenchh</i>
Pino coreano:	<i>Pinus Koraiensis</i>
Plátano americano:	<i>Platanus occidentalis</i>
Arce plateado:	<i>Acer saccharinum</i> L
Arce blanco:	<i>Acer pseudoplatanus</i> L
Arce tridente:	<i>Acer buergerianum</i>

CUADRO 5

Valores ajustados de α según la frecuencia/especies

Frecuencia (GHz)	Castaño de indias	Arce plateado		Plátano común		Tilo común		Arce blanco	
	Con hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas
1,3	0,90	0,95	0,90	0,95	0,90	0,90	0,95		0,95
2	0,75		0,95	0,95			0,95		0,95
2,2			0,95	0,50					
11	0,85	0,90		0,70	0,95	0,95	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,80		0,25				0,90	

Frecuencia (GHz)	Ginkgo	Cerezo japonés	Arce tridente	Pino coreano	Cedro del Himalaya	Plátano americano	Secuoya China
	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas
1,5	0,90	0,95	0,95	0,70	0,48	0,95	0,93
2,5	0,90	0,93	0,95	0,82	0,74	0,74	0,82
3,5	0,30	0,90	0,95	0,74	0,92	0,85	0,85
4,5	0,40	0,90	0,90	0,72	0,91	0,75	0,89
5,5	0,40	0,95	0,90	0,73	0,96	0,70	0,82
12,5	0,20	0,16	0,25	0,23	0,27	0,71	0,21

Nota – Tamaño de la hoja en metros.

CUADRO 6

Valores ajustados de β según la frecuencia/especies

Frecuencia (GHz)	Castaño de indias	Arce plateado		Plátano común		Tilo común		Arce blanco	
	Con hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas
1,3	21	14	43	42	16	76	50		70
2	80		31	49			60		62
2,2			25	13					
11	69	58		100	19	78	48		44
37				18					
61,5		48		2				59	

Frecuencia (GHz)	Ginkgo	Cerezo japonés	Arce tridente	Pino coreano	Cedro del Himalaya	Plátano americano	Secuoya China
	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas
1,5	28,65	57,30	18,47	70	51,5	61	44
2,5	36,89	57,30	45,34	55	77,5	23	71
3,5	57,30	114,59	13,43	72	103	105	65
4,5	28,65	114,59	57,30	71	94	65	34
5,5	28,65	229,18	114,59	75	100	77	77
12,5	3,58	3,38	4,25	4,37	3,54	2,36	2,57

Nota – Tamaño de la hoja en metros.

CUADRO 7

Valores ajustados del albedo según la frecuencia/especies

Frecuencia (GHz)	Castaño de indias	Arce plateado		Plátano común		Tilo común		Arce blanco	
	Con hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas
1,3	0,25	0,95	0,25	0,95	0,95	0,95	0,95		0,85
2	0,55		0,95	0,95			0,95		0,95
2,2			0,95	0,45					
11	0,95	0,95		0,95	0,95	0,75	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,80		0,50				0,90	

Frecuencia (GHz)	Ginkgo	Cerezo japonés	Arce tridente	Pino coreano	Cedro del Himalaya	Plátano americano	Secuoya China
	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas
1,5	0,95	0,95	0,96	0,78	0,43	0,88	0,98
2,5	0,92	0,95	0,95	0,92	0,71	0,71	0,97
3,5	0,10	0,95	0,95	0,71	0,87	0,84	0,93
4,5	0,83	0,30	0,95	0,87	0,92	0,95	0,99
5,5	0,90	0,90	0,95	0,75	0,97	0,96	0,94
12,5	0,97	0,90	0,94	0,98	0,98	0,25	0,99

Nota – Tamaño de la hoja en metros.

CUADRO 8

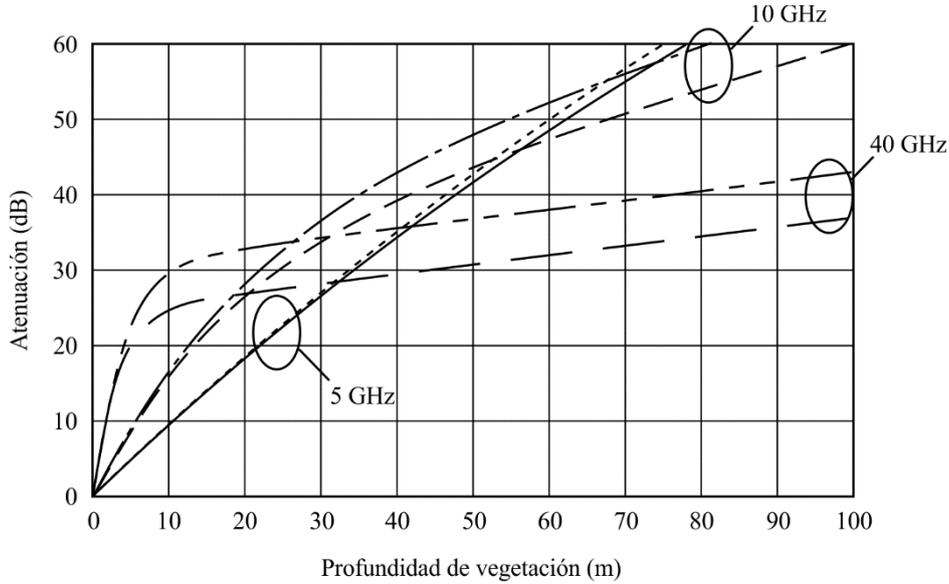
Valores ajustados de σ_τ según la frecuencia/especies

Frecuencia (GHz)	Castaño de indias	Arce plateado		Plátano común		Tilo común		Arce blanco	
	Con hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas
1,3	0,772	0,241	0,139	0,147	0,221	0,22	0,591		0,360
2	0,091		0,176	0,203			0,692		0,360
2,2			0,377	0,244					0,360
11	0,124	0,321		0,750	0,459	0,56	0,757		0,179
37				0,441					0,179
61,5		0,567		0,498				0,647	0,179

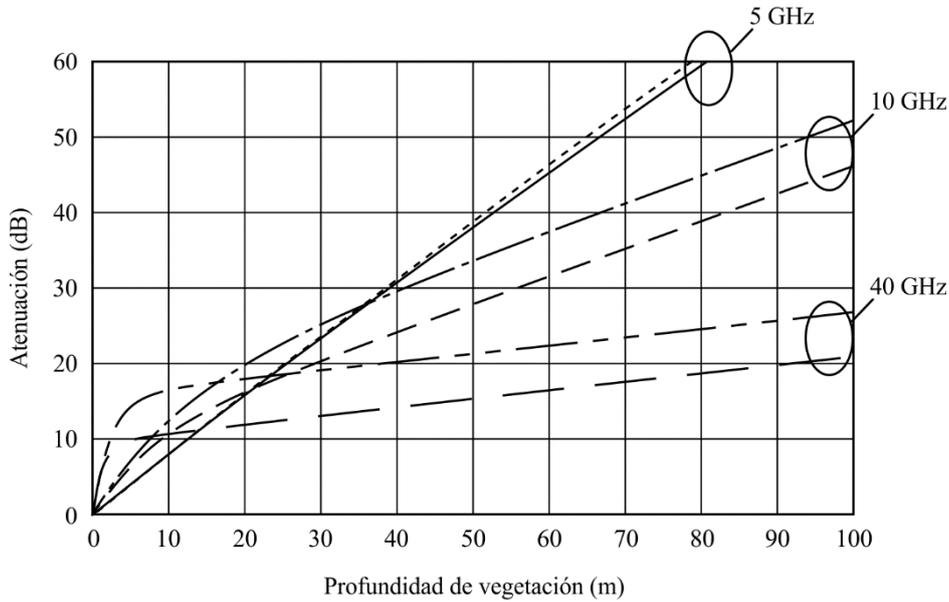
Frecuencia (GHz)	Ginkgo	Cerezo japonés	Arce tridente	Pino coreano	Cedro del Himalaya	Plátano americano	Secuoya China
	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas
1,5	0,40	0,40	0,47	0,215	0,271	0,490	0,261
2,5	1,10	1,10	0,73	0,617	0,402	0,486	0,350
3,5	0,30	0,30	0,73	0,334	0,603	0,513	0,370
4,5	0,46	0,46	0,27	0,545	0,540	0,691	0,266
5,5	0,48	0,48	0,31	0,310	0,502	0,558	0,200
12,5	0,74	0,74	0,47	0,500	0,900	0,170	0,440

Nota – Tamaño de la hoja en metros.

FIGURA 9
 Atenuación para un área de iluminación de 0,5 m² y 2 m²,
 a) con hojas,
 b) sin hojas*



a)



b)



P.0833-09

Nota de la Fig. 9: Las curvas muestran las pérdidas en exceso que experimenta la señal al pasar a través de la vegetación. En la práctica, una vez que la señal atraviesa la vegetación recibe contribuciones debidas a la propagación tanto a través de la vegetación como de la difracción que se produce en los alrededores. Así, el mecanismo de propagación dominante limitará las pérdidas totales debidas a la vegetación.

3.2.2 Trayecto oblicuo

Para trayectos oblicuos a través de la copa de un solo árbol se recomiendan dos métodos en función de si la frecuencia es inferior o superior a 30 GHz.

3.2.2.1 De 1 a 30 GHz

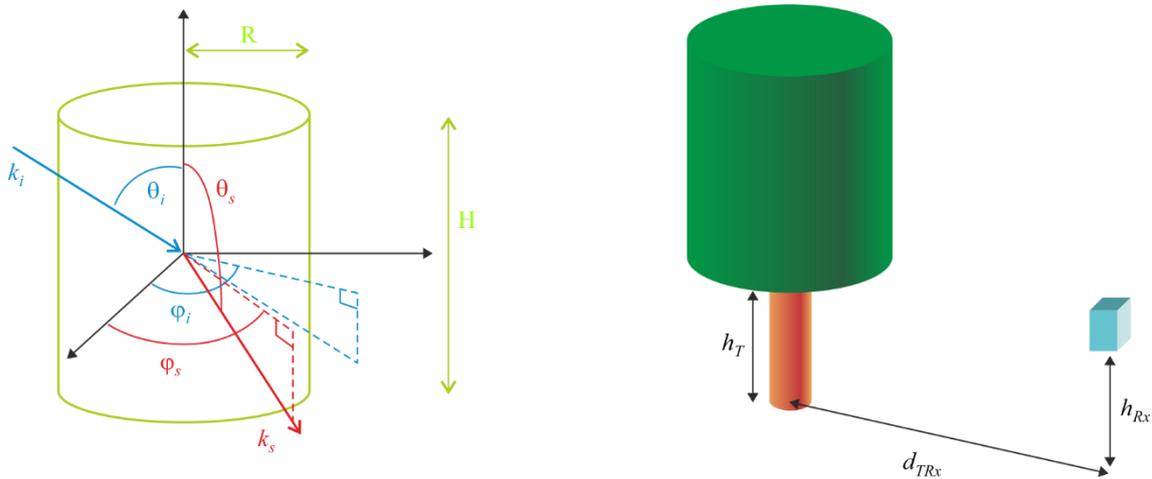
Para frecuencias inferiores a 30 GHz (excluida), se recomienda utilizar el siguiente método paso a paso a fin de calcular las pérdidas totales debidas a los árboles, el factor de Rice y la distribución acumulativa a pequeña escala de la potencia recibida.

Los parámetros de partida del modelo son los siguientes (para la definición de la geometría véase la Fig. 10):

- R : radio de la copa del árbol (m)
- H : altura de la copa del árbol (m)
- θ_i : ángulo de elevación incidente a la copa del árbol (rad)
- φ_i : ángulo acimutal incidente a la copa del árbol (rad)
- φ_s : ángulo de dispersión acimutal (rad)
- f : frecuencia (GHz, entre 1 y 30 GHz)
- d_{TRx} : distancia horizontal desde la antena de recepción hasta el árbol (m)
- h_T : altura de la base de la copa del árbol (m)
- h_{Rx} : altura de la antena de recepción (m, debe ser inferior a $h_T + H/2$):
polarización del enlace (V , H , circular dextrógira o circular levógira).

FIGURA 10

Definición de la geometría



P.0833-10

Paso 1 Se calcula θ_s , ángulo de dispersión en elevación (en radianes):

$$\theta_s = \frac{\pi}{2} - \operatorname{tg}^{-1} \left(h_{Rx} - \left(h_T + \frac{H}{2} \right), d_{TRx} \right) \quad (17)$$

Paso 2 Se definen las características de las ramas y las hojas:

- a : radio (m)
- h : longitud (m)
- ϵ_r : constante dieléctrica
- ρ : densidad (m^{-3}).

Si se desconocen los valores de a , h y ρ se utilizan los que aparecen en el Cuadro 9 que corresponden a un roble típico.

CUADRO 9
Tamaño y densidad medidos de las ramas y hojas
de un roble en Boxtel, Países Bajos

Tipo de dispersor	Radio (cm)	Longitud/espesor (cm)	Densidad (m^{-3})
Rama (1)	11,4	131	0,013
Rama (2)	6,0	99	0,073
Rama (3)	2,8	82	0,41
Rama (4)	0,7	54	5,1
Rama (5)	0,2	12	56
Hoja	3,7	0,02	420

Si no se conoce la constante dieléctrica de las ramas y hojas, puede calcularse de la siguiente forma:

– hojas:

$$\epsilon_l = 3,1686 + \frac{28,938}{1 + j \frac{f}{18}} - j \frac{0,5672}{f} \quad (18)$$

– ramas:

$$\epsilon_b = \epsilon'_b (1 + j \operatorname{tg} \delta_b) \quad (19)$$

donde ϵ'_b y $\operatorname{tg} \delta_b$ se calculan a la frecuencia f mediante interpolación de los valores del Cuadro 10.

CUADRO 10
Constante dieléctrica y tangente de pérdidas de la madera para
un contenido de humedad = 40% y temperatura = 20°C

Frecuencia (GHz)	1	2,4	5,8	30
ϵ'_b	7,2	6,2	6,0	5,3
$\operatorname{tg} \delta_b$	0,29	0,30	0,37	0,43

Paso 3 Se define la longitud de onda λ (m):

$$\lambda = \frac{0,3}{f} \quad (20)$$

Paso 4 Para cada categoría de ramas y de hojas se calculan los tensores de amplitud de la dispersión para los siguientes valores de orientación en acimut y elevación de las ramas y las hojas:

$$\text{Acimut: } \varphi_{sc}(i_\varphi) = i_\varphi \frac{2\pi}{5} \text{ con } 0 \leq i_\varphi \leq 5$$

$$\text{Elevación: } \theta_{sc}(i_\theta) = i_\theta \frac{\beta_{\text{máx}}}{5} \text{ con } 0 \leq i_\theta \leq 5 \text{ siendo } \beta_{\text{máx}} = \pi/4 \text{ para ramas de categoría}$$

(1) y (2) y $\beta_{\text{máx}} = \pi/2$ para ramas de categoría (3), (4), (5) y hojas.

Paso 4.1 Se calculan los ángulos de incidencia y salida en la estructura local del dispersor $\theta_{i,sc}$, $\varphi_{s,sc}$, $\theta_{s,sc}$ y $\varphi_{s,sc}$.

$$\begin{cases} \theta_{i,sc} = \cos^{-1}(\cos\theta_{sc} \cos\theta_i - \text{sen}\theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_i) \text{sen}\theta_i) \\ \varphi_{i,sc} = \text{tg}2^{-1}(\text{sen}\theta_i \text{sen}(\varphi_i - \varphi_{sc}), \text{sen}\theta_i \cos\theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_i) + \text{sen}\theta_{sc} \cos\theta_i) \\ \theta_{s,sc} = \pi - \cos^{-1}(-\cos\theta_{sc} \cos\theta_s - \text{sen}\theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_s) \text{sen}\theta_s) \\ \varphi_{s,sc} = \text{tg}2^{-1}(\text{sen}\theta_s \text{sen}(\varphi_s - \varphi_{sc}), \text{sen}\theta_s \cos\theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_s) + \text{sen}\theta_{sc} \cos\theta_s) \end{cases} \quad (21)$$

Paso 4.2 Se calculan los tensores de amplitud de la dispersión en la estructura local f_{vv} , f_{vh} , f_{hv} y f_{hh} para cada categoría de ramas y hojas:

– ramas en las que $\left| \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\epsilon_r} - 1 \right| < 1$ y hojas:

$$\begin{cases} f_{vv} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\epsilon_r - 1)}{2} (a_N \text{sen}\theta_{i,sc} \text{sen}\theta_{s,sc} - a_T \cos\theta_{i,sc} \cos\theta_{s,sc} \cos(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \mu \\ f_{hv} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\epsilon_r - 1)}{2} a_T \cos\theta_{i,sc} \text{sen}(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc}) \mu \\ f_{hh} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\epsilon_r - 1)}{2} a_T \cos(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc}) \mu \\ f_{vh} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\epsilon_r - 1)}{2} a_T \cos\theta_{s,sc} \text{sen}(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc}) \mu \end{cases} \quad (22)$$

con

$$\begin{cases} a_T = \frac{1}{(\epsilon_r - 1)g_t + 1} \\ a_N = \frac{1}{(\epsilon_r - 1)g_n + 1} \end{cases} \quad (23)$$

siendo:

– ramas:

$$\left\{ \begin{array}{l} b = \sqrt{1 - \left(\frac{2a}{h}\right)^2} \\ g_t = \frac{b(b^2 - 1)}{2} \left(\frac{b}{b^2 - 1} + \frac{\log_{10} \frac{b-1}{b+1}}{2} \right) \\ g_n = -(b^2 - 1) \left(\frac{b \log_{10} \frac{b-1}{b+1}}{2} + 1 \right) \end{array} \right. \quad (24)$$

– hojas:

$$\left\{ \begin{array}{l} m = \frac{2a}{h} \\ g_t = \frac{1}{2(m^2 - 1)} \left(\frac{m^2}{\sqrt{m^2 - 1}} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \right) - 1 \right) \\ g_n = \frac{m^2}{m^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{m^2 - 1}} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \right) \right) \end{array} \right. \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \mu = \sum_{n=5}^5 \sum_{l=0}^{50} \sum_{p=0}^{50} & \left[l \frac{a}{50} J_n \left(\frac{2\pi}{\lambda} l \frac{a}{50} \operatorname{sen} \theta_{i,sc} \right) J_n \left(\frac{2\pi}{\lambda} l \frac{a}{50} \operatorname{sen} \theta_{s,sc} \right) \right. \\ & \left. \times \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} h \left(\frac{l}{50} - \frac{1}{2} \right) \right) (\cos \theta_{i,sc} + \cos \theta_{s,sc}) \frac{a}{50} \frac{h}{50} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

– ramas en las que $\left| \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\epsilon_r} - 1 \right| > 1$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{vv} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1) h \mu \left(\frac{E_v(0)(Z(-1) + Z(1)) \cos \theta_{i,sc} \cos \theta_{s,sc} - Z(0) \operatorname{sen} \theta_{s,sc} + G_{vv}}{2\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} \right) \\ f_{vh} = 2j \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1) h \mu \left(\frac{E_v(0)(Z(-1) + Z(1)) \cos \theta_{i,sc} \cos \theta_{s,sc} - Z(0) \operatorname{sen} \theta_{s,sc} + G_{vh}}{2\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} \right) \\ f_{hh} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1) h \mu \left(\frac{H_h(0)(Z(-1) + Z(1))}{2\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} + G_{hh} \right) \\ f_{vh} = j \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1) h \mu G_{hv} \end{array} \right. \quad (27)$$

con:

$$\mu = \frac{\operatorname{sen} \frac{2\pi}{\lambda} h (\cos \theta_{i,sc} + \cos \theta_{s,sc})}{\frac{2\pi}{\lambda} h (\cos \theta_{i,sc} + \cos \theta_{s,sc})} \quad (28)$$

$$Z(n) = \frac{a^2}{u^2 - v_s^2} (u J_n(v_s) J_{n+1}(u) - v_s J_n(u) J_{n+1}(v_s)) \quad (29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{vv} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n) E_v(n) \cos \theta_{i,sc} - j \alpha(n) H_v(n) \cos \theta_{s,sc} - Z(n) E_v(n) \operatorname{sen} \theta_{s,sc}) \cos(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \\ G_{vh} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n) E_h(n) \cos \theta_{i,sc} - j \alpha(n) H_h(n) \cos \theta_{s,sc} - Z(n) E_v(n) \operatorname{sen} \theta_{s,sc}) \operatorname{sen}(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \\ G_{hh} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n) H_h(n) + j \alpha(n) E_h(n) \cos \theta_{i,sc}) \cos(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \\ G_{vv} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n) H_v(n) + j \alpha(n) E_v(n) \cos \theta_{i,sc}) \operatorname{sen}(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \end{array} \right. \quad (30)$$

siendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}} \\ v_i = \max \left(10^{-5}, \frac{2\pi}{\lambda} a \operatorname{sen} \theta_{i,sc} \right) \\ v_s = \frac{2\pi}{\lambda} a \operatorname{sen} \theta_{s,sc} \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\begin{cases} \alpha(n) = \frac{Z(n-1) - Z(n+1)}{2\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} \\ \beta(n) = \frac{Z(n-1) + Z(n+1)}{2\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} E_v(n) = \frac{j \operatorname{sen} \theta_{i,sc}}{R(n) J_n(u)} \left(\frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) \\ E_h(n) = \frac{-\operatorname{sen} \theta_{i,sc}}{R(n) J_n(u)} \left(\frac{1}{v_i^2} - \frac{1}{u^2} \right) n \cos \theta_{i,sc} \\ H_v(n) = \frac{\operatorname{sen} \theta_{i,sc}}{R(n) J_n(u)} \left(\frac{1}{v_i^2} - \frac{1}{u^2} \right) n \cos \theta_{i,sc} \\ H_h(n) = \frac{j \operatorname{sen} \theta_{i,sc}}{R(n) J_n(u)} \left(\frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \varepsilon_r \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} J'(n) = \frac{J_{n-1}(u) - J_{n+1}(u)}{2} \\ H'(n) = \frac{H_{n-1}^{(2)}(v_i) - H_{n+1}^{(2)}(v_i)}{2} \\ R(n) = \frac{\pi v_i^2 H_n^{(2)}}{2} \left(\left(\frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) \left(\frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \varepsilon_r \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) - \left(\frac{1}{u^2} - \frac{1}{v_i^2} \right) n \cos \theta_{i,sc} \right) \end{cases} \quad (34)$$

$J_n(\cdot)$ función de Bessel de n -ésimo orden del primer tipo

$H_n^{(2)}(\cdot)$ función de Hankel de n -ésimo orden.

Paso 4.3 Se calculan los factores de rotación de la estructura:

$$\begin{cases} t_{vi} = -(\operatorname{sen} \theta_{sc} \cos \theta_i \cos(\varphi_{sc} - \varphi_i) + \cos \theta_{sc} \operatorname{sen} \theta_i) \\ t_{hi} = \operatorname{sen} \theta_{sc} \operatorname{sen}(\varphi_{sc} - \varphi_i) \\ t_{vs} = \operatorname{sen} \theta_{sc} \cos \theta_s \cos(\varphi_{sc} - \varphi_s) - \cos \theta_{sc} \operatorname{sen} \theta_s \\ t_{hs} = \operatorname{sen} \theta_{sc} \operatorname{sen}(\varphi_{sc} - \varphi_s) \end{cases} \quad (35)$$

Paso 4.4 Se calcula la matriz de los tensores de dispersión de la estructura de referencia F_{VV} , F_{VH} , F_{HV} y F_{HH} para cada categoría de ramas y hojas:

$$\begin{cases} F_{VV} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{vs}(f_{vv}t_{vi} - f_{vh}t_{hi}) - t_{hs}(f_{hv}t_{vi} - f_{hh}t_{hi})] \\ F_{HH} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{hs}(f_{vv}t_{hi} + f_{vh}t_{vi}) + t_{vs}(f_{hv}t_{hi} + f_{hh}t_{vi})] \\ F_{HV} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{hs}(f_{vv}t_{vi} - f_{vh}t_{hi}) + t_{vs}(f_{hv}t_{vi} - f_{hh}t_{hi})] \\ F_{VH} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{vs}(f_{vv}t_{hi} + f_{vh}t_{vi}) - t_{hs}(f_{hv}t_{hi} + f_{hh}t_{vi})] \end{cases} \quad (36)$$

Paso 4.5 Se calcula el tensor de la amplitud de la dispersión en la estructura de referencia $F_{scat}(i_\theta, i_\varphi)$ para la polarización del enlace en cada categoría de ramas y hojas:

$$\begin{aligned} \text{Polarización vertical} \quad & F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = F_{VV} \\ \text{Polarización horizontal} \quad & F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = F_{HH} \\ \text{Polarización circular dextrógira} \quad & F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = \frac{1}{2}[F_{VV} + F_{HH} + j(-F_{VH} + F_{HV})] \\ \text{Polarización circular levógira} \quad & F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = \frac{1}{2}[F_{VV} + F_{HH} + j(F_{VH} - F_{HV})] \end{aligned} \quad (37)$$

Paso 5 Para cada categoría de ramas y hojas se calculan los momentos primero y segundo de la amplitud de la dispersión:

$$E \left[\left| F_{scat} \right|_{b,l}^2 \right] = \int_0^{2\pi\beta_{\text{máx}}} \int_0^{\beta_{\text{máx}}} |F_{scat}(\theta, \varphi)|^2 \frac{\text{sen}\theta}{1 - \cos\beta_{\text{máx}}} d\theta d\varphi \quad (38)$$

donde $\int_0^{2\pi\beta_{\text{máx}}} \int_0^{\beta_{\text{máx}}} f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi$ se calcula utilizando la regla trapezoidal y considerando:

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{\Delta x}{2} \sum_{k=1}^{N-1} (f(x_{k+1}) - f(x_k))$$

$$F_{scat}(\theta, \varphi) = F_{scat}(i_\theta, i_\varphi)$$

$$\Delta\theta = \frac{\beta_{\text{máx}}}{N_\theta - 1}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{N_\varphi - 1}$$

$$N_\theta = N_\varphi = 20$$

Paso 6 Se repiten los *Pasos 4.1 a 4.5* utilizando $\theta_s = \pi - \theta_i$ y $\varphi_s = \varphi_i$ para calcular

$$E[F_{scat}]_{b,l} = \int_0^{2\pi\beta_{\max}} \int_0^{\beta_{\max}} F_{scat}(\theta, \varphi) \frac{\sin\theta}{1 - \cos\beta_{\max}} d\theta d\varphi \quad (39)$$

Paso 7 Se calcula la amplitud de la dispersión equivalente y la sección transversal de dispersión equivalente por unidad de volumen de la copa del árbol:

$$F^{eq} = \sum_{ramasy\ hojas} \rho_{b,l} E[F_{scat}]_{b,l} \quad (40)$$

$$\sigma^{eq} = \sum_{ramasy\ hojas} 4\pi\rho_{b,l} E\left[|F_{scat}|^2\right]_{b,l} \quad (41)$$

Paso 8 Se calcula la parte imaginaria de la constante de propagación efectiva dentro de la copa del árbol, K_c'' :

$$K_c'' = -imag\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta_i + \frac{\lambda}{\sin\theta_i} F^{eq}\right) \quad (42)$$

Paso 9 Se calcula la atenuación específica de la copa del árbol en decibelios por metros (dB/m):

$$\alpha_c = 20K_c'' \log_{10} e = 8,686K_c'' \quad (43)$$

Paso 10 Se calcula la potencia relativa multitrayecto difusa con respecto al nivel de visibilidad directa $mp = 2\sigma^2$:

$$mp = 2\sigma^2 = \frac{\sigma^{eq}}{4\pi s^2} \int_{-H/2}^{H/2} \int_{-R}^R \int_{-R}^R \exp(-2K_c''(s_1(x,y,z) + s_2(x,y,z))) dx dy dz \quad (44)$$

donde $\int_{-H/2}^{H/2} \int_{-R}^R \int_{-R}^R f(x,y,z) dx dy dz$ se calcula utilizando la regla trapezoidal y considerando:

$$\begin{cases} s_1(x,y,z) = s_{1,0}(x,y,z) \times \min\left(1, \frac{\frac{H}{2} - z}{s_{1,0}(x,y,z) \cos\theta_i}\right) & \text{si } x^2 + y^2 \leq R^2 \\ s_1(x,y,z) = 0 & \text{si } x^2 + y^2 > R^2 \end{cases} \quad (45)$$

con
$$s_{1,0}(x,y,z) = \frac{(y \sin\varphi_i - x \cos\varphi_i) + \sqrt{(y \sin\varphi_i - x \cos\varphi_i)^2 - (x^2 + y^2 - R^2)}}{\sin\theta_i} \quad (46)$$

$$\begin{cases} s_2(x, y, z) = s_{2,0}(x, y, z) \times \min \left(1, \frac{-\left(\frac{H}{2} + z\right)}{s_{2,0}(x, y, z) \cos \theta_s} \right) & \text{si } x^2 + y^2 \leq R^2 \\ s_2(x, y, z) = 0 & \text{si } x^2 + y^2 > R^2 \end{cases} \quad (47)$$

con
$$s_{2,0}(x, y, z) = \frac{(-y \sin \varphi_s + x \cos \varphi_s) + \sqrt{(y \sin \varphi_s - x \cos \varphi_s)^2 - (x^2 + y^2 - R^2)}}{\sin \theta_s} \quad (48)$$

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \frac{\lambda}{4}$$

Paso 11 Se calcula la longitud del trayecto geométrico a través del árbol, l_{tree} (m)

Paso 11.1 Se calcula δ :

$$\delta = R^2 - d_{TRx}^2 \sin^2(\varphi_i - \varphi_s) \quad (49)$$

Paso 11.2 Se calcula l_{tree} :

- si $\delta \leq 0$: $l_{tree} = 0$
- si $\delta > 0$:

$$l_{tree} = \max \left(0, \min \left(\frac{d_{TRx} \cos(\varphi_i - \varphi_s) + \sqrt{\delta}}{\sin \theta_i}, \frac{h_T - h_{Rx} + H}{\cos \theta_i} \right) - \max \left(\frac{d_{TRx} \cos(\varphi_i - \varphi_s) - \sqrt{\delta}}{\sin \theta_i}, \frac{h_T - h_{Rx}}{\cos \theta_i} \right) \right) \quad (50)$$

Paso 12 Se calcula la potencia de trayecto directo respecto al nivel de visibilidad directa, a^2 :

$$a^2 = 10^{\frac{-\alpha_c \times l_{tree}}{10}} \quad (51)$$

Paso 13 Se calcula la potencia de trayecto total respecto al nivel de visibilidad directa, p_{tot} :

$$p_{tot} = a^2 + 2\sigma^2 \quad (52)$$

Paso 14 Se calcula el factor de Rice K (dB):

$$K = 10 \log_{10} \left(\frac{a^2}{2\sigma^2} \right) \quad (53)$$

Paso 15 Se calcula la distribución acumulativa de potencia a pequeña escala utilizando la distribución de Nakagami-Rice definida en la Recomendación UIT-R P.1057:

$$\text{Prob}(X > x) = 2 \exp \left(-\frac{a^2}{2\sigma^2} \right) \int_{x/\sigma\sqrt{2}}^{\infty} v \exp(-v^2) I_0 \left(\frac{2va}{\sigma\sqrt{2}} \right) dv \quad (54)$$

3.2.2.2 De 30 GHz a 100 GHz

Para frecuencias comprendidas entre 30 GHz y 100 GHz, se recomienda el siguiente método, que recurre a una modelización casi óptica:

Paso 1 Realizar un modelo explícito del árbol con arreglo al Cuadro 9 que incluya todos los elementos (ramas y hojas) cuyo radio sea mayor que $\lambda/2$, siendo λ la longitud de onda.

Paso 2 Para los elementos más pequeños que $\lambda/2$, calcular los parámetros de la copa utilizando el método para 1-30 GHz.

Paso 3 Determinar los tres elementos del modelo explícito del paso 1 que son intersectados por el rayo.

Paso 4:

- si ningún elemento ha sido intersectado por el rayo, utilizar los parámetros de la copa calculados en el paso 2;
- de lo contrario, añádase una atenuación de 40 dB a la atenuación en el espacio libre.

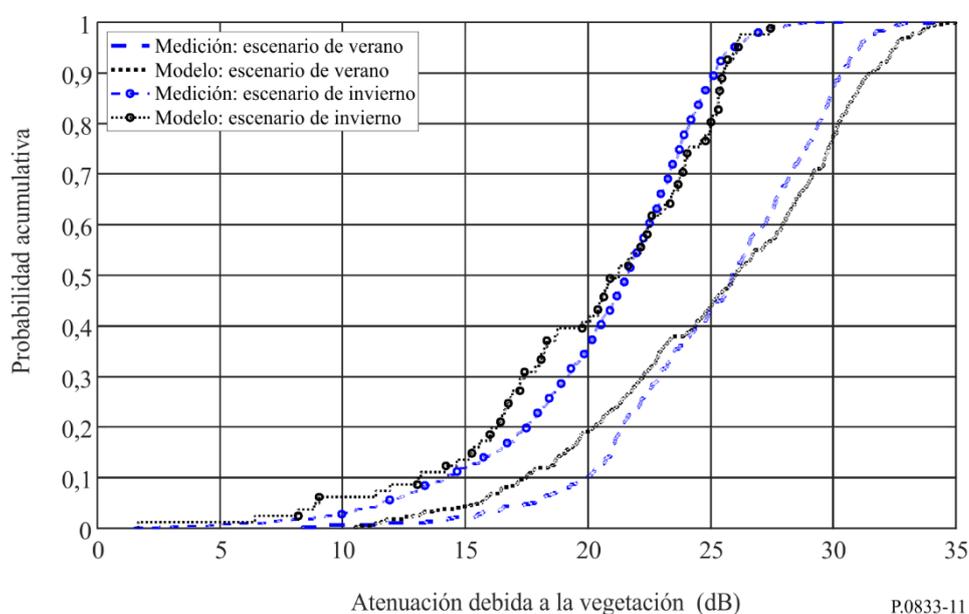
3.2.3 Efectos estacionales en árboles aislados a 60,5 GHz

La atención debida a la vegetación depende de las estaciones. La atenuación debida a una vegetación abundante en verano es mayor que la que se produce en invierno, como resultado del marchitamiento de las hojas.

En la Fig. 11 se presentan las funciones de la distribución acumulativa a través del mismo árbol con vegetación abundante en verano (líneas sin símbolos) y escasa vegetación en invierno (líneas con símbolos) en 60,5 GHz: las líneas discontinuas indican los datos medidos, mientras que las líneas de puntos indican los datos simulados.

FIGURA 11

Atenuación a través del mismo árbol en verano e invierno en 60,5 GHz



En el Cuadro 11 se presentan los coeficientes a y b de la distribución de Weibull, que caracterizan la atenuación a través de la vegetación medida en 60,5 GHz para siete tipos de árboles con vegetación densa en verano, y un subconjunto de tres árboles con escasa vegetación tras el marchitamiento de las hojas en invierno.

CUADRO 11
Atenuación a través de la vegetación en los escenarios
de verano e invierno en 60,5 GHz

Escenario	Tipo de árbol	Diámetro (m)	Coeficientes de atenuación	
			a	b
Verano	Ortiga europea	4,5	27,05	7,13
	Abedul	5,5	27,53	7,16
	Roble común	12	27,92	14,91
	Magnolia común	5	27,34	7,92
	Santa María	6	28,37	6,54
	Fresno blanco	8	24	4,66
	Píceas de Serbia	5	35,31	11,8
Invierno	Ortiga europea	4,5	22,23	5,9
	Abedul	5,5	22,11	3,41
	Roble común	12	25,77	5,78

La función de distribución acumulativa para la distribución de Weibull se expresa como:

$$F(x|a, b) = \int_0^x b a^{-b} t^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} dt = 1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (55)$$

Los parámetros de distribución de Weibull a y b representan la forma y la escala, respectivamente.

Se observó que el dispersado ángulo de llegada también depende de las estaciones. La ausencia de hojas genera una dispersión angular más estrecha en la distribución.

En el Cuadro 12 se presentan los coeficientes μ y σ de la distribución normal, que caracterizan el dispersado ángulo de llegada a través de la vegetación medido en 60,5 GHz para siete tipos de árboles con vegetación densa en verano, y un subconjunto de tres árboles con escasa vegetación tras el marchitamiento de las hojas en invierno.

CUADRO 12

**Coefficientes del dispersado ángulo de llegada para
los escenarios de verano e invierno en 60,5 GHz**

Escenario	Tipo de árbol	Diámetro (m)	Coeficientes del dispersado ángulo de llegada (grados)	
			μ	σ
Verano	Ortiga europea	4,5	0,45	4,91
	Abedul	5,5	0,32	4,05
	Roble común	12	1,31	4,37
	Magnolia común	5	0,45	3,98
	Santa María	6	-1,18	4,31
	Fresno blanco	8	-1,89	3,18
	Píceas de Serbia	5	-0,24	3,7
Invierno	Ortiga europea	4,5	-3,03	3,49
	Abedul	5,5	-1,02	3,91
	Roble común	12	-2,61	4,43

La función de distribución acumulativa para la distribución normal se expresa como:

$$F(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt, \text{ para } x \in \mathbb{R}. \quad (56)$$

Los parámetros de la distribución normal μ y σ representan respectivamente la desviación media y estándar.

4 Despolarización

Las mediciones previas a 38 GHz sugieren que la despolarización a través de la vegetación puede muy bien ser importante, es decir, que la señal de polarización cruzada transmitida puede ser similar a la señal copolar a través de la vegetación. Sin embargo, para las profundidades mayores de la vegetación que se requieren para que esto ocurra, la atenuación sería tan grande que ambos componentes, el copolar y el de polarización cruzada, quedarían por debajo de la gama dinámica de la antena receptora.

5 Efectos dinámicos

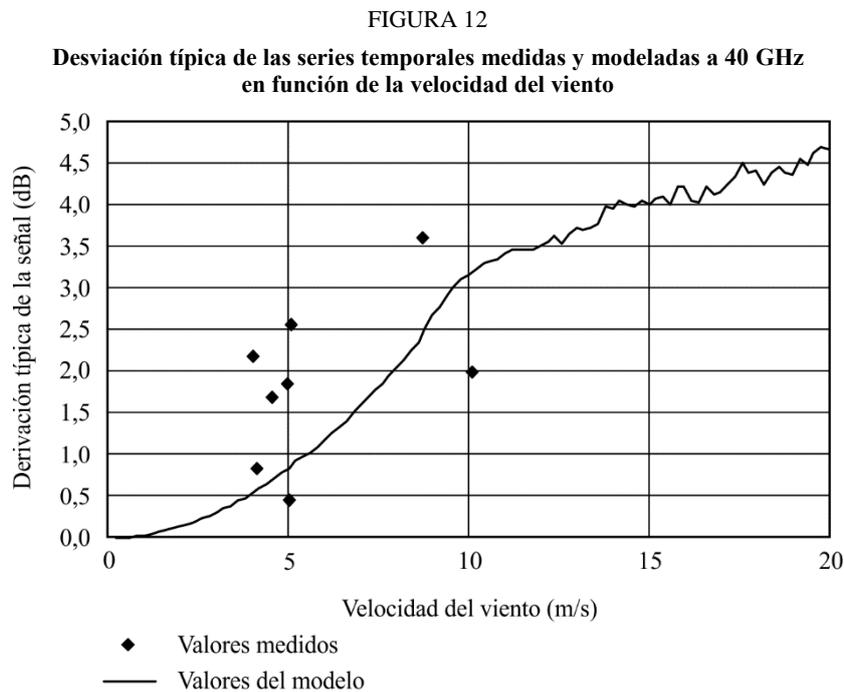
Se ha observado que cuando un enlace atraviesa vegetación la amplitud de la señal recibida varía rápidamente cuando la vegetación se mueve. La causa principal del movimiento se debe al viento y mediciones realizadas a 38 GHz y 42 GHz han demostrado que hay una fuerte correlación entre la tasa de fluctuación de la amplitud y la velocidad del viento.

Al considerar los efectos de la vegetación resulta evidente que el entorno no permanecerá estático. Un emplazamiento de receptor puede tener uno o más árboles a lo largo del trayecto de la señal que no proporcionan una atenuación media suficiente para que el nivel de la señal recibida caiga por debajo del margen del sistema. Sin embargo, se ha observado que cuando las hojas de los árboles se mueven, el nivel de la señal varía dinámicamente a lo largo de un amplio margen, lo que puede hacer inviable la prestación de un servicio. Se han efectuado diversas mediciones del nivel de una señal que

atraviesa árboles en función del tiempo, y dichas mediciones han mostrado una reducción media del nivel de la señal de unos 20 dB por árbol. Se ha encontrado una importante variabilidad de la señal con frecuentes descensos de hasta 50 dB de atenuación y una duración en torno a los 10 ms.

Cabe señalar que la estructura de nulo profundo observada en las mediciones de series temporales sólo puede producirse por la interacción de un cierto número de componentes de dispersión con la vegetación. Para simular este mecanismo de propagación, se ha calculado el campo suma obtenido a partir de un cierto número de fuentes de dispersión ubicadas aleatoriamente a lo largo de una línea tangencial al trayecto. Para dar a la señal resultante una variabilidad temporal adecuada, se modificó sinusoidalmente la posición de cada elemento de dispersión a fin de simular el movimiento de las ramas de los árboles con el viento. La frecuencia y amplitud de la variabilidad de la posición aumentó al incrementarse la velocidad del viento. Este modelo presentó una similitud razonable con las observaciones.

En la Fig. 12 se presentan las series temporales modeladas y las desviaciones típicas de la amplitud de la señal para diversas velocidades del viento, entre 0 y 20 m/s, y su comparación con los datos medidos.



Para una aproximación lineal sencilla la desviación típica σ se modela de la forma siguiente:

$$\sigma = v/4 \quad \text{dB} \quad (57)$$

donde v es la velocidad del viento (m/s).

Cabe señalar que a pesar del hecho de que este tipo de modelo muestra una dependencia con la frecuencia inherente, las diferencias de longitud de trayecto a través de los árboles son pequeñas y el desvanecimiento a lo largo de una anchura de banda típica de 40 MHz aparecerá plano. El desvanecimiento rápido se debe a la variabilidad temporal del medio.

En el Cuadro 13 se presentan datos sobre la media y la desviación típica de la atenuación medida a 38 GHz para tres tipos de árboles en condiciones de viento en calma y de viento intenso.

CUADRO 13

Dinámica del desvanecimiento en la vegetación medida a 38 GHz

Tipo de árbol		Arbusto de escaramujo, (diámetro de 2 m)	Manzano, (diámetro de 2,8 m)	Pino, (diámetro de 1,5 m)
Sin viento	Pérdidas medias (dB)	8,6	17,4	7,7
	Típicas (dB)	2,0	2,8	2,2
Viento intenso	Pérdidas medias (dB)	11,7	17,8	12,1
	Típicas (dB)	4,4	4,2	4,3

6 Características de dispersión de propagación por la vegetación

Una señal recibida a través de la vegetación consta de trayectos múltiples debidos a la dispersión. Una señal de entrada sufre dispersión de la propagación. Esa dispersión de la propagación puede tener un efecto notable en los sistemas digitales de banda ancha y, por lo tanto, es importante poder predecir las características de dispersión de la propagación debidas a la propagación a través de la vegetación.

Los datos indicados en el Cuadro 14 se basan en datos de medición de frecuencias de banda ancha efectuados en la República de Corea. Las características de tiempo-dominio se obtuvieron para una señal portadora de 3,5 GHz modulada con un impulso de 1,5 ns. La anchura de banda de 3 dB de la señal modulada en impulsos resultante es de 0,78 GHz.

CUADRO 14

Características del retardo a través de la vegetación

Parámetros	Ginkgo	Cerezo japonés	Arce tridente	Pino coreano	Cedro del Himalaya	Plátano americano	Secuoya China
	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas	Con hojas
Profundidad de la vegetación (m)	5,4	6,2	4,3	5,2	4,7	6,5	4,7
Dispersión de la propagación (ns)	7,27	8,23	5,89	6,62	6,39	2,56	6,56