



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“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

Previa a la obtención del Título de:

MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

DIEGO ALEJANDRO HERNÁNDEZ BOUTIN

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTOS

Este logro lo agradezco a mis padres, quienes día a día me han dado su apoyo para culminar una etapa más en mi vida. A mi esposa, quien ha estado a mi lado y con la Bendición de Dios seguimos consiguiendo metas.

Agradecer a mis hermosas hijas Nicole Valentina y Sophia Paulette, por quienes de aquí en adelante me ayudarán a poner en práctica lo aprendido en esta maestría.

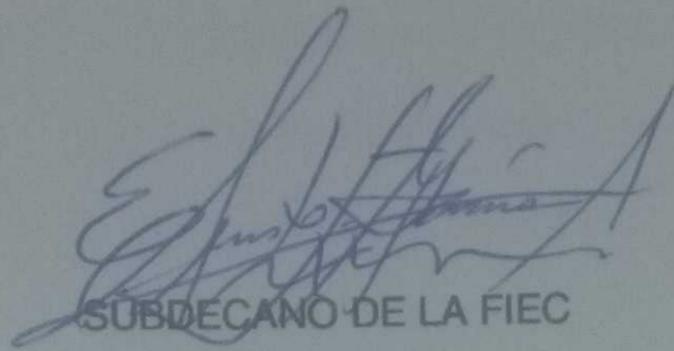
También agradecer a esta prestigiosa institución, MET-ESPOL y a mis profesores de la carrera por compartir sus conocimientos; pero en especial a mi tutor de tesis, Dr. Nelson Pérez García, por brindarme experiencia, amistad y mucho apoyo durante el desarrollo de este proyecto, ya que sin él no habría podido culminar esta etapa.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi querida madre, quien con su trabajo y esfuerzo diario me guió por el camino del bien y confió en mí. A mis hermanos Richard y David, quienes me brindaron su apoyo incondicional. Mi amada esposa Hynga quien desde que la conocí ha sido mi nueva luz del camino, con quien quiero seguir compartiendo etapas y se demuestra que seguiremos adelante hasta llegar a viejitos.

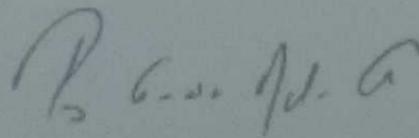
A mi compadre Mauricio Vela, mi comadre Paola Jiménez y mis amigos Héctor Pinto, Wilson Laverde, Juan Alban, María José Montenegro, Priscila Togra, Andrea Asencio, María José Cepeda, que siempre me ayudaron a salir adelante, preocupándose y dándome ánimos en los momentos más difíciles.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



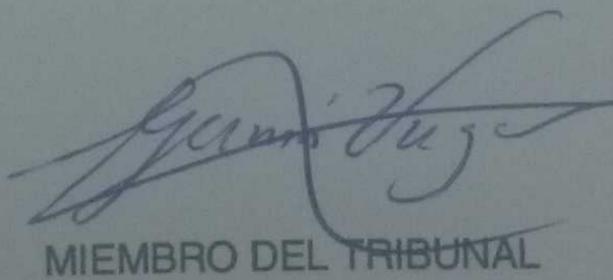
SUBDECANO DE LA FIEC

Dr. Sixto García Aguilar



DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Dr. Nelson A. Pérez García

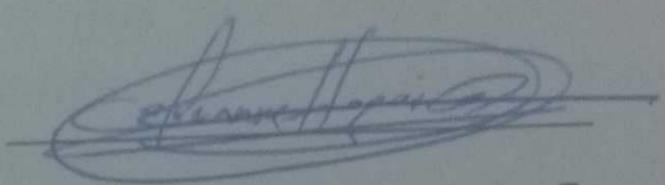


MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Dr. Germán Vargas L.

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"



Diego Alejandro Hernández B.

RESUMEN

La adecuada planificación y dimensionamiento de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones depende de la acertada selección que se haga del modelo de propagación a utilizar, de manera tal que el mismo se adapte lo mejor posible a las características de propagación del ambiente en el que se va a implementar.

En el presente trabajo, se desarrolló un modelo de propagación, basado en mediciones locales realizadas en ambientes interiores de la ciudad de Guayaquil, para frecuencias de operación de 2,4 GHz y 5,8 GHz, utilizando equipos de redes WLAN (*Wireless Local Area Network*).

El modelo desarrollado es comparado con otros modelos existentes en la literatura para la estimación de pérdidas de propagación en ambientes interiores, en términos de la raíz del error medio cuadrático (RMSE = *Root Mean Square Error*), observándose que el nuevo presenta el mejor desempeño en los tres (3) escenarios de estudio considerados, es decir, sin paredes ni pisos en la trayectoria directa de la señal, con paredes interpuestas en esa trayectoria y con un piso siendo atravesado por la trayectoria en cuestión, en virtud del menor valor de RMSE arrojado por el modelo desarrollado en esos tres (3) casos.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO 1	
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del Problema	4
1.3. Justificación	4
1.4. Descripción de la Solución Propuesta	5
1.5. Objetivos	6
1.6. Alcances y Limitaciones	6
1.7. Metodología	7
CAPÍTULO 2	
2. ASPECTOS SOBRE REDES WLAN Y PROPAGACIÓN DE RF EN AMBIENTES INTERIORES	8
2.1. Generalidades sobre Redes WLAN	8
2.1.1. Principales Características del Estándar HiperLAN2 ..	10
2.1.2. Principales Características del Estándar IEEE 802.11a	11
2.1.3. Principales Características del Estándar IEEE 802.11b/g	12
2.1.4. Principales Características del Estándar IEEE	

802.11n.....	13
2.2. Propagación de RF en Ambientes Interiores	16
2.2.1. Atenuación de la Señal con la Distancia	17
2.2.2. Mecanismo de Propagación por Difracción	18
2.2.3. Mecanismo de Propagación por Múltiple Trayectoria ...	19
2.3. Modelos de Propagación en Ambientes Interiores	21
2.3.1. Modelo de 2 Rayos	21
2.3.2. Modelo de Múltiples Rayos	22
2.3.3. Modelo <i>Log-Distance</i>	24
2.3.4. Modelo de ITU-R	25
2.3.5. Modelo COST 231 Keenan y Motley	26
2.3.6. Modelo COST 231 <i>Multiwall</i>	27
2.3.7. Modelo Desarrollado en Venezuela	27
CAPÍTULO 3	
3. MEDICIONES REALIZADAS EN AMBIENTES INTERIORES	29
3.1. Herramientas Computacionales para la Medición del Nivel de Señal Recibido	29
3.2. Equipo Utilizado para las Mediciones	29
3.2.1. Transmisores	31
3.2.2. Receptor	31
3.3. Selección de Ambientes Interiores y Rutas para las Mediciones	31
3.4. Resultados Obtenidos	34
3.4.1. Variación del Nivel de Señal Recibido en Función de la Distancia	34
3.4.2. Variación del Nivel de Señal Recibido en Función de la Altura del Transmisor	38
3.4.3. Variación del Nivel de Señal Recibido en Función del Número de Pisos y Paredes Atravesadas	40

CAPÍTULO 4

4. DESARROLLO DEL MODELO SEMI-EMPÍRICO DE PROPAGACIÓN EN AMBIENTES INTERIORES.....	42
4.1. Técnicas de Regresión para el Ajuste de Funciones	42
4.2. Correlación entre las Variables de Medición	43
4.3. Modelo de Propagación Obtenido	43
4.3.1. Sin Efectos de Pisos y Paredes	45
4.3.2. Con Efectos de Pisos y Paredes	46
4.4. Comparación de Resultados	48
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Arquitectura básica de una red WLAN	9
Figura 2.2: Capa PHY de un transmisor HIPERLAN/2	11
Figura 2.3: Tecnología MIMO	14
Figura 2.4: Pérdidas de la señal con la distancia, para distintos modelos de propagación	18
Figura 2.5: Difracción	19
Figura 2.6: Propagación por múltiple trayectoria	20
Figura 2.7: Desvanecimiento en ambientes interiores	20
Figura 2.8: Método de imágenes en trazado de rayos en ambientes interiores	23
Figura 3.1: InSSIDer	30
Figura 3.2: Caminos para las Medición 1, 2, 3 y 4	33
Figura 3.3: Caminos para las Mediciones 5 y 7	34
Figura 3.4: Caminos para las Mediciones 6 y 8 (AP en el piso de abajo, mostrado en la Figura 3.3).....	35
Figura 3.5: Pérdidas de propagación versus distancia, caminos de Medición 1, 2, 5 y 6 ($f = 2,4$ GHz, $h_T = 2,5$ m)	36
Figura 3.6: Pérdidas de propagación versus distancia, caminos de Medición 7 y 8 ($f = 5,8$ GHz, $h = 2,5$ m)	37
Figura 3.7: Pérdidas de propagación versus distancia, camino de Medición 3, varias alturas “h” ($f = 2,4$ GHz)	39
Figura 3.8: Pérdidas de propagación versus distancia, camino de Medición 4, varias alturas “h” ($f = 5,8$ GHz)	39
Figura 3.9: Pérdidas de propagación en función de la distancia, con y sin presencia de paredes	40
Figura 3.10: Pérdidas de propagación en función de distancia, con y sin presencia de pisos	41

Figura 4.1: Curvas de correlación entre las pérdidas de propagación y la altura de la AP.....	44
Figura 4.2: Curvas de correlación entre las pérdidas de propagación y la frecuencia de operación	44
Figura 4.3: Valores medidos de “L” y valores estimados por la primera aproximación del modelo	46
Figura 4.4: Valores medidos y estimados para el camino de Medición 1 (f = 2,4 GHz, h = 2,5 m)	49
Figura 4.5: Valores medidos y estimados para el camino de Medición 4 (f = 5,8 GHz, h = 2,5 m)	50
Figura 4.6: Valores medidos y estimados para el camino de Medición 6 (f = 2,4 GHz, h = 2,5 m)	51
Figura 4.7: Valores medidos y estimados para el camino de Medición 8 (f = 5,8 GHz, h = 2,5 m)	51
Figura 4.8: Valores medidos y estimados para el camino de Medición 2 (f = 2,4 GHz, h = 2,5 m)	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Factores de pérdidas (pisos y paredes)	27
Tabla 2.2: Factores de pérdidas (pisos y paredes)	28
Tabla 3.1: Características técnicas del AP TL-W801ND	31
Tabla 3.2: Características técnicas del AP AT-D30.....	31
Tabla 4.1: Factor de pérdidas L_{f1}	47
Tabla 4.2: Factor de pérdidas L_w	47
Tabla 4.3: RMSE para el camino de Medición 1 ($f = 2,4$ GHz, h = 2,5 m)	52
Tabla 4.4: RMSE para el camino de Medición 3 ($f = 5,8$ GHz, h = 2,5 m)	53
Tabla 4.5: RMSE para el camino de Medición 6 ($f = 2,4$ GHz, h = 2,5 m)	53
Tabla 4.6: RMSE para el camino de Medición 8 ($f = 5,8$ GHz, h = 2,5 m)	53
Tabla 4.7: RMSE para el camino de Medición 2 ($f = 2,4$ GHz, h = 2,5 m)	53

INTRODUCCIÓN

El buen desempeño de un sistema de telecomunicaciones, una vez puesto en operación, se obtiene luego de un proceso de planificación y dimensionamiento (PyD) lo más preciso posible; proceso que debe cubrir varias aristas, tales como cobertura, capacidad, mantenimiento, etc.

Entre esas aristas, la cobertura guarda relación directa con el nivel de señal recibido, también conocido como potencia recibida. A su vez, el nivel de señal recibido está estrechamente relacionado con las pérdidas de propagación. Para los sistemas inalámbricos, tal es el caso, por ejemplo, de las redes WLAN (*Wireless Local Area Network*), las pérdidas de propagación tienen una alta dependencia con el canal de comunicación, es decir, el aire, llamado “segmento de propagación” en el proceso de PyD.

Un sobredimensionamiento en la estimación de las pérdidas de propagación en un sistema de telecomunicaciones, especialmente los inalámbricos, traerá como consecuencia una inversión económica adicional innecesaria por parte del operador, en términos de equipos. Por su parte, si la predicción de las pérdidas de propagación es subdimensionada, la consecuencia directa será aún más grave, pues afectará directamente a los usuarios, ya que el sistema, puesto en funcionamiento, no brindará cobertura en una o más zonas en las que teóricamente si estaría cubriendo.

En ese sentido, la precisión en el proceso de PyD, en un sistema inalámbrico de telecomunicaciones, dependerá principalmente de si el modelo de propagación seleccionado para la estimación de las pérdidas se adapta o no a las características de propagación propias del ambiente en el cual está siendo planificado y dimensionado el sistema. Por ejemplo, para ambientes interiores, esas características de propagación están relacionadas con las configuraciones físicas de los ambientes, tipo de objetos presentes, tipo de materiales que componen las paredes y pisos, entre otros.

En la literatura existe una enorme cantidad de modelos de propagación, tanto para ambientes interiores como para ambientes exteriores, pero cada uno de ellos ha sido desarrollado para características propias del ambiente considerado, razón por la cual,

suele suceder que cuando uno de esos modelos es aplicado en un ambiente diferente al usado para su desarrollo, sus resultados son imprecisos. Esta imprecisión aumenta en la medida que esas características del ambiente de aplicación difieren en mayor grado que las características del ambiente en el cual el modelo fue desarrollado.

Precisamente, el presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar un modelo de propagación que permita estimar las pérdidas de propagación en ambientes interiores seleccionados en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, en base a mediciones realizadas en dichos ambientes del nivel de señal recibido, y por tanto, de las pérdidas de propagación, en redes WLAN operando en 2,4 GHz y 5,8 GHz.

Ahora bien, para comprender mejor la lectura del texto del presente trabajo, el mismo se ha dividido en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: aborda algunos de los antecedentes sobre el desarrollo de modelos de propagación, especialmente, para las bandas de frecuencia de las redes WLAN. También, se hace el planteamiento del problema y la justificación de la necesidad de resolverlo. Asimismo, se trazan los objetivos a seguir que permitan solucionar del problema. Finalmente, se presentan los alcances del trabajo, las limitaciones encontradas en el desarrollo del mismo y la metodología seguida para dicho desarrollo.
- Capítulo 2: contempla los aspectos más resaltantes de las redes WLAN y los estándares IEEE para dichas redes. Adicionalmente, abarca los principales aspectos de propagación que caracterizan al canal RF (radiofrecuencia) en ambientes interiores, que impactan las pérdidas de propagación en esos ambientes. Además, se hace una revisión de algunos de los modelos de propagación existentes en la literatura para ambientes interiores.
- Capítulo 3: contiene lo relacionado con la realización de las mediciones como tal, es decir, del nivel de señal recibido o potencia recibida, en ambientes interiores de dos (2) edificaciones de la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Así mismo se presenta el diseño del experimento, así como los resultados obtenidos.
- Capítulo 4: se hace el desarrollo del modelo de propagación como tal, en base a los resultados obtenidos en el Capítulo 3. Finalmente, se hacen comparaciones,

en términos del RMSE, del modelo desarrollado con algunos de los revisados en el Capítulo 2.

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo, se hace una breve revisión de algunos de los antecedentes directamente relacionados con el tema central del presente trabajo, es decir, el desarrollo de modelos de propagación, específicamente, para la estimación de pérdidas de la señal en sistemas inalámbricos de telecomunicaciones que operan en 2,4 GHz y 5,8 GHz. Asimismo, se formula el problema que se desea resolver, así como la justificación de la importancia en solucionar dicho problema. Seguidamente, se trazan los objetivos planteados que hacen posible la resolución del problema y se señalan los alcances y limitaciones encontradas en el desarrollo del trabajo. Finalmente, se hace un resumen de la metodología seguida en el trabajo para alcanzar las metas establecidas.

1.1 Antecedentes

El desarrollo de modelos de propagación para sistemas inalámbricos de telecomunicaciones data desde hace muchos años y ha sido ampliamente reportado en la literatura [1-11]. Dicho desarrollo comprende modelos para las distintas bandas de servicio del espectro radioeléctrico, toda vez que cada una de esas bandas tiene sus propias características de propagación que la diferencian unas de las otras. Por ejemplo, una diferencia natural entre cada una de esas bandas es la forma como las pérdidas de propagación aumentan con la frecuencia; forma que difiere precisamente dependiendo de la banda considerada.

Pero existen otros factores que impactan a la forma final del modelo de propagación desarrollado en mayor o menor grado, que incluso son exclusivos de una banda de servicio. Por ejemplo, en las bandas de frecuencias arriba de los 10 GHz el nivel de potencia de la señal recibida se ve seriamente afectado por la presencia de eventos de lluvias que en un momento dado estén presentes en al menos un trecho del camino de propagación de la señal entre el transmisor y receptor; no obstante, enlaces RF que operen en frecuencias inferiores a 10

GHz no verán afectado su nivel de señal recibido debido a la presencia de las lluvias.

Siendo así, en esta sección se hará referencia a algunos de los modelos de propagación desarrollados para las bandas de frecuencia de interés del presente trabajo, es decir, 2,4 GHz y 5,8 GHz, y sólo para ambientes interiores.

En ese orden de ideas, se tiene el artículo de Pérez y colaboradores [1], el cual, por cierto, es usado como referencia base para el desarrollo del presente trabajo, en lo que a la metodología a seguir para la elaboración del modelo respecta. En dicho artículo, se desarrolla un modelo de propagación para predecir las pérdidas de la señal, basado en mediciones realizadas en algunos ambientes interiores de la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), localizada en Venezuela. El modelo en cuestión, el cual será denominado en el presente trabajo como Modelo Venezuela, incluye factores de ajuste por presencia de paredes y pisos.

Otro trabajo que es usado como base para el presente trabajo, es el publicado por Pérez y colaboradores, con finalidad similar al desarrollo expuesto en [1], pero esta vez para ambientes exteriores, utilizando mediciones realizadas en las ciudades de Mérida, Venezuela y Cúcuta, Colombia [2].

Mompo y colaboradores [3], desarrollaron una herramienta computacional basada en la predicción de cobertura en redes IEEE 802.11a/b/g, para ambientes interiores y exteriores. Si bien, en el trabajo en cuestión no se desarrolla un nuevo modelo como tal, un aporte interesante del mismo es la revisión bibliográfica que se hace de algunos de los modelos de propagación clásicos, existentes en la literatura, para ambos tipos de ambientes.

Por su parte, Yi [4], en su tesis de maestría publica sus resultados de mediciones realizadas en la banda de 2,4 GHz, en ambientes exteriores de la ciudad de Espoo, Finlandia. Como transmisor se utilizó a un AP's (Access Point).

En [5], Akl y colaboradores, desarrollan un modelo para ambientes interiores, utilizando el método de ajuste por mínimos cuadrados a los datos obtenidos de

mediciones de potencia recibida. El transmisor empleado fue un AP y como receptor se recurrió a un computador portátil con tarjeta inalámbrica de red.

Han y colaboradores [6], parten de un “mapa de radio” de una red WLAN en espacios interiores, para seleccionar en el mismo una pequeña cantidad de intersecciones y desarrollar un modelo de propagación que permita reconstruir dicho mapa. Con el fin de extender la validez del modelo en cuestión a otros escenarios interiores, se incluyen los ángulos formados por la señal y la superficie de los obstáculos.

En [7] se utiliza el método de inteligencia computacional para evaluar, planificar y dimensionar una red WLAN. Específicamente, para la evaluación o prueba se recurre a redes neuronales artificiales (RNA), considerando las posiciones de los AP's y el receptor como entradas y optimizando la red para un óptimo nivel de señal recibido. Para la planificación y dimensionamiento de red se emplea algoritmo genético, teniendo en cuenta las paredes y las propiedades del AP para nuevamente obtener un nivel de señal recibido deseado. De esa manera, se consigue determinar el número necesario de AP's, así como sus ubicaciones más apropiadas.

Japertas y Slanys [8] publicaron los resultados de sus mediciones realizadas en redes bajo el estándar 802.11 g/n, en ambientes interiores de varios pisos. Como transmisores también fueron utilizados AP's (Access Point). Adicionalmente, en dicho trabajo es desarrollado un modelo propagación basado en las referidas mediciones.

La ITU (International Union Telecommunications), en su Recomendación ITU-R P.1238-8 [9], presenta un modelo que permite estimar las pérdidas de propagación en ambientes interiores, para la banda de frecuencia entre 900 MHz y 100 GHz.

En [10], Solahuddin y Mardeni desarrollan un modelo que denominan modelo Solah's, mediante la optimización del Modelo Particionado en base a mediciones llevadas a cabo en ambientes interiores de una institución universitaria localizada en la ciudad de Penang, Malasia, con una red IEEE 802.11n.

Nagy y Szalay [11], aplican dos (2) métodos de optimización para estimar las adecuadas ubicaciones de los AP`s, en una red WLAN operando en ambientes interiores. Los métodos utilizados fueron algoritmo genético y DIRECT (Divided Rectangles).

1.2 Planteamiento del Problema

El éxito en una adecuada planificación y dimensionamiento de un sistema de telecomunicaciones, entre ellos, las redes WiFi [12-14], está basado, entre otros importantes aspectos, en el uso de un adecuado modelo de propagación que permita predecir, con la mayor precisión, el nivel de señal recibido para posteriormente determinar la distancia de cobertura del sistema. Esa precisión es clave para disminuir el sobredimensionamiento (estimación de mayor número de equipos que los requeridos para alcanzar una determinada cobertura) o subdimensionamiento (cobertura real menor que la estimada, con la consiguiente falla en la prestación del servicio) del sistema que se está planificando y dimensionando.

Al respecto, si bien existe en la literatura una significativa cantidad de modelos de propagación para la predicción del nivel de señal recibido, ninguno de ellos ha sido desarrollado considerando las condiciones propias de propagación (atmósfera, orografía, morfología, tipos de ambientes, tipos de material de construcción, entre otros) típicas de Ecuador, por lo que se espera que la aplicación de esos modelos para la planificación y dimensionamiento de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones en el país, redunden en el subdimensionamiento o sobredimensionamiento de las pérdidas de propagación.

1.3 Justificación

El desarrollo del modelo de propagación objeto del presente trabajo, se basará en mediciones del nivel de señal recibido, en las frecuencias de operación 2.4 GHz y 5.8 GHz, en ambientes interiores (*indoor*) en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, lo que redundará en un modelo que al ser aplicado en la planificación y dimensionamiento de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones que operen en las citadas bandas de frecuencias y en ambientes de Ecuador similares a los que serán considerados en las mencionadas mediciones, disminuirá el grado de

imprecisión en las predicciones de rigor, es decir, del nivel de señal recibido (o pérdidas de propagación) y de la distancia de cobertura.

Adicionalmente, existen valores agregados relacionados. Por una parte, se estarán impulsando campañas de mediciones de radio propagación desde el ámbito natural de la investigación como lo son las instituciones universitarias del país; mientras que por otro lado, se estará contribuyendo, de una manera u otra, con la filosofía de la ITU (*International Telecommunication Union*) de motivar a campañas de mediciones en radio propagación en el mundo entero [15].

1.4 Descripción de la Solución Propuesta

Se hacen mediciones del nivel de señal recibido en ambientes interiores localizados en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Adicionalmente, se incorpora la banda de 5,8 GHz, también de licencia libre, en las referidas mediciones.

Con la base de datos de las mediciones obtenida y aplicando como estrategia base de desarrollo la implementada en el modelo Venezuela [1], se desarrolla un modelo de propagación ajustado a esas nuevas mediciones, cuya mayor precisión en la estimación de las pérdidas de propagación en los ambientes considerados será confirmada mediante comparación, en términos del RMSE (*Root Mean Squared Error*), con las pérdidas de propagación estimadas por algunos de los modelos existentes en la literatura, tales como modelo *log-distance* y modelo Venezuela.

Es importante resaltar que, en realidad el modelo desarrollado en el presente trabajo no puede ser considerado como simplemente una variante del modelo Venezuela basada en un ajuste de los parámetros del mismo, ya que, por ejemplo, el nuevo modelo no contempla el método de regresión lineal (como se hace en el modelo Venezuela), además de que incorpora el efecto de la frecuencia, así como una forma diferente de considerar la atenuación adicional debida a las paredes. No obstante, conforme ha sido mencionado anteriormente, el modelo Venezuela es de utilidad tomado como referencia base, especialmente en lo que concierne el protocolo de mediciones, así como la forma en cómo varían algunos de los factores de la primera expresión del nuevo modelo.

1.5 Objetivos

General

Desarrollar un modelo de propagación para la estimación de pérdidas de propagación en redes IEEE 802.11 a/b/g/n, en base a mediciones realizadas en ambientes interiores de Guayaquil, Ecuador.

Específicos

- Estudiar el estado del arte de las redes WLAN (*Wireless Local Area Network*), con énfasis en las redes basadas en el estándar IEEE 802.11 y sus variantes.
- Analizar el estado del arte de los principales modelos de propagación utilizados en la planificación y dimensionamiento de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones que operan en las bandas de 2,4 GHz y 5,8 GHz, y cercanas a las mismas, en ambientes interiores.
- Realizar medidas de campo, en ambientes interiores de la ciudad de Guayaquil, Ecuador, del nivel de señal recibido, en las bandas de 2,4 GHz y 5,8 GHz.
- Desarrollar un modelo de propagación para 2,4 GHz y 5,8 GHz, para ambientes interiores, en base a las mediciones realizadas.
- Comparar, en términos del RMSE (*Root Mean Squared Error*) el desempeño del modelo desarrollado con algunos de los modelos existentes en la literatura.

1.6 Alcances y Limitaciones

El modelo desarrollado permite predecir las pérdidas de propagación en ambientes interiores similares a los considerados para la realización de las mediciones y para frecuencias de operación en 2,4 GHz y 5,8 GHz.

Adicionalmente, el presente trabajo reafirma el protocolo de mediciones propuesto en [1] para objetivos similares planteados en el presente trabajo.

Asimismo, el trabajo en cuestión consolida el hecho de que no necesariamente se requiere contar con equipos especializados y calibrados de medición, para emprender investigación, basadas en mediciones, que hagan posible la realización de mediciones en Ecuador y otras partes del mundo, que decanten en el desarrollo de modelos con cierta validez científica. Esa afirmación fue

confirmada por el menor RMSE obtenido para el nuevo modelo en todos los escenarios de comparación.

En cuanto a las limitaciones presentadas en el desarrollo del presente trabajo, se encuentran las especialmente relacionadas con la realización de mediciones en las edificaciones consideradas, debido principalmente al desconocimiento por parte de los administradores de ambas edificaciones del quehacer científico de las instituciones universitarias de Ecuador en actividades como las desarrolladas en este trabajo.

Otra limitación, que afortunadamente fue superada, fue la de no poder contar con el software AUTOCAD para representar los ambientes en los que se realizarán las mediciones; pero ello no fue necesario ya que los administradores suministraron los planos de los ambientes en los que se realizaron las mediciones.

1.7 Metodología

Se siguió una metodología inicialmente de tipo documental [16], específicamente en relacionada con la revisión bibliográfica sobre el estado del arte de las redes WLAN, especialmente las basadas en IEEE 802.11 y sus variantes, así como con el estudio de algunos de los principales modelos de propagación existentes en la literatura para la estimación de las pérdidas de propagación en ambientes interiores, en las bandas de frecuencia de 2,4 GHz y 5,8 GHz.

También se recurrió a una investigación experimental [16], ligada a la realización de las mediciones de campo, concretamente del nivel de la potencia recibida, en los ambientes considerados. Concretamente, fueron realizadas mediciones de dicho nivel en función de la distancia entre el transmisor y receptor y también en función de la altura del transmisor. Además, se consideró el efecto de los pisos y paredes en el mencionado nivel de señal recibido.

Finalmente, se recurre a la investigación comparativa [16], mediante la cual se evalúa el desempeño del modelo desarrollado en presente trabajo en comparación con el desempeño mostrado por los otros modelos existentes en la literatura incluidos en dicha comparación.

CAPÍTULO 2

2. ASPECTOS SOBRE REDES WLAN Y PROPAGACIÓN DE RF EN AMBIENTES INTERIORES

Este capítulo abarca las características más resaltantes de las redes WLAN, así como las de los estándares IEEE para dichas redes, es decir, 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, entre otros. Así mismo, se abordan los principales aspectos que caracterización en canal inalámbrico en ambientes interiores que inciden directamente en las pérdidas de propagación que tienen lugar en ese tipo de ambientes. Finalmente, se hace una revisión de algunos de los modelos, existentes en la literatura, para la estimación de las pérdidas de propagación en ambientes interiores.

2.1 Generalidades sobre Redes WLAN

Una red WLAN, es decir, red inalámbrica de área local, está destinada a la transmisión de datos a través del aire como medio de transmisión, es decir, sin cables. De esa manera, una red WLAN presenta como principales ventajas sobre su homóloga cableada, el hecho de poder ser instalada más fácil y rápidamente, es flexible y escalable y, generalmente, de menor costo en su implantación. Adicionalmente, ofrece a los usuarios la ventaja de poder estar conectados a la red, en cualquier lugar que la misma tenga red y/o cobertura, sin requerir una conexión cableada, por lo que fácilmente lo puede hacer desde su computador portátil, teléfono celular, *tablet*, etc.

La arquitectura básica de una red WLAN es la mostrada en la Figura 2.1 [17].

En la Figura 2.1, el AP (*Access Point*) tiene como función, por un lado, enlazarse al proveedor de ISP (*Internet Service Provider*) y, por otro lado, suministrar la conexión inalámbrica a los usuarios (U).

La capacidad de usuarios que una red WLAN puede soportar de manera simultánea varía dependiendo de las condiciones de propagación en un determinado momento, así como del volumen de información que los usuarios estén traficando por la red la mismo tiempo. En todo caso, la capacidad de la red

se determina en términos de la velocidad de transmisión total, es decir Mbps (megabits por segundo), que dicha red pueda ofrecer. Por ejemplo, con el estándar IEEE 802.11b la velocidad de transmisión máxima teórica es 11 Mbps, mientras que en el estándar IEEE 802.11n podría llegar a ser 600 Mbps [18].

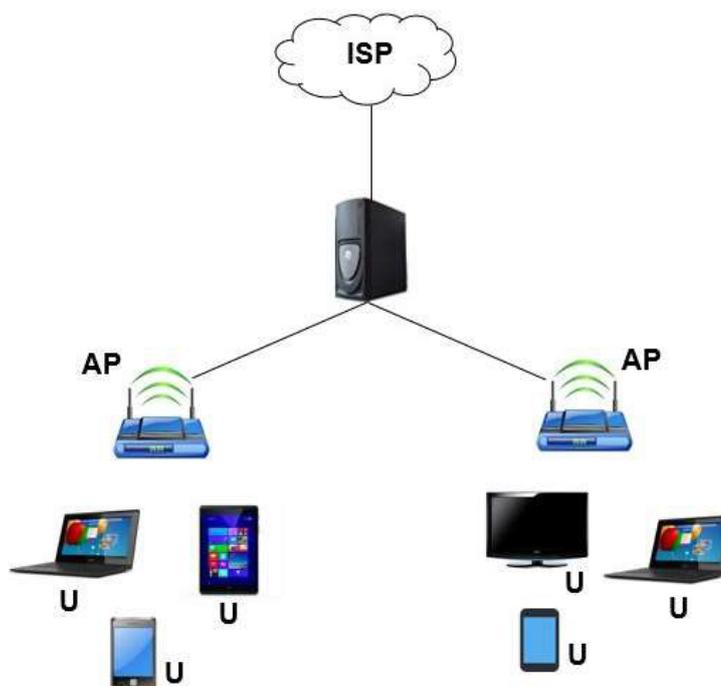


Figura 2.1: Arquitectura básica de una red WLAN.

Asimismo, los AP's tienen incorporadas, antenas internas o externas, a través de las cuales pueden cubrir una determinada área, cuyo radio varía dependiendo del estándar. Por ejemplo, en ambientes exteriores se pueden alcanzar típicamente, sin repetidores o antenas alternas, desde 140 metros (estándar IEEE 802.11b) hasta 250 metros (estándar IEEE 802.11n) [19] e incluso hasta más de un kilómetro (estándar IEEE 802.11af), en ambientes exteriores [20].

Es oportuno resaltar que, en la actualidad existen módems, por ejemplo, de la red ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) que al mismo tiempo funcionan como AP o enrutadores inalámbricos.

Finalmente, para que un equipo de usuario pueda acceder a la red WLAN debe contar con una tarjeta para conexión a red inalámbrica. En la actualidad, dichas tarjetas están presente en laptops, teléfonos celulares, Ipad's, *tablets*, televisores, consolas de videojuegos, entre otros.

2.1.1 Principales Características del Estándar HiperLAN2

HiperLAN/2 es una evolución de HiperLAN/1 y fue propuesto por la ETSI BRAN (*European Telecommunications Standards Institute - Broadband Radio Access Networks*) en 1999, para ofrecer velocidades de transmisión de hasta 54 Mbps, en la banda de los 5 GHz.

HiperLAN/2 puede ser usado en conjunto con otras redes (por ejemplo, WiMax, telefonía celular, etc.). Ello es posible gracias a una arquitectura flexible que define la red o redes de convivencia independientemente de las capas físicas (PHY = *Physical*) y de control de datos del enlace (DLC = *Data Link Control*). Además, contempla un conjunto de capas de convergencia (CL = *Convergence Layer*) que facilita el acceso a dichas redes [21].

La capa DLC tiene la función de establecer el enlace lógico entre el AP y los usuarios. Está compuesta por las subcapas MAC (*Medium Access Control*), EC (*Error Control*), DCC (*DLC Connection Control*), RLC (*Radio Link Control*), entre otras [22].

Por su parte, las capas de convergencia están representadas, entre otras, por Ethernet, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), PPP-IP (*Point-to-Point Protocol - Internet Protocol*) y UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [21, 23].

La interfaz aérea, representada por la capa MAC, está basada en TDD (*Time Division Duplex*) y en la técnica de acceso TDMA (*Time Division Multiple Access*). El control está centralizado en el AP, que es el que informa a las unidades de usuario para que transmitan sus datos [21, 24].

HIPERLAN/2 emplea OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), técnica con alta eficiencia que contrarresta el

desvanecimiento selectivo en frecuencia, típico de la múltiple trayectoria, y “aleatoriza” los errores de ráfaga causados por un canal con desvanecimiento en banda ancha [25].

La Figura 2.2 ilustra la capa física de un transmisor HIPERLAN/2 [21].

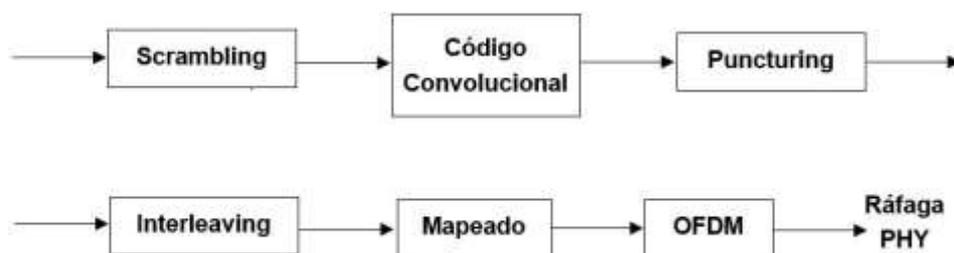


Figura 2.2: Capa PHY de un transmisor HIPERLAN/2.

En resumen, los datos con la información son mezclados (*scrambling*) con una secuencia pseudoaleatoria de longitud 127. Seguidamente, la información ingresa a un codificador convolutacional para la detección y corrección de error, con tasa de código igual a $\frac{1}{2}$. Luego, es sometida al proceso de punción (*puncturing*), para facilitar el uso de códigos con otras tasas. A continuación, se aplica el intercalador (*interleaving*) para minimizar los errores de ráfaga. La información codificada e intercalada es mapeada en símbolos de acuerdo al esquema de modulación empleado, el cual puede ser BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ó 64-QAM [21, 24].

La cobertura alcanzada por un AP de HiperLAN/2 puede llegar hasta los 150 m, en ambientes exteriores.

2.1.2 Principales Características del Estándar IEEE 802.11a

Creado en 1999 por IEEE, para proporcionar servicio de transmisión inalámbrica de datos a una velocidad de hasta 54 Mbps, en la banda no licenciada ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 5 GHz, superando los escollos que representan las interferencias típicas de la banda 2,4 GHz

provenientes de hornos microondas, teléfonos inalámbricos, monitores de bebés, entre otros, pero con mayores pérdidas por operar en una frecuencia superior y por ser más sensible a la presencia de obstáculos [26].

IEEE 802.11a también utiliza OFDM (específicamente, con 52 subportadoras) y la tecnología de antenas SISO (*Single Input, Single Output*). Su alcance puede llegar hasta los 125 m en ambientes exteriores. No obstante, existe una versión de IEEE 802.11a para la frecuencia de operación de 3,7 GHz, que puede tener distancias de cobertura hasta los 5 km [19, 21].

El núcleo principal de IEEE 802.11a es el mismo de su antecesor IEEE 802.11, con la incorporación de OFDM. Las capas físicas del transmisor son las mismas de HiperLAN/2, es decir, las mostradas en la Figura 2.2. Sin embargo, la inicialización del mezclador es diferente. Además, contempla tasa de 2/3, para la detección y corrección de error que no está contemplada en HiperLAN/2 [21].

En cuanto a la estructura de capas que conforman IEEE 802.11a, la misma es similar a la de HiperLAN/2, con algunas diferencias en la capa MAC y la capa física. En ese sentido, por ejemplo, IEEE 802.11a usa protocolo MAC distribuido, basado en CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*), el cual es referido como “escuche antes de hablar” debido a que las unidades de usuario deben evaluar el canal de radio antes de transmitir. Si el canal está libre, comienza la transmisión, pero de no estarlo, después de cierto periodo de tiempo el canal es evaluado nuevamente. El empleo de una capa MAC distribuida, hace que IEEE 802.11a pueda ser utilizado en redes *ad hoc* y aplicaciones en tiempo no real [21].

2.1.3 Principales Características del Estándar IEEE 802.11b/g

IEEE 802.11b fue también lanzado en 1999, para operar en la banda ISM de 2,4 GHz, con velocidades de transmisión hasta 11 Mbps (el estándar original, es decir, IEEE 802.11, soportaba velocidades hasta 5,5

Mbps). Puede alcanzar distancias de hasta 140 metros, con tecnología de antena SISO [19].

Al igual que el estándar original, es decir, IEEE 802.11, esta versión mejorada emplea DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). Como técnicas de modulación contempla BPSK y QPSK.

Por su parte, el estándar IEEE 802.11g fue creado en 2003, para operar también en la banda no licenciada de 2,4 GHz, es decir, es compatible con IEEE 802.11b. De hecho, prácticamente desde su lanzamiento, surgieron los productos IEEE 802.11b/g. Utiliza DSSS u OFDM. En este último caso, se pueden alcanzar velocidades de transmisión hasta 54 Mbps [26].

También utiliza tecnología SISO, con distancias de cobertura hasta los 140 m [19].

La concepción de capas de IEEE 802.11b e IEEE 802.11g son similares y su vez, similares a las de IEEE 802.11a, con las diferencias relacionadas con el uso de DSSS y/o OFDM.

Al igual que IEEE 802.11a, los estándares IEEE 802.11b e IEEE 802g IEEE 802.11ag usan protocolo MAC distribuido, basado en CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*).

2.1.4 Principales Características del Estándar IEEE 802.11n

El estándar IEEE 802.11n, publicado en 2009 es el primer estándar de IEEE de redes inalámbricas diseñado para operar en las bandas ISM de 2,4 GHz ó 5 GHz, es decir, es compatible con los estándares IEEE 802.11a, IEEE 802.11b e IEEE 802.11g.

En comparación con sus antecesores, IEEE 802.11n introduce dos (2) nuevas tecnologías [26, 27]:

- Ancho de banda del canal de 40 MHz: que duplica la velocidad de transmisión en comparación con todos sus antecesores, que usan anchos de banda de canal de 20 MHz.

- MIMO (Multiple Input, Multiple Output): es decir, múltiples antenas para la transmisión y recepción, para mejorar la distancia de cobertura (hasta 250 metros en ambientes exteriores). Adicionalmente, MIMO contribuye a incrementar la velocidad de transmisión.

En la Figura 2.3, se puede observar el concepto de la tecnología de antena MIMO [26].

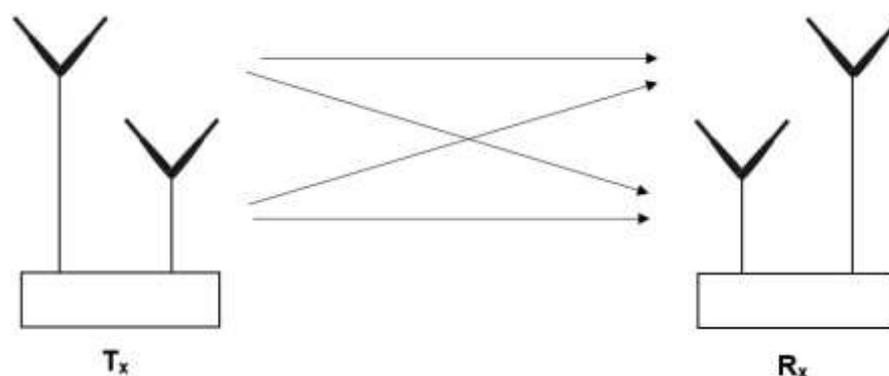


Figura 2.3: Tecnología MIMO.

MIMO representa dos importantes ventajas, como los son diversidad de antena [28] y multiplexación espacial [28], lo cual permite de resolver de manera coherente la información proveniente de la trayectoria múltiple mediante el uso de las múltiples antenas receptoras separadas espacialmente.

Con el uso de un ancho de banda de canal mayor (40 MHz), IEEE 802.11n ofrece velocidades de transmisión de hasta 150 Mbps. Si se implementa MIMO 2x2, es decir, dos (2) transmisoras y dos (2) antenas receptoras (como lo ilustra la Figura 2.3), la velocidad se duplica hasta 300 Mbps; en tanto que con MIMO 4x4 dicha velocidad puede alcanzar los 600 Mbps, siempre y cuando se use para la detección y corrección de errores el código LPDC (*Low Density Parity Check*) [18, 28].

Es oportuno resaltar que, en IEEE 802.11n, las velocidades de transmisión ofrecidas en el ancho de banda de canal de 20 MHz, pueden ir desde 65 Mbps hasta 288 Mbps [28].

Otro aspecto interesante de IEEE 802.11n es que contempla AP's con ganancia de antena de hasta 5 dBi, lo cual contribuye a también incrementar la distancia de cobertura de dichos AP's [28].

Finalmente, también es importante destacar que IEEE 802.11 contempla otros estándares, algunos de ellos ya lanzados y otros en proyecto, para transmisión de datos con objetivos precisos en términos de velocidad de transmisión, cobertura y banda de frecuencia de operación. Esos estándares son:

- IEEE 802.11ad [29-30]: también conocido como WiGig (*Wireless Gigabit Alliance*), fue publicado en 2012 y ofrece velocidades de hasta 6,93 Gbps (inclusive, hasta 28,5 Gbps, con MIMO 4x4). Opera en la banda de frecuencia no licenciada llamada "campo verde" (*green-field*) de 60 GHz (altamente sensible a la atenuación por lluvias), en un ancho de canal de 2,16 GHz. La cobertura estimada alcanza hasta los 10 metros.
- IEEE 802.11ac [30-31]: aprobado en enero de 2014, opera en la banda de 5 GHz y contempla velocidades de transmisión hasta 1,3 Gbps, empleando MU-MIMO (*Multiuser MIMO*). Incorpora el uso de modulación 256-QAM. Como código para detectar y corregir errores emplea LDPC y su cobertura es de hasta 80 metros (con MU-MIMO).
- IEEE 802.11ah [32-33]: se espera su lanzamiento para 2016. Operará en la banda no licenciada ISM de 900 MHz, por lo que se esperan distancias de coberturas de hasta 1 km. Usará OFDM y también contemplará modulación 256-QAM, para velocidades de transmisión de 100 kbps, pero se espera se puedan lograr hasta 40 Mbps. Además, incluye radio cognitiva, mecanismos avanzados de ahorro de potencia y soporte para dispositivos M2M (*Machine to Machine*).
- IEEE 802.11af [33-34]: aprobado en enero 2014, tiene como objetivo utilizar los espacios no utilizados (espacios en "blanco") del espectro de TV Digital Terrestre (TDT), razón por la cual también se denomina "White-Fi". Concretamente, la banda de operación está desde 54 MHz

hasta 790 MHz, por lo que puede ser utilizado por una gran variedad de dispositivos. De manera similar a IEEE 802.11ah, el alcance es de hasta al menos 1 km y también incluye radio cognitiva, soporte para dispositivos M2M (*Machine to Machine*) y mecanismos avanzados de ahorro de potencia.

- IEEE 802.11aj [35]: otra versión de IEEE 802.11ad, pero en frecuencia de operación de 45 GHz, para ser utilizada en algunas regiones del mundo, como por ejemplo, China. Se espera su lanzamiento para 2016. Utilizará anchos de banda de canal de 540 MHz y 1,08 GHz. Por su limitada distancia de cobertura, el estándar estará destinado a ser utilizado en oficinas, salas de conferencia y salas de estar de hoteles, hospitales, etc.
- IEEE 802.11ax [36]: se espera sea lanzado en 2019 para operar en bandas 2,4 GHz y 5 GHz. Se considera sucesor de IEEE 802.11ac, con cuatro (4) veces más de velocidad de transmisión, gracias al uso de nuevas tecnologías para redes inalámbricas tales como DCCA (*Dynamic Clear Channel Assessment*) y OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*).
- IEEE 802.11ay [37]: Será publicado en 2017. Considerado como sucesor de IEEE 802.11d, operará en la banda de 57 GHz y 64 GHz, pero con velocidades de transmisión desde 20 Gbps hasta 100 Gbps. La distancia de cobertura será de hasta 100 m en ambientes exteriores.

2.2 Propagación de RF en Ambientes Interiores

En ambientes interiores, la señal, en su trayecto desde el transmisor hasta el receptor, puede valerse de diversos mecanismos para alcanzar su destino. Esos mecanismos son la línea de vista directa (LOS = *Line of Sight*), múltiple trayectoria y difracción.

La propagación por línea de vista ocurre cuando entre el transmisor y el receptor existe visibilidad directa. Este tipo de propagación no es precisamente el más común en ambientes interiores, ya que, en este tipo de ambientes abundan los obstáculos, como por ejemplo, muebles, paredes, pisos, objetos, entre otros.

Por su parte, en esos ambientes si es común la propagación múltiple trayectoria y difracción.

La trayectoria múltiple se debe a que la señal en realidad está contenida en un haz y no en una sola dirección, por lo que, en ambientes interiores cada una de las direcciones o trayectorias o rayos que conforman el haz, sigue su propio camino y en más de un camino la señal se consigue con superficies que reflejan la señal bajo el principio de la primera ley de Snell [20]. El campo eléctrico de la señal recibida será la sumatoria, en módulo y fase, de todas las versiones de la señal que alcancen la antena receptora.

La difracción tiene lugar cuando una o más trayectoria que conforman el haz que se irradia de la antena transmisora incide en un borde, por ejemplo, de una mesa, un escritorio, una pared, entre otros, por lo que, parte de la señal es difractada pudiendo alcanzar directamente al receptor o alcanzarlo después de previas reflexiones o difracciones en otros puntos del recorrido de la señal.

Ahora bien, la múltiple trayectoria y la difracción también pueden pasar a ser perjudiciales en relación al nivel de la potencia recibida. Esa afectación, en conjunto con las pérdidas de propagación con la distancia, determina el nivel del desvanecimiento en la señal recibida.

2.2.1 Atenuación de la Señal con la Distancia

Toda señal que se transmite de un punto a otro siempre se atenúa a medida que se propaga en el canal, indistintamente del medio de transmisión utilizado. Según Briceño [38], ello se debe a “la distribución de la señal en el canal, que produce una reducción en la densidad de potencia de dicha señal”.

En el caso de la propagación a través del espacio libre (las antenas se suponen tan elevadas, que la señal no se ve afectada por la presencia de la superficie terrestre ni de obstáculos), la pérdida que sufre la señal con la distancia es de 20 dB/década [1]; en tanto, que para otros modelos, como el de tierra plana (modelo de dos rayos) [39] o los desarrollados

para ambientes urbanos, suburbanos o rurales, esas pérdidas oscilan entre 20 dB/década y 40 dB/década o más.

En la Figura 2.4, se muestra la variación de las pérdidas de propagación para espacio libre, tierra plana y el modelo de Egli [39] (aplicado para diversos ambientes: SU-1 = Suburbano 1, SU-2 = Suburbano 2, NY = Nueva York, F = Filadelfia) [40].

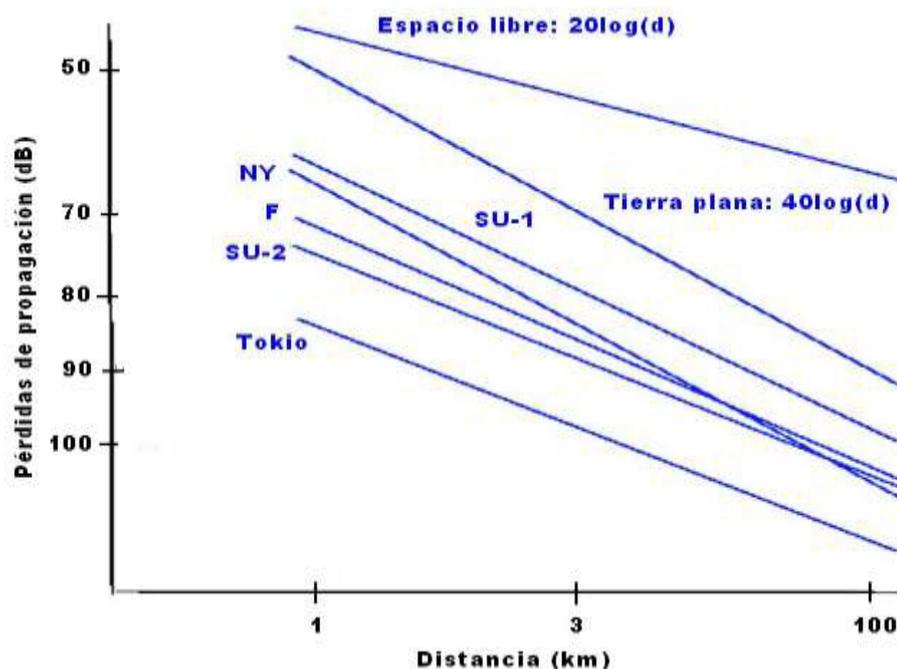


Figura 2.4: Pérdidas de la señal con la distancia, para distintos modelos de propagación.

2.2.2 Mecanismo de Propagación por Difracción

Tal como fue mencionado anteriormente, la difracción ocurre cuando la señal, en su recorrido hacia el receptor, se encuentra con superficie que tiene irregularidades agudas (bordes), como es ilustrado en la Figura 2.5 [41]. En estas circunstancias, parte de las trayectorias o rayos que componen el haz de la onda electromagnética, viajarán alrededor de esquinas y otros bordes, lo cual puede permitir que al menos un subconjunto de las mismas alcance su destino aun cuando no exista línea

de vista entre transmisor o que, por el contrario, no llegue hasta el receptor. A alta frecuencia, como es el caso de las redes WLAN, la difracción depende de la geometría del objeto, así como de la amplitud, la fase y la polarización de la onda incidente al punto de difracción [28].

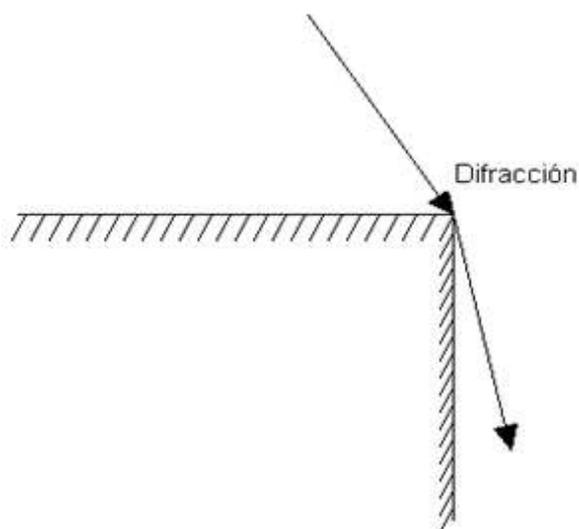


Figura 2.5: Difracción

2.2.3 Mecanismo de Propagación por Múltiple Trayectoria

En la Figura 2.6, se observa un caso típico de propagación en ambientes interiores mediante el mecanismo de múltiple trayectoria [42]. Nótese que no todas las trayectorias o rayos que parten del transmisor alcanzan al receptor. No obstante, el mecanismo permite que rayos que no tienen línea de vista directa con el receptor alcancen a éste después de reflejarse previamente, al menos una vez, en una superficie.

En todo caso, la magnitud del campo eléctrico en el receptor, y en consecuencia, el nivel de señal recibido, será el resultado de la composición vectorial de los campos eléctricos asociados a cada uno de los rayos que llegan a su destino. En la Figura 2.7 se muestra un caso típico de variación del nivel de señal recibido en un ambiente interior en función del tiempo [43], en la que se puede observar los significativos

descensos del nivel nominal de la potencia recibida en determinados intervalos de tiempo, que pueden sacar de operación al sistema.

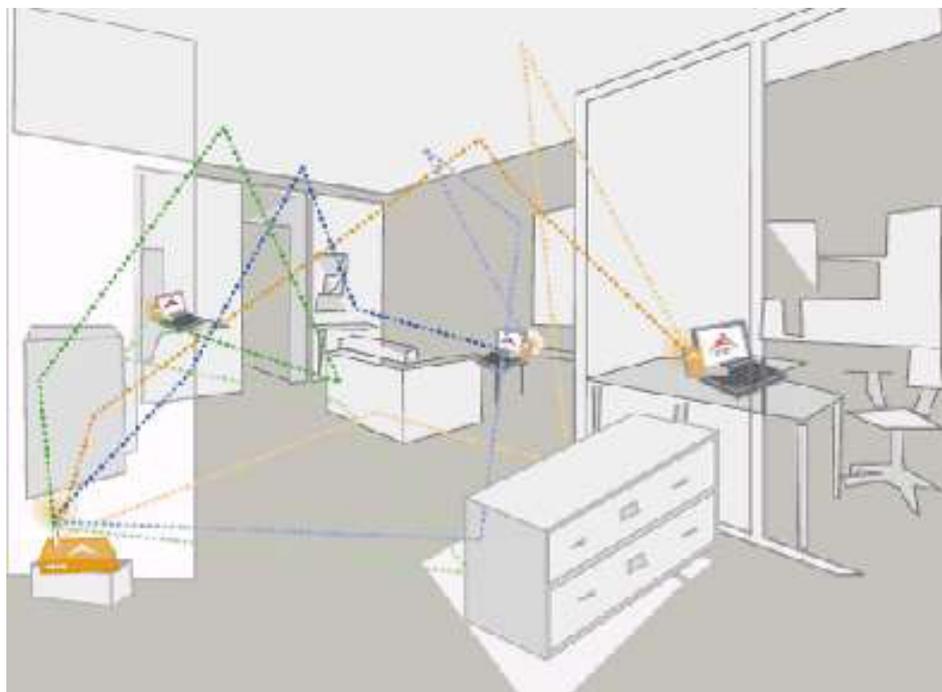


Figura 2.6: Propagación por múltiple trayectoria.

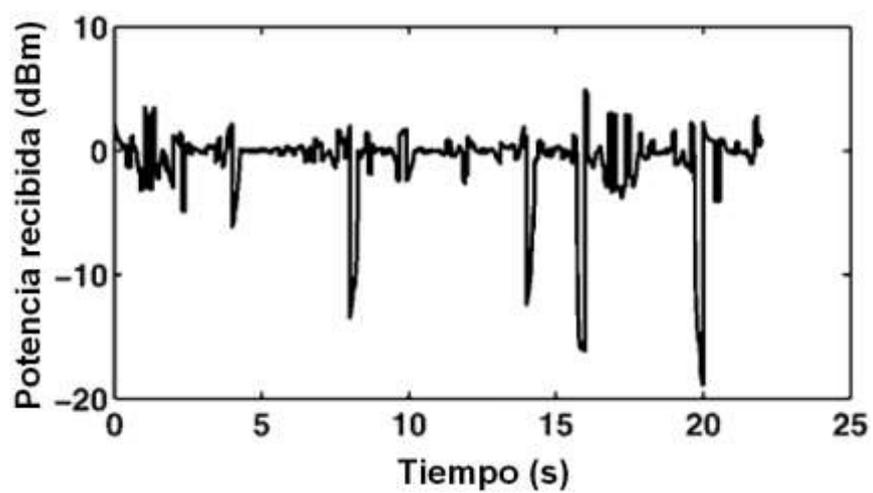


Figura 2.7: Desvanecimiento en ambientes interiores.

2.3 Modelos de Propagación en Ambientes Interiores

En la literatura han sido reportados prácticamente un sin número de modelos de propagación para estimar las pérdidas de la señal en ambientes interiores. En los últimos años, muchos de ellos han estado centrados en redes WLAN. En esta sección se esbozan las principales características de algunos de ellos, incluyendo el modelo Venezuela [1], que tal como fue mencionado, será la referencia base del modelo que se desarrollará en el presente trabajo.

2.3.1 Modelo de 2 Rayos

Es el mismo modelo de dos rayos utilizado en la predicción del nivel de señal recibido en ambientes exteriores, en presencia de desvanecimientos lentos en grandes distancias entre transmisor y receptor. También es conocido como modelo de tierra plana, en el cual se considera que el campo eléctrico en el receptor es dado por la suma del campo asociado a la trayectoria o rayo directo (línea de vista) transmisor-receptor y el campo asociado al rayo reflejado en la superficie terrestre o piso. Las pérdidas por propagación son dadas por [39]:

$$L(\text{dB}) = 120 + 40 \log(d) + 20 \log(h_T h_R) \quad (2.1)$$

Donde:

d = Distancia del transmisor al receptor (km)

h_T = Altura absoluta de la antena transmisora (m)

h_R = Altura absoluta de la antena receptora (m)

Se observa que el exponente de pérdidas de potencia con la distancia es igual a 4, lo que significa que dichas pérdidas aumentan a razón de 20 dB/década a medida que la señal recorre su camino hacia el receptor.

Es importante resaltar que, el exponente de pérdidas, γ , está contenido en el factor que multiplica al "log(d)", de la siguiente manera:

$$L(\text{dB}) = 120 + 10\gamma \log(d) + 20 \log(h_T h_R) \quad (2.2)$$

Por lo que, comparando las ecuaciones (2.1) y (2.2) se tiene que, para el modelo de dos rayos, ese exponente de pérdidas, γ , es igual a 4.

La forma explicada para determinar γ , es válida siempre y cuando en la expresión de las pérdidas de propagación no aparezca dos o más términos dependientes de la distancia "d" que no se puedan agrupar en sólo término "log(d)".

En realidad, el modelo de dos rayos no representa la realidad de los mecanismos de propagación en ambientes interiores, pues como ya ha sido mencionado, en ese tipo de ambientes la señal recorre múltiples trayectorias.

2.3.2 Modelo de Múltiples Rayos

Es un modelo que se aproxima un poco más al caso real de propagación en interiores y al respecto se han reportado una importante cantidad de desarrollos. En líneas generales, el desarrollo de modelos de propagación mediante el trazado de rayos se puede llevar a cabo a través de una de las siguientes técnicas [44]:

- Método de lanzamiento de rayos de disparos y rebotes (SBR = *Shooting-and-Bouncing Ray*): consiste en lanzar un rayo desde la antena transmisora y trazarlo para observar si el mismo impacta algún objeto o si alcanza directamente al punto de recepción. Si el rayo se encuentra con un objeto, dependiendo de la geometría y propiedades eléctricas del mismo, tendrá lugar reflexión, difracción, transmisión o refracción (trayectoria del rayo, por ejemplo, dentro de una pared) o dispersión.
- Método de imágenes: en la Figura 2.8 se muestra el principio básico de éste método [44]. Inicialmente, partiendo del transmisor Tx se determina su imagen Tx1, a través de la Pared 1. Luego, se calcula la imagen de Tx1 a través de la Pared 2, es decir, Tx2. Uniendo las posiciones correspondientes a Tx2 con el receptor (Rx), la intersección de dicha trayectoria recta con la Pared 2 determina el punto de reflexión P2. Otro punto de reflexión (P1) se obtiene mediante la intersección la trayectoria recta entre Tx1 y P2, con la Pared 1. El método en cuestión tiene el inconveniente de requerir un considerable tiempo de

integración cuando el número de paredes y puntos de reflexión es elevado. En este caso, se aplican métodos híbridos o métodos de aceleración.

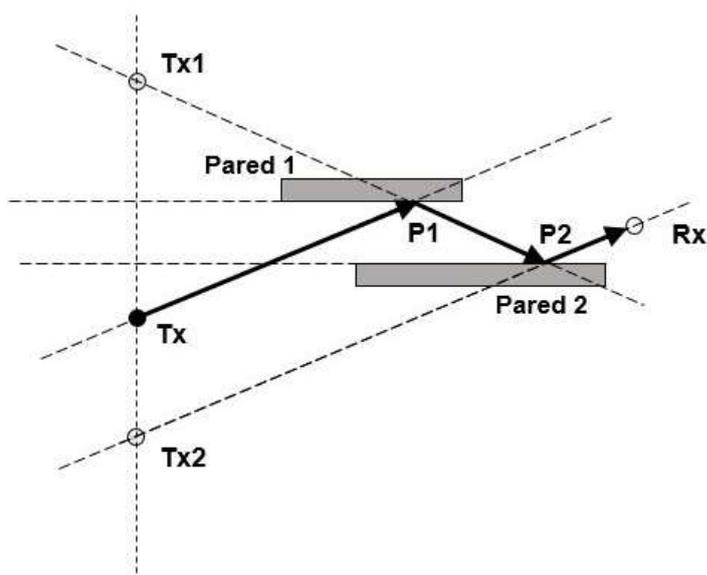


Figura 2.8: Método de imágenes en trazado de rayos en ambientes interiores.

- Método híbrido: combina el método de imágenes con el método SBR. Éste último se emplea para identificar rápidamente la trayectoria de cada rayo desde Tx hasta Rx. Para las reflexiones en las paredes, se recurre al método de imágenes para determinar los puntos exactos donde tienen lugar dichas reflexiones. En otras palabras, este método combina la eficiencia del método SBR con la precisión del método de imágenes.
- Algoritmos de aceleración en trazado de rayos: los tiempos de computación en las simulaciones de los métodos de trazados de rayos se pueden optimizar mediante la reducción del número de objetos en los cuales un rayo impacta o través de la aceleración del cálculo de la prueba de intersección.

Ahora bien, no existe una ecuación como tal que sea generada a partir del desarrollo de modelos de propagación mediante el trazado de rayos, sino

que cada modelo es particular en el ambiente interior bajo el cual tiene lugar el desarrollo como tal. De hecho, este tipo de modelos tiene como desventaja su alta dependencia con el entorno (tipo de objetos, posición de los objetos, cantidad de objetos, etc.) utilizado para su desarrollo; de manera tal que un modelo de trazado de rayos desarrollado para un determinado entorno, perderá significativamente su precisión o simplemente dejará de ser válido, cuando se aplica para un entorno diferente. En todo caso, dicha desventaja que puede ser mitigada si adicionalmente se consideran los ángulos de arribo de los rayos al receptor [6].

2.3.3 Modelo *Log-Distance*

En este modelo el promedio de la potencia de señal recibida disminuye con el logaritmo de la distancia entre transmisor y receptor, indistintamente si se trata de ambientes interiores o exteriores.

Para ambientes interiores, las pérdidas de propagación a una distancia “d” (en km) del transmisor se determinan a partir de [1]:

$$L(\text{dB}) = L(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2.3)$$

Donde:

$L(d_0)$ = Pérdidas de propagación a una distancia d_0 , en dB (se calculan utilizando el modelo de pérdidas en el espacio libre, o a través de mediciones de campo realizadas a dicha distancia).

d_0 = Distancia de referencia, en km (para ambientes interiores, generalmente igual a 0,01 km o 0,001 km).

X_σ = Variable aleatoria (normal o *gaussiana*), en dB, con media igual a cero y desviación estándar igual a $\alpha\sigma$, también en dB. Este parámetro se refiere a la atenuación causada por el desvanecimiento plano (de no haber desvanecimiento, entonces X_σ es igual a cero).

En [45], aparecen valores medidos de γ y σ para diferentes tipos de ambientes interiores.

Las pérdidas de propagación en el modelo de espacio libre, L_{el} , son dadas por [46]:

$$L_{el}(\text{dB}) = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (2.4)$$

Donde “f” representa la frecuencia de operación, en GHz y “d” se refiere a la distancia.

2.3.4 Modelo de ITU-R

Este modelo permite estimar las pérdidas de propagación en ambientes interiores, en el rango comprendido entre 900 MHz y 100 GHz. Este modelo toma en cuenta [1]:

- Reflexión y difracción en objetos fijos.
- Refracción a través de paredes, pisos y otros obstáculos fijos.
- Confinamiento o túneles de energía en pasillos.
- Presencia de personas y objetos en movimiento en el ambiente.

Específicamente, la atenuación de la señal se determina a partir de [9]:

$$L(\text{dB}) = L(d_o) + N \log\left(\frac{d}{d_o}\right) + L_f(N_f) \quad (2.5)$$

Donde:

$N = 10\gamma$ (se obtiene de la Tabla 2 de [9])

f = Frecuencia de operación (MHz)

d = Distancia entre transmisor y receptor, en metros ($d > 1$ m).

d_o = Distancia de referencia (m)

$L(d_o)$ = Pérdidas, en dB, para una distancia de referencia d_o igual a 1 m.

Asumiendo, propagación en espacio libre, $L(d_o) = 20 \log_{10}(f) - 28$, con “f” en MHz

N_f = Número de pisos atravesados por la trayectoria directa (para $N_f = 0$,

$L_f = 0$ dB)

L_f = Factor de pérdidas por penetración en pisos (dB). Además de depender de N_f , también depende de la frecuencia (se obtiene de la Tabla 3 de [9])

N_f = Número de pisos atravesados entre transmisor y receptor (si $N_f = 0$, $L_f = 0$ dB)

2.3.5 Modelo COST 231 Keenan y Motley

Válido solamente para ambientes interiores, considera las pérdidas en el espacio libre adicionadas a las pérdidas que se producen cuando la señal entre transmisor y receptor atraviesa diferentes paredes y pisos. Para su aplicación, se requiere conocer un gran volumen de datos. Las pérdidas totales son dadas por [1]:

$$L(\text{dB}) = L_0 + 10\gamma \log d + [\sum_{i=1}^I N_{f,i} L_{f,i} + \sum_{j=1}^J N_{w,j} L_{w,j}] \quad (2.6)$$

Donde:

L_0 = Pérdidas de propagación a un metro de la antena transmisora, en dB

$L_{f,i}$ = Pérdidas de propagación de la señal a través de los pisos, en dB

$N_{f,i}$ = Número de pisos con las mismas características

$L_{w,j}$ = Pérdidas de propagación de la señal a través de paredes, en dB

$N_{w,j}$ = Número de paredes con las mismas características.

I = Número de tipos de pisos atravesados por la señal

J = Número de tipos de paredes atravesadas por la señal

Cuando no se tiene la suficiente información acerca de los tipos de paredes y pisos, se recomienda recurrir a la versión simplificada del modelo, que considera un único tipo de piso y hasta dos (2) tipos de paredes [1], es decir:

$$L(\text{dB}) = 37 + 20 \log d + N_f L_f + \sum_{j=1}^2 N_{w,j} L_{w,j} \quad (2.7)$$

Donde:

N_f = Número de pisos atravesados

L_f = Pérdidas a través de los pisos (dB)

$L_{w,1}$ = Pérdidas en paredes ligeras de madera, puertas, etc. (dB)

$L_{w,2}$ = Pérdidas en paredes gruesas, tabiques de ladrillo, cemento, etc.
(dB)

Los valores típicos de L_f , $L_{w,1}$ y $L_{w,2}$ son mostrados en la Tabla 2.1 [1].

Tipo de pérdidas	Rango de pérdidas (dB)
L_f	13-27
$L_{w,1}$	2-4
$L_{w,2}$	8-12

Tabla 2.1: Factores de pérdidas (pisos y paredes)

2.3.6 Modelo COST 231 *Multiwall*

Se basa en el modelo de propagación COST 231 Keenan y Motley, incorporando una componente de pérdida que es proporcional al número de paredes atravesadas. Además, adiciona un término más complejo que depende del número de pisos atravesados que da lugar a una pérdida que aumenta más lentamente para pisos adicionales después del primer piso atravesado. Las pérdidas totales se determinan a partir [1]:

$$L(\text{dB}) = L_0 + 10\gamma \log d + L_f N_f \left(\frac{L_f - 2}{L_f + 1} - b \right) + \sum_{j=1}^J N_{w,j} L_{w,j} \quad (2.8)$$

Donde N_f representa el número de pisos atravesados y “b” es un factor de atenuación asociado a los pisos que la señal debe atravesar.

2.3.7 Modelo Desarrollado en Venezuela

Tal como fue dicho anteriormente, en [1] se desarrolla un modelo de propagación para predecir las pérdidas en ambientes interiores de la Universidad Experimental del Táchira (UNET), ubicada en la ciudad de San Cristóbal, Venezuela: se trata de modelo llamado en este trabajo “Venezuela”.

Primero, se obtiene una primera aproximación del modelo en base a los niveles de señal recibidos medidos en un determinado camino, en el cual no se atraviesan pisos ni paredes. En esas mediciones se considera la

variación de la potencia recibida en función de la distancia “d” entre transmisor y receptor, así como la variación de dicha potencia con la altura del AP. De esa manera, esa primera aproximación relaciona las pérdidas de propagación en función de la distancia “d” y la altura del transmisor.

Seguidamente, se incorporarán el efecto de la atenuación de la señal en pisos y paredes, resultando:

$$L(\text{dB}) = -56,11 + 29,71h + (74,33 - 21,40h)\log(d) + L_{f_1} + L_w \quad (2.9)$$

Donde “h” es la altura del transmisor (en metros), “d” es la distancia (en metros), L_{f_1} es igual 14,94 y L_w implícitamente depende del número de paredes atravesadas, N_w , según la Tabla 2.2 [1].

N_w	L_w (dB)
1	2,46
2	5,56
3	9,66
4	12,27
5	13,42
6	14,92

Tabla 2.2. Factores de pérdidas (pisos y paredes)

CAPÍTULO 3

3. MEDICIONES REALIZADAS EN AMBIENTES INTERIORES

Este capítulo trata sobre las mediciones realizadas en ambientes interiores de dos (2) edificaciones de Guayaquil. Específicamente, las mediciones en cuestión son del nivel de señal recibido o nivel de potencia recibida para caminos con línea de vista, caminos con paredes interpuestas y caminos con pisos interpuestos, con o sin variación de la altura del AP. Previamente, se presentan las características técnicas de los equipos utilizados para la realización de las mediciones. Al final, se muestran los resultados obtenidos.

3.1 Herramientas Computacionales para la Medición del Nivel de Señal Recibido

Dado que como equipo receptor se empleó un computador portátil (laptop), se recurrió a la Web para conseguir la herramienta computacional, de uso gratuito, que permitiese registrar el nivel de potencia recibida en cada punto de interés, por así decirlo, de la forma más automática posible. En ese sentido, el software que mejor se adaptó a lo contemplado fue el InSSIDer [47].

La Figura 3.1 ilustra una captura de pantalla de la mencionada herramienta computacional [47].

Es oportuno señalar que además del InSSIDer, existen otras herramientas computacionales, unas de uso gratuito y otras pagas, que permiten que el computador portátil registre el nivel de potencia recibida, como por ejemplo, NetSurveyor [48], WifiInfoView [49], Wavemon [50], entre otras.

3.2 Equipo Utilizado para las Mediciones

Si bien lo ideal es contar con equipos experimentales de mediciones certificados (transmisores, antenas calibradas, analizadores de espectro, entre otros), fabricados especialmente para la realización confiable de mediciones, el muy elevado costo de los mismos torna extremadamente difícil contar con ellos.

Ante tales circunstancias, en este trabajo se recurre al empleo de AP's (*Access Point*) haciendo las veces de transmisor y de un computador portátil (laptop) en

calidad de receptor. Incluso, cuando se trata de ambientes interiores se puede utilizar como transmisor a un enrutador, en este caso, inalámbrico.



Figura 3.1: InSSIDer.

Es necesario resaltar que por el hecho de no tratarse de equipos de mediciones certificados como tal, lo que si le resta precisión a los resultados, las mediciones no pierden validez dentro del contexto global del objetivo, que es contar con mediciones que permitan desarrollar modelos semi-empíricos para la predicción de los aspectos de propagación, en este caso, en la bandas de 2,4 GHz y 5,8 GHz, tal como lo demuestran [1-2, 4-5, 7-8, 11].

Asimismo, es importante tomar en cuenta que a la par de los resultados obtenidos de las mediciones, el procedimiento como tal tiene como valor agregado el hecho de ser válido en lo que se refiere al protocolo de mediciones utilizado y a la metodología empleada para el desarrollo del modelo de propagación propiamente dicho. Esta afirmación se basa en el menor valor de RMSE obtenidos para el caso del modelo desarrollado en el presente trabajo, en todos los escenarios de comparación.

3.2.1 Transmisores

Como transmisores fueron utilizados dos (2) AP: uno para la banda de 2,4 GHz y el otro para la banda de 5,8 GHz. Las características técnicas, de interés para el presente trabajo, de los equipos mencionados, aparecen en las Tablas 3.1 y 3.2.

Parámetros	Valores
Frecuencia de operación (GHz)	2,4
Potencia de transmisión (dBm)	20
Ganancia de la antena (interna) (dBi)	5
Pérdidas en la línea de transmisión (dBi)	0

Tabla 3.1: Características técnicas del AP TL-W801ND.

Parámetros	Valores
Frecuencia de operación (GHz)	5,8
Potencia de transmisión (dBm)	30
Ganancia de la antena (interna) (dBi)	5
Pérdidas en la línea de transmisión (dBi)	0

Tabla 3.2: Características técnicas del AP AT-D30.

3.2.2 Receptor

El receptor consistió en un computador portátil provisto de una tarjeta interna para recepción inalámbrica de datos bajo la norma IEEE 802.11a/b/g/n; mientras que la captura del nivel de potencia recibida se hizo mediante la herramienta computacional mencionada en la sección 3.1.

3.3 Selección de Ambientes Interiores y Rutas para las Mediciones

Se contó con ambientes interiores de un edificio y un centro comercial, localizados en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, cuyos responsables de la

administración de los mismos no permitieron suministrar los nombres de ambas edificaciones. No obstante, para los fines del presente trabajo, esos nombres son irrelevantes.

En las Figuras 3.2 a 3.4, se muestran los planos de los ambientes seleccionados en las mencionadas edificaciones, en las cuales fueron realizadas las siguientes mediciones:

- Edificación 1 (Figura 3.2):
 - Medición 1: Nivel de potencia recibida versus distancia, línea de vista, frecuencia igual a 2,4 GHz, altura del AP igual 2,5 m (ver Figura 3.2).
 - Medición 2: Nivel de potencia recibida versus distancia, presencia de paredes en el camino, frecuencia igual a 2,4 GHz, altura del AP igual a 2,5 m (camino paralelo al de la Medición 1) (ver Figura 3.2).
 - Medición 3: Nivel de potencia recibida versus distancia, línea de vista, frecuencia de 2,4 GHz, alturas variables del AP (es el mismo camino de la Medición 1, pero variando la altura del AP entre 2,2 m y 2,5 m) (ver Figura 3.2).
 - Medición 4: Similar al caso de la Medición 3, pero para una frecuencia de 5,8 GHz (ver Figura 3.2).
- Edificación 2:
 - Medición 5: Nivel de potencia recibida versus distancia, presencia de paredes en el camino, frecuencia iguala 2,4 GHz, altura del AP igual a 2,5 m, piso 2 (ver Figura 3.3).
 - Medición 6: Nivel de potencia recibida versus distancia, presencia de paredes y un piso en el camino, frecuencia igual a 2,4 GHz, altura del AP igual a 2,5 m (camino paralelo a la de la Medición 5) (ver Figura 3.4).
 - Medición 7: similar al camino de Medición 5, pero con frecuencia igual a 5,8 GHz (ver Figura 3.3).
 - Medición 8: similar al camino de Medición 6, pero con frecuencia igual a 5,8 GHz (ver Figura 3.4).

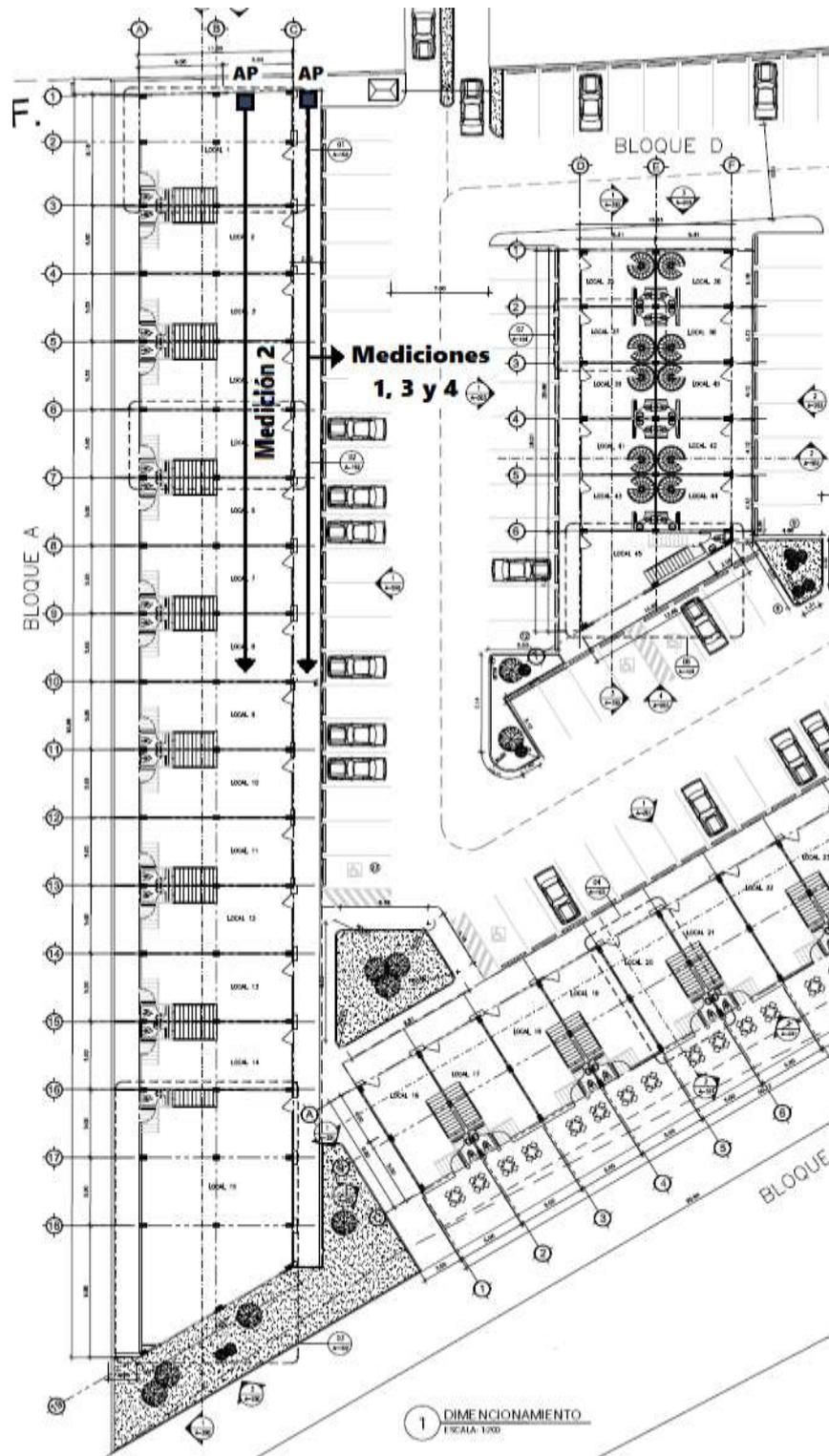


Figura 3.2: Caminos para las Mediciones 1, 2, 3 y 4.

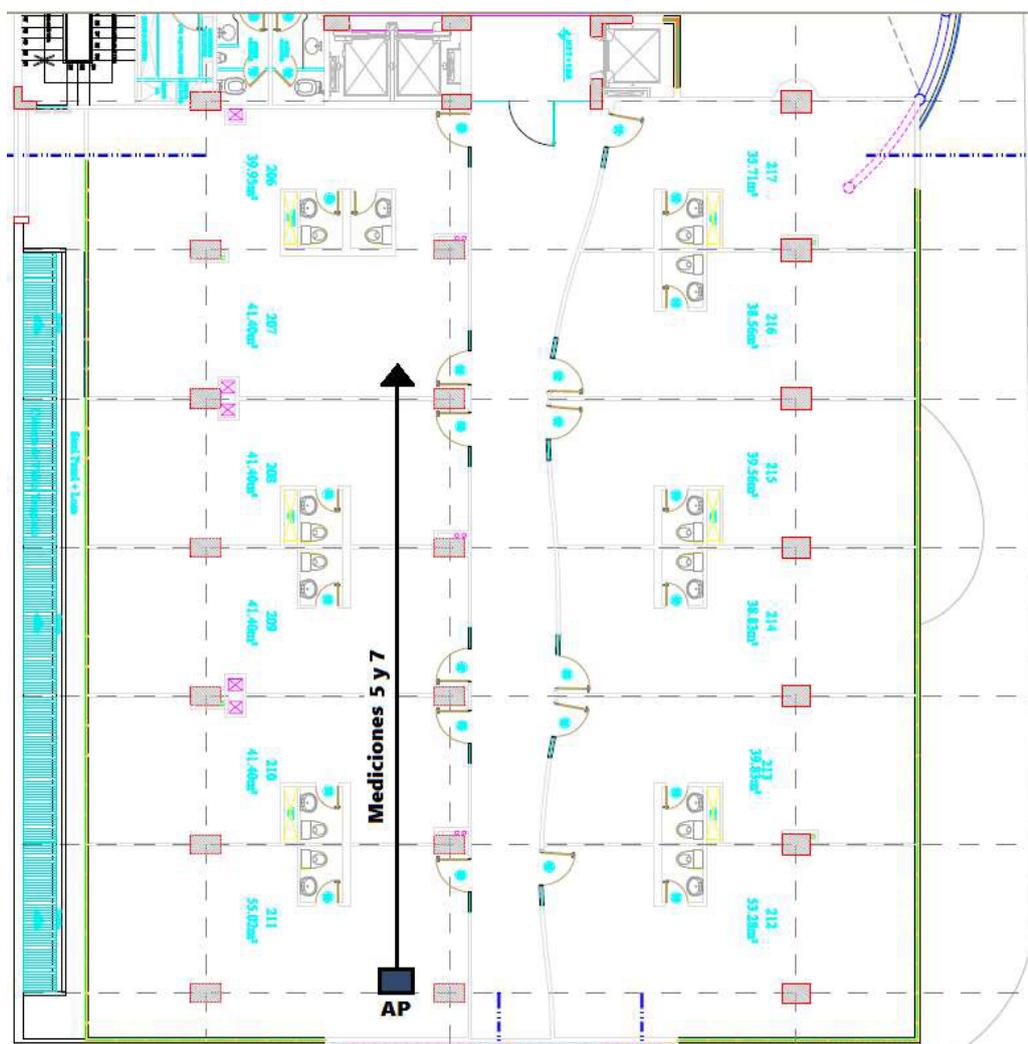


Figura 3.3: Caminos para las Mediciones 5 y 7.

3.4 Resultados Obtenidos

En los ocho (8) caminos señalados, las mediciones fueron realizadas cinco (5) veces, en días y horarios diferentes. Esto con la finalidad de que dichas mediciones considerarán, de manera implícita, el efecto de la hora del día, cantidad de personas presentes en los ambientes al momento de realización de las mediciones, cantidad y tipo de objetos presentes en los ambientes durante las mediciones, etc.

Los puntos de medición fueron ubicados con espaciamientos aproximados de tres (3) metros entre ellos, comenzando en “d” igual a 3 m.

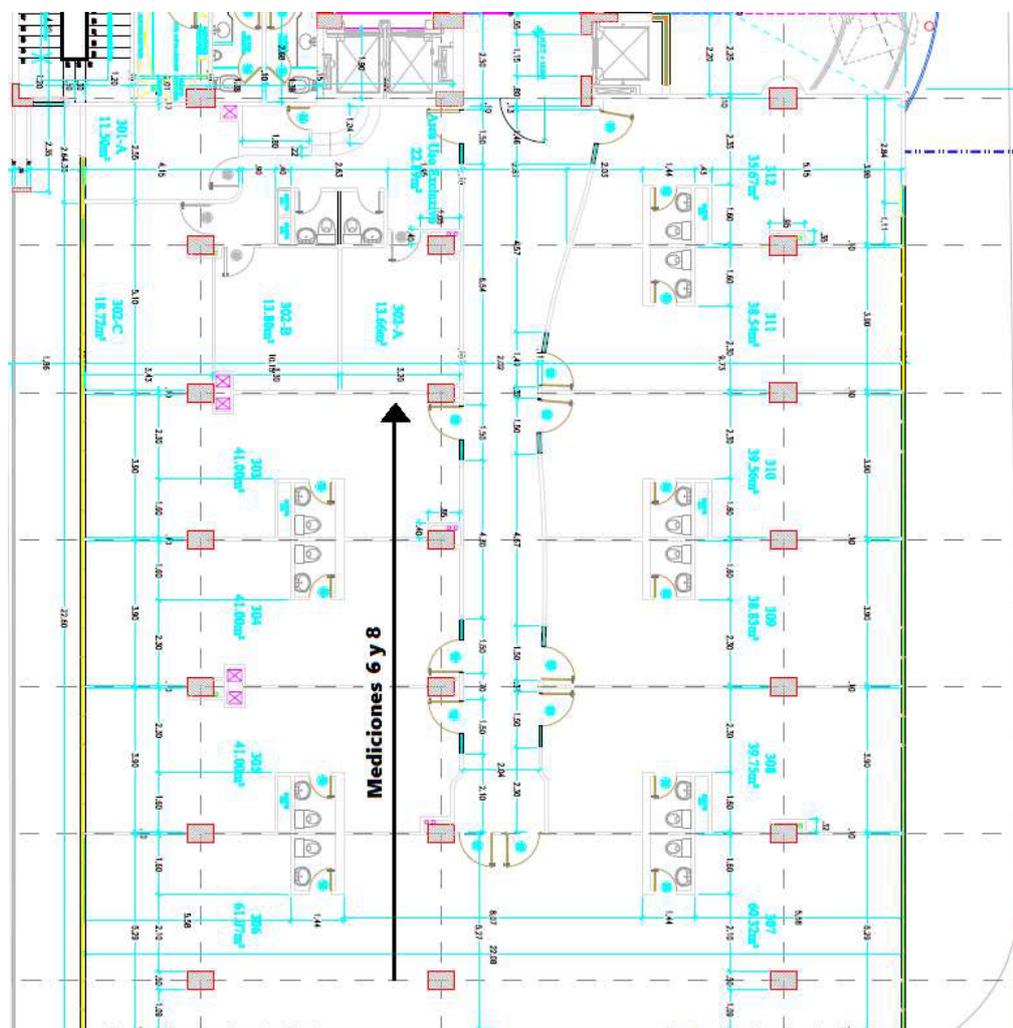


Figura 3.4: Caminos para las Mediciones 6 y 8 (AP en el piso de abajo, mostrado en la Figura 3.3).

3.4.1 Variación del Nivel de Señal Recibido en Función de la Distancia

Aunque las mediciones realizadas consistieron en el registro del nivel de señal recibido en cada punto de medición, para fines del presente trabajo el interés se centra en las pérdidas de propagación medidas, las cuales serán calculadas a partir del nivel de potencia recibida, tal como se explicará más adelante.

En la Figura 3.5 se muestran los gráficos de dispersión de las pérdidas de propagación, L , en función de la distancia, para los caminos de Medición 1 y 2, correspondiente a la Edificación 1, con una frecuencia de operación de 2,4 GHz y altura del AP de 2,5 m (en adelante, “ h_T ”), así como los gráficos similares, pero para los caminos de Medición 5 y 6 en la Edificación 2, con igual frecuencia de operación y misma altura del AP.

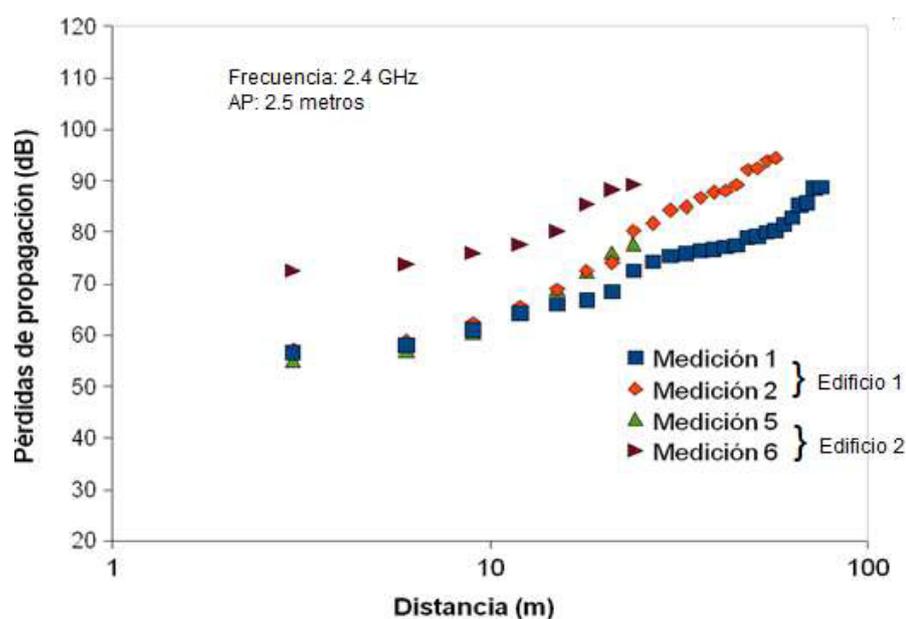


Figura 3.5: Pérdidas de propagación versus distancia, caminos de Medición 1, 2, 5 y 6 ($f = 2,4$ GHz, $h_T = 2,5$ m).

Es oportuno resaltar que las pérdidas de propagación fueron calculadas a partir del nivel de señal recibido en cada punto y determinando las pérdidas a partir de [39]:

$$L(\text{dB}) = P_T(\text{dBm}) + G_T(\text{dBi}) + G_R(\text{dBi}) - L_T(\text{dB}) - L_R(\text{dB}) - P_R(\text{dBm}) \quad (3.1)$$

Donde:

P_T = Potencia transmitida

G_T = Ganancia de la antena del transmisor

G_R = Ganancia de la antena del receptor

L_T = Pérdidas en la línea de transmisión del transmisor

L_R = Pérdidas en la línea de transmisión del receptor (igual a 0 dB)

P_R = Nivel de señal recibido

Los valores de los parámetros necesarios para aplicar la expresión (3.1) se obtiene de la Tabla 3.1.

Por su parte, en la Figura 3.6 se observan los gráficos de dispersión de las pérdidas de propagación, en función de la distancia, para los caminos de Medición 7 y 8 correspondiente a la Edificación 2, con una frecuencia de operación de 5,8 GHz y altura del AP de 2,5 m. Los valores de los parámetros requeridos para la utilización de la expresión (3.1) son obtenidos de la Tabla 3.2.

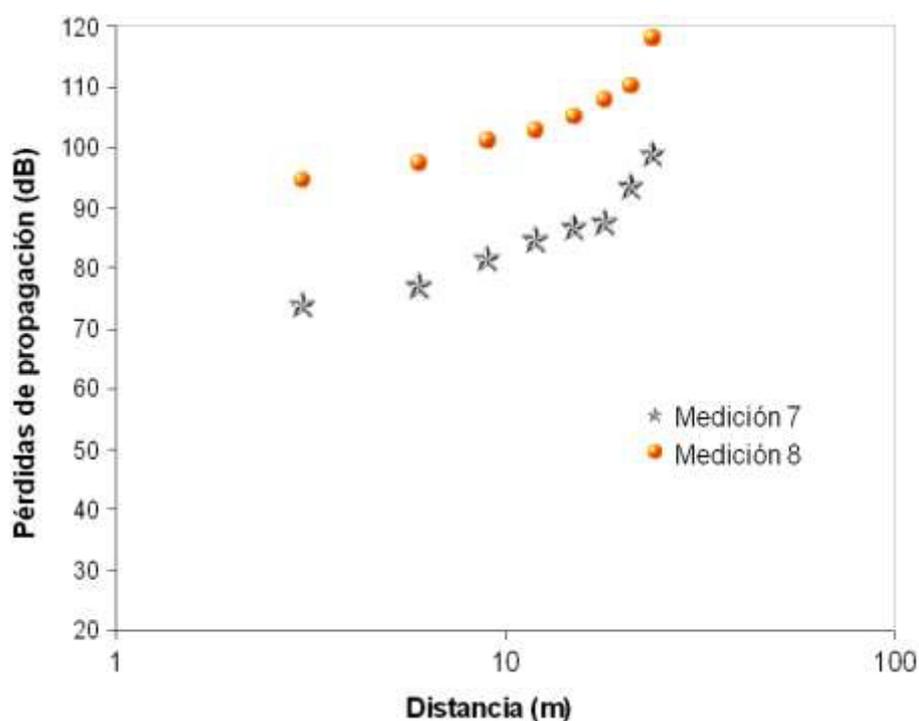


Figura 3.6: Pérdidas de propagación versus distancia, caminos de Medición 7 y 8 ($f = 5,8$ GHz, $h = 2,5$ m).

En las Figuras 3.5 y 3.6, se observa que, como era de esperarse, las pérdidas de propagación aumentan a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor se incrementa. También se observa,

específicamente en la Figura 3.5, que el camino de Medición 1 es el que presenta menos pérdidas, lo cual se debe a que es un camino con línea de vista y además corresponde a la frecuencia de operación de 2,4 GHz. Asimismo, el camino que presenta más pérdidas es el correspondiente a la Medición 8 (ver Figura 3.6), debido a que se trata del camino en el que, además de la trayectoria directa de la señal encontrarse paredes y un piso, la medición fue hecha a una frecuencia superior, concretamente, 5,8 GHz, en comparación con el camino de Medición 1. Además, nótese que las líneas de tendencia de cada curva se pueden aproximar a una línea recta, resaltando que en el eje de las abscisas la distancia aparece en logaritmo de base de 10.

3.4.2 Variación del Nivel de Señal Recibido en Función de la Altura del Transmisor

De manera similar a la sección 3.4.1, se recurre a la ecuación (3.1) para determinar las pérdidas de propagación, en este caso, las pérdidas de propagación en función de la altura del AP. Los resultados obtenidos son mostrados en las Figuras 3.7 y 3.8. Para ello, se consideraron los caminos de Medición 3 y 4 (Edificación 1), con frecuencia de operaciones iguales a 2,4 GHz y 5,8 GHz, respectivamente. La altura del AP fueron 2,2 m, 2,3 m, 2,4 m y 2,5 m.

En la Figura 3.7 se puede apreciar nuevamente el aumento de las pérdidas de propagación con la distancia, así como la tendencia de línea recta de todas las curvas. Asimismo, se observa de nuevo el aumento de las pérdidas con la frecuencia. Adicionalmente, se nota que, en general, el comportamiento de dicha pérdida con la altura es similar para los cuatro (4) valores de “h” considerados para la medición, para una misma frecuencia. No obstante, se puede verificar que la tendencia lineal correspondiente a cada “h” tiene una pendiente que es menor a medida que aumenta “h”, es decir, como también es esperarse, las pérdidas de propagación también varían con la altura del transmisor.

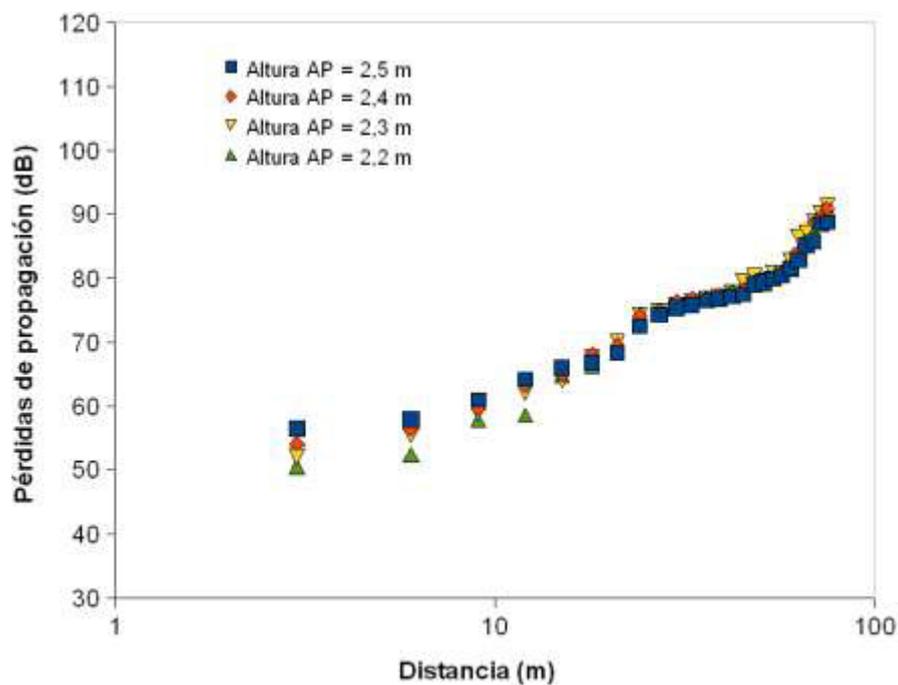


Figura 3.7: Pérdidas de propagación versus distancia, camino de Medición 3, varias alturas “h” (f = 2,4 GHz).

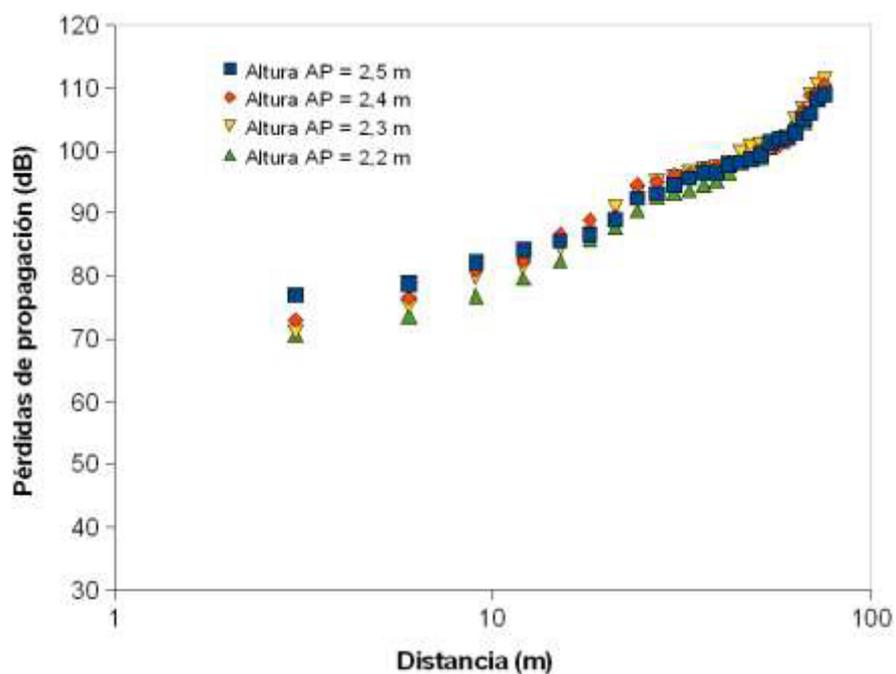


Figura 3.8: Pérdidas de propagación versus distancia, camino de Medición 4, varias alturas “h” (f = 5,8 GHz).

3.4.3 Variación del Nivel de Señal Recibido en Función del Número de Pisos y Paredes Atravesadas

La comparación más clara que permite observar el comportamiento de las pérdidas de propagación con las paredes es la referida a los caminos de Medición 1 y 2, los cuales son aproximadamente los mismos caminos físicos, con la misma frecuencia de operación (2,4 GHz) y misma altura “h” (2,5 m), pero con la diferencia que el camino de Medición 1 presenta línea de vista, mientras que en el otro la trayectoria directa de la señal atraviesa paredes.

La Figura 3.9 ilustra la referida comparación, en la que se puede apreciar que las pérdidas en el camino de Medición 2 son mayores que en el camino de Medición 1.

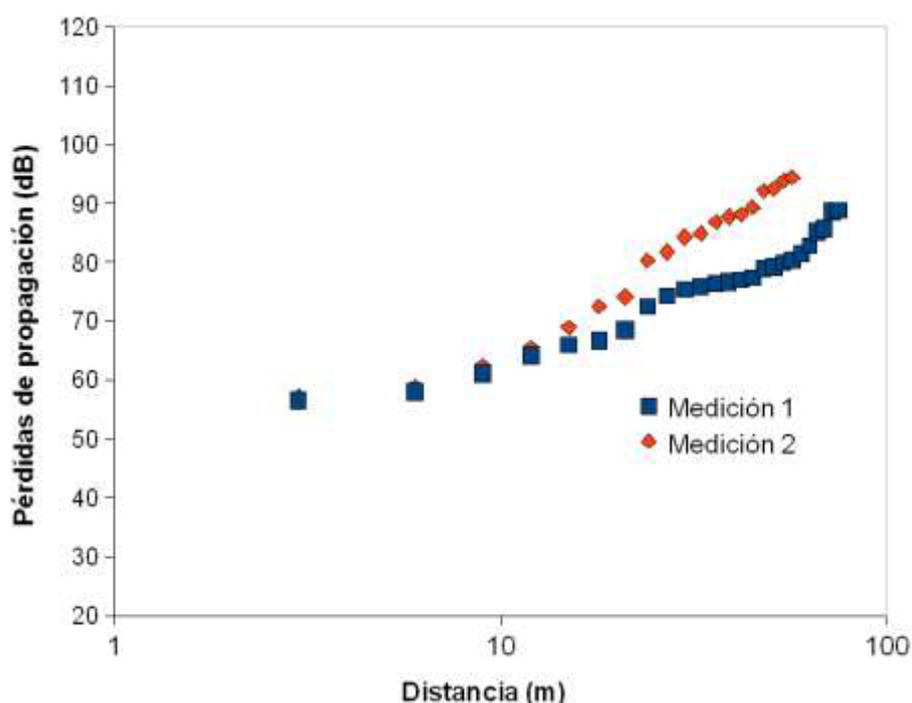


Figura 3.9: Pérdidas de propagación en función de la distancia, con y sin presencia de paredes.

En la Figura 3.9, se observa que a medida que aumenta la distancia, las pérdidas de propagación acumuladas del camino de Medición 2 se hacen

mayores a correspondientes al camino de Medición 1. Ello se debe a que, como fue dicho anteriormente, el camino de Medición 2 se encuentra paredes en la trayectoria del rayo directo de la señal.

Por su parte, las pérdidas en pisos, en este caso uno (1), se pueden observar comparando el comportamiento de dichas pérdidas en los caminos de Medición 5 y 6, así como 7 y 8, que corresponden a mediciones en pisos paralelos, uno arriba del otro, para las frecuencias de operación de 2,4 GHz y 5,8 GHz, respectivamente (ver Figura 3.10). Se aprecian mayores pérdidas de propagación para los caminos de Medición 6 (respecto al 5) y 8 (respecto al 7).

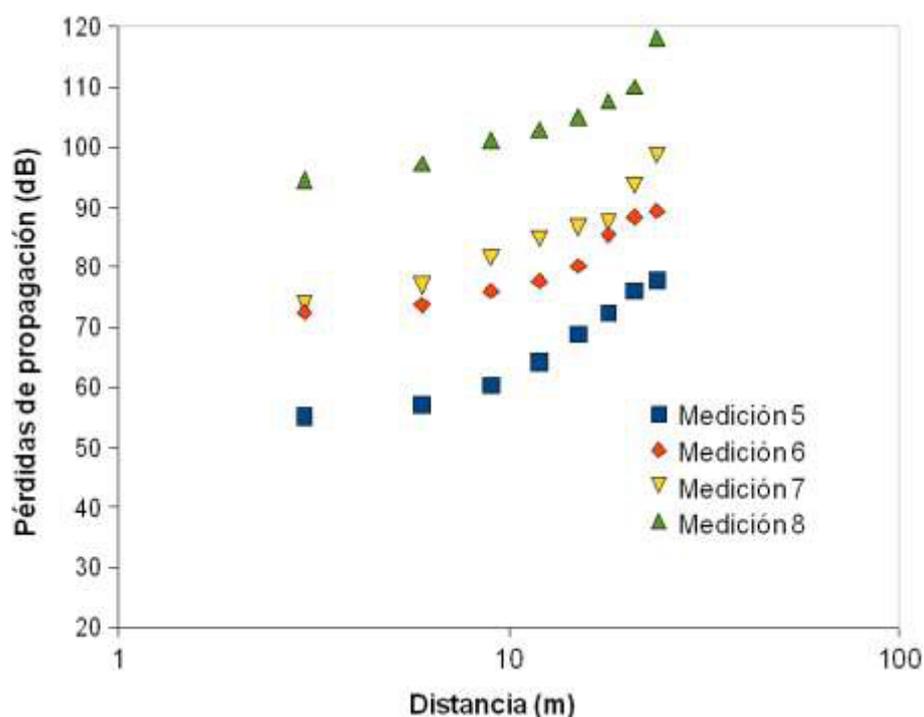


Figura 3.10: Pérdidas de propagación en función de distancia, con y sin presencia de pisos.

CAPÍTULO 4

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

En este capítulo, se desarrolló el modelo para la predicción de las pérdidas de propagación, objeto del presente trabajo, en base a los resultados obtenidos en el Capítulo 3 y siguiendo metodología similar a la aplicada en [1]. El desempeño del modelo desarrollado en la estimación de las pérdidas de propagación en los ambientes en los que se realizaron las mediciones, es comparado con el desempeño de algunos de los modelos revisados en el Capítulo 2.

4.1 Técnicas de Regresión para el Ajuste de Funciones

Existen dos (2) tipos de relaciones matemáticas entre dos (2) o más variables. Una de ellas es la relación matemática, como por ejemplo, la presente entre la fuerza que se ejerce sobre un cuerpo y la aceleración del mismo. La otra es la relación estadística, en la cual el conocer los valores de la o las variables independientes no permite determinar con certeza el valor de la variable dependiente; sin embargo, si es posible determinar algún comportamiento de esa variable dependiente en función de la o las variables independientes [51].

En el caso concreto de la relación estadística, es importante considerar dos (2) aspectos: la correlación (estudia el grado de dependencia que existe entre las variables) y la regresión (permite determina la estructura de la dependencia que mejor exprese la dicha relación).

En el caso del presente trabajo, algunas de las correlaciones pueden ser observadas en los resultados obtenidos en el Capítulo 3, en los cuales, la variable dependiente son las pérdidas de propagación y las variables independientes son la distancia, la altura del transmisor y la frecuencia de operación.

Uno de los tradicionales métodos de regresión es el lineal, también conocido como “método de los mínimos cuadrados”. Esta técnica se aplica cuando la relación entre dos variables es lineal, es decir, esa relación entre la variable dependiente y la independiente es dada por la ecuación de una recta de

pendiente “A” y corte en la ordenada “B”. El propósito es minimizar la desviación entre los valores observados de la variable dependiente y los valores estimados por la ecuación de dicha recta, para de esa manera obtener los valores de “A” y “B” que mejor ajusten ambos grupos de valores [51].

Precisamente en [1], correspondiente a mediciones realizadas en una sola frecuencia (2,4 GHz), se recurrió a la técnica de regresión lineal para hallar la ecuación de las pérdidas de propagación en función de la altura y el logaritmo de la distancia. No obstante, para el presente trabajo, dado que varias de las mediciones fueran realizadas en dos (2) frecuencias diferentes, el método de los mínimos cuadrados no arroja un buen ajuste. Por ello, se recurre a técnicas de regresión no lineales, entre las que se tienen *Quasi-Newton*, *Simplex*, *Hooke-Jeeves Pattern moves*, *Rosenbrock Pattern search*, entre otras [52], las cuales serán implementadas con el auxilio de la herramienta computacional STATISTICA [53].

4.2 Correlación entre las Variables de Medición

Tal como fue mencionado en la sección 4.1, en el caso de concreto de las curvas de correlación entre las pérdidas de propagación y el logaritmo de la distancia, las mismas aparecen en los resultados obtenidos en el Capítulo 3, es decir, desde las Figura 3.5 hasta la Figura 3.10.

Por su parte, las curvas de correlación entre las pérdidas de propagación y la altura del transmisor y la frecuencia de operación se muestran en las Figuras 4.1 y 4.2.

En la Figura 4.1, levemente se aprecia una tendencia de aumento de las pérdidas de propagación con el incremento de la altura del AP, mientras que en la Figura 4.2 el aumento de dichas pérdidas con el aumento de la frecuencia de operación del sistema es notorio.

4.3 Modelo de Propagación Obtenido

Una vez analizadas las correlaciones entre las pérdidas de propagación y las variables independientes (d, f, h), en esta sección se abordan los pormenores del desarrollo del modelo de propagación como tal.

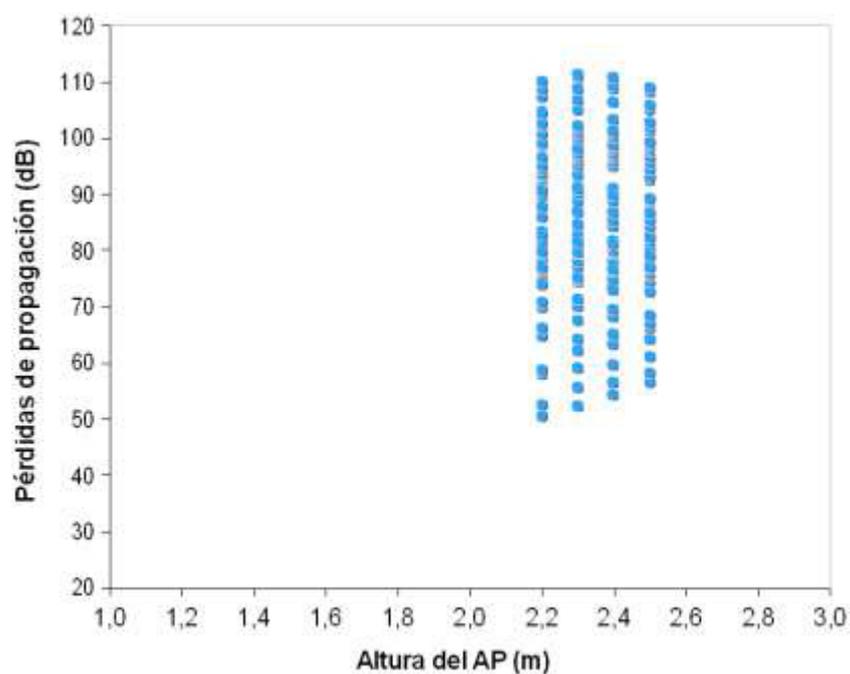


Figura 4.1: Curvas de correlación entre las pérdidas de propagación y la altura de la AP.

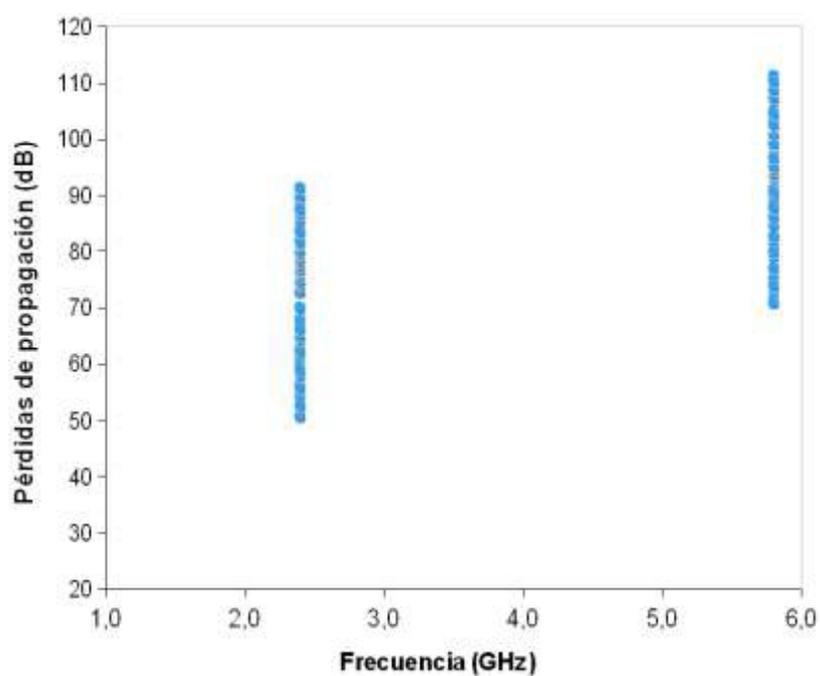


Figura 4.2: Curvas de correlación entre las pérdidas de propagación y la frecuencia de operación.

4.3.1 Sin Efectos de Pisos y Paredes

Siguiendo un procedimiento similar al utilizado en [1], se recurre a los caminos de Medición 3 y 4, en los cuales se midieron las pérdidas de propagación, para cada punto, con cuatro (4) alturas diferentes del AP, sin existencia de paredes y pisos en la trayectoria directa de la señal.

No obstante, a diferencia de [1], en este trabajo no es conveniente recurrir al ajuste por regresión lineal para obtener la ecuación de las pérdidas de propagación en función de la altura del transmisor y el logaritmo de la distancia, debido a que cada uno de los caminos mencionados, es decir, 3 y 4, corresponde a frecuencias diferentes (2,4 GHz y 5,8 GHz, respectivamente) y tal como puede observarse en las Figuras 3.10 y 4.2, dicha frecuencia influye en las pérdidas de propagación. Por ello, se debe agregar en la ecuación del modelo un factor que dependa de la frecuencia, lo que imposibilita la aplicación del método de los mínimos cuadrados.

En ese orden de ideas, a la luz de los resultados obtenidos en el Capítulo 3, la ecuación que mejor ajuste ofrece entre los valores medidos y estimados de las pérdidas de propagación es:

$$L(\text{dB}) = (-56,75 + 30,66h) + (72,15 - 19,15h)\log d + 51,78\log f \quad (4.1)$$

Donde “h” y “d” están dadas en metros y “f” en GHz.

Es importante resaltar que la forma de los factores entre paréntesis que contienen la variable “h” es similar a la considerada en [1].

La correlación entre los valores medidos de “L” y los valores estimados por esa primera aproximación del modelo de propagación representado por la expresión (4.1), es de 98,76%, es decir, muy cercana al 100% ideal y bastante por arriba del 90% considerado como buena [52]. En la Figura 4.3 se ilustra el gráfico de dispersión de los valores medidos y estimados.

Es oportuno destacar que la correlación entre dos variables determina el grado de proporcionalidad que existe entre las mismas y puede ser determinada a partir de [53].

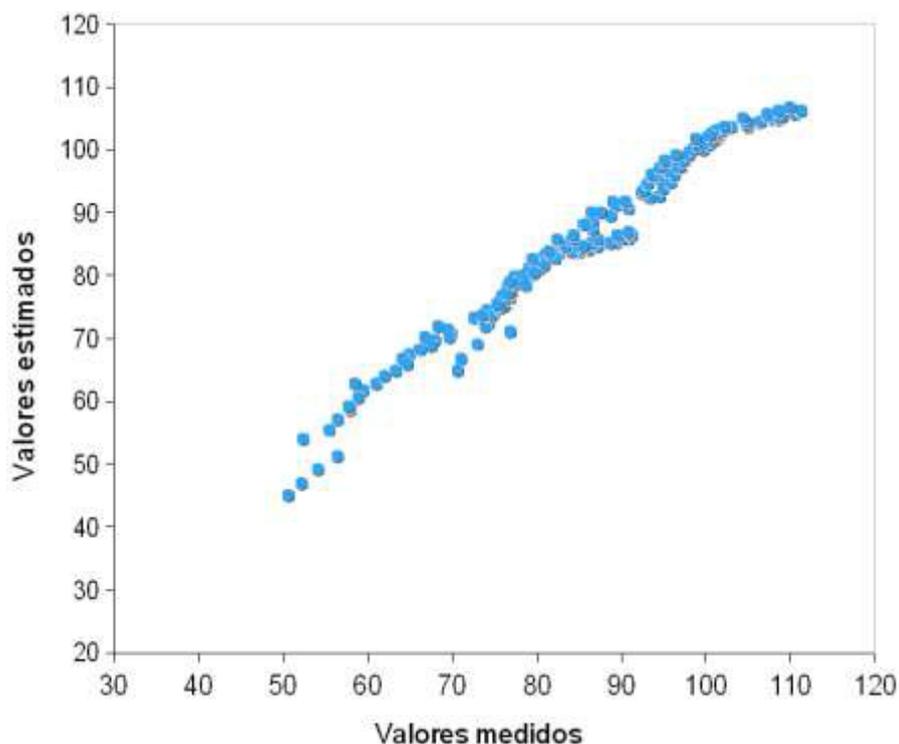


Figura 4.3: Valores medidos de “L” y valores estimados por la primera aproximación del modelo.

4.3.2 Con Efectos de Pisos y Paredes

Para la incorporación de las pérdidas por pisos, que en el caso del presente trabajo sólo se pudo evaluar el efecto de un (1) piso, se recurre a los resultados mostrados en la Figura 3.10. De manera similar a [1], se realiza la resta, punto a punto, del valor de pérdidas de propagación para el camino de medición del piso superior y el valor de dichas pérdidas para el camino del piso inmediatamente inferior, para las frecuencias de operación de 2,4 GHz y 5,8 GHz y luego obteniendo un promedio para cada frecuencia. Es decir, para cada punto, se restan las pérdidas de propagación del camino de Medición 6 menos las del camino de Medición 5 (para la frecuencia de 2,4 GHz) y de manera similar se procede para los caminos de Medición 7 y 8. Por cada punto fueron realizadas tres (3)

mediciones seguidas, las cuales fueron repetidas cinco (5) veces en días y horarios diferentes.

El factor de pérdida, L_{f1} , por la presencia de un piso, para cada frecuencia, se muestra en la Tabla 4.1, en la cual se puede observar que la frecuencia de operación también afecta el valor del factor de incremento de las pérdidas de propagación debido a la presencia de pisos en el rayo directo de la señal.

f (GHz)	L_{f1} (dB)
2,4	13,90
5,8	19,20

Tabla 4.1: Factor de pérdidas L_{f1}

Finalmente, para tomar en cuenta las pérdidas por la presencia de las paredes, se recurre a los resultados mostrados en la Figura 3.9 y nuevamente se procede de manera similar a [1], es decir, aplicando el mismo procedimiento explicado más arriba para el caso de presencia de un piso. Los incrementos de las pérdidas de propagación, L_w , debido a la presencia de paredes en la trayectoria directa de la señal son mostrados en la Tabla 4.2, donde N_w se refiere al número de paredes atravesadas que generan el factor de pérdidas que le corresponde.

N_w	L_w (dB)
1	1,32
2	2,80
3	5,75
4	7,63
5	9,02
6	10,3

Tabla 4.2. Factor de pérdidas L_w

Por tanto, una segunda expresión del modelo de propagación desarrollado en el presente trabajo es dada por:

$$L(\text{dB}) = (-56,75 + 30,66h) + (72,15 - 19,15h)\log d + 51,78\log f + L_{f1} + L_w \quad (4.2)$$

Donde L_{f1} y L_w se obtiene de las Tablas 4.1 y 4.2, respectivamente.

La Tabla 4.2 se debe interpretar de la siguiente manera:

Si la distancia a la que se va calcular las pérdidas de propagación es, por ejemplo, 20 metros y la trayectoria directa recorre, en esa distancia, tres (3) cubículos de 6 metros cada uno. En los primeros seis (6) metros no se le debe adicionar factor alguno de pérdidas por paredes a la ecuación (4.2), debido a que la señal no ha atravesado una (1) pared. Entre los 6 m y 18 m se debe agregar 1,32 dB a la expresión (4.2), debido a que la señal habrá atravesado una (1) pared y, finalmente, entre los 18 metros y 20 metros se debe reemplazar 1,32 dB por 2,80 dB, debido a que la señal habrá atravesado dos (2) paredes.

Ahora bien, ya que en la práctica rara vez se tiene la posibilidad de contar con los factores de pérdidas de propagación por pisos y paredes, se procede a obtener una tercera aproximación del modelo, pero esta vez cambiando el factor " L_w " de la expresión (4.2) por un término que dependa del número de paredes N_w . Ello se logró considerando una aproximación del tipo potencia entre las pérdidas de propagación L y las pérdidas por paredes N_w , resultando la tercera expresión del modelo de propagación, dada por:

$$L(\text{dB}) = (-56,75 + 30,66h) + (72,15 - 19,15h)\log d + 51,78\log f + L_{f1} + 1,37N_w^{0,18} \quad (4.3)$$

4.4 Comparación de Resultados

A fin de evaluar el desempeño del modelo aquí desarrollado, se procede a comparar los valores medidos de la pérdida de propagación, L , con los valores

estimados por el modelo desarrollado y algunos de los modelos revisados en el Capítulo 2.

En ese sentido, por ejemplo, en las Figuras 4.4 y 4.5 se ilustra esa comparación para los caminos de Medición 1 (“f” igual a 2,4 GHz y “h” igual a 2,5 m) y Medición 4 (“f” igual a 5,8 GHz y “h” igual a 2,5 m). En ese caso, se emplea la expresión (4.1) pues no existen ni pisos ni paredes.

En la Figura 4.4, se observa que el modelo que mejor se ajusta es el desarrollado en el presente trabajo, mientras que el modelo de ITU-R es el que aparentemente más se aleja, sobrestimando las pérdidas de propagación, mientras que los modelos COST 231 Keenan y Motley simplificado (que en la Figura 4.4 aparece como “K-Ms”) y Venezuela, subestiman dichas pérdidas.

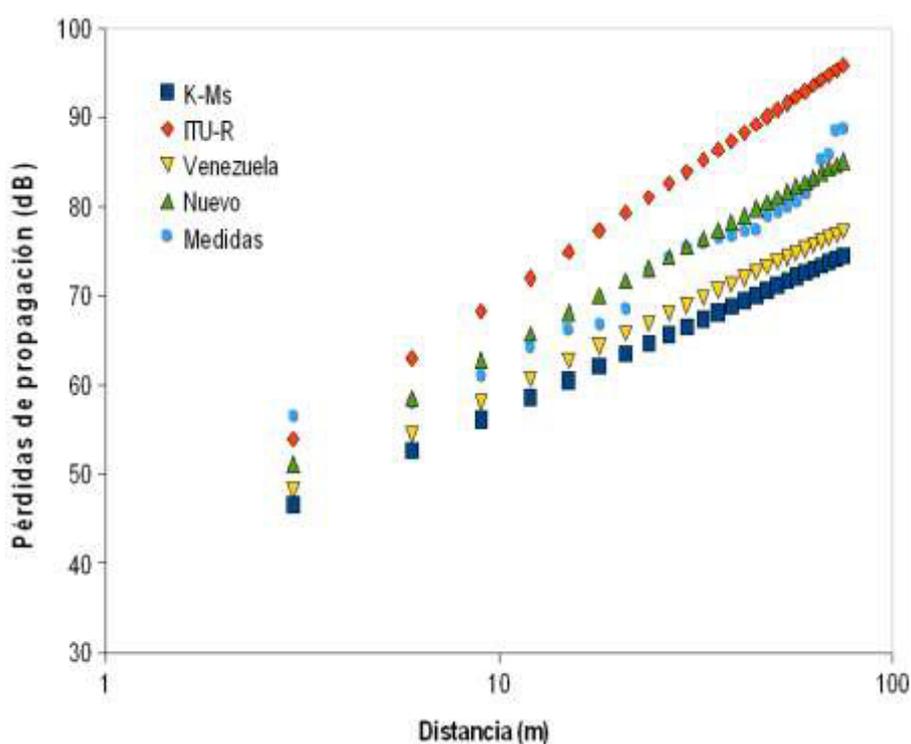


Figura 4.4: Valores medidos y estimados para el camino de Medición 1 (f = 2,4 GHz, h = 2,5 m).

En la Figura 4.5, se puede observar que nuevamente el modelo que mejor se ajusta a las medidas es el aquí desarrollado, mientras que los modelos que

presentan el más bajo desempeño en sus estimaciones son el desarrollado en Venezuela y el modelo de ITU-R, ambos subestimando las pérdidas por propagación al igual que el modelo COST 231 Keenan y Motley simplificado.

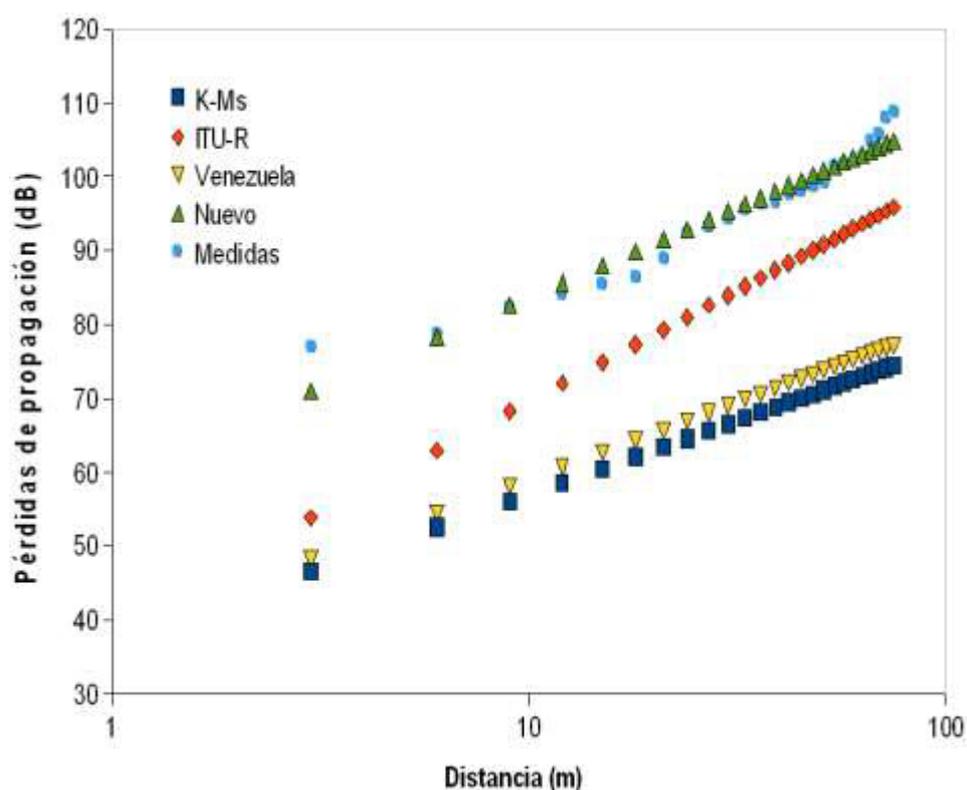


Figura 4.5. Valores medidos y estimados para el camino de Medición 4 ($f = 5,8$ GHz, $h = 2,5$ m).

En las Figuras 4.6 y 4.7 se muestran los valores medidos y estimados para los caminos de Medición 6 y 8, que corresponden a la presencia de un (1) piso, razón por la cual se recurre a la expresión (4.3), con N_w igual a cero (el AP está por muy próximo al techo del piso de abajo, por lo que se asume que no existen paredes en la trayectoria directa de la señal). Nuevamente, se comprueba que el modelo de mejor desempeño es el desarrollado en el presente trabajo.

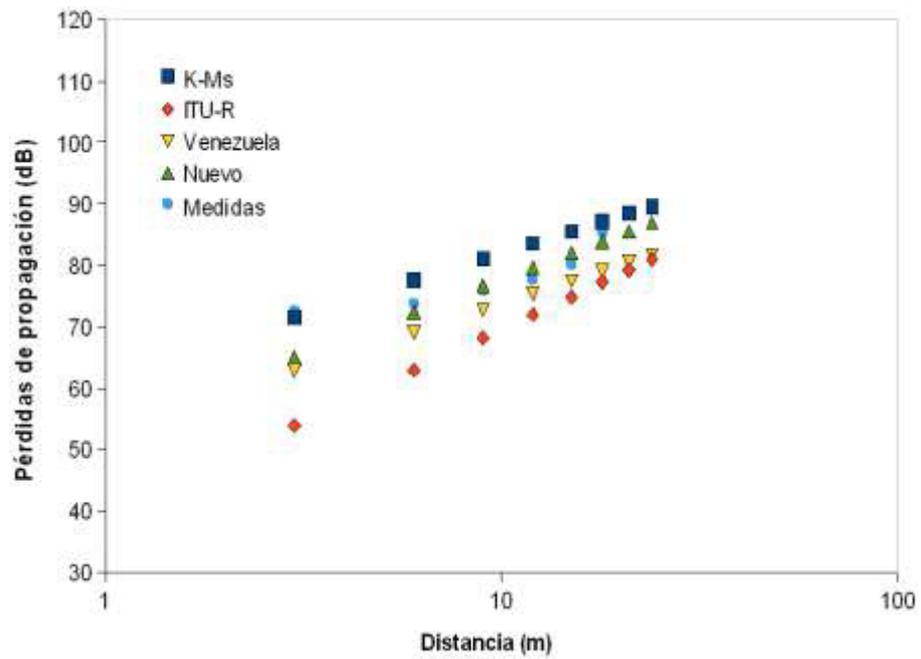


Figura 4.6: Valores medidos y estimados para el camino de Medición 6 ($f = 2,4$ GHz, $h = 2,5$ m).

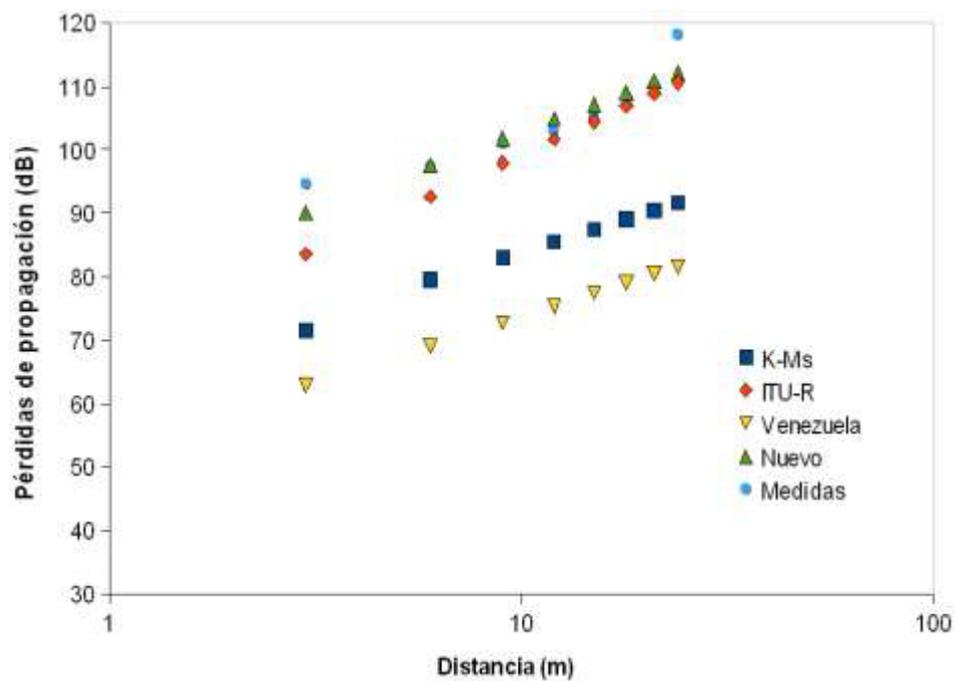


Figura 4.7: Valores medidos y estimados para el camino de Medición 8 ($f = 5,8$ GHz, $h = 2,5$ m).

En la Figura 4.8 se aprecian los valores medidos y estimados de “L” para el caso de existencia de paredes en la trayectoria directa. Concretamente, para esa comparación se seleccionó el camino de Medición 2 y se utilizó la expresión (4.3) con L_{f1} igual a cero.

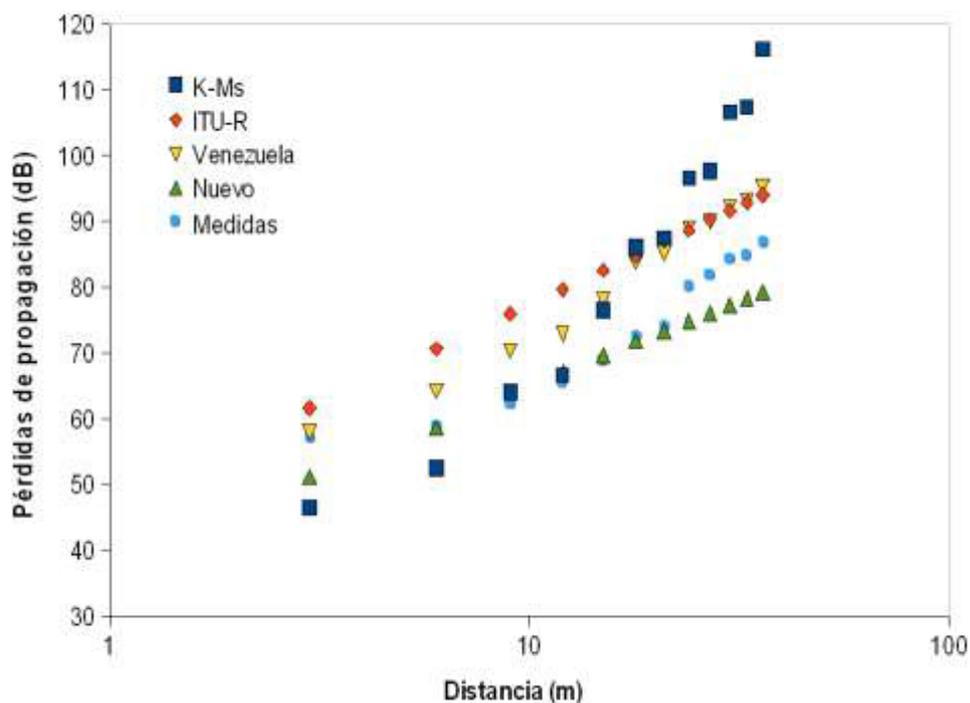


Figura 4.8: Valores medidos y estimados para el camino de Medición 2 ($f = 2,4$ GHz, $h = 2,5$ m).

Ahora bien, para tener una idea cuantitativa, más clara, del desempeño de los modelos considerados en las comparaciones de las Figuras 4.4 a 4.8, se procede a determinar el RMSE para todos esos casos. Los valores de RMSE obtenidos se resumen en las Tablas 4.3 a 4.7, con los cuales se comprueba el mejor desempeño del modelo desarrollado en todos los casos, pues es el que arroja menor RMSE.

	K-Ms	ITU-R	Venezuela	Nuevo
RMSE (dB)	80,66	94,23	43,80	2,32

Tabla 4.3: RMSE para el camino de Medición 1 ($f = 2,4$ GHz, $h = 2,5$ m)

	K-Ms	ITU-R	Venezuela	Nuevo
RMSE (dB)	855,68	137,70	718,30	2,14

Tabla 4.4: RMSE para el camino de Medición 3 (f = 5,8 GHz, h = 2,5 m)

	K-Ms	ITU-R	Venezuela	Nuevo
RMSE (dB)	15,56	44,14	42,45	11,42

Tabla 4.5: RMSE para el camino de Medición 6 (f = 2,4 GHz, h = 2,5 m)

	K-Ms	ITU-R	Venezuela	Nuevo
RMSE (dB)	383,13	30,36	1022,45	9,37

Tabla 4.6: RMSE para el camino de Medición 8 (f = 5,8 GHz, h = 2,5 m)

	K-Ms	ITU-R	Venezuela	Nuevo-1	Nuevo-2
RMSE (dB)	268,51	123,00	74,39	6,27	23,25

Tabla 4.7: RMSE para el camino de Medición 2 (f = 2,4 GHz, h = 2,5 m)

Conviene aclarar que en la Tabla 4.7 “Nuevo-1” se refiere al modelo aquí desarrollado y evaluado considerando los factores de pérdidas de propagación debido a las paredes de la Tabla 4.2; mientras que “Nuevo-2” se refiere a la tercera aproximación del modelo desarrollado, es decir, el dado por la expresión (4.3). Se observa que el desempeño del modelo al no considerar los valores puntuales de los factores de pérdidas de propagación producidas por las paredes decae, pero aun así, continua siendo mejor que el desempeño presentado por los modelos de la literatura considerados para la comparación.

Asimismo, de las Tablas 4.3 a 4.7 se puede notar que el desempeño de los modelos de propagación de la literatura incluidos en la comparación varía dependiendo del escenario de evaluación considerado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. En el presente trabajo se desarrolló un modelo para la estimación de pérdidas en ambientes interiores, para las frecuencias de 2,4 GHz y 5,8 GHz, recurriendo para ello a la realización de mediciones del nivel de señal recibido en ese tipo de ambientes, pertenecientes a dos (2) edificaciones de la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Concretamente, las mediciones realizadas fueron del nivel de potencia en función de la distancia, para diversas situaciones, es decir, con o sin pisos, con y sin paredes y variando o no la altura del transmisor.
2. Como equipos de medición fueron utilizados dos (2) AP (*Access Point*), uno para cada frecuencia de operación (ambos haciendo las veces de transmisores). Asimismo, se utilizó un computador portátil en calidad de receptor.
3. Los resultados obtenidos permitieron verificar el hecho conocido de que las pérdidas de propagación aumentan con el incremento de la distancia entre transmisor y receptor.
4. Asimismo, se pudo comprobar que a mayor frecuencia de operación, mayor también será la atenuación de la señal.
5. De la misma manera, se verificó que las pérdidas de propagación disminuyen con el aumento de la altura del transmisor.
6. Adicionalmente, los resultados demuestran que cuando en la trayectoria directa entre transmisor y receptor existen paredes y/o pisos, las pérdidas de propagación también aumentan.
7. En relación al modelo desarrollado, la comparación de su desempeño, en términos del RMSE, con el desempeño de los modelos considerados para dicha comparación, muestra que el modelo desarrollado presentó el menor RMSE para todos los casos estudiados, lo cual indica que el modelo en cuestión cumplió con las expectativas planteadas. El mencionado mejor desempeño del modelo en cuestión se debe a que se logró obtener expresiones para el mismo que arrojasen valores estimados de las pérdidas de propagación más cercanos a los valores medidos que los valores estimados por los demás modelos considerados en la comparación.

8. En cuanto a los restantes modelos de propagación, su comportamiento en la estimación de las pérdidas de propagación varía, a ocasiones subestimando y en otras sobreestimando los valores de las pérdidas de propagación, dependiendo del escenario de estudio considerado para la comparación.

Recomendaciones

1. Realización de más mediciones, en mayor cantidad de ambientes, mayor variedad de frecuencias de operación y mayor cantidad de pisos interpuestos en la trayectoria directa entre el transmisor y el receptor.
2. Realización de mediciones en ambientes exteriores, para desarrollar modelos al respecto.
3. Realización de mediciones con el auxilio de antenas y amplificadores, a fin de cubrir un mayor rango de valores en términos de distancia desde el transmisor y poder evaluar con mayor precisión el impacto de la distancia en las pérdidas de propagación.
4. Incorporación de medidas que permitan modelar la interferencia, aspecto importante en sistemas inalámbricos de telecomunicaciones.
5. Caracterizar las pérdidas de propagación, de acuerdo al material del que están contruidos pisos y paredes.
6. Desarrollar herramientas computacionales para la planificación y dimensionamiento de sistemas inalámbricos de comunicaciones, en las que se incluyan modelos de propagación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pérez N., Pabón C., Uzcátegui J. Nuevo Modelo de Propagación para Redes WLAN operando en 2.4 GHz, en Ambientes Interiores. Telematique, Vol. 9, No. 3, 2010, pp. 1-22.
- [2] Pérez N., Herrera J., Uzcátegui J., Bernardo J. Modelo de Propagación en las Ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia) para Redes WLAN, operando en 2.4 GHz, en Ambientes Exteriores. Universidad, Ciencia y Tecnología, Vol. 16, No. 62, marzo 2012, pp. 54-64.
- [3] Mompó M., Corral P., Segrelles J., Pierucci L. Herramienta Gráfica para la Predicción de Coberturas IEEE 802.11a/b/g en Interiores, Exteriores y Espacio Libre. XX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, Gandia España, Septiembre 2005.
- [4] Yi H. Outdoor Signal Strength Measurement at TV Band and ISM Band in Otaniemi Campus. Master's Thesis, Electrical Engineering, Aalto University, August 2013.
- [5] Akl R., Tummala D., Li X. Indoor Propagation Modeling At 2.4 GHz for IEEE 802.11 Networks. The Sixth IASTED International Multi-Conference on Wireless and Optical Communications, AB Canada, July 2006.
- [6] Han S., Gong Z., Meng W., Li C. An Indoor Radio Propagation Model considering Angles for WLAN Infrastructures. Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 15, No. 16, November 2015, pp. 2038-2048.
- [7] Yigit T., Ersoy M. Testing and Design of Indoor WLAN Using Artificial Intelligence Techniques, Elektronika Ir Elektrotechnika, Vol. 20, No. 6, 2014, pp. 154-157.
- [8] Japertas S. Slanys R. Research of IEEE 802.11 Standard Signal Propagation Features in Multi Floor Buildings, Elektronika ir Elektrotechnika, Vol. 19, No. 8, pp. 101-104, 2013.
- [9] International Union Telecommunications (ITU). Recommendation ITU-R P.1238-8: Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Indoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 900 MHz to 100 GHz. Geneva, Switzerland, 2015.

- [10] Solahuddin, Y. F., Mardeni, R. Indoor Empirical Path Loss Prediction Model for 2.4 GHz 802.11n Network. 2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2011), Penang, Malaysia. 2011.
- [11] Nagy L. and Szalay Z. Global Optimization of Indoor Radio Coverage. 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom 2010), Dubrovnik, Croatia, 2010.
- [12] Eldad E., Stacey R. Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac. 2nd Edition, Cambridge University Press, 2013.
- [13] WiFi Alliance (2015). Wi-Fi CERTIFIED™ [En línea]. Disponible en: <http://www.wi-fi.org>, (consultada en junio 2015).
- [14] Olenewa J. Guide to Wireless Communications. 3rd Edition, Cengage Learning, 2013.
- [15] International Union Telecommunications. ITU-R Study Groups. Geneva, Switzerland, 2013.
- [16] Hernández R., Fernández C., Baptista P. Metodología de la Investigación. 4ta Edición, McGraw Hill, 2006.
- [17] Jacobsen O. A Quarterly Technical Publication for Internet and Intranet Professionals. The Internet Protocol Journal, Vol. 9, No. 3, September 2006, pp. 1-36.
- [18] Khanduri R., Khanduri 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.
- [19] Mohammed R., Mustafa A., Osman A. A Comparison between IEEE 802.11a, b, g, n and ac Standards. IOSR Journal of Computer Engineering, Vol. 17, No. 5, Sep. – Oct. 2015, pp. 26-29.
- [20] RFWIRELESS WOLRD (2015). 11af vs 11ah- Difference between 802.11af and 802.11ah [En línea]. Disponible en: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Difference-between-IEEE-802-11af-and-IEEE-802-11ah.html> (consultada en junio 2015).

- [21] Doufexi A., Armour S., Butler M., Nix A., Bull D., McGeehan J. A Comparison of the HIPERLAN/2 and IEEE 802.11a Wireless LAN Standards. IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 5, May 2002, pp. 172-180.
- [22] Garg V. Wireless Communications and Networking. Morgan Kaufmann Publishers, 2007.
- [23] Khun-Jush J., Malmgren G., Schramm P., Torsner J. HIPERLAN Type 2 for Broadband Wireless Communication. Ericsson Review, No. 2, 2000, pp. 108-119.
- [24] Bonde P., Bonde J. HIPERLAN/2 and 802.11a: A Comparative Study. Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on Electronics, Hardware, Wireless and Optical Communications, February 2006, pp. 7-11.
- [25] Agrawal D., Zeng Q. Introduction to Wireless and Mobile Systems. 3rd Edition, Cengage Learning, 2011.
- [26] Tektronix (2013). Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements [En línea]. Disponible en: http://www.cnrood.com/public/docs/WiFi_Physical_Layer_and_Transm_Meas.pdf (consultada en junio 2015)
- [27] Verenkoff B (2011, July). Understanding and Optimizing 802.11n [En línea]. Disponible en: http://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf (consultada en junio 2015).
- [28] Pérez N. Radioenlaces. Notas de Aula, Semestre B-2104, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2014.
- [29] Agilent Technologies (2013, May 30). 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 junio 2015).
- [30] 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.

- [31] Hassan R., A/Nabi A. Wi-Fi 802.11 ac vs. 802.11 ad Comparative Study. International Journal of Science and Research, Vol. 4, No. 6, June 2015, pp. 1082-1083.
- [32] Adame T., Bel A., Bellalta B., Barcelo J., Oliver M. IEEE 802.11AH: The WiFi Approach for M2M Communications. IEEE Wireless Communications, Vol. 11, No. 6, December 2014, pp. 144-152.
- [33] MWRf (2015). What's the Difference between IEEE 802.11af and 802.11ah [En línea]. Disponible en: <http://mwrif.com/active-components/what-s-difference-between-ieee-80211af-and-80211ah> (consultada en julio 2015).
- [34] Ajah S., Al-Sherbaz A., Turner S. J., Picton P. Sub 1GHz M2M Communications Standardization: The Advancement in White Space Utilization for Enhancing the Energy Efficiency. PGNET Proceedings of the 15th Annual Postgraduate Symposium on the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting, Liverpool, UK, 2014.
- [35] Haiming W., Wei H., Jixin C., Bo S., Xiaoming P. IEEE 802.11aj (45GHz): A New Very High Throughput Millimeter-Wave WLAN System. Next Generation Wireless Networks, China Communications, Vol. 11, No. 6, June 2014, pp. 51-62.
- [36] Bellalta B. IEEE 802.11ax: High-Efficiency WLANs. IEEE Wireless Communications Magazine, July 2015, pp. 1-16.
- [37] IEEE 802 LAN/MAN (2015). Status of Project IEEE 802.11ay [En línea]. Disponible: http://www.ieee802.org/11/Reports/tgay_update.htm)consultada en julio 2015).
- [38] Briceño J. Transmisión de Datos. 3ra Edición, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, Abril 2005
- [39] Pérez N. Cálculo de Cobertura de Sistemas WLL e LMDS. Tesis de Maestría, PUC/Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- [40] Jean Paul Linnartz Reference Website (2015). Path Loss [En línea]. Disponible en: <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/pathloss.htm> (consultada en agosto 2015).

- [41] Joshi Y. Mediciones de la Potencia Recibida en una Red WLAN Operando en 2,4 GHz, en Ambientes Interiores (Indoor). Trabajo de grado no publicado. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2005.
- [42] Legg G. (2005, March 3). Smart Antennas: A New Boost for Wireless LANs [En línea]. Disponible en: <http://www.embedded.com/design/communications-design/4017796/Smart-Antennas-A-New-Boost-for-Wireless-LANs>)consultada en agosto 2015).
- [43] Dey I. Joint Fading and Shadowing Model for Large Office Indoor WLAN Environments. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol. 62, No. 4, April 2014, pp. 2209-2222.
- [44] Iskander M. Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 50, No. 3, March 2002, pp. 662-673.
- [45] Rappaport, T.S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd Edition, Prentice Hall, 2002.
- [46] Parsons, J.D. The Mobile Radio Propagation Channel. 2nd Edition, John Wiley& Sons, Londres, Inglaterra, 2000.
- [47] Metageek (2015). InSSIDer [En línea]. Disponible en: <http://www.inssider.com/es> (consultada en junio 2015).
- [48] Nutsaboutnets (2016). NetSurveyor - 802.11 Network Discovery / WiFi Scanner [En línea]. Disponible en: <http://nutsaboutnets.com/netsurveyor-wifi-scanner/> (consultada en abril 2016).
- [49] NirSoft (2016). WifInfoView v2.08 [En línea]. Disponible en: http://www.nirsoft.net/utils/wifi_information_view.html (consultada en abril 2016).
- [50] Free(code) (2016). Wavemon [En línea]. Disponible en: <http://freecode.com/projects/wavemon> (consultada en abril 2016).
- [51] Numerictron (2015). 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 2015).

[52] Araujo P., Pérez 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, 2010, pp.133-141.

[53] StatSoft (2015). STATISTICA [En línea]. Disponible en: <http://www.statsoft.com> (consultada en junio 2015).