

# Evaluación de modelos de propagación de canal inalámbrico

**Raikel Bordón López**

Correo electrónico:rbordon@uclv.edu.cu

**Artículo Original**

**Reinier Alonso Quintana**

Correo electrónico:raquintana@uclv.edu.cu

**Samuel Montejo Sánchez**

Correo electrónico:montejo@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Villa Clara, Cuba

## Resumen

En el diseño de sistemas de radiocomunicaciones, la modelación del canal inalámbrico es una alternativa eficiente para predecir las pérdidas de trayecto. En este artículo se presenta un estudio comparativo entre los modelos de propagación de Okumura, Hata, Walfisch-Bertoni y Walfisch-Ikegami. Se describe una herramienta de software implementada con el propósito de permitir la ejecución y evaluación de dichos modelos a través de una interfaz gráfica. El objetivo principal es analizar y comparar las predicciones de las pérdidas de trayecto, considerando distintas condiciones del entorno y límites de validez comunes. Los resultados obtenidos muestran una notable convergencia de los modelos semiempíricos y empíricos abordados cuando existe correspondencia entre el tipo de entorno y el valor del parámetro asumido. Los modelos de Walfisch-Bertoni y Walfisch-Ikegami permiten obtener los resultados más cercanos a las mediciones experimentales.

Palabras clave: difracción, dispersión, modelo de propagación, pérdidas de trayecto, reflexión

Recibido: 28 de septiembre del 2011

Aprobado: 12 de diciembre del 2011

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las características de propagación radioeléctrica es esencial en la etapa de diseño de un sistema de comunicaciones inalámbricas cuando se pretende estimar las localizaciones óptimas de las estaciones base para conseguir altas razones de transmisión y mayor área de cobertura. [1] Las mediciones experimentales pueden proveer resultados muy precisos, pero en la medida en que mayor sea el área de cobertura y la precisión deseada su utilización resulta de elevado costo en términos de tiempo y tecnología. Una alternativa factible por la rapidez de su implementación es la simulación basada en modelos de canal inalámbrico para estimar los parámetros del sistema.

El desarrollo de modelos de propagación adecuados a las necesidades de las nuevas tecnologías inalámbricas y su disponibilidad a través de herramientas de simulación cobra cada vez más importancia en el diseño e implementación de redes inalámbricas. En la actualidad existe una gran variedad de modelos que difieren en el rango de aplicabilidad, en cuanto

a bandas de frecuencias, características del entorno, movilidad de los usuarios y otros parámetros del sistema de transmisión.

El estudio de la propagación de las ondas de radio puede hacerse analíticamente empleando las ecuaciones de Maxwell, determinando las soluciones compatibles con las condiciones de contorno impuestas. Debido a que un análisis por esta vía resulta complejo, en la práctica se utilizan modelos deterministas basados en óptica geométrica y modelos empíricos basados en mediciones reales, o una combinación de ambos. [2]

La precisión de los resultados obtenidos al aplicar modelos basados en óptica geométrica es proporcional al nivel de detalle en la información disponible sobre la topografía del terreno. Cuando se desea estudiar la radiopropagación en un entorno para el cual es difícil la obtención de las características detalladas del mismo, resulta más práctico el empleo de modelos empíricos. Los modelos deterministas pueden, en ciertas condiciones, proporcionar predicciones

más acordes a la realidad, pero a cambio de un costo computacional elevado. Los modelos empíricos se basan en mediciones llevadas a cabo en entornos específicos, para parámetros de transmisión y recepción de datos. Una combinación de ambos enfoques, adecuada a requerimientos específicos, puede resultar en un mejoramiento de la precisión, el rango de aplicabilidad y/o la eficiencia computacional. [3]

El estudio teórico de los modelos de propagación y su comparación con mediciones reales en una variedad de entornos permite evaluar su correcta aplicación en función de sus limitaciones, el escenario y los requerimientos del sistema. En [4] y [5] los autores realizan una valoración de la exactitud de algunos de los modelos más usados en redes WiMAX sobre la base de una comparación entre la atenuación medida y la predicha por los modelos, para redes en la bandas de 3,5 GHz y 2,5 GHz, respectivamente. En [1] se presenta una revisión de varios modelos donde se discuten sus ventajas y desventajas para la propagación en entornos abiertos y cerrados.

Una descripción de diversos modelos empíricos y modelos deterministas fundamentados en técnicas de trazado de rayos puede encontrarse en [6]. Con el empleo de métodos basados en el trazado de rayos se logra una exactitud elevada, el precio a pagar es un incremento considerable en la complejidad de los algoritmos y un tiempo de cálculo elevado. Los modelos de propagación encuentran aplicación no solo en el diseño de sistemas de radiocomunicaciones, en [7] se usan modelos de propagación para el posicionamiento de terminales móviles en redes celulares a través de correlaciones entre bases de datos creadas a partir de estos modelos y las mediciones de las pérdidas.

El presente artículo tiene dos objetivos fundamentales. En primer lugar, se presenta la evaluación y comparación con resultados experimentales de cuatro modelos de propagación: los modelos empíricos de Okumura y Hata, y los modelos semiempíricos de Walfisch-Bertoni y COST 231 Walfisch-Ikegami. En segundo lugar, se describe una herramienta de software que se diseñó e implementó con el propósito de facilitar el estudio del comportamiento de dichos modelos ante la variación de parámetros como: la frecuencia, la distancia y las alturas de las antenas, para diferentes tipos de entorno (ciudades grandes, pequeñas y zonas suburbanas).

## PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA PROPAGACIÓN

### Mecanismos de propagación

En la propagación de una onda radioeléctrica intervienen diversos y complejos fenómenos físicos, entre los cuales se destacan por su influencia, la reflexión, la difracción y la dispersión [8], representados en la figura 1.

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. El resultado depende de varios factores como la polarización de la onda, el ángulo de incidencia y las características del material reflector (como dieléctrico o conductor perfecto). [9]

La difracción se produce cuando existe una obstrucción de un objeto de bordes bien definidos entre la antena transmisora y la receptora, dando lugar a la formación de frentes de ondas secundarios. Este mecanismo puede explicarse a partir del principio de Huygens [10] y partiendo de él se puede comprender cómo es posible la propagación de la señal en condiciones sin línea de vista.

La dispersión ocurre cuando la onda se propaga en un medio con una alta densidad de obstáculos de dimensiones del orden de la longitud de onda o menores. Se origina sobre la base de un principio físico similar al de la difracción, pero dando lugar a un esparcimiento mayor de la energía de la señal radioeléctrica. [9]

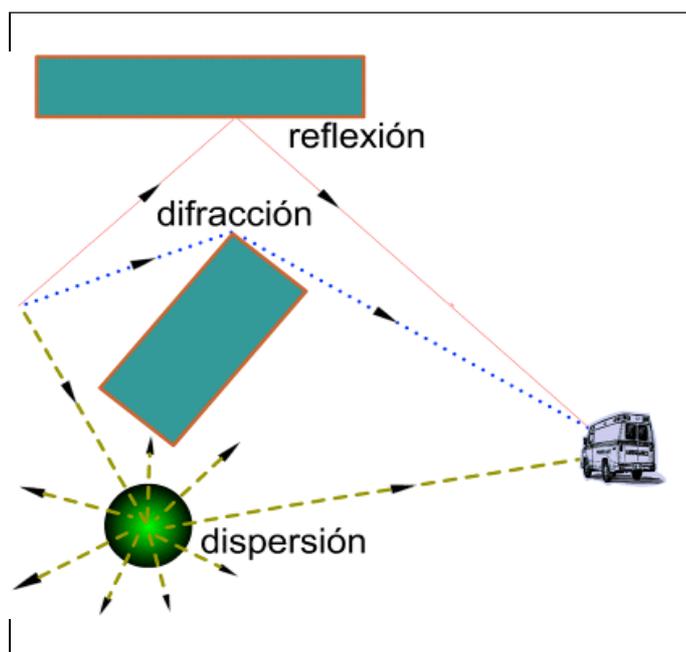


Fig. 1. Mecanismos básicos de propagación.

### Afectaciones al canal inalámbrico

Los fenómenos anteriormente descritos producen afectaciones al canal inalámbrico que pueden caracterizarse por las pérdidas de trayecto y los desvanecimientos [11]. Los desvanecimientos causan variaciones rápidas en la envolvente de la señal recibida y pueden clasificarse según su profundidad (magnitud), duración, característica espectral, mecanismo de producción (fenómeno que lo origina), distribución probabilística y dependencia temporal. [2] La modelación de los desvanecimientos se realiza mediante distribuciones probabilísticas como las de Rice, Rayleigh y Gauss.

### Pérdida de trayecto

La pérdida de trayecto se define como la razón entre la potencia de transmisión,  $P_t$ , y la potencia recibida,  $P_r$ , según la siguiente ecuación:

$$L(dB) = 10 \log(P_t / P_r) \quad (1)$$

Para condiciones de espacio libre, la potencia recibida por una antena de ganancia  $G_r$ , separada una distancia  $d$  de la antena transmisora de ganancia  $G_t$ , puede determinarse según la ecuación de espacio libre de Friis [9]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L_a} \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda y  $L_a$  es el factor de pérdidas del sistema no relacionadas con la propagación ( $L_a > 1$ ). Se define entonces la pérdida de espacio libre como:

$$L_b(dB) = 32,45 + 20 \log f + 20 \log d \quad (3)$$

Siendo la frecuencia de operación  $f$  que se expresa en MHz y la distancia  $d$  en kilómetros. En un entorno de radiocomunicaciones móviles en ambientes urbanos sería erróneo considerar solo las pérdidas de espacio libre, ya que la atenuación de la señal en estos casos no depende de la frecuencia y la distancia únicamente, sino también de las alturas de las antenas transmisoras y receptoras, y de características específicas del entorno. [10]

## MODELOS DE PROPAGACIÓN

### Modelo de Okumura

El modelo de Okumura [12] proporciona un método empírico para el cálculo de las pérdidas de propagación en entornos urbanos. Fue desarrollado a partir de mediciones llevadas a cabo en Japón, de las cuales se obtuvieron curvas de la atenuación media relativas a las pérdidas de espacio libre en función de la frecuencia y la distancia entre el móvil y la estación base. El valor medio de las pérdidas de propagación según este modelo puede estimarse como:

$$L(dB) = L_b + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{area} \quad (4)$$

Donde  $A_{mu}$  es la atenuación media relativa a las pérdidas de espacio libre,  $G(h_{te})$  y  $G(h_{re})$  son los factores de ganancia de las antenas de la estación base y el móvil, respectivamente;  $G_{area}$  es un factor de corrección que depende del entorno y es diferente de cero para entornos rurales, suburbanos y suburbanos densos. Los valores de  $A_{mu}$  y  $G_{area}$  se determinan por curvas experimentales como las mostradas en las figuras 2 y 3, respectivamente;  $G(h_{te})$  y  $G(h_{re})$  pueden hallarse a partir de otras curvas de corrección o calcularse usando las aproximaciones siguientes:

$$G(h_{te}) = 20 \log(h_{te} / 200), \quad 30 \text{ m} \leq h_{te} \leq 1000 \text{ m} \quad (5)$$

$$G(h_{re}) = \begin{cases} 10 \log(h_{re} / 3), & h_{re} \leq 3 \text{ m} \\ 20 \log(h_{re} / 3), & 3 \text{ m} < h_{re} \leq 10 \text{ m} \end{cases} \quad (6)$$

Es posible además incluir en los cálculos correcciones debidas a varios factores como la ondulación del terreno, su homogeneidad y pendiente media, la presencia de obstáculos, disposición de las calles y densidad de las construcciones en zonas urbanas. El modelo es aplicable en un rango de frecuencias de 150 a 1 920 MHz, para alturas de las antenas transmisoras entre 30 y 1 000 m. Las distancias pueden variar de 1 a 100 km y la altura de la antena del móvil debe estar entre 3 y 10 m. [6] El modelo de Okumura es considerado uno de los más simples y eficaces en términos de precisión para sistemas celulares en entornos de naturaleza irregular. [9] Su efectividad es mayor cuando se aplica para ciudades densas de edificios altos, como aquellas en las que se realizaron las mediciones que dieron origen al modelo.

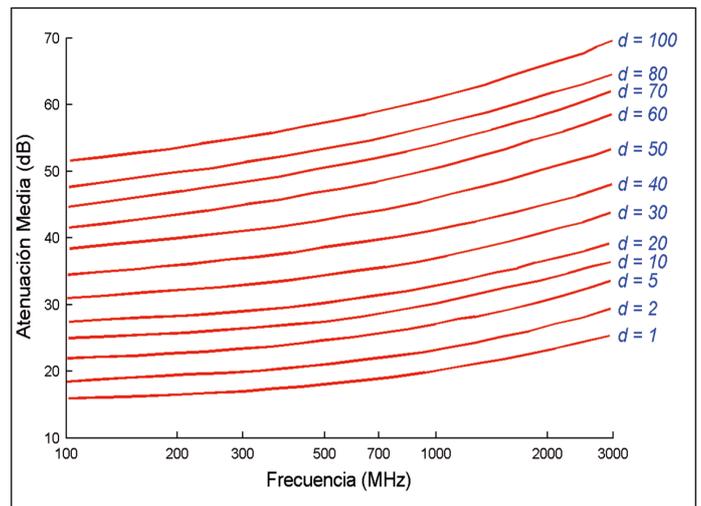


Fig. 2. Curvas del modelo de Okumura para la atenuación media.

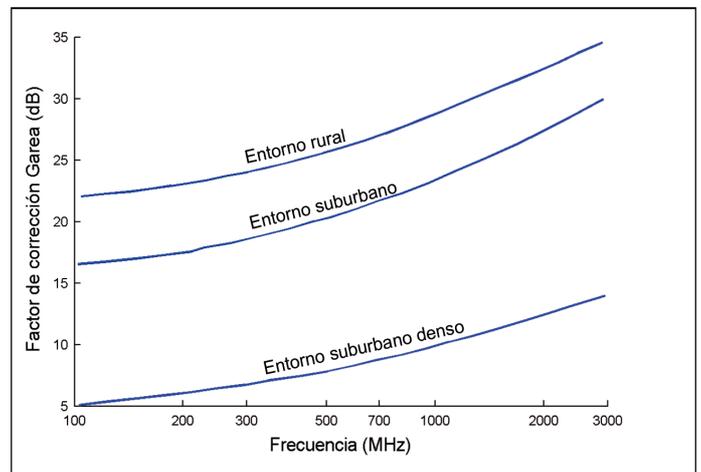


Fig. 3. Factor de corrección dependiente del entorno para el modelo de Okumura.

### Modelo de Hata

El modelo de propagación de Hata es resultado del desarrollo de expresiones numéricas para las curvas de propagación normalizadas del modelo de Okumura, mediante un análisis de regresión múltiple. [13] 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 km [9]. Su expresión está en función de la frecuencia de operación del sistema, la altura de las antenas transmisora y receptora y la distancia entre la estación base y el terminal móvil. Para estimar las pérdidas en ambientes urbanos, suburbanos y rurales se emplean (7), (8) y (9), respectivamente.

$$L_{urb}(dB) = 69,5 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_{re} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{re}) \log d \quad (7)$$

$$L_{suburb}(dB) = L_{urb} - 2[\log(f/28)]^2 - 5,4 \quad (8)$$

$$L_{rural}(dB) = L_{urb} - 4,78(\log f)^2 - 18,33 \log f - 40,98 \quad (9)$$

El término  $a(h_{re})$  es un factor de corrección debido a la altura de la antena receptora que depende de la densidad estructural del entorno urbano, se determina usando (10) para entornos urbanos y (11) para entornos suburbanos y rurales.

$$a(h_{re}) = \begin{cases} 8,29[\log(1,54h_{re})]^2 - 1,1, & f < 300 \text{ MHz} \\ 3,2[\log(1,45h_{re})]^2 - 4,97, & f \geq 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad (10)$$

$$a(h_{re}) = (1,1 \log f - 0,7)h_{re} - (1,56 \log f - 0,8) \quad (11)$$

### Modelo de Walfisch-Bertoni

Este modelo, propuesto por Joram Walfisch y Henri Bertoni, tiene en cuenta las pérdidas producidas por las difracciones que se producen en las azoteas de los edificios. [14] Es un modelo que no considera la existencia de línea de vista entre el transmisor y el receptor, utiliza el fenómeno de la difracción para describir las pérdidas que sufre la señal antes de alcanzar al receptor ubicado a baja altura sobre la calle. Es despreciada la contribución de los rayos que penetran en los edificios y de los que sufren múltiples difracciones. La separación entre los edificios debe ser menor que su altura y se suponen organizados en filas paralelas. El rango de frecuencias en que es aplicable este modelo es de 300 a 3 000 MHz, con separación entre transmisor y receptor de 200 a 5 000 m. No es aplicable cuando la antena de la estación base está por debajo de la altura media de los edificios. [2] En la figura 4 pueden observarse las variables específicas del entorno que se consideran en el modelo. La expresión de las pérdidas totales toma en cuenta la contribución de las pérdidas de espacio libre  $L_b$  y las pérdidas por la difracción de la señal en los

edificios situados a ambos lados de la calle en la que se encuentra el móvil,  $L_{ex}$ .

$$L(dB) = L_b + L_{ex} \quad (12)$$

$$L_{ex} = 57,1 + A + \log f + 18 \left[ \log \left( \frac{d - b/2}{\Delta h_t} \right) - \log \left( 1 - \frac{(d - b/2)^2}{17 \Delta h t} \right) \right] \quad (13)$$

$$A = 5 \log \left( \frac{b^2}{2} + \Delta h_R^2 \right) - 9 \log b + 20 \log \left[ \tan^{-1} \left( \frac{2 \Delta h_R}{b} \right) \right] \quad (14)$$

donde  $b$  es la anchura promedio entre centros de edificios. Además son denotados  $h_t$  y  $h_r$  como las alturas de las antenas transmisoras y receptoras, respectivamente y  $h_R$  es denotada como la altura media de las edificaciones (figura 4). Entonces, se calcula  $\Delta h_R = h_R - h_r$ , mientras que  $\Delta h_t = h_t - h_R$ . Puede notarse que todos estos parámetros son expresados en metros para su empleo en (13) y (14).

### Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami

Este modelo, propuesto en el proyecto europeo COST 231, es resultado de la integración de los modelos de Ikegami-Ioshida y de Walfisch-Bertoni [15]. En él se incorpora la influencia de edificaciones y calles en las que se encuentra el dispositivo receptor, para una predicción más precisa de las pérdidas de propagación en entornos urbanos. De acuerdo con [16], las pérdidas pueden evaluarse dependiendo de la existencia o no de línea de vista entre el transmisor y el receptor, según las expresiones (15) y (16):

$$L_{LOS}(dB) = 42,6 + 20 \log f + 26 \log d \quad (15)$$

$$L_{NLOS}(dB) = L_b + L_{rts} + L_{msd} \quad (16)$$

donde  $L_{rts}$  es la pérdida debida a la difracción de la terraza a la calle en que se sitúa el móvil (*rooftop to street*), que es independiente de la altura de la estación base, y  $L_{msd}$  es la pérdida causada por la difracción de la onda en múltiples construcciones situadas entre el transmisor y el receptor (*multiple screen diffraction*).

Este modelo considera las mismas variables que el modelo de Walfisch-Bertoni (figura 4), en adición a otras dos:  $w$ , el ancho de la calle en la que se encuentra el móvil (expresado en metros) y  $\varphi$ , el ángulo entre el rayo de la onda incidente y el eje de la calle (en grados). En la figura 5 se ha representado una vista superior de la ubicación del receptor, donde se muestra como está definido  $\varphi$ .

Mediante la aplicación de los principios de la óptica física y asumiendo características geométricas uniformes en los

edificios y su disposición, fueron derivadas las siguientes expresiones:

$$L_{rts} = -8,23 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_R + L_{ori} \quad (17)$$

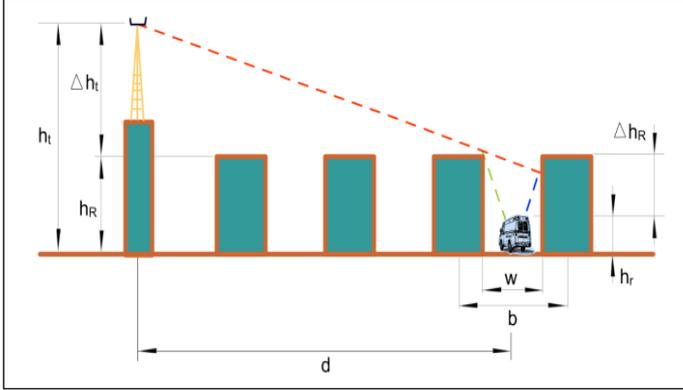


Fig. 4. Variables consideradas en los modelos Walfisch-Bertoni y Walfisch-Ikegami.

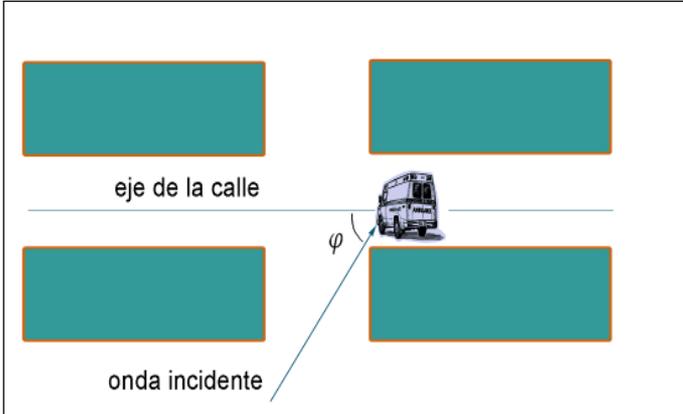


Fig. 5. Ángulo entre el rayo de la onda incidente y el eje de la calle, en el modelo Walfisch-Ikegami.

Es necesario señalar que la expresión presentada para el cálculo de  $L_{rts}$  es el resultado de una corrección, realizada en [17], a la formulación original del modelo. El término  $L_{ori}$  es un factor de corrección debido a la orientación de las calles, que toma en consideración el efecto de la difracción terraza-calle cuando la calle no es perpendicular a la dirección de propagación.

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,3571\phi, & \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,0075(\phi - 35^\circ), & 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4 - 0,114(\phi - 55^\circ), & 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (18)$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (19)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_t), & \Delta h_t \geq 0 \\ 0, & \Delta h_t < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & \Delta h_t \geq 0 \\ 54 - 0,8\Delta h_t, & \Delta h_t < 0, \quad d \geq 0,5 \\ 54 - 1,6\Delta h_t d, & \Delta h_t < 0, \quad d < 0,5 \end{cases} \quad (21)$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & \Delta h_t \geq 0 \\ 18 - 15(\Delta h_t / h_R), & \Delta h_t < 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7(f / 925 - 1), & \text{para zonas suburbanas} \\ -4 + 1,5(f / 925 - 1), & \text{para ciudades grandes} \end{cases} \quad (23)$$

Este modelo, a diferencia del de Walfisch-Bertoni, puede ser aplicado cuando la antena de la estación base se encuentra por debajo de la altura media de las edificaciones; tiene validez para frecuencias entre 800 y 2 000 MHz, alturas de las antenas transmisoras de 4 a 50 m, distancias en un rango de 200 a 5 000 m y altura de la antena receptora de 1 a 3 m .[2]

## HERRAMIENTA PARA LA SIMULACIÓN DE LOS MODELOS

Para facilitar el estudio de los modelos anteriormente presentados se implementó una interfaz gráfica (GUI) en Matlab, la cual se muestra en la figura 6. En el área principal de la misma se grafican las pérdidas de propagación para cada modelo, en función de uno de los siguientes parámetros ( $f, h_p, h_r, d, w, b, \phi, h_R$ ), seleccionado por el usuario al especificar en el botón de edición correspondiente el rango de variación deseado en forma de vector  $[X_{min}, X_{max}]$ , puede notarse en la figura  $f$  (MHz) = [800 1 500]. Es posible asignarle al *slider* ubicado en la parte superior de la gráfica el control de una de las variables anteriores, permitiendo observar la variación de las curvas, mientras dinámicamente modifica el parámetro seleccionado. Desde la línea de edición de texto ubicada en la parte inferior derecha de la GUI se puede acceder a los datos graficados mediante las variables  $L_{ok}, L_{ht}, L_{wb}, L_{wi}$  que representan las pérdidas dadas por los modelos de Okumura, Hata, Walfisch-Bertoni y Walfisch-Ikegami, respectivamente; así como al parámetro en función del cual se evalúan las pérdidas, representado por la variable  $x$ . De esta forma, se ofrece la opción de guardar las curvas para un procesamiento adicional posterior o realizar cualquier manipulación directamente desde esta línea de edición.

En el modelo de Okumura no es posible determinar las pérdidas directamente a partir de una expresión matemática. Este es uno de los inconvenientes del modelo, puesto que su evaluación a una distancia y frecuencia dadas requiere la ubicación de los puntos manualmente en un gráfico. Para su implementación en la herramienta descrita se obtuvieron muestras de las curvas en varios puntos. Luego, las pérdidas para cualquier distancia y frecuencia se determinaron interpolando dichas muestras.

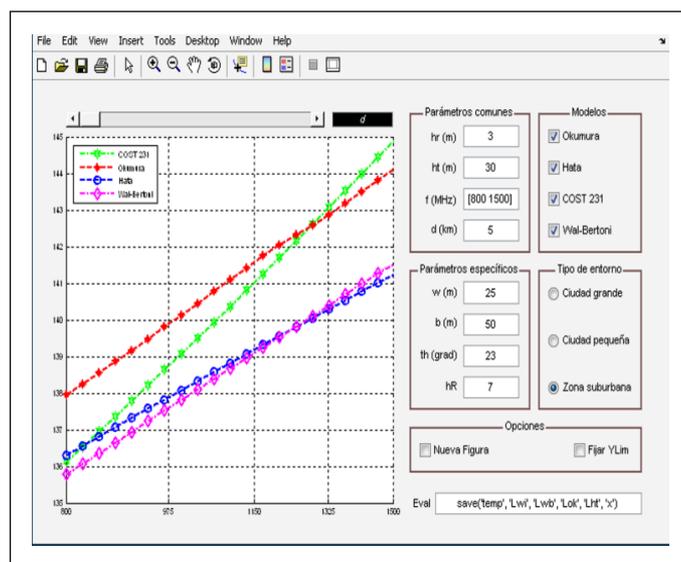


Fig. 6. Interfaz gráfica para la comparación de los modelos.

### COMPARACIÓN DE LOS MODELOS

En la comparación entre los modelos presentados se consideraron los rangos comunes de validez mostrados en la tabla 1.

Tabla 1 Rangos de validez de los modelos				
Modelo	$f$ (MHz)	$h_t$ (m)	$h_r$ (m)	$d$ (km)
Okumura	150-3000	30-1000	1-10	1-100
Hata	150-1500	30-200	1-10	1-20
Walfisch-Bertoni	300-3000	4-50	1-3	0,2-5
COST 231	800-2000	4-50	1-3	0,2-5
Rangos Comunes	800-1500	30-50	1-3	1-5

Las comparaciones se realizaron entre las pérdidas predichas por los modelos. Se asumieron los siguientes valores de datos:  $f = 800$  MHz,  $h_r = 3$  m,  $h_t = 30$  m,  $d = 5$  km,  $w = 25$  m,  $b = 50$  m,  $\phi = 28^\circ$ ,  $h_R = 7$  m. En todos los casos se consideró un entorno suburbano. Como medida del grado de dispersión de los modelos se utilizó la desviación estándar:

$$L_\sigma = \left[ \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (L_i - L_\mu)^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

donde  $L_\mu$  es el valor medio de las pérdidas y  $L_i$  es la pérdida específica de cada modelo.

En la figura 7 se muestra el resultado obtenido para la variación de las pérdidas en función de la frecuencia, entre 800 y 1 500 MHz. Puede notarse la linealidad de las curvas

en el rango seleccionado, debido a la escala logarítmica del eje de frecuencias y la dependencia de los modelos del término  $\log f$ . Considerándolas perfectamente lineales, sus pendientes fueron calculadas y se obtuvieron valores de 23, 18, 21 y 33 dB/década para los modelos de Walfisch-Bertoni, Walfisch-Ikegami, Okumura y Hata, respectivamente. Estos valores, excepto para el caso del modelo de Walfisch-Ikegami, se acercan a 20 dB/década, lo que demuestra el peso que dentro de las pérdidas totales tiene el factor  $20 \log f$  presente en las pérdidas básicas. A este factor hay que añadir, en el modelo de Walfisch-Ikegami, el término  $10 \log f$  contenido en las pérdidas  $L_{rts}$ , de ahí que la pendiente calculada para la curva correspondiente a este modelo sea la que más se aleja de 20 dB/década. Es importante recordar que las pérdidas en los diferentes modelos dependen de la frecuencia no solo con el término  $\log f$ , sino que también incluyen factores de corrección de menor peso que varían linealmente con  $f$  (factor  $k_f$  en el modelo de Walfisch-Ikegami) o con el cuadrado del logaritmo de la frecuencia (corrección para los entornos suburbanos y rurales en el modelo de Hata).

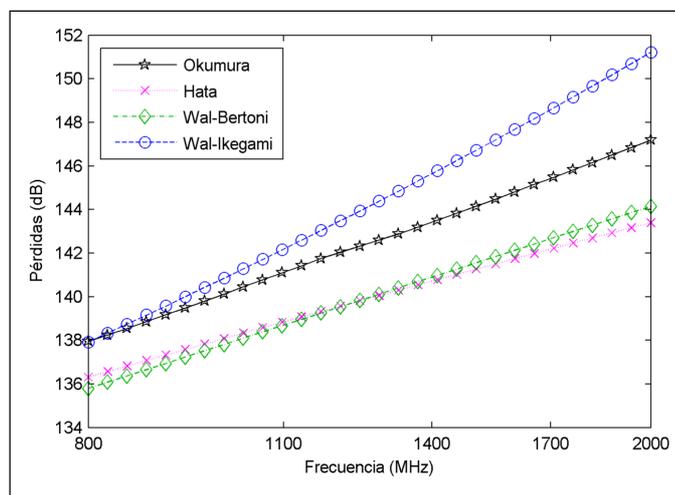


Fig. 7. Variación de las pérdidas en función de la frecuencia.

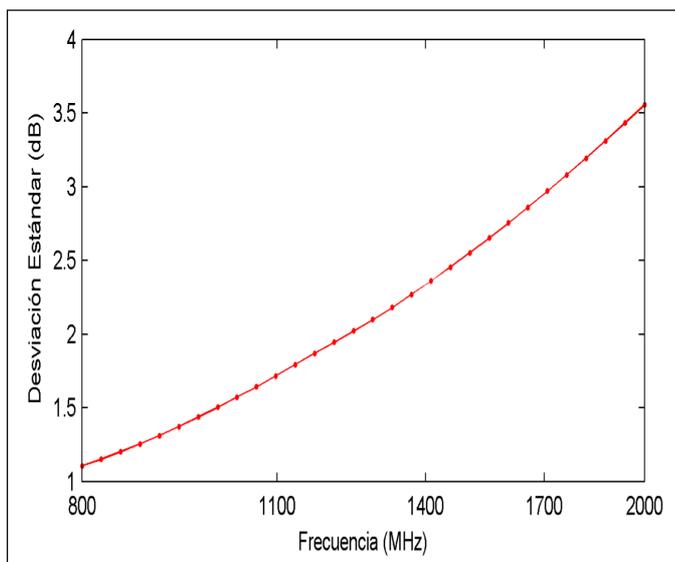


Fig. 8. Dispersión de los modelos en función de la frecuencia.

La variación de las pérdidas con el logaritmo de la frecuencia no es del todo lineal, como puede observarse en las curvas de la figura 2 para el modelo de Okumura, pero en un rango relativamente estrecho como el que se considera, la aproximación es aceptable. La desviación estándar de las pérdidas fueron calculadas para el rango de frecuencias considerado, empleando (24). Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica de la figura 8, en la que puede notarse la pequeña dispersión, con valores comprendidos entre 1 y 3,5 dB.

En la figura 9 se representa la dependencia de las pérdidas con la distancia, cuando esta varía en un rango de 1 a 5 km. Pudo comprobarse, al emplear una escala logarítmica para la distancia, un comportamiento lineal de las pérdidas en función del logaritmo de la distancia para los cuatro modelos. Esto significa que las pérdidas, cuando solo se considera la variable distancia, pueden describirse aproximadamente por una ecuación de la forma  $A \log d + B$ , donde  $A$  y  $B$  son constantes que dependen del resto de los parámetros.

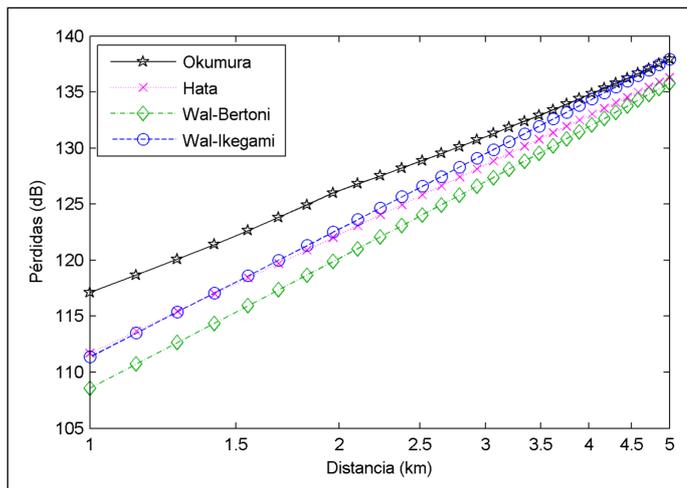


Fig. 9. Variación de las pérdidas en función de la distancia.

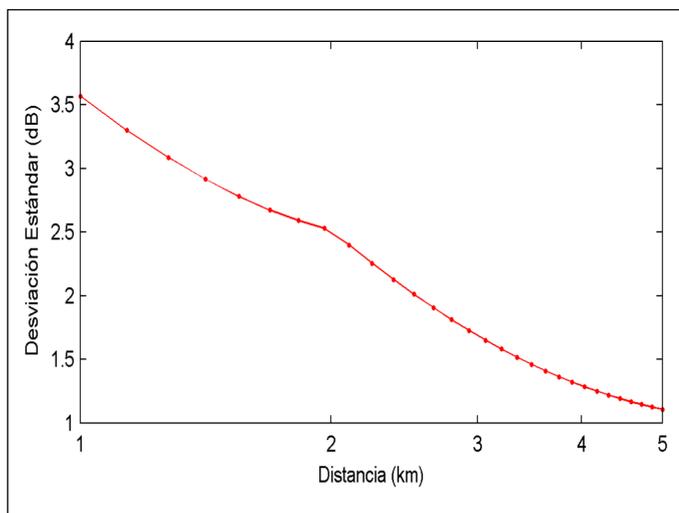


Fig. 10. Dispersión de los modelos en función de la distancia.

Para las curvas que se muestran, estas ecuaciones son las siguientes:

$$L_{ok}(dB) = 29,8 \log d + 117,1 \quad , \quad L_{ht}(dB) = 35,2 \log d + 111,7 \quad ,$$

$$L_{wb}(dB) = 39 \log d + 108,6 \quad \text{y} \quad L_{wi}(dB) = 38 \log d + 111,3 \quad .$$

Como puede notarse en las ecuaciones anteriores, los modelos de Okumura y Hata son los que presentan la razón de variación más lenta con la distancia. Para los otros dos modelos las pérdidas varían más rápido debido a que consideran la difracción de la onda en múltiples construcciones situadas entre el transmisor y el receptor. Del análisis anterior y del hecho de ser más altas las pérdidas del modelo de Okumura en la distancia inicial igual a 1 km puede comprenderse porqué la coincidencia de los modelos es más notable cuando se incrementa la distancia, lo cual se aprecia más claramente en la figura 10.

En la figura 11 se han graficado las pérdidas en función de la altura media de los edificios, puede notarse que como era de esperar los modelos de Okumura y Hata no muestran dependencia de este parámetro, ya que es considerado implícitamente en el tipo de zona. Cabe destacar cómo las curvas de estos dos modelos coinciden con los modelos de Walfisch-Ikegami y Walfisch-Bertoni para una altura media de las construcciones de aproximadamente 7 m, equivalente a dos plantas o una zona de tipo suburbana. Si se elige como entorno el de una ciudad pequeña se verá cómo esta región de convergencia de los cuatro modelos se desplaza hacia los 14 m, equivalente a cuatro plantas. En este sentido la generalización de los modelos Okumura y Hata impide la correcta caracterización del entorno, al no considerar el valor preciso del parámetro  $h_R$ . Es por ello que, con el objetivo de hacer una comparación equitativa, se escogió para el parámetro  $h_R$  un valor de 7 m para una zona suburbana. Se aprecia en esta gráfica la notable influencia que tiene en los modelos de Walfisch-Bertoni y Walfisch-Ikegami el valor de  $h_R$ , ya que al ser más altos los edificios, más obstruido resulta el trayecto de la señal entre el transmisor y el receptor, y por tanto mayores son las pérdidas debido a la difracción terraza-calle.

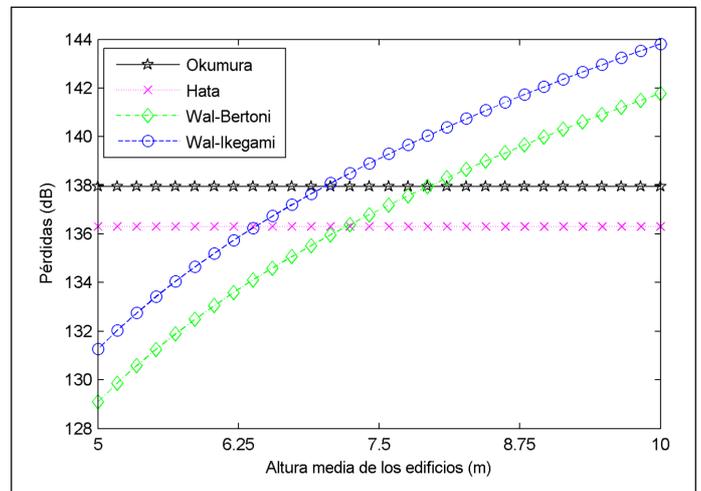


Fig. 11. Variación de las pérdidas en función de la altura media de los edificios.

La gráfica mostrada en la figura 12 se obtuvo de variar el parámetro  $\varphi$ , del que solo depende el modelo de Walfisch-Ikegami, en consecuencia las pérdidas correspondientes a los demás modelos permanecen constantes. El valor mínimo de las pérdidas estimadas por este modelo resulta para  $\varphi = 90^\circ$  cuando el rayo entre el transmisor y el receptor sigue la dirección de la calle. Se evidencia que coincide con el modelo de Okumura cuando  $\varphi$  se aproxima a  $28^\circ$ . Puede notarse además, que cuando  $\varphi = 28^\circ$  el factor  $L_{ori} = 0$ , acorde a (18). Para verificar la incidencia media de este parámetro se generaron 105 valores del ángulo uniformemente distribuidos en el intervalo  $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$  y se determinó el valor medio de  $L_{ori}$ , empleando (18), el resultado obtenido fue de  $-0,0076$  dB, valor muy cercano a cero.

Los resultados obtenidos por los modelos fueron comparados con resultados experimentales obtenidos en [15], en COST231 Final Report se describe el procedimiento utilizado para realizar las mediciones. Estas mediciones se realizaron a una frecuencia de 947 MHz y los valores estimados para la descripción del entorno fueron los siguientes:  $w = 13$  m,  $b = 26$  m,  $h_R = 20$  m, correspondientes a una ciudad de tamaño medio. En la figura 13 se muestran los resultados experimentales y la recta obtenida al ajustar las muestras por el método de mínimos cuadrados. Dicha recta se usa como referencia en la figura 14 para la comparación con los modelos. Como se observa, los modelos de Walfisch-Bertoni y Walfisch-Ikegami son los que más se acercan a los resultados experimentales.

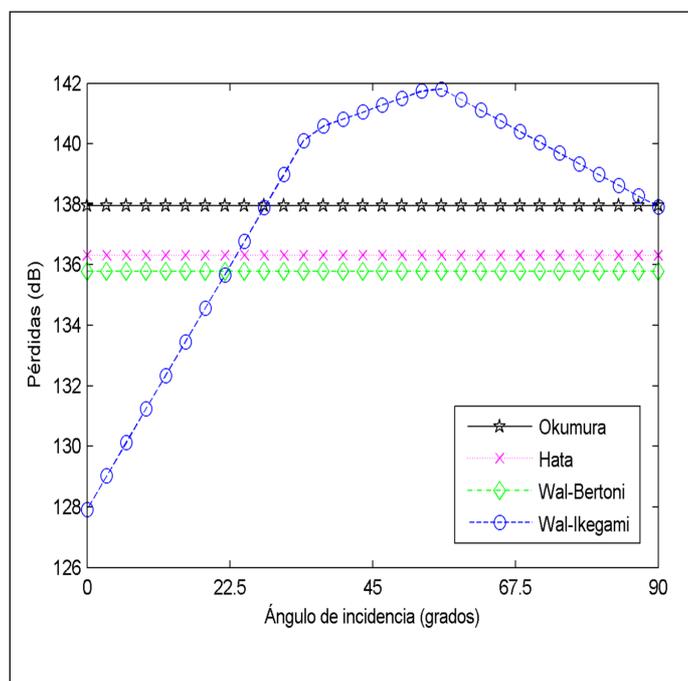


Fig. 12. Variación de las pérdidas en función del ángulo entre el rayo y el eje de la calle.

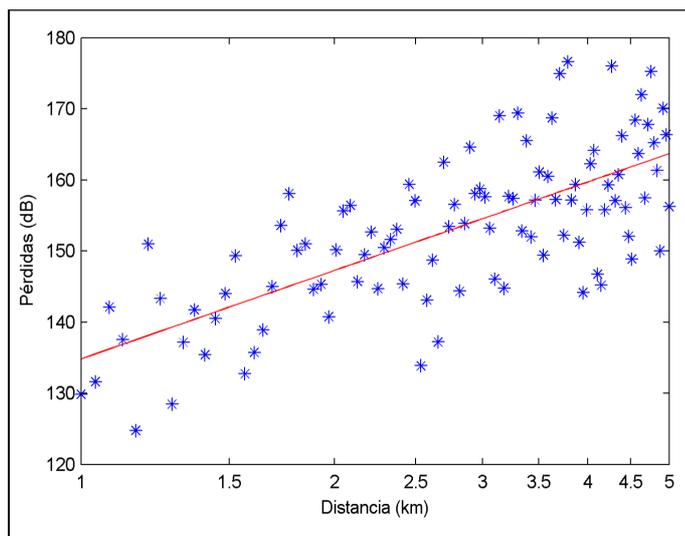


Fig. 13. Mediciones experimentales y ajuste de las muestras por mínimos cuadrados.

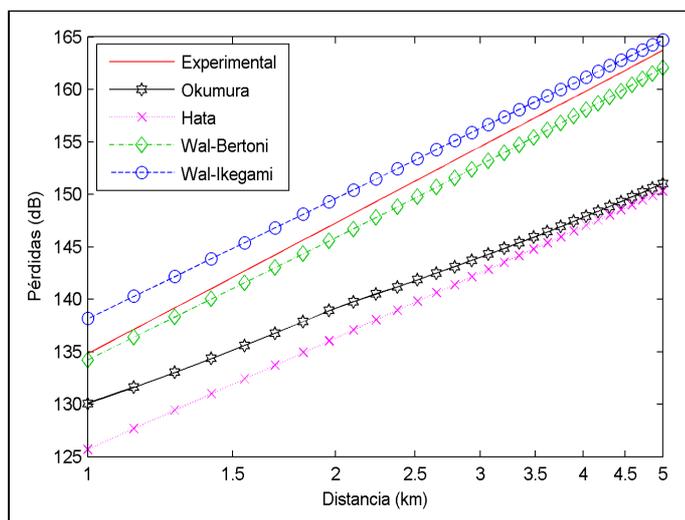


Fig. 14. Comparación de los modelos con las mediciones experimentales.

## CONCLUSIONES

En este artículo son descritos y comparados cuatro modelos de propagación, analizando las pérdidas estimadas por cada uno en función de la frecuencia, la distancia, la altura media de las edificaciones y el ángulo de incidencia respecto a las calles. Los resultados muestran que, aún cuando el modelo de Hata se basa en expresiones algebraicas obtenidas del modelo de Okumura, se destacan diferencias significativas entre sus resultados, en ocasiones menores con respecto a los otros modelos. La coincidencia entre las pérdidas predichas por los modelos es mayor cuando los valores de las variables del entorno caracterizado se aproximan a las de los entornos utilizados para la formulación del modelo de Okumura. Además, se evidencia una mayor sensibilidad de los modelos de Walfisch-Bertoni y Walfisch-Ikegami a las variaciones en la altura media de las edificaciones.

La elección adecuada de un modelo de propagación para una aplicación en un entorno específico depende de la amplia comparación que se realice en cuanto a parámetros del entorno y cantidad de modelos. La utilidad de la herramienta de software desarrollada resulta de innegable valor en este sentido. En primer lugar, permite la rápida evaluación de las pérdidas en función de las variables del entorno. En segundo lugar, por su escalabilidad, al permitir la incorporación de otros modelos, para contar con mayor cantidad de alternativas en la comparación.

## REFERENCIAS

1. **SARKAR, T. et al.** "A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication". *IEEE Ant. and Propag. Mag.*, 2003, vol. 45, pp. 51-82.
2. **HERNANDO RÁBANOS, José María.** *Transmisión por radio*. España: Editorial Universitaria Ramon Areces, 2008. 663 pp. ISBN 9788480048569.
3. **ISKANDER, M. F.** "Channel Characterization and Propagation Models for Wireless Communications Systems". [en línea]. Disponible en Web: [www.wtec.org/loyola/wireless/chapter04.pdf](http://www.wtec.org/loyola/wireless/chapter04.pdf).
4. **MILANOVIC, J.; RIMAC-DRLJE, S. and BEJUK, K.** "Comparison of Propagation Models Accuracy for WiMAX on 3.5 GHz". *14th IEEE International Conference. Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 2007, pp. 111-114.
5. **PETRACCA, M. et al.** "Outdoor Path Loss Measurements of WiMAX at 2.5G Hz in Suburban Environment". *4th IFIP International Conference. New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, 2011, pp. 1 - 5.
6. **ISKANDER, M. F. and YUN, Z.** "Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems". *IEEE Transaction on MicroWave Theory and Techniques*, 2002, vol. 50, pp. 662-663.
7. **ZIMMERMANN, D. et al.** "Database Correlation for Positioning of Mobile Terminals in Cellular Networks Using Wave Propagation Models". *60th IEEE Vehicular Technology Conference*, 2004, vol. 7, pp. 4682 - 4686.
8. **ANDERSEN, J. B.; RAPPAPORT, T. S. and YOSHIDA, S.** "Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels". *IEEE Commun. Mag.*, 1995, pp. 42-49.
9. **RAPPAPORT, T. S.** *Wireless Communications Principle and Practice*. New York: Prentice Hall, 2002. 641 pp. ISBN 0130422320.
10. **STUBER, G. L.** *Principles of Mobile Communication*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. 752 pp. ISBN 0-792-37998-5.
11. **GOLENIEWSKI, L. and JARRETT, K. W.** *Telecommunications Essentials*. Stoughton: Addison Wesley Professional, 2006. 928 pp. ISBN 978-0-321-42761-8.
12. **OKUMURA, Y. et al.** "Field Strength Variability in VHF and UHF Land Mobile Service". *Rev. Elect. Comm. Lab.*, 1968, vol. 16, pp. 825-873.
13. **HATA, M.** "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services". *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 1980, vol. VT-29, pp. 317-325.
14. **WALFISCH, J. and BERTONI, H.L.** "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments". *Antennas and Propagation IEEE Transactions*, 1988, vol. 36, pp. 1788-1796.
15. **CICHONAND, D. J. and KURNER, T.** *Propagation Prediction Models. COST231 Final Report* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.lx.it.pt/cost231/>.
16. **ITU-R.** *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz*. Recommendation ITU-R P.1411-1. Geneva. Switzerland. 2001.
17. **DONGSOO, H.; WATSON, A. M. and CHADNEY, A. G.** "Comment on Diffraction Loss of Rooftop-to-Street in Cost231-Walfisch-Ikegami Model". *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 1999, pp. 1451-1452.

## AUTORES

### Raikel Bordón López

Estudiante de 5to. año, Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Villa Clara, Cuba

### Reinier Alonso Quintana

Estudiante de 5to. año, Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Villa Clara, Cuba

### Samuel Montejo Sánchez

Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Máster en Telecomunicaciones y Electrónica, Asistente, Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Villa Clara, Cuba

## Wireless Channel Propagation Models Evaluation

### **Abstract**

In the design of wireless communications systems, channel modelling is an efficient alternative to predict the path loss. In this paper we present a comparative study between Okumura, Hata, Walfisch-Bertoni and Walfisch-Ikegami propagation models. We present a developed software tool, which is useful to evaluate these models from a graphical user interface. The main objective is to analyze and compare path loss predictions, taking into account different environment conditions and a common validity range. The results show the good match between empirical and semiempirical models when there is correspondence between the environment type and the assumed parameter value. Walfisch-Bertoni and Walfisch-Ikegami models predict the results closer to experimental measurements.

Key words: diffraction, scattering, path loss, propagation model, reflection