



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA CIUDAD DE CUENCA (ECUADOR), EN REDES WLAN OPERANDO EN 2.4 GHz Y 5.8 GHz, EN AMBIENTES EXTERIORES”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de

MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

MARIO ALBERTO MOLINA REINO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por haberme brindado el maravilloso don de la vida y junto con ella la salud, la capacidad, la inteligencia y la perseverancia necesaria para poder culminar este Trabajo de Titulación con éxito. Gracias Dios por iluminar mi vida día a día y llenarme de bendiciones en todo momento.

También agradezco a mis padres Mario y Cecilia por todo el apoyo incondicional que siempre me brindan, sin ustedes la consecución de este gran logro hubiera sido imposible. Gracias papá y mamá los amo infinitamente.

Finalmente, mi eterna gratitud con la ESPOL; con el personal administrativo de la MET quienes siempre muy amablemente estuvieron prestos para ayudarme ante cualquier situación; y con todos los profesores que formaron parte del claustro académico de este prestigioso programa de estudios, de manera especial a mi director del Trabajo, Dr. Nelson Alexander Pérez García, gracias por compartir sus conocimientos y su experiencia con mi persona, pero por sobre todo gracias por brindarme su amistad y confianza.

Mario Alberto

DEDICATORIA

Con cariño y gratitud quiero dedicar este trabajo a mis padres Mario y Cecilia por todo el amor, la abnegación, las enseñanzas y el apoyo incondicional que desde niño me han brindado. Gracias a ustedes soy lo que soy. Constituyen un ejemplo para mí.

De igual manera a mi hermana Diana Mercedes por estar junto a mí en todo momento, por sus palabras y mensajes alentándome a seguir siempre adelante. Éxito en tus estudios y carrera profesional. ¡Ánimo!

A toda mi querida familia, a mis abuelos quienes están en un lugar muypreciado de mi corazón, a mis tíos y a mis primos; por la preocupación, consideración y estima que siempre han demostrado hacia mí. Ustedes también forman parte de la consecución de esta meta.

Mario Alberto

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Sixto Ernesto García-Aguilar, Ph.D.

SUBDECANO DE LA FIEC



Nelson Alexander Pérez García, Ph.D.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



Vladimir Sánchez, M.Sc.

MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Mario Alberto Molina Reino

RESUMEN

El adecuado funcionamiento de una red inalámbrica de área local o WLAN (*Wireless Local Area Network*), en cualquier tipo de ambiente (exterior o interior), se basa principalmente en la correcta planificación y dimensionamiento del sistema. Para tal efecto juega un papel preponderante la acertada selección de un modelo de propagación que permita planificar y dimensionar el sistema de telecomunicaciones con el menor grado de imprecisión posible.

En ese sentido, en el caso específico de ambientes exteriores, el modelo de propagación a utilizar debe ser seleccionado de acuerdo a las características geográficas y de propagación del ambiente donde se implementará la red WLAN.

En el presente trabajo se desarrolla un modelo de propagación para ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca, Ecuador; ciudad ubicada en la región de la Sierra, a 2500 m de altura sobre el nivel del mar, con un clima primaveral durante todo el año y una temperatura promedio anual de 15° C. El modelo está basado en mediciones del nivel de señal recibido en redes WLAN operando en 2.4 GHz y 5.8 GHz. Para el desarrollo en cuestión se emplea una combinación de la clásica técnica de regresión lineal con la técnica de regresión no lineal Quasi-Newton.

El desempeño del nuevo modelo de propagación fue comparado, mediante la métrica conocida como raíz del error medio cuadrático (RMSE, *Root Mean Square Error*), con el desempeño arrojado por algunos de los modelos existentes en la literatura para ambientes exteriores. Los resultados obtenidos muestran la mejor precisión obtenida por parte del nuevo modelo de propagación para todos los ambientes exteriores considerados.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiii
CAPÍTULO 1	
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Identificación del Problema.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Solución Propuesta.....	2
1.4 Objetivos del Trabajo de Titulación.....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos.....	3
1.5 Metodología.....	4
1.6 Alcance.....	5
CAPÍTULO 2	
2. PRINCIPALES ASPECTOS SOBRE REDES WLAN Y PROPAGACIÓN EN AMBIENTES EXTERIORES.....	6
2.1 Principales Características de Redes WLAN.....	6
2.1.1 Estándar HiperLAN.....	8
2.1.2 Estándar 802.11b/g.....	9
2.1.3 Estándar IEEE 802.11a.....	10
2.1.4 Estándar IEEE 802.11n.....	11

2.1.5 Otros estándar IEEE 802.11.....	12
2.2 Aspectos de Propagación en Ambientes Exteriores para Redes WLAN.....	14
2.2.1 Pérdidas de propagación con la distancia.....	14
2.2.2 Reflexión.....	15
2.2.3 Difracción.....	16
2.2.4 Dispersión.....	17
2.2.5 Efecto de la múltiple trayectoria.....	18
2.3 Modelos de Propagación en Ambientes Exteriores usados en Redes WLAN.....	18
2.3.1 Modelo de Young.....	19
2.3.2 Modelo de Longley-Rice.....	20
2.3.3 Modelo de Okumura.....	21
2.3.4 Modelo de Okumura-Hata.....	23
2.3.5 Modelo extendido de Hata (COST-231 Hata).....	24
2.3.6 Modelo SUI (<i>Stanford University Interim</i>).....	24
2.3.7 Modelo de Sakagami-Kuboi.....	26
2.3.8 Modelo de Walfisch-Bertoni.....	27
2.3.9 Modelo Venezuela-Colombia.....	28
CAPÍTULO 3	
3. REALIZACIÓN DE MEDICIONES EN AMBIENTES EXTERIORES DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR.....	30
3.1 Equipo Utilizado para la Realización de las Mediciones.....	30
3.1.1 Transmisor.....	30
3.1.2 Receptor.....	31
3.2 Software utilizado para la Medición del Nivel de Señal Recibido.....	32
3.3 Ambientes Exteriores Considerados para las Mediciones....	34
3.4 Resultados Obtenidos.....	36
3.4.1 Ambientes Urbanos.....	37
3.4.2 Ambientes Semiurbanos.....	41

3.4.3 Ambientes Abiertos	42
CAPÍTULO 4	
4. DESARROLLO DEL MODELO SEMI-EMPÍRICO DE PROPAGACIÓN EN AMBIENTES EXTERIORES.....	44
4.1 Técnica de Regresión para Ajuste de Funciones	44
4.2 Curvas de Correlación entre las Variables de Medición	46
4.3 Desarrollo del Modelo de Propagación	47
4.4 Análisis Comparativo de Resultados	55
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
GLOSARIO.....	69
APÉNDICE 1	
A1. FOTOGRAFÍAS DE LOS AMBIENTES EXTERIORES CONSIDERADOS PARA LAS MEDICIONES.....	71
A2. ABREVIATURAS.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Arquitectura de una red WLAN.....	7
Figura 2.2. Técnica OFDM.....	9
Figura 2.3. Tecnología de antena SISO.....	9
Figura 2.4. Tecnología de antena MIMO.....	11
Figura 2.5. Fenómeno de reflexión de una onda electromagnética.....	16
Figura 2.6. Fenómeno de difracción de una onda electromagnética.....	17
Figura 2.7. Fenómeno de dispersión de una onda electromagnética.....	17
Figura 2.8. Múltiple trayectoria.....	18
Figura 2.9. Desvanecimiento debido a la múltiple trayectoria.....	19
Figura 2.10. Geometría para el modelo de Walfisch-Bertoni.....	27
Figura 3.1. Enrutador inalámbrico TP-LINK N750 TL-WDR4300.....	31
Figura 3.2. Adaptador USB TP-LINK N600 TL-WDN3200.....	32
Figura 3.3. Pantalla principal del software WirelessMon 4.0.....	33
Figura 3.4. Cuadro de configuración “ <i>General Options</i> ”.....	33
Figura 3.5. Ejemplo de reporte con la información de la red WLAN.....	34
Figura 3.6. Estructura metálica para variar la altura del transmisor.....	36
Figura 3.7. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, h = 2.5 m, ambiente AU1.....	37
Figura 3.8. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, h = 2.5 m, ambiente AU2.....	38
Figura 3.9. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, h = 2.5 m, ambiente AU3.....	38
Figura 3.10. Nivel de señal recibido vs distancia, en función de la altura del transmisor, f = 2.4 GHz, ambiente AU1.....	39
Figura 3.11. Nivel de señal recibido vs distancia, en función de la altura del transmisor, f = 5.8 GHz, ambiente AU1.....	40
Figura 3.12. Nivel de señal recibido vs distancia, en función de la altura del transmisor, f = 2.4 GHz, ambiente AU2.....	40
Figura 3.13. Nivel de señal recibido vs distancia, en función de la altura del transmisor, f = 5.8 GHz, ambiente AU2.....	41

Figura 3.14. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, h = 2.5 m, ambiente ASU1	42
Figura 3.15. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, h = 2.5 m, ambiente AA1	42
Figura 4.1. Curva de correlación entre el nivel de señal recibido y la altura del transmisor.....	46
Figura 4.2. Curva de correlación entre el nivel de señal recibido y la frecuencia de operación.....	47
Figura 4.3. Uso del Statistica para la primera fase del desarrollo del Modelo.....	48
Figura 4.4. Valores medidos y estimados, primera fase del desarrollo del modelo, h = 2.5 m, f = 2.4 GHz.....	50
Figura 4.5. Valores medidos y estimados, primera fase del desarrollo del modelo, h = 2.5 m, f = 5.8 GHz.....	51
Figura 4.6. Valores medidos y estimados, segunda fase del desarrollo del modelo, h = 2.5 m.....	52
Figura 4.7. Valores medidos y estimados, tercera fase del desarrollo del modelo, h = 2.5 m.....	54
Figura 4.8. Valores medidos y estimados para el ambiente AU3 (f = 2.4 GHz, h = 2.5 m).....	56
Figura 4.9. Valores medidos y estimados para el ambiente ASU1 (f = 5.8 GHz; h = 2.5 m).....	56
Figura 4.10. Valores medidos y estimados para el ambiente AA1 (f = 2.4 GHz, h = 2.5 m).....	57
Figura 4.11. Valores medidos y estimados para el ambiente AU1 (f = 5.8 GHz, h = 1.9 m).....	57
Figura 4.12. Valores medidos y estimados para el ambiente AU2 (f = 2.4 GHz, h = 2.2 m).....	58
Figura A.1. Ambiente de medición AU1.....	71
Figura A.2. Ambiente de medición AU2.....	72
Figura A.3. Ambiente de medición AU3.....	73
Figura A.4. Ambiente de medición ASU1.....	74
Figura A.5. Ambiente de medición AA1.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor de las constantes para el exponente de pérdidas γ	25
Tabla 2. Características técnicas del enrutador inalámbrico de TP-LINK N750 TL-WDR4300.....	31
Tabla 3. Valor de γ de acuerdo al tipo de ambiente.....	49
Tabla 4. Parámetros de Ajuste “A” y “B”.....	53
Tabla 5. Valores de los parámetros del <i>setup</i> experimental utilizado.....	55
Tabla 6. RMSE para el ambiente AU3 (f = 2.4 GHz, h = 2.5 m).....	59
Tabla 7. RMSE para el ambiente SU1 (f = 5.8 GHz, h = 2.5 m).....	59
Tabla 8. RMSE para el ambiente AA1 (f = 2.4 GHz, h = 2.5 m).....	59
Tabla 9. RMSE para el ambiente AU1 (f = 5.8 GHz, h = 1.9 m).....	59
Tabla 10. RMSE para el ambiente AU2 (f = 2.4 GHz, h = 2.2 m).....	60

INTRODUCCIÓN

Las ventajas inherentes a los servicios prestados a los usuarios por un determinado sistema de telecomunicaciones, inalámbrico o cableado, no serán tal si dicho sistema no es previamente planificado y dimensionado de manera que se tome en cuenta, por ejemplo, las características técnicas de los equipos a ser implantados, requerimientos de desempeño (por ejemplo, velocidad de transmisión) y características del canal de comunicación. En ese sentido, en el caso específico de las ampliamente utilizadas redes WLAN, comúnmente conocidas como redes WiFi (*Wireless Fidelity*), y en general, en sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, uno de los parámetros de mayor interés en ser previstos en el proceso de planificación y dimensionamiento (PyD) de dichos sistemas, es el relacionado con la cobertura, la cual a su vez está estrechamente relacionada con la pérdida que sufre la señal RF (radiofrecuencia) en el ambiente en el que se propaga. Tales pérdidas se estiman mediante la aplicación de los denominados modelos de propagación.

Al respecto, en la literatura aparecen reportados una significativa cantidad de modelos de propagación que pueden ser aplicados al caso de las redes WLAN, pero ninguno de ellos ha sido desarrollado para las características típicas del Ecuador en como por ejemplo morfología, orografía, atmósfera radioeléctrica que circunda los enlaces, entre otras. De forma que, el uso de dichos modelos en la PyD en el Ecuador, más concretamente, en la ciudad de Cuenca, conllevará a un aumento en la probabilidad de que el sistema, una vez puesto en operación, resulte con sobredimensionamiento o subdimensionamiento del mismo. En el primer caso, se acarreará una inversión económica innecesaria en equipos (bien sea por la cantidad y/o sus características técnicas, como potencia de transmisión, ganancia de las antenas, etc.), mientras que en el segundo caso, el impacto negativo será la insatisfacción por parte del usuario ante falta de cobertura del sistema, velocidad de transmisión lejana a la ofrecida, etc.

Es por ello que, en el presente trabajo, se desarrolla un modelo de propagación para ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca, Ecuador, basado en mediciones del nivel de señal recibido (nivel de potencia recibida) en redes WLAN operando en 2.4 GHz y 5.8 GHz, lo que permitirá que el mencionado modelo tome en cuenta, tanto

explícita como implícitamente, las características de propagación de dichos ambientes.

El trabajo en cuestión está estructurado de la siguiente manera:

- Capítulo 1: comprende los aspectos más relevantes relacionados con la identificación del problema, justificación de su resolución, solución propuesta, objetivos general y específicos, metodología a seguir para el desarrollo de los objetivos y el alcance.
- Capítulo 2: se hace una revisión bibliográfica del estado del arte de las redes WLAN con énfasis en las redes del estándar IEEE 802.11 y sus respectivas variantes. Asimismo, se revisan los principales aspectos de propagación en ambientes exteriores, así como algunos de los modelos de propagación existentes en la literatura para ambientes exteriores, con aplicabilidad en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz.
- Capítulo 3: se detalla las mediciones del nivel de señal recibido realizadas en ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca. En ese sentido, se dan a conocer las características técnicas y la configuración de los equipos utilizados y los ambientes específicos seleccionados para las mediciones. Finalmente, se muestran y analizan los resultados obtenidos.
- Capítulo 4: puntualiza el desarrollo del modelo semi-empírico de propagación como tal, para ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca, en base a las mediciones reportadas en el Capítulo 3. Se evalúa el desempeño del modelo desarrollado mediante la comparación del mismo con el desempeño arrojado por algunos de los modelos de la literatura considerados en el Capítulo 2.

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este capítulo trata de los aspectos más importantes relacionados con el origen y desarrollo del trabajo, tales como la identificación del problema que se desea solucionar, su respectiva justificación de abordaje, una descripción de la solución que se propone para enfrentar el problema planteado, los objetivos (general y específicos) trazados para la consecución de la meta, la metodología aplicada para lograr los objetivos y, finalmente, la delimitación del alcance del trabajo.

1.1 Identificación del Problema

Entre las principales aristas que contempla el proceso de planificación y dimensionamiento (PyD) de un sistema inalámbrico de telecomunicaciones, como por ejemplo, las redes WLAN (*Wireless Local Area Network*), está el segmento de radio propagación, el cual considera los aspectos que impactan la propagación de la señal RF (radiofrecuencia) entre el transmisor y receptor, que inciden directamente en el nivel de señal recibido (nivel de potencia recibida) y, en consecuencia, en la distancia de cobertura del sistema. Dichos aspectos son tomados en cuenta a través de los modelos de propagación, entre los cuales se tienen, para el caso específico de ambientes exteriores, los modelos de Young [1], Longley-Rice [2], Okumura [3], Okumura-Hata [4], Extendido de Hata (COST-231 Hata) [5], SUI (*Stanford University Interim*) [6, 7], Sakagami-Kuboi [8, 9], Walfisch-Bertoni [10], Venezuela-Colombia [11], entre otros.

Ahora bien, ninguno de esos modelos ha sido desarrollado para las características típicas de propagación de Ecuador, tales como atmósfera radioeléctrica, geografía, orografía, morfología, entre otras, razón por la cual, la aplicación de dichos modelos en la planificación y dimensionamiento de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones en el Ecuador y, específicamente, en la ciudad de Cuenca, aumentará la probabilidad de sobredimensionar o subdimensionar dichos sistemas, generando, en el primer caso, una inversión económica en equipos

innecesaria por parte del operador y, en el segundo caso, insatisfacción en el usuario por la falta de cobertura del sistema.

1.2 Justificación

Por lo expuesto en la sección 1.1, se torna necesario el desarrollo de un modelo de propagación, basado en mediciones realizadas localmente, que se compagine con las características de propagación propias de la ciudad de Cuenca, lo que redundará en la disminución de la magnitud de un eventual sobredimensionamiento o subdimensionamiento de redes WLAN, planificadas y dimensionadas para operar en ambientes exteriores de la referida ciudad. Con ello, se tendrá un menor grado de imprecisión en la predicción del nivel de señal recibido y la distancia de cobertura.

Además, dicho modelo también podrá arrojar buenos resultados cuando se aplique en sistemas de telecomunicaciones que operen en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz, en ambientes exteriores con características de propagación similares a los de la ciudad de Cuenca.

Asimismo, el esfuerzo a desplegar mediante el desarrollo del presente trabajo de titulación se sumará al ya realizado por Hernández [12], para continuar impulsando campañas de mediciones de radio propagación desde uno de los ámbitos naturales para la investigación, como lo son, las instituciones universitarias del país.

Adicionalmente, con dicho esfuerzo también se estará contribuyendo, de alguna manera, con las políticas de la ITU (*International Telecommunications Union*) de motivar la realización de campañas de mediciones en radio propagación en el mundo entero [13, 14].

1.3 Solución Propuesta

La solución propuesta consiste en una ecuación que permitirá estimar las pérdidas de propagación en ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca, Ecuador, y en general, posiblemente en ambientes exteriores de otras localidades con características de propagación similares, en función de tres (3) factores que típicamente influyen en la pérdida que sufre la señal RF en su recorrido desde el

transmisor hasta el receptor, como lo son la distancia, frecuencia de operación y altura del transmisor.

El modelo en cuestión será obtenido de forma semi-empírica mediante el ajuste de los parámetros de la ecuación del mismo, a las mediciones del nivel de señal recibido que se realizarán en redes WLAN operando en las frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz en los mencionados ambientes. Para el ajuste señalado se recurrirá a la clásica técnica de regresión lineal en conjunto con la técnica de regresión no lineal Quasi-Newton, de forma similar a como se procede en [11, 12], Finalmente, para evaluar el buen desempeño del modelo desarrollado, se hace una comparación, en términos del RMSE, con algunos de los modelos existentes en la literatura.

1.4 Objetivos del Trabajo de Titulación

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de propagación para la predicción de pérdidas de propagación en redes WLAN operando en 2.4 GHz y 5.8 GHz, en ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar el estado del arte de las redes WLAN (*Wireless Local Area Network*), con especial énfasis en las redes basadas en el estándar IEEE 802.11.
- Estudiar el estado del arte de los principales modelos de propagación utilizados en la planificación y dimensionamiento (PyD) de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones que operan en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz, y cercanas a las mismas, en ambientes exteriores.
- Realizar mediciones de campo, específicamente, del nivel de señal recibido (nivel de potencia recibida), en ambientes exteriores, en las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz.

- Desarrollar un modelo de propagación para las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz, para ambientes exteriores, desarrollado en base a las mediciones realizadas.
- Comparar, en términos del RMSE, el desempeño del modelo desarrollado, con algunos de los modelos existentes en la literatura.

1.5 Metodología

El cumplimiento de los dos (2) primeros objetivos específicos se logrará mediante una revisión bibliográfica, sobre los asuntos especificados, es decir, estado del arte de las redes WLAN (con énfasis en las redes del estándar IEEE 802.11) y el estado del arte de los modelos de propagación para ambientes exteriores con aplicabilidad en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz.

Por su parte, el tercer objetivo será alcanzado a través de la configuración de un *setup* (conjunto de equipos y materiales) experimental constituido básicamente por un enrutador inalámbrico (que hará las veces de transmisores) operando en las bandas de interés, es decir, 2.4 GHz y 5.8 GHz, y un computador portátil o laptop con software para captura de niveles de señales recibidos (que hará las veces de receptor). Las mediciones serán realizadas en una calle residencial, parque o plaza pública, patio interno de una institución educativa y una zona abierta o rural. Se tomará en cuenta la variación del nivel de señal recibido en función de la distancia entre transmisor y receptor, la altura del transmisor y la frecuencia de operación, así como también, aunque de manera implícita, la influencia de la orografía, morfología, objetos dispersores de la señal RF (por ejemplo, vehículos, paredes externas de edificios, etc.), entre otros.

Es importante resaltar que dado que las distancias de cobertura para las redes WiFi (como también suelen ser conocidas las redes WLAN), en ambientes exteriores son relativamente cortas, se usará una cinta métrica para medir la distancia entre transmisor y receptor, para cada punto de medición. Los errores introducidos por esta metodología no implican un impacto significativo en los resultados a obtener.

El cuarto objetivo planteado será posible mediante el análisis de las medidas realizadas y el uso de técnicas de regresión lineal y no lineal, de ser necesario, ya

implementadas en la herramienta computacional Statistica, entre otros, que permitirán obtener la (s) ecuación (es) empírica (s) que mejor se ajuste (n) a las mediciones realizadas.

Ahora bien, de acuerdo a experiencias previas en el modelado de pérdidas de propagación para ambientes exteriores, el desarrollo del modelo se llevará a cabo en tres (3) fases. La primera que consistirá en una aproximación para el modelo semi-empírico a ser desarrollado, en la cual dichas pérdidas varíen linealmente con el logaritmo de la distancia. En la segunda fase se adicionará un factor dependiente de la frecuencia de operación y, finalmente, en la tercera fase se incorporará también, de manera explícita, el efecto de la altura del transmisor.

Finalmente, para la comparación del desempeño del modelo desarrollado con el desempeño que arrojen los modelos de la literatura que se incluyan en dicha comparación, se utilizará el valor RMSE (*Root Mean Square Error*) entre los valores medidos y los valores estimados por los modelos, incluyendo el modelo que será desarrollado en el presente trabajo.

1.6 Alcance

Un modelo de propagación que permita estimar el nivel de señal recibido, y en consecuencia, la distancia de cobertura, de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones que operen en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz, en ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca, Ecuador, y en ambientes exteriores con características de propagación similares a los de dicha ciudad.

Asimismo, el desarrollo del presente trabajo formará parte del impulso para la realización de investigaciones y desarrollos similares que se viene dando en la ESPOL, no sólo en las bandas de frecuencia y ambientes señalados, sino también en otras bandas de frecuencia y/u otros ambientes. Por tanto, se trata de la continuación de la gran campaña de mediciones de radio propagación por parte de la ESPOL.

CAPÍTULO 2

2. PRINCIPALES ASPECTOS SOBRE REDES WLAN Y PROPAGACIÓN EN AMBIENTES EXTERIORES

En este capítulo, se realiza una revisión de los aspectos más resaltantes relacionados con las redes WLAN. Asimismo, se hace un sucinto abordaje de los principales estándares IEEE 802.11 para dichas redes. Adicionalmente, se estudian los aspectos que predominan en la propagación de la señal RF en ambientes exteriores, para las frecuencias de operación de 2.4 GHz y 5.8 GHz, que están directamente en las pérdidas que sufre dicha señal durante su recorrido hasta el receptor. Finalmente, se abordan algunos de los modelos existentes en la literatura para la predicción de pérdidas de propagación en ambientes exteriores.

2.1. Principales Características de Redes WLAN

Las redes WLAN (*Wireless Local Area Network*) permiten transmitir información entre transmisor y receptor mediante ondas electromagnéticas que se propagan a través del aire. Esa característica ofrece a los usuarios de la red una gran portabilidad dentro del área de cobertura de la misma sin perder conexión; además, hace posible la conectividad desde cualquier equipo terminal o unidad de usuario asociada a la red, es decir, computador portátil, teléfono celular, tableta, *smart TV*, consola de juegos, etc. Una red WLAN es fácil de ser instalada y su costo de implementación es menor en comparación a una red basada en un medio de transmisión cableado [15].

En la Figura 2.1, se ilustra la arquitectura básica de una red WLAN, conformada por el proveedor de servicios de Internet o ISP (*Internet Service Provider*) y al menos un AP (*Access Point*) o enrutador inalámbrico, encargado de suministrar la conexión inalámbrica a Internet a las unidades de usuarios (UU) [12, 16].

Las bandas de frecuencia usadas por las redes WLAN son las llamadas no licenciadas o de libre uso, es decir, las bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), entre ellas, 2.4 GHz y 5.8 GHz.

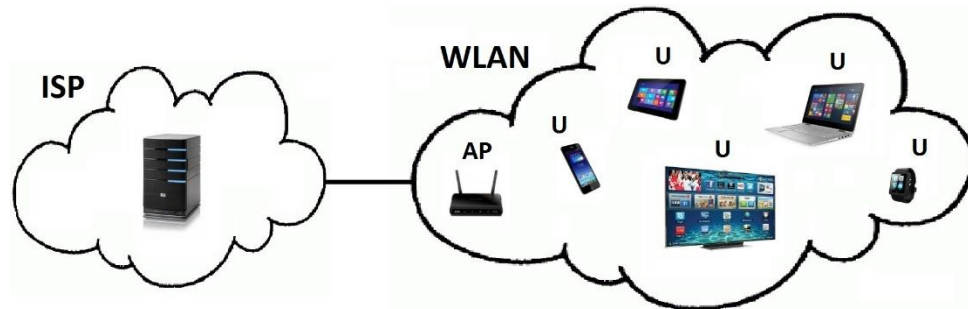


Figura 2.1. Arquitectura de una red WLAN.

Por otra parte, los rangos de cobertura típicos a ser alcanzados por una WLAN van desde los 10 metros (ambientes interiores del tipo oficinas, habitaciones) y 50 metros o un poco más (pasillos o corredores) hasta los 100 metros o un poco más (ambientes exteriores).

El organismo que, por así decirlo, más se ha dedicado a establecer las normas técnicas de las redes WLAN es el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). En ese sentido, el primer estándar WLAN definido por el organismo fue IEEE 802.11 [17], fue lanzado en 1997, con velocidad de transmisión máxima de 2 Mbps, operando en la frecuencia de 2.4 GHz, ancho de banda del canal de 22 MHz y cobertura de hasta 20 metros y 100 metros, para ambientes interiores y exteriores, respectivamente. Adicionalmente, incluyó técnica de corrección de error (FEC, *Forward Error Correction*) y dos formas de mitigar la interferencia: espectro expandido por secuencia directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) y espectro expandido por salto de frecuencia (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*) [15, 17]. Posteriormente, surgieron otros estándares IEEE 802.11 mejorados para WLAN.

Asimismo, el ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), que es el organismo de estandarización de Europa creó su estándar para redes WLAN, conocido como HiperLAN (*High Performance Radio Local Area Network*). A

continuación, se abordarán algunas de las características más resaltantes de los estándares para WLAN.

2.1.1. Estándar HiperLAN

El estándar HiperLAN fue definido por la ETSI en el marco del proyecto denominado BRAN (*Broadband Radio Access Networks*).

La primera fase del proyecto arrojó como resultado, en 1999, el estándar HiperLAN/1, para servicio en ambientes interiores. HiperLAN/1 ofrece velocidades de transmisión de 23.5 Mbps, en la bandas de frecuencias de 5.15 GHz a 5.30 GHz y 17.1 GHz a 17.30 GHz y con una cobertura de hasta 50 metros. Es compatible con redes LAN cableadas basadas en Ethernet y estándares *Token Ring* [18, 19].

La segunda fase del proyecto, HiperLAN/2, fue lanzada en el año 2000, con velocidades de transmisión de 6 Mbps a 54 Mbps, en la banda de frecuencia de 5 GHz, ancho de banda del canal de 20 MHz y cobertura de hasta 50 m para ambientes interiores y hasta 100 m para ambientes exteriores [19]. Utiliza la técnica de multiplexación por división ortogonal de frecuencias (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), dividiendo el canal de radio, en este caso, en 52 subportadoras (48 para datos y 4 para señales pilotos), tal como ilustra la Figura 2.2 [20]. Entre las ventajas de OFDM está la de disminuir los efectos por el desvanecimiento por múltiple trayectoria, mitigando la interferencia intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*). HiperLAN/2 es compatible con redes IP (*Internet Protocol*), ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) y UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*); motivo por el cual, se puede integrar a redes celulares, WiMax, entre otras [21].

Además de OFDM, en HiperLAN/2 también se implementa la técnica de detección de error FEC, un proceso de punción o *puncturing* (para hacer posible el uso de códigos FEC con otras tasas) y un bloque intercalador o *interleaving* (para minimizar los errores asociados a la ráfaga de datos proveniente de un proceso previo de mezclado o *scrambling* de los datos con una secuencia pseudoaleatoria de longitud 127). Asimismo, las

subportadoras de OFDM se modulan con BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) o QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ó 64-QAM [12].

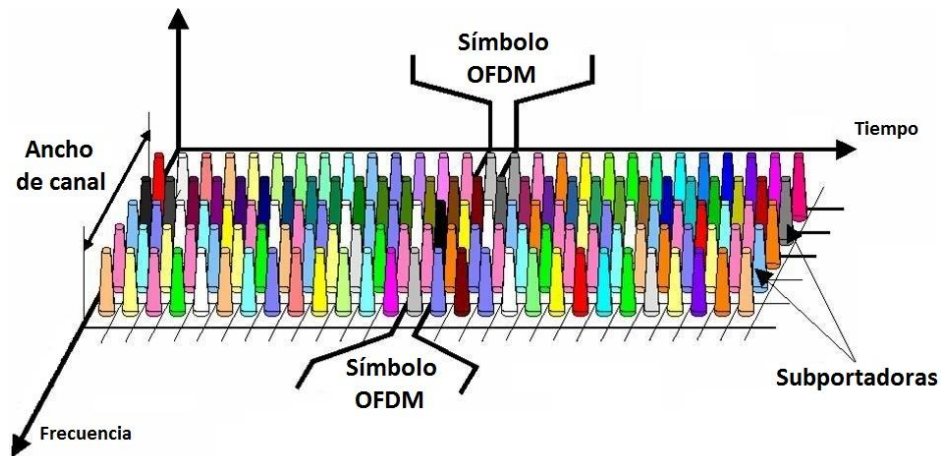


Figura 2.2. Técnica OFDM.

2.1.2. Estándar 802.11b/g

El estándar IEEE 802.11b fue creado en 1999, motivado por el creciente aumento de la demanda en el uso redes WLAN. En ese sentido, IEEE 802.11b ofrece velocidades de transmisión hasta 11 Mbps, opera en la frecuencia de 2.4 GHz, posee un ancho de banda del canal de 22 MHz y tiene una cobertura aproximada de hasta 140 metros (en ambientes exteriores). Se basa en la técnica DSSS y emplea tecnología de antena SISO (*Single Input Single Output*) [22], es decir, una sola antena en el transmisor y una sola antena en el receptor, tal como se observa en la Figura 2.3.

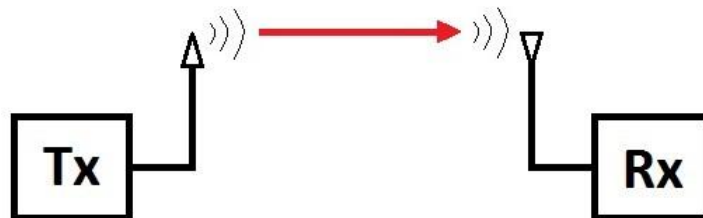


Figura 2.3. Tecnología de antena SISO.

En ese mismo año 1999, la WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*) adoptó el nombre WiFi (*Wireless Fidelity*) como marca que certifica la interoperabilidad entre productos que cumplen con el estándar IEEE 802.11b.

Por su parte, el estándar IEEE 802.11g fue lanzado en el 2003, nuevamente como respuesta a la reiterada necesidad de proporcionar mayores velocidades de transmisión. Es así que, IEEE 802.11g ofrece velocidades de transmisión de hasta 54 Mbps, también en la frecuencia de 2.4 GHz, posee un ancho de banda del canal de 20 MHz y hasta 140 metros de cobertura (ambientes exteriores). De manera similar a IEEE 802.11b, emplea DSSS y tecnología de antena SISO; sin embargo, a diferencia de IEEE 802.11b, utiliza OFDM [22].

Con la implementación del estándar IEEE 802.11g se buscó satisfacer servicios que requieren mayor ancho de banda, como por ejemplo video multimedia y señales MPEG (*Moving Picture Experts Group*). IEEE 802.11g también puede trabajar a velocidades de 11 Mbps, por lo que es compatible con los dispositivos del estándar IEEE 802.11b (con excepción de equipos muy antiguos), debido a que operan en la misma frecuencia de 2.4 GHz [15, 23].

2.1.3. Estándar IEEE 802.11a

Conocido también como WiFi-5, el estándar IEEE 802.11a fue creado en el mismo año que su estándar homólogo IEEE 802.11b, es decir, en 1999, pero para operar en la banda de 5 GHz.

IEEE 802.11a presenta velocidades de transmisión de 6 Mbps a 54 Mbps, en canales de 20 MHz y con cobertura aproximada de hasta 120 metros (en ambientes interiores). También emplea la técnica OFDM y tecnología de antena SISO [22].

Adicionalmente, existe otra versión del estándar IEEE 802.11a, que opera en la frecuencia de 3.7 GHz y contempla coberturas, en ambientes exteriores, de hasta 5 km [22].

Por otro lado, a rigor, los dispositivos del estándar 802.11a no son compatibles con los dispositivos del estándar 802.11b, debido a que operan en frecuencias diferentes. Sin embargo, se han incorporado equipos con dos *chips* para que puedan operar en la banda de 2.4 GHz y de 5 GHz. Dichos equipos son conocidos como dispositivos de banda dual [15, 23].

2.1.4. Estándar IEEE 802.11n

El estándar IEEE 802.11n fue lanzado en el 2009 y puede operar simultáneamente en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz, razón por la cual es compatible con cualesquiera de los estándares anteriores 802.11b, 802.11g y 802.11a.

El estándar IEEE 802.11n puede contemplar dos anchos de banda del canal [22]:

- Ancho de banda del canal de 20 MHz: con velocidades de transmisión de 7.2 Mbps a 72.2 Mbps y cobertura de hasta aproximadamente 70 m y 250 m, para ambientes interiores y exteriores, respectivamente.
- Ancho de banda del canal de 40 MHz: con velocidades de transmisión de 15 Mbps a 150 Mbps y cobertura similar al caso anterior (ancho de canal de 20 MHz).

En cualquiera de los dos casos, el estándar emplea OFDM y la tecnología de antena MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), es decir, múltiples antenas en el transmisor y múltiples antenas en el receptor [22], como se muestra en la Figura 2.4.

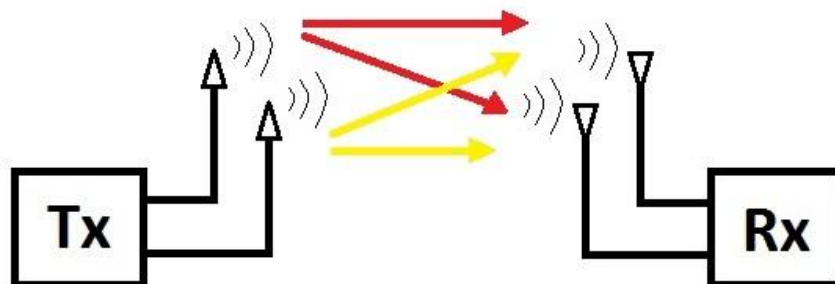


Figura 2.4. Tecnología de antena MIMO.

El aumento de la velocidad de transmisión y distancia de cobertura con relación a los estándares anteriores se debe principalmente al incremento del ancho de banda del canal de radio a 40 MHz y a la utilización de la tecnología de antena MIMO.

La tecnología MIMO usa un conjunto de antenas transmisoras y receptoras 2x2, como el ilustrado en la Figura 2.4, o también 4x4. Gracias a las técnicas de diversidad espacial y multiplexado espacial, el sistema selecciona la mejor de las varias señales que recibe simultáneamente, lo que conlleva a una mejora de la calidad y fiabilidad del enlace. De esa manera, se pueden proveer velocidades de transmisión teóricas de hasta 600 Mbps. Específicamente, la técnica de la diversidad espacial en el transmisor y receptor reduce la tasa del error del bit (BER, *Bit Error Rate*) y mejora la eficiencia espectral mediante el uso de esquemas de modulación de niveles superiores, mientras que con la técnica del multiplexado espacial se logran elevadas velocidades de transmisión debido a la transmisión de flujos de datos simultáneos por cada una de las diferentes antenas, sin necesidad de utilizar una mayor potencia o incrementar el ancho de banda [24, 25].

2.1.5. Otros Estándares IEEE 802.11

Además de los estándares IEEE 802.11 mencionados anteriormente, existen otros que representan mejoras, bien sea en términos de la velocidad de transmisión o de la distancia de cobertura, o ambos a la vez.

- IEEE 802.11ac: fue lanzado en el 2013. Oficialmente, representa la quinta generación (5G) de estándares para redes WiFi, opera en la frecuencia de 5 GHz y contempla los siguientes anchos de banda del canal [22]:
 - Ancho de banda del canal de 20 MHz: con velocidades de transmisión de 7.2 Mbps a 96.3 Mbps.
 - Ancho de banda del canal de 40 MHz, con velocidades de transmisión de 15 Mbps a 200 Mbps.

- Ancho de banda del canal de 80 MHz: con velocidades de transmisión de 32.5 Mbps a 433.3 Mbps.
- Ancho de banda del canal de 160 MHz: con velocidades de transmisión de 65 Mbps a 866.7 Mbps.

IEEE 802.11ac emplea OFDM y MIMO. Su cobertura es de hasta aproximadamente 35 metros (ambientes interiores), pudiendo alcanzar 80 metros, empleando la técnica MU-MIMO (*Multiuser MIMO*). El estándar incorpora el uso de modulación 256-QAM y la detección y corrección de errores mediante códigos LDPC (*Low Density Parity Check*) [26].

- IEEE 802.11ad: aprobado en 2012 y también llamado WiGig (*Wireless Gigabit Alliance*), opera en la banda de frecuencia no licenciada de 60 GHz (entre 57 GHz y 66 GHz) y es muy susceptible a la atenuación por lluvias y presencia de obstáculos en la trayectoria directa de la señal RF entre transmisor y receptor. El estándar IEEE 802.11ad posee un ancho de banda del canal de aproximadamente 2 GHz, ofrece velocidades de transmisión de hasta 7 Gbps y su cobertura está en principio destinada para ambientes interiores, con 10 metros de alcance (con línea de vista directa, sin obstáculos en la trayectoria directa de la señal RF y sin antenas externas adicionales ni amplificadores) [27] y hasta 200 metros pero con velocidad de transmisión hasta 2 Gbps [28]. Entre sus principales aplicaciones están la transmisión de video *streaming* en HD (*High Definition*) o UHD (*Ultra HD*) [27, 29].
- IEEE 802.11ah: lanzado en septiembre 2016, opera en la banda de frecuencia no licenciada de 900 MHz. Contempla anchos de banda del canal de 1 MHz, 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz y 16 MHz. Utiliza OFDM y MU-MIMO. Debido a las características de propagación favorables en una banda de menor frecuencia como lo es 900 MHz, la cobertura del estándar se estima hasta 1.5 km, pero con velocidad de transmisión menor, de hasta 150 kbps (se espera lograr hasta 346 Mbps) [28].

- IEEE 802.11ax: con lanzamiento previsto en 2019, reemplazará a los estándares IEEE 802.11n e IEEE 802.11ac. Operará simultáneamente en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz, con velocidades de transmisión cuatro veces más altas en comparación con el estándar IEEE 802.11ac, gracias a la utilización de tecnologías tales como, DCCA (*Dynamic Clear Channel Assessment*), OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y MU-MIMO [30].

2.2. Aspectos de Propagación en Ambientes Exteriores para Redes WLAN

En una WLAN, si no existen obstáculos en el camino entre las antenas transmisora y receptora, la señal puede alcanzar al receptor a través de una trayectoria con línea de vista directa (LOS, *Line of Sight*). En caso contrario, es decir, trayectoria sin línea de vista directa (NLOS, *Non Line of Sight*), la señal puede completar el recorrido hasta el receptor mediante los mecanismos de reflexión, difracción, dispersión y múltiple trayectoria.

La reflexión tiene lugar cuando la onda electromagnética cambia de dirección y después de incidir en la superficie de separación de dos medios eléctricamente diferentes, regresa al medio de propagación original; mientras que la difracción ocurre cuando la onda sufre un desvío en su trayectoria debido a bordes de obstáculos e incluso al atravesar rendijas o agujeros. A su vez, la dispersión tiene lugar cuando la trayectoria de la onda, al encontrarse con un medio eléctricamente diferente, se descompone en diversas trayectorias hacia atrás, hacia adelante y hacia los lados. Finalmente, la múltiple trayectoria es consecuencia del arribo de la señal receptor a través de diferentes trayectos, de manera que la señal recibida será igual a la suma vectorial de todas las ondas que llegan hasta el receptor.

2.2.1. Pérdidas de propagación con la distancia

Aún en ausencia de obstáculos que afecten la trayectoria directa de la señal electromagnética entre las antenas transmisora y receptora, es decir, en condiciones de espacio libre, en todo sistema inalámbrico de comunicaciones, como es el caso de las redes WLAN, dicha señal pierde energía cuanto más se aleje de la fuente o transmisor. Ello se debe a que a medida que la señal se separa de la antena transmisora el área de la

superficie del frente de onda, que es esférico, aumenta, por lo que, de acuerdo a la ley de conservación de la energía, al incrementarse la mencionada área, la energía contenida en el frente de onda debe disminuir [31].

En consecuencia, en el espacio libre, la potencia de señal o su campo eléctrico asociado disminuye con el cuadrado de la distancia, “d”, desde la fuente.

Pérdidas en espacio libre

En el mejor de los casos, es decir, espacio libre, la menor pérdida de propagación que sufre la señal, en un sistema inalámbrico de comunicaciones, en su recorrido hasta el transmisor, además de incrementarse con el cuadrado de la distancia respecto a la fuente, también se incrementa con el cuadrado de la frecuencia de operación del sistema, “f”. La ecuación que permite hallar las pérdidas de propagación en espacio libre (L_{el}), en decibelios, es dada por [3, 4]:

$$L_{el}(\text{dB}) = 32,45 + 20\log f + 20\log d \quad (2.1)$$

Donde “f” está dada en MHz y “d” en kilómetros.

De forma general, la ecuación (2.1) se puede escribir como:

$$L_{el}(\text{dB}) = L_o + 10\gamma\log d \quad (2.2)$$

Donde γ es el exponente de pérdidas de potencia con la distancia.

Por tanto, para el caso de espacio libre, γ es igual a 2.

Ahora bien, en situaciones reales, la gran mayoría de los sistemas operan en condiciones de NLOS, por lo que, a pesar de que la forma general de expresar las pérdidas de propagación es similar a la ecuación (2.2), el exponente de pérdidas γ es diferente de 2 [4, 32, 33].

2.2.2. Reflexión

Tal como fue mencionado anteriormente, una onda reflejada es producida cuando la señal electromagnética alcanza una superficie de separación

entre dos medios diferentes desde el punto de vista eléctrico; en consecuencia, al menos parte de la energía de la señal incidente no pasa al otro medio, sino que se propaga en su medio original, aunque en otra dirección distinta a la que traía inicialmente, tal como se puede observar en la Figura 2.5.

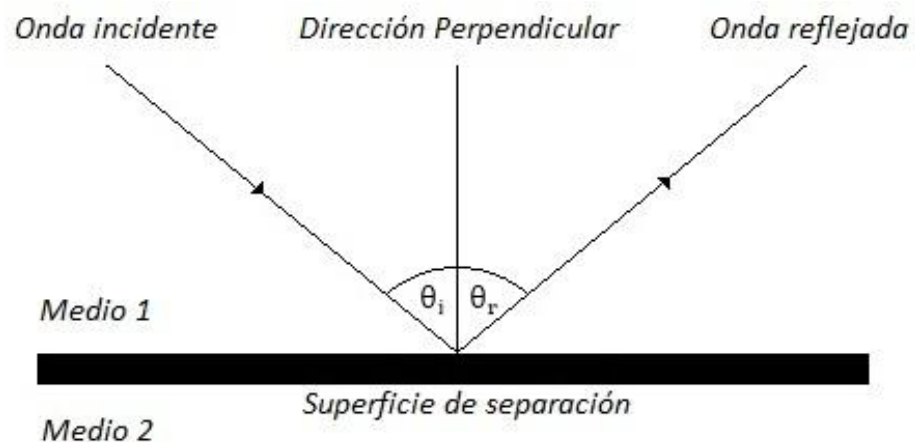


Figura 2.5. Fenómeno de reflexión de una onda electromagnética.

En la Figura 2.5, la dirección perpendicular es en relación a la superficie de separación de los dos medios, mientras que θ_i y θ_r son los ángulos que forman las ondas incidente y reflejadas con dicha dirección, respetivamente. Las mencionadas ondas están contenidas en un mismo plano y de acuerdo a la primera ley de Snell, los ángulos θ_i y θ_r deben ser iguales [34].

2.2.3. Difracción

Cuando una onda electromagnética incide en el borde de un obstáculo, parte de la señal continúa su trayectoria y la parte restante se dirige hacia la parte posterior del obstáculo. Este fenómeno, conocido como difracción, es explicado por el principio de Huygens [34], según el cual un frente de onda (esférico) cualquiera de la onda electromagnética que se está propagando, puede ser considerado como un conjunto de frentes de onda secundarios, también esféricos. Por tanto, la porción de frentes de onda secundarios del frente principal que está por arriba del obstáculo es la

responsable de irradiar energía atrás de dicho obstáculo, tal como se muestra en la Figura 2.6.

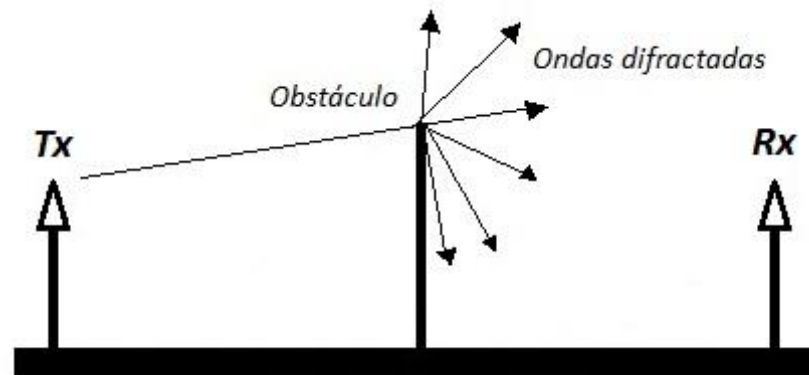


Figura 2.6. Fenómeno de difracción de una onda electromagnética.

2.2.4. Dispersión

El fenómeno de dispersión que una onda electromagnética puede sufrir en su camino hacia el receptor tiene lugar cuando la onda se encuentra con un medio eléctricamente diferente, lo que conduce a una descomposición de la trayectoria original en diversas direcciones que, en general, se orientan hacia atrás, hacia adelante y hacia los lados. En esa situación, parte de la señal puede alcanzar al receptor, como se ilustra en la Figura 2.7.

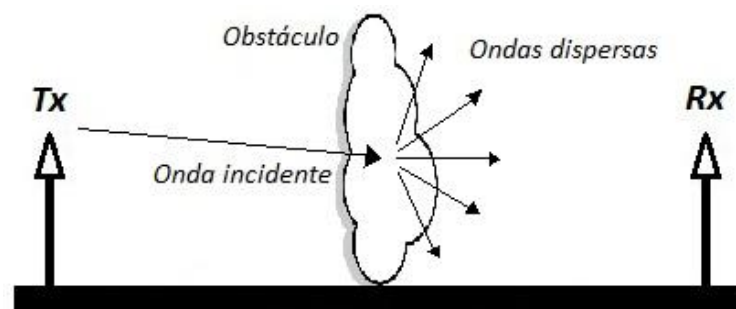


Figura 2.7. Fenómeno de dispersión de una onda electromagnética.

La dispersión de la señal puede ser causada por obstáculos tales como árboles, postes de alumbrado público, avisos de señalización, entre otros, así como irregularidades en la tropósfera y rugosidades en la superficie en la cual incide la onda [34, 35].

2.2.5. Efecto de la múltiple trayectoria

Como consecuencia de los fenómenos de reflexión, difracción, dispersión y otros que puedan modificar la trayectoria de la señal en su ruta hacia el receptor, en la mayoría de los sistemas inalámbricos de comunicaciones, como es el caso de las redes WLAN, la señal resultante en el receptor está conformada por diversas señales que arriban al mismo provenientes de múltiples trayectorias, con diversos tiempos de llegada, como puede observarse en la Figura 2.8 [35]. El campo eléctrico total en el receptor es la suma vectorial de todos los campos eléctricos correspondientes a las respectivas trayectorias [12].

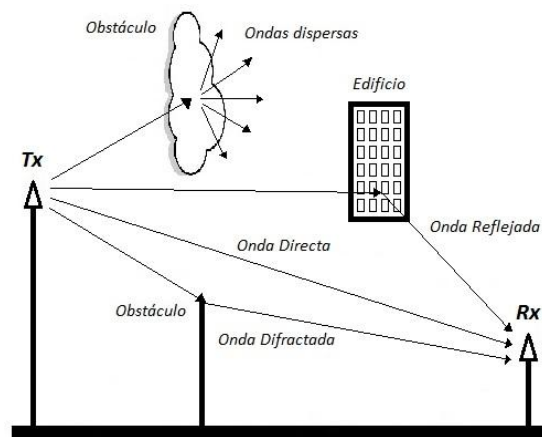


Figura 2.8. Múltiple trayectoria.

El efecto de la múltiple trayectoria es el desvanecimiento de la potencia de la señal recibida en relación a su valor de medio. En ese sentido, la reflexión es responsable por el desvanecimiento de larga escala, mientras que la difracción y la dispersión son responsables del desvanecimiento de pequeña escala [35]. En la Figura 2.9, se aprecia un típico ejemplo de desvanecimiento en ambientes exteriores debido a la múltiple trayectoria [36].

2.3. Modelos de Propagación en Ambientes Exteriores usados en Redes WLAN

En la literatura existe una gran cantidad de modelos de propagación que pueden ser utilizados para la planificación y dimensionamiento de redes WLAN operando

en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz, en ambientes exteriores. Algunos de esos modelos, serán abordados en esta sección.

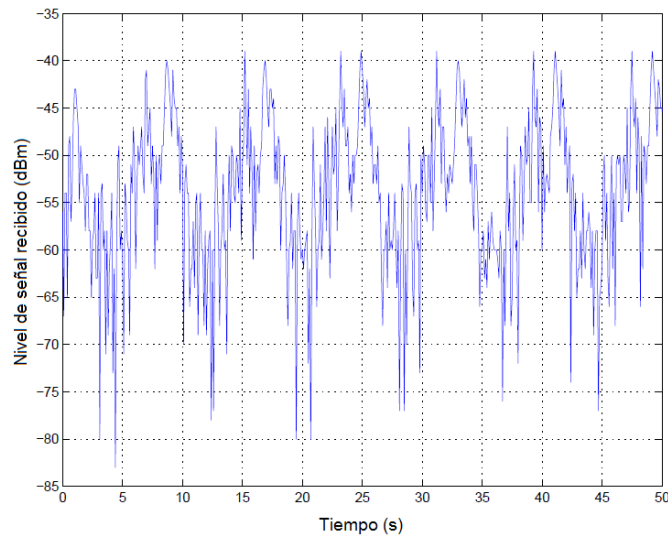


Figura 2.9. Desvanecimiento debido a la múltiple trayectoria.

2.3.1. Modelo de Young

Desarrollado en base a mediciones realizadas en ambientes exteriores de las zonas de Manhattan y del Bronx, localizadas en la ciudad de New York, Estados Unidos de América, en el año 1952, es válido para las frecuencias comprendidas entre 150 MHz y 3.7 GHz, con aplicación preferiblemente para lugares o centros poblados que presentan una elevada concentración de edificios de gran altura. Las pérdidas de propagación del modelo de Young se pueden determinar mediante [1, 37]:

$$L(\text{dB}) = -G_b - G_m - 20\log h_b - 20\log h_m + 40\log d + \beta \quad (2.3)$$

Donde:

G_b = Ganancia de la antena de la estación base (dBi)

G_m = Ganancia de la antena del móvil (dBi)

h_b = Altura de la antena de la estación base (m)

h_m = Altura de la antena del móvil (m)

d = Distancia entre el transmisor y el receptor (m)

β = Factor relacionado con la densidad de edificios del ambiente (25 dB para ciudades grandes [37])

De acuerdo a las ecuaciones (2.2) y (2.3), el coeficiente de pérdidas de potencia con la distancia, γ , según el modelo de Young, es igual a 4.

Ahora bien, en el caso del Ecuador, el modelo de Young pudiera ser aplicado en aquellas ciudades o zonas del país significativamente urbanizadas y con una alta concentración de edificios altos, como por ejemplo, las áreas céntricas y comerciales de Guayaquil, Portoviejo, Machala, Durán, Manta, Esmeraldas, entre otras.

2.3.2. Modelo de Longley-Rice

El modelo de Longley-Rice es un método actualmente implementado en software para la predicción de pérdidas de propagación sobre terrenos irregulares, tales como, llanuras, desiertos, colinas, montes y montañas empinadas. Es válido para frecuencias entre 20 MHz y 100 GHz. Las pérdidas de propagación del modelo en cuestión son dadas por [2]:

$$L(\text{dB}) = L_{\text{el}} + A_{\text{cr}} \quad (2.4)$$

Donde L_{el} se refiere a las pérdidas en espacio libre, calculadas por medio de la ecuación (2.1), mientras que A_{cr} representa la atenuación relativa del espacio libre y puede ser calculada, empleando algún mecanismo de propagación, de acuerdo a los siguientes tres rangos de distancia [2]:

- Dentro de la línea de vista: se emplea la ecuación de pérdidas de propagación del modelo de dos rayos (un rayo directo y un rayo reflejado), también conocido como modelo de tierra plana [37]:

$$L(\text{dB}) = 120 - 20\log h_T + 20\log h_R + 40\log d \quad (2.5)$$

Donde “d” está dada en kilómetros, h_T es la altura de la antena transmisora, en metros, y h_R es la altura de la antena receptora, también en metros.

- Fuera de la línea de vista: se recurre al mecanismo de propagación de difracción, calculando un valor promedio estimado de todas las atenuaciones por difracción causadas por el terreno irregular o por

obstáculos tipo “filo de cuchillo” interpuestos en la trayectoria directa de la señal entre transmisor y receptor.

- A grandes distancias, más allá del horizonte: se considera el mecanismo de dispersión, mediante el método de predicción de pérdidas para la dispersión a largas distancias desarrollado por Rice y colaboradores en 1967 [38].

El modelo de Longley-Rice es considerado uno de los más completos para la estimación de las pérdidas de propagación; sin embargo, su implementación generalmente es difícil debido a la gran cantidad de información que se requiere, con la cual no siempre se cuenta.

En relación a su posible aplicación en el Ecuador, considerando la diversidad de regiones naturales con marcadas diferencias entre si existentes en el país, el modelo de Longley-Rice tendría cabida en muchos lugares, tales como las partes altas de la serranía rodeadas de montañas empinadas y elevaciones de gran tamaño (Cordillera de Los Andes), las extensas llanuras y colinas de poca altura de las zonas costeras y región insular y los exuberantes bosques y montes de la Amazonía llenos de vegetación.

2.3.3. Modelo de Okumura

Desarrollado en base a mediciones realizadas en la década de los años 60 la ciudad de Tokio y sus alrededores, el modelo de Okumura es válido para las frecuencias comprendidas entre 150 MHz y 1.92 GHz, aunque su uso suele ser extendido hasta la frecuencia de 3 GHz [3, 37].

Básicamente, es un método gráfico compuesto por curvas, así como factores de corrección para algunos de sus parámetros. Las pérdidas de propagación se estiman a partir de [3, 37]:

$$L(\text{dB}) = L_{\text{el}}(\text{dB}) + A_{\text{mu}}(\text{dB}) - F_{\text{eb}} - F_{\text{m}} - F_{\text{AREA}} \quad (2.6)$$

Donde:

A_{mu} = Atenuación relativa promedio del espacio libre en zonas urbanas (función de la frecuencia de operación y la distancia).

F_{eb} = Factor de corrección debido a la altura de la estación base (función de la altura de la estación base, h_{eb}).

F_m = Factor de corrección debido a la altura del móvil (función de la altura del móvil, h_m).

F_{AREA} = Factor de corrección debido al tipo de ambiente exterior (función de la frecuencia de operación y el tipo de ambiente).

En [3], se consiguen las gráficas que permiten hallar los parámetros que forman parte de la ecuación (2.6).

Es oportuno resaltar que, el modelo de Okumura es válido para h_{eb} entre 30 m y 1 km, así como para distancias desde 1 km hasta 100 km.

Asimismo, es importante resaltar que los factores de corrección debido a las alturas de la estación base y el móvil también se pueden determinar a partir de las siguientes expresiones [37]:

$$F_{eb} = 20 \log \left(\frac{h_{eb}}{200} \right) \quad (2.7)$$

$$F_m = \begin{cases} 10 \log \left(\frac{h_m}{3} \right); & h_m \leq 3 \text{ m} \\ 20 \log \left(\frac{h_m}{3} \right); & 3 \text{ m} < h_m < 10 \text{ m} \end{cases} \quad (2.8)$$

En vista de que el modelo de Okumura fue desarrollado para zonas urbanas (Tokio y sus alrededores), en el Ecuador pudiera ser efectiva su aplicación en los centros urbanos, especialmente de ciudades que encuentran al nivel del mar, como Guayaquil, Portoviejo, Machala, Durán, Manta, Esmeraldas, Quevedo, Milagro, Babahoyo, etc. Aunque, no se descartaría por completo su uso en los centros urbanos de ciudades que no están a nivel del mar, tal es el caso de Quito, Cuenca, Santo Domingo, Ambato, Riobamba, Loja, entre otras.

2.3.4. Modelo de Okumura-Hata

El modelo de Okumura-Hata utiliza la información gráfica del modelo de Okumura para establecer relaciones matemáticas que permiten calcular analíticamente las pérdidas de propagación. Es válido para frecuencias, “f”, comprendidas entre 150 MHz y 1.5 GHz, distancia, “d”, entre 1 km y 20 km, altura efectiva de la antena transmisora, h_1 , desde 30 m hasta 200 m y altura efectiva de la antena receptora, h_2 , entre 1 m y 10 m.

Las pérdidas de propagación, L_U , para ambientes urbanos, estimadas por el modelo de Okumura-Hata son dadas por [1, 4, 37]:

$$L_U(\text{dB}) = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_1 - a(h_2) + (44,9 - 6,55 \log h_1) \log d \quad (2.9)$$

Donde $a(h_2)$ es el factor de corrección de la altura de la antena receptora, y se determina por medio de:

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_2) = (1,1 \log f - 0,7)h_2 - (1,56 \log f - 0,8) \quad (2.10)$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_2) = 8,29[\log(1,54h_2)]^2 - 1,1 \quad f < 300 \text{ MHz} \quad (2.11a)$$

$$a(h_2) = 3,2[\log(11,75h_2)]^2 - 4,97 \quad f \geq 300 \text{ MHz} \quad (2.11b)$$

Para áreas suburbanas y abiertas (rurales), las pérdidas de propagación, L_{SU} y $L_{abierta}$, respectivamente, se determinan a partir de:

- Áreas suburbanas:

$$L_{SU}(\text{dB}) = L_U - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (2.12)$$

- Áreas abiertas o rurales:

$$L_{abierta}(\text{dB}) = L_U - 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94 \quad (2.13)$$

En cuanto a la aplicación del modelo de Okumura-Hata en Ecuador, el análisis es similar al realizado para el modelo de Okumura.

2.3.5. Modelo Extendido de Hata (COST-231 Hata)

El modelo extendido de Hata, también conocido como COST-231 Hata, es una extensión del modelo de Okumura-Hata para su uso en el rango de frecuencias de 1.5 GHz a 2 GHz, aunque también suele ser utilizado hasta frecuencias de 3 GHz. Las pérdidas de propagación son dadas por [1,4,5]:

$$L_U(\text{dB}) = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_1 - a(h_2) + (44,9 - 6,55 \log h_1) \log d + C \quad (2.14)$$

Donde el factor $a(h_2)$ se determina a partir de las ecuaciones (2.10), (2.11a) y (2.11b), mientras que “C” es un factor de corrección según el tipo de ciudad (3 dB para centros metropolitanos y 0 dB para ciudades medianas y áreas suburbanas).

Por su parte, las pérdidas de propagación para áreas suburbanas y áreas abiertas son dadas por las ecuaciones (2.12) y (2.13), con L_U determinada a partir de la ecuación (2.14).

En el Ecuador, el modelo extendido de Hata es aplicable a los mismos lugares señalados para el caso de los modelos Okumura y Okumura-Hata.

2.3.6. Modelo SUI (*Stanford University Interim*)

El modelo Stanford University Interim fue desarrollado por el grupo de trabajo IEEE 802.16, a partir del modelo de Okumura-Hata, en base a mediciones realizadas en la banda de frecuencia desde 1.9 GHz hasta 11 GHz [6, 7, 37].

El modelo en cuestión considera tres tipos de ambientes:

- Tipo A: zonas montañosas con alta densidad de árboles (presenta más pérdidas).
- Tipo B: zonas montañosas con baja densidad de árboles y zonas llanas con alta densidad de árboles.
- Tipo C: zonas llanas con baja densidad de árboles (presenta menos pérdidas).

Las pérdidas de propagación en el modelo SUI se pueden calcular por medio de:

$$L(\text{dB}) = L_{e1} \quad \text{para } d \leq d_0 \quad (2.15a)$$

$$L(\text{dB}) = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + S \quad \text{para } d > d_0 \quad (2.15b)$$

Donde A son las pérdidas en el espacio libre para una distancia de referencia d_0 entre 0,1 km y 1 km, γ es el exponente de pérdida de la potencia con la distancia, dependiente de la altura del transmisor, H_T (dado más adelante), X_f es un factor de corrección para frecuencias superiores a 2 GHz (dado más adelante), X_h es un factor de corrección debido a la altura de la antena receptor, h_R (dado más adelante) y "S" es un factor de corrección debido al efecto de sombreado (dado más adelante).

$$\gamma = a - bh_T + \left(\frac{c}{h_T}\right) \quad (2.16)$$

Donde H_T está entre 10 m y 80 m y los parámetros "a", "b" y "c" dependen del tipo de terreno y aparecen en la Tabla 1 [7].

	Tipo de terreno		
	A	B	C
a	4.6	4.0	3.6
b (m⁻¹)	0.0075	0.0065	0.005
c (m)	12.6	17.1	20

Tabla 1. Valor de las constantes para el exponente de pérdidas γ

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (2.17)$$

Donde "f" está dada en MHz.

$$X_h = -10 \log\left(\frac{h_R}{2000}\right) \quad \text{para terrenos tipo A y B} \quad (2.18a)$$

$$X_h = -20 \log\left(\frac{h_R}{2000}\right) \quad \text{para terrenos tipo C} \quad (2.18b)$$

Donde h_R está entre 2 m y 10 m.

Finalmente, “S” también depende del tipo de terreno y es igual a 10.6, 9.6 y 8.2, para terreno tipo A, B y C, respectivamente [7].

El modelo SUI puede ser aplicado en el Ecuador preferiblemente en ambientes rurales [6], que presenten características similares a las descritas para los terrenos tipo A, B y C, es decir:

- Tipo A: zonas altas y bosques secos de la serranía completamente rodeados de montañas de gran altura, con alta densidad de árboles y vegetación.
- Tipo B: bosques húmedos y tropicales del oriente o región amazónica, llenos de vegetación, árboles y montes característicos del lugar.
- Tipo C: extensas llanuras y planicies de la región de la costa y región insular, con muy poca vegetación, árboles y en ocasiones un poco desérticas.

2.3.7. Modelo de Sakagami-Kuboi

El modelo de Sakagami-Kuboi es otra variante del modelo de Okumura, desarrollado mediante el uso de técnicas de múltiple regresión no lineal aplicada a un subconjunto de las medidas realizadas por Okumura en la ciudad de Tokio [8]. El modelo es válido para frecuencias de operación entre 0.8 GHz y 8 GHz, distancias desde 0.1 km a 3 km, altura de la antena de la estación base, h_b , entre 10 m y 100 m, y una altura de la antena de la estación móvil, h_m , igual a 1.5 m [9]. Las pérdidas de propagación se calculan a partir de [8, 9]:

$$L(\text{dB}) = 100 - 7,1\log W + 0,023\alpha + 7,5 \log h_B - \left[24,37 - 3,7 \left(\frac{h_B}{h_b} \right)^2 \right] \log h_b + (43,42 - 3,1 \log h_b) \log d + 20 \log f \quad (2.19)$$

Donde:

W = Ancho de la calle (m)

α = Ángulo formado entre el rayo directo y el nivel de la calle (en grados)

h_B = Altura promedio de los edificios (m)

h_b = Altura de la antena de la estación base, entre 10 m y 100 m

En Ecuador, el modelo de Sakagami-Kuboi puede ser aplicado en ambientes urbanos y suburbanos de ciudades preferiblemente localizadas a nivel del mar tales como Guayaquil, Portoviejo, Machala, Durán, Manta, etc.

2.3.8. Modelo de Walfisch-Bertoni

El modelo de Walfisch-Bertoni también es conocido como “modelo de pantallas de difracción”, ya que en la predicción de las pérdidas de propagación considera la difracción de la onda electromagnética en los techos de los edificios. Específicamente, en el modelo Walfisch-Bertoni la hilera de edificios se modela como un conjunto de pantallas de difracción y absorción, que son las responsables de la atenuación sufrida por la señal al pasar por dicha hilera [10]. En la Figura 2.10 [37], se ilustra la geometría generalmente considerada para la aplicación del referido modelo.

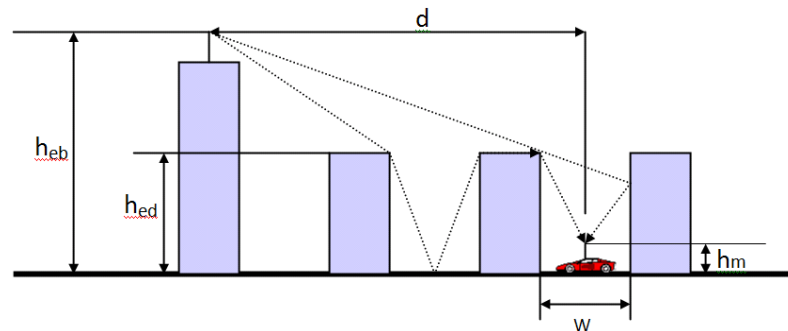


Figura 2.10. Geometría para el modelo de Walfisch-Bertoni.

En la Figura 2.10, h_{eb} representa la altura de la antena de la estación base respecto al suelo (metros), h_{ed} se refiere a la altura promedio de los edificios (metros), h_m es la altura de la antena del móvil respecto al suelo (metros) y “ w ” es la separación entre edificios (metros).

El modelo de Walfisch-Bertoni es aplicable preferiblemente en zonas urbanas y es válido para las frecuencias comprendidas entre 300 MHz y 3 GHz [11]. Las pérdidas de propagación estimadas por el modelo de Walfisch-Bertoni son dadas por [10, 11]:

$$L(\text{dB}) = 89,55 + A + 21 \log f + 38 \log d - 18(h_{\text{eb}} - h_{\text{ed}}) - 18 \log \left[1 - \frac{d^2}{17(h_{\text{eb}} - h_{\text{ed}})} \right] \quad (2.20)$$

Donde A es el factor que incorpora las pérdidas por efectos de los edificios y se determina por medio de:

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{w}{2} \right)^2 + (h_{\text{ed}} - h_{\text{m}})^2 \right] - 9 \log w + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h_{\text{ed}} - h_{\text{m}})}{w} \right] \right\} \quad (2.21)$$

En el caso de Ecuador, el modelo de Walfisch-Bertoni puede ser utilizado principalmente en zonas urbanas de ciudades densamente pobladas, con una elevada concentración de edificios y calles amplias, tal es el caso de Quito, Guayaquil, Cuenca, Santo Domingo, Ambato, Portoviejo, Machala, etc.

2.3.9. Modelo Venezuela-Colombia

El modelo Venezuela-Colombia fue desarrollado utilizando mediciones realizadas en redes WLAN operando en la frecuencia de 2.4 GHz y ambientes exteriores de las ciudades de Mérida, Venezuela y Cúcuta, Colombia. El modelo contempla ambientes urbanos, semiurbanos y rurales. Las pérdidas de propagación se obtienen a partir de [11]:

Áreas urbanas:

$$L(\text{dB}) = 51,01 + 22,59 \log d \quad (2.22)$$

Donde “d” está dada en metros.

Áreas suburbanas:

$$L(\text{dB}) = 48,73 + 22,59 \log d \quad (2.23)$$

Áreas abiertas:

$$L(\text{dB}) = 51,93 + 22,59 \log d \quad (2.24)$$

En vista de que el modelo es válido preferiblemente para redes WLAN operando a 2.4 GHz, en ambientes exteriores, con una altura de la antena transmisora de 3 m, altura de la antena receptora de 1 m y un rango de distancia transmisor-receptor entre 5 m y 150 m [11], en el Ecuador pudiera

ser aplicado en un campus universitario, un barrio residencial, parques y plazas públicas, conjuntos habitacionales privados, etc.

CAPÍTULO 3

3. REALIZACIÓN DE MEDICIONES EN AMBIENTES EXTERIORES DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR

En este capítulo, se detalla explícitamente cómo se realizaron las mediciones en los ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca, Ecuador; las características técnicas y configuración del *setup* experimental (conjunto de equipos, materiales y herramientas utilizados); la selección de los ambientes de acuerdo a tres (3) tipos de escenarios posibles: urbanos, semiurbanos y abiertos (rurales); y los resultados obtenidos para cada uno de los ambientes anteriormente citados.

3.1. Equipo Utilizado para la Realización de las Mediciones

Si bien es cierto que el escenario ideal para desarrollar mediciones es poseer equipos certificados internacionalmente por la ITU, tales como antenas y analizadores de espectro calibrados, su elevado costo de adquisición y la dificultad de contar con ellos, torna cuesta arriba disponer de los mismos. Por ello, para sortear ese inconveniente se recurre a la configuración de un *setup* experimental constituido por un enrutador inalámbrico (que hará las veces de transmisor) operando en las bandas de interés 2.4 GHz y 5.8 GHz y un computador portátil (laptop) con un software instalado para capturar los niveles de señales recibidos, que en conjunto hará las veces de receptor.

Es importante resaltar que los errores introducidos por esta metodología no implican un impacto significativo en los resultados a obtener.

3.1.1. Transmisor

Como transmisor se utilizó el enrutador inalámbrico de banda dual TP-LINK N750 TL-WDR4300. Este enrutador funciona en banda dual de forma simultánea, es decir, opera en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8

GHz al mismo tiempo. En la Figura 3.1, se observa el enrutador inalámbrico utilizado.



Figura 3.1. Enrutador inalámbrico TP-LINK N750 TL-WDR4300.

Las características técnicas del enrutador inalámbrico se presentan a continuación en la Tabla 2 [39].

Parámetro	Valor	
Frecuencia de operación (GHz)	2.4	5.8
Potencia de transmisión (dBm)	20	20
Ganancia de la antena (dBi)	3	3
Pérdidas en la línea de transmisión (dBi)	0	0

Tabla 2. Características técnicas del enrutador inalámbrico de TP-LINK N750 TL-WDR4300.

3.1.2. Receptor

Como receptor se utilizó un computador portátil dotado de un adaptador USB de banda dual inalámbrico. Específicamente, se empleó el adaptador TP-LINK N600 TL-WDN3200, el cual hace las veces de una tarjeta de red, admitiendo la conexión con redes inalámbricas que operan en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz. En la Figura 3.2, se puede observar el receptor en cuestión, cuya ganancia de antena de 2 dBi y las pérdidas en la línea de transmisión son iguales a 0 dB [40].



Figura 3.2. Adaptador USB TP-LINK N600 TL-WDN3200.

Por otra parte, la captura del nivel de señal recibido fue realizada por medio de la herramienta computacional WirelessMon 4.0 [41], cuyos principales detalles se esbozan a continuación.

3.2. Software utilizado para la Medición del Nivel de Señal Recibido

Tal como fue mencionado, para la medición del nivel de potencia recibida se recurrió al software WirelessMon 4.0 [41], el cual permite obtener información detallada sobre las diferentes redes inalámbricas operativas cercanas al receptor, tal como nombre de la red inalámbrica (SSID, *Service Set Identifier*), nivel de potencia recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*), número del canal, protocolos de seguridad instalados para cada red, velocidades de transmisión soportadas, entre otras.

En la Figura 3.3, se observa una captura de la pantalla principal del de la herramienta computacional WirelessMon 4.0.

El software en cuestión permite registrar todos los datos de interés durante un determinado tiempo. Para ello, se debe activar la opción “*Start logging*”, la cual da inicio al registro. Para detener dicho registro, se activa la opción “*Stop logging*”. Ambas opciones se encuentran en el menú gráfico principal. Además, el usuario puede colocar la frecuencia de muestreo deseada con la que desea sean tomados los datos durante el intervalo de tiempo del registro. Esta configuración se realiza

en la opción “*General options*”, también localizada en el menú gráfico principal. En la Figura 3.4, se puede observar la configuración de la frecuencia de muestreo en la opción “*Sampling Rate*”, así como otro tipo configuraciones, tales como nivel máximo de señal, nivel mínimo de señal, retardo, etc.

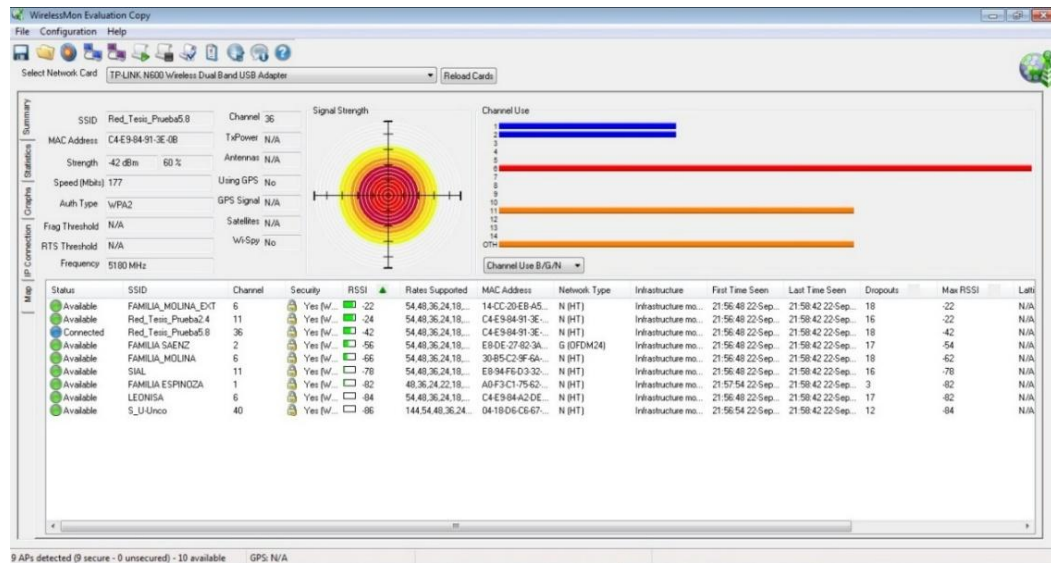


Figura 3.3. Pantalla principal del software WirelessMon 4.0.

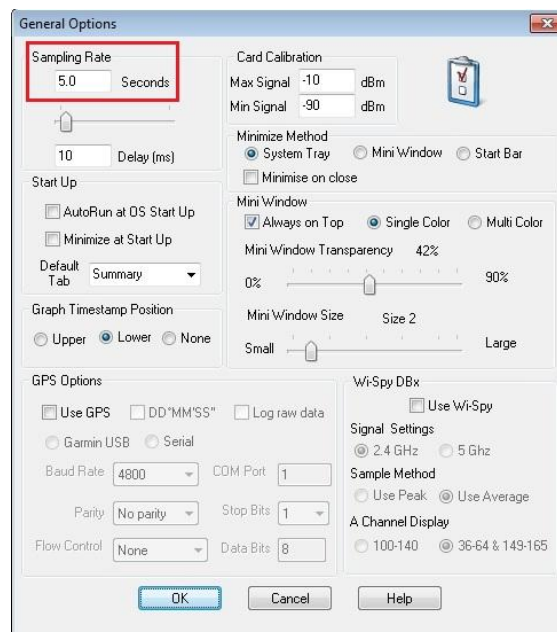


Figura 3.4. Cuadro de configuración “*General Options*”.

La información registrada de la red WLAN, se almacena en un documento de texto (.txt), siendo la de mayor interés para el desarrollo del trabajo, la concerniente al nivel de potencia recibida o RSSI. En la Figura 3.5, se muestra un ejemplo de reporte de la información de la red. Los niveles de potencia recibida corresponden a los datos de la columna "*Strength(dBm)*" del reporte.

Index	Time	SSID	MAC	Channel	Percentage(%)	Strength(dBm)
0	15:30:11:696	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,47	-52
1	15:30:18:674	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,45	-54
2	15:30:25:554	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,45	-54
3	15:30:32:492	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,45	-54
4	15:30:39:254	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,47	-52
5	15:30:45:880	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,47	-52
6	15:30:52:997	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,45	-54
7	15:30:59:580	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,45	-54
8	15:31:06:209	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,45	-54
9	15:31:12:727	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,47	-52
10	15:31:19:320	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,47	-52
11	15:31:25:927	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,47	-52
12	15:31:32:533	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,42	-56
13	15:31:39:075	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,45	-54
14	15:31:45:544	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,45	-54
15	15:31:51:711	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,47	-52
16	15:31:58:161	18-Sep-2016	Red_Tesis_Prueba5.8	C4-E9-84-91-3E-0B	44,47	-52

Figura 3.5. Ejemplo de reporte con la información de la red WLAN.

3.3. Ambientes Exteriores Considerados para las Mediciones

La selección de los ambientes exteriores para la realización de las mediciones obedeció a los siguientes tres (3) tipos de escenarios:

- **Ambientes urbanos:** lugares consolidados, ubicados en medio de los grandes centros poblacionales, dotados de todos los servicios básicos y con una elevada concentración de objetos dispersores de la señal (vehículos, paredes externas de casas y edificios, presencia de personas, etc.); lugares tales como calles residenciales, parques y plazas públicas, etc.
- **Ambientes semiurbanos:** lugares en proceso de consolidación, localizados a las afueras de las ciudades. Por lo general, esos lugares no poseen todos los servicios y presentan una mediana concentración de objetos dispersores (árboles, vegetación, entre otros).
- **Ambientes abiertos (rurales):** lugares despejados, alejados de los centros urbanos y semiurbanos de las ciudades; en consecuencia, esos lugares poseen una baja concentración de objetos dispersores de la señal.

En ese sentido, para el presente trabajo fueron seleccionados cinco (5) ambientes exteriores ubicados en la ciudad de Cuenca, Ecuador, distribuidos de la siguiente forma: tres (3) urbanos, uno (1) semiurbano y uno (1) abierto o rural, concretamente:

- Ambiente Urbano 1 (AU1): calle principal de la Urbanización Villaclub Machángara I, situada al norte de la ciudad. Las mediciones realizadas fueron del nivel de potencia recibida en función de la distancia, frecuencia de operación (2.4 GHz y 5.8 GHz) y alturas fijas y variables del transmisor.
- Ambiente Urbano 2 (AU2): patio central de una institución educativa localizada en el centro de la ciudad, cuyas autoridades no permitieron suministrar el nombre. En este caso, nuevamente se midió el nivel de señal recibido en función de la distancia, frecuencia de operación (2.4 GHz y 5.8 GHz) y alturas fijas y variables del transmisor.
- Ambiente Urbano 3 (AU3): plaza de La Merced, ubicada en el centro histórico de la ciudad, calle Presidente Borrero entre Calle Larga y Honorato Vásquez. Las mediciones realizadas fueron nivel de potencia recibida en función de la distancia, frecuencia de operación (2.4 GHz y 5.8 GHz) y altura fija de 2.5 m para el transmisor.
- Ambiente Semiurbano 1 (ASU1): área semiurbana con densa vegetación, situada en el parque lineal de la Av. Los Migrantes, sector norte de la ciudad. Se midió el nivel de potencia recibida en función de la distancia, frecuencia de operación (2.4 GHz y 5.8 GHz) y altura del transmisor 2.5 m.
- Ambiente Abierto 1 (AA1): área rural con escasa vegetación, ubicada en el sector de Guncay del cantón Cuenca, al sureste de la ciudad. Las mediciones realizadas fueron del nivel de potencia recibida en función de la distancia, frecuencia de operación (2.4 GHz y 5.8 GHz) y altura de 2.5 m para el transmisor.

En el Apéndice 1, se muestran algunas imágenes de los mencionados ambientes exteriores.

3.4. Resultados Obtenidos

Con el objetivo de considerar también algunos otros efectos, aunque haya sido de manera implícita, sobre la señal RF, cada medición se repitió tres (3) veces, en días y horarios diferentes. De esa manera, se consideró, por ejemplo, la influencia de la hora del día, clima y variación en la cantidad y tipo de objetos dispersores de la señal inalámbrica.

Para la selección de la ubicación de los puntos de medición, se siguió la recomendación de [11, 42], espaciando el receptor cinco (5) metros entre cada punto, partiendo desde 1 m del transmisor, hasta donde existiese recepción de señal (aproximadamente 120 m). Se recurrió a una cinta métrica para medir la distancia entre transmisor y receptor.

Para todos los ambientes, las mediciones fueron realizadas en los dos (2) valores de frecuencia de operación de interés, es decir, 2.4 GHz y 5.8 GHz.

Es importante resaltar que, tal como fue mencionado anteriormente, en los ambientes AU1 y AU2 se incorporaron mediciones para evaluar el efecto de la altura del transmisor en el nivel de señal recibido, para lo cual se varió dicha altura desde 0.7 m hasta 2.5 m, con intervalos de 0.3 m. Para implementar la referida variación de altura se utilizó una estructura metálica con una base ajustable tal como se puede apreciar en la Figura 3.6.



Figura 3.6. Estructura metálica para variar la altura del transmisor.

Los resultados obtenidos para las mediciones correspondientes a cada ambiente señalado, se detallan en las secciones 3.4.1, 3.4.2 y 3.4.3.

3.4.1. Ambientes Urbanos

En las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9, se muestran los gráficos de dispersión del nivel de señal recibido en función de la distancia y la frecuencia de operación, para los ambientes AU1, AU2 y AU3, respectivamente. La altura del transmisor se fijó en 2.5 m.

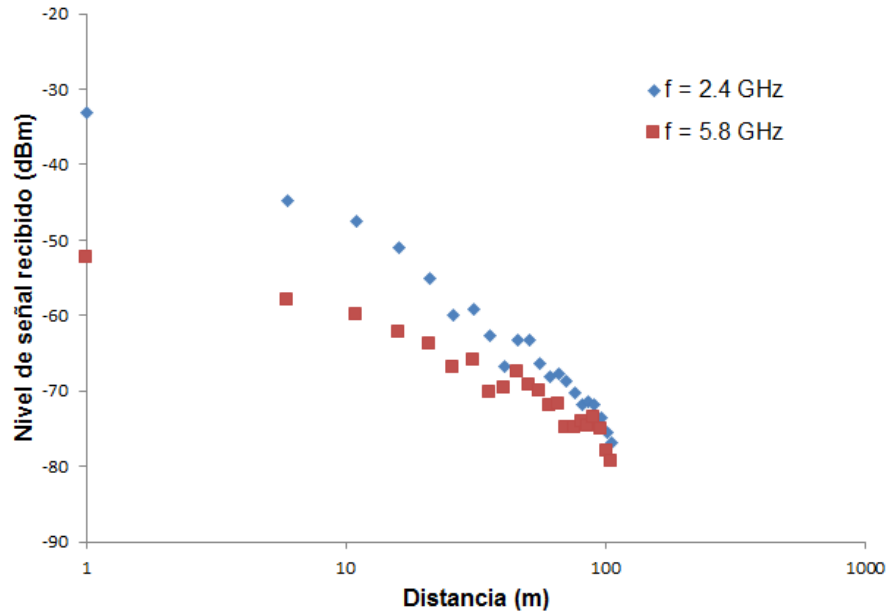


Figura 3.7. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, h = 2.5 m, ambiente AU1.

Como era de suponerse, de las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9 se percibe claramente que el nivel de señal recibido disminuye con el aumento de la distancia transmisor-receptor y el aumento de la frecuencia de operación. Por tanto, se puede afirmar que la banda de 2.4 GHz, a pesar de estar más sujeta a interferencias provenientes de diversos dispositivos que operan en esa frecuencia [43], la cobertura de la red WLAN será mayor que para el caso de la red operando en 5.8 GHz, asumiendo que la sensibilidad del receptor para ambas frecuencias sea al menos similar. Asimismo, en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9 se observa la influencia de las particularidades del tipo de ambiente, en este caso urbano, en el nivel de potencia recibida, haciendo, por ejemplo, que en los ambientes AU2 y AU3 la disminución del nivel de

esa potencia con la distancia y la frecuencia sea mayor que para el ambiente AU1.

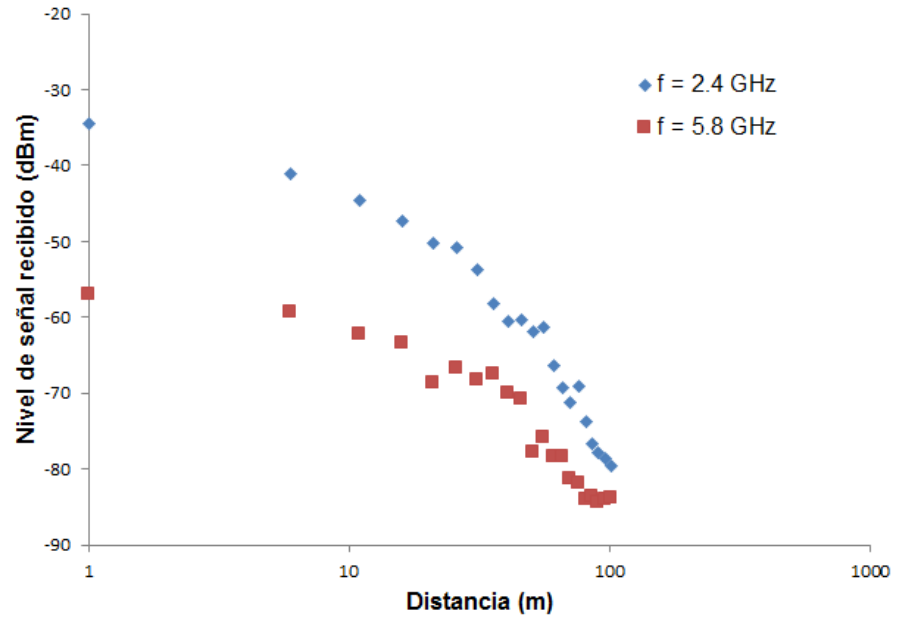


Figura 3.8. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, $h = 2.5$ m, ambiente AU2.

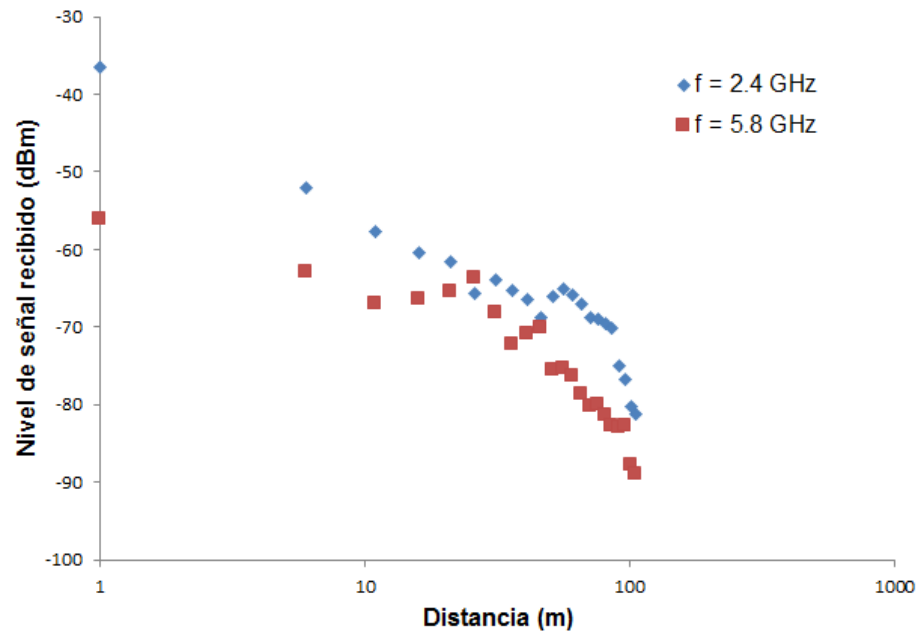


Figura 3.9. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, $h = 2.5$ m, ambiente AU3.

Por su parte, en las Figuras 3.10 y 3.11, se muestran los gráficos de dispersión del nivel de señal recibido en función de la distancia y la altura del transmisor para el ambiente AU1 y frecuencias de operación de 2.4 GHz y 5.8 GHz, respectivamente.

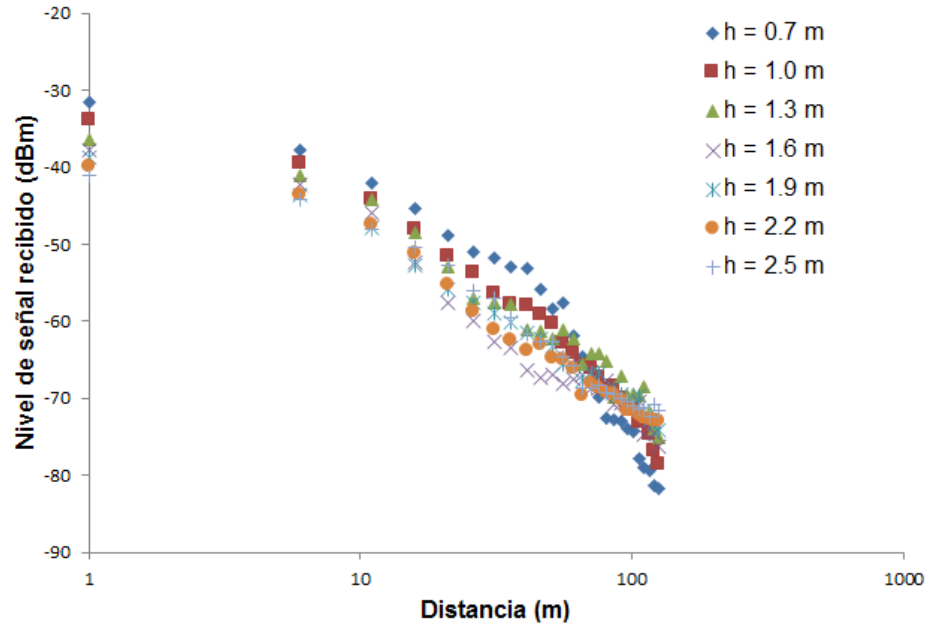


Figura 3.10. Nivel de señal recibido vs distancia, en función de la altura del transmisor, $f = 2.4$ GHz, ambiente AU1.

En las Figuras 3.10 y 3.11, nuevamente se aprecia como el nivel de potencia recibida disminuye conforme aumenta la distancia y la frecuencia. Asimismo, se observa, para ambas frecuencias, que la pérdida en el nivel de señal recibido es menor a medida que aumenta la altura del transmisor, lo cual se compagina con los resultados obtenidos por Okumura, en los cuales de acuerdo a lo mostrado por la ecuación (2.7), cuando la altura del transmisor se incrementa el factor F_{eb} aumenta y con ello las pérdidas de propagación disminuyen. Ese efecto de la altura del transmisor en el nivel de potencia recibida también es mostrado en el modelo de Okumura-Hata, ya que, según la ecuación (2.9), al aumentar dicha altura, disminuye el exponente de pérdidas con la distancia.

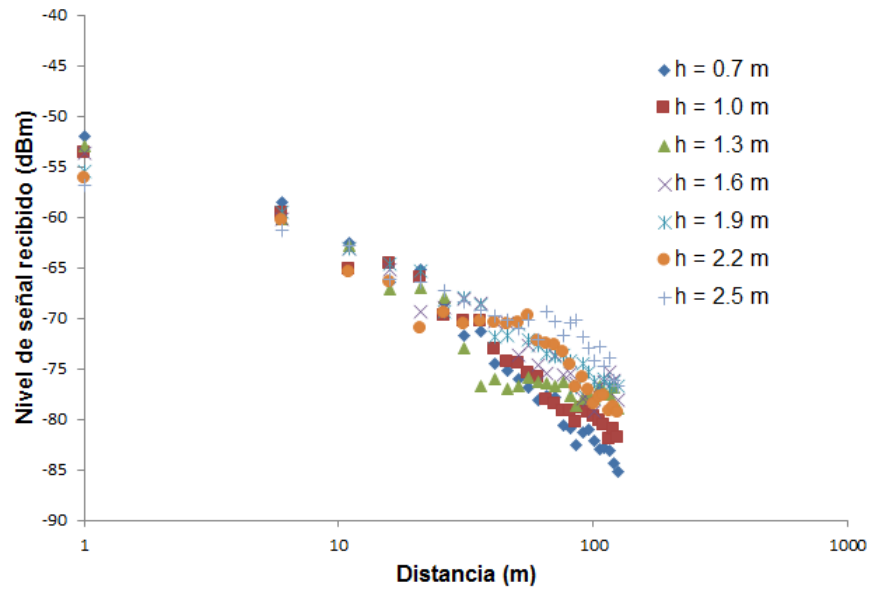


Figura 3.11. Nivel de señal recibido vs distancia, en función de la altura del transmisor, $f = 5.8$ GHz, ambiente AU1.

En las Figuras 3.12 y 3.13, se ilustran los gráficos de dispersión del nivel de señal recibido en función de la distancia y también de la altura del transmisor, esta vez para el ambiente AU2 y nuevamente para las frecuencias de operación de 2.4 GHz y 5.8 GHz, respectivamente.

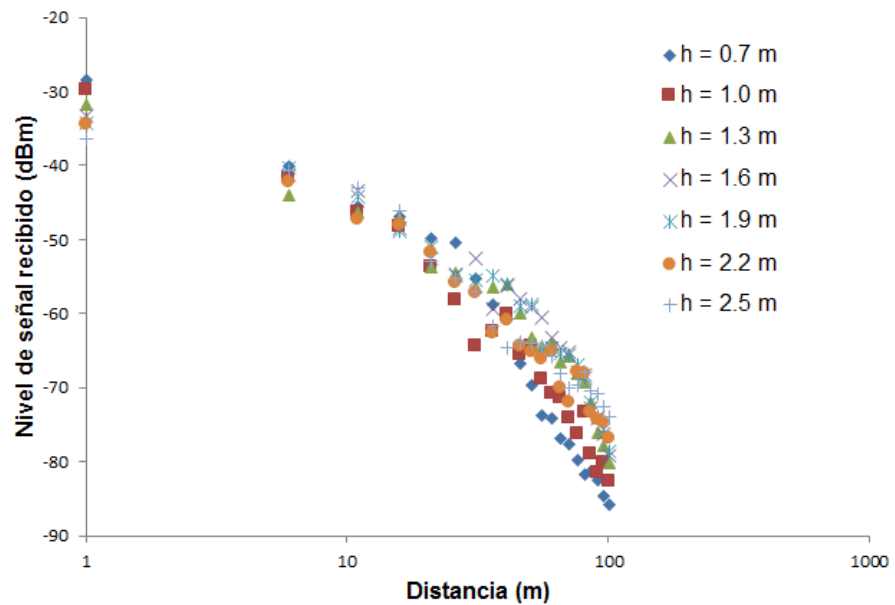


Figura 3.12. Nivel de señal recibido vs distancia, en función de la altura del transmisor, $f = 2.4$ GHz, ambiente AU2.

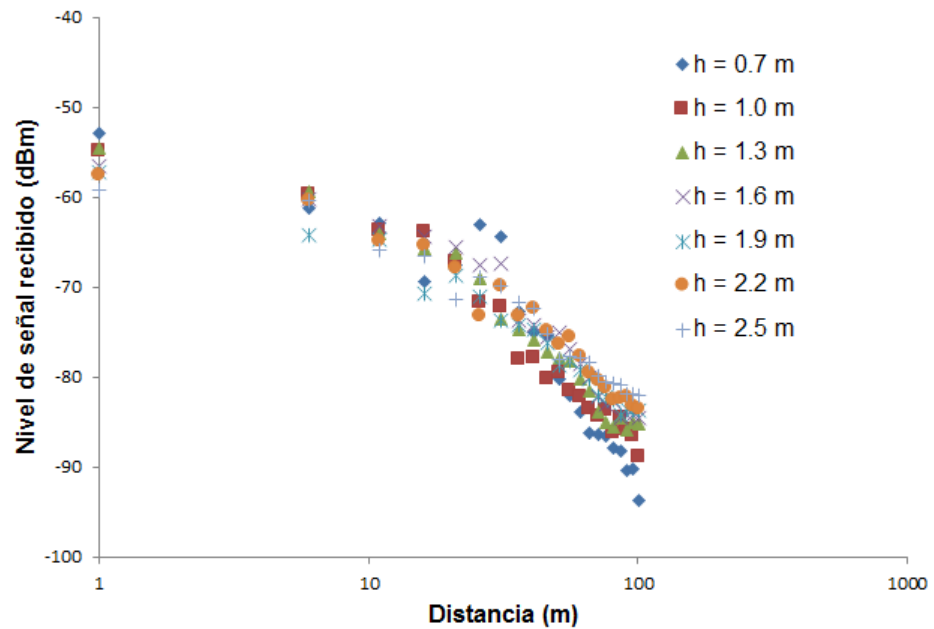


Figura 3.13. Nivel de señal recibido vs distancia, en función de la altura del transmisor, $f = 5.8$ GHz, ambiente AU2.

El comportamiento exhibido en las Figuras 3.12 y 3.13, del nivel de potencia recibida en función de la distancia, frecuencia de operación y altura del transmisor en el ambiente AU2 es similar al mostrado en las Figuras 3.10 y 3.11 correspondientes al ambiente AU1, aunque nuevamente se observa la influencia de las particularidades de cada ambiente, ya que la disminución en el nivel de señal recibido, en general, es mayor en el ambiente AU2 en comparación con el ambiente AU1.

3.4.2. Ambientes Semiurbanos

En la Figura 3.14 se visualiza el gráfico de dispersión del nivel de señal recibido en función de la distancia y la frecuencia de operación, para el ambiente ASU1. La altura de transmisor fue de 2.5 m. Se nota un comportamiento similar al mostrado en los ambientes urbanos, es decir, la disminución del nivel de señal recibido con el incremento de la distancia y la frecuencia de operación. No obstante, de manera cualitativa no es posible detectar una diferencia clara entre los niveles de potencia recibida alcanzada entre el ambiente semiurbano y los ambientes urbanos.

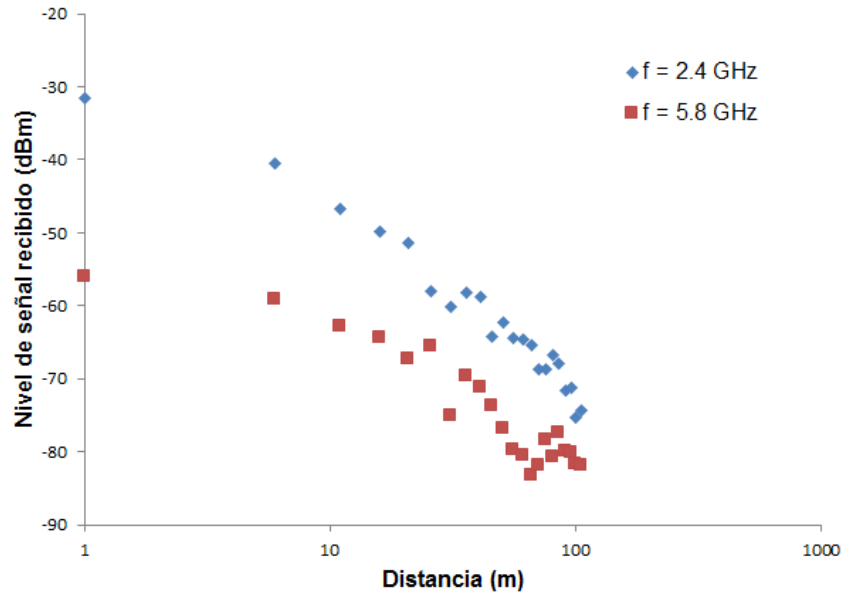


Figura 3.14. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, $h = 2.5$ m, ambiente ASU1.

3.4.3. Ambientes Abiertos

En la Figura 3.15, se aprecia el gráfico de dispersión del nivel de señal recibido en función de la distancia y la frecuencia de operación para el ambiente AA1, con una altura del transmisor de 2.5 m.

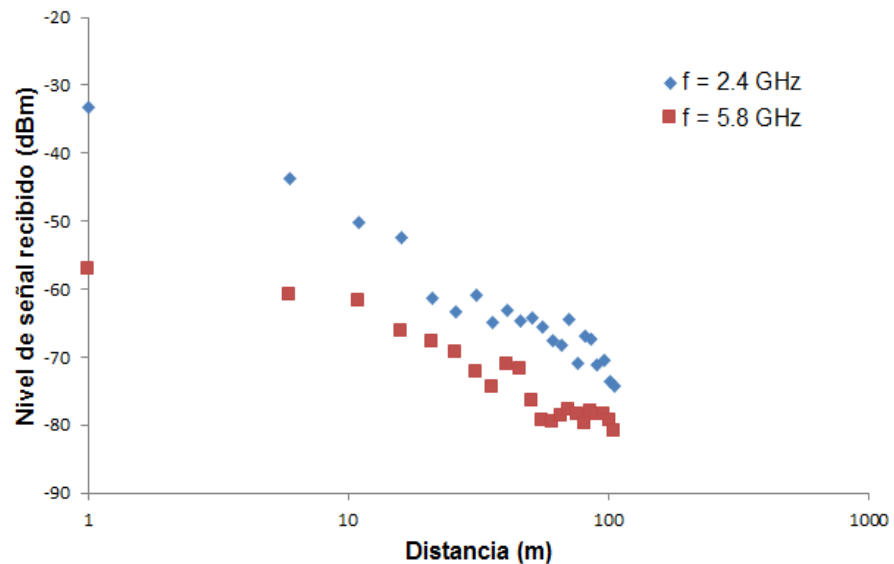


Figura 3.15. Nivel de señal recibido vs distancia, frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, $h = 2.5$ m, ambiente AA1.

En la Figura 3.15, nuevamente se nota la pérdida en el nivel de potencia recibida cuando la distancia transmisor-receptor y la frecuencia aumentan. Asimismo, tampoco es posible percibir una diferencia marcante entre los niveles de potencia alcanzados en el ambiente abierto o rural en comparación con los ambientes urbano y semiurbano. No obstante, si se puede apreciar que para el caso del ambiente abierto, la distancia alcanzada, es decir, aproximadamente 120 metros, es mayor que la alcanzada en los ambientes urbanos y en el ambiente semiurbano, que resultó ser de aproximadamente 100 m.

CAPÍTULO 4

4. DESARROLLO DEL MODELO SEMI-EMPÍRICO DE PROPAGACIÓN EN AMBIENTES EXTERIORES

En este capítulo, se desarrolla el nuevo modelo de propagación, específicamente para ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca, Ecuador, basados en los resultados de las mediciones presentados en el Capítulo 3. El desarrollo en cuestión se realiza en tres (3) fases. En la primera se considera la variación lineal de la pérdida con el logaritmo de la distancia transmisor-receptor, mientras que en la segunda fase se considera el efecto de la frecuencia en dicha pérdida. En la tercera fase, se agrega a la pérdida de propagación un factor dependiente de la altura del transmisor. Finalmente, se realiza una comparación entre el desempeño del modelo desarrollado con el desempeño que arrojan algunos de los modelos de la literatura reportados en el Capítulo 2.

4.1. Técnica de Regresión para Ajuste de Funciones

La relación entre dos (2) o más variables puede ser de dos (2) tipos [44]:

- Matemática: cuando existe una relación funcional exacta por medio de alguna fórmula convencional. Ejemplo: velocidad, distancia y tiempo.
- Estadística: cuando a partir de las variables independientes se llega a determinar un posible comportamiento de las variables dependientes. Ejemplo: la relación entre los ingresos y los gastos de las personas de una población.

A su vez, la relación estadística entre variables plantea dos (2) conceptos que están muy relacionados entre sí [44]:

- Correlación: estudia el grado de correspondencia que existe entre las variables.
- Regresión: determina la estructura de dependencia que mejor expresa la correspondencia entre las variables.

Al respecto, en algunas de las curvas resultantes presentadas en el Capítulo 3 se observa, de una manera u otra, correlación entre las variables nivel de señal recibido, distancia entre transmisor y receptor, frecuencia de operación y altura del transmisor.

Ahora bien, en cuanto a la regresión, la misma puede ser de dos (2) tipos:

- Lineal: tiene lugar cuando la relación entre las variables dependiente e independiente es lineal, es decir, incremento o disminución constante. Está determinada por la ecuación de una recta, incluyendo aquellos casos en los que dicha recta surge de la representación de forma logarítmica de la relación entre las variables en cuestión. Generalmente, la regresión lineal es denominada también “regresión de mínimos cuadrados” [12, 44, 46] y puede ser simple (cuando se tiene una sola variable) y múltiple (cuando se tienen dos o más variables).
- No lineal: se da cuando la relación entre las variables dependiente e independiente no es lineal, es decir, cuando existe una relación arbitraria entre sí. Puede contener una o más variables independientes [46]. Entre las técnicas de regresión no lineal se encuentran Quasi-Newton, Gauss-Newton, Hooke-Jeeves, Rosenbrock, entre otras [46, 47].

La regresión (lineal y no lineal) busca disminuir la desviación entre los valores medidos de la variable dependiente y los valores estimados por la ecuación propuesta. Ello se logra calculando los parámetros que sean considerados para el ajuste de dichos valores (por ejemplo, si la ecuación es una recta, los parámetros a ser ajustados son la pendiente de la recta y su corte con la ordenada). En el presente trabajo, los parámetros de ajuste serán determinados con la ayuda del software Statistica 13.2 [47].

Para la primera fase considerada en el desarrollo del modelo, en la que la pérdida de propagación estará en función del logaritmo de la distancia, se empleará regresión lineal, mientras que para la segunda y tercera fase será necesario utilizar técnicas de regresión no lineal debido a la consideración de más de dos variables independientes.

4.2. Curvas de Correlación entre las Variables de Medición

Las curvas de correlación entre el nivel de señal recibido y el logaritmo de la distancia transmisor-receptor son las que se muestran en el Capítulo 3, desde la Figura 3.7 hasta la Figura 3.15, en las que se observa, como ya fue dicho anteriormente, que a medida que aumenta la distancia transmisor-receptor el nivel de potencia recibida disminuye, es decir, aumenta la pérdida de propagación.

Por su parte, la curva de correlación entre el nivel de señal recibido y la altura del transmisor es la que se observa en la Figura 4.1.

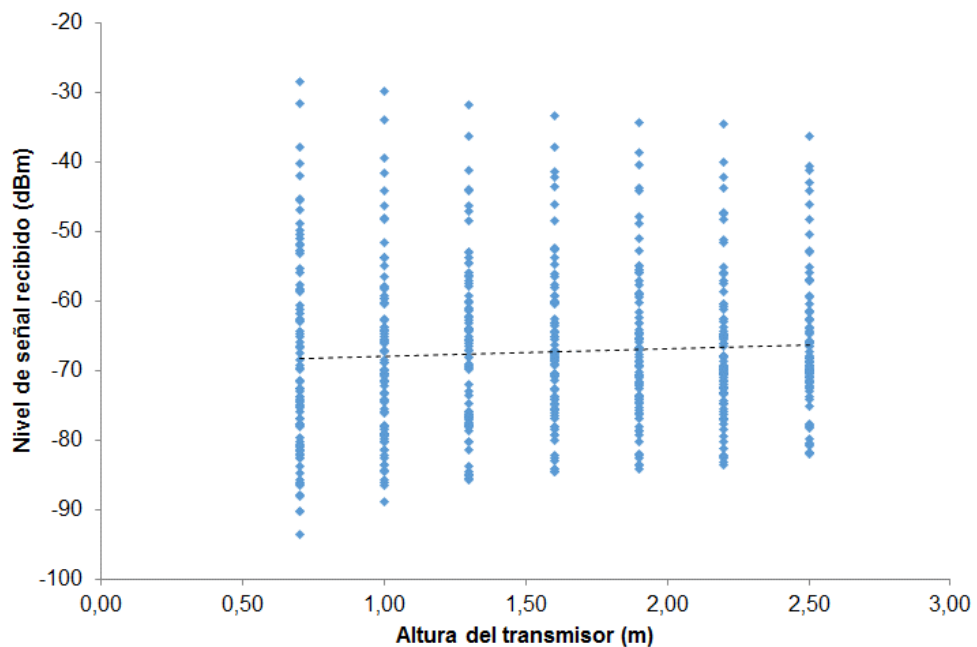


Figura 4.1. Curva de correlación entre el nivel de señal recibido y la altura del transmisor.

De acuerdo a la línea de tendencia (línea punteada) de la Figura 4.1, se verifica que efectivamente, cuando la altura del transmisor aumenta, el nivel de potencia recibida también tiende a incrementarse, es decir, disminuyen las pérdidas de propagación.

Finalmente, en la Figura 4.2 se ilustra la curva de correlación entre el nivel de señal recibido y la frecuencia de operación, para el caso de altura del transmisor, “h”, igual a 2.5 m.

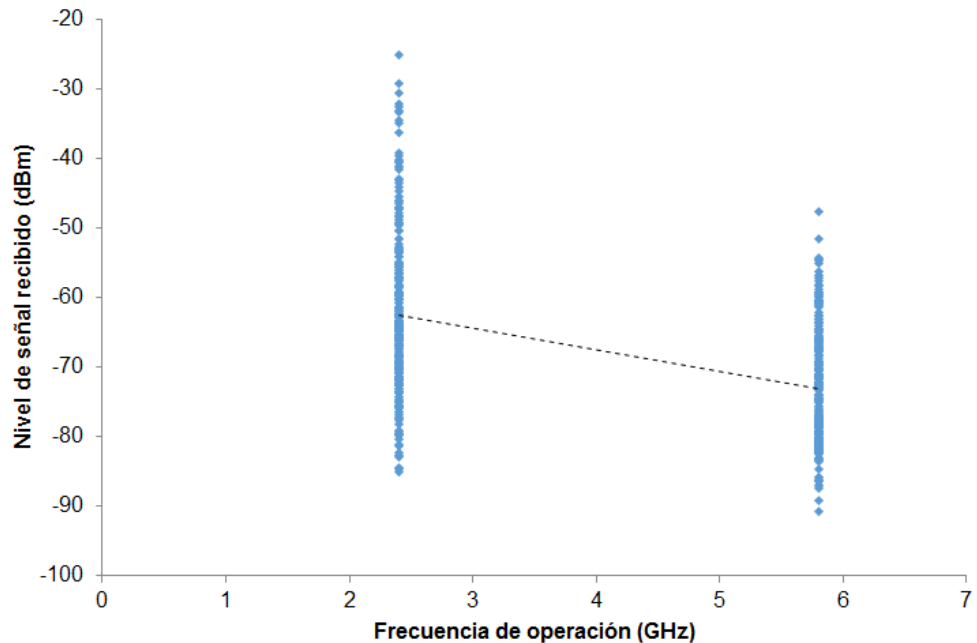


Figura 4.2. Curva de correlación entre el nivel de señal recibido y la frecuencia de operación.

En la Figura 4.2, se observa que a medida que se incrementa la frecuencia de operación el nivel de potencia recibida disminuye, lo que significa que la pérdida de propagación aumenta con la frecuencia.

4.3. Desarrollo del Modelo de Propagación

Tal como ha sido señalado anteriormente, se desarrollarán tres fases para la consecución del modelo de propagación.

Primera Fase del Desarrollo del Modelo

De acuerdo a las curvas de correlación entre el nivel de señal recibido y la distancia, mostradas en el Capítulo 3, se infiere que dicho nivel decrece con el logaritmo de la distancia, es decir, de manera general se puede escribir:

$$P_R(\text{dBm}) = A + B \log d \quad (4.1)$$

Donde:

A = Factor que considera las pérdidas de potencia con la frecuencia de transmisión, altura del transmisor, paredes externas de casas y edificios, vehículos, personas, otros obstáculos, etc.

$$B = 10\gamma$$

d = Distancia entre el transmisor y el receptor (m).

Los parámetros “A” y “ γ ” serán obtenidos mediante técnicas de regresión lineal, utilizando la herramienta computacional Statistica.

En la Figura 4.3, se muestra la ventana del mencionado software en la cual se implementa la ecuación (4.1) y se considera como función de control para el ajuste, Loss, dada por:

$$\text{Loss} = (\text{Obs} - \text{Pred})^2 \quad (4.2)$$

Donde “Obs” es el valor medido para el punto de medición “i” y “Pred” es el valor de propagación estimado para dicho punto.

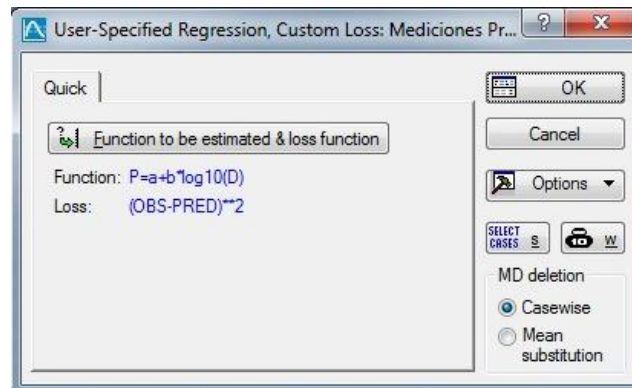


Figura 4.3. Uso del Statistica para la primera fase del desarrollo del modelo.

Los valores de “A” y “B” fueron obtenidos para los tres tipos de ambientes considerados en las mediciones, frecuencia de operación de 2.4 GHz y altura del transmisor igual a 2.5 m. Es de hacer notar que para el caso del ambiente urbano, se realizó un promedio del nivel de potencia recibida (en cada punto de medición) obtenido para los ambientes AU1, AU2 y AU3. De esa manera, las expresiones obtenidas después del ajuste para cada ambiente son:

Ambientes Urbanos

$$P_{R_u}(\text{dBm}) = -28,97 - 22,83 \log d \quad (4.3)$$

Ambientes Semiurbanos

$$P_{R_{su}}(\text{dBm}) = -25,77 - 22,28 \log d \quad (4.4)$$

Ambientes Rurales

$$P_{R_{ru}}(\text{dBm}) = -31,37 - 19,94 \log d \quad (4.5)$$

De las ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.5), se tiene que el exponente de pérdidas, γ , para cada ambiente es el que se muestra en la Tabla 3.

Ambiente	γ
Urbano	2.28
Semiurbano	2.23
Rural	1.99

Tabla 3. Valor de γ de acuerdo al tipo de ambiente.

En la Tabla 3, se puede observar claramente que los ambientes urbanos presentan un mayor exponente de pérdidas, mientras que los rurales presentan un menor exponente. Dicho resultado, que era de esperarse, se debe a que en los ambientes rurales, en el cual se propaga la señal RF tiende a despejarse de obstáculos y objetos dispersores en general de la señal, en comparación con los ambientes urbanos.

Es importante resaltar que el exponente de pérdidas para ambientes urbanos, que resultó ser 2.28, es bajo en comparación con el exponente propuesto, por ejemplo, en el modelo el extendido de Hata (COST-231 Hata), el cual está entre 3 y 4 [5]. Ello es debido que el modelo COST-231 Hata fue desarrollado en base a mediciones realizadas en la ciudad de Tokio, Japón, ambiente notoriamente más denso urbanísticamente hablando que la ciudad de Cuenca.

Para el caso del ambiente rural, el exponente de pérdidas de potencia con la distancia resultó ser 1.99, valor muy próximo al exponente de pérdida para el espacio libre, que es 2. Ciertamente, los ambientes rurales o abiertos tienden a parecerse más a los ambientes ideales de espacio libre.

Con el fin de obtener una expresión que abarque todos los tipos de ambientes, se consideran todas las mediciones realizadas en los cinco (5) ambientes, operando

en la banda de 2.4 GHz, con la altura del transmisor de 2.5 m y se aplica la regresión lineal para el conjunto completo de esas mediciones, obteniéndose:

$$P_{R_{2.4}}(\text{dBm}) = -28.70 - 21.42 \log d \quad (4.6)$$

Donde $P_{R_{2.4}}$ representa el nivel de potencia recibido, con frecuencia de operación igual a 2.4 GHz.

En la Figura 4.4, se muestra el gráfico de dispersión entre los valores medidos del nivel de señal recibido y los obtenidos mediante la ecuación (4.6), con una correlación entre ambos conjuntos de valores del 96,39%, superior a la correlación considerado como buena para los modelos de propagación [12, 48].

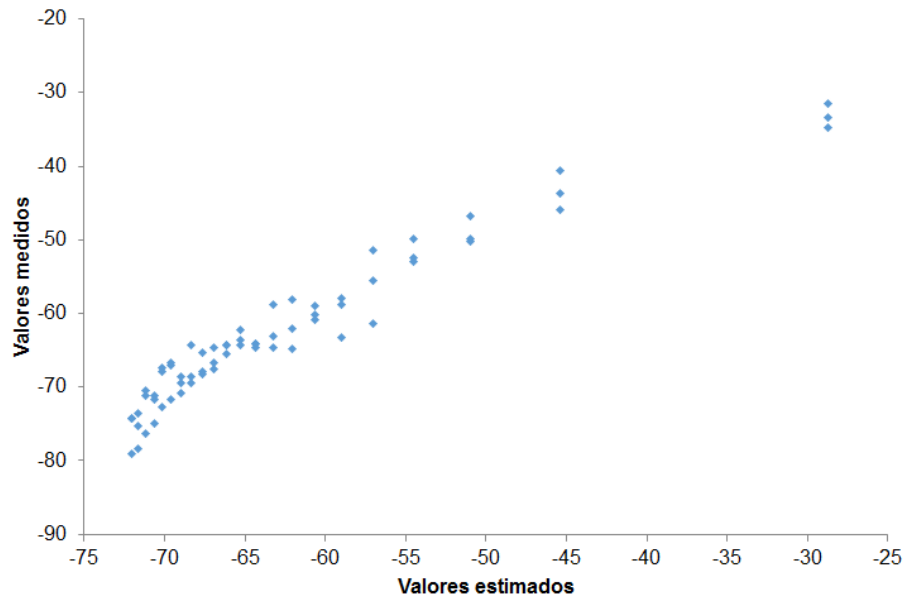


Figura 4.4. Valores medidos y estimados, primera fase del desarrollo del modelo, $h = 2.5$ m, $f = 2.4$ GHz.

Aplicando el mismo procedimiento anterior, pero para la frecuencia de 5.8 GHz, se obtuvo la siguiente expresión:

$$P_{R_{5.8}}(\text{dBm}) = -49.93 - 14.87 \log d \quad (4.7)$$

Donde $P_{R_{5.8}}$ es el nivel de señal recibido, con frecuencia de operación igual a 5.8 GHz.

En la ecuación (4.7) se observa un exponente de pérdidas de 1.49, menor al obtenido para el caso de la frecuencia de 2.4 GHz, que fue de 2.14, en la ecuación

(4.6). El resultado es cónsono con el hecho conocido de que la disminución del nivel de potencia recibida es menor a medida que aumenta la frecuencia de operación del sistema.

La dispersión entre los valores medidos y estimados, en este caso, por la ecuación (4.7), es mostrada en la Figura 4.5. La correlación resultante fue del 92,34%, que sigue siendo mayor al 90%.

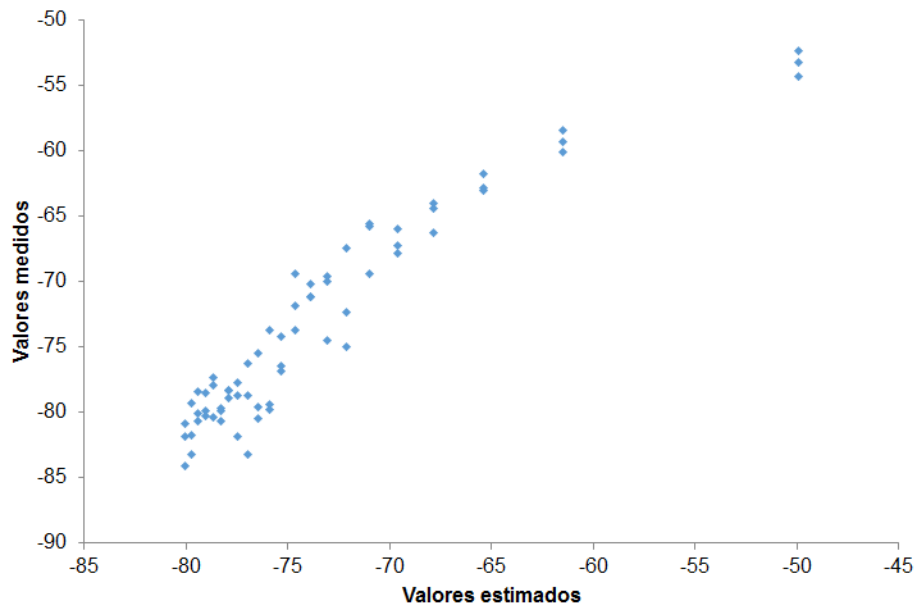


Figura 4.5. Valores medidos y estimados, primera fase del desarrollo del modelo, h = 2.5 m, f = 5.8 GHz.

Segunda Fase del Desarrollo del Modelo

En esta fase se adiciona a la ecuación de la potencia recibida un factor dependiente de la frecuencia de operación, en concordancia con la correlación entre ambas variables verificadas en la Figura 4.2. Para ello, basado en la ecuación (2.2), se considera que la variación del nivel de señal recibido en relación a la frecuencia es lineal con el logaritmo de esta última. Por tanto, el nivel de potencia recibida, de manera general, se expresa como:

$$P_R(\text{dBm}) = A + B \log d + C \log f \quad (4.8)$$

Donde "f" es dada en GHz.

Dada la existencia de dos (2) variables independientes (“d” y “f”), se recurre al ajuste por regresión no lineal, para lo cual se utiliza el método Quasi-Newton, incorporado en el software Statistica. Se consideraron un número de iteraciones de 50 y un criterio de convergencia de 0.0001.

En esta segunda fase del desarrollo del nuevo modelo de propagación fueron tomadas en cuenta las mediciones realizadas en los cinco (5) ambientes, para las dos (2) bandas de frecuencia (2.4 GHz y 5.8 GHz) y la altura de transmisor de 2.5 m, resultando:

$$P_R(\text{dBm}) = -23.05 - 18.14 \log d - 28.44 \log f \quad (4.9)$$

En la Figura 4.6, se observa la dispersión entre los valores medidos y los valores estimados por la ecuación (4.9). En este caso, la correlación entre ambos valores fue del 95,24%, es decir, nuevamente un valor superior al 90%.

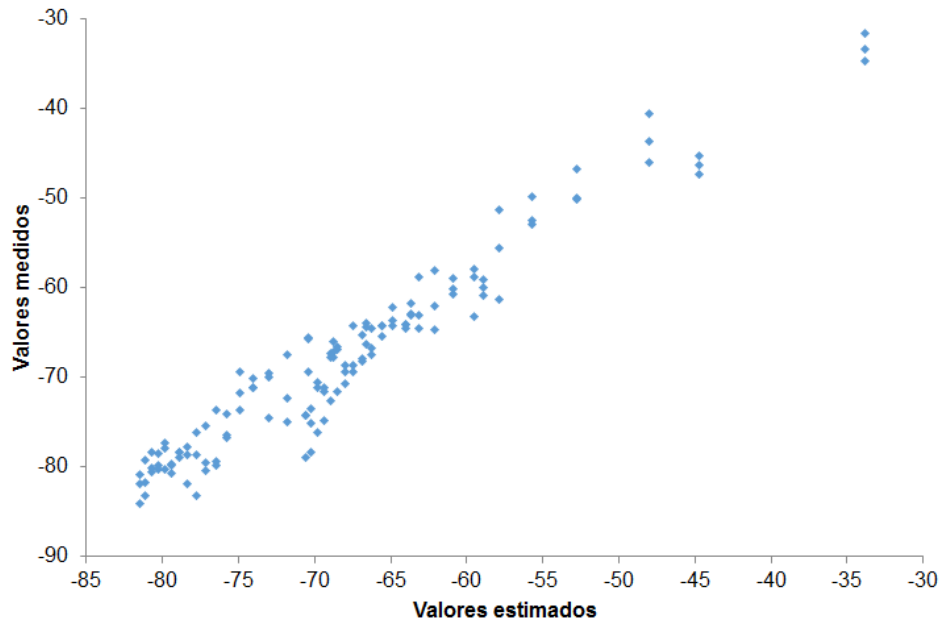


Figura 4.6. Valores medidos y estimados, segunda fase del desarrollo del modelo, h = 2.5 m.

Tercera Fase del Desarrollo del Modelo

De manera similar a [12, 49], en esta fase, además de la distancia y la frecuencia, se adiciona la dependencia del nivel de señal recibido en relación a la altura del

transmisor, corroborada en la Figura 4.1. En ese sentido, el nivel de potencia recibida es, de manera general:

$$P_R(\text{dBm}) = A + B \log d + C \log f = (A_1 + A_2 h) + (B_1 + B_2 h) \log d + C \log f \quad (4.10)$$

Donde, "h" es la altura del transmisor dada en metros.

Para determinar los parámetros "A₁", "A₂", "B₁" y "B₂", es necesario calcular primero, por separado, los parámetros "A" y "B", de la ecuación, para cada altura del transmisor considerada en las mediciones realizadas en los ambientes AU1 y AU2, en las que se varió dicha altura desde 0.7 m hasta 2.5 m. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4.

Altura (m)	Parámetro de Ajuste	
	A	B
0.7	-11.06	-23.72
1.0	-16.36	-20.78
1.3	-16.41	-18.64
1.6	-21.51	-17.99
1.9	-21.96	-16.71
2.2	-25.31	-16.70
2.5	-26.52	-15.43

Tabla 4. Parámetros de Ajuste "A" y "B".

Una vez calculados los valores de "A" y "B", se determinan los parámetros "A₁", "A₂", "B₁" y "B₂", analizando "A" y "B" de forma independiente, en función de la altura del transmisor. Por tanto, en este caso se apuesta a la variación lineal de A y B, por separado, en relación a la altura "h", indicada en la ecuación (4.10). Los resultados son:

$$A = 8.06 + 7.08h \quad (4.11)$$

$$B = 24.06 - 3.19h \quad (4.12)$$

Por tanto, la ecuación (4.10) resulta ser:

$$P_R(\text{dBm}) = -(8.06 + 7.08h) - (24.06 - 3.19h) \log d - 31.53 \log f \quad (4.13)$$

La dispersión entre los valores medidos y los valores estimados por la ecuación (4.13) se ilustran en la Figura 4.7, donde se observa que la correlación entre los valores medidos y los valores estimados por la tercera aproximación es del 94,91%, un valor bastante aceptable.

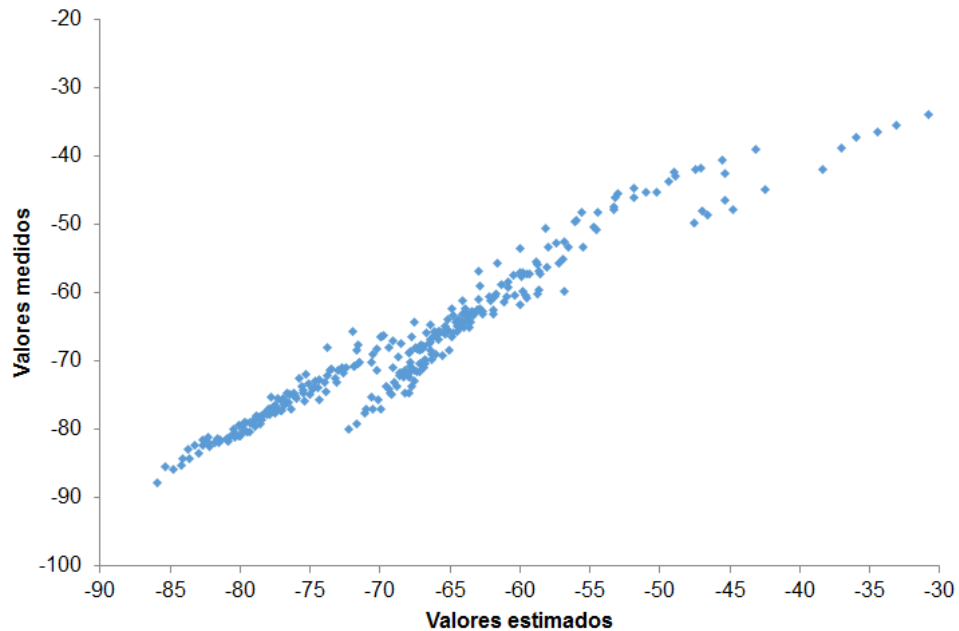


Figura 4.7. Valores medidos y estimados, tercera fase del desarrollo del modelo, $h = 2.5$ m.

Expresión Definitiva del Nuevo Modelo de Propagación

Para obtener la expresión definitiva del modelo de propagación objeto del presente trabajo, se aplica la ecuación clásica del cálculo de enlace, dada por [5]:

$$L(\text{dBm}) = P_T + G_T + G_R - L_T - L_R - P_R \quad (4.14)$$

Donde:

P_T = Potencia del transmisor (dBm)

G_T y G_R = Ganancia de las antenas transmisora y receptora (dBi), respectivamente

L_T y L_R = Pérdidas de alimentación en el transmisor y receptor (dB), respectivamente

P_R = Nivel de potencia recibida (dBm)

Los parámetros P_T , G_T , G_R , L_T y L_R son extraídos de los valores característicos de los equipos en el *setup* experimental descrito en la sección 3.1 (ver Tabla 5), mientras que P_R corresponde a la ecuación (4.13).

P_T (dBm)	20
G_T (dBi)	3
G_R (dBi)	2
L_T (dB)	0
L_R (dB)	0

Tabla 5. Valores de los parámetros del *setup* experimental utilizado.

Por tanto, las pérdidas de propagación estimados por el nuevo modelo se obtienen a partir de:

$$L(\text{dBm}) = 33.06 + 7.08h + (24.06 - 3.19h)\log d + 31.53\log f \quad (4.15)$$

La ecuación (4.15) es válida preferiblemente para frecuencias de operación de 2.4 GHz y 5.8 GHz, alturas del transmisor desde 0.7 m hasta 2.5 m, altura del receptor de 1 m y distancias entre el transmisor y receptor desde 1 m hasta 150 m.

4.4. Análisis Comparativo de Resultados

Para evaluar la precisión del modelo semi-empírico de propagación desarrollado en el presente trabajo, en la estimación de las pérdidas en los ambientes considerados en las mediciones, se realiza una comparación entre su desempeño y el arrojado por algunos modelos de la literatura incluidos en el Capítulo 2; específicamente, modelo de Young, el modelo de Longley-Rice y el modelo extendido de Hata (COST-231 Hata).

En las Figuras 4.8 a 4.12, se muestran, a título de ejemplo, los resultados obtenidos en la mencionada comparación para cinco (5) de los casos de medición.

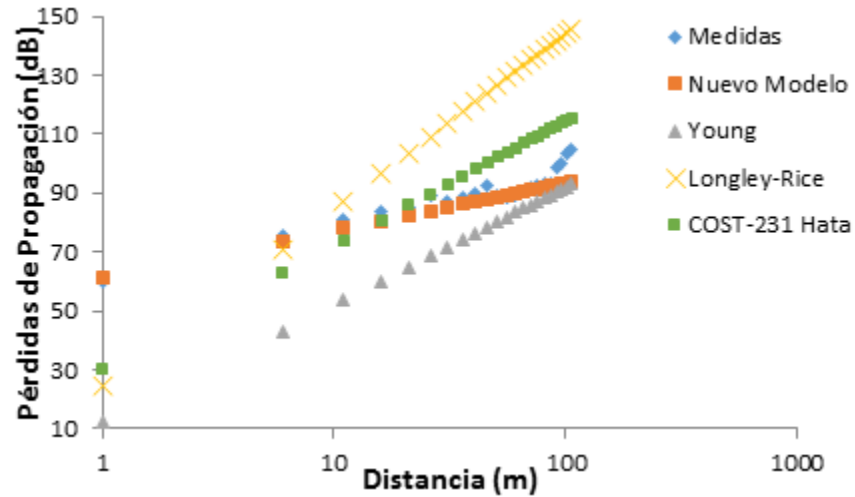


Figura 4.8. Valores medidos y estimados para el ambiente AU3
($f = 2.4 \text{ GHz}$, $h = 2.5 \text{ m}$).

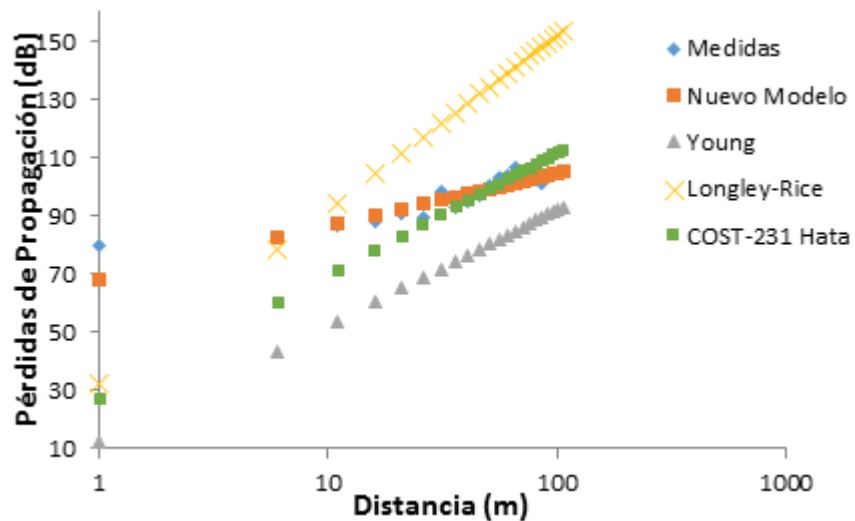


Figura 4.9. Valores medidos y estimados para el ambiente ASU1
($f = 5.8 \text{ GHz}$; $h = 2.5 \text{ m}$).

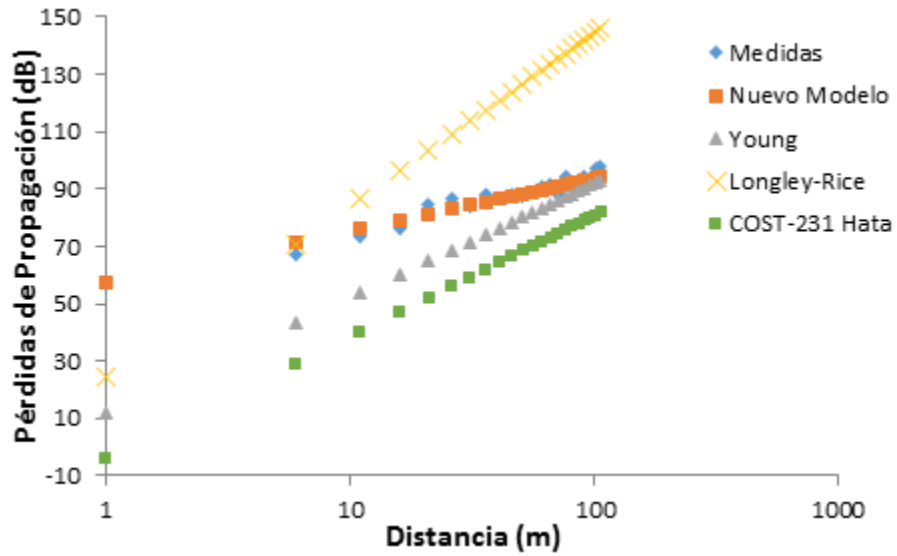


Figura 4.10. Valores medidos y estimados para el ambiente AA1
($f = 2.4$ GHz, $h = 2.5$ m).

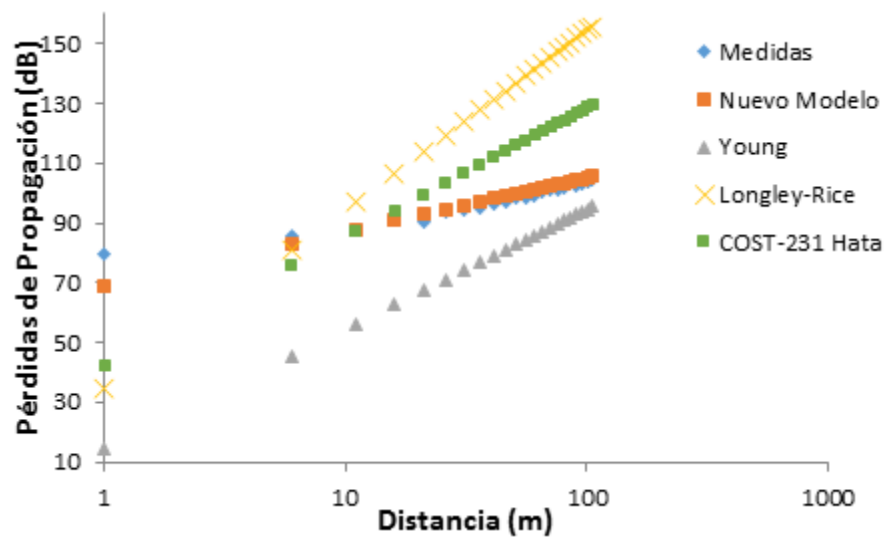
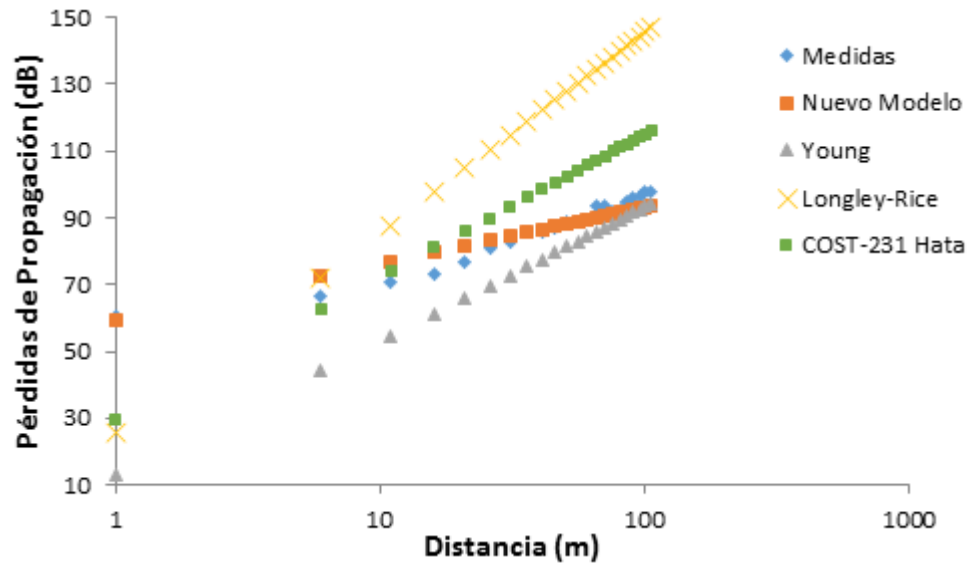


Figura 4.11. Valores medidos y estimados para el ambiente AU1
($f = 5.8$ GHz, $h = 1.9$ m).



**Figura 4.12. Valores medidos y estimados para el ambiente AU2
(f = 2.4 GHz, h = 2.2 m).**

En las Figuras 4.8 a 4.12, se observa que en los casos ejemplos considerados, el nuevo modelo es el que notoriamente mejor desempeño presenta en la predicción de las pérdidas, en tanto que aparentemente el modelo Longley-Rice es el de más bajo desempeño, seguido por el modelo de Young.

No obstante, para obtener una idea más clara sobre el desempeño de los modelos utilizados en las comparaciones, se recurre a la métrica raíz del error medio cuadrático (RMSE, *Root Mean Square Error*) para los cinco (5) casos de medición considerados en las Figuras 4.8 a 4.12.

La RMSE evalúa la diferencia entre los valores estimados por un modelo y los valores medidos (valores reales) en el entorno en el que está siendo aplicado el modelo y se determina a partir de [33]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{medidos} - x_{estimados})^2}{n}} \quad (4.16)$$

Donde:

$x_{medidos}$ = Valores observados o medidos

$x_{\text{estimados}}$ = Valores predichos o estimados

n = Número total de puntos de medición

Los valores RMSE obtenidos se resumen en las Tablas 6 a 10.

RMSE			
Nuevo Modelo	Young	Longley-Rice	COST-231 Hata
4,31	17,85	35,46	13,63

Tabla 6. RMSE para el ambiente AU3 ($f = 2.4$ GHz, $h = 2.5$ m).

RMSE			
Nuevo Modelo	Young	Longley-Rice	COST-231 Hata
3,46	25,36	36,03	13,56

Tabla 7. RMSE para el ambiente SU1 ($f = 5.8$ GHz, $h = 2.5$ m).

RMSE			
Nuevo Modelo	Young	Longley-Rice	COST-231 Hata
2,36	14,83	37,75	25,63

Tabla 8. RMSE para el ambiente AA1 ($f = 2.4$ GHz, $h = 2.5$ m).

RMSE			
Nuevo Modelo	Young	Longley-Rice	COST-231 Hata
2,76	23,12	39,02	19,59

Tabla 9. RMSE para el ambiente AU1 ($f = 5.8$ GHz, $h = 1.9$ m).

RMSE			
Nuevo Modelo	Young	Longley-Rice	COST-231 Hata
3,29	13,55	38,83	15,25

Tabla 10. RMSE para el ambiente AU2 ($f = 2.4$ GHz, $h = 2.2$ m).

Cuanto más bajo es el valor del RMSE, mejor es el desempeño del modelo evaluado. En ese sentido, de las Tablas 6 a 10, se puede comprobar que el nuevo modelo efectivamente presenta el mejor desempeño, con excelentes valores RMSE que incluso no superan el mínimo recomendado, que es 6 dB [49]. Por su parte, el modelo Longley-Rice ciertamente es el más impreciso para los casos de medición considerados, mientras que el desempeño de los modelos COST 231 y Young, aunque arrojan valores RMSE elevados, no lo son tanto como el modelo Longley-Rice.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se desarrolló un modelo de propagación para ambientes exteriores de la ciudad de Cuenca, Ecuador, en base a mediciones del nivel de señal recibido (nivel de potencia recibida) en redes WLAN operando en 2.4 GHz y 5.8 GHz. Las mediciones fueron realizadas en cinco (5) ambientes ubicados en la mencionada ciudad, distribuidos de la siguiente forma: tres (3) urbanos, uno (1) semiurbano y uno (1) abierto.

Para la ejecución de las mediciones se utilizó un *setup* experimental constituido por un enrutador inalámbrico (transmisor) operando en las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz y un laptop dotado de un software para capturar los niveles de señales recibidos (receptor). La herramienta computacional utilizada en el receptor fue el software WirelessMon 4.0.

Debido a que una disminución en el nivel de señal recibido se traduce en un aumento en la pérdida de propagación y viceversa, a raíz de los resultados obtenidos de las mediciones, se pudo confirmar las siguientes apreciaciones:

- A medida que la distancia entre transmisor y receptor aumenta, la pérdida de propagación también se incrementa.
- Un aumento en la frecuencia de operación del sistema ocasiona mayor pérdida de propagación.
- A medida que la altura del transmisor aumenta, la pérdida de propagación disminuye.
- En los ambientes abiertos o rurales, los cuales se caracterizan por la presencia de pocos obstáculos, elementos dispersores de la señal, etc., la pérdida de propagación es menor en comparación con los ambientes urbanos y semiurbanos. Asimismo, el mayor valor de exponente de pérdida de la potencia con la distancia lo presentó el entorno urbano.

El ajuste de los parámetros del modelo desarrollado se llevó a cabo utilizando técnica de regresión lineal en una primera fase y la técnica de regresión no lineal Quasi-

Newton para la segunda y tercera fase del mencionado. En las tres (3) fases se empleó la herramienta computacional Statistica (versión 13.2).

El desempeño del nuevo modelo en la predicción de la pérdida de propagación para los ambientes seleccionados fue comparado con el desempeño que arrojaron otros modelos de la literatura, específicamente, los modelos de Young, Longley-Rice y extendido de Hata (COST-231 Hata). Para la comparación se recurrió a la RMSE entre los valores medidos en el entorno y los valores estimados por cada uno de los modelos, incluyendo el nuevo modelo. Los resultados obtenidos demostraron un notorio mejor desempeño para el nuevo modelo, con valores RMSE por debajo de los 6 dB considerados como valor mínimo recomendable.

Finalmente, para investigaciones y trabajos futuros, desde la óptica del autor del trabajo se recomienda:

- Extender el desarrollo de modelos de propagación para otras ciudades del Ecuador, de manera que se pueda considerar la diversidad de características de propagación existentes en el país.
- En medida de lo posible utilizar equipos de medición calibrados, tales como transmisores profesionales y analizadores de espectro, para garantizar una mayor precisión en los resultados de las mediciones. Asimismo, en el caso de las redes WLAN, incorporar antenas externas que aporten mayor ganancia a la señal RF y por tanto, permitan alcanzar mayores distancias de cobertura.
- Realizar mediciones en otras bandas de frecuencia, una mayor diversidad y cantidad de ambientes y mayores alturas del transmisor e inclusive, del receptor.
- Desarrollar herramientas computacionales que sistematicen y automaticen el proceso de planificación y dimensionamiento de un sistema inalámbrico de telecomunicaciones, en lo que al uso de modelos de propagación desarrollados en el Ecuador se refiere.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Seybold J.S. Introduction to RF Propagation. John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2005.
- [2] Longley A.G., Rice P.L. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss over Irregular Terrain - A Computer Method. NTIS National Technical Information Service. ESSA Technical Report ERL 79-ITS 67, Colorado, USA, 1968.
- [3] Parsons J.D. The Mobile Radio Propagation Channel. Second Edition. John Wiley & Sons, London, England, 2000.
- [4] Rappaport T.S. Wireless Communications: Principles and Practice. Second Edition. Prentice Hall, 2002.
- [5] Pérez N.A. Cálculo de Cobertura de Sistemas WLL e LMDS. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/Rio), Brasil, 2000.
- [6] XIRIO Online (2016). Stanford University Interim. [En línea]. Disponible en: <https://www.xirio-online.com/help/es/sui.html> (consultada en septiembre 2016).
- [7] Alam M.D., Huque-Khan M.R. Comparative Study of Path Loss Models of WiMAX at 2.5 GHz Frequency Band. International Journal of Future Generation Communication and Networking, Vol. 6, No. 2, April 2013, pp. 11-23.
- [8] Sakagami S., Kuboi K. Mobile Propagation Loss Prediction for Arbitrary Urban Environments. Electronics and Communications in Japan, Part 1, Vol. 74, No. 10, 1991, pp. 87-99.
- [9] Ramanathan P. Propagation Path-Loss Prediction Model for 4G Mobile Communication Systems. Pondicherry, India. International Journal of Computer Science and Information Technologies, Part 1, Vol. 5, No. 1, January-February 2014, pp. 410-413.

- [10] Walfisch J., Bertoni H.L. A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 36, No. 12, December 1988, pp. 1788-1796.
- [11] Pérez N.A., Herrera J., Uzcátegui J.R., Peña J.B. Modelo de Propagación en las Ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia) para Redes WLAN, operando en 2.4 GHz, en Ambientes Exteriores. Revista Universidad, Ciencia y Tecnología, Vol. 16, No. 62, Marzo 2012, pp. 54-64.
- [12] Hernández D.A. Modelo para Predicción de Pérdidas de Propagación en Redes WLAN, Bandas No Licenciadas (2.4 GHz y 5.8 GHz), en Ambientes Interiores. Trabajo de Titulación, Magíster en Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador, 2016.
- [13] International Telecommunications Union. Resolution ITU-R 8-1: Radio-wave Propagation Studies and Measurement Campaigns in Developing Countries. Geneva, Switzerland, 1993-2000.
- [14] International Telecommunications Union. ITU-R Study Groups. Geneva, Switzerland, 2016.
- [15] García-Fernández N. Modelo de Cobertura en Redes Inalámbricas basado en Radiosidad por Refinamiento Progresivo. Tesis de Doctorado, Departamento de Informática, Universidad de Oviedo, España, 2006.
- [16] Jacobsen O.J. A Quarterly Technical Publication for Internet and Intranet Professionals. The Internet Protocol Journal, Vol. 9, No. 3, 2006, pp. 1-36.
- [17] Berg. J. (2011). The IEEE 802.11 Standardization. Its History, Specifications, Implementations, and Future. [En línea]. Disponible en: http://telecom.gmu.edu/sites/default/files/publications/Berg_802.11_GMU-TCOM-TR-8.pdf (consultada en septiembre 2016).
- [18] Wilkinson T.A. HIPERLAN: An Air Interface Designed for Multi-Media. Second International Workshop on Mobile Multi-Media Communications (MoMuC-2), Bristol, England, April 1995.

- [19] Moltchanov D.A. (2015). IEEE 802.11 WLAN and HIPERLAN. [En línea]. Disponible en: <http://www.cs.tut.fi/kurssit/ELT-53306/lecture04.pdf> (consultada en septiembre 2016).
- [20] Villalpando J. A. (2016). Televisión Digital II. [En línea]. Disponible en: http://www.iesromerovargas.es/recursos/elec/sol/television_digital_2.htm (consultada en agosto 2016).
- [21] Kiran B. BER Performance Comparison of HIPERLAN/2 for Different Modulation Schemes with $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ Code Rates. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 3, No. 12, December 2015, pp. 12864- 12867.
- [22] Mohammed R.B., Mustafa A.B., Osman, A.A. A Comparison between IEEE 802.11a, b, g, n and ac Standards. IOSR Journal of Computer Engineering, Vol.17, No. 5, September-October 2015, pp. 26-29.
- [23] Shamra S., Shah R. Comparative Study of IEEE 802.11 a, b, g & n Standards. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 4, No. 4, April 2015, pp. 1846-1851.
- [24] Luques M. Redes Wireless - Tecnología MIMO - Análisis y performance del Estándar de Comunicaciones Inalámbricas 802.11n. Trabajo de Especialización en Interconexión de Redes y Servicios, Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina, 2009.
- [25] Khanduri R., Rattan S.S. Performance Comparison Analysis between IEEE 802.11a/b/g/n Standards. International Journal of Computer Applications, Vol. 78, No. 1, September 2013, pp. 13-20.
- [26] Perahia E., Gong M. Gigabit Wireless LANs: An Overview of IEEE 802.11ac and 802.11ad. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications, Vol. 15, July 2011, pp. 23-33.
- [27] Agilent Technologies (2013). Wireless LAN at 60 GHz - IEEE 802.11ad Explained [En línea]. Disponible en: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-9697EN.pdf> (consultada en agosto 2016).

- [28] Baños-Gonzalez V., Afaqui M.S., Lopez-Aguilera E., Garcia-Villegas E. IEEE 802.11ah: A Technology to Face the IoT Challenge. Sensors, Vol. 16, No. 11. November 2016, pp. 1-21.
- [29] Assasa H., Widmer J. Implementation and Evaluation of a WLAN IEEE 802.11ad Model in ns-3. Workshop on ns-3 (WNS3 2016), Seattle, Washington, USA, June 2016.
- [30] Bellalta B. IEEE 802.11ax: High-Efficiency WLANs. IEEE Wireless Communications Magazine, July 2015, pp. 1-16.
- [31] SRM University (2010-2011). TE0421 – Wireless Communication Lab. [En línea]. Disponible en: http://www.srmuniv.ac.in/sites/default/files/files/TE0421%20-%20Manual_Final%5B1%5D.pdf (consultada en agosto 2016).
- [32] Hamid M.D. Measurement Based Statistical Model for Path Loss Prediction for Relaying Systems Operating in 1900 MHz Band. Ph.D Thesis, Electrical Engineering, Florida Institute of Technology, Melbourne, USA, 2014.
- [33] Pinto-Mangones A., Torres-Tovio J.M., García A.S., Pérez-García N., Uzcátegui J. R. Modelo para Estimación de Pérdidas de Propagación en Sistema de Televisión Digital Abierta. Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, CUJAE, Cuba, Vol. XXXVII, No. 2, Mayo-Agosto 2016, pp. 67-81.
- [34] Li X. Efficient Ray Tracing Simulation. Master's Thesis, Department of Electrical and Information Technology, Faculty of Engineering, LTH, Lund University, Swedish, May 2014.
- [35] Agrawal D. P., Zeng Q. Introduction to Wireless and Mobile Systems. Third Edition. Cengage Learning, North Carolina, USA, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://dinus.ac.id/repository/docs/ajar/dharma-prakash-agrawal-intro-to-wireless-and-mobile-system.pdf> (consultada en diciembre 2016).
- [36] Puccinelli D., Haenggi M. Multipath Fading in Wireless Sensor Networks: Measurements and Interpretation. International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC 2006), Vancouver, Canada, July 2006.

- [37] Tirado K., Muñoz J. Una Revisión de Modelos de Propagación para la Planificación y Dimensionamiento de Sistemas de Comunicaciones Móviles. Revista Ingeniería Al Día, Vol. 2, No. 2, Julio-Diciembre 2016, pp. 72-94.
- [38] Rice P.L., Longley A.G., Norton K. A., Barsis A. P. Transmission Loss Predictions for Tropospheric Communication Circuits. National Bureau of Standards (NBS) Technical Note 101, Vols. I and II, Washington, USA, 1965.
- [39] TP-LINK (2016). TL-WDR4300. N750 Wireless Dual Band Gigabit Router. [En línea]. Disponible en: http://static.tp-link.com/resources/document/TL-WDR4300_V1_User_Guide_19100.pdf (consultada en julio 2016).
- [40] TP-LINK (2016). TL-WDN3200. N600 Wireless Dual Band USB Adapter. [En línea]. Disponible en: http://static.tp-link.com/resources/document/TL-WDN3200_V1.0_Datasheet.zip (consultada en julio 2016).
- [41] PassMark. WirelessMon 4.0 build 1009. [En línea]. Disponible en: <https://wirelessmon.uptodown.com/windows> (consultada en julio 2016).
- [42] International Telecommunications Union. Recommendation ITU-R P.1406-2: Propagation Effects relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands. Geneva, Switzerland, 2015.
- [43] Manthe J., Herrera M., Kuykendall A., Gao T., A Distributed, Adaptive Protocol For Handling Interference in Wireless Communications. 2008 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium, Charlottesville, VA, USA, April 2008.
- [44] Nieves-Hurtado A., Domínguez-Sánchez F.C., Probabilidad y Estadística para Ingeniería. McGraw Hill Education, 2010.
- [45] Numerictron. Regresión por Mínimos Cuadrados: Lineal y Cuadrática. [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/numerictron/unidad-4/4-3-regresion-por-minimos-cuadrados-lineal-y-cuadratica> (consultada en septiembre 2016).
- [46] Soporte de Minitab. (2016). Regresión No Lineal. [En línea]. Disponible en: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/regression-and-correlation/basics/nonlinear-regression/> (consultada en septiembre 2016).

[47] Dell Inc. (2016). Statistica 13.2. [En línea]. Disponible en: <http://www.statsoft.com/> (consultada en septiembre 2016).

[48] Araujo P., Pérez-García N., Uzcátegui J.R., Paredes J.L., Silva Mello L. Un Nuevo Modelo para la Atenuación Diferencial por Lluvias en Enlaces Terrestres Convergentes Operando en Frecuencias Superiores a 10 GHz, para Climas Inter-Tropicales. Ciencia e Ingeniería, Vol. 31, No. 3, Agosto-Noviembre 2010, pp.133-141.

[49] Wu J., Yuan D. Propagation Measurements and Modeling in Jinan City. 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Boston, MA, USA, September 1998.

GLOSARIO

Ambientes exteriores: entornos naturales localizados al aire libre, los cuales pueden ser urbanos, semiurbanos y abiertos (rurales).

Atenuación: pérdida de potencia de cualquier tipo de señal (eléctrica, electromagnética) como resultado de ser transmitida a través de algún medio de transmisión.

Bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*): bandas de frecuencias no licenciadas o de libre uso, destinadas precisamente para aplicaciones industriales, científicas y médicas.

Correlación: relación estadística que estudia el grado de correspondencia y relación que existe entre dos variables.

Difracción: mecanismo de propagación que ocurre cuando la onda electromagnética sufre un desvío en su trayectoria debido a su incidencia sobre bordes de obstáculos, rendijas o agujeros.

Dispersión: mecanismo de propagación que tiene lugar cuando la señal, en su trayectoria, se encuentra con un medio eléctricamente diferente, descomponiéndose en diversas ondas con trayectorias hacia atrás, hacia adelante y hacia los lados.

DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*): método de mitigación de interferencias basado en secuencias de bits para cada uno de los bits que componen la señal original, espectro expandido por secuencia directa.

FEC (*Forward Error Correction*): técnica de corrección de errores hacia adelante, en la que los errores se corrigen en el receptor sin reenvío de la señal original.

FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*): es un método de mitigación de interferencias mediante transmisión de partes de la información en diferentes valores de frecuencia durante determinados intervalos de tiempo, espectro expandido por salto de frecuencia.

Ganancia: magnitud que expresa la relación que existe entre la amplitud de la señal de salida con la amplitud de la señal de entrada.

ISI (*Intersymbol Interference*): forma de distorsión de una señal, en la cual un símbolo interfiere con los símbolos subsecuentes.

LOS (*Line of Sight*): trayectoria de una señal que ocurre cuando no existen obstáculos en el camino entre las antenas transmisora y receptora.

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*): tecnología de antenas que emplea múltiples antenas en el transmisor y múltiples antenas en el receptor, por ejemplo, 2x2, 4x4.

Modelo de propagación: conjunto de expresiones matemáticas y/o curvas que permiten determinar la pérdida de propagación que sufre una onda electromagnética en su recorrido hasta el receptor.

Modelo semi-empírico de propagación: conjunto de expresiones matemáticas y/o curvas que lo definen, se basa en la experiencia y observación de los hechos, conjuntamente con el uso de leyes y teorías científicas.

Múltiple trayectoria: mecanismo de propagación que ocurre cuando la onda arriba al receptor a través de diferentes trayectos, de manera que la señal recibida será igual a la suma vectorial de todas las ondas que llegan hasta el receptor.

NLOS (*Non Line of Sight*): trayectoria de una señal sin línea de vista directa entre las antenas transmisora y receptora.

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*): técnica de multiplexación por división ortogonal de frecuencias, en la cual, la onda portadora se divide en subportadoras ortogonales entre sí, para evitar interferencia entre ellas.

Pérdidas de propagación: pérdida de potencia de una onda electromagnética cuando esta se irradia por el espacio.

Potencia recibida: cantidad o nivel de señal recibido que se obtiene a la entrada del receptor con relación a la salida del transmisor.

Receptor: elemento de una red de telecomunicaciones que recibe toda la información enviada desde un determinado transmisor.

Reflexión: mecanismo de propagación que tiene lugar cuando la señal, después de incidir en la superficie de separación de dos medios eléctricamente diferentes, cambia de dirección y regresa al medio de propagación original.

Regresión: relación estadística que determina la estructura de dependencia que mejor expresa la correspondencia entre las variables.

RMSE (*Root Mean Square Error*): raíz del error medio cuadrático. Métrica que evalúa la diferencia entre los valores estimados por un modelo teórico y los valores medidos en el entorno que está siendo modelado.

SISO (*Single Input Single Output*): tecnología de antenas que emplea una sola antena en el transmisor y una sola antena en el receptor.

Transmisor: elemento de una red de telecomunicaciones que envía información hacia uno o varios receptores.

APÉNDICE 1

A1. FOTOGRAFÍAS DE LOS AMBIENTES EXTERIORES CONSIDERADOS PARA LAS MEDICIONES

En la Figura A.1, se muestran tres (3) tomas del ambiente AU1, correspondiente a una calle residencial.



Figura A.1. Ambiente de medición AU1.

Por su parte, en la Figura A.2, se muestran tres (3) tomas del ambiente AU2, correspondiente al patio interior de una institución educativa.



Figura A.2. Ambiente de medición AU2.

Las tomas respectivas del ambiente AU3, corresponden a un parque o plaza pública, y se pueden observar en la Figura A.3.



Figura A.3. Ambiente de medición AU3.

En la Figura A.4, se ilustran tres (3) tomas del ambiente ASU1, que corresponde a un área con densa vegetación.



Figura A.4. Ambiente de medición ASU1.

Finalmente, en la Figura A.5, se muestran tres (3) tomas del ambiente AA1, que corresponde a un área bastante despejada.



Figura A.5. Ambiente de medición AA1.

A2. ABREVIATURAS

AP	<i>(Access Point)</i>
ATM	<i>(Asynchronous Transfer Mode)</i>
BER	<i>(Bit Error Rate)</i>
BPSK	<i>(Binary Phase Shift Keying)</i>
BRAN	<i>(Broadband Radio Access Networks)</i>
DCCA	<i>(Dynamic Clear Channel Assessment)</i>
DSSS	<i>(Direct Sequence Spread Spectrum)</i>
ETSI	<i>(European Telecommunications Standards Institute)</i>
FEC	<i>(Forward Error Correction)</i>
FHSS	<i>(Frequency Hopping Spread Spectrum)</i>
HD	<i>(High Definition)</i>
HiperLAN	<i>(High Performance Radio Local Area Network)</i>
IEEE	<i>(Institute of Electrical and Electronics Engineers)</i>
IP	<i>(Internet Protocol)</i>
ISI	<i>(Intersymbol Interference)</i>
ISM	<i>(Industrial, Scientific and Medical)</i>
ISP	<i>(Internet Service Provider)</i>
ITU	<i>(International Telecommunications Union)</i>
LDPC	<i>(Low Density Parity Check)</i>
LOS	<i>(Line of Sight)</i>
MIMO	<i>(Multiple Input Multiple Output)</i>
MPEG	<i>(Moving Picture Experts Group)</i>
MU-MIMO	<i>(Multiuser MIMO)</i>
NLOS	<i>(Non Line of Sight)</i>
OFDM	<i>(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)</i>
PyD	<i>(Planificación y Dimensionamiento)</i>
QAM	<i>(Quadrature Amplitude Modulation)</i>
QPSK	<i>(Quadrature Phase Shift Keying)</i>

RF	(Radiofrecuencia)
RMSE	(<i>Root Mean Square Error</i>)
RSSI	(<i>Received Signal Strength Indicator</i>)
SISO	(<i>Single Input Single Output</i>)
SSID	(<i>Service Set Identifier</i>)
SUI	(<i>Stanford University Interim</i>)
UHD	(<i>Ultra HD</i>)
UMTS	(<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>)
UU	(<i>User Unit</i>)
WECA	(<i>Wireless Ethernet Compatibility Alliance</i>)
WiFi	(<i>Wireless Fidelity</i>)
WiGig	(<i>Wireless Gigabit Alliance</i>)
WLAN	(<i>Wireless Local Area Network</i>)