

## RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1017\*

**Método sugerido para calcular la calidad de un enlace en el servicio de investigaciones del espacio**

(Cuestión UIT-R 131/7)

(1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que la identificación de las gamas de frecuencias que permiten la máxima calidad de un enlace es de utilidad cuando se trata de establecer una base para las atribuciones de bandas y otros fines de gestión de frecuencias;
- b) que los cálculos de la calidad de un enlace exigen necesariamente la consideración de las características de la propagación de las ondas radioeléctricas;
- c) que las Recomendaciones relativas a propagación contienen ecuaciones, algoritmos y datos adecuados para efectuar dichos cálculos;
- d) que se ha desarrollado un método para efectuar los cálculos, basado en estas Recomendaciones, a fin de realizar estudios de las bandas de frecuencias preferidas para los servicios de investigación del espacio;
- e) que el Anexo 1 presenta este método;
- f) que el método también tiene en cuenta los factores de ruido y de atenuación que son particularmente aplicables a algunos sistemas que tienen temperaturas de ruido inferiores a aproximadamente 30 K,

*recomienda*

1 que el método indicado en el Anexo 1 se considere un método preferido para su utilización cuando hayan de efectuarse cálculos de la calidad del enlace en los servicios de investigación del espacio sobre la base de las Recomendaciones UIT-R relativas a la propagación.

**Anexo 1****Método para utilizar la información de propagación del UIT-R en los cálculos de la atenuación, la temperatura de ruido y la calidad del enlace****1 Introducción**

Este Anexo presenta un método para calcular la atenuación, la temperatura de ruido y la calidad de un enlace, basado en las Recomendaciones UIT-R relativas a las características de la propagación de las ondas radioeléctricas. El método puede ampliarse para que incluya las características de los equipos.

---

\* La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2003 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

El método incluye la consideración de algunos efectos que resultan importantes en los sistemas con temperaturas de ruido inferior a unos 30 K cuando se hacen funcionar en bandas de frecuencias por debajo de unos 15 GHz. Estos factores son el ruido de fondo cósmico, el ruido galáctico, y el efecto de la atenuación atmosférica sobre sus valores. En muchos otros sistemas con temperaturas de ruido más elevadas, estos factores pueden despreciarse.

El método se expondrá en el contexto de la provisión de datos para la selección de bandas de frecuencias preferidas según la calidad del enlace.

## 2 Referencias

El método y los cálculos a describir se basan en parte en las Recomendaciones siguientes:

Recomendación UIT-R P.837: Características de las precipitaciones para establecer modelos de propagación

Recomendación UIT-R P.618: Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio

Recomendación UIT-R P.676: Atenuación producida por los gases atmosféricos

Recomendación UIT-R P.838: Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción

Recomendación UIT-R P.372: Ruido radioeléctrico.

## 3 Procedimientos de cálculo

En el Apéndice 1 figura una discusión paso a paso de los cálculos necesarios para determinar la variación de la calidad del enlace con la frecuencia. Por conveniencia, al presentar el método, y para mayor claridad conceptual, los cálculos se agrupan en cinco secciones:

- cálculos de la atenuación y la temperatura de ruido con cielo despejado (sin lluvia ni nubes),
- cálculo de los efectos de la lluvia en la atenuación y en la temperatura de ruido,
- cálculos de la atenuación y la temperatura de ruido con cielo despejado y lluvia,
- cálculo de la calidad del enlace con cielo despejado (sin lluvia ni nubes),
- cálculo de la calidad del enlace con cielo despejado y lluvia.

NOTA 1 – Para un trayecto de propagación espacio-Tierra a través de una atmósfera lluviosa, la atenuación es igual a la atenuación producida por la atmósfera despejada a lo largo del trayecto, más la atenuación adicional producida por la precipitación a lo largo del trayecto. La atenuación producida sólo por la atmósfera, y la atenuación producida sólo por la precipitación se calculan por separado (véase la Recomendación UIT-R P.618).

La temperatura de ruido celeste atribuida a la atmósfera lluviosa se calcula con relación a la atenuación total, y no es igual a la suma de las temperaturas de ruido que podrían calcularse para cada una de las dos componentes de la atenuación total.

#### 4 Tipos de análisis para la selección de frecuencia

En los enlaces entre un vehículo espacial y la Tierra, pueden identificarse cuatro tipos de análisis:

- espacio-Tierra, limitado únicamente por fenómenos naturales,
- espacio-Tierra, incluidos los efectos del equipo,
- Tierra-espacio, limitado únicamente por fenómenos naturales,
- Tierra-espacio, incluidos los efectos del equipo.

En el enlace Tierra-espacio, las contribuciones a la temperatura de ruido del sistema de recepción de vehículo espacial incluye también los fondos cósmico y galáctico, pero la contribución de la atmósfera de la Tierra puede ser relativamente pequeña. Con las sondas del espacio lejano, la Tierra ocupa una parte tan pequeña del diagrama de antena de recepción que la contribución de la temperatura de ruido de la atmósfera es despreciable. La atenuación de la atmósfera debe no obstante, incluirse en el análisis del enlace, ya que afecta directamente a la potencia de señal recibida.

Conviene considerar enlaces que utilizan dos tipos de antenas. El primer enlace supone antenas de transmisión y recepción de diámetro fijo. En este caso, la ganancia de ambas antenas varía con la frecuencia. El segundo tipo de enlace supone la utilización de una antena de diámetro fijo y una antena de anchura de haz fija. En este caso, la ganancia de la antena de anchura de haz fija es casi independiente de la frecuencia. Un ejemplo de este caso es la utilización de una antena omnidireccional en una estación espacial a fin de permitir la comunicación durante las maniobras de primera corrección o pérdida del control de actitud.

La forma de las curvas de calidad del enlace depende de los tipos de antena supuestos.

#### 5 Selección de las bandas de frecuencias preferidas

Los cálculos pueden emplearse para crear dos conjuntos de curvas de calidad de funcionamiento del enlace. En el primer conjunto, el equipo se supone que es perfecto. Las antenas se suponen ideales con variación de la ganancia proporcional al cuadrado de la frecuencia, o con una anchura de haz (ganancia) constante con respecto a la frecuencia. La potencia del transmisor se supone constante con respecto a la frecuencia y se desprecia la temperatura de ruido del equipo del sistema de recepción. El objeto de estas hipótesis es permitir una selección de bandas de frecuencias preferidas limitada únicamente por fenómenos naturales.

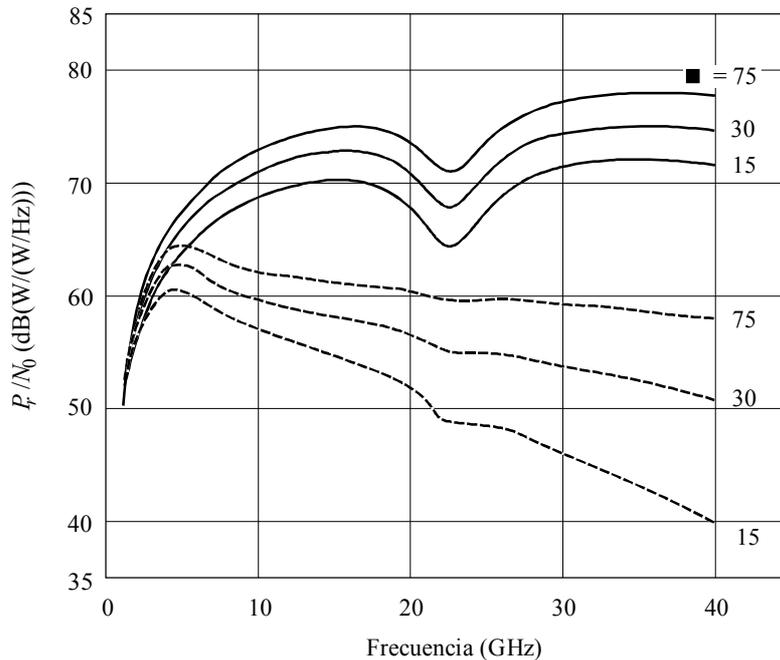
El segundo conjunto de curvas incluye las variaciones dependientes de la frecuencia de un determinado conjunto de parámetros de equipo. Algunos parámetros de la antena de estación terrena dependen también del ángulo de elevación, incluyéndose estas variaciones. Los factores considerados son la variación de la ganancia de antena en función del ángulo de elevación; la contribución de la temperatura de ruido de la Tierra caliente producida por acoplamiento a través de la estructura de soporte de alimentación y el desbordamiento de iluminación; y la temperatura de ruido del equipo del receptor. El objeto de incluir estos factores es permitir la selección de bandas de frecuencias preferidas para un enlace que incluye las características del equipo práctico.

Considerando la calidad de los enlaces actualmente realizables, así como los enlaces ideales, es posible identificar las bandas de frecuencias preferidas en la actualidad y también para el futuro cuando el equipo siga mejorando.

En la Fig. 1 se incluye un ejemplo de la calidad de funcionamiento que puede obtenerse con equipo ideal. La Figura muestra curvas para un trayecto espacio-Tierra. Se supone equipo perfecto, incluidas antenas de diámetros fijos para transmisión y recepción. Si se desea identificar una banda de frecuencias en la gama de 1-40 GHz que dé una calidad de funcionamiento no inferior a aproximadamente 1 dB del máximo disponible, las curvas dan los siguientes resultados, para el caso de un ángulo de elevación de 30°.

Condiciones de propagación	Banda de frecuencias preferida
Cielo despejado (sin lluvia ni nubes)	12,5-19,2 GHz
Cielo despejado y 0,1% de lluvia	4 100-9 400 MHz

FIGURA 1  
Calidad del enlace espacio-Tierra,  $P_r/N_0$



Antenas de estación terrena y de estación espacial de diámetro fijo  
Calidad ideal del enlace, limitada solamente por fenómenos naturales

———— Cielo despejado. 7,5 gm/m<sup>3</sup> de vapor de agua

- - - - - Atmósfera y lluvia, 10 mm/h

■ Ángulo de elevación (grados) de la antena de la estación terrena

## Apéndice 1 al Anexo 1

### Procedimiento de cálculo

#### 1 Introducción

Se describe el cálculo de la calidad de funcionamiento del enlace espacio-Tierra en condiciones de cielo despejado y aire puro y lluvia. Los Cuadros 1 a 5 enumeran los diversos parámetros incluidos en el cálculo. Los Cuadros corresponden a:

- 1) Atenuación y temperatura de ruido en función de la frecuencia, ángulo de elevación y densidad de vapor de agua para la propagación con cielo despejado.
- 2) Atenuación y temperatura de ruido debidas únicamente a la precipitación, en función de la frecuencia, ángulo de elevación e intensidad de lluvia.
- 3) Atenuación y temperatura de ruido para un trayecto de propagación con cielo despejado y lluvia, utilizando los datos del Cuadro 2.
- 4) Calidad del enlace con un conjunto supuesto de transmisor, antena y parámetros de distancia, y considerando los datos de atenuación y temperatura de ruido del Cuadro 1.
- 5) Calidad del enlace con un conjunto supuesto de transmisor, antena y parámetros de distancia, considerando los datos de atenuación y de temperatura de ruido del Cuadro 3.

Los Cuadros son simplemente ejemplos que muestran los diversos parámetros y valores a unas cuantas frecuencias.

NOTA 1 – Los valores indicados en los Cuadros son resultado de cálculos analíticos. No debe inferirse que la enumeración de estos valores hasta una precisión de varios lugares decimales es una indicación de la exactitud o precisión de los datos de propagación subyacentes o de las correspondientes expresiones analíticas. La predicción de la calidad de un enlace real hasta la precisión indicada no es generalmente posible.

Cada línea de cada cuadro incluye una descripción del parámetro o cálculo y, normalmente, se referencia una determinada fuente de información.

#### 2 Cálculos con cielo despejado (sin lluvia ni nubes)

El Cuadro 1 presenta valores calculados de la atenuación producida por la atmósfera, y de la temperatura de ruido producida por los efectos combinados del ruido de fondo cósmico, el ruido de fondo galáctico, y la temperatura de ruido en relación con la atenuación producida por la atmósfera. Los cálculos presentados en el Cuadro 1 corresponden a condiciones de cielo despejado (sin lluvia ni nubes). En relación con los números de línea indicados en la parte izquierda del cuadro, los cálculos se efectúan como sigue:

Línea 7 Dens vapor ( $\text{gm}/\text{m}^3$ )

Densidad de vapor de agua en la atmósfera que se supone para el cálculo considerado.

Línea 8 Elev estac (km)

Elevación de la estación terrena por encima del nivel del mar. El ejemplo indicado en el Cuadro 1 es 0,81 km para la estación terrena de espacio lejano situada en Madrid (España).

## Línea 10 Frecuencia (GHz)

Frecuencia radioeléctrica en el cálculo considerado.

Línea 12  $H_o'$  (km)

Altura de oxígeno equivalente a la elevación de la estación terrena.  $H_o'$  se obtiene mediante una corrección al valor de  $H_o$ , altura de oxígeno equivalente al nivel del mar, y para frecuencias inferiores a 57 GHz viene dada por:

$$H_o \times e^{(-\text{elevación de la estación} / H_o)} \quad \text{km}$$

donde  $H_o = 6$  km al nivel del mar.

Véase el § 2.2 de la Recomendación UIT-R P.676.

## Línea 13 Ogamma (dB/km)

Atenuación específica al nivel del suelo debida al oxígeno a una temperatura de 15° C, y para frecuencias inferiores a 57 GHz viene dada por:

$$\left( 7,19 \times 10^{-3} + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 0,57)^2 + 1,5} f^2 \times 10^{-3} \right) \quad \text{dB/km}$$

Véase el § 1 de la Recomendación UIT-R P.676.

Línea 14  $H_w'$  (km)

Altura de vapor de agua equivalente a la elevación de la estación terrena.  $H_w'$  se obtiene mediante una corrección del valor de  $H_w$ , altura de vapor de agua equivalente al nivel del mar. La naturaleza de la corrección es tal que para un trayecto comprendido entre una estación terrena y un satélite,  $H_w' = H_w$ . Para frecuencias < 350 GHz,  $H_w$  viene dada por:

$$H_{w0} \left( 1 + \frac{3}{(f - 22,2)^2 + 5} + \frac{5}{(f - 183,3)^2 + 6} + \frac{2,5}{(f - 325,4)^2 + 4} \right) \quad \text{km}$$

donde  $H_{w0} = 1,6$  km con tiempo despejado y 2,1 km con lluvia.

NOTA 1 – Para frecuencias inferiores a 57 GHz, sólo se necesitan los dos primeros términos de la expresión.

Véase el § 2.2 de la Recomendación UIT-R P.676.

## Línea 15 Wgamma (dB/km)

Atenuación específica al nivel del suelo debido al vapor de agua a una temperatura de 15° C,  $\rho < 12$  gm/m<sup>3</sup> y frecuencias inferiores a 350 GHz, y viene dada por:

$$\left[ 0,05 + 0,0021 \rho + \frac{3,6}{(f - 22,2)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f - 183,3)^2 + 9} + \frac{8,9}{(f - 325,4)^2 + 26,3} \right] f^2 \times \rho \times 10^{-4} \quad \text{dB/km}$$

donde  $\rho$  es la densidad de vapor de agua (gm/m<sup>3</sup>) para la elevación de la estación.

NOTA 1 – Para frecuencias inferiores a 57 GHz, sólo se necesitan los dos primeros términos de la expresión entre corchetes.

Véase el § 1 de la Recomendación UIT-R P.676.

## Línea 17 Temp galáct @ 408 MHz (K)

Temperatura galáctica para una determinada región del cielo y se utiliza para calcular la temperatura de ruido galáctica para otras frecuencias en la misma región del cielo. Para el Cuadro 1 se seleccionó arbitrariamente un valor de 30 K.

Véase la Recomendación UIT-R P.372.

## Línea 18 Temp galáct (K)

Temperatura calculada para una determinada frecuencia y viene dada por:

$$(\text{Temp galáct @ 408 MHz}) \left( \frac{\text{Frecuencia (MHz)}}{408} \right)^{-2,75} \quad \text{K}$$

Véase la Recomendación UIT-R P.372.

## Línea 19 Ruido cósm (W/Hz)

Densidad espectral de potencia del ruido de fondo cósmico, y viene dada por:

$$\frac{hf}{e^{(hf/kT)} - 1} \quad \text{W/Hz}$$

donde:

$h = 6,626 \times 10^{-34}$  (J/s) (constante de Planck)

$f$ : frecuencia (Hz)

$k = 1,3806 \times 10^{-23}$  (J/K) (constante de Boltzmann)

$T$ : temperatura de ruido, que se supone 2,7 K.

## Línea 20 Temp cósm (K)

Temperatura de ruido de fondo cósmico, y viene dada por:

$$\text{Ruido cósm} / k \quad \text{K}$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann,  $1,3806 \times 10^{-23}$  (J/K).

## Línea 21 Cósm + galáct (K)

Suma de las temperaturas de ruido cósmico y galáctico a una determinada frecuencia, y viene dada por:

$$\text{Temp cósm} + \text{temp galáct} \quad \text{K}$$

## Línea 23 Aten cenit (dB)

Atenuación unidireccional a través de la atmósfera en la dirección del cenit, y viene dada por:

$$(Ho' \times O\text{gamma}) + (Hw' \times W\text{gamma}) \quad \text{dB}$$

Véase el § 2.2 de la Recomendación UIT-R P.676.

## Línea 24 Ruido atmosf cenit (K)

Temperatura de ruido producida por la atmósfera en la dirección cenital, y viene dada por:

$$280 (1 - 10^{-A(\text{dB})/10}) \quad \text{K}$$

donde 280 es la temperatura radiante media de la atmósfera y  $A$  (dB) es la atenuación unidireccional a través de la atmósfera en la dirección del cenit.

Véase la Recomendación UIT-R P.372.

## Línea 25 Cósm + galáct cenit (K)

Suma de la temperatura de ruido cósmico y galáctico, reducida por la atenuación cenital, y viene dada por:

$$(\text{Cósm} + \text{galáct}) / e^{A(\text{dB})/4,34} \quad \text{K}$$

Véase la Recomendación UIT-R P.372.

## Línea 26 Ruido tot cenit (K)

Suma de la temperatura de ruido atmosférico cenital, y la temperatura de ruido cósmico + galáctico cenital, y viene dada por:

$$\text{Ruido atmosf cenit} + (\text{cósm} + \text{galáct}) \text{ cenit} \quad \text{K}$$

## Línea 29 Áng elev (grados)

Ángulo de elevación de la antena de la estación terrena para el cálculo correspondiente.

## Línea 30 Aten atmosf elev (dB)

Atenuación unidireccional a través de la atmósfera para el ángulo de elevación considerado, y para ángulos de elevación superiores a 10° viene dada por:

$$\text{aten cenit} / \text{sen}(\text{áng elev}) \quad \text{dB}$$

Véase el § 2.2 de la Recomendación UIT-R P.676.

## Línea 31 Ruido atmosf elev (K)

Temperatura de ruido producida por la atmósfera en la dirección del ángulo de elevación, y viene dada por:

$$280 (1 - 10^{B(\text{dB})/10}) \quad \text{K}$$

donde 280 es la temperatura radiante media (K) de la atmósfera y  $B$  (dB) es la atenuación unidireccional a través de la atmósfera en la dirección del ángulo de elevación.

## Línea 32 Cósm + galáct elev (K)

Suma de las temperaturas de ruido cósmico y galáctico, reducido por la atenuación a ese ángulo de elevación, y viene dada por:

$$(\text{Cósm} + \text{galáct}) / e^{B(\text{dB})/4,34} \quad \text{K}$$

donde  $B$  (dB) es la atenuación unidireccional a través de la atmósfera en la dirección del ángulo de elevación.

## Línea 33 Ruido tot elev (K)

Suma del ruido atmosférico y el ruido cósmico + galáctico para el ángulo de elevación considerado, y viene dado por:

$$\text{Ruido atmosf elev} + \text{cósm elev} + \text{galáct elev} \quad \text{K}$$

## Línea 34 Pot ruido elev (dBW/Hz)

Densidad espectral de potencia de ruido correspondiente al ruido total de elevación, y viene dado por:

$$-228,6 + 10 \log(\text{ruido tot elev}) \quad \text{dB(W/Hz)}$$

donde  $-228,6$  es la expresión logarítmica de la constante de Boltzmann,  $1,3806 \times 10^{-23}$  (J/K).

Las líneas 37-42 y 45-50 son similares a las líneas 29-34, salvo en los efectos de los diferentes ángulos de elevación.

CUADRO 1					
Datos para la selección de las frecuencias preferidas					
Atenuación y temperatura de ruido, cielo despejado, sin lluvia					
-----					
		1	10	20	30
7	Dens vapor (gm/m <sup>3</sup> )	7,5			
8	Elev estac (km)	0,81			
10	Frecuencia (GHz)				
12	Ho' (km)	5,242	5,242	5,242	5,242
13	Ogamma (dB/km)	0,005	0,007	0,010	0,018
14	Hw' (km)	1,611	1,632	2,088	1,673
15	Wgamma (dB/km)	0,000	0,007	0,101	0,080
17	Temp galáct @ 408 MHz (K)	30			
18	Temp galáct (K)	2,549	0,005	0,001	0,000
19	Ruido cósm (W/Hz)	3,69E-23	3,41E-23	3,10E-23	2,82E-23
20	Temp cósm (K)	2,676	2,467	2,248	2,044
21	Cósm + galáct (K)	5,225	2,472	2,249	2,044
23	Aten cenit (dB)	0,03	0,05	0,26	0,23
24	Ruido atmosf cenit (K)	1,68	3,06	16,57	14,47
25	Cósm + galáct cenit (K)	5,19	2,44	2,12	1,94
26	Ruido tot cenit (K)	6,88	5,50	18,68	16,41
29	Áng elev (grados)	15,00			
30	Aten atmosf elev (dB)	0,10	0,18	1,02	0,89
31	Ruido atmosf elev (K)	6,44	11,62	58,79	51,90
32	Cósm + galáct elev (K)	5,11	2,37	1,78	1,66
33	Ruido tot elev (K)	11,55	13,99	60,56	53,56
34	Pot ruido elev (dB(W/Hz))	-217,98	-217,14	-210,78	-211,31
37	Áng elev (grados)	30,00			
38	Aten atmosf elev (dB)	0,05	0,10	0,53	0,46
39	Ruido atmosf elev (K)	3,35	6,08	32,16	28,19
40	Cósm + galáct elev (K)	5,16	2,42	1,99	1,84
41	Ruido tot elev (K)	8,52	8,50	34,15	30,03
42	Pot ruido elev (dB(W/Hz))	-219,30	-219,31	-213,27	-213,82
45	Áng elev (grados)	75,00			
46	Aten atmosf elev (dB)	0,03	0,05	0,27	0,24
47	Ruido atmosf elev (K)	1,74	3,16	17,13	14,97
48	Cósm + galáct elev (K)	5,19	2,44	2,11	1,93
49	Ruido tot elev (K)	6,93	5,61	19,25	16,90
50	Pot ruido elev (dB(W/Hz))	-220,19	-221,11	-215,76	-216,32

### 3 Cálculo de los efectos de la lluvia

El Cuadro 2 presenta datos que muestran la atenuación y la temperatura de ruido resultante de los efectos de la lluvia (hidrometeoros) únicamente, sin incluir los efectos de la atmósfera gaseosa. Con relación a los números de línea indicados en la parte izquierda del Cuadro, los cálculos se hacen como sigue:

Línea 7 Lat estac (grados)

Latitud de la estación terrena. El ejemplo indicado en el Cuadro 2 es 40° para la estación terrena de espacio lejano situada en Madrid (España).

Línea 8 Elev estac (km)

Elevación de la estación terrena por encima del nivel del mar: 0,81 km para Madrid (España).

Línea 9 Intens lluv (mm/h)

Intensidad de lluvia excedida el 0,01% del tiempo, que en este ejemplo es de 32 mm/h para Madrid (España) (clima hidrometeorológico H).

Véase el § 2.2.1.1, Paso 5 de la Recomendación UIT-R P.618 y Fig.1 y Cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.837.

Línea 10 Alt lluv (km)

Viene dada por:

$$3,0 + 0,028 \text{ lat} \quad \text{para} \quad 0^\circ < \text{lat} < 36^\circ$$

$$4,0 - 0,075 (\text{lat} - 36) \quad \text{para} \quad \text{lat} \geq 36^\circ$$

donde lat es la latitud de la estación terrena.

Véase el § 2.2.1.1, Paso 1 de la Recomendación UIT-R P.618.

Línea 12 Frecuencia (GHz)

Línea 14 Coef  $kH$

Coeficiente utilizado para estimar la atenuación específica producida por la lluvia.

Véase la Recomendación UIT-R P.838.

Para valores de  $kH$  no directamente indicados en el Cuadro, la fórmula de interpolación es:

$$\log kH = \left( \frac{\log f - \log f_1}{\log f_2 - \log f_1} \right) (\log kH_2 - \log kH_1) + \log kH_1$$

donde los números 2 y 1 designan los valores tabulados superior e inferior entre los cuales se halla el valor desconocido.

Línea 15 Coef  $aH$

Coeficiente utilizado para estimar la atenuación específica producida por la lluvia.

Véase la Recomendación UIT-R P.838.

Para valores de  $aH$  no directamente indicados en el Cuadro, la fórmula de interpolación es:

$$aH = \left( \frac{\log f - \log f_2}{\log f_2 - \log f_1} \right) (aH_2 - aH_1) + aH_1$$

donde los números 2 y 1 designan los valores tabulados superior e inferior entre los cuales se halla el valor desconocido.

Línea 16  $r\Gamma$  (dB/km)

Atenuación específica producida por la lluvia y viene dada por:

$$kH \times \text{intens lluv}^{(aH)} \quad \text{dB/km}$$

Véase la Recomendación UIT-R P.838 y Paso 6 de la Recomendación UIT-R P.618.

Línea 19 Áng elev (grados)

Línea 20 Tray obl (km)

Longitud del trayecto oblicuo a través de la lluvia desde la estación terrena a la altura de lluvia, y viene dada por:

$$(\text{alt lluv} - \text{elev est}) / \text{sen}(\text{áng elev}) \quad \text{km}$$

Véase el § 2.2.1.1, Paso 2 de la Recomendación UIT-R P.618.

Línea 21 Proy horiz (km)

Proyección horizontal del trayecto oblicuo, dada por:

$$\text{Tray obl} \times \text{cos}(\text{áng elev}) \quad \text{km}$$

Véase el § 2.2.1.1, Paso 3 de la Recomendación UIT-R P.618.

Línea 22 Reducción 0,01%

Factor de reducción para el 0,01% del tiempo, y viene dado por:

$$\frac{1}{1 + (0,05 \text{ proy horiz})}$$

Véase el § 2.2.1.1, Paso 4 de la Recomendación UIT-R P.618.

Línea 24 Aten 0,01% (dB)

Atenuación producida por la lluvia excedida en 0,01% del año, y viene dada por:

$$r\Gamma \times \text{trayecto oblicuo} \times \text{reducción (0,01\%)} \quad \text{dB}$$

Véase el § 2.2.1.1, Paso 7 de la Recomendación UIT-R P.618.

Línea 25 Aten 0,1% (dB)

Atenuación producida por la lluvia excedida en 0,1% del año, y dada por:

$$0,38 \text{ aten (0,1\%)} \quad \text{dB}$$

NOTA 1 – La selección de un determinado porcentaje de tiempo se basa en consideraciones operacionales. 0,1% es apropiado para algunas misiones de investigación espacial y se eligió para este ejemplo a fin de ilustrar el método de cálculo.

Véase el § 2.2.1.1, Paso 8 de la Recomendación UIT-R P.618.

Las líneas 28-34 y 37-43 son similares a las líneas 19-25, salvo en lo relativo a los efectos de los diferentes ángulos de elevación.

CUADRO 2  
**Datos para la selección de las frecuencias preferidas**  
**Atenuación producida por la lluvia únicamente, sin atmósfera**

---

7	Lat estac (grados)	40			
8	Elev estac (km)	0,81			
9	Intens lluv (mm/h) 0,01%	32			
10	Alt lluv (km)	3,7			
12	Frecuencia (GHz)	1	10	20	30
14	Coef <i>kH</i>	3,87E-05	1,01E-02	7,51E-02	1,87E-01
15	Coef <i>aH</i>	0,912	1,276	1,099	1,021
16	rGamma (dB/km)	9,13E-04	8,41E-01	3,39E+00	6,44E+00
19	Áng elev (grados)	15			
20	Tray obl (km)	11,17			
21	Proy horiz (km)	10,79			
22	Reducción 0,01%	0,67			
24	Aten 0,01% (dB)	0,007	6,324	25,462	48,383
25	Aten 0,1% (dB)	0,003	2,466	9,930	18,869
28	Áng elev (grados)	30			
29	Tray obl (km)	5,78			
30	Proy horiz (km)	5,01			
31	Reducción 0,01%	0,82			
33	Aten 0,01% (dB)	0,004	3,968	15,978	30,362
34	Aten 0,1% (dB)	0,002	1,548	6,231	11,841
37	Áng elev (grados)	75			
38	Tray obl (km)	2,99			
39	Proy horiz (km)	0,77			
40	Reducción 0,01%	0,97			
42	Aten 0,01% (dB)	0,003	2,432	9,792	18,607
43	Aten 0,1% (dB)	0,001	0,949	3,819	7,257

#### 4 Cálculos con cielo despejado y lluvia

El Cuadro 3 presenta valores calculados de la atenuación producida por la atmósfera despejada y la lluvia, y de la temperatura de ruido producida por los efectos del ruido de fondo cósmico, ruido de fondo galáctico, y la temperatura de ruido relacionada con la atenuación producida por la combinación de cielo despejado y lluvia. Con relación a los números de línea de la izquierda del Cuadro, se efectúan los cálculos siguientes:

Las líneas 1 a 30 son las que se explican para el Cuadro 1.

Línea 31 Aten lluv elev (dB)

Atenuación producida por la lluvia a lo largo de un trayecto para el ángulo de elevación especificado. El valor indicado es la atenuación que se excede el 0,1% del tiempo en Madrid, y se obtiene del Cuadro 2.

Línea 32 Aten tot elev (dB)

Suma de la atenuación producida por la atmósfera y la atenuación producida por la lluvia.

Línea 33 Ruido atmosf + lluv elev (K)

Temperatura de ruido producida por la atenuación total de elevación, y viene dada por:

$$280 (1 - 10^{-B/10}) \quad \text{K}$$

donde 280 es la temperatura de radiación media de la atmósfera (K) y  $B$  la atenuación (dB) unidireccional a lo largo del trayecto.

Línea 34 Cosm + galáct elev (K)

Suma de la temperatura de ruido cósmico y la temperatura de ruido galáctico, reducida por la atenuación a lo largo del trayecto para el ángulo de elevación considerado (véase la línea 19 del Cuadro 1).

Línea 35 Ruido tot elev (K)

Suma del ruido atmosférico y del ruido producido por la lluvia y el ruido cósmico + galáctico para el ángulo de elevación considerado.

Línea 36 Pot elev ruido (dB(W/Hz))

Densidad espectral de potencia de ruido correspondiente al ruido total de elevación, y viene dada por:

$$-228,6 + 10 \log (\text{ruido tot elev (K)}) \quad \text{dB(W/Hz)}$$

donde  $-228,6$  es la expresión logarítmica de la constante de Boltzmann,  $1,3806 \times 10^{-23}$  (J/K).

Las líneas 39-46 son similares a las líneas 29-36, salvo en lo relativo a los efectos de los diferentes ángulos de elevación.

CUADRO 3  
**Datos para la selección de las frecuencias preferidas**  
**Atenuación y temperatura de ruido, cielo despejado y lluvia**

---

7	Dens vapor (gm/m <sup>3</sup> )	7,50			
8	Elev estac (km)	0,81			
9					
10	Frecuencia (GHz)	1	10	20	30
11					
12	$H_o'$ (km)	5,242	5,242	5,242	5,242
13	Ogamma (dB/km)	0,005	0,007	0,010	0,018
14	$H_w'$ (km)	2,114	2,141	2,741	2,196
15	Wgamma (dB/km)	0,000	0,006	0,081	0,076
16					
17	Temp galáct @ 408 MHz (K)	30			
18	Temp galáct (K)	2,549	0,005	0,001	0,000
19	Ruido cósm (W/Hz)	3,69E-23	3,41E-23	3,10E-23	2,82E-23
20	Temp cósm (K)	2,676	2,467	2,248	2,044
21	Cósm + galáct (K)	5,225	2,472	2,249	2,044
22					
23	Aten cenit (dB)	0,03	0,05	0,28	0,26
24	Ruido atmosf cenit (K)	1,68	3,23	17,24	16,51
25	Cósm + galáct cenit (K)	5,19	2,44	2,11	1,92
26	Ruido tot cenit (K)	6,88	5,67	19,35	18,43
27					
28					
29	Áng elev (grados)	15,00			
30	Aten atmosf elev (dB)	0,10	0,19	1,07	1,02
31	Aten lluv elev (dB)	0,00	2,47	9,93	18,87
32	Aten tot elev dB	0,10	2,66	11,00	19,89
33	Ruido atmosf + lluv elev (K)	6,61	128,27	257,74	277,13
34	Cósm + galáct elev (K)	5,10	1,34	0,18	0,02
35	Ruido tot elev (K)	11,72	129,60	257,92	277,15
36	Pot ruido elev (dB(W/Hz))	-217,91	-207,47	-204,49	-204,17
37					
38					
39	Áng elev (grados)	30,00			
40	Aten atmosf elev (dB)	0,05	0,10	0,55	0,53
41	Aten lluv elev (dB)	0,00	1,55	6,23	11,84
42	Aten tot elev (dB)	0,05	1,65	6,78	12,37
43	Ruido atmosf + lluv elev (K)	3,46	88,43	221,28	263,77
44	Cósm + galáct elev (K)	5,16	1,69	0,47	0,12
45	Ruido tot elev K	8,62	90,12	221,75	263,89
46	Pot ruido elev (dB(W/Hz))	-219,24	-209,05	-205,14	-204,39
47					

## 5 Calidad del enlace con cielo despejado

El Cuadro 4 presenta la calidad del enlace calculada para un conjunto supuesto de parámetros de equipo y de distancia utilizando los valores de atenuación y temperatura de ruido para propagación en condiciones de cielo despejado. Con relación a los números de línea indicados en la parte izquierda del Cuadro, los cálculos se hacen como sigue:

Línea 9 Frecuencia (GHz)

Frecuencia radioeléctrica a la que se ha efectuado el cálculo.

Línea 11 Pot veh esp  $P_0$  (dBW)

Potencia de transpondedor del vehículo espacial supuesto, en este caso 25 W, dada por:

$$P_0 = 10 \log 25$$

Línea 12 Ganancia, 3,7 m diámetro (dBi)

Ganancia supuesta de la antena transmisora del vehículo espacial, en este caso una parábola de 3,7 m de diámetro con una eficacia supuesta del 100%, dada por:

$$20,40 + 20 \log (\text{diámetro (m)}) + 20 \log (\text{frecuencia (GHz)}) \quad \text{dBi}$$

Línea 13 Pérd esp libre (dB)

Atenuación para un trayecto de espacio libre, en este caso de longitud  $8 \times 10^6$  km dada por:

$$230,51 + 20 \log (\text{frecuencia (GHz)}) \quad \text{dB}$$

Línea 14 Ganancia, 70 m diámetro (dBi)

Ganancia de la antena receptora de estación terrena, en este caso una parábola de 70 m de diámetro con una eficacia supuesta del 100%, dada por:

$$20,40 + 20 \log (\text{diámetro (m)}) + 20 \log (\text{frecuencia (GHz)}) \quad \text{dBi}$$

Línea 16 Áng elev (grados)

Ángulo de elevación de la antena receptora de estación terrena y del trayecto de propagación a través de la atmósfera, en este caso  $15^\circ$ .

Línea 17 Aten atmosf (dB)

Atenuación producida por la atmósfera para el ángulo de especificación especificado, y se toma del Cuadro 1.

Línea 18 Pot recib (dBW)

Potencia recibida en los terminales de cada antena de estación terrena, dada por:

$$\text{Línea 11} + \text{línea 12} - \text{línea 13} + \text{línea 14} - \text{línea 17}$$

Línea 19 Pot ruido (dB(W/Hz))

Densidad espectral de potencia de ruido recibida, y se toma del Cuadro 1. En el ejemplo presentado por el Cuadro 4, la contribución de temperatura de ruido del sistema receptor de estación terrena se ha supuesto igual a cero.

Línea 20  $P_r/N_0$  (dB(W/(W/Hz))) (a menudo expresado como dBHz)

Relación potencia recibida/densidad espectral de potencia de ruido, y viene dada por (línea 18, línea 19). La variación de  $P_r/N_0$  con la frecuencia ofrece la base para la selección de bandas de frecuencias preferidas en términos de calidad del enlace. Las frecuencias con  $P_r/N_0$  más alta proporcionan la mejor calidad de funcionamiento para un conjunto dado de condiciones supuestas y características del equipo.

Las líneas 22-26 y 28-32 son similares a las líneas 16-20, salvo para diferentes valores del ángulo de elevación.

CUADRO 4				
Datos para la selección de las frecuencias preferidas				
Calidad de un enlace ideal, espacio-Tierra, cielo despejado sin lluvia				
	1	10	20	30
9	Frecuencia (GHz)			
10				
11	Pot veh esp $P_0$ (dBW)	13,98		
12	Ganancia, 3,7 m diám (dBi)	31,77	51,77	57,79
13	Pérd esp libre (dB)	270,51	290,51	296,53
14	Ganancia, 70 m diám (dBi)	57,30	77,30	83,32
15				
16	Áng elev (grados)	15		
17	Aten atmosf (dB)	0,10	0,18	1,02
18	Pot recib (dBW)	-167,56	-147,64	-142,46
19	Pot ruido (dB(W/Hz))	-217,98	-217,14	-210,78
20	$P_r/N_0$ (dB(W/(W/Hz)))	50,41	69,50	68,31
21				
22	Áng elev (grados)	30		
23	Aten atmosf (dB)	0,05	0,10	0,53
24	Pot recib (dBW)	-167,51	-147,56	-141,97
25	Pot ruido (dB(W/Hz))	-219,30	-219,31	-213,27
26	$P_r/N_0$ (dB(W/(W/Hz)))	51,79	71,75	71,30
27				
28	Áng elev (grados)	75		
29	Aten atmosf (dB)	0,03	0,05	0,27
30	Pot recib (dBW)	-167,49	-147,51	-141,71
31	Pot ruido (dB(W/Hz))	-220,19	-221,11	-215,76
32	$P_r/N_0$ (dB(W/(W/Hz)))	52,70	73,60	74,04

## 6 Calidad del enlace con cielo despejado y lluvia

El cálculo de la calidad del enlace con cielo despejado y lluvia se presenta en el Cuadro 5. Los Cuadros 4 y 5 son similares, con la diferencia de que en el Cuadro 5 los valores de atenuación y temperatura de ruido se toman en parte del Cuadro 3. Obsérvese también que el Cuadro 5 incluye los efectos dependientes de la frecuencia del soporte físico de la estación terrena: la variación de la ganancia de antena, y las contribuciones a la potencia de ruido total.

CUADRO 5  
**Datos para la selección de las frecuencias preferidas**  
**Calidad del enlace obtenible, espacio-Tierra, cielo despejado y lluvia**  
**Incluye los efectos del soporte físico de estación terrena**

Frecuencia (GHz)	1	10	20	30
Pot veh esp $P_0$ (dBW)	13,98			
Ganancia, 3,7 m diám (dBi)	29,55	49,55	55,57	59,09
Pérd esp libre (dB)	270,51	290,51	296,53	300,05
Áng elev (grados)	15			
Ganancia 70 m (dBi)	55,67	75,35	80,40	82,30
Aten atmosf (dB)	0,10	0,18	1,02	0,89
Pot ruido (dBW)	-171,41	-151,81	-147,60	-145,57
Ruido celeste (K)	11,55	13,99	60,56	53,56
Ruido REL* (K)	10,01	16,13	20,97	26,16
Ruido estación (K)	-215,26	-213,81	-209,49	-209,58
$P_r/N_0$ (dB)	43,85	62,00	61,88	64,02
Áng elev (grados)	30			
Ganancia 70 m (dBi)	55,67	75,42	80,69	82,95
Aten atmosf (dB)	0,05	0,10	0,53	0,46
Pot recib (dBW)	-171,36	-151,65	-146,82	-144,49
Ruido celeste (K)	8,52	8,50	34,15	30,03
Ruido estac (K)	8,71	14,83	19,67	24,86
Pot ruido (dB(W/Hz)) (kTB)	-216,24	-214,92	-211,29	-211,21
$P_r/N_0$ (dB)	44,88	63,27	64,47	66,72
		-214,97	-211,33	-211,26
Áng elev (grados)	75			
Ganancia 70 m (dBi)	55,67	75,32	80,29	82,06
Aten atmosf (dB)	0,03	0,05	0,27	0,24
Pot recib (dBW)	-171,34	-151,71	-146,96	-145,15
Ruido celeste (K)	6,93	5,61	19,25	16,90
Ruido estación (K)	6,41	12,53	17,37	22,56
Pot ruido (dB(W/Hz))	-217,35	-216,01	-212,96	-212,64
$P_r/N_0$ (dB(W/(W/Hz)))	46,01	64,31	66,00	67,49

\*REL: Red del espacio lejano