

MODELO DE PROPAGACIÓN EMPÍRICO PARA PREDICCIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA EN SEÑALES INALÁMBRICAS BAJO EL ESTÁNDAR IEEE 802.11B/G

EMPIRICAL PROPAGATION MODEL FOR PREDICTION OF POWER LOSSES IN WIRELESS SIGNALS UNDER IEEE 802.11b/g STANDARD.



AUTOR

JEISON MARÍN ALFONSO
Magister en Ingeniería Electrónica
Unidades Tecnológicas de Santander
Docente Investigador
Ingeniería en Telecomunicaciones.
jeison.marin@uts.edu.co
COLOMBIA.

INSTITUCIÓN

Unidades Tecnológicas de Santander UTS
Institución de Educación Superior de carácter tecnológico, redefinida.
Calle de los Estudiantes No 9-82.
uts@uts.edu.co
COLOMBIA

Recepción: Junio 8 de 2009

Aceptación: Junio 8 de 2009

Temática: Sistemas Inalámbricos y Móviles.

Tipo de Artículo: Artículo de Investigación Científica y Tecnológica.

RESUMEN

En este artículo se presenta un modelo de pérdidas de potencia en la propagación para las señales bajo estándar IEEE 802.11b/g, en dos tipos de ambientes: en espacio libre sin obstáculos, y luego con obstáculos como árboles, y densidad poblacional. Este modelo fue validado mediante campañas de medidas usando un Acces Point 1200 cisco, un analizador de espectro, y el software cisco Aironet Site Survey Utility; y contrastado con los resultados de otros modelos empíricos. El efecto de factores como el medio ambiente y la presencia de obstáculos en el análisis del modelo, conlleva a la inclusión de una variable aleatoria log-normal dentro de la ecuación de propagación. Finalmente se presenta la implementación de una interfaz gráfica que permite visualizar las pérdidas de potencia para el modelo propuesto y comparar los resultados con las curvas de diferentes modelos.

PALABRAS CLAVES

Estándar IEEE 802b/g.
Modelo de propagación empírico.
Pérdidas de potencia.
Sistemas Wi-Fi.

ABSTRACT

This paper presents a model of power losses in the spread for signals under standard IEEE802.11 b/g, in two types of environments: in free space without barriers, and obstacles such as trees, and population

density. This model was validated by means of using a Cisco 1200 Access Point, a spectrum analyzer, software and Cisco Aironet Site Survey Utility and contrasted with the results of other empirical models. The effect of factors such as environment and the presence of obstacles in the analysis of the model leads to the inclusion of a lognormal random variable in the equation of propagation. Finally presents the implementation of a graphical interface that lets you view the loss of power for the proposed model and compare the results with curves of different models.

KEYWORDS

Location system.
IEEE 802 /g Standard.
Propagation model.
Wi-Fi systems.

INTRODUCCIÓN

En las redes de comunicación inalámbrica, predecir las pérdidas de potencia de la señal con respecto a la distancia de propagación, en diferentes ambientes y bajo diversas condiciones, es muy útil para el diseño de equipos, cálculo de posición de repetidores o antenas, ubicación de nodos, entre otros. Las pérdidas de potencia normalmente se modelan matemáticamente por medio de una ecuación de propagación, donde se calculan las pérdidas en función de la distancia, la frecuencia, y otras variables que dependen de los obstáculos y los fenómenos asociados, como la difracción o la reflexión de señales.[4]

Los modelos de propagación pueden ser determinísticos o empíricos; los primeros se basan en aproximaciones teóricas con fundamento en la teoría electromagnética, y los segundos en campañas de medidas y ajuste de curvas a partir de los datos muestreados. Existen a su vez, modelos semi-determinísticos, que parten de algoritmos teóricos pero se validan con campañas de medidas.

Para la propagación de ondas en las redes bajo el estándar IEEE 802.11b/g o Wireless Fidelity (Wi-Fi), no es fácil encontrar modelos de predicción empíricos o semi-determinísticos ya validados por la comunidad científica, en gran medida, porque la mayoría de modelos se han desarrollado para sistemas de comunicación celular, con alturas de antenas superiores a 30 metros, distancias superiores a los 100 metros, y frecuencias de no sobrepasan los 2 GHz; variables que no se adaptan a una aplicación LAN inalámbrica bajo dicho estándar.[5]

Con el presente trabajo se plantea un modelo de propagación empírico, como resultado de campañas de medidas usando como transmisor un Acces Point

(AP) que opera bajo el estándar IEEE 802.11b/g, transmitiendo por lo tanto señales en el orden de 2,4 GHz. Las medidas se realizaron inicialmente en espacio libre, con una altura de la antena del AP de 3 metros, y distancias de 0 a 100 metros. Los valores de potencia obtenidos con ayuda de un analizador de espectro, permitieron plantear una primera ecuación logarítmica que predice las pérdidas en función de la distancia, para espacio libre. Posteriormente se realizaron otras tres campañas de medidas con obstáculos, la primera en un entorno urbano en un barrio de la ciudad de Bucaramanga-Colombia, la segunda en un ambiente con presencia de arboles y la tercera en un recinto con densidad poblacional.

CONTENIDO DEL DOCUMENTO

Se presenta inicialmente la expresión matemática base, sobre la que se desarrollan las ecuaciones de propagación, tomando como referencia un modelo empírico propuesto por Rappaport en 1992. Posteriormente se muestran las principales características técnicas de equipos usados en las campañas de medidas. Luego se muestran los resultados de las campañas de medida y los modelos empíricos resultantes, tanto en espacio libre, como en ambientes con obstáculos, realizando una comparación de dichos modelos con los modelos semi-determinísticos de Okumura, Hata rural, Cost231 y Cost231 Walfish Ikegami. Finalmente se explica la influencia del medio ambiente y la densidad de obstáculos en el modelo propuesto, y su modelado en las ecuaciones a través de la constante aleatoria log-normal.

1. EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE PÉRDIDAS DE POTENCIA

Para el modelado matemático de las pérdidas de potencia en la propagación, se aplicó una expresión matemática logarítmica que describe de manera general la atenuación de potencia en espacio libre con una variable aleatoria $X\sigma$, la cual incluye la atenuación de la señal en entornos abiertos debido a pequeños obstáculos (Ver ecuación 1).[8] Se puede observar en la ecuación la presencia de una potencia de referencia $L_f(d_0)$; esta corresponde a la potencia medida a un metro de distancia del AP, y sirve de referencia para calcular la atenuación. En la ecuación 1 cada variable corresponde a:

- $L(d)$: Potencia en función a la distancia.
- $L_f(d_0)$: Representa la potencia de referencia del enlace en dB cuando el receptor-transmisor está a una distancia de 1 metro ($d_0=1$).
- d/d_0 : Establece la distancia entre receptor y transmisor en metros.
- n : Representa las pérdidas en el enlace por el medio ambiente.

- X_σ : es un proceso aleatorio siguiendo una ley log-normal y de desviación σ dependiente del entorno, que representa el grado de desvanecimiento de nivel de potencia (shadow fading) presente en el medio ambiente en dB y donde se incluye el factor de densidad poblacional.

$$L(d) = Lf(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

Inicialmente se realizaron los análisis sin tener en cuenta el factor aleatorio de la ecuación 1: X_σ . El hecho de que exista una potencia de referencia Lf , y un factor n , permite no tener en cuenta en la ecuación las variables normalmente asociadas a las pérdidas de potencia en señales inalámbricas (variables como las ganancias de las antenas o la frecuencia) ya que Lf y n llevan de manera implícita sus efectos. La ecuación 1 es usada básicamente en casos empíricos, donde con base en unas medidas tomadas se calcula el factor n , dentro del cual ya se tiene en cuenta indirectamente las variables que intervienen en la propagación. De manera general, se ha comprobado que los valores de n para ciertos ambientes son los mostrados en la tabla 1.

TABLA 1. Valores de n para diferentes ambientes.

Environment	Path Loss Exponent, n
Free space	2
Urban area cellular radio	2.7 to 3.5
Shadowed urban cellular radio	3 to 5
In building line-of-sight	1.6 to 1.8
Obstructed in building	4 to 6
Obstructed in factories	2 to 3

Tomado de: [9]

2. EQUIPO UTILIZADO

Como equipo transmisor, se usó El Access Point Cisco Aironet 1200, mostrado en la figura 1.

El AP 1200 soporta las tecnologías 802.11a, 802.11b, 802.11g en modos de operación sencillo y dual, maneja velocidad de transferencia de datos a 11 Mbps y 54 Mbps; una potencia máxima de transmisión de 100 mW y sensibilidad de recepción de 85dBm y bandas de frecuencia en 2.4 MHz, 2.4 GHz, 5 GHz. En sus especificaciones técnicas, dice manejar un alcance máximo en interior de 124 m, y al aire libre de 610m.

Tiene en la banda seleccionada hasta 13 canales de transmisión. La antena interna transmisora se configuró con una ganancia de 3dB.

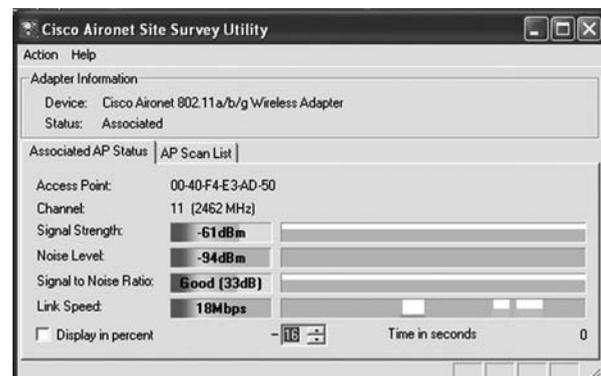
FIGURA 1. Cisco Aironet AP 1200.



Tomado de: Autor

Las medidas de potencia se realizaron a través del software Cisco Aironet Site Survey como se aprecia en la Figura 2, y a través de un analizador de espectro que se aprecia en la Figura 3.

FIGURA 2. Medida de potencia de señal Wi-Fi con CISCO Aironet.



Tomado de: Autor

FIGURA 3. Analizador de espectro Rohde & Schwarz.



Tomado de: Autor

El software Cisco Aironet Site Survey, diseñado para evaluar el rango de cobertura de redes inalámbricas, trabaja en modo pasivo, es decir, no inicia ningún tráfico de la red de RF; escucha simplemente el tráfico que el adaptador del cliente oye y visualiza los resultados. En la Figura 1 se pueden observar datos como la dirección IP y MAC del AP, el canal y la frecuencia que el AP está utilizando para las comunicaciones, la fuerza de la señal (Signal Strength) de los paquetes recibidos recientemente (en la cual cuanto más alto es el valor y cuanto más ancho es el gráfico de barra, más fuerte es la señal), el nivel de ruido, la calidad de la señal y la velocidad de conexión (Link Speed).

Por su parte, el analizador de espectro mostrado en la figura 3, tiene características como Rango de Frecuencia de 9 kHz to 6 GHz, ancho de banda de demodulación de señales IQ de 20 MHz, nivel de ruido promedio desplegado (DANL) -152 dBm, Incertidumbre total de la medición menor a 0.5 dB, peso menor a 7 kg, Opción de operación a batería interna, entre otras.

3. ATENUACIÓN EN ESPACIO LIBRE.

La campaña de medidas en espacio libre se realizó con el AP 1200 como transmisor, y como receptor el analizador de espectro con una antena logó periódica direccional con una ganancia de aproximadamente 6dB. Se configuró el AP a un canal en la banda de los 2400 MHz y se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 2.

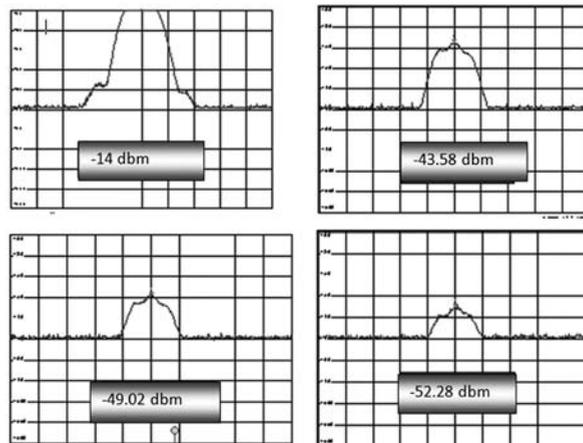
TABLA 2. Medidas de potencia en espacio libre.

DISTANCIA EN METROS	POTENCIA EN Dbm
1	-20
10	-43,58
20	-48,68
30	-49,61
40	-51,53
50	-55,02
60	-57,89
70	-58,28
80	-59,98

Tomado de: Autor

Los datos muestran la atenuación de la señal de 2,4Ghz tomando una muestra cada 10 metros hasta lograr una distancia máxima de cien metros. La figura 4 muestra la forma en que el analizador de espectro registra la atenuación.

FIGURA 4. Atenuación de potencia de señal Wi-Fi registrada con analizador de espectro.



Tomado de: Autor

Posteriormente, mediante un ajuste de curvas con el método de mínimos cuadrados con los datos tomados, se obtuvo la ecuación (2). [3].

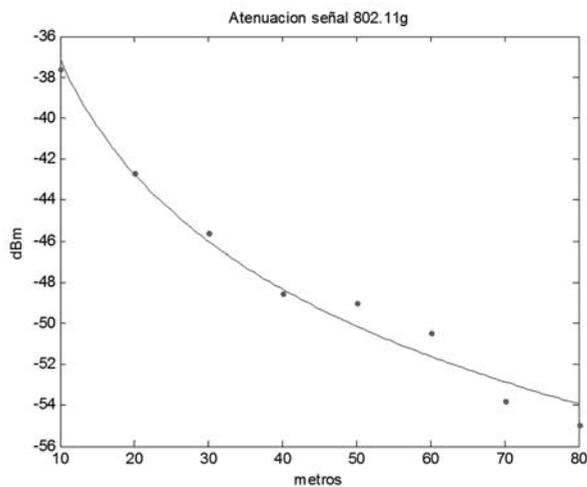
$$Y = -14.9101 - 8.83295 * \ln x \quad (2)$$

coeficiente de correlación: $r = 0.986109$

Esta función logarítmica se usó para extrapolar y calcular la atenuación hasta 700m, distancia donde teóricamente se tiene el nivel mínimo de sensibilidad del AP. El coeficiente de correlación cercano a 1 del ajuste, muestra que el error entre la curva ajustada y los puntos medidos es mínimo.

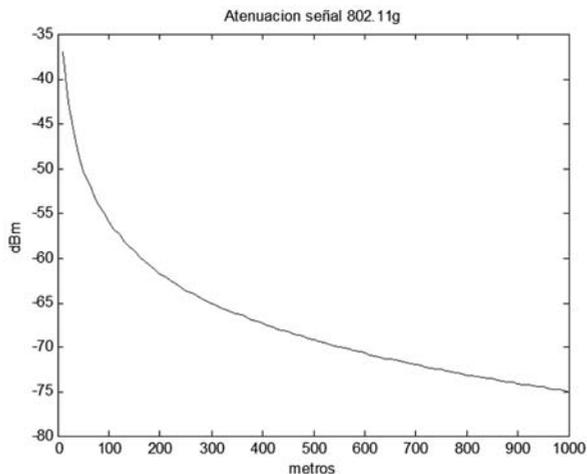
La Figura 5 muestra el resultado del ajuste de la curva logarítmica a partir de los puntos de medida de potencia tomados en el escenario inalámbrico implementado. En la Figura 6 se ha extrapolado la señal a valores de distancia superiores a los 700m en el cual se presenta el límite de sensibilidad.

FIGURA 5. Ajuste de la curva de potencia para espacio libre



Tomado de: Autor

FIGURA 6. Medida de potencia extrapolada a 1000m



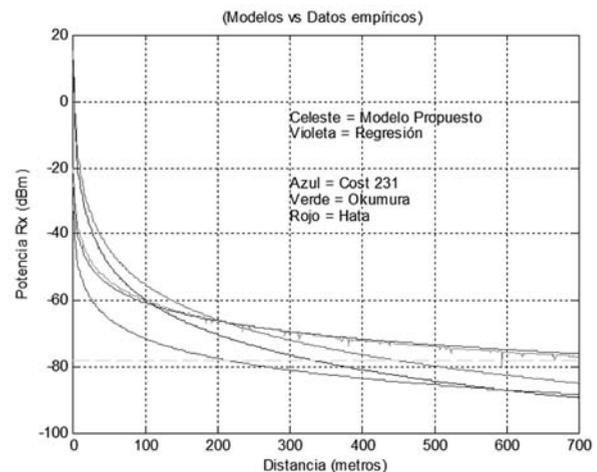
Tomado de: Autor

La Ecuación 2, muestra el comportamiento real de atenuación en un escenario abierto con muy baja densidad de obstáculos. Sin embargo, se desea escribir el modelo matemático en términos de la ecuación 1, sin tener en cuenta el factor aleatorio $X\sigma$. Dado que $L_r(d_0)$ representa la potencia de referencia del enlace cuando el receptor está a una distancia de 1 metro ($d_0=1$), esta variable corresponde a 20dbm según la tabla 2. Por su parte, el factor n que mejor ajusta la curva representada por la ecuación 2, a la ecuación 1, es $n=1.8$ (lo que se aproxima a lo mostrado en la tabla 1). De acuerdo a esto, el modelo propuesto para espacio libre es el mostrado en la ecuación (3).

$$L(d) = 22\text{dbm} + 10 (1.8)\log(d) \quad (3)$$

Las curvas representadas por la ecuación 2 y 3 se contrastaron a su vez con otros modelos empírico – estadísticos como los del grupo Cost 231, Okumura y Hata; obteniendo los resultados presentados en la Figura 7.

FIGURA 7. Modelos de propagación evaluados para señales Wi-Fi.



Tomado de: Autor

Los modelos de Okumura, Hata y del grupo Cost 231 fueron desarrollados en su mayoría con frecuencias de hasta 1900 MHz, pero algunas veces se extrapolan a 2400 MHz, por lo que era de interés verificar que tan certera era dicha extrapolación para redes Wi-Fi. Como resultado se aprecia que los modelos propuestos por el grupo Cost 231, y Hata predicen menos pérdidas de potencia antes de 100 metros, y más pérdidas cuando se sobrepasan los 250 metros. Okumura en cambio desde los 0 metros es bastante pesimista en sus predicciones.

4. ATENUACIÓN CON OBSTÁCULOS.

Se propusieron 3 entornos diferentes para evaluar la atenuación de la señal bajo la presencia de obstáculos:

- Un entorno urbano, en un barrio de la ciudad de Bucaramanga Colombia.
- Un entorno semi-urbano en el campus de una universidad, para evaluar la atenuación bajo la presencia de arboles.
- Un pasillo de un edificio, para evaluar la atenuación bajo la presencia de densidad poblacional.

La figura 8 muestra una panorámica del barrio donde fueron tomadas las medidas del entorno urbano. El AP fue ubicado en el edificio etiquetado como *ministerio* en la figura, y el analizador de espectro fue colocado en los puntos señalados en la figura 8. La altura de la antena del AP era de 3 metros.

FIGURA 8. Entorno urbano para análisis con obstáculos.



Tomado de: Autor

Como era de esperarse, en el entorno urbano, se captaron señales solo hasta 30 m. En los puntos que corresponden a distancias mayores y con obstáculos propios del medio (casas, edificios, carros, arboles, etc.) no se percibía señal alguna. Esto sirvió para corroborar que las señales bajo la norma IEEE 802.11b/g necesitan línea de vista entre el transmisor y receptor.

Para el segundo entorno con presencia de arboles, se tomaron medidas de 0 a 100 metros, y se siguió el mismo procedimiento hecho en el análisis en espacio libre: toma de datos, ajuste de curva y calibración de

la variable n de la ecuación 1. El estudio se hizo con la antena del AP a 1 metro y a 5,5 metros (en el primer y tercer piso del edificio). Para este estudio, se tomaron entre 20 y 30 muestras en cada punto, cuyo promedio se tabula en la tabla 3.

TABLA 3. Medidas de potencia en campus con árboles.

DISTANCIA EN METROS	POTENCIA EN Dbm
0,1	-12,5
8	-47,6
10,3	-52,75
14,5	-55,81
26	-62,9
27,5	-72,85
28,7	-73,68
29,2	-70,93
31,5	-76,87
35,2	-77,25
45,2	-73
49	-68,5
56,1	-80
67,3	-86,19
79	-88,87

Tomado de: Autor

A diferencia del estudio en espacio libre, en el entorno con árboles entran a cobrar mayor incidencia en la medida los fenómenos en la propagación de señales como la difracción y reflexión de ondas. Esto hace que la medida pierda precisión. Como un ejemplo, en la tabla 4 se pueden observar las medidas de 10 muestras tomadas a 10.3, 31.5, 49 y 67.3 metros. Se puede apreciar cómo a pesar de ser la misma distancia, las magnitudes de la potencia cambian. Más aun, se observa en las tablas 3 y 4 como a medida que aumenta la distancia, no necesariamente aumenta la atenuación, como en el caso de 31.5 m y 49 metros. Esto se puede explicar por la posición de los puntos donde se tomó la medida, los cuales se muestran en la figura 9 con sus respectivas distancias al AP; allí se puede observar que la línea de vista hacia el AP cambia entre puntos, por lo que en algunos el efecto de los fenómenos de propagación es mayor que en otros.

TABLA 4. Muestras de potencia tomadas en las respectivas distancias.

10,3 m	31.5 m	49 m	67.3 m
-51 dbm	-75 dbm	-66 dbm	-84 dbm
-55 dbm	-73 dbm	-68 dbm	-86 dbm
-54 dbm	-77 dbm	-70 dbm	-85 dbm
-55 dbm	-78 dbm	-68 dbm	-86 dbm
-55 dbm	-78 dbm	-67 dbm	-88 dbm
-53 dbm	-74 dbm	-68 dbm	-86 dbm
-55 dbm	-71 dbm	-71 dbm	-86 dbm
-52 dbm	-77 dbm	-72 dbm	-85 dbm
-52 dbm	-80 dbm	-67 dbm	-87 dbm
-51 dbm	-76 dbm	-66 dbm	-87 dbm

Tomado de: Autor

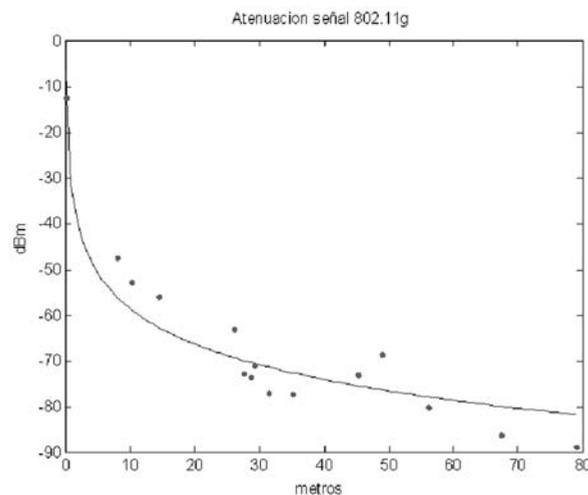
La curva logarítmica correspondiente al ajuste de los datos de la tabla 3 se muestra en la figura 9, y es modelada por la ecuación (4)

$$Y = -32.6504 - 11.2307 * \ln x \quad (4)$$

Una vez teniendo la ecuación de ajuste se procede a hallar el factor n de la ecuación 1 para establecer un modelo de propagación aplicado a este entorno, el cual da 2.48. Por lo tanto el modelo a proponer es:

$$L(d) = 22\text{dbm} + 10 (2.48)\log (d) \quad (5)$$

El valor n concuerda con el valor teórico mostrado en la Tabla 2.

FIGURA 9. Ajuste de la curva de potencia para entorno con árboles.

Tomado de: Autor

Finalmente se realizó el estudio en un entorno con densidad poblacional, en el pasillo de un edificio de una universidad con estudiantes. Los resultados de las medidas se muestran en la tabla 5.

La curva logarítmica correspondiente al ajuste de los datos de la tabla 5 se muestra en la figura 10, y es modelada por la ecuación (6)

$$Y = -36.7226 - 7.89978 * \ln x \quad (6)$$

Se procede ahora como en los casos previos a hallar el factor n de la ecuación 1 para establecer un modelo de propagación aplicado a este entorno, el cual da n=2. Por lo tanto el modelo a proponer es:

$$L(d) = 22\text{dbm} + 10 (2)\log (d) \quad (7)$$

Se puede ver como la dispersión de los datos en la figura 10 es mayor que la de la figura 9, y como el factor n es más cercano al de espacio libre que al de obstáculos con árboles. Esto muestra que en presencia de densidad poblacional, se afecta más la dispersión de los datos que la atenuación promedio.

TABLA 5. Medidas de potencia en entorno con densidad poblacional.

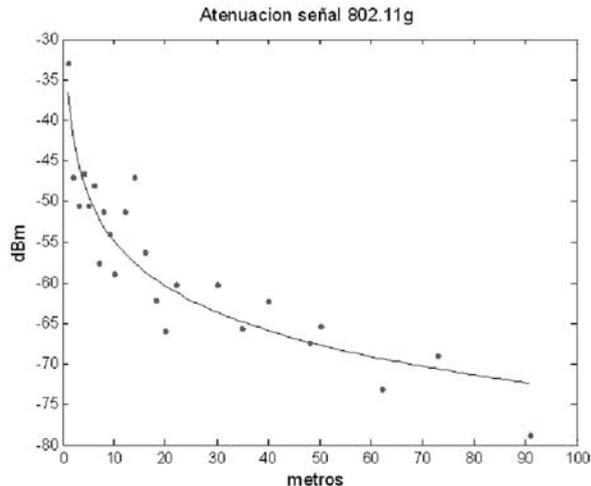
DISTANCIA EN METROS	POTENCIA EN Dbm
1	-33
2	-47
3	-50,5
4	-46,57
5	-50,6
6	-48,1
7	-57,57
8	-51,28
9	-54
10	-58,87
12	-51,28
14	-47
16	-56,25
18	-62,14
20	-65,84
22	-60,14
30	-60,2

35	-65,6
40	-62,3
48	-67,3
50	-65,28
62	-73,12
73	-69
91	-78,7

Tomado de: Autor

Se realizó también la comparación de los modelos propuestos en presencia de obstáculos con los modelos semi-empíricos Hata Rural, Okumura y los del grupo Cost 231; lo cual se muestra en la figura 11 para el caso de presencia de arboles, y en la figura 12 para el caso de densidad poblacional.

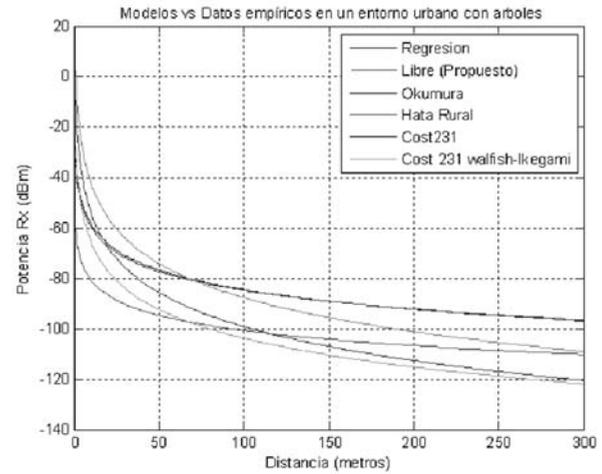
FIGURA 10. Ajuste de la curva de potencia para entorno con densidad poblacional.



Tomado de: Autor

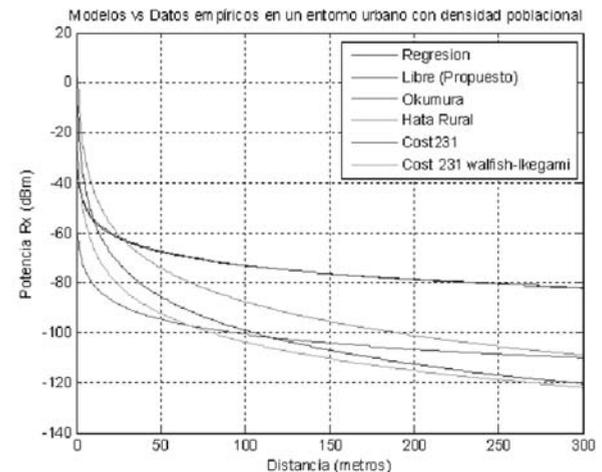
Mientras que en la comparación con el modelo de espacio libre mostrada en la figura 7 se observó que los comportamientos coincidían en puntos de distancia alrededor de 100 metros para cost 231, y 200 metros para hata; en el caso de la comparación con obstáculos observe que estos puntos de cruce se obtienen a menores distancias; alrededor de 20 a 30 metros en Cost 231, y de 70 metros para Hata.

FIGURA 11. Comparación del modelo propuesto en un ambiente con arboles vs modelos semi-empíricos.



Tomado de: Autor

FIGURA 12. Comparación del modelo propuesto en un ambiente con densidad poblacional vs modelos semi-empíricos.



Tomado de: Autor

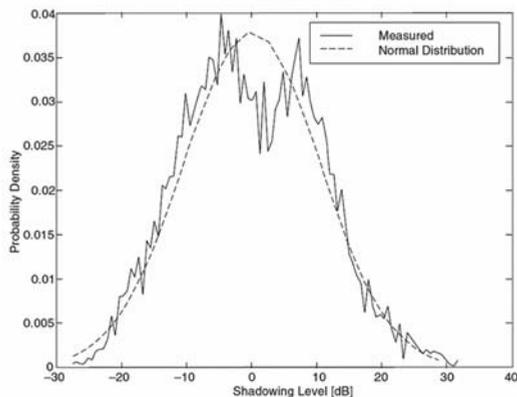
5. CARACTERÍSTICAS DE MEDIO AMBIENTE Y DENSIDAD DE OBSTÁCULOS EN EL MODELO PROPUESTO.

Tomando como base la ecuación 1, el valor de n puede variar en entornos tipo campus desde 1.8 cuando se trabaja en espacio libre hasta 4 cuando se presentan obstrucciones debido a la vegetación, densidad poblacional

o factores ambientales como la lluvia [2]. Este modelo empírico inicial se basa en el propuesto por Rappaport en 1992 donde $X\sigma$ es un proceso aleatorio atribuido a la refracción llamado "shadowing" o desvanecimiento por sombra, el cual se modela mediante una variable aleatoria lognormal cuya función de distribución de potencia (PDF) se muestra en la Figura 13.

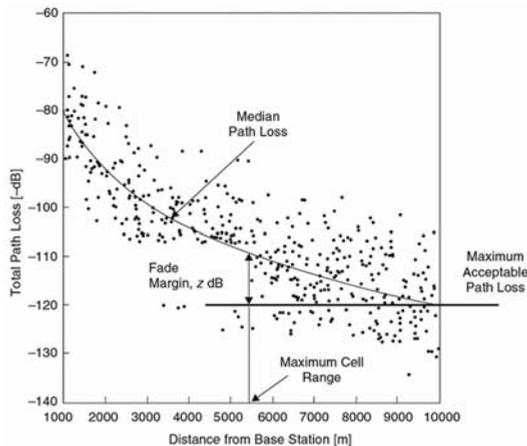
La variable aleatoria $X\sigma$ representa, por ejemplo, diferentes niveles de atenuación producidos por los arboles en un ambiente tipo campus los cuales presentan bajos niveles de reflexión y valores considerables de refracción. En la Figura 14 se presenta un margen de error debido a las variaciones de atenuación por los diferentes obstáculos en un escenario propuesto, para el caso de distancias superiores a los 1000 metros para la telefonía celular.

FIGURA 13. Histograma de la medida de desvanecimiento por sombra comparada con la normal PDF.



Tomado de [8]

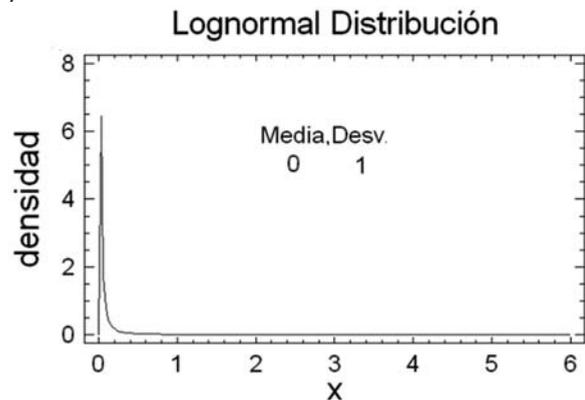
FIGURA 14. Medidas de atenuación de la señal que siguen una distribución lognormal para diferentes valores de distancias.



Tomado de [8]

Algo similar a la dispersión de los datos mostrada en la figura 14, se puede observar en las figuras 9 y 10. Hasta ahora se propusieron dos modelos empíricos para atenuación en presencia de obstáculos, sin tener en cuenta la variable aleatoria. Para incluir esta variable, se le sumó a las ecuaciones la función de distribución lognormal de forma aleatoria, ajustando el valor de la media $\mu=0$ y desviación σ a un valor de tal manera que en el gráfico la curva no sobrepasara la muestra con el máximo error. En todos los casos, se uso $\sigma=1.9$ La curva de distribución lognormal con $\mu=0$ y $\sigma=1$, se muestra en la figura 15.

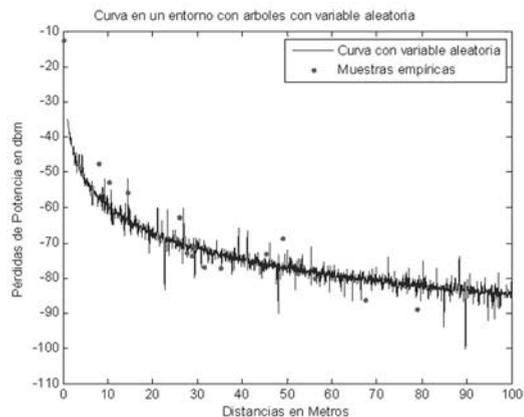
FIGURA 15. Curva de distribución lognormal, con $\mu=0$ y $\sigma=1$.



Tomado de: Autor

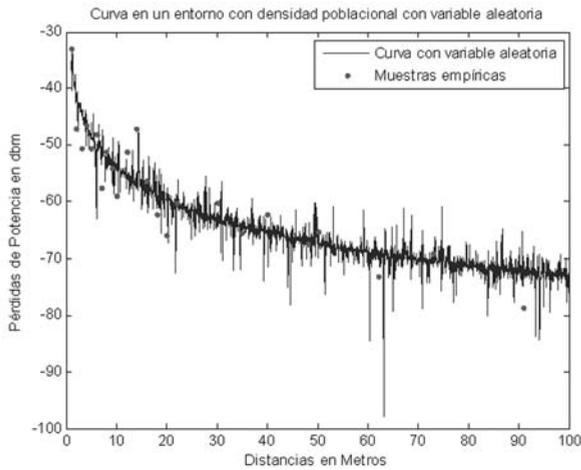
Las figuras 16 y 17, muestran las curvas de atenuación con la distribución lognormal añadida. Fijese como este modelo matemático predice de una mejor manera las pérdidas de potencia, y tiene en cuenta el factor aleatorio que añade el efecto de los fenómenos en la propagación de señales.

FIGURA 16. Curva en un entorno con arboles con variable aleatoria.



Tomado de: Autor

FIGURA 17. Curva en un entorno con densidad poblacional con variable aleatoria.



Tomado de: Autor

6. CONCLUSIONES

Para expresar matemáticamente las pérdidas de propagación se eligió un modelo determinístico de pérdidas de potencia, que tiene en cuenta solo la distancia de propagación (en realidad su logaritmo, o log-distancia), un valor n que representa las pérdidas debido al medio ambiente, y un factor aleatorio $X\sigma$ donde se tiene en cuenta la dispersión y desviación de las medidas. Este modelo es usado cuando se tienen datos empíricos de atenuación de potencia basados en campañas de medidas.

Se realizaron 4 campañas de medidas para poder caracterizar las pérdidas de potencia en la propagación de señales Wi Fi. De cada campaña de medidas se propuso una ecuación de propagación, con valores diferentes de n . (Excepto en la campaña en entorno urbano). Estas ecuaciones pueden predecir de una manera más exacta la atenuación de potencia en señales inalámbricas bajo el estándar IEEE 802.11b/g, que los modelos semi-empíricos de Okumura, Hata y Cost 231.

En el análisis en espacio libre, se ajustó una ecuación que describe las pérdidas de potencia en la propagación de señales a 2400 MHz, con un factor de pérdidas en el enlace por el medio ambiente (n) igual a 1.8. Este factor es muy parecido al propuesto por las fuentes bibliográficas, las cuales calculan un valor de $n=2$, para espacio libre [4]. La razón por la cual dio menor el valor, se puede justificar por la poca distancia entre los equipos transmisor y receptor (máximo 100 metros), comparada con sistemas de propagación celular, sobre los cuales se han hecho los estudios, y la tecnología que maneja el protocolo 802.11g.

La desviación estándar de las muestras en las campañas de medidas aumento en la medida en que aumentaban los obstáculos. La campaña que menor desviación presentó fue en espacio libre, y la de mayor desviación fue el estudio con densidad poblacional. Estos niveles de desviación se tuvieron en cuenta en los modelos matemáticos propuestos, con el factor $X\sigma$.

Cuando se intentó medir la propagación en espacio urbano con edificaciones como obstáculos, se comprobó que en sistemas Wi Fi la señal se atenúa considerablemente a distancias mayores a 30 m, por medio de una campaña de medidas en el barrio Provenza de Bucaramanga. Esto reafirma el concepto previo que se tenía acerca de la necesidad de tener línea de vista (LOS) en la transmisión de señales inalámbricas con Access Point Wi Fi.

En el análisis con densidad poblacional, se evidenció claramente el efecto de las personas en la propagación de la señal, aumentando notablemente la desviación en el valor de las muestras, presentando errores hasta de 10 dB en el mismo punto. Esto hizo que el factor $X\sigma$ trabajara con una desviación estándar mayor a la de espacio libre. Sin embargo el valor de n fue muy parecido al del espacio libre, lo que permite concluir que la densidad poblacional afecta sobre la variación y dispersión de los datos, más que en la atenuación de potencia. Los valores de n y la desviación estándar en $X\sigma$ en este caso dieron 1.9 y 1 respectivamente.

En la comparación de los modelos propuestos en este proyecto con modelos empíricos determinísticos como Hata, Okumura y los del grupo cost 231, se pudo verificar mediante simulación que dichos modelos son demasiado pesimistas en cuanto a la predicción de pérdidas de potencia, y no se ajustan a sistemas Wi Fi, sobre todo en espacio libre. Muy posiblemente esto se debe a que dichos modelos determinísticos fueron desarrollados para entornos diferentes, sistemas de comunicación celular, y frecuencias inferiores a las trabajadas en este proyecto. Sin embargo los modelos del grupo cost 231 o el Hata rural pueden servir como referencia a distancias menores a 100 metros, con obstáculos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.K.M. Mahtab Hossain, Hien Nguyen Van, Yunye Jin, Wee-Seng Soh. *Indoor Localization Using Multiple Wireless Technologies*.
- [2] ALEXANDER, Tom. *Optimizing and Testing WLAN*. 2007.
- [3] BURDEN, Richard. FAIRES, Douglas. *Análisis Numérico*. Séptima edición. Thomson Learning. 2002. 831p.

- [4] HAKIN. Sistemas de Comunicación. 1 ed. México. Limusa Wiley, 2002. 816p
- [5] KARLOF, Chris. A practical evaluation of Radio Signal Strength. 2005.
- [6] LEE W.C.Y. Mobile radio signal correlation vs antenna height and spacing, IEEE Trans. Vehicular technology.
- [7] LEE W.C.Y. Mobile communications Design fundamentals, Howard W. Sams and Co.
- [8] RAPPAPORT, T. Wireless Communication, Prentice Hall, 1996.
- [9] SEYBOLD, Jhon. Introduction to RF propagation. Pág 190.
- [10] HANSLETT, Christopher. Essentials o Radio Wave Propagation. Publicación Cambridge wireless essentials series. 215p.
- [11] BLAUNSTEIN, Nathan. Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communications Links, Editorial Wiley. 636p.