



Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico

Reinier Alonso Quintana¹, Raikel Bordón López² & Samuel Montejó Sánchez³

RESUMEN / ABSTRACT

Los modelos de propagación del canal inalámbrico resultan de gran importancia en el diseño de redes y sistemas, dada su gran diversidad, es necesario determinar los modelos más eficaces para cada entorno. En este artículo se evalúa el desempeño de una selección de modelos de propagación en ambientes urbanos y suburbanos. Se determina el impacto de la altura de la estación base sobre las predicciones de los modelos, destacándose la sensibilidad de aquellos que incluyen información detallada del entorno en su formulación. Finalmente, son comparadas las predicciones de los modelos evaluados con mediciones reales, resultando el Hata y el Walfisch-Ikegami como los modelos más precisos para su aplicabilidad en estos entornos.

Palabras claves: modelos de propagación, pérdida de trayecto, modelo de Hata, modelo Walfisch-Bertoni, modelo SUI, modelo de Ericsson, modelo Walfisch-Ikegami.

Wireless channel propagation models are very important in network and systems design, because of its great diversity, it is necessary to determine the most effective models for each environment. This paper presents a performance evaluation of a set of propagation models in urban and suburban environments. The impact of the base station height on model predictions is determined, highlighting the sensitivity of those that include detailed environment information in its formulation. Finally, the predictions of the evaluated models are compared with actual measurements, being Hata and Walfisch-Ikegami identified as the most accurate models for its applicability in these environments.

Keywords: *propagation models, path loss, Hata model, Walfisch-Bertoni model, SUI model, Ericsson model, Walfisch-Ikegami model.*

Comparative study of wireless channel propagation models.

INTRODUCCIÓN

El dimensionamiento de redes de comunicaciones inalámbricas es hoy en día una actividad que requiere de rapidez y efectividad dada la relevancia de las aplicaciones y servicios soportados por estas redes. Con el fin de agilizar el proceso de diseño y realizarlos de una manera eficiente son empleados los modelos predictivos de las pérdidas de trayecto, tópico de investigación abordado con énfasis, dada su aplicabilidad y versatilidad. Estos modelos representan una gran diversidad en cuanto a la exactitud, nivel de información geográfica y topográfica requerida, costo computacional y el tipo de algoritmo que emplean para obtener las predicciones. Las mediciones experimentales resultan costosas en términos de tiempo y recursos en la medida que son mayores el área de cobertura y la precisión deseada, este hecho refuerza la amplia utilización y aceptación de estos modelos.

Debido al rápido crecimiento de las redes inalámbricas los operadores desarrollan herramientas que permiten la valoración del medio a partir de modelos de propagación en unión con bases de datos de información geográfica lo que conlleva al aumento de la complejidad de los mismos y la cantidad de parámetros del medio que consideran. En este sentido ¹ y ² realizan un profundo análisis de algunos modelos y proponen herramientas propietarias.

Los modelos de propagación pueden clasificarse como empíricos, debido a que caracterizan el comportamiento de la señal a partir de un modelo matemático; deterministas, ya que se basan en el análisis de las leyes del electromagnetismo para la descripción de la onda en un punto determinado del espacio; y estocásticos, los cuales modelan el fenómeno a partir de una serie de variables aleatorias lo que provoca grandes inexactitudes en sus resultados, aunque requieren poca información³.

Dada la efectividad de los modelos de propagación en sus predicciones y su relativa sencillez computacional, son múltiples y diversas las investigaciones que se basan en los mismos, en ⁴ y ⁵ se comparan, con resultados reales, los principales modelos en entornos suburbano y urbano utilizando la banda de frecuencia de WiMAX a 2.5 GHz y 3.5 GHz. En ⁶ se realiza una comparación entre múltiples modelos con resultados experimentales obtenidos en el borde del área de cobertura de una red WiMAX a 3.5 GHz en entornos urbanos, suburbanos y rurales, y se analiza como varían las dimensiones del área de cobertura predicha en función del modelo empleado. En ³ se realiza un exhaustivo análisis valorativo de los principales modelos de propagación en diferentes entornos y para tres alturas de la antena de la estación móvil en la banda de 3.5 GHz de una red WiMAX. En ⁷ se realiza un estudio de la efectividad de los modelos de propagación en la localización de terminales móviles en ambientes urbanos, suburbanos y rurales, el estudio se basó en los modelos Okumura-Hata, para ambientes rurales y suburbanos y en el modelo Walfisch-Ikegami para ambiente urbano, la valoración de la exactitud de la predicción de dichos modelos se fundamentó en la correlación de los resultados con una base de datos de mediciones reales. En ⁸ se realiza la validación de una selección de modelos para su aplicación en sistemas inalámbricos de acceso fijo en la banda de 3.5 GHz.

Debido a la importancia de determinar con exactitud las pérdidas en los sistemas de radiocomunicaciones se desarrollan nuevos modelos predictivos y su efectividad se compara comúnmente con los resultados obtenidos con modelos de propagación bien conocidos, en relación con este aspecto en ⁹ se propone un nuevo modelo basado en redes neuronales y compara el mismo con los resultados obtenidos a partir del modelo Walfisch-Bertoni.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis comparativo del desempeño de múltiples modelos empíricos utilizados en macroceldas en el rango de frecuencia de 850–1000 MHz, por su relevancia en las comunicaciones móviles. La validación del empleo de cada modelo se realizará a través de la comparación de las predicciones en ambientes urbanos y suburbanos con resultados experimentales obtenidos a la frecuencia de 914,2 MHz.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera. En la Sección 2 son descritos los modelos de propagación que se evalúan. En la Sección 3 son realizados experimentos para validar la aplicación de los modelos en el rango de frecuencia establecido y son discutidos los resultados obtenidos. Por último en la Sección 4 son abordadas las principales conclusiones de la investigación.

METODOLOGÍA

La mayoría de los modelos de propagación basan sus resultados de pérdidas de trayecto en tres fenómenos fundamentales, la reflexión, difracción, y dispersión ¹⁰.

Una onda electromagnética sufre una reflexión cuando encuentra en su trayecto un obstáculo de dimensiones mucho mayores que su longitud de onda. Una señal puede reflejarse en múltiples objetos originando ondas reflejadas que pueden sumarse constructiva o destructivamente en el receptor. Generalmente ocurre a partir de la superficie terrestre, edificios y paredes.

La difracción se produce cuando el trayecto entre el transmisor y el receptor está obstaculizado por superficies afiladas, esto genera frentes de onda secundarios. Este mecanismo explica la propagación de la señal en sistemas sin línea de vista.

La dispersión ocurre cuando en el trayecto de la onda existen objetos pequeños comparados con la longitud de onda de la señal y su agrupación espacial es muy densa.

La dispersión surge también por la presencia de superficies rugosas y objetos de pequeñas dimensiones.

Estos fenómenos son la causa de afectaciones severas a la propagación de la señal, en la medida que aumenta la densidad de estructuras entre transmisor y receptor, originando la propagación multitrayecto y consigo el desvanecimiento. Lo cual puede ocasionar cambios rápidos en la potencia de la señal en cortos intervalos de tiempo o distancia, aparición de ecos en la señal debido a componentes con diferentes retrasos y modulaciones aleatorias de frecuencia.

Modelo de Okumura-Hata

Este modelo de pérdidas está basado en las mediciones obtenidas por Okumura en una ciudad de Japón. Generalmente es utilizado para sistemas móviles de macroceldas, en los cuales la distancia entre el móvil y la estación base oscila entre 1 y 20 kilómetros¹¹. La expresión de pérdidas de este modelo depende de la frecuencia de operación del sistema, la altura de las antenas y la distancia entre la estación base y el terminal móvil. Define expresiones para cuatro ambientes diferentes, urbano denso y medio, suburbano y rural. La ecuación general de pérdidas, L_{urb} (dB), para ambiente urbano es la siguiente:

$$L_{urb} = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log(h_{te})) \log(d), \quad (1)$$

donde f_c (MHz) es la frecuencia de operación, h_{te} (m) es la altura de la antena transmisora, d es la distancia entre la estación base y el móvil y $a(h_{re})$ es el factor de corrección de la antena receptora. El cálculo de este factor depende de la densidad del entorno, siendo su expresión para un entorno urbano denso:

$$a(h_{re}) = \begin{cases} 3.2 \log(11.45 h_{re})^2 - 4.97 & f_c > 300 \\ 8.29 \log(1.54 h_{re})^2 - 1.1 & f_c \leq 300 \end{cases} \quad (2)$$

y para un entorno urbano medio:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log(f_c) - 0.7) h_{re} - (1.56 \log(f_c) - 0.8) \quad 150 \leq f_c \leq 1500. \quad (3)$$

Si el análisis es realizado en ambientes suburbanos la ecuación de pérdidas L (dB) es:

$$L = L_{urb} - 2 \left(\log \left(\frac{f_c}{28} \right) \right)^2 - 5.4. \quad (4)$$

Para entorno rural:

$$L = L_{urb} - 4.78 (\log(f_c))^2 - 18.33 \log(f_c) - 40.98. \quad (5)$$

Modelo Walfisch-Bertoni

Este modelo fue propuesto por Joram Walfisch y Henri Bertoni, tiene cuenta las pérdidas producidas debido a la altura de los edificios y la propagación sobre las azoteas, es un modelo que no considera LOS entre transmisor y receptor, utiliza el fenómeno de la difracción para describir las pérdidas a nivel de la calle no toma en consideración para el cálculo de las pérdidas el aporte de los rayos que penetran en los edificios y los caminos de múltiples difracciones. La separación entre los edificios debe ser menor que su altura y están organizados en filas paralelas, en su expresión toma en cuenta que la altura de la antena de la estación base debe estar por encima del nivel medio de los edificios. El rango de frecuencias en que es aplicable este modelo es de 300 Mhz a 3 GHz, con separación entre transmisor y receptor de 200 a 5000 metros y la antena de la estación base por encima de las azoteas¹².

La expresión de pérdidas totales L_t (dB) de este modelo depende de tres tipos de pérdidas, las pérdidas de espacio libre, por propagación sobre los edificios y por difracción en el camino final:

$$L_t = L_o + L_{ex} \quad (6)$$

$$L_o = 32.4 + 20\log(f_c) + 20\log(R) \quad (7)$$

$$L_{ex} = 57.1 + A + \log(f_c) + 18\log(R) - 18\log(h_{te} - h) - 18\log(1 - R^2/17(h_{te} - h)) \quad (8)$$

$$A = 5\log\left[\frac{b^2}{2} + (h - h_{re})^2\right] - 9\log(b) + 20\log[\tan^{-1}(2(h - h_{re})/2)] \quad (9)$$

Donde L_o (dB) son las pérdidas de espacio libre, L_{ex} (dB) es el término que combina las pérdidas por difracción y de propagación sobre los edificios, f_c (MHz) es la frecuencia de operación, R (km) es la distancia entre las antenas, b (m) es la separación media de los edificios de centro a centro y h_{re} (m), h_{te} (m) y h (m) son las alturas del receptor, la estación base y la media de los edificios respectivamente.

Modelo SUI

Modelo Stanford University Interim (SUI) derivado del Hata, con correcciones para frecuencias por encima de 1900MHz. Incluye el exponente de pérdidas de trayecto γ , propone tres tipos de terreno diferentes, urbano, suburbano y rural³.

La altura de la antena de la estación base propuesta está entre 10 y 80 metros, la del móvil de 2 a 10 metros y la extensión de la célula de 0.1 a 8 Km³.

Las expresiones de este modelo:

$$L = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h \text{ para } d > d_0 \quad (10)$$

$$A = 20\log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad \gamma = a - b h_{te} + \frac{c}{h_{te}} \quad (11)$$

$$X_f = 6.0\log\left(\frac{f_c}{2000}\right) \quad (12)$$

$$X_h = -10.8\log\left(\frac{h_{re}}{2000}\right) \text{ para urbano y suburbano} \quad (13)$$

$$X_h = -20\log\left(\frac{h_{re}}{2000}\right) \text{ para rural} \quad (14)$$

Donde d (m) es la distancia entre el móvil y la estación base, d_0 es igual a 100 metros, X_f (dB) es un factor de corrección de frecuencia por encima de 2000 MHz, X_h (dB) es el factor de corrección de la altura de la antena receptora y f_c (MHz) es la frecuencia de operación. Los factores a, b, c dependen del tipo de entorno⁵:

Cuadro 1. Coeficientes del exponente de pérdidas de trayecto. Modelo SUL.

Factor	Urbano	Suburbano	Rural
a	4.6	4.0	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

Modelo de Ericsson

Basado también en el modelo Okumura-Hata, utilizado como software por la compañía Ericsson para el dimensionamiento de redes³. Sus expresiones son¹³:

$$L = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_{te}) + a_3 \log(h_{te}) \log(d) - 3.2 \log((11.75h_{re})^2) + g(f_c) \quad (15)$$

$$g(f_c) = 44.9 \log(f_c) - 4.78(\log(f_c))^2 \quad (16)$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de los factores a_0, a_1, a_2 y a_3 ¹³.

Cuadro 2. Coeficientes de la expresión de pérdidas. Modelo de Ericsson.

Factor	Urbano	Suburbano	Rural
a_0	36.2	43.20	45.95
a_1	30.2	68.93	100.6
a_2	-12.0	-12.0	-12.0
a_3	0.1	0.1	0.1

Modelo Walfisch-Ikegami (Cost-231)

Es resultado de la combinación de los modelos de Ikegami y Walfisch-Bertoni. La expresión que describe al Walfisch-Ikegami está compuesta por tres términos, las pérdidas por espacio libre, las pérdidas por difracción y dispersión desde las azoteas hasta nivel de la calle y las pérdidas por difracciones en múltiples pantallas. Este modelo toma en cuenta factores que obvian la mayoría de los modelos empíricos como son el ángulo de incidencia del rayo directo respecto a la calle y los factores de corrección para las pérdidas por difracción¹⁴. Las pérdidas totales de este modelo se hallan según la expresión:

$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{mds}, & L_{rts} + L_{mds} > 0 \\ L_0, & L_{rts} + L_{mds} \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

Pérdidas por espacio libre L_0 (dB):

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(d) + 20 \log(f_c) \quad (18)$$

Pérdidas azotea – nivel de la calle L_{rts} (dB):

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log(f_c) + 20 \log(\Delta h_m) + L_{ori}, \quad (19)$$

donde w (m) es el ancho de la calle, Δh_m (m) es la diferencia entre la altura media de los edificios y la altura de la antena del móvil, L_{ori} define las pérdidas debidas al ángulo de incidencia del rayo directo respecto a la calle:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\emptyset & 0^\circ \leq \emptyset < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\emptyset - 35^\circ) & 35^\circ \leq \emptyset < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\emptyset - 55^\circ) & 55^\circ \leq \emptyset < 90^\circ \end{cases}, \quad (20)$$

donde \emptyset es el ángulo de incidencia respecto a la calle.

Las pérdidas por difracción en múltiples pantallas L_{msd} (dB)son calculadas como:

$$L_{msd} = L_{hte} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f_c) - 9 \log(b). \quad (21)$$

En esta expresión b (m) es la distancia centro a centro entre los edificios, d (km) es la separación entre transmisor y receptor, L_{hte} (dB) son las pérdidas debido a la altura de la antena de la estación basey k_a (dB) representa el incremento de las pérdidas para las estaciones base que están por debajo de las azoteas de los edificios adyacentes:

$$L_{hte} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{te}), & h_{te} > h_{roof} \\ 0, & h_{te} \leq h_{roof} \end{cases}, \quad (22)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_{te} > h_{roof} \\ 54 - 0.8\Delta h_{te} & d \geq 0.5 \text{ y } h_{te} \leq h_{roof} \\ 54 - 1.6\Delta h_{te} & d < 0.5 \text{ y } h_{te} \leq h_{roof} \end{cases}, \quad (23)$$

donde $\Delta h_{te} = h_{te} - h_{roof}$, h_{te} (m) es la altura de la estación base y h_{roof} (m) es la altura media de las edificaciones del entorno. El término k_d (dB)está relacionado con el control de la dependencia entre las pérdidas por difracción en múltiples pantallas y la distancia, mientras que el término k_f (dB)controla la dependencia de dichas pérdidas con la frecuencia de operación.

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_{te} > h_{roof} \\ 18 - 15 \left(\frac{\Delta h_{te}}{h_{roof}} \right), & h_{te} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (23)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right), & \text{suburbano} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right), & \text{urbano} \end{cases} \quad (24)$$

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Las consideraciones abordadas en esta sección, son importantes para el dimensionamiento de área de cobertura a partir de predicciones de modelos de propagación, pues la extensión de la misma puede variar considerablemente en dependencia del modelo utilizado. En aplicaciones de localización de terminales móviles se pueden obtener errores considerables respecto a la posición real del dispositivo si no se emplea el modelo que más se ajusta al tipo de entorno y no son ajustadas acertadamente las variables del entorno y el sistema de comunicación, como frecuencia de operación, la distancia entre transmisor y receptor y las alturas reales de las antenas.

Pérdidas en ambiente urbano

Las simulaciones de los experimentos se realizaron considerando variaciones de la distancia entre la estación base y el móvil de 100 a 5000 m, para la implementación de los cinco modelos descritos en la Sección 2, se asumió la altura de la antena transmisora en 32 m y son consideradas alturas de las antenas móviles en 2 y 7.5 m, con valores de frecuencia de 850 y 1000 MHz. Se tomó como separación media de las edificaciones para ambientes urbanos 30 metros y se asumió como la mitad de este valor el ancho de las calles. Estos valores son asignados para los modelos que toman en cuenta las características específicas de cada entorno y son valores recomendados en ¹⁴ para el modelo Walfisch-Ikegami, para estudios basados en un área genérica de datos no conocidos; asimismo el ángulo de la calle que se asumió para el modelo Cost-231 fue de 90°.

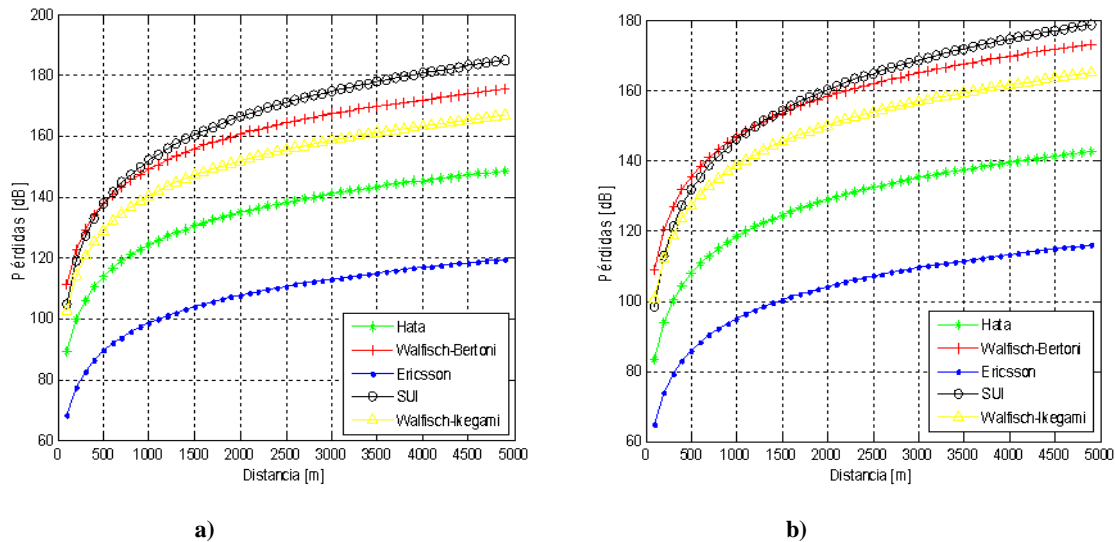


Figura 1. Pérdidas para 850 MHz. Altura de la antena del móvil (a) 2 m, (b) 7.5 m.

En el análisis de las figuras 1a y 1b se puede apreciar que las pérdidas más bajas se obtienen con el modelo de Ericsson. Los modelos que predicen las mayores pérdidas son los modelos SUI y Walfisch-Bertoni. En la figura 1a, con altura de la antena del móvil de 2 m, la predicción de ambos modelos coincide hasta los 750 m aproximadamente. En la figura 1b, cuando la antena del móvil tiene una altura de 7.5 m, las predicciones coinciden en el intervalo de 1000 a 1750 m. La curva de predicciones de pérdidas del modelo SUI con valores tan elevados se debe a que su rango de aplicación comienza en los 1900 MHz y en este caso se utiliza para un valor de frecuencia inferior. Es evidente también que al aumentar la altura de la antena móvil receptora disminuyen las pérdidas. Se puede notar además en la figura 1 que las pérdidas en los primeros 1000 m crecen abruptamente, debido a que estas son proporcionales al logaritmo de la distancia entre transmisor y receptor. La diferencia que existe en este sentido entre los modelos de predicción, es el aumento de las pérdidas entre puntos consecutivos que brindan los mismos.

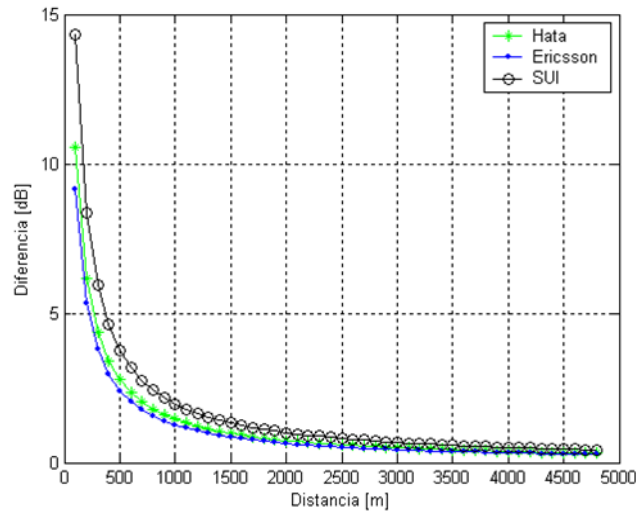
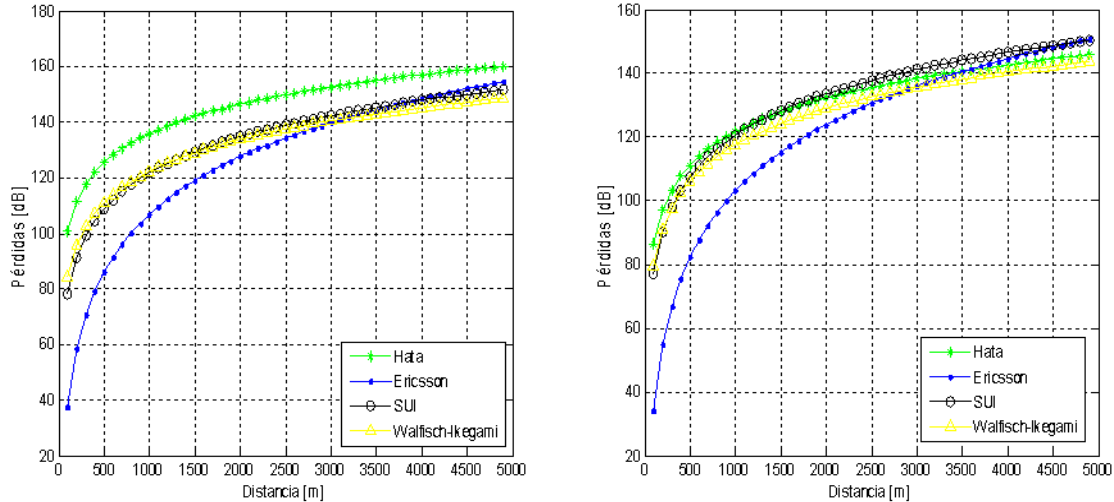


Figura 2. Diferencia de predicción entre puntos consecutivos. Antena del móvil de 7.5 m.

En la figura 2 se muestran las diferencias entre las predicciones de los puntos consecutivos, en este caso el modelo SUI tiene una diferencia en el primer par de puntos de alrededor de 15 dB, mientras que la diferencia en los modelos Ericsson y Hata es de aproximadamente 10 dB; a partir de los 1000m la diferencia entre puntos consecutivos para los tres modelos es menor de 0.7 dB.

Pérdidas en ambiente suburbano.

Para las simulaciones de los modelos empíricos de predicción en entornos suburbanos, se tuvieron en cuenta los mismos intervalos de frecuencia, distancia y alturas de las antenas que en el caso del entorno urbano. Para el modelo Walfisch-Ikegami se fijó la altura de las edificaciones en 12 m y se matuvo el ángulo de la calle en 90°.



a) b)
Figura 3. Pérdidas para 1000 MHz. Altura de la antena del móvil (a) 2 m, (b) 7.5 m.

En la figura 3 se observa que para un ambiente suburbano como el descrito, las estimaciones de los modelos se comportan de manera menos dispersa respecto al entorno urbano. Para estas simulaciones no se tomó en cuenta el modelo Walfisch-Bertoni debido que considera entornos urbanos densos.

Según los resultados de los experimentos, para un entorno de este tipo el comportamiento de la dispersión entre los modelos disminuye medida que aumenta la distancia. Este comportamiento es inverso al hallado en el entorno urbano, donde la dispersión en la predicción de los modelos decrece para las distancias menores. En la comparación de las gráficas se observa que el modelo de mayor contraste de un entorno a otro es el SUI.

En la figura 4 se muestran las diferencias de predicción de pérdidas entre puntos consecutivos para tres modelos. Para el entorno suburbano los modelos SUI y Hata tienen comportamientos muy similares a partir de los 300m. El modelo Ericsson muestra diferencias superiores a los 5 dB para los 5 primeros puntos, los cuales están por debajo de los 500 metros, y su curva tanto en la figura 4 como en la figura 3 se acerca a las de los otros modelos a partir de los 2500 metros, con diferencias menores de 0.6 dB en las gráficas de la figura 4.

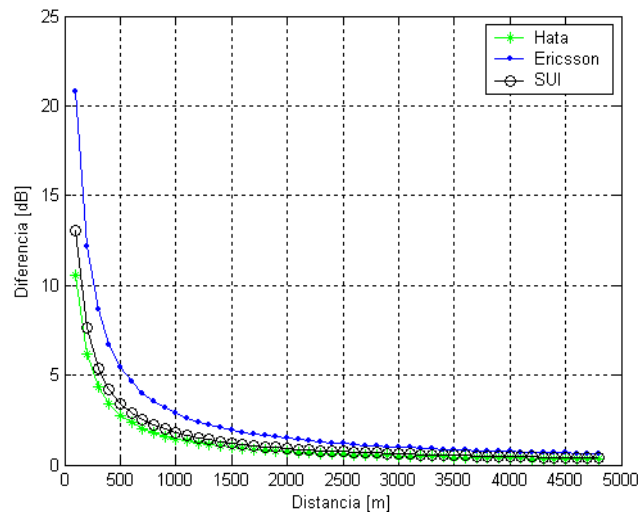


Figura 4. Diferencia de predicción entre puntos consecutivos

Familias de curvas de rango de dispersión de la predicción.

Para la simulación del rango de predicción se tomaron en cuenta las distancias entre la antena de la estación móvil y de la estación base de 1000 hasta 5000m y se evaluaron las frecuencias desde 850 hasta 1000 MHz. Las figuras de esta sección representan la diferencia máxima de predicción entre los modelos utilizados para cada tipo de entorno.

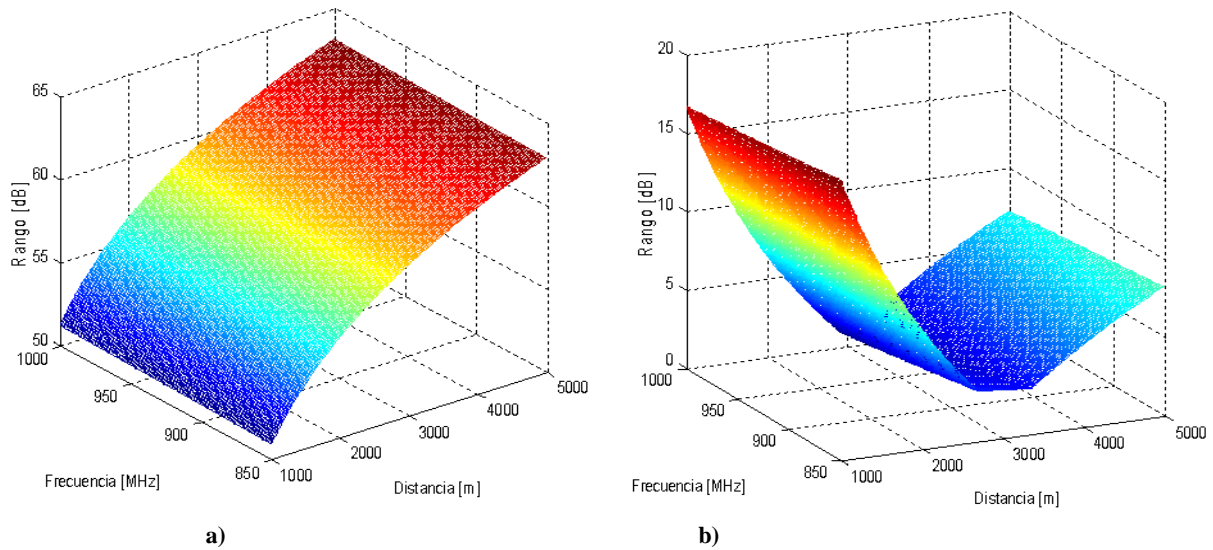


Figura 5. Familia de curvas del rango de predicción.(a) Ambiente urbano, (b) Ambiente suburbano.

En las figuras 5a y 5b, que muestran la concordancia de predicción de los modelos de propagación, para una altura de la antena receptora de 7.5 metros, se aprecia que los modelos de pérdidas de trayecto tienen una mejor concordancia para las predicciones en ambientes suburbanos que para entornos urbanos.

Cuadro 3. Valores de rango de predicción. 900 MHz.

Entorno	1000m	2000m	3000m	4000m	5000m
Urbano[dB]	51.431	56.59	59.36	61.82	62.51
Suburbano [dB]	17.26	7.2	2.52	4.75	7.78

Altura de la estación base.

En esta sección se evaluó la influencia que tiene el término de altura de la antena de la estación base en la determinación de las pérdidas totales, para esto se evaluaron las mismas desde 30 hasta 50 m de altura; dichos valores permiten considerar todos los modelos utilizados con anterioridad.

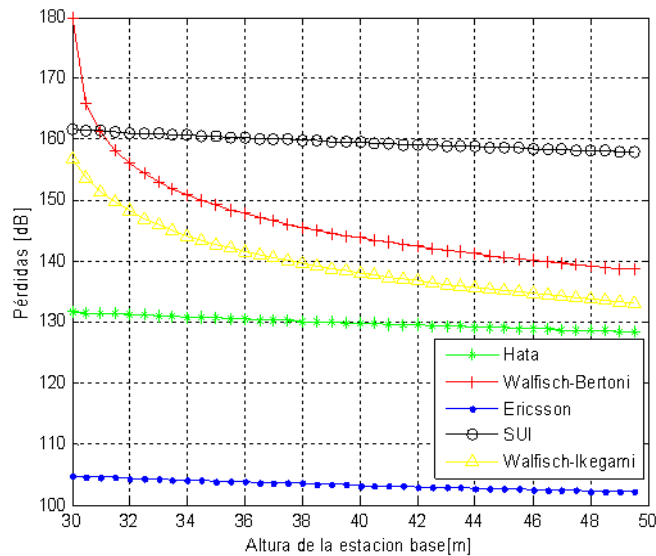


Figura 6. Pérdidas para 1500 m,900 MHz. Ambiente urbano.

En la figura 6, es posible observar que la variación máxima corresponde a los modelos Walfisch-Ikegami y Walfisch-Bertoni, los cuales tienen un cambio de predicción de alrededor de 25 dB y 40 dB respectivamente en todo el rango evaluado y que los que menos afectan su predicción, son los modelos de Hata, SUI y Ericsson. El comportamiento observado en los primeros modelos mencionados (Walfisch-Bertoni, Walfisch-Ikegami) se debe a que para realizar la predicción, a diferencia de los otros (Hata, SUI, Ericsson), en la expresión de dichos modelos se considera la altura media de las estructuras.

Comparación con mediciones reales.

Como parte de la valoración al comportamiento y confiabilidad de los diferentes modelos, se tomaron como base las mediciones realizadas por Turkka y Renfors¹⁵, en ambientes rurales y suburbanos de una región de Finlandia.

En las simulaciones no se tomó en cuenta el modelo de Walfisch-Bertoni debido a que considera que la altura de la antena debe ser mayor que la altura media de los edificios, y las mediciones fueron realizadas a partir de una estación base con antena de altura de 1.5 m y antena móvil de 1.5 m. Es necesario apuntar que para estos experimentos no se consideró el límite que imponen los modelos para las alturas de las antenas, por lo tanto la predicción de los mismos se puede ver afectada por esta omisión, pero lo consideramos provechoso debido a que permite comparar los diferentes modelos con mediciones reales.

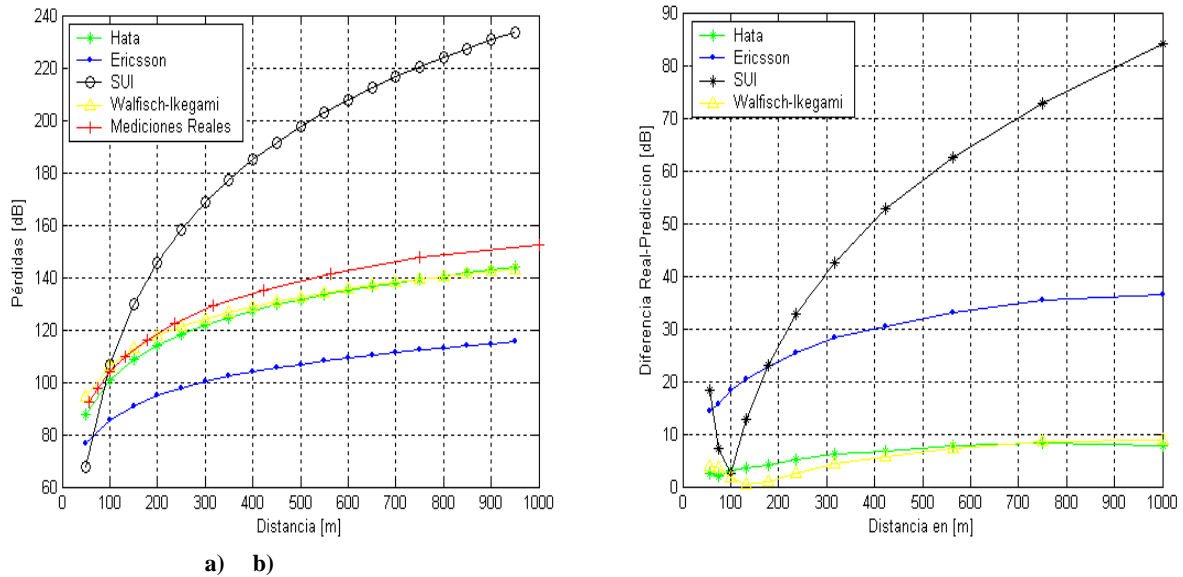


Figura 7. Comparación de modelos con valores reales ambiente urbano. (a) Pérdidas, (b) Diferencia entre los modelos y datos reales.

Para el experimento en el entorno urbano, mostrado en las figuras 7a y 7b, se obtienen los mejores resultados con los modelos Walfisch-Ikegami y Hata, cuyas predicciones en todo el intervalo de distancias se mantienen inferiores a 10 dB de diferencia respecto los valores reales. Cuando la separación entre la estación base y el móvil es inferior a los 700 m, el modelo Walfisch-Ikegami, brinda la mejor predicción, cuando se sobrepasa dicha separación es el modelo de Hata el que tiene mejores predicciones, aunque en todo el intervalo evaluado, con ambos modelos se obtienen resultados similares. A partir de los modelos SUI y Ericsson no se obtienen buenas predicciones, con valores por encima de 15 dB de diferencia en el 81.8% de los puntos evaluados.

Nuevamente en las figuras 8a y 8b se aprecia como para el caso del entorno suburbano los modelos de Hata y Walfisch-Ikegami fueron los más acertados, debido a que continúan teniendo diferencias menores 10 dB. Hasta los primeros 400 m de separación el modelo de Hata posee las predicciones más cercanas, después de superar esa distancia entre estación base y móvil el modelo Walfisch-Ikegami tiene mejor exactitud. Como aspecto contrastante, la predicción del modelo de Ericsson mejora a medida que aumenta la separación entre las antenas, aunque nunca se encuentra por debajo de los 20 dB de diferencia, nuevamente este modelo junto al SUI brindan los peores resultados, con el 86.36% de los puntos de predicción por encima de los 20 dB de diferencia.

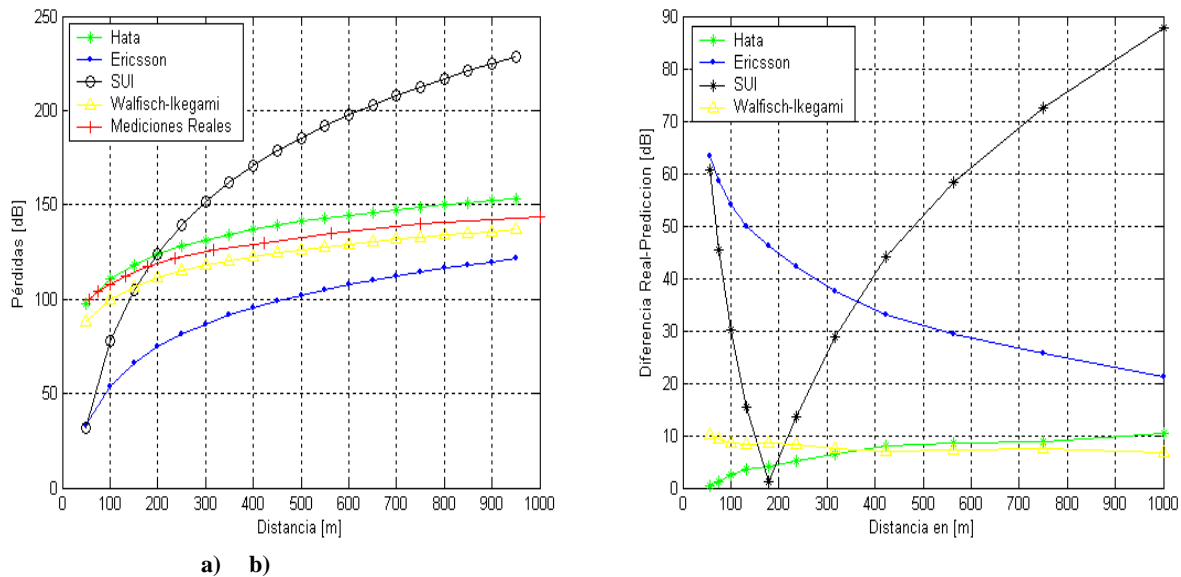


Figura 8. Comparación de modelos con valores reales ambiente suburbano. (a) Pérdidas, (b) Diferencia entre los modelos y datos reales.

En este experimento se demuestra una característica importante de los modelos de predicción, que es su gran flexibilidad ante numerosos tipos de escenarios. Como resultado de estos experimentos se puede afirmar que en las aplicaciones en las cuales no se posean informaciones precisas sobre el entorno en cuanto a sus características topográficas, es el modelo de Hata el más adecuado, y en el caso de poseer dichos datos entonces el modelo más efectivo es el Walfisch-Ikegami.

CONCLUSIONES

Al evaluar la diferencia máxima de predicción entre los modelos escogidos en la investigación, se demostró que para ambientes urbanos las predicciones realizadas por los modelos poseen una mayor dispersión que las realizadas para entornos suburbanos. Tomando en consideración el término de la altura de la antena de la estación base, en el rango de 30 a 50 m de altura, se encontró que los modelos de Walfisch-Bertoni y Walfisch-Ikegami sufren cambios del orden de 40 dB y 25 dB, respectivamente. Para este análisis los otros modelos no presentaron cambios superiores a los 5 dB. Por lo que se evidencian los modelos que toman en cuenta las condiciones del entorno como más sensibles y confiables ante variaciones de la altura de la estación base.

Como resultado de la comparación con mediciones reales en ambientes urbanos y suburbanos, con los modelos Hata y Walfisch-Ikegami se obtuvieron diferencias de predicción menores a los 10 dB, mientras que con los otros modelos más del 80% de las predicciones presentan diferencias por encima de los 15 dB y 20 dB en entornos urbanos y suburbanos, respectivamente. Por tanto son los modelos Hata y Walfisch-Ikegami los más efectivos para estos entornos en la banda de 900 MHz.

Futuras investigaciones deben estar enfocadas en realizar campañas de mediciones en entornos locales con características de urbanización diferente para valorar la exactitud de los modelos de propagación y determinar su aplicabilidad en función de las condiciones específicas de cada región, con lo cual las tareas de redimensionamiento e implementación de nuevos servicios en las redes móviles poseerán una mayor fiabilidad. Además, tomando como base dichas mediciones se pueden combinar los modelos con bases de datos de información geográfica (SIG) para optimizar sus resultados y mejorar la planeación y distribución de los recursos.

REFERENCIAS

1. **DIAZ SALVADOR SERGI.** “Diseño y desarrollo de una aplicación en ArcGis del modelo de propagación COST 3231” Universidad Politécnica de Cataluña, 25 Jun. 2010.
2. **GALVIS QUINTERO ALEXANDER, GOMEZ SANTAMARIA CRISTINA, HINCAPIE REYES ROBERTO C.** “Modelos de canal inalámbricos y su aplicación al diseño de redes WiMAX”. Universidad Pontificia de Medellín, Nov. 2006.
3. **SHAHJAHAN MOHAMMAD, HES-SHAFI ABDULLA.** “Analysis of Propagation Models for WiMAX at 3.5 GHz”. Blekinge Institute of Technology, Sept 2009.
4. **VATALARO FRANCESCO, PETRACCA MARCO, DURANTINI ANNALISA, VARI MARCO.** “Outdoor Path Loss Measurements of WiMAX at 2.5 GHz in Suburban Environment” 4th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). 2011.
5. **MILANOVIC JOSIP, RIMAC-DRLJE SNJEZANA, BEJUK KRUNOSLAV** “Comparison of Propagation Models Accuracy for WiMAX on 3.5 GHz” 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, ICECS. 2007.
6. **ALSHAMI MOHAMMED, ARSLAN TUGHRUL, THOMPSON JOHN, ERDOGAN AHMET.** “Evaluation of Path Loss Models in WiMAX Cell-edge” The University of Edinburgh, School of Engineering. 4th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). 2011.
7. **ZIMMERMANN D., BAUMANN J., LAYH A., LANDSTORFER F., HOPPE R., WOLFE G.** “Database correlation for positioning of mobile terminals in cellular networks using wave propagation models” IEEE 60th Vehicular Technology Conference. VTC2004-Fall. 2004.
8. **ABHAYAWARDHANA V.S., WASSELL I.J., CROSBY D., SELLARS M.P., BROWN M.G.** “Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems” IEEE 61st Vehicular Technology Conference. VTC. 2005.
9. **ERBAY DALKILIC TURKAN, HANCI BERNA YESIM, APEYDIN AYSEN.** “Fuzzy adaptive neural network approach to path loss prediction in urban areas at GSM-900 band”. Turk J. ElecEng&CcompSci, Vol. 18, No. 6, 2010.
10. **RAPPAPORT THEODORE S.** *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed Prentice Hall pp.70-72, 110-122, 2005.
11. **HATA M.** “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile radio Services” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-29. Sept 1981.
12. **WAGERMARKS ALEXANDRE, IBARZ BORJA.** “Modelos de propagación electromagnética: Propagación en entorno urbano”. URJC, Oct 2007.
13. **SIMI I.S, STANI I., ZIRNI B.** “Minimax LS Algorithm for Automatic Propagation Model Tuning”, Proceeding of the 9th Telecommunications Forum (TELFOR 2001), Belgrade. Nov. 2001.
14. **EUROPEAN CO-OPERATION IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH (COST).** “Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems”. Cost-231 Final Report.
15. **TURKKA J., RENFORS M.** “Path Loss Measurement for a Non-Line-of-Sight Mobile-to-Mobile Environment”, 8th International Conference on ITS Telecommunications. 2008

Autores:

Reinier Alonso Quintana: Ing. Investigador colaborador de la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba.
raquintana@uclv.edu.cu

Raikel Bordón López: Ing. Investigador colaborador de la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba.
rbardon@uclv.edu.cu

Samuel Montejo Sánchez: MSc. Profesor Asistente de la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba.
montejo@uclv.edu.cu