Un nuevo modelo para la atenuación diferencial por lluvias en enlaces terrestres convergentes operando en frecuencias superiores a 10 ghz, para climas inter-tropicales

A novel model for differential rain attenuation in converging terrestrial links operating at frequencies above 10 ghz and inter-tropical weathers

Araujo, Pedro[1*]; Pérez, Nelson[2]; Uzcátegui, José[2] y Paredes, José-Luís[2]
[1]Escuela de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería. ULA
[2]Grupo de Investigación en Telecomunicaciones (GITEL). Ingeniería Eléctrica. ULA
Mérida 5101, Venezuela
[*]pedro_araujo85@hotmail.com

Da Silva Mello, Luiz
Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC). PUC\Rio
Río de Janeiro, Brasil

Recibido: 30-07-2010 Revisado: 29-10-2010

Resumen

Los sistemas inalámbricos de comunicación que operan en frecuencias superiores a 10 GHz son fuertemente afectados por la presencia de eventos de lluvias. En el caso de los enlaces punto-multipunto, como por ejemplo los sistemas LMDS (Local Multipoint Distribution Services), que operan en dicho rango de frecuencias, existe otro efecto producido por las lluvias, conocido como atenuación diferencial, que degrada significativamente la relación señal-interferencia (S/I) de los enlaces, pudiendo causar indisponibilidad en el servicio. Para la predicción de este fenómeno existen pocos modelos disponibles en la literatura, los cuales, además, presentan ciertas desventajas (inconsistencia con el comportamiento físico del fenómeno, dependencia de las atenuaciones totales de cada enlace y excesivo número de parámetros de ajuste). En este artículo se desarrolla un nuevo modelo semi-empírico para la estimación de la atenuación diferencial, que supera las desventajas mencionadas, y puede ser aplicado en Venezuela. Para ello, se dispone de una base de datos de medidas realizadas en Brasil, que al igual que Venezuela, también está ubicado en la zona inter-tropical del globo terrestre. El modelo desarrollado se basa en el ajuste de la distribución acumulativa de Weibull a los datos obtenidos a partir de las medidas, y se utilizaron diversos métodos de regresión no lineal para la obtención de los respectivos parámetros de ajuste. Los resultados son bastantes satisfactorios, ya que, dicho modelo además de superar las desventajas de los modelos existentes (presentando una muy buena correlación del 95,96% con respecto a toda la muestra de datos medidos, para el caso de modelos no dependientes de atenuaciones totales de enlaces), presenta un mejor desempeño en términos del valor RMS de los errores, para bajos porcentajes de tiempo (entre 0,01 % y 0,1%), los cuales son ampliamente utilizados como parámetro en la planificación y dimensionamiento de sistemas de alta disponibilidad.

Palabras clave: Atenuación diferencial por lluvias, distribución acumulativa de weibull, modelado.

Abstract

Wireless communication systems operating at frequencies above 10 GHz are strongly affected by rain events. In the case of point-multipoint links, e.g. Local Multipoint Distribution Services (LMDS) systems that particularly operate in such a frequency range, there exists another additional effect due to the rain. This effect is known as differential rain attenuation and significantly degrades the link signal to interference (S/I) ratios, which may cause service unavailability. To estimate this

effect there are few model reported on the literature that show disadvantages, i.e. inconsistencies with the physical behavior of the phenomenon, total attenuation dependencies for each link, and a considerable number of adjustment parameters. This paper presents the development of a novel semi-empirical modeling for the estimation of the differential rain attenuation that outperforms and overcomes earlier models. The proposed model is specifically useful in Venezuela. To develop the model a database of measurements taken in Brazil was used, and the results were extrapolated to the Venezuelan case since both countries are located in the inter-tropical earth region showing similar weather characteristics. The developed model is based on parameter estimation of a Weibull cumulative distribution function from the data, using several non-linear regression methods. Results are promising: additionally to overcome earlier model disadvantages (good correlation of 95,96%, for the case of non-dependable total attenuations models), there is a better RMS errors performance for low time percentages (from 0.01 to 0.1), which are widely used for planning and dimensioning high reliability systems.

Key words: Differential rain attenuation, weibull cumulative distribution, modeling.

1 Introducción

El vertiginoso incremento de la demanda por parte de los usuarios de servicios de banda ancha (voz sobre IP, video, datos a alta velocidad, entre otros), así como la necesidad para los operadores de acceder a bandas del espectro no congestionadas, ha redundando en el aumento de la implantación de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones operando en frecuencias superiores a 10 GHz. Entre estos sistemas se encuentran WiMax, LMDS (*Local Multipoint Distribution Services*) y UWB (*Ultra Wideband*). En estos sistemas, el principal factor limitador de su cobertura y desempeño son los eventos de lluvias, debido a que la longitud de onda (λ) de señales con frecuencias superiores a 10 GHz está en el mismo orden de magnitud de las dimensiones de las gotas de agua, lo que produce pérdidas de potencia debido a los mecanismos de absorción y dispersión de la señal electromagnética al atravesar dicha gota.

Por ello, es imprescindible la adecuada caracterización de los efectos de la atenuación por lluvias en esos sistemas, a fin de no sobredimensionar ni subdimensionar los mismos. En caso de la atenuación total producida por las lluvias en un enlace punto a punto, está puede ser estimada utilizando los diversos modelos desarrollados para tal fin, tales como: modelo de la ITU-R (ITU-R, 2009), modelo de Crane (Crane, 1980), modelo australiano (Pérez, 2003), modelo CETUC-98 (Pérez, 2003), modelo de Pérez-Mello (Pérez y col., 2004), entre otros (Souza, 2006; Capsoni, 2006; Silva y col., 2007). Estos métodos, en su mayoría, basan su desarrollo en el concepto de longitud efectiva, que toma en cuenta el hecho de que la lluvia no está distribuida de forma uniforme a lo largo de la longitud de un vano.

Por otra parte, otro de los efectos significativos producidos por las lluvias en los sistemas en cuestión, es la atenuación diferencial que se produce en par de enlaces convergentes con igual frecuencia de operación. Durante eventos de lluvias, ambos enlaces están sujetos a diferentes niveles de atenuación total, debido no solamente a la diferencias de sus longitudes (pérdidas en espacio libre diferentes), sino también a la no uniformidad espacial de lluvia. Esta diferencia de la atenuación total en cada enlace hace que la relación señal-interferencia (S/I) en el receptor pueda verse gravemente afectada, deteriorando el porcentaje real de disponibilidad del sistema. Este efecto, que es de especial interés en la planificación y dimensionamiento de dichos enlaces, específicamente para el cálculo de interferencia en sistemas punto-multipunto, ha sido poco abordado en la literatura existente.

En el caso específico de Venezuela, no existe ningún modelo desarrollado con base a mediciones locales que permita estimar la atenuación diferencial por lluvias. Sin embargo, mediciones de atenuación por lluvias realizadas en Brasil, reconocidas oficialmente por la ITU (*International Telecommunication* Union*)*, sobre enlaces terrestres, han permitido desarrollar modelos incipientes (Pérez, 2003; Pérez, 2005) que pueden ser aplicados en Venezuela, considerando su clima también inter-tropical similar al de Brasil. No obstante, dichos modelos pueden ser mejorados en términos de su ajuste a los datos obtenidos experimentalmente, y en términos de la cantidad de parámetros considerados para su desarrollo.

En este artículo, se desarrolla un nuevo modelo para la predicción de la atenuación diferencial por lluvias, con base a las mencionadas mediciones, realizadas sobre enlaces terrestres operando en frecuencias superiores a 10 GHz, que puede ser aplicado en Venezuela, y que supera las desventajas que presentan los citados modelos. El modelo en cuestión se basa en la función de distribución acumulativa (*fda*) de Weibull (Weibull, 2010).

2 Base de datos experimentales disponible

Para el desarrollo del mencionado modelo se utiliza un conjunto de medidas de atenuación diferencial por lluvias realizadas en Brasil, reconocidas oficialmente por la base de datos de la ITU-R, denominada DB-SG5 (ITU-R, 2009), que cumplen con los requisitos mínimos de consistencia, tiempo de medición y calidad de los datos. Estas mediciones son de especial interés, dado que el clima tropical y ecuatorial de dicho país es similar al de Venezuela, ambos caracterizados por fuertes regímenes de lluvia. Las medidas fueron realizadas en un conjunto de siete (07) enlaces convergentes en la Rua dos Ingleses, São Paulo, de los cuales dos (02) operan en 18 GHz y cinco (05) en 15 GHz; y seis

(06) enlaces convergentes en Brasilia, de los cuales dos (02) operan en 38 GHz y cuatro (04) en 23 GHz. Entre ambos conjuntos de medidas suman 36 distribuciones de atenuación diferencial por lluvias disponibles para el desarrollo del modelo.

Los parámetros de cada conjunto de enlaces se resumen en las Tablas 1 y 2 (Pérez, 2003), mientras que en las Figs. 1 y 2 (Pérez, 2003) se ilustran los esquemas de distribución geográfica de los dichos enlaces, en São Paulo y Brasilia, respectivamente.

Tabla 1. Datos de los enlaces convergentes de São Paulo

Enlace	Longitud (km)	Frecuencia (GHz)	Polarización	Duración de las mediciones (años)
Bradesco2-RIS	12,79	15	V	2
CENESP15-RIS	12,78	15	H	2
CENESP18-RIS	12,78	18	V	1
Scania-RIS	18,38	15	V	2
Barueri-RIS	21,69	15	V	1
Shell-RIS	7,48	18	V	1
Paranapiacaba-RIS	42,99	15	H	2

H = Polarización horizontal; V = Polarización vertical

Tabla 2. Datos de los enlaces convergentes de Brasilia

Enlace	Longitud (km)	Frecuencia (GHz)	Polarización	Duración de las mediciones (años)
AUTORAC-BSA	3,37	23	V	1
MF38-BSA	1,01	38	H	1
PGR-BSA	1,90	23	V	1
INCRA-BSA	1,21	23	H	1
SARAH-BSA	0,41	38	H	1
BNDES-BSA	0,95	23	V	1

3 Aspectos introductorios del desarrollo del modelo

3.1 Ajuste de la función de distribución acumulativa (fda) de Weibull con los datos experimentales

Se utiliza la *fda* Weibull de dos (02) parámetros (η y β) para ajustarla a las distribuciones de atenuación diferencial por lluvias medidas para cada par de enlace, y así obtener un conjunto de valores para los parámetros η y β (primera fase). El empleo de esta distribución se debe a que los eventos de atenuación diferencial por lluvias en enlaces que operan en frecuencias superiores a 10 GHz pueden ser considerados como eventos que producen fallas en la disponibilidad del enlace, por lo que es posible aplicar la teoría de confiabilidad para el análisis de las estadísticas de estos eventos, donde dicha función de Weibull es ampliamente utilizada. Además, la misma es de fácil tratamiento matemático en comparación a la distribución log-normal.

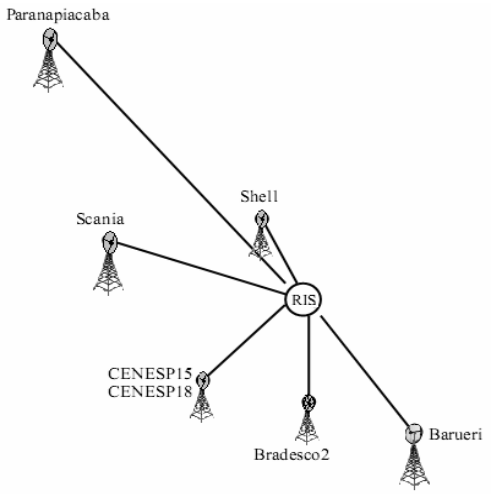


Fig. 1. Distribución geográfica de los enlaces convergentes de São Paulo

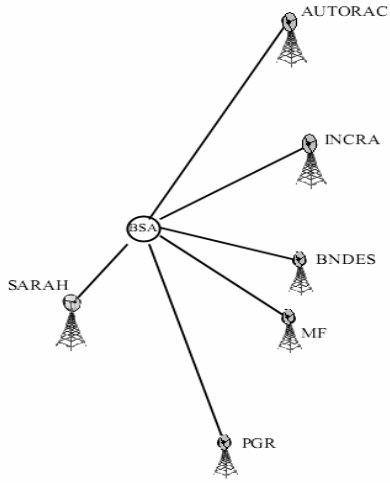


Fig. 2. Distribución geográfica de los enlaces convergentes de Brasilia

3.2 Obtención de las expresiones empíricas para η y β

Se procede a obtener expresiones matemáticas empíricas para η y β, en función de los parámetros de enlaces (que son considerados como variables independientes), es decir, frecuencia de operación (f), longitud del enlace (d_1 y d_2) y ángulo entre cada par de enlaces (θ). Para ello, se construyen gráficos de dispersión que permitan observar la correlación entre η y β con cada una de las variables independientes, para de esta manera inferir las posibles funciones de ajuste. Seguidamente, aplicando métodos de regresión no lineal se determinan los valores de los parámetros de ajuste. Es importante resaltar que se trata de apenas expresiones matemáticas, por lo que las ecuaciones resultantes no necesariamente tienen que cumplir con las restricciones intrínsecas propias de los parámetros de la distribución de Weibull, aunque si deben ser físicamente consistentes con el comportamiento de la atenuación diferencial por lluvias.

Para la determinación de los parámetros de ajuste de las expresiones matemáticas de η y β, se recurre al método de "ensayo y error", probando con diversas probables expresiones matemáticas, hasta conseguir: a) Correlación entre los valores estimados mediante el modelo desarrollado y los valores reales (medidos), cercana al 90% (caso ideal: superior al 95%); b) Mejor desempeño en términos de la media, desviación estándar y valor RMS de los errores, que los arrojados por los modelos ya existentes en literatura, en la mayor parte del porcentaje de tiempo.

Finalmente, para la obtención de los parámetros de ajuste se utiliza la herramienta computacional STATISTICA (Statsoft, 2009), que provee diferentes métodos de regresión no lineal para la estimación de los parámetros, tales como: Quasi-Newton, Simplex, Hooke-Jeeves Ppattern moves y Rosenbrock pattern search.

4 Desarrollo del nuevo modelo para la atenuación diferencial por lluvias (Modelo 3)

La *fda* de Weibull, la función es dada por (Weibull, 2010):

$$P = e^{-\left(\frac{A_{dif}}{\eta}\right)^{\beta}} \Rightarrow p = 100 \times e^{-\left(\frac{A_{dif}}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

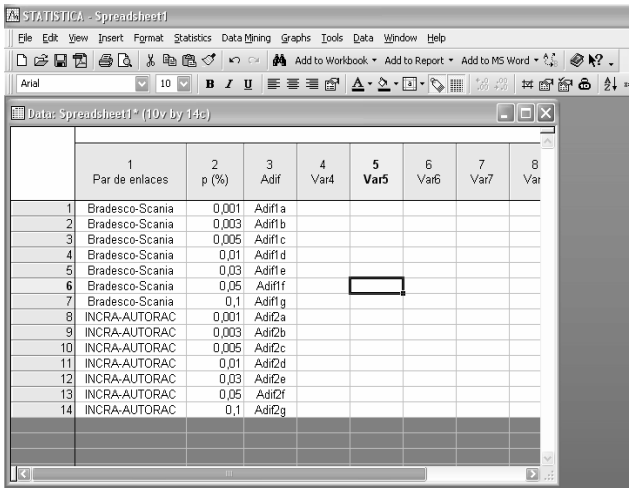
donde:

P = Probabilidad de que la atenuación diferencial exceda un determinado valor.

p = Porcentaje de tiempo (respecto a un año) donde la atenuación diferencial excede un determinado valor (en este caso, p = 100P).

El ajuste de la expresión (1) se lleva a cabo para cada par de enlaces, obteniéndose así un conjunto de 36 pares de valores de η y β. En este caso, no se emplea "ensayo y error", ya que la expresión (1) no es empírica.

En la Fig. 3 se observa un ejemplo de hoja de cálculo del programa STATISTICA similar a la que se utilizó para esta primera fase.



	1 Par de enlaces	2 p (%)	3 Adif	4 Var4	5 Var5	6 Var6	7 Var7	8 Var
1	Bradesco-Scania	0,001	Adif1a					
2	Bradesco-Scania	0,003	Adif1b					
3	Bradesco-Scania	0,005	Adif1c					
4	Bradesco-Scania	0,01	Adif1d					
5	Bradesco-Scania	0,03	Adif1e					
6	Bradesco-Scania	0,05	Adif1f					
7	Bradesco-Scania	0,1	Adif1g					
8	INCRA-AUTORAC	0,001	Adif2a					
9	INCRA-AUTORAC	0,003	Adif2b					
10	INCRA-AUTORAC	0,005	Adif2c					
11	INCRA-AUTORAC	0,01	Adif2d					
12	INCRA-AUTORAC	0,03	Adif2e					
13	INCRA-AUTORAC	0,05	Adif2f					
14	INCRA-AUTORAC	0,1	Adif2g					

Fig. 3. Hoja de cálculo del programa STATISTICA utilizada para la determinación de los valores de η y β que ajustan la expresión (1)

De los 36 pares mencionados, la mayor correlación obtenida entre la *fda* medida de atenuación diferencial y la *fda* de Weibull ocurre para el enlace CENESP15-Scania, con coeficiente de correlación de 99,96% (Fig. 4). Por su parte, el peor de los casos corresponde al par Paranapiacaba-Barueri, con una correlación de 96,81% (Fig. 5).

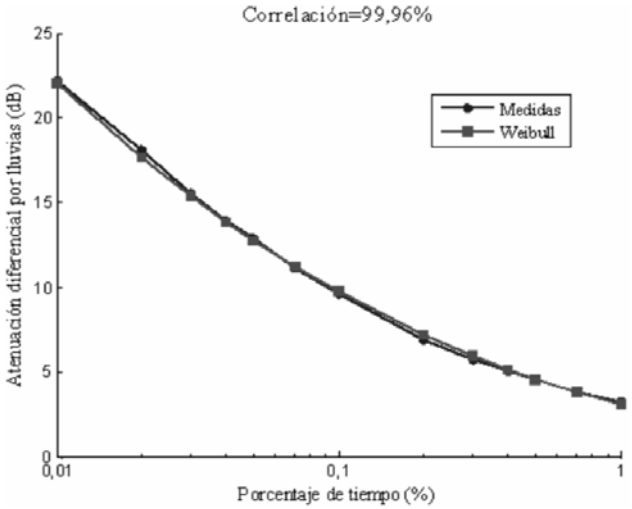


Fig. 4. Atenuación diferencial del par CENESP15-Scania

Una vez obtenidos los parámetros de la distribución de Weibull, se procedió a confrontarlos en función de los parámetros de enlace (variables independientes). Las Figs. 6 a 9 representan los gráficos de dispersión de η en función de cada una de las variables independientes.

De las Figs. 6 a 9 se observa que la mayor correlación existe para el caso de relación de η con la longitud del enlace 1. Respecto a las restantes variables, la correlación es menos marcada, pero esto no significa que se deban descartar, ya que físicamente la atenuación diferencial tiene dependencia con ellas, hecho que se confirma en la observación de los resultados experimentales.

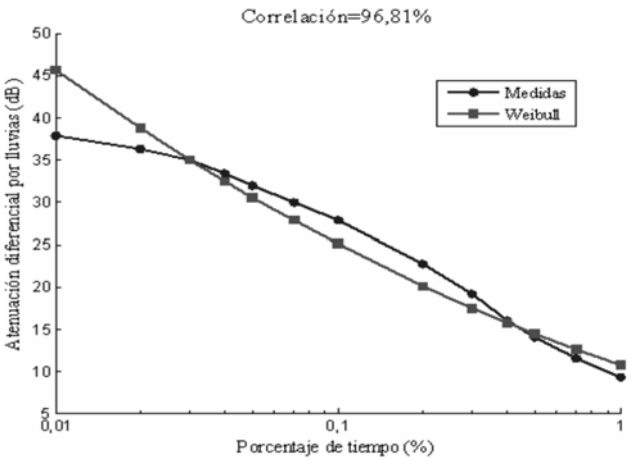


Fig. 5. Atenuación diferencial del par Paranapiacaba-Barueri

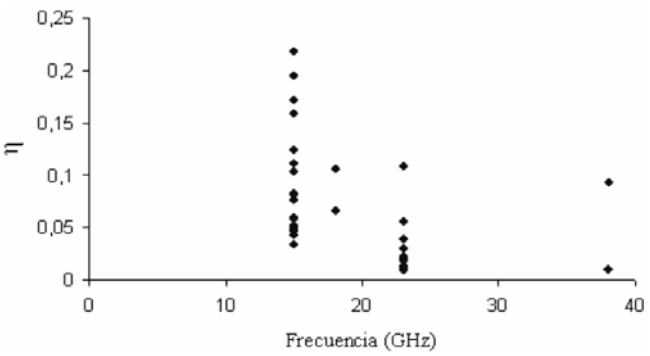


Fig. 6. Parámetro η vs. frecuencia de operación de cada par de enlaces

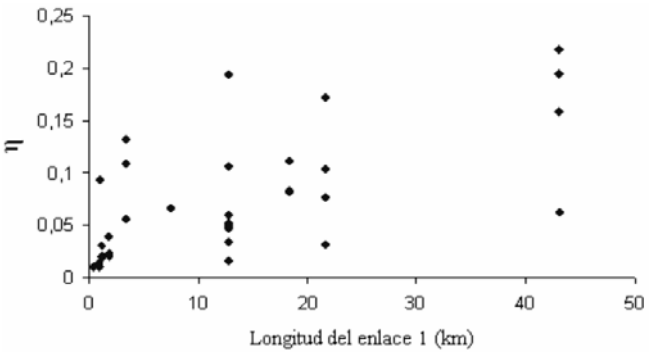


Fig. 7. Parámetro η vs. longitud del enlace 1

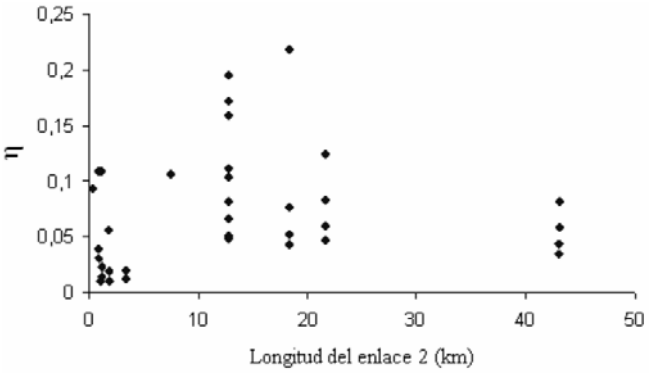


Fig. 8. Parámetro η vs. longitud del enlace 2

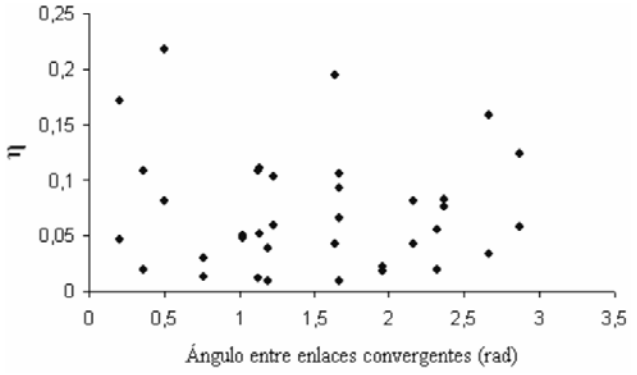


Fig. 9. Parámetro η vs. ángulo entre cada par de enlaces

Para el ajuste en cuestión, correspondiente a η, fueron probadas diferentes funciones de ajuste (todas empíricas), procurando la mayor correlación posible con el menor número posible de parámetros, con el objetivo de cumplir con la recomendación de que el número de parámetros de ajuste de una ecuación obtenida empíricamente debe ser como máximo, en lo posible, igual al número de variables más uno (1). La expresión para η con mejor desempeño está dada por:

$$\eta = \left(a_1 + a_2 d_1 - a_3 d_2\right)\left[a_4 + e^{\left(a_5|\theta| + a_6 f\right)}\right] \quad (2)$$

donde:
$a_1, a_2, \ldots, a_6$ = Parámetros de ajuste para la función η

El "ensayo y error", para por ejemplo, el parámetro η (que es similar al caso de β), se lleva a cabo con una hoja de cálculo del programa STATISTICA, similar a la mostrada en la Fig. 10 (capturada directamente del programa STATISTICA).

En la Tabla 3 se resumen los valores de los coeficientes de ajuste para la función η.

La correlación entre los valores calculados de η a través de la expresión (2) y los obtenidos en la primera fase (ajuste de η y β a la *fda* de Weibull), se muestra en la Fig. 11.

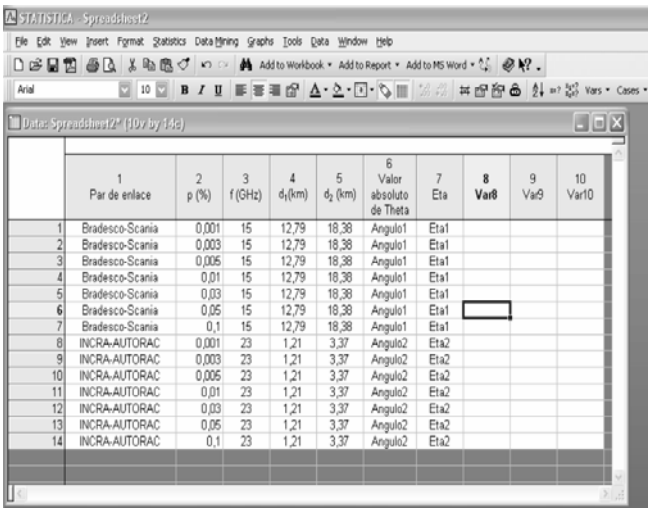


Fig. 10. Hoja de cálculo del programa STATISTICA utilizada para la determinación de la expresión matemática de η

Tabla 3. Valores de los parámetros de ajuste la función de η

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-0,000933	0,00356	0,000258	-2,665779	-0,076535	0,100243

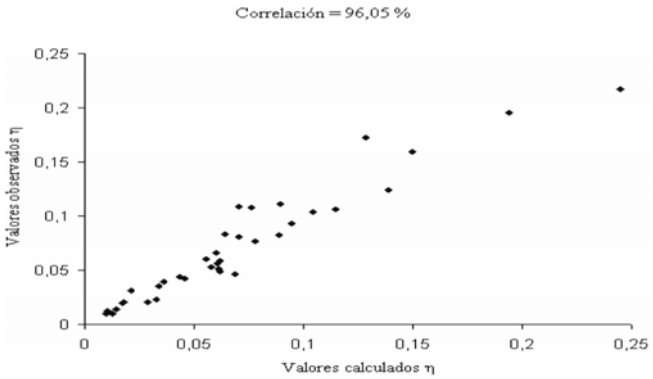


Fig. 11. Valores obtenidos en la 1era fase vs. valores calculados de η

Por su parte, los gráficos de dispersión de β en función de las variables involucradas se muestran en las Figuras 12 a 15, de las cuales se observa que la correlación más acentuada ocurre con el ángulo (Fig. 15). No obstante, de forma similar a como ocurre con η, también se debe considerar la dependencia con las restantes variables, a fin de mantener la consistencia física del comportamiento el fenómeno en cuestión.

En este caso, la expresión semi-empírica que se consiguió para el parámetro β está dada por:

$$\beta = \left(c_1 + c_2 \frac{d_1}{d_2}\right)\left[c_3 + e^{\left(c_4|\theta|^{c_5} + c_6 f\right)}\right] \quad (3)$$

donde:

$c_1, c_2, \ldots, c_6$ = Parámetros de ajuste para la función β

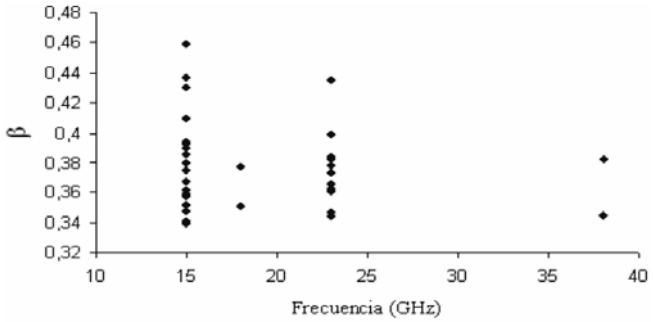


Fig. 12. Parámetro β vs. frecuencia de operación de cada par de enlaces

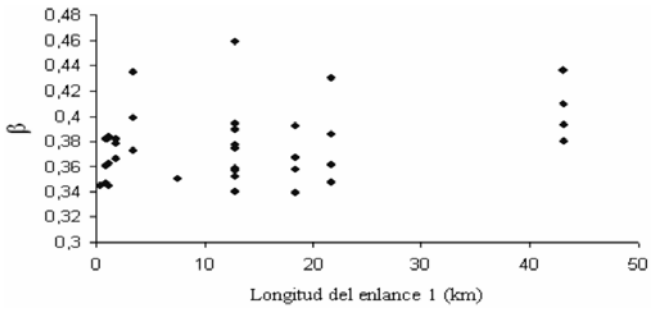


Fig. 13. Parámetro β vs longitud del enlace 1

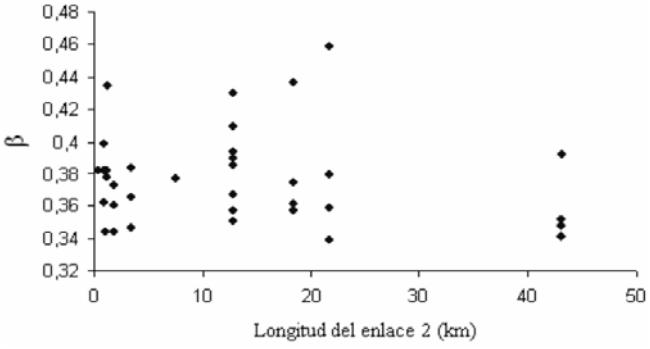


Fig. 14. Parámetro β vs longitud del enlace

Los valores de los coeficientes de ajuste para la función β, se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de los parámetros de ajuste la función de β

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
0,124118	0,006566	1,108219	0,60979	-0,185228	-0,002031

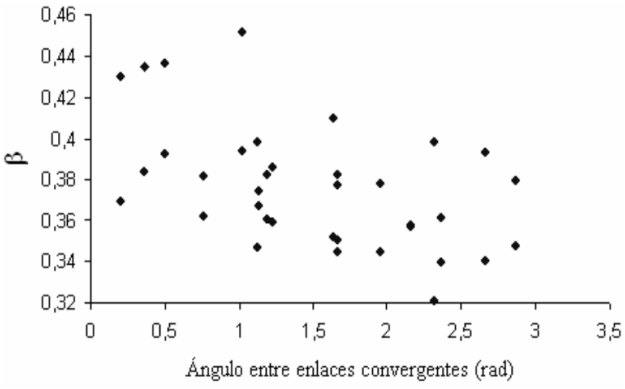


Fig. 15. Parámetro β vs ángulo entre cada par de enlaces

En la Fig. 16, la correlación entre los valores obtenidos en la primera fase y los valores calculados con la expresión (3), donde se aprecia una correlación bastante aceptable de 91,41%.

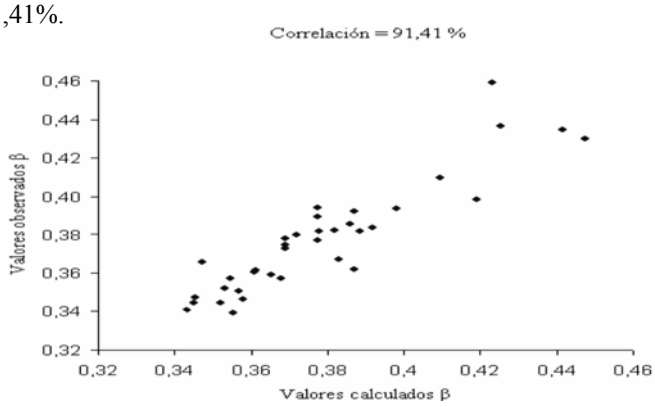


Fig. 16. Valores obtenidos en la 1era fase vs. valores calculados de β

Finalmente, la expresión semi-empírica para la estimación de la atenuación diferencial por lluvias, en el Modelo 3 aquí desarrollado, está dada por:

$$A_{dif} = \eta\left[-\mathrm{Ln}\left(\frac{p}{100}\right)\right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

donde:
p = Porcentaje de tiempo (entre 0,01 y 1 %)
η = Parámetro de escala de la distribución de Weibull, dado por (2).
β = Parámetro de perfil de la distribución de Weibull, dado por (3).

5 Resultados

5.1 Coeficiente de correlación

En la Fig. 17 se muestra la dispersión entre los valores medidos y calculados de la atenuación diferencial, usando el Modelo desarrollado.

Tal como se puede observar en la Fig. 17, existe alta correlación entre los valores medidos de la atenuación diferencial por lluvias y los calculados por el nuevo modelo aquí desarrollado. Otra característica importante de este Modelo 3 es su fácil implementación, debido a la simplicidad de la expresión matemática que lo caracteriza, ya que, no requiere de cálculos complejos, y además de que los datos requeridos son de fácil acceso.

En la Tabla 5 se muestra el coeficiente de correlación, en porcentaje, entre las atenuaciones diferenciales por lluvias medidas y las previstas por cada uno de los modelos considerados en el presente artículo.

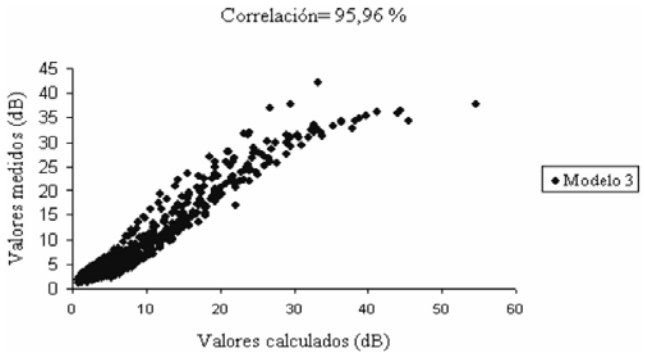


Fig. 17. Valores medidos vs. valores calculados de atenuación diferencial por lluvias (Modelo 3)

Tabla 5. Valores de coeficientes de correlación

Modelo 1 (con ITU-R)	Modelo 1 (con CETUC-98)	Modelo 1 (con Pérez-Mello)	Modelo 2	Modelo 3
91,85	89,62	83,73	81,73	95,96

El Modelo 1 depende, entre otras variables, de las atenuaciones totales por lluvias de los enlaces de cada par, por lo que es necesario recurrir a modelos que permitan estimar dichas atenuaciones. Por su parte, el Modelo 2 también es basado en la *fda* de Weibull de dos (2) parámetros.

De acuerdo a los coeficientes de correlación de la Tabla 5, el Modelo 3 presenta el mejor desempeño.

5.2 Media de los errores

A fin de comparar el desempeño del Modelo 3 desarrollado en el presente trabajo, con el del los restantes modelos considerados, se procedió a determinar los errores entre los valores medidos y los valores estimados por cada uno de los modelos. Específicamente, se implementó el error relativo.

En la Tabla 6 y Fig. 18, se observa que el Modelo 1, con las atenuaciones totales de cada enlace estimadas por los métodos de ITU-R y CETUC-98, presenta elevadas subestimaciones y sobrestimaciones, respectivamente, mientras que cuando dichas atenuaciones se calculan con el método Pérez-Mello se observa un mejor desempeño. Estas variaciones extremas en el comportamiento del Modelo 1 se deben precisamente a su dependencia con las atenuaciones totales de cada enlace del par, lo que constituye en su principal desventaja, tal como fue mencionado anteriormente.

Asimismo, la Tabla 6 y Fig. 18 también muestran que el Modelo 3 presenta el mejor desempeño, en términos de media de errores, para la mayor parte de los porcentajes de tiempo, con error medio máximo de 10,59% frente a 40,13% y 18,92% correspondientes al Modelo 1 utilizando (Pérez-Mello) y Modelo 2.

Tabla 6. Media de errores (relativos) de los Modelos 1, 2 y 3

p (%)	Modelo 1 (con ITU-R)	Modelo 1 (con CETUC-98)	Modelo 1 (con Pérez-Mello)	Modelo 2	Modelo 3
0,01	-34,50	30,12	-1,75	-5,59	3,65
0,02	-38,93	36,72	-0,39	-7,82	-0,76
0,03	-41,13	42,42	2,30	-5,91	-0,84
0,04	-42,80	50,49	7,66	-4,03	-0,20
0,05	-44,12	53,87	8,65	-2,23	0,64
0,07	-46,20	60,53	10,69	1,06	2,51
0,1	-48,64	62,01	8,14	4,97	4,96
0,2	-54,77	61,44	3,41	12,18	8,03
0,3	-58,72	52,94	-6,19	16,04	9,62
0,4	-61,64	42,77	-16,29	18,26	10,59
0,5	-64,36	33,42	-24,17	18,56	9,63
0,7	-68,09	25,92	-31,59	18,92	8,68
1	-72,27	16,18	-40,13	16,9	5,30

5.3 Desviación estándar de los errores

En cuanto a la desviación estándar de los errores (Tabla 7 y Fig. 19), el Modelo 1 (utilizando ITU-R) presenta bajos porcentajes de error (menores a 18,58%); sin embargo, esto no significa necesariamente buen desempeño, como puede verse más adelante en la Fig. 18 (valor RMS de los errores). Esto se debe a la fuerte subestimación en las medidas en todos los porcentajes de tiempo observada en la Fig. 16. Con respecto al Modelo 3, el mismo exhibe el mejor desempeño para porcentajes de tiempo entre 0,01% y 0,1%, con error máximo de 29,47%. El Modelo 2 supera al Modelo 3 sólo para los porcentajes entre 0,7% y 1%. Para porcentajes mayor a 0,2%, el Modelo 1 (utilizando Pérez-Mello) presenta menores porcentajes de error en relación a la desviación estándar.

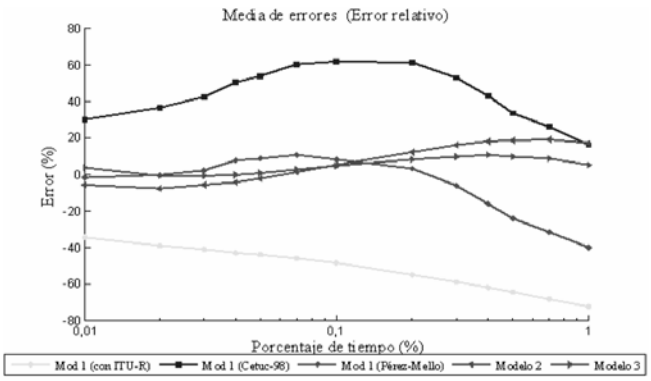


Fig. 18. Media de errores (relativos)

Tabla 7. Desviación estándar de los errores (relativos)

p (%)	Modelo 1 (con ITU-R)	Modelo 1 (con CETUC-98)	Modelo 1 (con Pérez-Mello)	Modelo 2	Modelo 3
0,01	18,58	56,76	50,92	47,36	21,72
0,02	17,76	56,47	45,40	41,08	21,03
0,03	16,88	54,31	42,63	41,09	21,06
0,04	16,13	53,06	42,03	40,75	21,63
0,05	15,61	51,67	40,00	40,34	22,30
0,07	15,12	52,20	37,74	40,17	24,89
0,1	15,08	52,47	35,06	40,39	29,47
0,2	13,56	45,67	31,47	41,52	32,22
0,3	12,51	42,07	27,56	41,63	34,38
0,4	11,54	40,46	24,29	40,78	36,59
0,5	10,61	38,38	21,60	40,05	37,63
0,7	9,73	39,57	20,22	39	41,44
1	8,86	42,15	20,00	37,77	44,85

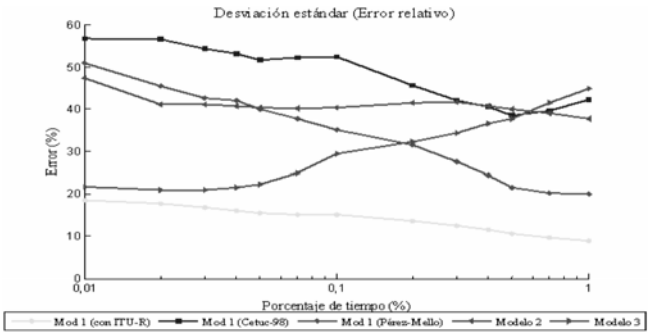


Fig. 19. Desviación estándar de errores (relativos)

5.4 Valor RMS de los errores

Finalmente, en la Tabla 8 y Fig. 20, se observa el bajo desempeño del Modelo 1 cuando las atenuaciones totales por lluvias son calculadas con los métodos ITU-R y CETUC-98. Para todos los porcentajes de tiempo, exceptuando entre 0,7% y 1%, el Modelo 3 presenta mejor desempeño que el Modelo 2. Entre 0,2% y 1% de tiempo, el comportamiento del Modelo 1, utilizando Pérez-Mello, es un tanto superior al Modelo 3.

Tabla 8. Valor RMS de los errores (relativos)

p (%)	Modelo 1 (con ITU-R)	Modelo 1 (con CETUC-98)	Modelo 1 (con Pérez-Mello)	Modelo 2	Modelo 3
0,01	39,19	64,26	50,95	47,69	22,02
0,02	42,79	67,36	45,40	41,81	21,04
0,03	44,46	68,92	42,70	41,51	21,08
0,04	45,74	73,24	42,72	40,95	21,63
0,05	46,80	74,65	40,92	40,4	22,31
0,07	48,61	79,93	39,22	40,18	25,01
0,1	50,93	81,23	35,99	40,7	29,89
0,2	56,43	76,55	31,65	43,27	33,21
0,3	60,04	67,62	28,24	44,61	35,70
0,4	62,71	58,88	29,24	44,68	38,09
0,5	65,23	50,89	32,42	44,14	38,84
0,7	68,78	47,31	37,51	43,35	42,34
1	72,81	45,15	44,84	41,38	45,17

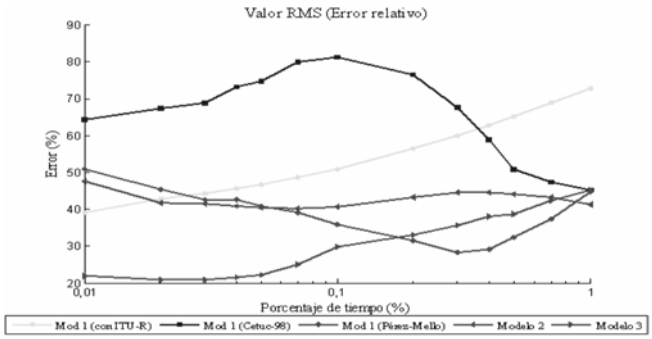


Fig. 20. Valor RMS de los errores (relativos)

6 Conclusiones

El nuevo modelo desarrollado en el presente artículo, Modelo 3, para la estimación de la atenuación diferencial por lluvias, supera las desventajas de modelos existentes en la literatura, especialmente las relacionadas con la dependencia de las atenuaciones totales por lluvias de los enlaces de cada par y el número de parámetros de ajuste de las expresiones matemáticas obtenidas. El modelo en cuestión contiene seis (6) parámetros de ajuste, cantidad menor a los contenidos en su antecesor Modelo 2, y bastante cercana a la recomendación de que el número de parámetros de ajuste, en lo posible, debe ser como máximo, igual al número de variables independientes (en este caso, 4), más uno (1).

Adicionalmente, el Modelo 3, presenta, de acuerdo al valor RMS de los errores (indicador estadístico que se constituye en el mejor parámetro de comparación en términos de los errores), desempeño superior al resto de los modelos existentes en la mayor parte del porcentaje del tiempo, específicamente para porcentajes de tiempo menores a 0,1%, para los cuales precisamente se requiere mayor precisión en la estimación de la atenuación diferencial por lluvias, debido a que los mismos corresponden a los considerados en la planificación y dimensionamiento de sistemas con alta disponibilidad (igual o mayor a 99,9%), que garantizan las creciente exigencia de los usuarios, en materia de calidad de servicio.

Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes (CDCHTA), de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, bajo el proyecto I-909-05-02-B.

Referencias

Capsoni C, Luini L, Paraboni A y Riva C, 2006, Potentiality of the SC EXCELL model in the prediction of rain attenuation, First European Conference on Conference on Antennas and Propagation, 2006 (EuCAP 2006), Nice, France, pp. 1-6.

Crane RK, 1980, Prediction of attenuation by rain, IEEE Transactions on Communications, Vol. 28, No. 9, pp. 1717-1733.

International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.530-13, 2009, Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.

International Telecommunication Union, 2009, Database – Study Group 5, disponible en http:// http://www.itu.int.

Pérez NA, 2003, Modelamento de efeitos de atenuação por chuvas em enlaces terrestres ponto-a-ponto e ponto-multiponto, Tesis Doctoral, PUC\Rio, Rio de Janeiro, Brasil.

Pérez NA, Silva LAR, 2004, Improved method for prediction of rain attenuation in terrestrial links, Electronics Letters, Vol. 40, No. 11, pp. 683-684.

Pérez NA, Silva LR y Pontes MS, 2005. Measurements and prediction of differential rain attenuation in convergent links, Electronics Letters, Vol. 41, No. 17, pp. 942-943.

Silva LR, Pontes MS, Souza RM, Perez NA, 2007, Prediction of rain attenuation in terrestrial links using full rainfall rate distribution, Electronics Letters, Vol. 43, No. 25, pp. 1442-1443.

Souza RM, 2006, Previsão de atenuação por chuvas através de uma modelagem semi-empírica consistente para enlaces rádio terrestres e via satélite, Tesis Doctoral, PUC\Rio, Rio de Janeiro, Brasil.

StatSoft, 2009, STATISTICA, disponible en http://www.statsoft.com

WEIBULL.COM, 2010, The Weibull distribution, disponible en http://www.weibull.com.