

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1817*

**Datos de propagación necesarios para el diseño de enlaces ópticos
terrenales en el espacio libre**

(Cuestión UIT-R 228/3)

(2007)

Cometido

En esta Recomendación aparecen los datos de propagación necesarios para el diseño de enlaces ópticos en el espacio libre (FSO, *free-space optic*) y la planificación de sistemas ópticos en el espacio libre, en los respectivos intervalos de validez que se indican en la Recomendación.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que se pueden efectuar radiocomunicaciones en la Tierra utilizando el espectro óptico visible y el infrarrojo;
- b) que para planificar adecuadamente los sistemas de radiocomunicaciones ópticas en el espacio libre (FSO, *free-space optic*), que funcionan en el espectro óptico visible y en el espectro infrarrojo, es necesario contar con los datos de propagación convenientes;
- c) que se han desarrollado métodos que permiten calcular los principales parámetros de propagación requeridos para la planificación de sistemas ópticos en el espacio libre que funcionan en el espectro óptico visible y en el espectro infrarrojo;
- d) que, en la medida de lo posible, dichos métodos se han cotejado con la información disponible, han mostrado una precisión compatible con la variabilidad natural de los fenómenos de propagación y han demostrado ser los indicados para la mayoría de las aplicaciones actuales en la planificación de sistemas que funcionan en el espectro óptico visible y en el espectro infrarrojo,

reconociendo

- a) que en el número 78 del artículo 12 de la Constitución de la UIT se estipula que entre las funciones del Sector de Radiocomunicaciones se incluyen, «... realizar estudios sin limitación de gamas de frecuencias y adoptar recomendaciones ...»,

recomienda

- 1 que se adopten los métodos de predicción de los parámetros de propagación, que figuran en el Anexo 1 para la planificación de sistemas ópticos en el espacio libre, en los respectivos intervalos de validez indicados en dicho anexo.

NOTA 1 – En una Recomendación UIT-R sobre métodos de predicción de propagación requeridos para el diseño de enlaces ópticos terrenales en el espacio libre se puede encontrar más información sobre los métodos de propagación para frecuencias en el espectro óptico visible y en el espectro infrarrojo.

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 1 y 9 de Radiocomunicaciones.

Anexo 1

1 Consideraciones atmosféricas

La absorción y la dispersión de la luz en la atmósfera terrestre degradan el funcionamiento de los enlaces FSO. La interacción entre la atmósfera y la luz se debe a la composición de aquella, que suele estar formada por varias moléculas diferentes y por pequeñas partículas en suspensión, denominadas aerosoles. Esta interacción produce diversos fenómenos, tales como la absorción selectiva de frecuencias, la dispersión y el centelleo.

- La absorción selectiva de frecuencias a determinadas longitudes de onda ópticas es el resultado de la interacción entre los fotones y los átomos o las moléculas, que produce la extinción de los fotones incidentes, el aumento de la temperatura y la emisión de radiación.
- La dispersión atmosférica proviene de la interacción entre los fotones y los átomos y moléculas del medio de propagación. La dispersión provoca una redistribución angular de la radiación, con o sin modificación de la longitud de onda.
- El centelleo es la consecuencia de la turbulencia térmica dentro del medio de propagación, que produce una distribución aleatoria de las células. Dichas células tienen tamaños (10 cm – 1 km), temperaturas e índices de refracción variables, que tienen como resultado la dispersión, los multitrayectos y la variación de los ángulos de llegada. La frecuencia de la señal recibida fluctúa entonces en una gama entre 0,01 y 200 Hz. Asimismo, el centelleo hace que se distorsione el frente de ondas, con lo cual el haz se desenfoca.

Además, es posible que la luz solar afecte al comportamiento de los FSO cuando el Sol esté alineado con la dirección del enlace FSO.

2 Absorción molecular

La absorción molecular viene provocada por una interacción entre la radiación óptica y los átomos y moléculas del medio (N_2 , O_2 , H_2 , H_2O , CO_2 , O_3 , Ar , etc.). El coeficiente de absorción depende del tipo de moléculas de gas y de su concentración. Las variaciones espectrales del coeficiente de absorción condicionan el espectro de absorción, cuya naturaleza se debe a las variaciones de los posibles niveles de energía del gas, generados especialmente por las transiciones electrónicas, las vibraciones de los átomos y la rotación de las moléculas. Si se aumenta la presión o la temperatura, se tiende a ampliar las líneas de absorción espectral, mediante la excitación de niveles superiores de energía y el efecto Doppler. La absorción molecular es un fenómeno selectivo que produce ventanas de transmisión atmosféricas relativamente transparentes y bandas de absorción atmosféricas relativamente opacas.

Las ventanas de transmisión en la gama óptica son:

- Visible e infrarrojo (IR) muy cercano: de 0,4 a 1,4 μm
- IR cercano o IR I: de 1,4 a 1,9 μm y de 1,9 a 2,7 μm
- IR medio o IR II: de 2,7 a 4,3 μm y de 4,5 a 5,2 μm
- IR lejano o IR III: de 8 a 14 μm
- IR extremo o IR IV: de 16 a 28 μm .

Las moléculas de gas tienen niveles de energía cuantificados propios de cada tipo, y pueden absorber energía (o fotones) bajo la influencia de una radiación electromagnética incidente y pasar de un nivel inicial de energía, e_i , a un nivel superior de energía, e_f . La pérdida de uno o más fotones atenúa luego la energía de radiación.

Este proceso sólo tiene lugar cuando la frecuencia de la onda incidente corresponde exactamente a una de las frecuencias de resonancia de la molécula en cuestión, y que viene dada por:

$$\nu_0 = \frac{e_f - e_i}{h} \tag{1}$$

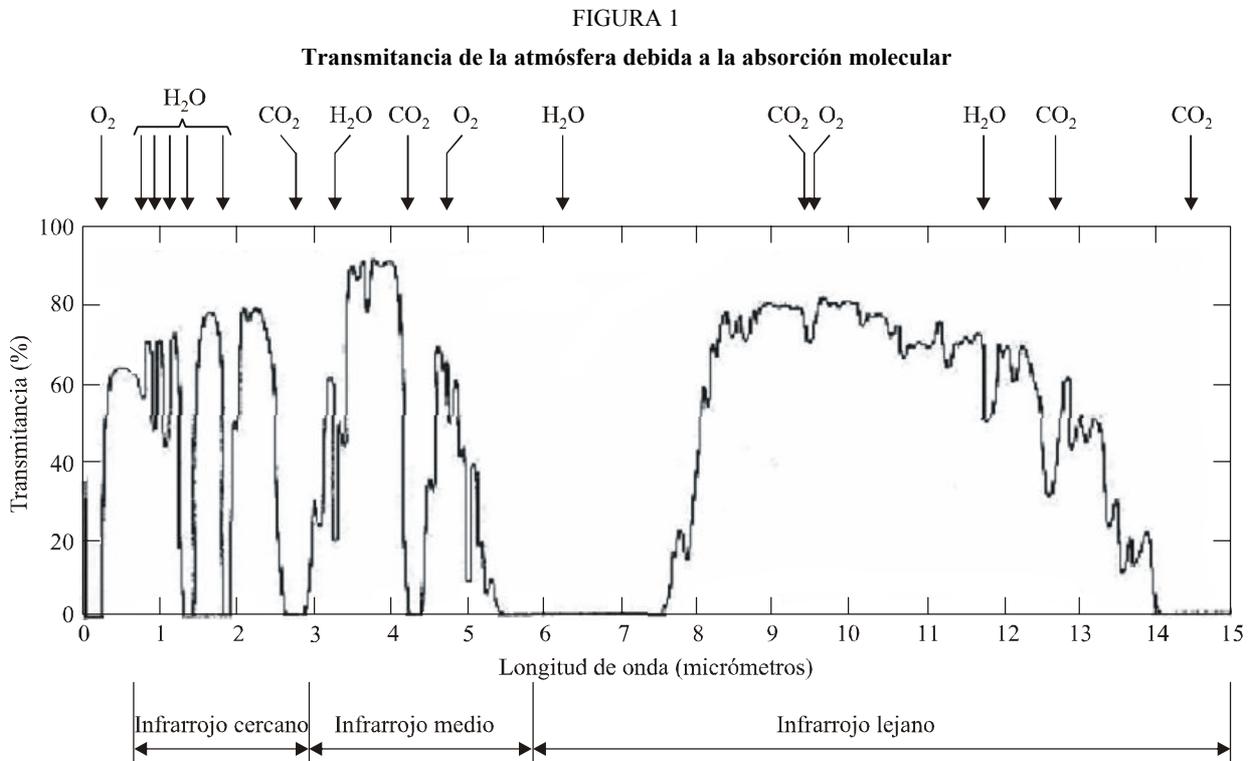
donde:

ν_0 : frecuencia de la onda incidente (Hz)

h : constante de Planck, $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ J-s.

Los parámetros fundamentales que determinan la absorción generada por la resonancia molecular son los siguientes: posibles niveles de energía propios a cada tipo de molécula, probabilidad de transición de un nivel de energía e_i a un nivel de energía e_f , intensidad de las líneas de resonancia y perfil natural de cada línea.

A menudo, el perfil de cada línea de absorción se ve afectado por el efecto Doppler cuando las moléculas se desplazan con respecto a la onda incidente, y por las colisiones provocadas por la interacción entre las moléculas. Estos fenómenos dan lugar a un ensanchamiento espectral de la línea natural de cada molécula y, en ciertos casos, por ejemplo en las moléculas de dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O), nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂), los perfiles de línea de absorción pueden expandirse bastante desde el centro de cada línea. Esta propiedad provoca un espectro continuo de absorción. En la Fig. 1 se muestra la transmitancia atmosférica nominal medida causada por la absorción molecular en un enlace horizontal de 1 820 m a nivel del mar.



3 Dispersión molecular

La dispersión molecular proviene de la interacción de la luz con partículas atmosféricas cuyos tamaños son menores que la longitud de onda de la luz incidente. La dispersión debida a las moléculas de gas de la atmósfera (dispersión de Rayleigh) contribuye a la atenuación total de la radiación electromagnética.

El coeficiente de extinción resultante de la dispersión molecular, $\beta_m(\lambda)$, viene dado por:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{24\pi^3}{\rho\lambda^4} 10^3 \left(\frac{[n(\lambda)]^2 - 1}{[n(\lambda)]^2 + 2} \right) \left(\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right) \quad (2)$$

donde:

- $\beta_m(\lambda)$: coeficiente de dispersión molecular (km^{-1})
- λ : longitud de onda (μm)
- ρ : densidad molecular (m^{-3})
- δ : factor de despolarización del aire ($\cong 0,03$)
- $n(\lambda)$: índice de refracción del aire.

$\beta_m(\lambda)$ es aproximadamente igual a:

$$\beta_m(\lambda) = A\lambda^{-4} \quad (3)$$

donde:

$$A = 1,09 * 10^{-3} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad \text{km}^{-1} \text{ m}^4 \quad (4)$$

y

- P : presión atmosférica (mbar)
- P_0 : 1 013 mbar
- T : temperatura de la atmósfera (K), y
- T_0 : 273,15 K.

La dispersión molecular es despreciable cuando se trata de longitudes de onda infrarrojas, y la dispersión de Rayleigh afecta sobre todo a longitudes de onda que van desde el ultravioleta hasta el espectro visible. Este tipo de dispersión es responsable del color azul del cielo despejado.

4 Absorción por aerosoles

Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas muy pequeñas, que se encuentran en suspensión en la atmósfera y cuya velocidad de caída es bastante baja (hielo, arena, humo, etc.). Sus tamaños oscilan entre 10^{-2} y $100 \mu\text{m}$. Algunos ejemplos de aerosoles son las partículas de neblina, de arena y de espuma de mar.

Como resultado de su composición química, su tamaño y su concentración, los aerosoles ejercen una influencia sobre las condiciones de atenuación atmosférica. En el medio marítimo, los aerosoles se componen especialmente de gotas de agua (espuma, niebla, llovizna, lluvia), cristales de sal y varias partículas de origen continental. El tipo y la densidad de estas últimas es función de la distancia desde la costa y de sus características.

El coeficiente de extinción debido a la absorción por aerosoles, $\alpha_n(\lambda)$, es:

$$\alpha_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_a \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{km}^{-1} \quad (5)$$

donde:

- λ : longitud de onda (μm)
- $dN(r)/dr$: distribución del tamaño de las partículas por unidad de volumen (cm^{-4})
- n'' : parte imaginaria del índice de refracción, n , del aerosol en cuestión
- r : radio de las partículas (cm)
- $Q_a(2\pi r/\lambda, n'')$: sección transversal de absorción para un determinado tipo de aerosol.

La teoría de Mie predice la difracción del campo electromagnético por partículas esféricas homogéneas. Las secciones transversales de absorción (Q_a) y de dispersión (Q_d) dependen del tamaño de la partícula, del índice de refracción y de la longitud de onda incidente. Corresponden a la parte de una onda incidente en la que la potencia absorbida (o dispersada) es igual a la potencia incidente.

El índice de refracción de los aerosoles depende de su composición química y de la longitud de onda. Se calcula como $n = n' + n''$, donde n' es función de la capacidad de dispersión de la partícula y n'' de la absorción de la partícula.

En las regiones espectrales visible e infrarroja cercana, la parte imaginaria del índice de refracción es bastante pequeña, con lo cual se la puede despreciar en el cálculo de la atenuación general (extinción). Por contra, en el caso del infrarrojo lejano, ha de tenerse en cuenta.

5 Dispersión por aerosoles

La dispersión por aerosoles (dispersión de Mie) tiene lugar cuando el tamaño de las partículas es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la luz incidente. La atenuación es función de la frecuencia y de la visibilidad, y la visibilidad está relacionada con la distribución del tamaño de las partículas. Este fenómeno constituye el factor más restrictivo cuando se trata de utilizar sistemas ópticos en el espacio libre a grandes distancias. En la región óptica, se debe principalmente a la bruma y la niebla. La atenuación en el régimen óptico puede llegar hasta 300 dB/km, mientras que para las ondas milimétricas suele ser de unos cuantos dB/km.

El coeficiente de extinción debida a la dispersión por aerosoles, β_n , viene dado por la siguiente fórmula:

$$\beta_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_d \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{km}^{-1} \quad (6)$$

donde:

- λ : longitud de onda (μm)
- $dN(r)/dr$: distribución del tamaño de las partículas por unidad de volumen (cm^{-4})
- n' : parte real del índice de refracción, n , del aerosol
- r : radio de las partículas (cm)
- $Q_d(2\pi r/\lambda, n')$: sección transversal de dispersión para un determinado tipo de aerosol.

La teoría de Mie predice el valor del coeficiente de dispersión, Q_d , debida a los aerosoles, partiendo de la hipótesis de que las partículas son esféricas y están lo suficientemente separadas como para

que se pueda calcular el campo dispersado bajo la hipótesis de una dispersión de campo lejano (solamente).

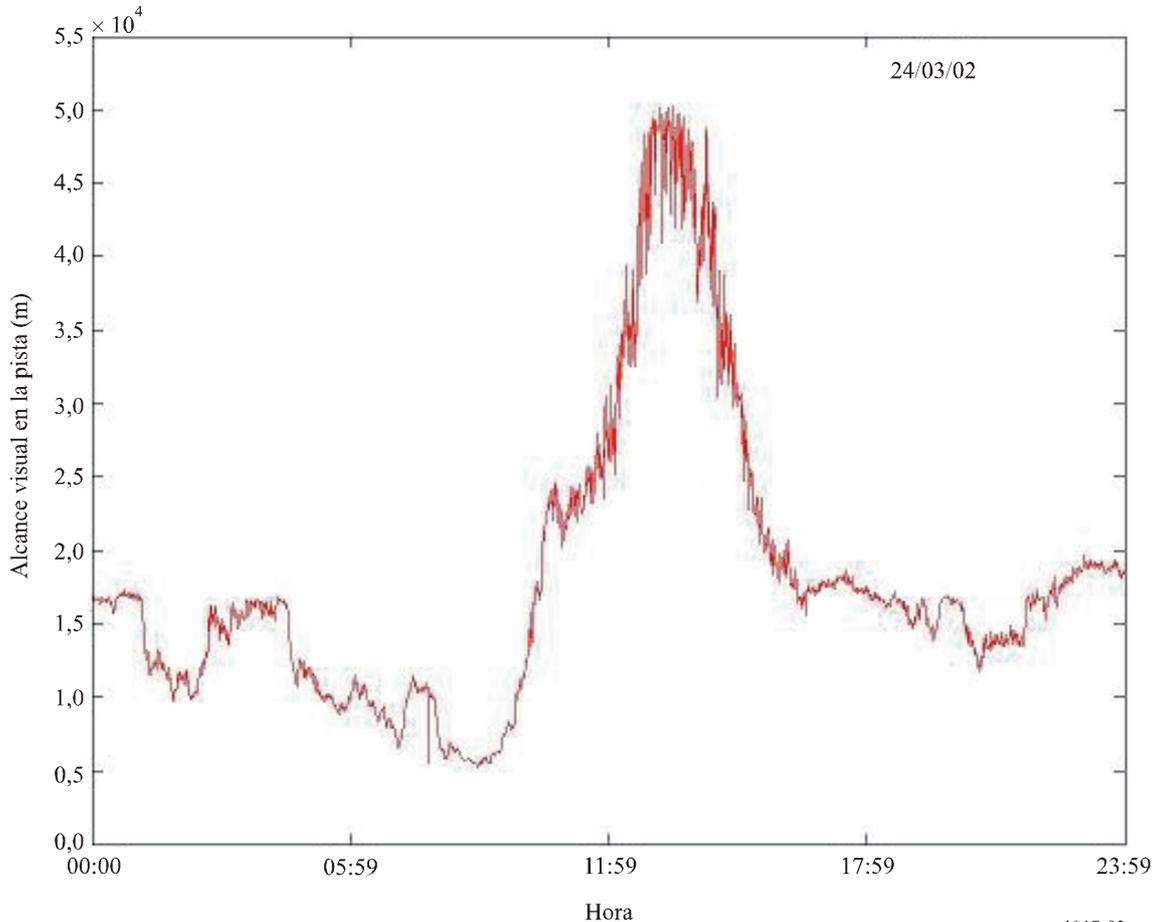
La sección transversal de dispersión, Q_d , depende en gran medida del tamaño del aerosol comparado con la longitud de onda, y es una función bastante selectiva en frecuencia en el caso de partículas cuyos radios sean menores o iguales que la longitud de onda. Alcanza su máximo valor (3,8) para radios de partículas iguales a la longitud de onda, en cuyo caso la dispersión es máxima. A medida que aumenta el tamaño de las partículas, la sección transversal de dispersión crece asintóticamente hacia un valor cercano a 2.

Como la concentración, la composición y la distribución de tamaños de los aerosoles varían con el tiempo y con la posición, es difícil predecir la atenuación provocada por estos aerosoles. Si bien la concentración está estrechamente relacionada con la visibilidad óptica, no existe una distribución única del tamaño de las partículas para una determinada visibilidad.

La visibilidad caracteriza la transparencia de la atmósfera tal como la percibe una persona. Se mide utilizando el alcance visual en la pista (RVR, *runway visual range*), y viene dada por la distancia que ha de atravesar un haz luminoso en la atmósfera antes de que su luminosidad (o flujo luminoso) disminuya hasta 0,05 veces su valor original. Puede medirse empleando un transmisómetro o un difusómetro.

En la Fig. 2 se muestra un ejemplo de las variaciones del alcance visual en la pista observado en La Turbie, Francia, durante un día bastante despejado.

FIGURA 2
Variaciones del alcance visual en la pista observado en La Turbie, Francia,
durante un día bastante despejado



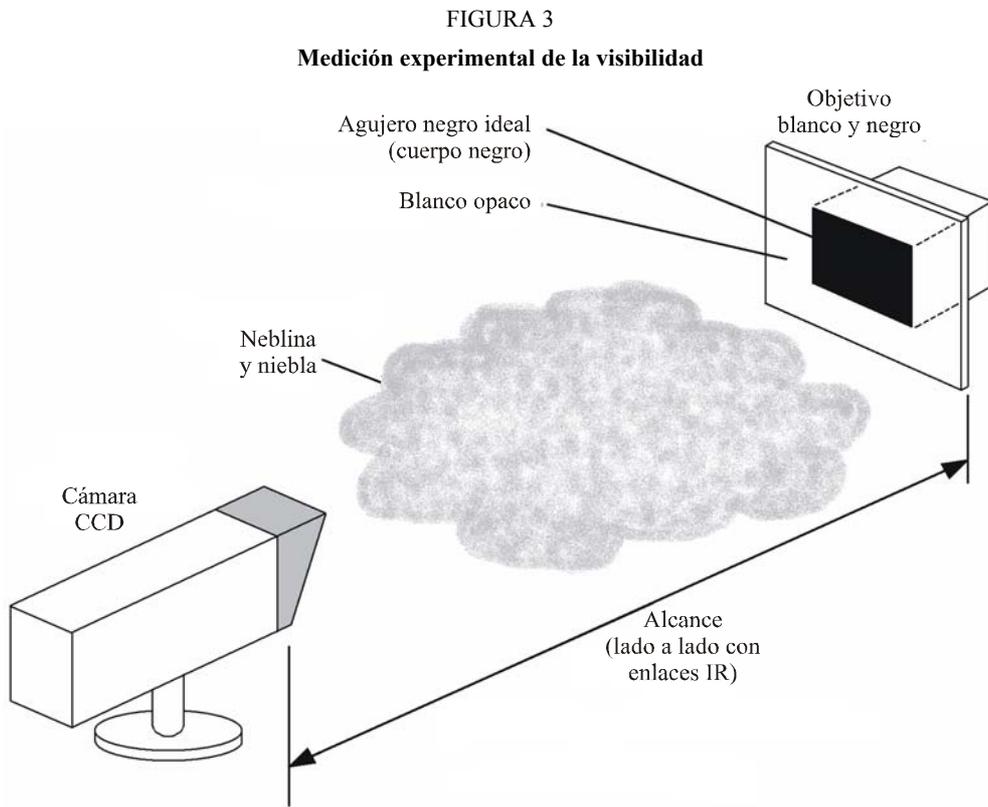
La visibilidad a lo largo del trayecto de transmisión también se puede medir con una cámara CCD y un objetivo de referencia blanco y negro. En este caso, el alcance visual, V_r , viene dado por:

$$V_r = \frac{\ln(0,02)}{\ln(C/C_0)} d \quad (7)$$

C es el contraste medido entre las regiones en blanco y negro del objetivo, C_0 es el índice intrínseco de contraste del objetivo (medido en sus inmediaciones), y d es la distancia a la que se encuentra el objetivo. El valor de C se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C = \frac{L_w - L_b}{L_w + L_b} = 0,02 = e^{-b_{EX} \cdot V_r} \quad (8)$$

donde L_w y L_b son las luminancias de las partes blanca y negra del objetivo, b_{EX} es el coeficiente de extinción y V_r el alcance visual. La Fig. 3 muestra el objetivo ideal, con su parte negra, la superficie de una cavidad en un panel pintado de blanco, y la superficie interna del agujero pintada de negro a fin de evitar toda dispersión directa de la luz.



1817-03

Todas las características ópticas de los aerosoles, y en particular de la niebla, están relacionadas con la distribución de tamaños de las partículas, que puede considerarse como el parámetro fundamental a la hora de establecer las propiedades físicas y ópticas de la niebla.

Esta distribución se suele representar mediante funciones analíticas, como la distribución lognormal para los aerosoles y la distribución gamma modificada para el caso de la niebla. Esta última distribución, que se utiliza a menudo en modelos de diversos tipos de niebla y nubes, viene dada por:

$$N(r) = ar^\alpha \exp(-br) \quad (9)$$

donde $N(r)$ es el número de partículas por unidad de volumen y por unidad de incremento del radio r , y α , a y b son parámetros que caracterizan la distribución del tamaño de las partículas.

En los programas informáticos (véase el Apéndice 1 al Anexo 1) se tienen en cuenta normalmente dos casos particulares: la niebla de alta advección y la niebla de radiación moderada, cuyos modelos se construyen utilizando la distribución de tamaños gamma modificada, como se muestra a continuación. En el Cuadro 1 se presentan valores característicos de los parámetros de la distribución gamma modificada.

CUADRO 1

Diversos parámetros de la distribución del tamaño de las partículas en los casos de niebla de alta advección y niebla de radiación moderada

	α	a	b	N (cm ⁻³)	W (g/m ³)	r_m (μm)	V (m)
Niebla de alta advección	3	0,027	0,3	20	0,37	10	130
Niebla de radiación moderada	6	607,5	3	200	0,02	2	450

donde:

N : número total de partículas de agua por unidad de volumen (cm³)

r_m : radio modal (μm) para el cual la distribución presenta un máximo

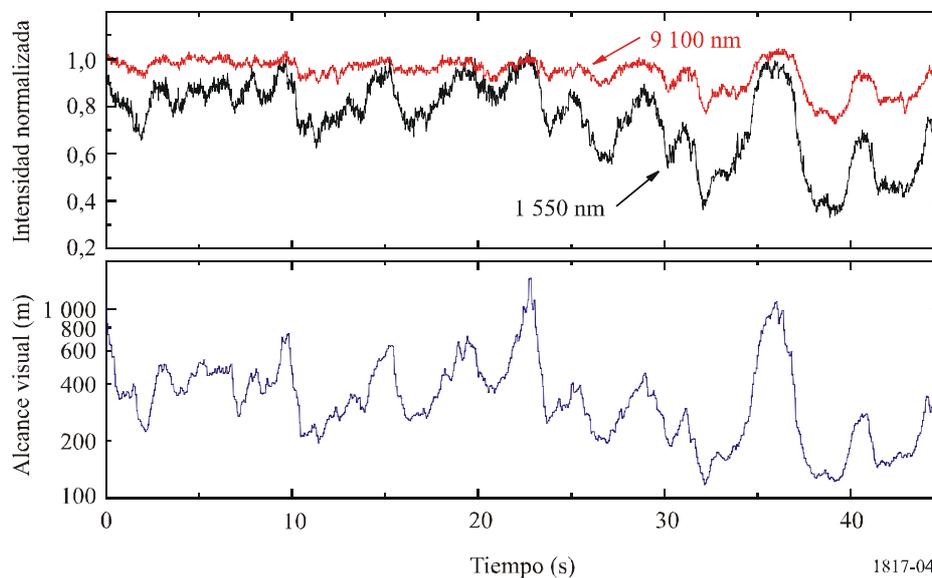
W : contenido de agua líquida (g/m³)

V : visibilidad correspondiente al tipo de niebla (m).

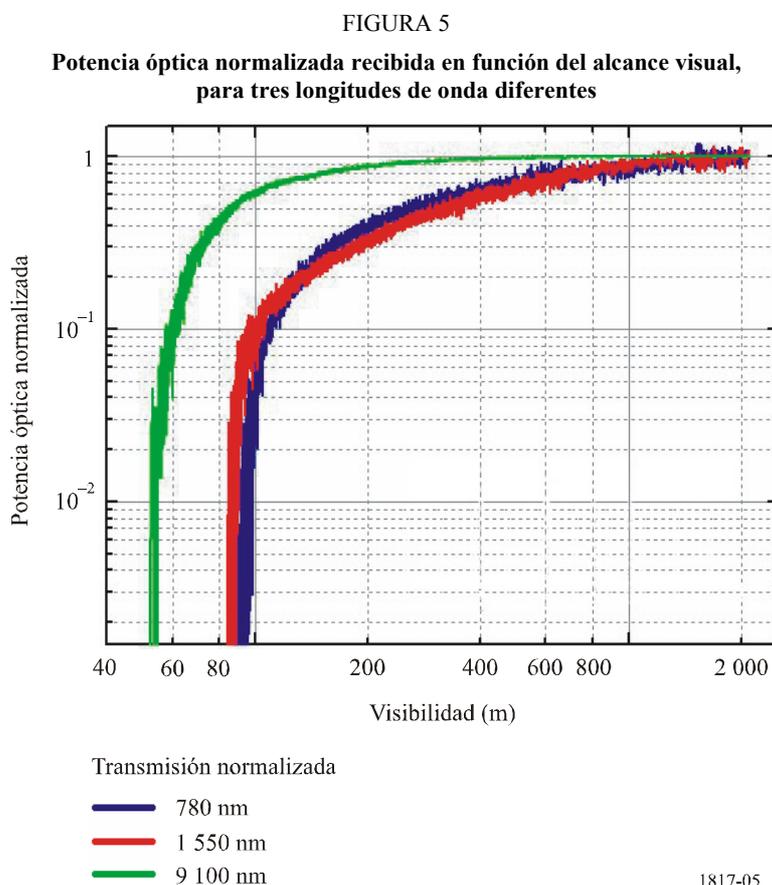
El nivel de señal recibida puede tener fluctuaciones importantes a corto plazo, debidas a variaciones en la visibilidad. La Fig. 4 representa las intensidades recibidas normalizadas de enlaces en el IR lejano y en el IR medio, junto con la visibilidad del enlace durante un intervalo de un minuto.

FIGURA 4

Intensidades recibidas en tiempo real para enlaces en el IR lejano y en el IR medio (a) y el alcance visual (b) registrados simultáneamente durante un periodo de un minuto



En la Fig. 5 se presenta la potencia óptica normalizada en función del alcance visual, medida a 780 nm, 1 550 nm y 9 100 nm.

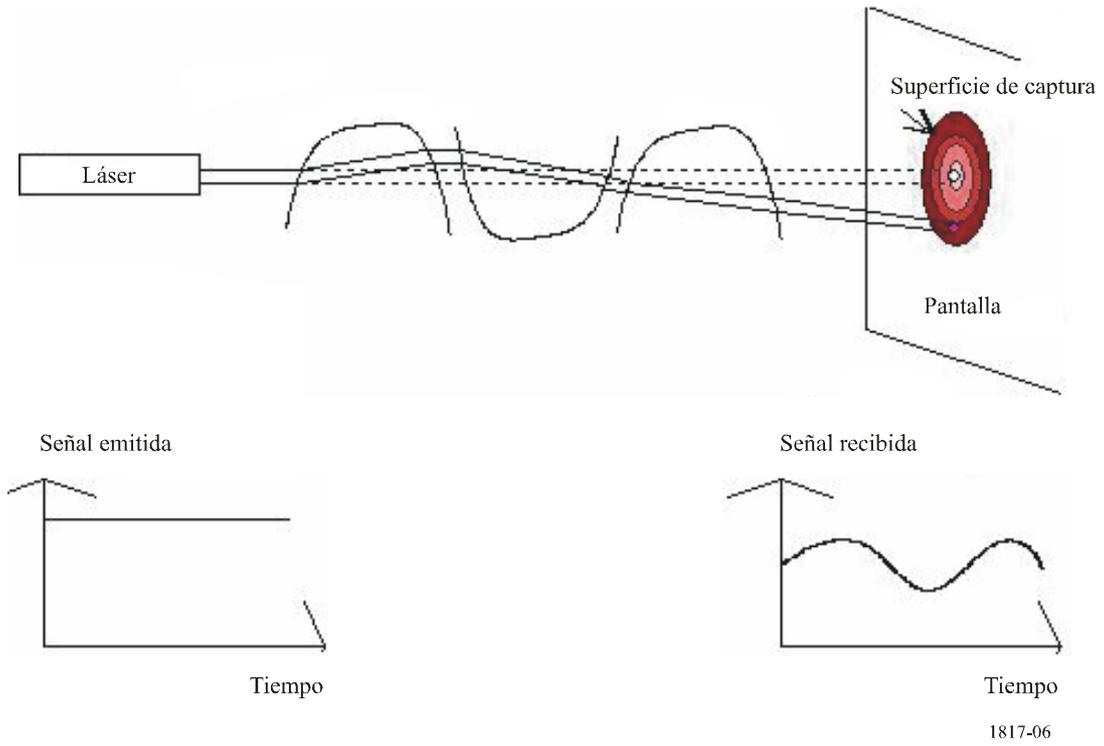


En muchas ocasiones en las que hay niebla espesa la distribución de partículas no es uniforme, en cuyo caso es mejor la disponibilidad de los enlaces en el IR lejano, dado que la luz de 10 μm puede superar las pérdidas en una niebla densa y mantener el enlace disponible, algo que no pueden lograr las longitudes de onda más cortas.

6 Centelleo

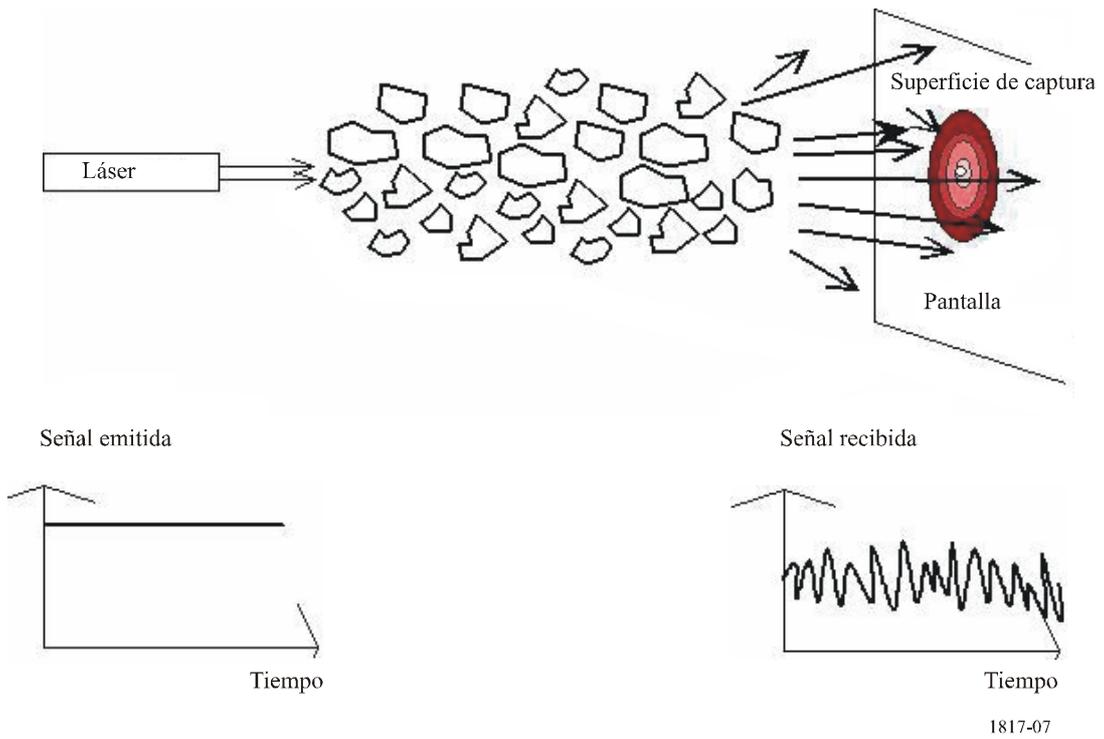
La influencia de la turbulencia térmica puede provocar que se formen dentro del medio de propagación células distribuidas aleatoriamente cuyo índice de refracción varía. Dichas células causan dispersión, multitrayectos y variación del ángulo de llegada, con lo cual el nivel de la señal recibida fluctúa a frecuencias entre 0,01 y 200 Hz. Del mismo modo, las variaciones del frente de ondas inducen una focalización y desfocalización del haz variable en el tiempo. Estas fluctuaciones de la señal se denominan centelleo. La amplitud y la frecuencia del centelleo dependen del tamaño de las células comparado con el diámetro del haz. En las siguientes figuras se muestra este efecto, así como las variaciones (de amplitud y de frecuencia) de la señal recibida. El haz se desvía (véase la Fig. 6) cuando el tamaño de las heterogeneidades es grande comparado con la sección transversal del haz, y el haz se agranda (véase la Fig. 7) cuando dichas heterogeneidades son pequeñas comparadas con la sección transversal. Una mezcla de heterogeneidades provoca el centelleo (véase la Fig. 8).

FIGURA 6
Desviación del haz bajo la influencia de células turbulentas de mayor tamaño que el diámetro del haz



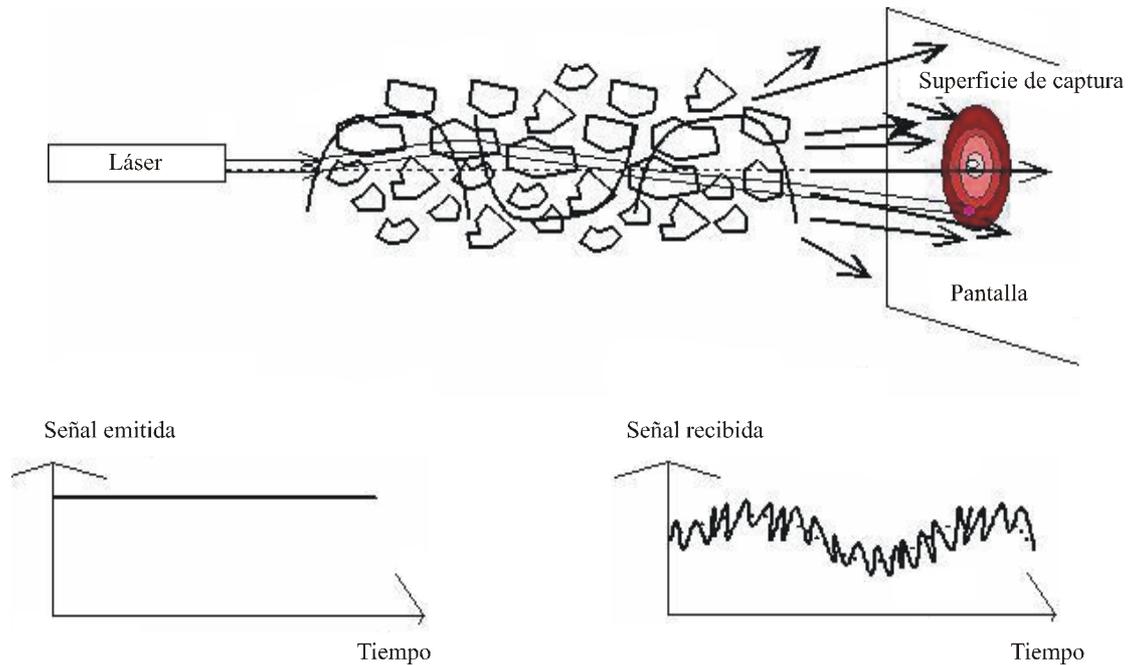
1817-06

FIGURA 7
Desviación del haz bajo la influencia de células turbulentas de menor tamaño que el diámetro del haz (ampliación del haz)



1817-07

FIGURA 8
 Efecto de heterogeneidades de diferentes tamaños en la propagación de un haz de láser (centelleo)



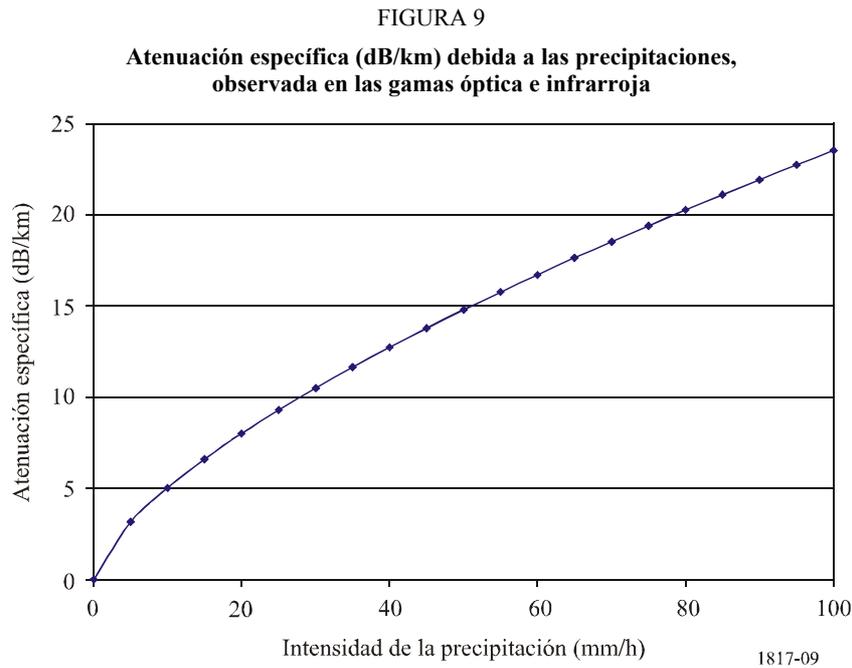
1817-08

7 Atenuación debida a la lluvia

La atenuación específica (dB/km) debida a la lluvia se suele calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\gamma_{lluvia} = k \cdot R^\alpha \tag{10}$$

En la Fig. 9 se indican las variaciones típicas de la atenuación específica (dB/km) debida a las precipitaciones, observada en las gamas óptica e infrarroja.



En la Recomendación UIT-R P.837 figura la intensidad de lluvia, R_p (mm/h), rebasada durante un porcentaje determinado del año medio, p , y en un emplazamiento concreto.

8 Atenuación debida a la nieve

La atenuación específica (dB/km) debida a la nieve en función de la intensidad de nevada viene dada por:

$$\gamma_{nieve} = a \cdot S^b \tag{11}$$

donde:

γ_{nieve} : atenuación específica (dB/km) debida a la nieve

S : intensidad de nevada (mm/h)

a y b : funciones de la longitud de onda, λ (nm), y se proporcionan en el Cuadro 2:

CUADRO 2

Parámetros «a» y «b» para la nieve húmeda y la nieve seca

	a	b
Nieve húmeda	$0,0001023 \lambda_{nm} + 3,7855466$	0,72
Nieve seca	$0,0000542 \lambda_{nm} + 5,4958776$	1,38

En las Figs. 10 y 11 se muestra la atenuación estimada en función de la intensidad de nevada y para $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.

FIGURA 10

Atenuación debida a la nieve húmeda en función de la intensidad de nevada para $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

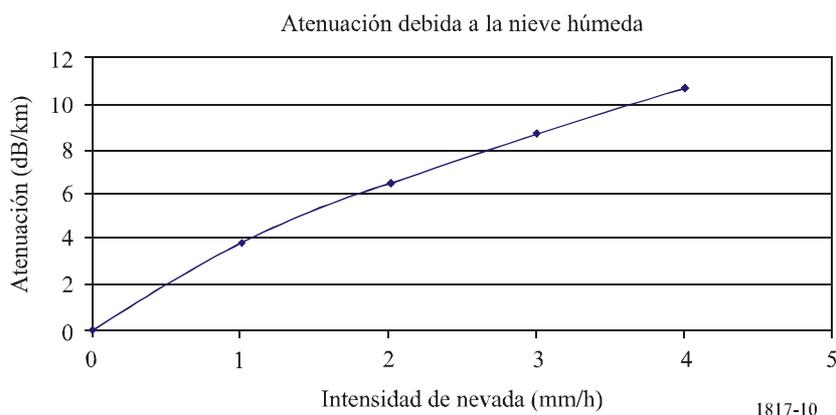
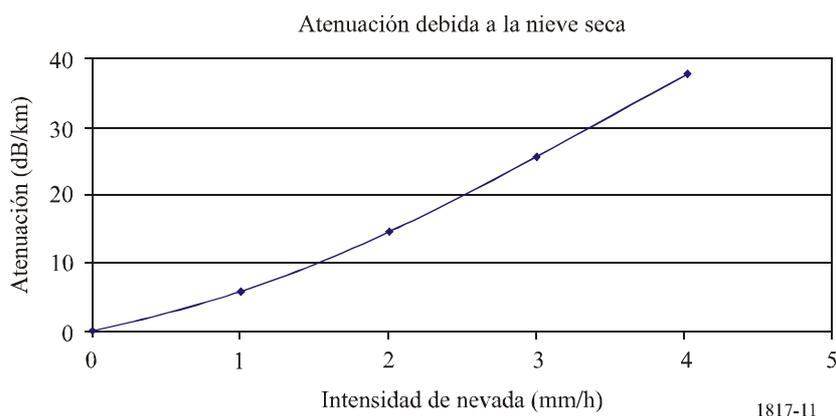


FIGURA 11

Atenuación debida a la nieve seca en función de la intensidad de nevada para $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$



9 Efecto de la luz ambiente

Aparece conjunción solar cuando el Sol o su imagen reflejada se encuentran en el campo instantáneo de visión (IFOV, *instantaneous field of view*) de un receptor óptico o cerca de él. El IFOV de recepción suele ser como mínimo igual al tamaño de la divergencia de transmisión. El objetivo es calcular la probabilidad de que la posición del Sol sea paralela al enlace óptico, y la potencia solar que penetra en el receptor sea mayor que la recibida desde el emisor. En la Recomendación UIT-R P.1814 se proporciona una metodología para calcular este efecto.

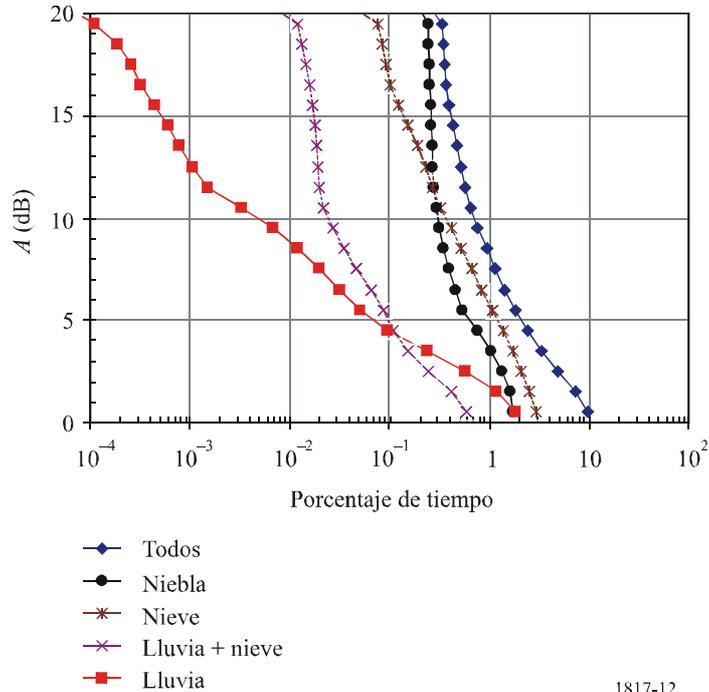
10 Distribución acumulativa de la atenuación

En la Fig. 12 se muestran las distribuciones acumulativas de la atenuación, medidas a 850 nm en un trayecto de 850 m, y causadas por todos los hidrometeoros, la niebla, la lluvia, la lluvia más la nieve y la nieve en Praga, República Checa, durante un periodo de un año. Todos los fenómenos de desvanecimiento se clasificaron conforme a las condiciones meteorológicas que los provocan. Las

condiciones meteorológicas se identificaron mediante una imagen de cámara de la zona entre el transmisor y el receptor, y empleando los datos procedentes de una estación meteorológica automática ubicada cerca del receptor. Los fenómenos de desvanecimiento provocados por la niebla y por la nieve fueron los más graves.

FIGURA 12

Distribución acumulativa de la atenuación para diferentes condiciones de trayecto



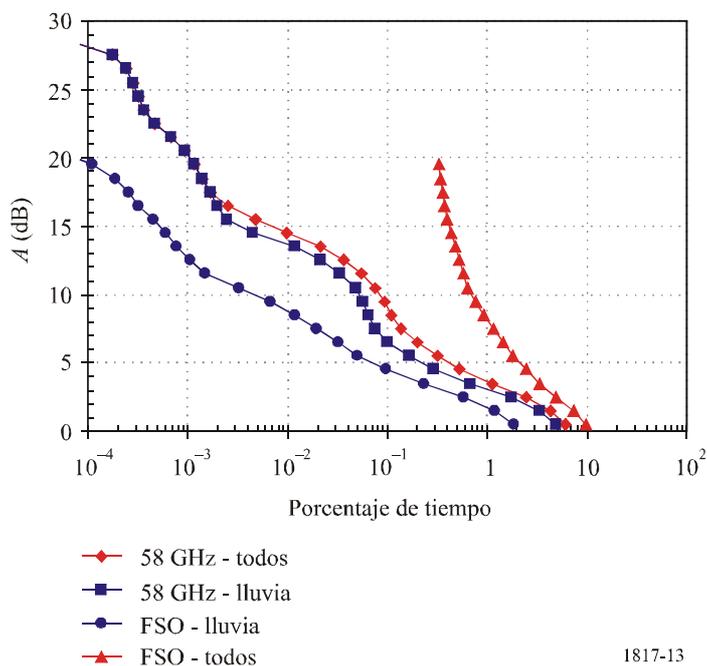
11 Sistemas híbridos/FSO

En la Fig. 13 se comparan las mediciones de atenuación a 58 GHz y en un enlace óptico para el mismo trayecto, debida a todos los hidrometeoros y a la lluvia solamente. El trayecto óptico tiene menos atenuación que el trayecto en ondas milimétricas durante los periodos de lluvia. Gracias a los sistemas híbridos radiocomunicaciones/ópticos (RF/FSO) se puede mejorar el comportamiento del enlace FSO aprovechando el hecho de que un trayecto de RF tiene atenuación debida a la lluvia pero es insensible a la niebla, mientras que el trayecto óptico sufre una fuerte atenuación por la niebla y es relativamente insensible a la lluvia.

En la Fig. 13 se presentan distribuciones anuales acumulativas que permiten evaluar el funcionamiento de un hipotético sistema híbrido RF/FSO. Considérese un sistema híbrido en el que los trayectos en RF y óptico tienen el mismo margen de desvanecimiento, $MD = 20$ dB. Se utiliza una técnica de diversidad simple, de tal manera que una de las partes del sistema trayecto en RF o enlace FSO, esté activa conforme a los valores instantáneos de la atenuación del trayecto en RF y óptico. Se supone que la parte de RF del sistema atenúa los eventos que no se relacionan con la lluvia, y la FSO los que sí se relacionan con ella. Como se muestra en el Cuadro 3, el coeficiente de disponibilidad (CD) del sistema híbrido se calcula a partir de las estadísticas de lluvia FSO.

FIGURA 13

Atenuaciones en RF y en el enlace FSO rebasadas en varios porcentajes de tiempo



CUADRO 3

Comparación del coeficiente de disponibilidad para sistemas RF, FSO e hipotéticos sistemas híbridos RF/FSO

Sistema	CD (%)
FSO (850 nm)	99,7
RF (58 GHz)	99,999
Híbrido RF/FSO	99,9999

12 Medición de la visibilidad

La visibilidad V (km) se define como la distancia hasta un objeto cuyo contraste de imagen disminuye al 2% de su valor original. Se mide a 550 nm, que es la longitud de onda correspondiente a la máxima intensidad del espectro solar, y se calcula mediante la ecuación de Koschmieder:

$$V(\text{km}) = \frac{3,912}{\gamma_{550 \text{ nm}}} \tag{12}$$

donde $\gamma_{550 \text{ nm}}$ es el coeficiente de extinción del medio (atmósfera y aerosoles).

Se emplean dos tipos de sensores para medir la visibilidad, a saber, los transmisómetros y los difusómetros.

El siguiente cuadro presenta el código internacional de visibilidad, que muestra la atenuación (dB/km) para varias condiciones climáticas:

- Condiciones meteorológicas que van desde periodos bien despejados hasta una densa niebla.
- Precipitación (mm/h): llovizna, lluvia, tormenta.
- Visibilidad desde 50 m hasta 50 km.

Código internacional de visibilidad					
Condiciones meteorológicas	Precipitación		Visibilidad (m)	Atenuación (dB/km)	
	mm/h				
Niebla densa			0		
			50	315	
Niebla espesa			200	75	
Niebla moderada			500	28,9	
Niebla ligera	Nieve	Tormenta	100	770	18,3
Niebla muy ligera				1 000	13,8
		Lluvia intensa	25	1 900	6,9
Neblina ligera				2 000	6,6
		Lluvia media	12,5	2 800	4,6
				4 000	3,1
Neblina muy ligera		Lluvia ligera	2,5	5 900	2
				10 000	1,1
Tiempo despejado		Llovizna	0,25	18 100	0,6
Tiempo muy despejado				20 000	0,54
			23 000	0,47	
			50 000	0,19	

Apéndice 1 al Anexo 1

Modelos de cálculo por ordenador

A partir de la descripción teórica de los fenómenos físicos ha sido posible desarrollar varios modelos de cálculo por ordenador del coeficiente de transmisión atmosférica. Se dispone de varios modelos, a saber, los programas LOWTRAN y NAM (*navy aerosol model*); NOVAM y WKDAER en los entornos marítimos, etc. NOVAM se incluye en MODTRAN, FASCOD, etc.

LOWTRAN contiene modelos de la atenuación de las señales ópticas causada por aerosoles. Se basa en un modelo línea por línea y se puede obtener en la ONTAR (Estados Unidos de América).

El programa NAM es más adecuado para entornos marítimos. Se basa en el modelo de distribución de aerosoles de GATHMAN.

NOVAM tiene en cuenta las partículas de arena de origen continental.

WKDAER puede adaptarse a un entorno específico.

FASCOD utiliza un modelo línea por línea y tiene en cuenta todos los parámetros que caracterizan las líneas de absorción (intensidad, probabilidad de transición, etc.). Se basa en la base datos de absorción molecular de alta resolución denominada HITRAN. Los principales parámetros de línea que se incluyen en HITRAN son la frecuencia de resonancia, la intensidad de línea a 296 K, la probabilidad de una transición, la mitad de la anchura de línea a 296 K y el estado molecular de baja energía o fundamental .

En el Laboratorio de geofísica de la Fuerza Aérea (AFGDL, *Air Force Geophysics Laboratory*) se desarrollaron tres modelos relacionados entre sí, con diversas resoluciones espectrales, a saber:

- LOWTRAN 7 – Transmisión de baja resolución (*low resolution transmission*)– La resolución espectral es 20 cm^{-1} (equivalente a 600 GHz) en pasos de 5 cm^{-1} .
- MODTRAN 3 – Transmisión de resolución intermedia (*moderate resolution transmission*)– La resolución espectral es 2 cm^{-1} (equivalente a 60 GHz) en pasos de 1 cm^{-1} .
- HITRAN 2004 – Transmisión de alta resolución (*high resolution transmission*)– La resolución espectral es $0,001 \text{ cm}^{-1}$ (equivalente a 30 MHz).

Todos los modelos contienen información espectral sobre muchos compuestos atmosféricos, incluidos H_2O , O_3 , N_2O , CO , CH_4 , O_2 , NO , NO_2 , SO_2 y HNO_3 . (HITRAN incluye detalles sobre más de 1 000 000 líneas de absorción de 37 moléculas.) Además, los tres modelos contienen el continuum del H_2O en todo el espectro y el de N_2 en la región de $2\,000$ a $2\,700 \text{ cm}^{-1}$, la dispersión molecular, junto con la dispersión y la absorción por aerosoles, niebla, lluvia y nubes.
