RECOMENDACIÓN UIT-R P.676-3

ATENUACIÓN DEBIDA A LOS GASES ATMOSFÉRICOS

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1990-1992-1995-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

a) la necesidad de evaluar la atenuación causada por los gases atmosféricos en trayectos terrenales y oblicuos,

recomienda

1 que, de manera general, se utilicen los procedimientos del Anexo 1 para calcular la atenuación debida a los gases en frecuencias de hasta 1 000 GHz. (En la Oficina de Radiocomunicaciones se dispone del código programado en MATLAB);

2 que, para estimaciones aproximadas de la atenuación causada por los gases en la gama de frecuencias de 1 a 350 GHz, se utilice el procedimiento más sencillo que se presenta en el Anexo 2.

ANEXO 1

Cálculo de la atenuación causada por los gases, con el método raya por raya

1 Atenuación específica

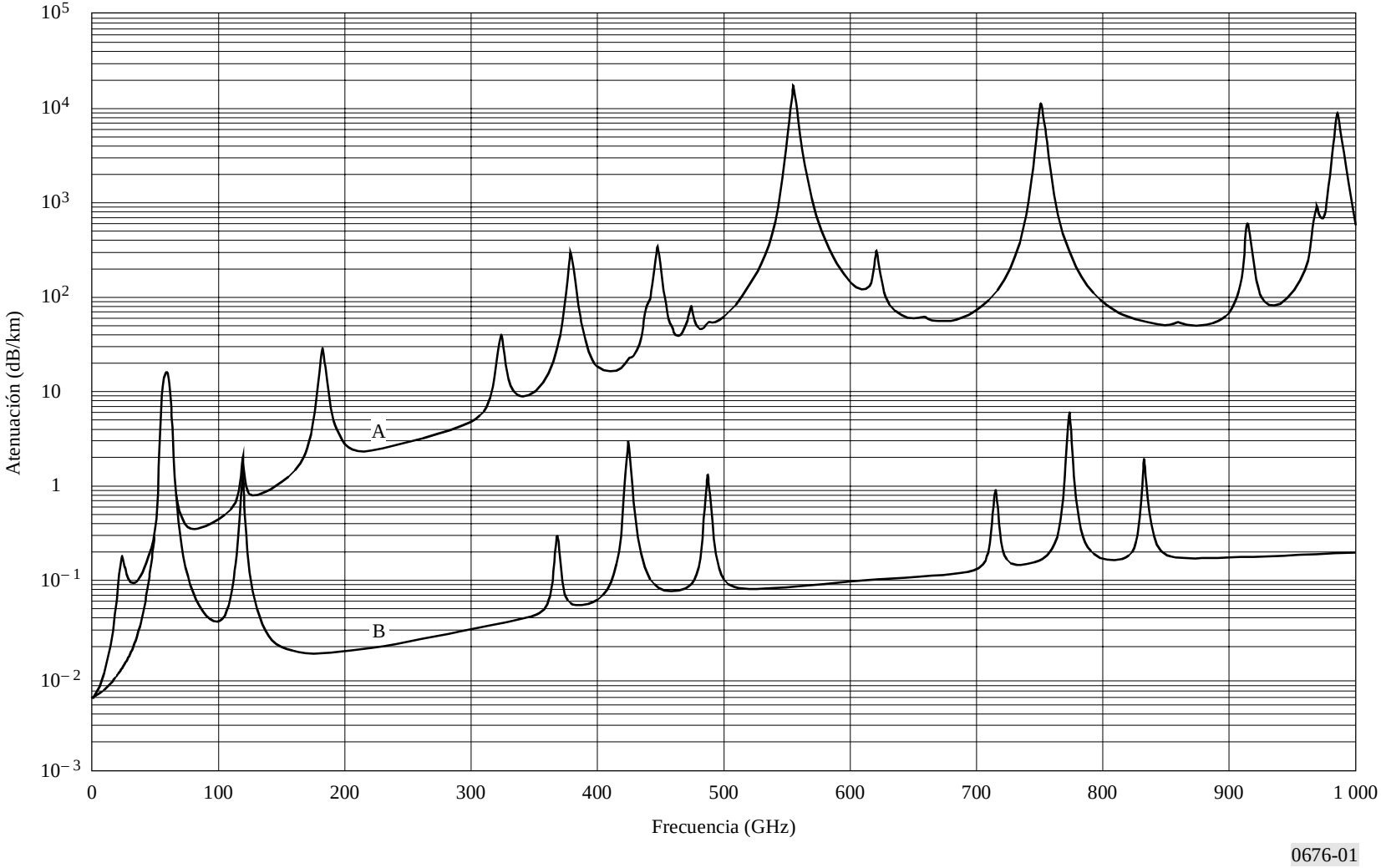
La atenuación específica en frecuencias de hasta 1 000 GHz debida al aire seco y al vapor de agua puede evaluarse con gran exactitud para cualquier valor de presión, temperatura y humedad. Para ello se suman cada una de las rayas de resonancia debidas al oxígeno y al vapor de agua, junto con los pequeños factores adicionales debidos al espectro de oxígeno no resonante de Debye, por debajo de 10 GHz, así como a la atenuación inducida por la presión del nitrógeno por encima de 100 GHz y al contenido de humedad por el exceso de absorción de vapor de agua, determinado de manera experimental. En la Fig. 1 se muestra la atenuación específica utilizando este modelo y calculada entre 0 y 1 000 GHz, en pasos de 1 GHz, para una presión de 1 013 hPa y una temperatura de 15° C, para los casos de densidad de vapor de agua de 7,5 g/m^3 (Curva A) y de atmósfera seca (Curva B).

En las proximidades de los 60 GHz muchas rayas de absorción del oxígeno se fusionan, a presiones correspondientes al nivel del mar, para formar una sola banda ancha de absorción tal como se muestra de manera detallada en la Fig. 2. Esta Figura muestra asimismo la atenuación debida al oxígeno en alturas superiores, con las rayas individuales obtenidas a presiones inferiores.

Para obtener estimaciones rápidas y aproximadas de la atenuación específica a frecuencias de hasta 350 GHz, en los casos en que no se necesita una alta precisión, el Anexo 2 ofrece algoritmos simplificados para situaciones meteorológicas concretas.

FIGURA 1

Atenuación específica debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz

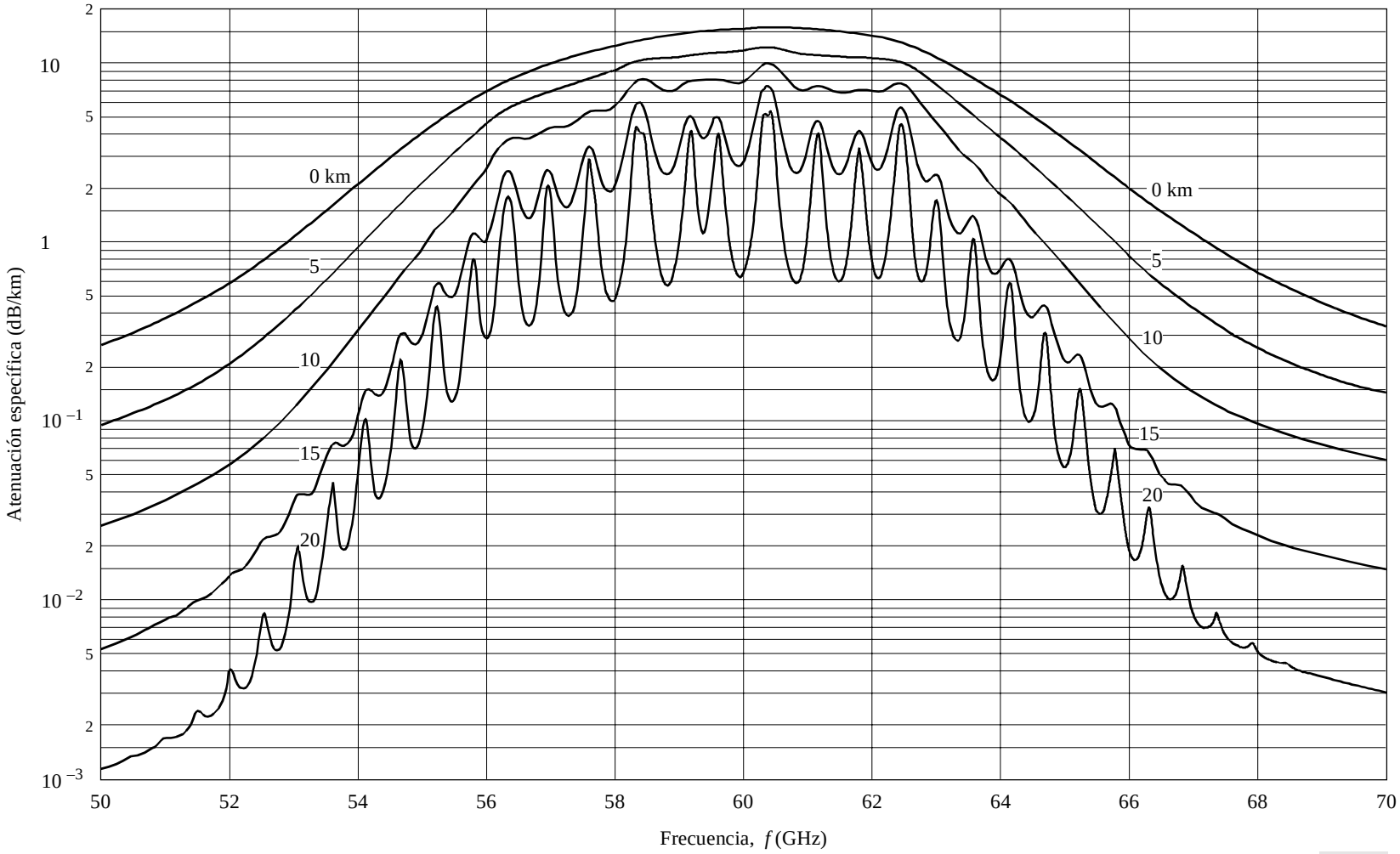


Curvas A: atmósfera normal (7,5 g/m^3)

B: atmósfera seca

FIGURA 2

Atenuación específica en la banda de 50-70 GHz para las alturas indicadas



La atenuación específica causada por los gases, γ, viene dada por la fórmula:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0{,}1820\, f\, N''(f) \qquad \text{dB/km} \tag{1}$$

donde γ_o y γ_w son las atenuaciones específicas (dB/km) debidas al aire seco y el vapor de agua, respectivamente y donde f es la frecuencia (GHz) y $N''(f)$ es la parte imaginaria del valor complejo de la refractividad, que depende de la frecuencia:

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) + N''_W(f) \tag{2}$$

S_i es el valor de la raya i-ésima, F_i es el factor de forma de raya y la suma se extiende a todas las rayas; $N''_D(f)$ y $N''_W(f)$ son espectros continuos en condiciones de tiempo seco y húmedo, respectivamente.

El valor de la raya viene dado por:

$$\begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7}\, p\, \theta^3 \exp\left[a_2 (1 - \theta)\right] && \text{para el oxígeno} \\ &= b_1 \times 10^{-1}\, e\, \theta^{3,5} \exp\left[b_2 (1 - \theta)\right] && \text{para el vapor de agua} \end{aligned} \tag{3}$$

donde:

p: presión del aire seco (hPa)

e: presión parcial del vapor de agua (hPa) (presión barométrica total $P = p + e$)

$\theta =$ $300/T$

T: temperatura (K).

Se deben utilizar valores locales de los perfiles de p, e y T medidos (por ejemplo, mediante radiosondas); no obstante, en ausencia de información local conviene utilizar el modelo de atmósferas de referencia descrito en la Recomendación UIT-R P.835.

La presión parcial del vapor de agua, e, puede obtenerse a partir de la densidad de vapor de agua ρ utilizando la expresión:

$$e = \frac{\rho T}{216{,}7} \tag{4}$$

En el Cuadro 1 figuran los coeficientes a_1, a_2 para el oxígeno y en el Cuadro 2, los coeficientes b_1 y b_2 para el vapor de agua.

El factor de forma de raya viene dado por:

$$F_i = \frac{f}{f_i}\left[\frac{\Delta f - \delta (f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta (f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2}\right] \tag{5}$$

donde f_i es la frecuencia de raya y Δf es la anchura de la raya:

$$\begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} \left(p\, \theta^{(0,8 - a_4)} + 1{,}1\, e\, \theta\right) && \text{para el oxígeno} \\ &= b_3 \times 10^{-4} \left(p\, \theta^{b_4} + b_5\, e\, \theta^{b_6}\right) && \text{para el vapor de agua} \end{aligned} \tag{6}$$

y δ es un factor de corrección que se introduce para tener en cuenta los efectos de interferencia en las rayas del oxígeno:

$$\begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4}\, p\, \theta^{0,8} && \text{para el oxígeno} \\ &= 0 && \text{para el vapor de agua} \end{aligned} \tag{7}$$

Los coeficientes espectroscópicos figuran en los Cuadros 1 y 2.

CUADRO 1

Datos espectroscópicos para la atenuación del oxígeno

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50,474238	0,94	9,694	8,60	0	1,600	5,520
50,987749	2,46	8,694	8,70	0	1,400	5,520
51,503350	6,08	7,744	8,90	0	1,165	5,520
52,021410	14,14	6,844	9,20	0	0,883	5,520
52,542394	31,02	6,004	9,40	0	0,579	5,520
53,066907	64,10	5,224	9,70	0	0,252	5,520
53,595749	124,70	4,484	10,00	0	−0,066	5,520
54,130000	228,00	3,814	10,20	0	−0,314	5,520
54,671159	391,80	3,194	10,50	0	−0,706	5,520
55,221367	631,60	2,624	10,79	0	–1,151	5,514
55,783802	953,50	2,119	11,10	0	−0,920	5,025
56,264775	548,90	0,015	16,46	0	2,881	−0,069
56,363389	1 344,00	1,660	11,44	0	−0,596	4,750
56,968206	1 763,00	1,260	11,81	0	−0,556	4,104
57,612484	2 141,00	0,915	12,21	0	–2,414	3,536
58,323877	2 386,00	0,626	12,66	0	–2,635	2,686
58,446590	1 457,00	0,084	14,49	0	6,848	−0,647
59,164207	2 404,00	0,391	13,19	0	−6,032	1,858
59,590983	2 112,00	0,212	13,60	0	8,266	–1,413
60,306061	2 124,00	0,212	13,82	0	–7,170	0,916
60,434776	2 461,00	0,391	12,97	0	5,664	–2,323
61,150560	2 504,00	0,626	12,48	0	1,731	–3,039
61,800154	2 298,00	0,915	12,07	0	1,738	–3,797
62,411215	1 933,00	1,260	11,71	0	−0,048	−4,277
62,486260	1 517,00	0,083	14,68	0	−4,290	0,238
62,997977	1 503,00	1,665	11,39	0	0,134	−4,860
63,568518	1 087,00	2,115	11,08	0	0,541	–5,079
64,127767	733,50	2,620	10,78	0	0,814	–5,525
64,678903	463,50	3,195	10,50	0	0,415	–5,520
65,224071	274,80	3,815	10,20	0	0,069	–5,520
65,764772	153,00	4,485	10,00	0	−0,143	–5,520
66,302091	80,09	5,225	9,70	0	−0,428	–5,520
66,836830	39,46	6,005	9,40	0	−0,726	–5,520
67,369598	18,32	6,845	9,20	0	–1,002	–5,520
67,900867	8,01	7,745	8,90	0	–1,255	–5,520
68,431005	3,30	8,695	8,70	0	–1,500	–5,520
68,960311	1,28	9,695	8,60	0	–1,700	–5,520
118,750343	945,00	0,009	16,30	0	−0,247	0,003
368,498350	67,90	0,049	19,20	0,6	0	0
424,763124	638,00	0,044	19,16	0,6	0	0
487,249370	235,00	0,049	19,20	0,6	0	0
715,393150	99,60	0,145	18,10	0,6	0	0
773,839675	671,00	0,130	18,10	0,6	0	0
834,145330	180,00	0,147	18,10	0,6	0	0

CUADRO 2

Datos espectroscópicos para la atenuación del vapor de agua

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
22,235080	0,1090	2,143	28,11	0,69	4,80	1,00
67,813960	0,0011	8,735	28,58	0,69	4,93	0,82
119,995941	0,0007	8,356	29,48	0,70	4,78	0,79
183,310074	2,3000	0,668	28,13	0,64	5,30	0,85
321,225644	0,0464	6,181	23,03	0,67	4,69	0,54
325,152919	1,5400	1,540	27,83	0,68	4,85	0,74
336,187000	0,0010	9,829	26,93	0,69	4,74	0,61
380,197372	11,9000	1,048	28,73	0,69	5,38	0,84
390,134508	0,0044	7,350	21,52	0,63	4,81	0,55
437,346667	0,0637	5,050	18,45	0,60	4,23	0,48
439,150812	0,9210	3,596	21,00	0,63	4,29	0,52
443,018295	0,1940	5,050	18,60	0,60	4,23	0,50
448,001075	10,6000	1,405	26,32	0,66	4,84	0,67
470,888947	0,3300	3,599	21,52	0,66	4,57	0,65
474,689127	1,2800	2,381	23,55	0,65	4,65	0,64
488,491133	0,2530	2,853	26,02	0,69	5,04	0,72
503,568532	0,0374	6,733	16,12	0,61	3,98	0,43
504,482692	0,0125	6,733	16,12	0,61	4,01	0,45
556,936002	510,0000	0,159	32,10	0,69	4,11	1,00
620,700807	5,0900	2,200	24,38	0,71	4,68	0,68
658,006500	0,2740	7,820	32,10	0,69	4,14	1,00
752,033227	250,0000	0,396	30,60	0,68	4,09	0,84
841,073593	0,0130	8,180	15,90	0,33	5,76	0,45
859,865000	0,1330	7,989	30,60	0,68	4,09	0,84
899,407000	0,0550	7,917	29,85	0,68	4,53	0,90
902,555000	0,0380	8,432	28,65	0,70	5,10	0,95
906,205524	0,1830	5,111	24,08	0,70	4,70	0,53
916,171582	8,5600	1,442	26,70	0,70	4,78	0,78
970,315022	9,1600	1,920	25,50	0,64	4,94	0,67
987,926764	138,0000	0,258	29,85	0,68	4,55	0,90

El contenido espectral de aire seco proviene del espectro de oxígeno no resonante de Debye, por debajo de 10 GHz, y de la atenuación del nitrógeno inducida por presión, por encima de 100 GHz.

$$N''_D(f) = f\ p\ \theta^2 \left[\frac{6{,}14 \times 10^{-5}}{d\left[1 + \left(\frac{f}{d}\right)^2\right]} + 1{,}4 \times 10^{-12} (1 - 1{,}2 \times 10^{-5} f^{1{,}5})\ p\ \theta^{1{,}5} \right] \quad (8)$$

donde d es el parámetro de anchura de banda del espectro de Debye:

$$d = 5{,}6 \times 10^{-4} (p + 1{,}1\ e)\ \theta \quad (9)$$

Se considera también el contenido de aire húmedo, $N''_W(f)$, por tener en cuenta el hecho de que los valores de las medidas de la atenuación del vapor de agua generalmente superan a las previsiones efectuadas al aplicar las ecuaciones (2) a (7), y se añaden los efectos de las rayas del vapor de agua a frecuencias más elevadas no considerados en el modelo básico donde hay reducción de rayas.

$$N''_W(f) = f\,(3{,}57\ \theta^{7{,}5}\ e + 0{,}113\ p)\ 10^{-7}\ e\ \theta^3 \quad (10)$$

2 Atenuación del trayecto

2.1 Trayectos terrenales

Para los trayectos terrenales y los ligeramente inclinados junto al suelo, la atenuación en el trayecto, A, puede expresarse como sigue:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \tag{11}$$

donde r_0 es la longitud del trayecto (km).

2.2 Trayectos oblicuos

En este punto se presenta un método para integrar la atenuación específica calculada utilizando el modelo raya por raya antes citado, a diferentes presiones, temperaturas y humedades a través de la atmósfera. Por este medio, la atenuación en el trayecto para sistemas de comunicaciones de cualquier configuración geométrica y con enlaces dentro y fuera de la atmósfera de la Tierra, puede determinarse con precisión simplemente dividiendo la atmósfera en capas horizontales, especificando las características de los parámetros meteorológicos de presión, temperatura y humedad a lo largo del trayecto. A falta de datos locales, obtenidos con radiosonda por ejemplo, puede utilizarse el modelo normalizado de atmósferas de referencia de la Recomendación UIT-R P.835, tanto para aplicaciones universales como en latitudes bajas (anual), medias (verano e invierno) y altas (verano e invierno).

La Fig. 3 muestra la atenuación cenital calculada en pasos de 1 GHz con este modelo para la atmósfera de referencia mundial según la Recomendación UIT-R P.835, con capas horizontales de 1 km de espesor. Presenta la suma de las atenuaciones producidas en cada capa, para los casos de atmósfera húmeda (Curva A) y de atmósfera seca (Curva B).

La atenuación total producida en trayectos oblicuos, $A(h, \varphi)$, a partir de una estación con altitud, h, y ángulo de elevación φ puede calcularse del modo siguiente cuando $\varphi \geq 0$:

$$A(h,\varphi) = \int_h^\infty \frac{\gamma(H)}{\operatorname{sen} \Phi} \, dH \tag{12}$$

donde el valor de Φ puede determinarse como sigue, basándose en la ley de Snell en coordenadas polares:

$$\Phi = \arccos\left(\frac{c}{(r + H) \times n(H)}\right) \tag{13}$$

donde:

$$c = (r + h) \times n(h) \times \cos \varphi \tag{14}$$

donde $n(h)$ es el índice de refracción del radio atmosférico, calculado a partir de la presión, la temperatura y la presión del vapor de agua a lo largo del trayecto (véase la Recomendación UIT-R P.835) utilizando la Recomendación UIT-R P.453.

Por otra parte, cuando $\varphi < 0$, hay un altura mínima, $h_{mín}$, para la cual el haz radioeléctrico se hace paralelo a la superficie de la Tierra. El valor de $h_{mín}$ puede determinarse mediante la ecuación transcendental siguiente:

$$(r + h_{mín}) \times n(h_{mín}) = c \tag{15}$$

Ésta puede resolverse fácilmente repitiendo el cálculo siguiente, utilizando $h_{mín} = h$ como valor inicial:

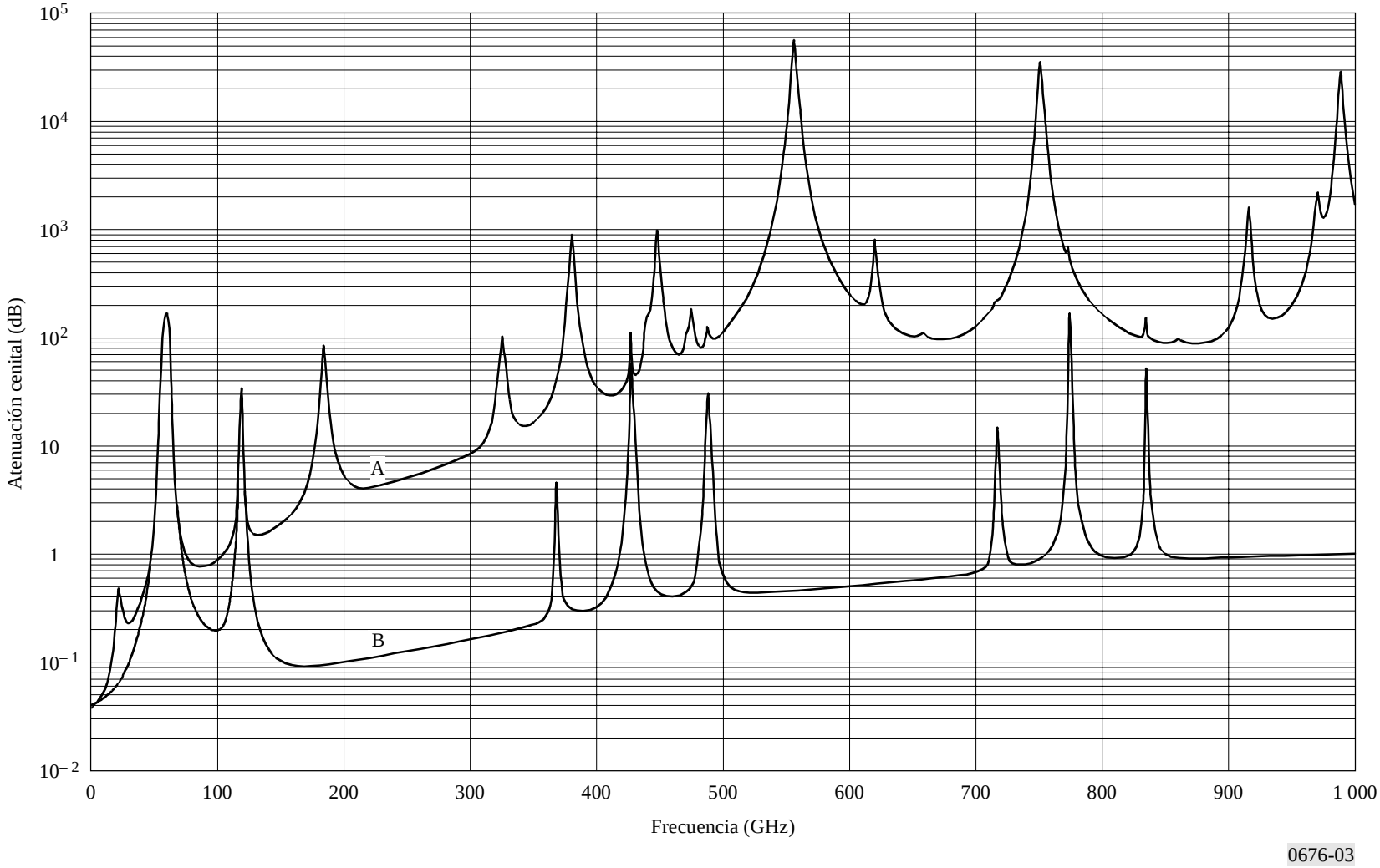
$$h'_{mín} = \frac{c}{n(h_{mín})} - r \tag{16}$$

Por lo tanto, $A(h, \varphi)$ puede calcularse como sigue:

$$A(h,\varphi) = \int_{h_{mín}}^\infty \frac{\gamma(H)}{\operatorname{sen} \Phi} \, dH + \int_{h_{mín}}^h \frac{\gamma(H)}{\operatorname{sen} \Phi} \, dH \tag{17}$$

FIGURA 3

Atenuación cenital debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz



Curvas A: atmósfera normal (7,5 g/m^3)

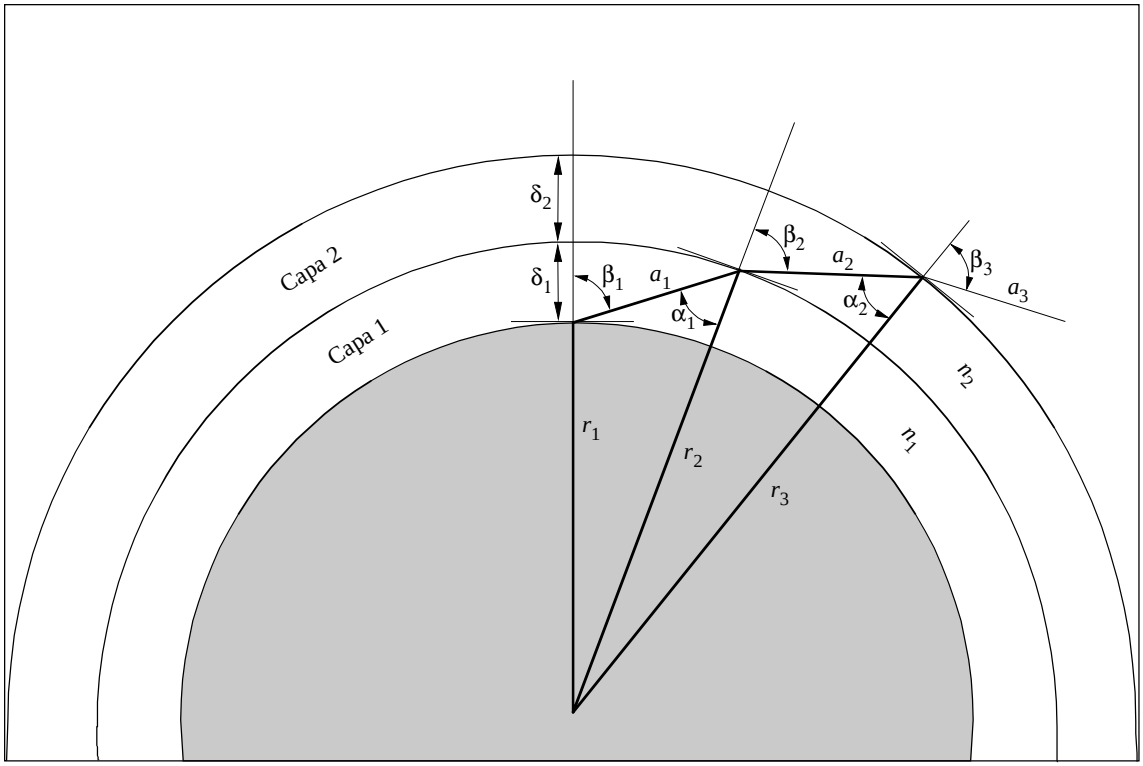
B: atmósfera seca

Al integrar las ecuaciones (12) y (17) se debe prestar atención al hecho de que el integrando se hace infinito para $\Phi = 0$. Sin embargo, esta singularidad puede eliminarse mediante una conversión de variables adecuada, por ejemplo, utilizando $u^4 = H - h$ en la ecuación (12) y $u^4 = H - h_{mín}$ en la ecuación (17).

Se puede obtener una solución numérica para la atenuación debida a los gases atmosféricos con el siguiente algoritmo.

Para calcular la atenuación total correspondiente a un enlace por satélite se necesita saber no sólo la atenuación específica en cada punto del enlace, sino también la longitud del trayecto para cada atenuación específica. Para determinar la longitud de los trayectos se necesita considerar también la curvatura de radiación debida a la forma esférica de la Tierra.

FIGURA 4



0676-04

Si se utiliza la Fig. 4 como referencia, a_n es la longitud del trayecto a través de la capa n, con un espesor δ_n que tiene un índice de refracción n_n α_n y β_n son los ángulos de incidencia de entrada y de salida. r_n son los radios a partir del centro de la Tierra hasta el comienzo de la capa n. Entonces a_n puede expresarse del siguiente modo:

$$a_n = -r_n \cos\beta_n + \frac{1}{2}\sqrt{4 r_n^2 \cos^2\beta_n + 8 r_n \delta_n + 4\delta_n^2} \tag{18}$$

El ángulo α_n puede calcularse a partir de:

$$\alpha_n = \pi - \arccos\left(\frac{-a_n^2 - 2r_n \delta_n - \delta_n^2}{2a_n r_n + 2a_n \delta_n}\right) \tag{19}$$

β_1 es el ángulo de incidencia en la estación terrena (el complemento del ángulo de elevación θ). β_{n+1} puede calcularse a partir de α_n utilizando la ley de Snell, cuya expresión en este caso será:

$$\beta_{n+1} = \text{arc sen}\left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \text{ sen } \alpha_n\right) \tag{20}$$

donde n_n y n_{n+1} índices de refracción de las capas n y $n + 1$.

El cambio de frecuencia provoca escaso efecto de dispersión en el resultado (alrededor del 1%), pero puede calcularse este efecto a partir del método indicado en el Manual de Radiometeorología del UIT-R.

Puede obtenerse la atenuación total debida a los gases atmosféricos mediante la fórmula:

$$A_{gas} = \sum_{n=1}^{k} a_n \ \gamma_n \qquad \text{dB} \tag{21}$$

donde γ_n es la atenuación específica obtenida mediante la ecuación (1).

Para asegurar una estimación exacta de la atenuación, el espesor de las capas debería crecer exponencialmente con la altura. Pueden obtenerse resultados precisos con espesores de capa que aumentan paulatinamente desde 10 cm para la capa inferior hasta 1 km a una altura de 100 km.

Para aplicaciones Tierra-espacio, la integración debe llevarse a cabo por lo menos hasta los 30 km.

3 Efectos de dispersión

Los efectos de dispersión se examinan en el Manual de Radiometeorología del UIT-R, que contiene un modelo para calcular la dispersión sobre la base del cálculo raya por raya. A efectos prácticos, los efectos de dispersión no deben imponer limitaciones importantes a los sistemas de comunicaciones terrenales en ondas milimétricas que operan con anchuras de banda de hasta unos cientos de MHz en sistemas de corto alcance (por ejemplo, inferiores a unos 20 km), especialmente en las regiones de ventana del espectro correspondientes a frecuencias desplazadas de los centros con más rayas de absorción. Para los sistemas de comunicaciones por satélite, las longitudes de trayecto más largas a través de la atmósfera obligan a desplazar las frecuencias de funcionamiento hacia las regiones de ventana del espectro donde la atenuación atmosférica y la dispersión correspondiente sean bajas.

ANEXO 2

Estimación aproximada de la atenuación causada por los gases en la gama de frecuencias 1-350 GHz

Este Anexo contiene algoritmos simplificados para una estimación rápida y aproximada de la atenuación causada por los gases para un número limitado de condiciones meteorológicas y una variedad limitada de configuraciones geométricas.

1 Atenuación específica

Las atenuaciones específicas debidas al aire seco y al vapor de agua, y consideradas a partir del nivel del mar hasta una altura de 5 km, pueden estimarse utilizando los siguientes algoritmos simplificados, que se basan en la adaptación de curvas al cálculo de raya por raya, y permiten los cálculos más exactos dentro de una media del ±15% para frecuencias desplazadas de los centros con más rayas de absorción. La diferencia absoluta entre los resultados obtenidos con estos algoritmos y con el cálculo raya por raya es generalmente menor de 0,1 dB/km y alcanza un máximo de 0,7 dB/km cerca de los 60 GHz. Para alturas superiores a 5 km, y en los casos en que se necesita una mayor precisión, se deberá utilizar el cálculo raya por raya.

En el caso de aire seco, la atenuación γ_o en dB/km viene dada por:

$$\gamma_o = \left[\frac{7{,}27\ r_t}{f^2 + 0{,}351\ r_p^2\ r_t^2} + \frac{7{,}5}{(f - 57)^2 + 2{,}44\ r_p^2\ r_t^5} \right] f^2\ r_p^2\ r_t^2 \times 10^{-3} \qquad (22a)$$

para $f \leq 57$ GHz

$$\gamma_o = \left[2 \times 10^{-4}\ r_t^{1{,}5} \left(1 - 1{,}2 \times 10^{-5}\ f^{1{,}5}\right) + \frac{4}{(f-63)^2 + 1{,}5\, r_p^2\, r_t^5} + \frac{0{,}28\, r_t^2}{(f - 118{,}75)^2 + 2{,}84\, r_p^2\, r_t^2} \right] f^2\ r_p^2\ r_t^2 \times 10^{-3} \qquad (22b)$$

para 63 GHz $\leq f \leq$ 350 GHz

$$\gamma_o = \frac{(f - 60)(f - 63)}{18}\ \gamma_o(57) - 1{,}66\ r_p^2\ r_t^{8{,}5} (f - 57)(f - 63) + \frac{(f - 57)(f - 60)}{18}\ \gamma_o(63) \qquad (22c)$$

para 57 GHz $\leq f \leq$ 63 GHz

donde:

f: frecuencia (GHz)

$r_p =$ $p/1013$

$r_t =$ $288/(273 + t)$

p: presión (hPa)

t: temperatura (°C).

En el caso de vapor de agua, la atenuación γ_w (dB/km) viene dada por:

$$\gamma_w = \left[\begin{array}{l} 3{,}27 \times 10^{-2}\ r_t + 1{,}67 \times 10^{-3}\ \dfrac{\rho\, r_t^7}{r_p} + 7{,}7 \times 10^{-4}\ f^{0{,}5} + \dfrac{3{,}79}{(f - 22{,}235)^2 + 9{,}81\, r_p^2\ r_t} \\ + \dfrac{11{,}73\, r_t}{(f - 183{,}31)^2 + 11{,}85\, r_p^2\ r_t} + \dfrac{4{,}01\, r_t}{(f - 325{,}153)^2 + 10{,}44\, r_p^2\ r_t} \end{array} \right] f^2\ \rho\ r_p\ r_t \times 10^{-4} \qquad (23)$$

para $f \leq$ 350 GHz

donde ρ es la densidad de vapor de agua (g/m^3).

La Fig. 5 muestra la atenuación específica de 1 a 350 GHz a nivel del mar para aire seco y para vapor de agua con una densidad de 7,5 g/m^3. Esta Figura se obtuvo utilizando el cálculo raya por raya que se describe en el Anexo 1.

2 Atenuación en el trayecto

2.1 En trayectos terrenales

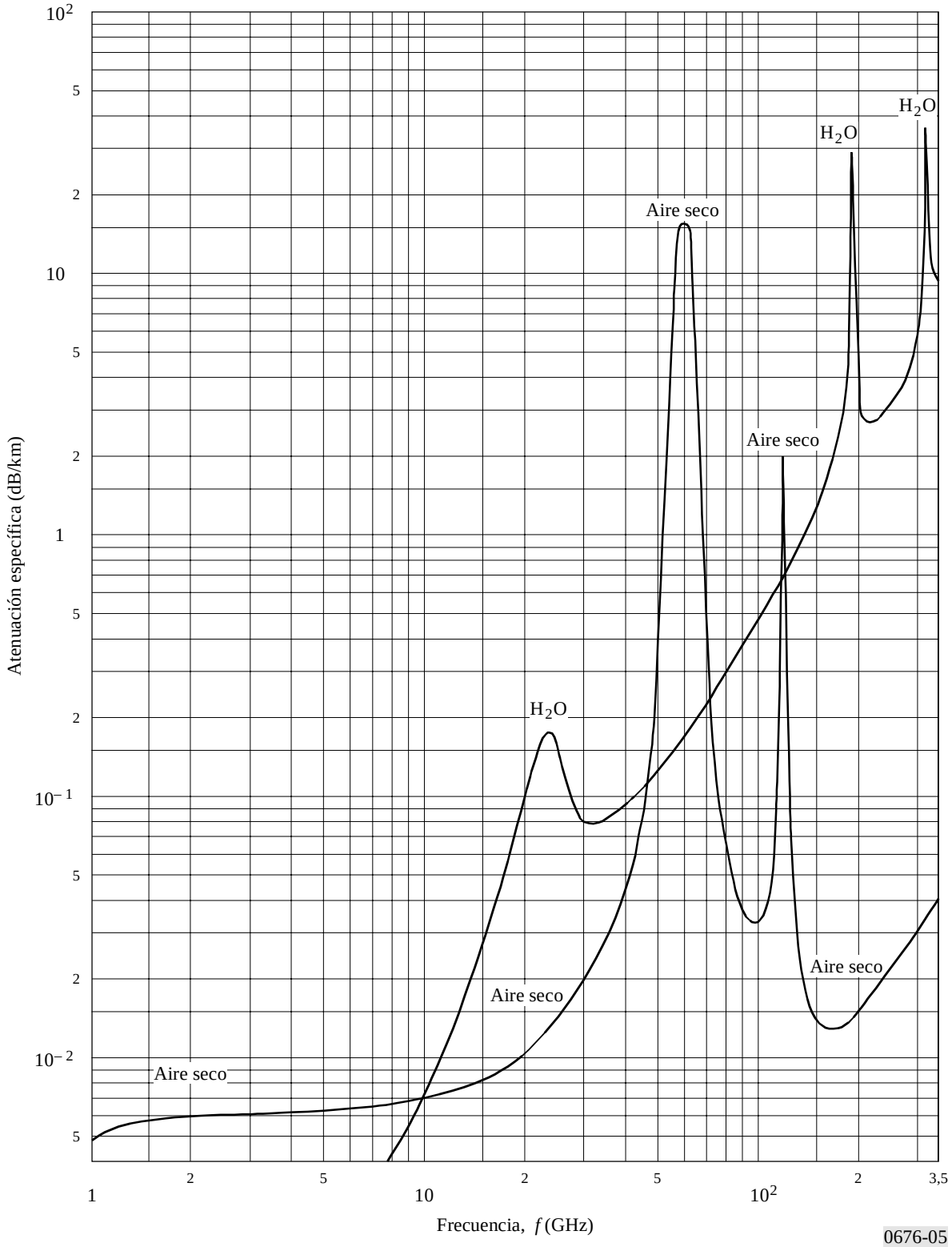
En un trayecto horizontal o ligeramente inclinado y próximo al suelo, la atenuación en el trayecto, A, puede escribirse como sigue:

$$A = \gamma\, r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \qquad (24)$$

donde r_0 es la longitud del trayecto (km).

FIGURA 5

Atenuación específica debida a los gases atmosféricos



Presión: 1 013 hPa
Temperatura: 15° C
Vapor de agua: 7,5 g/m^3

2.2 En trayectos oblicuos

En este punto figuran algoritmos sencillos para calcular la absorción gaseosa a lo largo de trayectos inclinados que atraviesan la atmósfera de la Tierra, definiendo una altura equivalente que puede multiplicarse por la atenuación específica calculada en el § 1, para obtener la atenuación cenital del trayecto, desde el nivel del mar hasta alturas de cerca de 2 km. Luego puede determinarse la atenuación del trayecto para ángulos de elevación distintos del cenit utilizando los procedimientos descritos más adelante en este punto.

Para el aire seco, la altura equivalente viene dada por:

$$h_o = 6 \quad \text{km} \quad \text{para} \quad f < 50 \ \text{GHz} \tag{25}$$

$$h_o = 6 + \frac{40}{(f - 118{,}7)^2 + 1} \quad \text{km} \quad \text{para } 70 < f < 350 \ \text{GHz} \tag{26}$$

y para el vapor de agua, la altura equivalente es:

$$h_w = h_{w0} \left\{ 1 + \frac{3{,}0}{(f - 22{,}2)^2 + 5} + \frac{5{,}0}{(f - 183{,}3)^2 + 6} + \frac{2{,}5}{(f - 325{,}4)^2 + 4} \right\} \quad \text{km} \tag{27}$$

$$\text{para } f < 350 \ \text{GHz}$$

donde:

h_{w0} : altura equivalente de vapor de agua en las regiones de las ventanas de absorción

= 1,6 km con tiempo despejado

= 2,1 km con tiempo lluvioso.

Estas alturas equivalentes para el vapor de agua se determinaron con una temperatura a nivel del suelo de 15° C. Para otras temperaturas, habrá que corregir las alturas equivalentes en 0,1% o 1% por °C con cielo despejado o lluvia, respectivamente, en las regiones de ventana, y en 0,2% o 2% en las bandas de absorción (altura creciente al aumentar la temperatura).

El concepto de altura equivalente se basa en la hipótesis de una atmósfera exponencial especificada mediante una altura de escala que describe la disminución de densidad con la altitud. Nótese que estas alturas de escala para el aire seco y el vapor de agua pueden variar con la latitud, la estación y/o el clima y que las distribuciones del vapor de agua en la atmósfera real pueden diferir considerablemente de la exponencial, con los cambios correspondientes de las alturas equivalentes. Los valores indicados más arriba se aplican hasta una altitud de 2 km.

La atenuación cenital total entonces será:

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad \text{dB} \tag{28}$$

La Fig. 6 muestra la atenuación cenital total para dos casos: (A) la atmósfera seca de referencia normalizada de la Recomendación UIT-R P.835 y (B) la atmósfera de vapor de agua de la Recomendación UIT-R P.835. Entre 50 y 70 GHz puede obtenerse una mayor precisión con las curvas de la Fig. 7, a partir de 0 km de altura. Esta Figura se obtuvo utilizando el cálculo raya por raya que se describe en el Anexo 1.

2.2.1 Ángulos de elevación comprendidos entre 10° y 90°

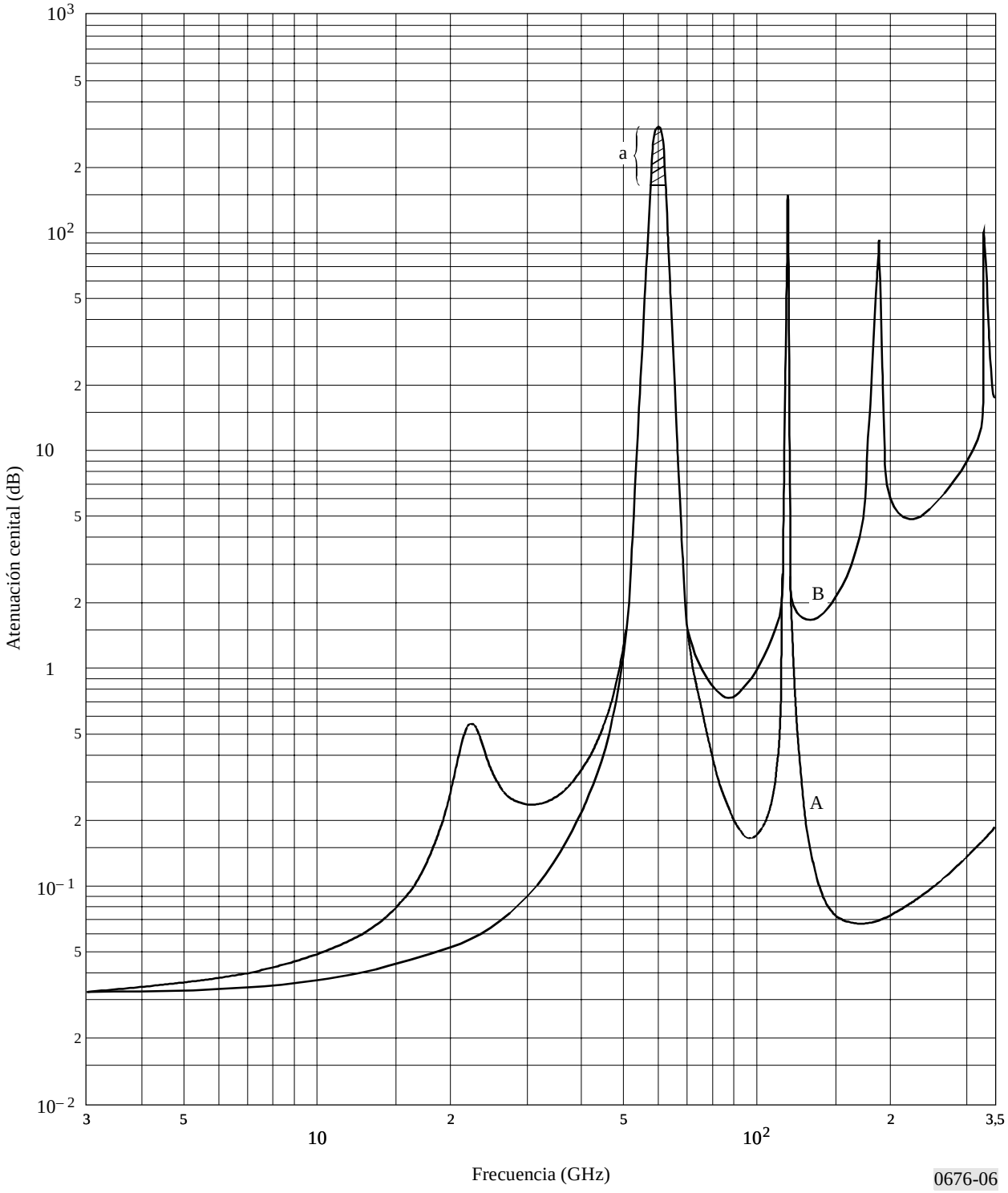
Para ángulos de elevación comprendidos entre 10° y 90°, la atenuación en el trayecto se obtiene mediante la ley de la cosecante:

$$A = \frac{h_o \gamma_o + h_w \gamma_w}{\operatorname{sen} \varphi} \quad \text{dB} \tag{29}$$

donde φ es el ángulo de elevación.

FIGURA 6

Atenuación cenital total a nivel del suelo



Presión: 1 013 hPa

Temperatura: 15° C

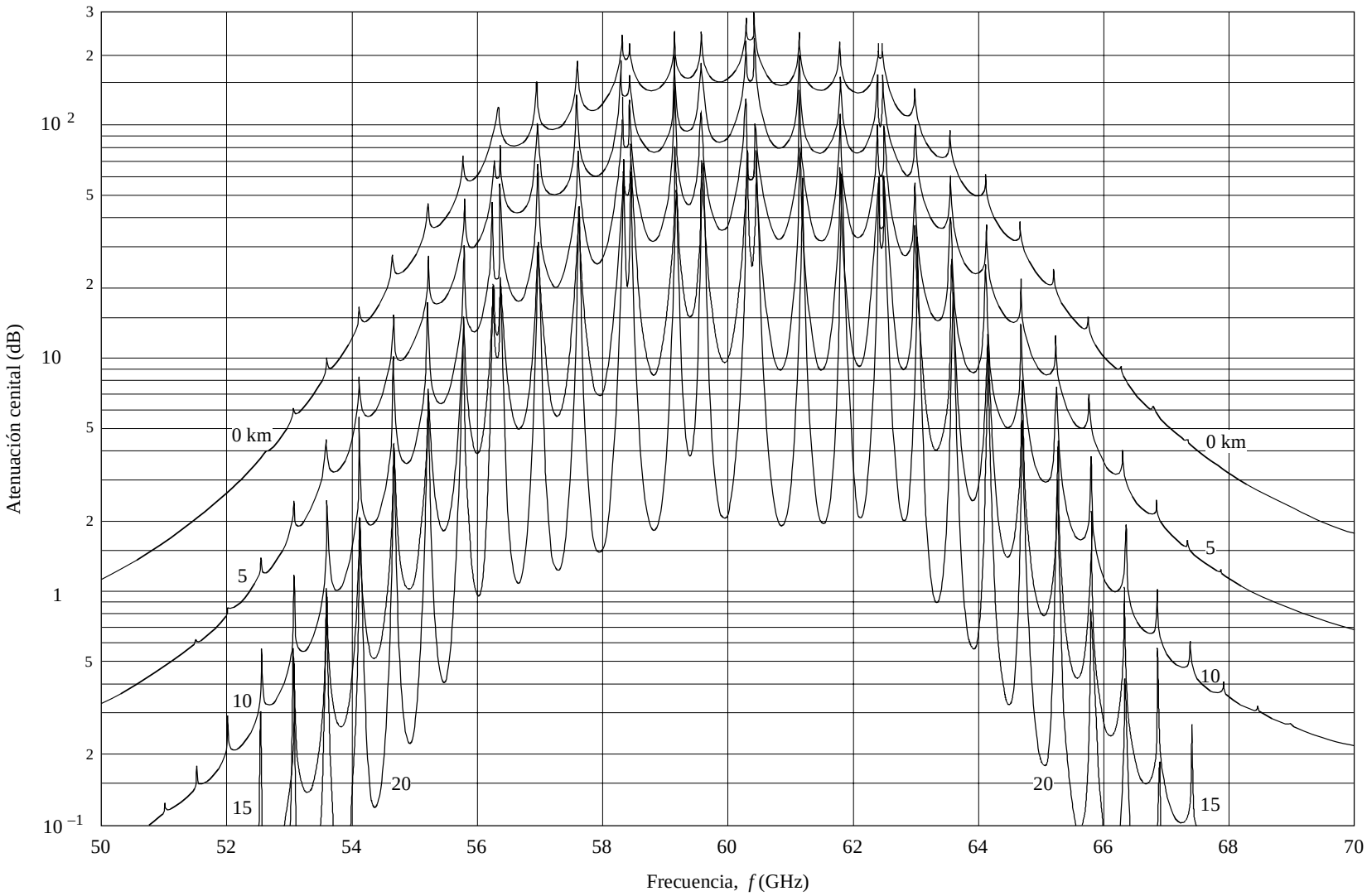
a: gama de valores (véase la Fig. 7)

Curvas A: para una atmósfera seca

B: con una atmósfera de vapor de agua exponencial de 7,5 g/m^3 al nivel del suelo, y una altura de escala de 2 km

FIGURA 7

Absorción producida por el oxígeno en la dirección del cenit, a partir de las alturas indicadas



0676-07

Estas fórmulas se pueden aplicar para los casos de trayectos oblicuos entre un satélite y una estación de Tierra situada al nivel del mar. Para conocer los valores de la atenuación sobre un trayecto oblicuo entre una estación situada a una altura h_1 y otra a una altura mayor h_2, deberán sustituirse en la ecuación (29) los valores h_o y h_w respectivamente por los valores de h'_o y h'_w siguientes:

$$h'_o = h_o \left[e^{-h_1 / h_o} - e^{-h_2 / h_o} \right] \quad \text{km} \tag{30}$$

$$h'_w = h_w \left[e^{-h_1 / h_w} - e^{-h_2 / h_w} \right] \quad \text{km} \tag{31}$$

Teniendo en cuenta que el valor ρ de la densidad de vapor de agua utilizado en la ecuación (23) es el valor hipotético al nivel del mar, calculado del siguiente modo:

$$\rho = \rho_1 \times \exp(h_1 / 2) \tag{32}$$

donde ρ_1 es el valor correspondiente a la altura h_1 de la estación de que se trate, y se supone que la altura equivalente de densidad de vapor de agua es de 2 km (véase la Recomendación UIT-R P.835).

Las ecuaciones (30), (31) y (32) utilizan diferentes normalizaciones para las alturas equivalentes de aire seco y vapor de agua. Si bien la presión de aire media sobre el nivel del mar puede considerarse constante en todo el mundo (igual a 1 013 hPa), la densidad de vapor de agua no sólo tiene una amplia gama de variabilidad climática, sino que se mide en la superficie (es decir, a la altura de la estación terrena). Véanse los valores de la densidad de vapor de agua en superficie en la Recomendación UIT-R P.836.

2.2.2 Ángulo de elevación comprendido entre 0° y 10°

En este caso, las ecuaciones (29) a (32) deben sustituirse por fórmulas más precisas que permitan tener en cuenta la longitud real del trayecto atmosférico. Esto conduce a las siguientes fórmulas:

$$A = \frac{\sqrt{R_e}}{\cos\varphi} \left[\gamma_o \sqrt{h_o}\, F\left(\operatorname{tg}\varphi \sqrt{\frac{R_e}{h_o}} \right) + \gamma_w \sqrt{h_w}\, F\left(\operatorname{tg}\varphi \sqrt{\frac{R_e}{h_w}} \right) \right] \quad \text{dB} \tag{33}$$

donde:

R_e: radio efectivo de la Tierra, teniendo en cuenta la refracción, dado en la Recomendación UIT-R P.834, expresado en km (en general es aceptable un valor de 8 500 km para lugares próximos a la superficie de la Tierra).

φ: ángulo de elevación

F: función definida por:

$$F(x) = \frac{1}{0{,}661\, x + 0{,}339 \sqrt{x^2 + 5{,}51}} \tag{34}$$

La fórmula (33) es aplicable a los casos de trayectos inclinados entre un satélite y una estación terrena situada al nivel del mar. Para determinar los valores de atenuación en un trayecto inclinado entre una estación situada a una altura h_1 y una altura superior h_2 (donde ambas alturas son inferiores a 1 000 km por encima del nivel medio del mar), la fórmula (33) se sustituirá por la siguiente:

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1)\, e^{-h_1/h_o}}{\cos\varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2)\, e^{-h_2/h_o}}{\cos\varphi_2} \right]$$

$$+ \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1)\, e^{-h_1/h_w}}{\cos\varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2)\, e^{-h_2/h_w}}{\cos\varphi_2} \right] \quad \text{dB} \tag{35}$$

donde:

φ_1: ángulo de elevación para la altura h_1

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2}\cos\varphi_1\right) \tag{36a}$$

$$x_i = tg\,\varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \qquad \text{para } i = 1, 2 \tag{36b}$$

$$x'_i = tg\,\varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \qquad \text{para } i = 1, 2 \tag{36c}$$

teniendo en cuenta que el valor ρ de la densidad de vapor de agua utilizado en la ecuación (23) es el valor hipotético al nivel del mar calculado del siguiente modo:

$$\rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1 / 2) \tag{37}$$

donde ρ_1 es el valor correspondiente a la altura h_1 de la estación de que se trate, y se considera que la altura equivalente de densidad de vapor de agua es de 2 km (véase la Recomendación UIT-R P.835).

Los valores para la ρ_1 en la superficie pueden encontrarse en la Recomendación UIT-R P.836. La formulación diferente para el aire seco y el vapor de agua está explicada al final del § 2.2.

Para ángulos de elevación inferiores a 0°, se debe utilizar el cálculo raya por raya que figura en el Anexo 1.

2.3 Atenuación causada por el vapor de agua en trayectos oblicuos

El método de cálculo de la atenuación en trayectos oblicuos causada por el vapor de agua, antes citado, se basa en el conocimiento de las características de la presión (o densidad) del vapor de agua a lo largo del trayecto. En los casos en que se conozca el contenido total de la columna del vapor de agua a lo largo del trayecto, *V*, puede utilizarse un método sustitutivo. La atenuación total causada por vapor de agua en la dirección cenital puede expresarse del siguiente modo:

$$A_w = a_v V \qquad \text{dB} \tag{38}$$

donde V (kg/m^2 o mm) y a_v (dB/kg/m^2 o dB/mm) es el coeficiente de absorción de masa de vapor de agua. El coeficiente de absorción de masa puede calcularse a partir del coeficiente de atenuación específica γ_w, dividido por la densidad de vapor de agua ρ, la cual puede obtenerse a partir de la presión de vapor de agua utilizando la ecuación (4).

Los valores para el contenido de columna total V pueden obtenerse a partir de las características de radiosonda o por mediciones radiométricas. Las estadísticas de V figuran en la Recomendación UIT-R P.836. En caso de ángulos de elevación distintos del cenit, la atenuación debe dividirse por sen θ donde θ, es el ángulo de elevación, suponiendo una atmósfera uniforme y estratificada horizontalmente, bajo ángulos de elevación de unos 10°.