

Desempeño del Modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 en la Predicción de Pérdidas en Sistemas de Televisión Digital Abierta en Caracas (Venezuela) y Belém (Brasil)

Performance of Recommendation ITU-R
P.1812-3 Model in the Propagation Loss
Prediction for Digital Terrestrial Television
in Caracas (Venezuela) and Belem (Brazil)

Ángel Darío Pinto M.*

Universidad del Sinú (Colombia)

José Rafael Uzcátegui M.**

Nelson A. Pérez García***

José L. Aguilar****

Universidad de Los Andes, Núcleo Mérida (Venezuela)

Pedro V. Castellanos González*****

Universidade Federal Fluminense (Brasil)

* Ph.D. en Gerencia de Tecnología. Profesor Titular, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad del Sinú. anpima1@hotmail.com

** M.Sc. en Telecomunicaciones. Profesor Agregado, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes. joseu@ula.ve, joserum@gmail.com

*** Ph.D. em Engenharia Elétrica (área Eletromagnetismo Aplicado). Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes. perezn@ula.ve, nelsonp90@hotmail.com

**** Post-Ph.D. en Informática. Profesor Titular, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad de Los Andes. aguilar@ula.ve, aguilarjos@gmail.com

***** Ph.D. em Engenharia Elétrica (área Eletromagnetismo Aplicado). Profesor Adjunto. Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense. gcpedro@gmail.com, pvgonzalezc@hotmail.com

Correspondencia: José Rafael Uzcátegui M. Núcleo La Hechicera, Universidad de Los Andes, Edificio Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Ala Este, Piso 4. Mérida, Venezuela. Teléfono: +58 2742402891. joseu@ula.ve, joserum@gmail.com

Resumen

El éxito de la operación de un sistema de telecomunicaciones depende principalmente de una previa y adecuada planificación y dimensionamiento (PyD) del mismo; proceso que incluye la selección del modelo que permita predecir con la mayor precisión posible las pérdidas de propagación en el sistema, parámetro clave en la estimación de su cobertura. Para ello es necesario contar con mediciones locales que hagan posible determinar si uno o más de esos modelos estiman dicha cobertura con la deseada precisión. En el caso específico de la Televisión Digital Abierta (TDA), uno de los modelos de propagación de reciente publicación y que considera un significativo número de factores para la estimación en cuestión es el de la Recomendación ITU-R P.1812-3, cuya aplicación ha sido escasamente abordada en la literatura y menos aun para TDA. En este trabajo se evalúa el desempeño del referido modelo en la predicción de pérdidas de propagación arrojadas por sistemas TDA en las ciudades de Caracas (Venezuela) y Belém (Brasil); para lo cual se dispone de mediciones de campo realizadas en ambas localidades. Dicho desempeño es comparado con el arrojado por otros modelos de propagación mediante el MSE (*Mean Square Error*), con los que se ha obtenido mejores resultados especialmente en Caracas.

Palabras clave: Error medio cuadrático, modelos de propagación, Recomendación ITU-R P.1812-3, Televisión Digital Abierta.

Abstract

The successful operation of a telecommunication system depends mainly on a previous and suitable planning and dimensioning (P&D) of the same one. This process includes the selection of model to predict as accurately as possible the system propagation path loss, which is an imperative parameter in the estimation of his coverage. For the specific case of Digital Terrestrial Television (DTT), one of the more recently proposed propagation models considers a significant number of factors to estimate the losses, and it is the Recommendation ITU-R P.1812-3; however, its implementation has not been fully discussed in literature for regular broadcasting systems and even less for DTT. In this paper, the performance of above-mentioned model, for predicting propagation losses on DTT systems in the cities of Caracas (Venezuela) and Belem (Brazil), is evaluated by comparing model estimation results with field measurements realized in both localities. The performance is also compared with other propagation models by means of Mean Square Error (MSE). Results have shown that best results are obtained for the Caracas city.

Keywords: Digital Terrestrial Television (DTT), Mean Square Error, Propagation models, Recommendation ITU-R P.1812-3.

Fecha de recepción: 14 de octubre de 2015
Fecha de aceptación: 2 de mayo de 2016

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de Televisión Digital Abierta (TDA), también conocidos como sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT), ofrecen una serie de ventajas tales como una mejor calidad de audio y video, mayor capacidad de canales disponibles, mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico, recepción móvil, interactividad, entre otras [1]; lo cual ha motivado su creciente uso, especialmente como alternativa técnica y económicamente viable, de amplia penetración y cobertura, para la verdadera inclusión social y democratización de la información [2], [3].

En TDA y en los sistemas de telecomunicaciones en general, la correcta planificación y dimensionamiento (PyD) es crucial para garantizar un óptimo desempeño y operación de dichos sistemas una vez implantados. Uno de los aspectos importantes en ese proceso de PyD es el relacionado con segmento de propagación, principalmente en lo concerniente a la estimación de la cobertura del sistema de interés. Para ello se recurre a modelos de propagación que permiten estimar las pérdidas de propagación que experimentan las señales en su trayecto desde el transmisor hasta el receptor.

La precisión con la que esos modelos permiten estimar la cobertura en una zona depende directamente de la correlación que exista entre las características de propagación (clima, topología, morfología, orografía, entre otras) del ambiente en el cual se implementará el sistema objeto de planificación y dimensionamiento y también de las características de propagación bajo las que fueron desarrollados los modelos en cuestión [4]-[7].

El grado de imprecisión arrojado por un determinado modelo de propagación incrementa el porcentaje de sobredimensionamiento o subdimensionamiento del sistema [8]. En el primer caso, una de las principales consecuencias sería el uso de una mayor cantidad de equipos (transmisores, antenas, entre otros) que los realmente requeridos, lo cual impacta negativamente la inversión económica necesaria para el despliegue del sistema. En el segundo caso, el afectado sería el usuario, debido a que, por ejemplo, la cobertura real del sistema será inferior a la estimada.

En la literatura existen diversos modelos de propagación que se pueden aplicar en la planificación y dimensionamiento de los sistemas de TDA, siendo

uno de los más recientes el descrito en la Recomendación ITU-R P.1812-3 [9], que permite estimar las pérdidas de propagación para un determinado porcentaje ($p\%$) del tiempo promedio de un año y en un porcentaje ($p_L\%$) de las ubicaciones o localidades del receptor, en sistemas punto-área o punto-zona o punto-multipunto, en las bandas de frecuencia de 30 MHz a 3 GHz, recurriendo al análisis del perfil de los trayectos de interés.

La implementación del método descrito en la mencionada recomendación no resulta sencilla, y un procedimiento claro y sistematizado de los algoritmos de cálculo descritos en dicho modelo no ha sido reportado.

En este trabajo se muestra el procedimiento resumido para la aplicación del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 en la estimación de las pérdidas de propagación en las ciudades de Caracas (Venezuela) y Belém (Brasil). Adicionalmente, los resultados obtenidos son comparados con los arrojados a partir de mediciones de campo realizadas en ambas ciudades, así como con los estimados mediante el modelo de propagación descrito en la Recomendación ITU-R P.1546-5 [10] y el modelo de Okumura-Hata [11]. La comparación se realiza en términos del error medio cuadrático ($MSE = Mean Square Error$).

METODOLOGÍA

En primer lugar se hace una investigación exploratoria o bibliográfica para analizar los detalles de los modelos de propagación de las Recomendación ITU-R P.1812-3, Recomendación ITU-R P.1546-5 y Okumura-Hata. Seguidamente se procede a evaluar el desempeño de dichos modelos mediante la implementación de sus respectivos algoritmos de cálculo en una herramienta computacional [12]. Concretamente, se calculan las pérdidas de propagación para un conjunto de puntos geográficos en Caracas y Belém. En esos puntos previamente se realizan mediciones del nivel de señal recibido (Caracas) e intensidad de campo eléctrico recibido (Belém) sobre sistemas TDA. Los valores calculados mediante los modelos se comparan con los valores medidos.

Recomendación ITU-R P.1812-3

Tal como fue dicho anteriormente, el método descrito en la Recomendación ITU-RP.1812-3 [9] genera valores estimados de las pérdidas de propagación

y aplica a sistemas terrestres punto-área, en la banda de 30 MHz a 3 GHz, sobre trayectos de 250 m a 3000 km y con el transmisor y receptor ubicados hasta 3 km de altura sobre el suelo.

Los factores o elementos que considera el modelo para la estimación de la intensidad de campo eléctrico son:

- Situación de línea de vista (LOS = *Line of Sight*).
- Difracción.
- Dispersión troposférica.
- Propagación por ductos y reflexión/refracción en capas de la atmósfera.
- Variación por la ocupación del terreno.
- Variación por la ubicación del receptor.
- Penetración en edificios.

La aplicación del modelo en cuestión implica el cálculo de las pérdidas básicas de propagación para cada punto del área geográfica por considerar, tomando en cuenta los parámetros de entrada mostrados en la tabla 1 [9].

Adicionalmente se requiere información detallada del perfil del terreno para cada punto involucrado; por lo que resulta de gran interés contar con una base de datos digital sobre elevación del terreno versus distancia, para cada punto, que permita obtener [9]:

- d_i = distancia del transmisor al i -ésimo punto (km).
- h_i = altura sobre el nivel del mar del i -ésimo punto (m).
- $g_i = h_i$ + altura representativa de la ocupación del terreno en el i -ésimo punto (m).

Tabla 1. Parámetros de entrada para el modelo
de la Recomendación ITU-R P.1812-3

Parámetro	Descripción	Límites
f (GHz)	Frecuencia de operación	[0,03; 3]
p (%)	Porcentaje medio del tiempo anual en que se rebasa el nivel de señal calculado	[1; 50]
p_L (%)	Porcentaje de ubicaciones para las que se rebasa el nivel de señal calculado	[1; 99]
φ_t (°)	Latitud de la ubicación del transmisor	[-80; +80]
φ_r (°)	Latitud de la ubicación del receptor	[-80; +80]
Ψ_t (°)	Longitud de la ubicación del transmisor	[-180; +180]
Ψ_r (°)	Longitud de la ubicación del receptor.	[-180; +180]
h_{tg} (m)	Altura de la antena transmisora sobre el nivel del suelo	[1; 3000]
h_{rg} (m)	Altura de la antena receptora sobre el nivel del suelo	[1; 3000]

La incorporación de la altura de ocupación del terreno permite obtener una representación más detallada del perfil, para considerar los efectos de difracción y obstrucción ocasionados por obstáculos. En el caso de que no se disponga de información detallada, el valor de dicha ocupación de terreno puede considerarse de manera general para todo el trayecto, a partir de los valores indicados en la tabla 2 [9].

Tabla 2. Altura de ocupación del terreno para distintas zonas de servicio

Tipo de ocupación del suelo (equivalente a área de servicio)	Altura representativa de ocupación del terreno (m)
Agua o mar	0
Abierta o rural	0
Suburbana	10
Urbana o árboles o bosques	15
Urbana densa	20

El procedimiento de cálculo de las pérdidas de propagación a partir del mencionado método consiste, para cada punto considerado en la zona de interés, en [9]:

- Definición de las variables y parámetros relacionados con ubicación del receptor (interior o exterior), gradiente medio del índice de refracción (ΔN) y refractividad (N_o), tipo de zona radiometeorológica (tierra inte-

rior, tierra exterior o mar). Asimismo, previamente se deben calcular los parámetros que consideran los efectos de la propagación por ductos (β_0), radio efectivo de la Tierra y un conjunto de parámetros definidos a partir del perfil de terreno, tales como la distancia desde las antenas transmisora y receptora a sus respectivos horizontes (d_t y d_r), ángulo de elevación de la línea que une el transmisor y el receptor con respecto a sus horizontes (θ_t y θ_r), altura de la antena transmisora y receptora respecto al nivel del mar (h_{ts} y h_{rs}), entre otros.

- Cálculo de las pérdidas básicas de propagación para el $p\%$ del tiempo y el 50 % de las ubicaciones. Estas pérdidas consideran la propagación por línea directa, difracción, dispersión troposférica, propagación por ductos y capas, así como la combinación de estos mecanismos. La componente de las pérdidas básicas de propagación por línea incluye las pérdidas de propagación en el espacio libre (L_{bfs}) más un factor de corrección por trayectoria múltiple, E_s . La componente de las pérdidas básicas de propagación debida al fenómeno de difracción se calcula mediante el método denominado “delta-Bullington” [13], que combina el modelo de difracción de Bullington (difracción por múltiples obstáculos del tipo “filos de cuchillo”) y el modelo de difracción por tierra esférica.
- Determinación de: a) los factores de corrección de las pérdidas debido a la ocupación del suelo en los entornos de las antenas transmisora y receptora; b) el factor de corrección debido a la variabilidad de las ubicaciones del receptor; c) el factor de corrección debido a la penetración en edificios.
- Finalmente se calculan las pérdidas de transmisión no excedidas durante el $p\%$ del tiempo y el $p_L\%$ de las ubicaciones.

Es oportuno destacar que, para cualquier $p\%$, un p_L igual a 50 % y tomando en cuenta los efectos de las pérdidas por ocupación del suelo, las pérdidas de transmisión, L_{bc} , son dadas por [9]:

$$L_{bc} = L_{bu} + A_{ht} + A_{hr} \quad (1)$$

Donde

L_{bu} : Pérdidas de transmisión, en dB, no excedidas durante el $p\%$ del tiempo y el 50 % de las ubicaciones, sin considerar los efectos de la ocupación del suelo en las que están ubicados el transmisor y el receptor [9].

A_{ht} , A_{hr} : Pérdidas adicionales, en dB, debido a los entornos del transmisor y receptor [9].

En el caso de que p_L sea diferente al 50 %, a la ecuación (1) se le debe agregar una pérdida adicional producto de la pérdida por variabilidad de las ubicaciones. Un valor sugerido es 5,5 dB [9].

Asimismo, para ambientes interiores se deben sumar a la ecuación (1) las pérdidas por penetración en edificios, las cuales se pueden considerar que oscilan entre 9 y 11 dB [9].

Para el caso correspondiente a este artículo se considera p_L igual a 50 %, por lo que no existirá pérdida adicional por la variabilidad de las ubicaciones. Adicionalmente, la pérdida por penetración en edificios será considerada igual a cero (0), debido a que los puntos en los cuales se calcularán las pérdidas de propagación están en ambientes exteriores.

Recomendación ITU-R P.1546-5

La Recomendación ITU-R P.1546-5 [10] describe un método para la predicción de la intensidad de campo eléctrico para servicios punto-área, en la banda de frecuencias de 30 a 3000 MHz y para distancias entre transmisor y receptor de 1 a 1000 km.

En general, el mencionado modelo se basa en la interpolación de valores de intensidad de campo eléctrico, obtenidos a partir de curvas que representan dicha intensidad para una potencia radiada aparente (p.r.a.) de 1 kW, en función de diversos parámetros, tal como la altura de la antena transmisora, para los valores de frecuencia de operación de 100, 600, y 2000 MHz, y para porcentajes de tiempo de 1, 10 y 50 %.

Los parámetros de entrada necesarios para la aplicación del método de la Recomendación ITU-R P.1546-5 se resumen en la tabla 3 [10].

Tabla 3. Parámetros de entrada para el modelo
de la Recomendación ITU-R P.1546-5

Parámetro	Descripción	Límites
f (MHz)	Frecuencia de operación	[30; 3000]
d (km)	Longitud del trayecto	[1; 1000]
p (%)	Porcentaje de tiempo	[1; 50]
h_1 (m)	Altura de la antena transmisora/base. Se define según la longitud y tipo de trayecto (terrestre, marítimo)	[1; 3000]
h_2 (m)	Altura de la antena receptora/móvil	[1; 3000]
R_1 (m)	Ocupación del terreno en la ubicación del transmisor	Ninguno
R_2 (m)	Ocupación del terreno en la ubicación del receptor	Ninguno
Tipo de trayecto	Especifica el tipo de trayecto: terrestre, marítimo o mixto	-

El método consiste en determinar, para un valor específico de frecuencia, longitud de trayecto, porcentaje de tiempo excedido y tipo de trayecto, el valor (o los valores, en caso de requerirse interpolación) de la intensidad de campo eléctrico a partir de las curvas de intensidad de campo eléctrico recibido para una p.r.a de 1 kW. Posteriormente, y de ser necesario, se incluyen los factores de corrección para la altura de la antena receptora, ángulo de despeje del terreno, dispersión troposférica y variabilidad en las ubicaciones del receptor.

Una vez determinado el campo eléctrico, las pérdidas de propagación equivalentes, L , se calculan a través de [10]:

$$L(\text{dB}) = 139,3 - E + 20 \log(f) \quad (2)$$

Donde “E” es el campo eléctrico, en $\text{dB}\mu\text{V/m}$, determinado por la aplicación del modelo y “f” está dada en MHz.

Modelo de Okumura-Hata

Uno de los modelos más ampliamente utilizados en la predicción de la cobertura en sistemas de comunicaciones inalámbricos, incluyendo los sistemas de TDA, es el denominado modelo de Okumura-Hata, basado

en mediciones realizadas en la ciudad de Tokio para mejorar el modelo original desarrollado por Yoshihisa Okumura en 1968 [14].

La aplicación del modelo de Okumura-Hata consiste en el cálculo de las pérdidas de propagación, L_b , a partir de [11], [15], [16]:

$$L_b \text{ (dB)} = A + B \log(d) + C \quad (3)$$

$$A = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_1) - a(h_2) \quad (4)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log(h_1) \quad (5)$$

Donde

f : Frecuencia de operación, válida entre 150 y 1500 MHz.

d : Distancia entre transmisor y receptor, en kilómetros.

h_1 : Altura de la antena transmisora, en metros.

h_2 : Altura de la antena receptora, en metros.

$a(h_2)$: Factor de corrección que depende de la altura de la antena receptora, frecuencia y tipo de área de servicio

C : Factor de corrección que depende de la frecuencia y del entorno.

- Ciudades grandes:

$$a(h_2) = \begin{cases} 8,29[\log(1,54h_2)]^2 - 1,1, & f < 300 \text{ MHz} \\ 3,2[\log(11,75h_2)]^2 - 4,97, & f \geq 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad (6)$$
$$C = 0$$

- Ciudades medianas y pequeñas:

$$a(h_2) = [1,1 \log(f) - 0,7] h_2 - [1,56 \log(f) - 0,8] \quad (7)$$

$$C = 0$$

Para áreas suburbanas:

$$C = -2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 \quad (8)$$

Para áreas rurales o abiertas:

$$C = -4,78[\log(f)]^2 + 18,33\log(f) - 40,94 \quad (9)$$

Para áreas suburbanas y rurales, el valor de se calcula de la misma manera que para el caso de ciudades medianas y pequeñas de acuerdo con la expresión (7).

Una variación del modelo, conocida como Modelo COST231-Hata o modelo de Hata Extendido, permite ampliar el rango de frecuencias de aplicación del modelo Okumura-Hata de 1500 a 2000 MHz [11], [15].

Entorno de Evaluación

Las mediciones utilizadas para la comparación y evaluación de los modelos de propagación en cuestión forman parte de sendas campañas de mediciones realizadas en las ciudades señaladas, en sistemas reales de TDA. En el caso de Caracas, los estándares de TDA considerados fueron ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial*), DVB-T/H (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial/Handheld*) y DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*); mientras que en Belém las mediciones fueron llevadas a cabo en la versión mejorada de ISDB-T, conocida como ISDB-Tb (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Built In*).

En las figuras 1 y 2 se muestra la localización de algunos de los puntos de medición en Caracas y Belém, respectivamente.

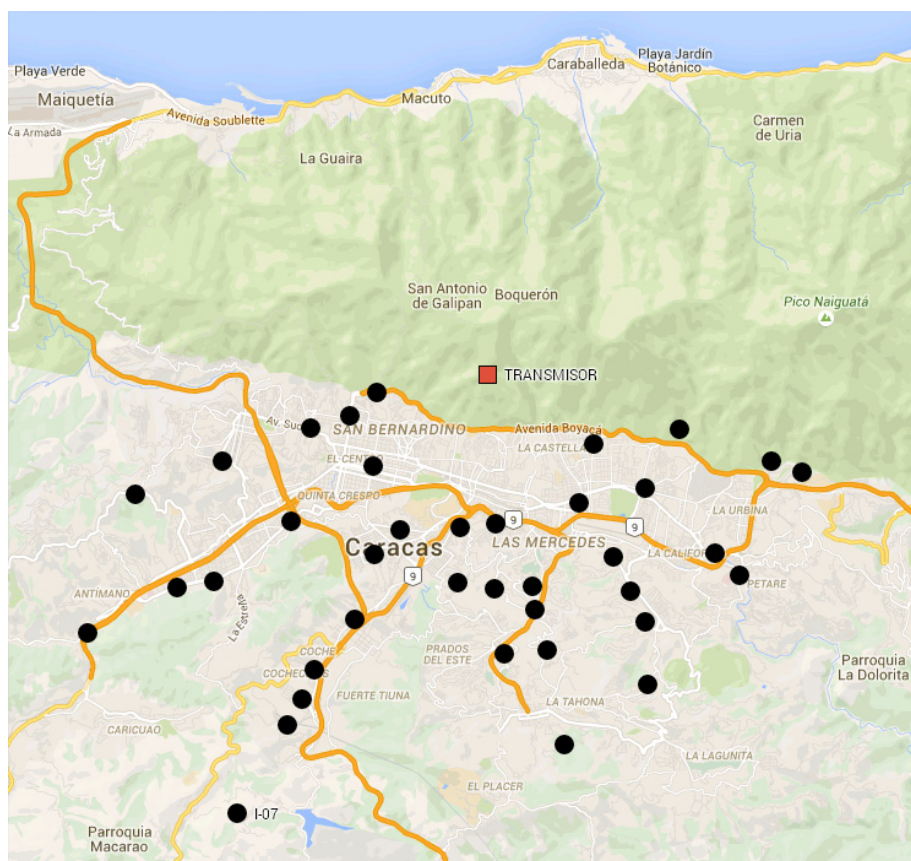


Figura 1. Ubicación de los puntos de medición en Caracas

Medidas realizadas en Caracas

Estas medidas forman parte de un conjunto de pruebas de desempeño en campo que fueron realizadas con los estándares ISDB-T, DVB-T/H y DTMB en Caracas [17]-[19], en las cuales se consideraron hasta tres (3) tipos de ambientes: exterior con recepción fija, exterior con recepción móvil e interior. Para el caso de este artículo interesan las mediciones realizadas del nivel de potencia recibida en ambientes exteriores con recepción fija.

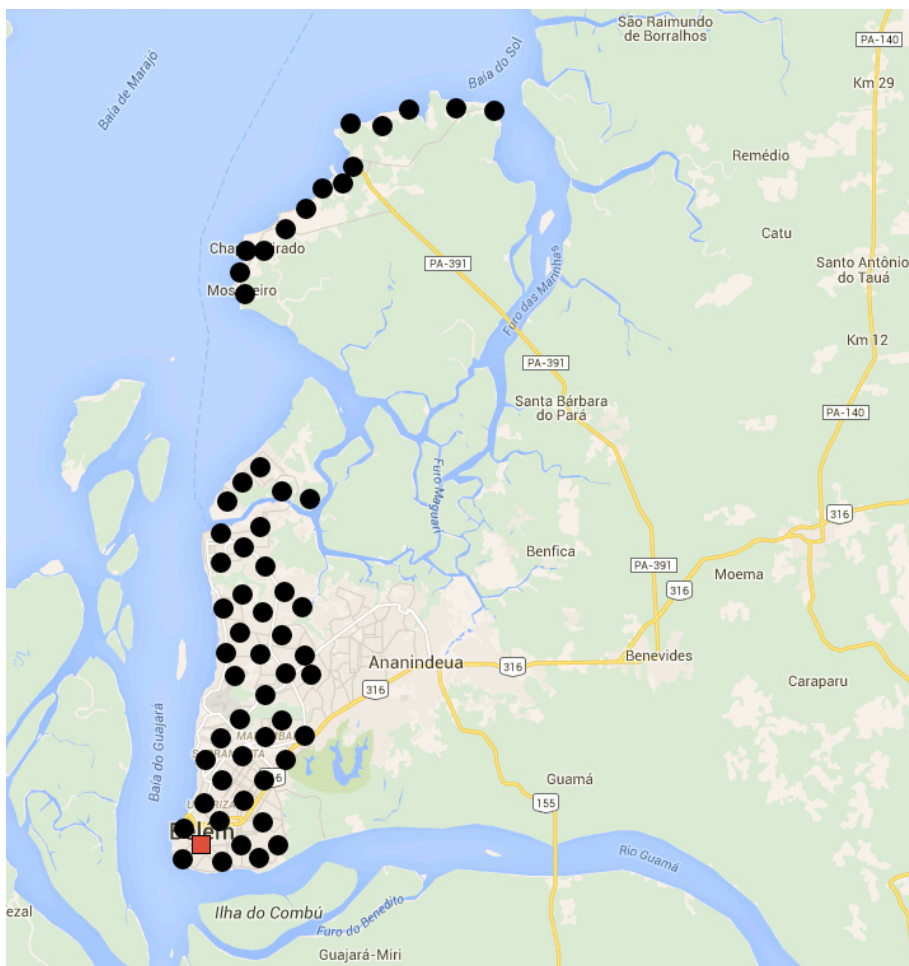


Figura 2. Ubicación de los puntos de medición en Belém

Para cada uno de los estándares se configuró un transmisor en el canal 48 UHF (*Ultra High Frequency*), centrado en 677 MHz. Adicionalmente, la potencia de transmisión fue de 500 W (57 dBm), alimentando un arreglo de antenas de 11,4 dBd (13,55 dBi) ubicado a una altura de 35 m sobre el nivel del suelo. Las pérdidas de alimentación fueron de 3,2 dB [17]-[19].

Como unidad receptora se utilizó una estación móvil con un mástil desplegable que permitió colocar la antena receptora a una altura de 10 m sobre

el nivel del suelo. La ganancia de la antena receptora fue de 15 dBd (17,15 dBi) [17]-[19].

Las distancias entre transmisor y receptor variaron desde 2 y 16 km.

Medidas realizadas en Belém

Estas medidas fueron obtenidas a partir de pruebas de campo realizadas sobre el sistema TDA operando en el canal 22 UHF (521 MHz). La potencia del transmisor fue de 6 kW, con una antena ubicada a 100 m sobre el nivel del suelo y ganancia de 8,95 dBd (11,1 dBi). En este caso, las pérdidas de alimentación fueron de 1,71 dB [19].

El receptor se ubicó en una estación móvil, utilizando una antena de 15 dBd (17,15 dBi) a 4 metros sobre el nivel del suelo.

Las distancias entre transmisor y receptor variaron desde 2 hasta 46 km.

RESULTADOS

A partir de los valores medidos del nivel de señal recibido (Caracas) e intensidad de campo eléctrico recibido (Belém) se calculó el valor de las pérdidas de propagación (medidas) a través de [19]:

$$L_b(\text{dB}) = \text{PIRE}(\text{dBm}) - P_r(\text{dBm}) \quad (10)$$

$$L_b(\text{dB}) = \text{PIRE}(\text{dBm}) - E\left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}\right) + 20 \log f(\text{GHz}) + 167,25 \quad (11)$$

Por su parte, para la implementación de los modelos de propagación de las Recomendaciones ITU-R P.1812-3 y P.1546-5, así como del modelo de Okumura-Hata, se consideraron los parámetros generales mostrados en las tablas 4 y 5 [19].

Tabla 4. Parámetros generales (caso Caracas)

Parámetro	Valor
Frecuencia (GHz)	0,677
p (%)	50
p_L (%)	50
φ_t (°)	10,52765
Ψ_t (°)	-66,87832
h_{lg} (m)	35
h_{rg} (m)	10
Ubicación del receptor	Exterior
Altura de la antena transmisora sobre el nivel del mar (m)	1773,6
ΔN	58
N_o	370
Zona radiometeorológica	A2 (tierra interior)

Tabla 5. Parámetros generales (caso Belém)

Parámetro	Valor
Frecuencia (GHz)	0,521
p (%)	50
p_L (%)	50 %
φ_t (°)	-1,46194
Ψ_t (°)	-48,49111
h_{lg} (m)	100
h_{rg} (m)	4
Ubicación del receptor	Exterior
Altura de la antena transmisora sobre el nivel del mar (m)	111,8
ΔN	64
N_o	378
Zona radiometeorológica	A1 (tierra costera)

En las figuras 3 y 4 se observan los resultados obtenidos para los valores estimados por medio de los modelos de propagación considerados, así como los valores correspondientes a las mediciones. Utilizando ajuste por mínimos cuadrados [20] se obtiene, para los modelos de propagación en cuestión y las mediciones, las ecuaciones de las líneas rectas de tendencia (pérdidas de propagación versus logaritmo de la distancia), mostradas en la tabla 6.

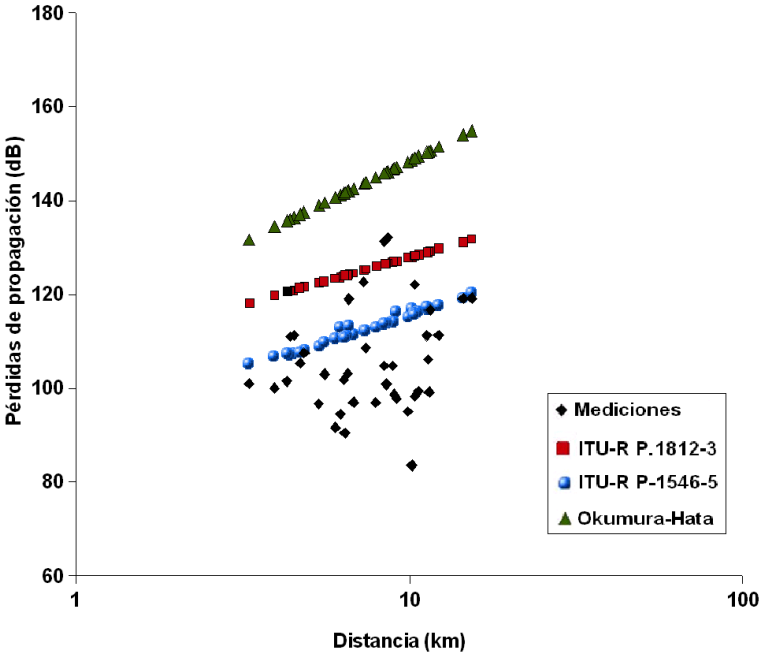


Figura 3. Pérdidas de propagación medidas y estimadas en Caracas

Tabla 6. Ecuaciones de las líneas rectas de tendencia L vs. d

	Caracas	Belém
Mediciones	$L = 14,73 \log(d) + 92,62$	$L = 36,33 \log(d) + 97,0$
ITU-R P.1812-3	$L = 20,27 \log(d) + 107,6$	$L = 21,67 \log(d) + 111,7$
ITU-R P.1546-5	$L = 23,20 \log(d) + 92,4$	$L = 42,71 \log(d) + 89,2$
Okumura-Hata	$L = 34,79 \log(d) + 113,6$	$L = 35,39 \log(d) + 105,8$

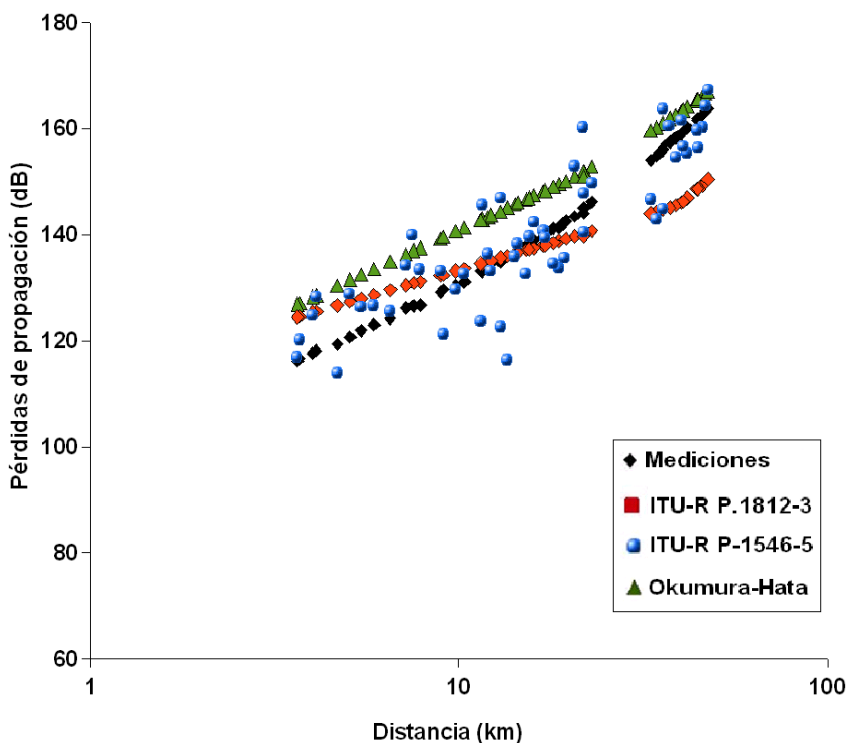


Figura 4. Pérdidas de propagación medidas y estimadas en Belém

En una primera impresión, de la figura 3 y la tabla 6 se puede observar que para el caso de Caracas, a pesar de que los valores estimados a través de la Recomendación ITU-R P.1546-5 están más próximos a los valores medidos, el modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 es el que presenta un exponente de pérdidas ($20,27/10 = 2,027$) menos alejado del exponente de pérdidas asociado a las medidas ($14/10,73 = 1,473$).

Por su parte, para el caso de Belém, la figura 4 muestra que aparentemente el modelo de propagación que más se aproxima a la tendencia de las medidas en términos del exponente de pérdidas es el de Okumura-Hata, con un exponente igual a 3,539, mientras que el de las medidas es de 3,633.

Es oportuno resaltar que el exponente de pérdidas menor a 2 obtenido en Caracas (tabla 6), que no es común para propagación en ambientes exteriores, puede ser debido a un comportamiento de propagación tipo “túnel”, en la

cual los efectos de las trayectorias múltiples causadas por las reflexiones en edificios asemejan las características de la propagación de ambientes interiores. Además, las variaciones entre los valores de distancias seleccionados para los puntos de medición respecto a la posición del transmisor son pequeñas, lo cual causa que los datos estén muy “agrupados” y el valor de la línea de tendencia no describa el comportamiento de las pérdidas de propagación fuera de ese rango [21].

Ahora bien, tal como fue dicho anteriormente, para una evaluación objetiva del desempeño de los modelos de propagación implementados, en relación con las mediciones, se recurre a la cuantificación del error existente entre los valores estimados y los valores medidos para cada modelo. Específicamente, se calculó el valor del error medio cuadrático ($MSE = Mean Square Error$) mediante [22]:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_{mi} - V_{ci})^2}{n - 1}} \quad (12)$$

Donde

V_m : Valor de pérdida de propagación medido en cada punto.

V_c : Valor de pérdida de propagación estimado en cada punto por el modelo de propagación.

N: Número de puntos de mediciones considerados.

En las tablas 7 y 8 se muestran los valores del MSE calculados para cada modelo de propagación en relación con las mediciones realizadas en Caracas y Belém, respectivamente.

Tabla 7. MSE para el caso de Caracas

	ITUR P.1812-3	ITU-R P.1546-5	Okumura-Hata
MSE (dB)	22,65	23,29	40,63

Tabla 8. MSE para el caso de Belém

	ITU-R P.1812-3	ITU-R P.1546-5	Okumura-Hata
MSE (dB)	9,08	7,27	10,49

De la tabla 7 se puede observar que para el caso de la ciudad de Caracas el modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 arroja un error ligeramente menor (2,75 %) que el obtenido con el modelo de la Recomendación ITU-R P.1546-5, así como un error 44,25 % menor a cuando se aplica el modelo de Okumura-Hata. Para Belém, los valores de la tabla 8 indican que el modelo con mejor desempeño es el de la Recomendación ITU-R P.1546-5, con un error de 19,93 % menor que el arrojado por modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 y 30,7 % menor que para el caso del modelo Okumura-Hata.

Empero, es importante resaltar que los valores del MSE obtenidos para los modelos de las recomendaciones ITU-R P.1812-3 e ITU-R P.1546-5, así como los obtenidos para el caso del modelo Okumura-Hata, para ambas ciudades, resultaron todos superiores a 6 dB, el cual es considerado como el valor mínimo aceptable para este tipo de error en el caso de modelos de propagación [22]. De ello se infiere que los tres modelos requieren ser ajustados u optimizados a fin de mejorar su respectivo desempeño cuando son implementados en ambientes como los de ambas ciudades.

CONCLUSIONES

Fue implementado el modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 para un conjunto de puntos geográficos en Caracas (Venezuela) y Belém (Brasil), en ambientes exteriores; ello con el fin de evaluar su desempeño en la estimación de las pérdidas de propagación en sistemas de Televisión Digital Abierta (TDA). Para ello se recurrió a mediciones de campo realizadas en dichos puntos, específicamente en lo que concierne al nivel de potencia recibido.

El desempeño, ante las mediciones realizadas, del método de la Recomendación ITU-R P.1812-3 también fue comparado con el mostrado por otros dos (2) modelos bastante utilizados en la predicción de pérdidas de propagación en sistemas TDA, como lo son el modelo de la Recomendación ITU-R P.1546-5 y el modelo de Okumura-Hata.

Los resultados, evaluados en términos del MSE, mostraron un ligero mejor desempeño de la Recomendación ITU-R P.1812-3 para el caso de Caracas, mientras que para Belém el mejor desempeño lo obtuvo el modelo de la Recomendación ITU-R P.1546-5.

Finalmente, dado que los valores de MSE resultantes de la aplicación de los tres (3) modelos fueron mayores a 6 dB, se infiere que dichos modelos deben ser ajustados u optimizados para mejorar su desempeño.

REFERENCIAS

- [1] J. J. Giménez, "Improved Spectrum Usage with Multi-RF Channel Aggregation Technologies for the Next-Generation Terrestrial Broadcasting". Ph.D. Thesis, Telecommunications Engineering, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2015.
- [2] E. Roppongi (). *ISDB-T Internacional: Aporte para la Democratización de Informaciones*, julio de 2007 (Online). Available : http://www.dibeg.org/news/previous_doc/0707_2seminar_in_Venezuela/presentation2.pdf
- [3] N. A. Pérez García and D. A. Paredes Marquina, "Interactividad de Impacto Social en Televisión Digital Abierta (TDA): Caso Venezuela", in *17ª Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA 2014)*, La Habana, Cuba, noviembre de 2014, pp. 1-12.
- [4] L. Azpilicueta *et al.*, "Analysis of Radio Wave Propagation for ISM 2.4 GHz Wireless Sensor Networks in Inhomogeneous Vegetation Environments", *Sensors*, vol. 14, n° 12, pp. 23650-23672, December 2014. doi: 10.3390/s141223650
- [5] M. Ekpenyong *et al.*, "Macrocellular Propagation Prediction for Wireless Communications in Urban Environments", *Journal of Computer Science & Technology*, vol. 10, n° 3, pp. 130-136, October 2010.
- [6] L. C. Fernandes and A. J. Martins Soares, "Simplified Characterization of the Urban Propagation Environment for Path Loss Calculation", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 24-27, March 2010. doi: 10.1109/LAWP.2010.2041523
- [7] A. Ghasemi *et al.*, *Propagation Engineering in Wireless Communications*. New York: Springer-Verlag, 2012. doi: 10.1007/978-1-4614-1077-5
- [8] N. A. Pérez García *et al.*, "Modelo de Propagación en las Ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia) para Redes WLAN, Operando en 2.4 GHz, en Ambientes Exteriores". *Revista Universidad, Ciencia y Tecnología*, UNEXPO-Puerto Ordaz, Venezuela, vol. 16, n° 62, p.p. 54-64, marzo 2012.

- [9] *A Path-specific Propagation Prediction Method for Point-to-area Terrestrial Services in the VHF and UHF Bands*, Recommendation ITU-R P.1812-3. Geneva, Switzerland, 2013.
- [10] *Method for Point-to-area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz*, Recommendation ITU-R P.1546-5. Geneva, Switzerland, 2013.
- [11] A. F. Molisch, *Wireless Communications*, 2^a ed. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2010.
- [12] OpenOffice.org (2015). *Apache OpenOffice Calc* (Online). Available: <https://www.openoffice.org/es/producto/calc.html>
- [13] P. Goktas, "Analysis and Implementation of Models for the Design of Fixed Terrestrial Point-to-point Terrestrial", M.Sc. Thesis, Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey, 2015.
- [14] N. Shabbir *et al.*, "Comparison of Radio Propagation Models for Long Term Evolution (LTE) Network", *International Journal of Next-Generation Networks*, vol. 3, n° 3, pp. 27-41, September 2011. doi: 10.5121/ijngn.2011.3303
- [15] European Commission. "COST Action 231. Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems". EUR 18957, 1999.
- [16] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2^a ed. United States: Prentice-Hall, 2002.
- [17] L. Duque and N.A. Pérez. "Informe Técnico sobre las Pruebas Comparativas de Desempeño en Campo de los Estándares para Televisión Digital Televisión Terrestre DVB-T, ISDB-T y DTMB". Comisión Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL), Caracas, Venezuela, Reporte técnico, julio de 2008.
- [18] N.A. Pérez García and L. Duque, "Desempeño en Ambiente Exterior, Recepción Fija, del Estándar DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast) en Pruebas de Campo realizadas en Caracas, Venezuela", in *17^a Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA 2014)*, La Habana, Cuba, noviembre de 2014, pp. 1-13.
- [19] J. R. Uzcátegui, "Implementación de la Recomendación ITU-R P.1812-3 para la Estimación de las Pérdidas de Propagación en Televisión Digital Abierta (TDA)". Tesis de Maestría en Telecomunicaciones, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2015.
- [20] S. J. Miller (2007). *The Method of Least Squares* (Online). Available: https://web.williams.edu/Mathematics/sjmiller/public_html/BrownClasses/54/handouts/MethodLeastSquares.pdf
- [21] P. Papazian *et al.*, "Flexible Interoperable Transceiver (FIT) Program Test Range I: Radio Propagation Measurements at 440, 1360, and 1920 MHz, Ed-

wards Air Force Base, CA". NTIA (National Telecommunications and Information Administration), Washington, D.C., Report 00-380, October 2000.

- [22] J. Wu and D. Yuan, "Propagation Measurements and Modeling in Jinan City", in *9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Boston, MA, USA, September 1998, pp. 1157-1160. doi: 10.1109/PIMRC.1998.731360