

ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DE COBERTURA DE UN SISTEMA WI-FI EN INTERIORES MEDIANTE LA TÉCNICA DE TRAZADO DE RAYOS

Analysis of the accuracy of coverage of a Wi-Fi in interior by ray tracing technique

Fecha de recibo del artículo: Julio de 2011 - Fecha de aceptación: Septiembre de 2011

Santiago Andrés Ágredo Parra

Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Popayán, Colombia. santiagoagredo@unicauca.edu.co

Javier Alberto Luna Bonilla

Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Popayán, Colombia. javierluna@unicauca.edu.co

Víctor Manuel Quintero Florez

Ingeniero. Magíster en Electrónica y Telecomunicaciones. Profesor Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. vflorez@unicauca.edu.co

RESUMEN

La caracterización y el modelado del canal radioeléctrico son las partes más complejas en el diseño y análisis de sistemas inalámbricos para la comunicación de datos, por lo que se han convertido en una de las áreas de investigación más importantes y fundamentales en estudios de cobertura, capacidad y desempeño de sistemas inalámbricos. Estos estudios hacen parte del proceso continuo de planificación, y el obtener resultados lo más cercanos a la realidad permite reducir el tiempo de diseño, implementación y mantenimiento, lo cual conlleva a disminuir los costos de despliegue y operación de estos sistemas. Este artículo se centra en el análisis de precisión de la estimación de la cobertura de un sistema inalámbrico para la comunicación de datos operando bajo el estándar IEEE 802.11 en un escenario de interiores, basado en este análisis en la comparación de medidas reales y los resultados obtenidos por medio de una herramienta software que hace uso de la técnica de trazado de rayos como método de predicción.

Palabras clave

Análisis de cobertura, escenarios de interiores, IEEE 802.11, trazado de rayos, modelos de propagación.

ABSTRACT

Characterization and modeling of the radio channel are the most complex parts in the design of wireless systems for data communication, so it has become one of the most important areas of research study about coverage, capacity and performance of wireless systems. These studies are useful in the continuous planning process, which allow obtaining accurate results to the reality and a reduction in design, deployment and maintenance, which reduce the deployment and operation costs of these kind of systems. This article focuses on the accurate analysis of coverage estimation in a wireless system for data communications operating under the IEEE 802.11 standard in an indoor scenario, based on this analysis in the comparison of real measurements and the obtained results using a software tool, which makes use of a ray tracing technique as a propagation prediction method and propagation models for estimating the power value in the defined scenario.

Keywords

Coverage analysis, indoor scenarios, IEEE 802.11, ray tracing, propagation models.

INTRODUCCIÓN

El uso de las Redes de Área Local Inalámbrica (*WLAN, Wireless Local Area Network*) se ha incrementado de forma exponencial a nivel mundial, brindando a los usuarios acceso a la información y a los recursos de una red en el momento requerido y sin la necesidad de una conexión cableada. A los operadores, las redes WLAN les brindan flexibilidad, escalabilidad y bajo costo en la instalación, lo que permite aumentar la cobertura, capacidad y desempeño de las redes, aun en sitios de difícil acceso [1].

En la actualidad la mayoría de equipos ofimáticos y dispositivos de comunicación móvil se encuentran equipados con interfaces inalámbricas certificadas por la *Wi-Fi Alliance* lo que ha generado el uso elevado y la alta popularidad de las redes inalámbricas, con un número de usuarios creciente. Las redes de área local inalámbricas tienen un limitado alcance y muchas de ellas son implementadas sobre escenarios complejos tanto en el hogar como en la industria, por lo tanto es necesario realizar estudios para su correcta planificación, diseño, despliegue y operación teniendo en cuenta los fenómenos y factores que se encuentran inmersos en estos procesos [2], con el fin de lograr un óptimo desempeño.

Lo anterior ha dado origen a técnicas y procedimientos para predecir o estimar el comportamiento de las señales radioeléctricas, las cuales en conjunción con modelos de propagación apropiados permiten estimar o predecir la cobertura de una red inalámbrica [2]. Los modelos de predicción y propagación posibilitan, de manera aproximada, estimar la cobertura de los puntos de acceso (*AP, Access Points*) y establecer la ubicación más adecuada de éstos, para lograr un rango específico de cobertura, con el fin de sacar el mayor provecho a la red y reducir los costos relacionados con su diseño, implementación y operación.

Para facilitar la planificación de estas redes, se han desarrollado diversas herramientas software de análisis, diseño y planificación de sistemas de comunicaciones inalámbricas, con las cuales se estima o predice la propagación de las ondas electromagnéticas a diferentes frecuencias, teniendo en cuenta los parámetros de los equipos involucrados en la transmisión, tales como potencia de transmisión, frecuencia de operación, ganancia de antenas, patrón de radiación de las antenas, altura de las antenas con respecto al suelo, etc. y a la vez teniendo en cuenta las características de la zona de interés o escenario de despliegue [3].

En el proceso de planificación de una red inalámbrica, la precisión en la predicción de la cobertura es considerada como uno de los aspectos más relevantes. Con el fin de incrementar la precisión de los modelos de propagación, éstos se complementan con los métodos de predicción, para lograr cada vez más una mayor aproximación a los valores medidos en escenarios reales.

TÉCNICA DE TRAZADO DE RAYOS Y MODELOS DE PROPAGACIÓN

Técnica de trazado de rayos

La técnica de trazado de rayos se basa en las teorías de la óptica geométrica (GO, *Geometrical Optics*) y la teoría uniforme de difracción (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*) siendo una técnica aplicada en la informática gráfica para la representación de imágenes reales. En la actualidad, es utilizada como modelo determinístico en el estudio de la propagación de las señales radioeléctricas. Técnica mediante la cual se predice la respuesta del canal radioeléctrico en escenarios de interiores y de exteriores [4].

En los modelos que usan trazado de rayos se especifican el número de máximo de reflexiones y difracciones que se tendrán en cuenta, en cada uno de los puntos o sobre puntos específicos de un determinado escenario, lo que implica una considerable carga computacional y un inmenso tiempo de procesamiento. Además, se debe especificar de la manera más precisa las características de los obstáculos y barreras, y en general del escenario donde se desea implementar un sistema de comunicaciones inalámbrico.

El inconveniente de los modelos de trazado de rayos radica en la necesidad de caracterizar de manera detallada el entorno que se va a analizar, lo que hace que la precisión del modelo dependa en gran medida de la exactitud de los datos asociados al entorno de despliegue de la red o sistema de comunicaciones inalámbrico [5].

El objetivo de la técnica de trazado de rayos en la predicción de la cobertura de un sistema inalámbrico es identificar las posibles trayectorias y tener en cuenta todas las contribuciones de las señales que alcanzan el terminal receptor, y en conjunto con los modelos de propagación estimar el valor de campo eléctrico o de potencia en una zona de interés o en un punto específico del escenario de despliegue.

Métodos basados en teoría de rayos

Los métodos basados en teoría de rayos se sustentan en modelos determinísticos cuasi-ópticos que analizan la influencia del terreno a través de mecanismos de propagación tales como reflexión, refracción, difracción y dispersión [6]. El conocimiento de la trayectoria de un rayo es fundamental en el estudio de la propagación de las señales radioeléctricas.

Los métodos basados en la teoría de rayos permiten calcular parámetros que caracterizan a una red o sistema inalámbrico tales como dispersión de retardo, desvanecimiento y respuesta al impulso [7], [8]. El modelo básico es el trazado de rayos, del cual hace uso la herramienta de predicción de cobertura Wireless InSite®.

Métodos de predicción de trazado de rayos

El trazado de rayos se aplica en modelos en dos dimensiones (2D) y en tres dimensiones (3D). Para los modelos en 2D, únicamente se trazan rayos en un plano, por lo que no todos los caminos hacia el terminal receptor son considerados, lo que reduce el tiempo de procesamiento. Generalmente los modelos en 2D son utilizados para estimar la cobertura en amplios y complejos escenarios de interiores.

En los modelos en 3D se trazan todos los rayos que alcanzan el terminal receptor a partir de un punto de transmisión, incluyendo las reflexiones presentadas en techos y pisos, requiriendo un tiempo de procesamiento mucho mayor que en el trazado de rayos en 2D.

La técnica de trazado de rayos implementada en la herramienta Wireless InSite® combina algoritmos de trazado de rayos con UTD. El trazado de rayos determina los caminos de propagación de la señal radioeléctrica para cada punto receptor [9].

A continuación se estudian los métodos de trazado de rayos utilizados para determinar los diferentes caminos que puede tomar la señal desde el transmisor al receptor.

a) Método de disparo y rebote de rayos

El método de disparo y rebote de rayos (SBR, *Shooting-and-Bouncing Ray*) consiste en lanzar múltiples rayos desde la antena transmisora, trazando los rayos con el fin de detectar si este incide sobre algún objeto o incide en la antena receptora. Si el rayo incide sobre un objeto, se produce reflexión, refracción, dispersión o difracción, dependiendo de las propiedades geométricas del objeto [10] tal como se muestra en la Figura 1.

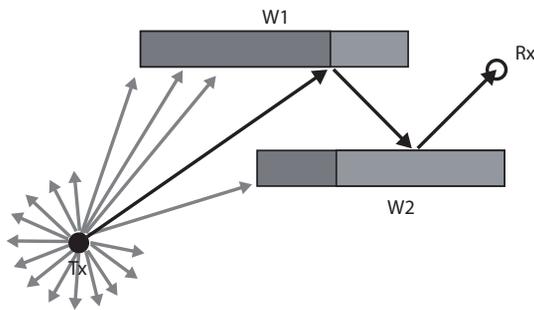


Figura 1. Representación gráfica del método de disparo y rebote de rayos

b) Método de imágenes

El método de imágenes consiste en analizar objetos de gran tamaño, que se encuentran próximos al terminal receptor; por lo general son las paredes, el piso y el techo de los escenarios, y se utiliza el concepto de fuentes virtuales, llamadas imágenes, las cuales representan un sistema equivalente del rayo reflejado, tal como se muestra en la Figura 2.

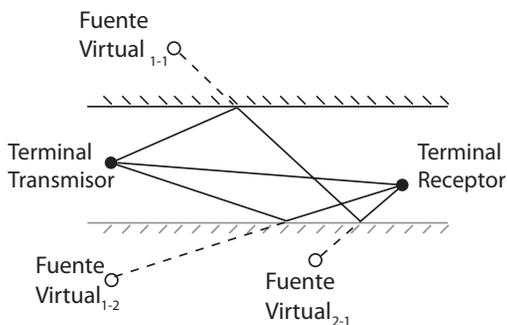


Figura 2. Representación gráfica del método de imágenes

Este método genera imágenes de todas las fuentes en todos los planos o respecto de todos los planos que tiene el sistema, obteniendo de esta forma N imágenes de primer orden, en la cual no se utiliza el terminal transmisor, sino una imagen de orden inmediatamente anterior. Cabe resaltar que este concepto puede ser aplicado en reflexiones de orden superior, en el cual, para el caso de N planos y un único terminal transmisor, se obtendría $N(N-1)$ planos de orden superior.

Una vez estimadas las múltiples reflexiones que sufre el rayo, la atenuación asociada a la trayectoria del rayo se puede calcular fácilmente sobre el plano que alcanza al terminal receptor, teniendo en cuenta la cantidad de energía reflejada que depende de los parámetros del medio sobre el que incide la señal radioeléctrica [11].

Modelos de propagación para escenarios de interiores

Los modelos de propagación son aproximaciones realizadas considerando fenómenos que presenta un escenario con el fin de estimar la cobertura y los valores de potencia que permitan el dimensionamiento adecuado de los sistemas de comunicación inalámbricos. Estos modelos tienen como fin estimar la potencia de la señal recibida o su valor de campo eléctrico y determinar variaciones de potencia en el terminal receptor, de acuerdo con el efecto del medio de propagación o canal sobre las señales radiadas [8], [12]. Dependiendo de las características del sistema de comunicación y el escenario sobre el cual se implementará, algunos parámetros toman mayor o menor importancia, por lo que diversos modelos han sido desarrollados con el fin de estimar con mayor o menor facilidad la potencia recibida en los diferentes escenarios de aplicación de los sistemas de comunicación inalámbricos [7].

a) Modelo completo 3D

Modelo de propagación para estimar la cobertura en escenarios de interiores, el cual se caracteriza por no tener restricciones en cuanto a la forma de las estructuras, considerando objetos con todo tipo de irregularidades. El modelo tie-

ne en cuenta transmisiones a través de las superficies de los objetos y reflexiones en pisos, paredes y techo, convirtiéndose en el modelo más completo utilizado por la herramienta de predicción de propagación Wireless InSite® para el análisis en escenarios interiores [13]. La Tabla 1 muestra los parámetros para la aplicación del modelo completo 3D.

Tabla 1. Parámetros del modelo completo 3D

Máximas reflexiones	30, asumiendo que no hay traspaso de señal en la superficie
Máximas difracciones	4 (SBR)
Transmisiones máximas	30, asumiendo que no hay reflexiones
Ambiente	Todos
Terreno	Todos
Interiores	Todos
Objetos	Todos
Alcance	Varía de acuerdo con la aplicación
Altura de las antenas	Todas
Tipo de antenas	Todos
Trazado de rayos	SBR
Frecuencia mínima	100 MHz
Frecuencia máxima	Depende de la aplicación

Si se presentara la máxima cantidad de reflexiones y transmisiones posibles, el tiempo en el cálculo de los trayectos se verá afectado con un incremento en el tiempo de respuesta debido al procesamiento.

El tiempo de cálculo de procesamiento aproximado es proporcional al mostrado en la ecuación (1).

$$tc = \frac{(Nr + Nt + 1)!}{Nr! \times Nt!} \quad (1)$$

Donde:

- *tc*: tiempo de cálculo (s)
- *Nr*: Número de reflexiones
- *Nt*: Número de traspasos

También es utilizado por la herramienta de predicción de propagación Wireless InSite® el método de trazado de rayos Eigenray que se enfoca en la definición explícita de la trayectoria de

los rayos entre el transmisor y el receptor, satisfaciendo el principio de Fermat.

Este método sólo tiene en cuenta los rayos con un máximo de tres reflexiones y difracciones, estimando un tiempo de cálculo proporcional, como lo describe la ecuación (2).

$$tc = (N_f)^x \quad (2)$$

Donde:

N_f: Número de fases geométricas

X: Número máximo de reflexiones más difracciones

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Metodología

Se utilizó una metodología de desarrollo basada en un enfoque sistemático para el diseño y aplicación de la simulación, lo cual facilitó la elección, diseño e implementación del escenario mediante la aplicación del modelo lineal secuencial (Figura 3), el cual implica la ejecución de una serie de fases o etapas ordenadas, las cuales al desarrollarse permiten determinar el grado de precisión de la predicción realizada por la herramienta Wireless InSite® al comparar estos resultados con las medidas de campo tomadas en el escenario real.



Figura 3. Modelo lineal secuencial o ciclo de vida

Análisis de requerimientos

En esta fase se extrajeron los requerimientos más relevantes que permitieron la construcción del escenario de simulación.

Lista de requerimientos

Requerimiento 1: Seleccionar el escenario de simulación que se construirá con la herramienta de predicción.

Requerimiento 2: Especificar las características físicas del escenario real, tales como ubicación, tamaño y material de cada elemento de la estructura.

Requerimiento 3: Establecer la ubicación del transmisor y los receptores.

Requerimiento 4: Presentar los resultados de estimación de cobertura del sistema en el escenario simulado.

Requerimiento 5: Recolectar de medidas de campo real.

Requerimiento 6: Presentar los resultados de la cobertura del sistema en el escenario real.

Requerimiento 7: Realizar análisis comparativo de los resultados de simulación y de las medidas de campo real.

Diseño

En esta fase de desarrollo se construyó el escenario de simulación a partir de los parámetros extraídos del escenario real para construir de una forma precisa o aproximada el escenario de simulación.

Para realizar un adecuado modelado del escenario es preciso definir los detalles que deben ser considerados para la construcción de la estructura, por lo cual se siguen estos pasos:

- Identificar y ubicar puertas, ventanas, corredores y salones.
- Identificar los materiales que constituyen las estructuras presentes en el escenario.
- Establecer la dimensión de los objetos que hayan sido identificados.
- Realizar un plano en dos dimensiones teniendo en cuenta las medidas realizadas en el escenario.
- Realizar el modelado en tres dimensiones

del escenario definido previamente utilizando la herramienta Wireless InSite®.

- Distribuir de manera aleatoria un transmisor y un número n de receptores por el escenario.

Implementación

En esta fase se analizó y evaluó la cobertura del sistema Wi-Fi desplegado en el escenario seleccionado.

Modelado de la estructura

Para obtener una predicción más precisa del comportamiento de las ondas propagadas en el escenario seleccionado, fue necesario definir en detalle los materiales con los cuales está construida la estructura, considerando las propiedades físicas de los mismos, tales como:

✓ Grosor

Este parámetro es especificado en metros y está relacionado con los coeficientes de reflexión y transmisión, aunque en algunos casos sólo es utilizado para propósitos de representación estética o de apariencia, definiéndose como la acumulación del espesor de cada una de las capas utilizadas en la estructura.

✓ Permitividad

Constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. Para la utilización de este parámetro se considera como referencia la permitividad del vacío, sin embargo la herramienta de simulación define esta propiedad para cada material y además permite su modificación. Sus unidades son picofaradios por metro (pF/m).

✓ Conductividad

Esta propiedad natural indica la capacidad de los cuerpos para permitir el paso de corriente eléctrica a través de ellos, convirtiéndose en una de las características más importantes de los materiales, definiéndose como el inverso de la resistividad y especificado en la herramienta en unidades de Siemens por metro (S/m).

Para el escenario seleccionado se han identificado cuatro materiales principales que componen la estructura, los cuales son mostrados en la Tabla 2, con sus principales características. Los valores establecidos para cada una de las propiedades de los materiales son los utilizados por defecto en la herramienta de predicción, limitándose sólo al cambio del grosor correspondiente a los objetos que componen el escenario.

Construcción de la estructura

Una vez los materiales fueron definidos y caracterizados, se procedió con la identificación de los objetos que hacen parte de la estructura del escenario como ventanas, puertas, corredores y salones, lográndose de esta manera diseñar un plano en dos dimensiones, como se muestra en la Figura 4, el cual brinda una perspectiva general del escenario que se desea simular. Para definir de manera más precisa estos objetos es necesario que se haga una toma de medidas en el escenario real con el fin de modelar cada uno de los espacios y cuerpos del mismo de manera más precisa dentro de la herramienta.

Con base en el plano en dos dimensiones, y utilizando la herramienta de predicción, se realizó el modelado de la estructura para obtener el escenario en tres dimensiones, el cual se muestra en la Figura 5.

Parámetros del sistema

Se implementó el sistema cumpliendo con las especificaciones del estándar IEEE 802.11b, con un transmisor y un número n de receptores, con el cual se busca obtener la mejor cobertura en el escenario interior escogido.

El estándar seleccionado utiliza la banda de frecuencias de 2.4 GHz, en donde se divide el espectro en partes iguales distribuidas sobre la banda en canales individuales, cuyo tamaño depende de la técnica de transmisión usada a nivel físico.

El sistema implementado utiliza la técnica de transmisión de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*), la cual usa una secuencia de bits para cada uno de los bits que componen la señal que se requiere transmitir, incrementando la re-

Tabla 2. Propiedades de los materiales utilizados

Material	Permitividad (pF/m)	Conductividad (S/m)	Grosor (m)
Ladrillo	4.44	0.001	0.125
Madera	5	0	0.04
Vidrio	2.4	0	0.005
Concreto	15	0.015	0.3

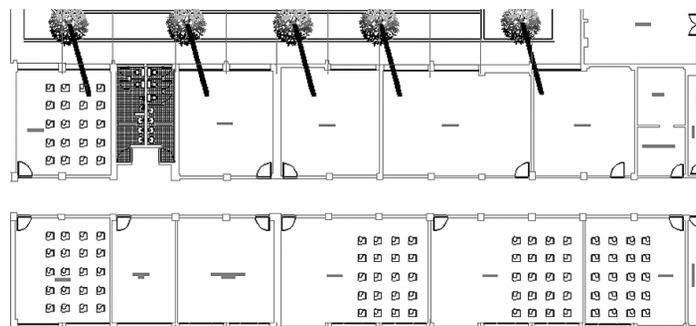


Figura 4. Plano en dos dimensiones del escenario de simulación

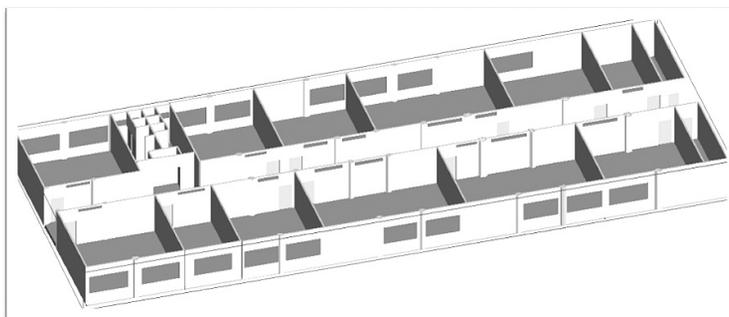


Figura 5. Escenario de trabajo modelado en Wireless Insite®

sistencia de la señal a las interferencias a medida que este patrón de bits sea mayor.

La técnica DSSS utiliza un rango de frecuencias de operación que va desde 2.4 GHz hasta 2.4835 GHz, permitiendo utilizar un ancho de banda total de 83.5 MHz, el cual se subdivide en 15 canales con una separación de 5 MHz.

Para este sistema se seleccionó el canal número uno, por no ser utilizado por otro sistema en el mismo escenario, con lo que se evitó tener contribuciones de potencia que alteraran las medidas recolectadas. La frecuencia central de operación de este canal es de 2.412 GHz con un ancho de banda de 22 MHz, en la cual es configurado el transmisor; además el transmisor es configurado con los parámetros que se muestran en la Tabla 3, los cuales corresponden a las especificaciones del estándar IEEE 802.11b y a los parámetros de configuración de la antena de transmisión utilizada para la implementación del sistema real en el escenario seleccionado y la sensibilidad de los receptores.

Pruebas

En esta fase se ejecutó el plan de pruebas a nivel de simulación, con el objetivo de encontrar la mejor posición para el transmisor del sistema en el escenario y hacer un mejor uso de los recursos, para lo cual se realizó un número considerable de simulaciones que permitió identificar este punto, así como la ubicación de un número n de receptores a los que se les realizó una estimación a nivel de potencia, para poste-

Tabla 3. Configuración de las antenas

Potencia de transmisión	23dBm (200mW)
Frecuencia de operación	2.412 GHz
Número de canal	1
Ancho de banda del canal	22 MHz
Altura de antenas Tx - Rx	1m
Tipo de antena	Direccional
Ganancia	17dBi
Sensibilidad de antena receptora	-96dBm
ROE	1
Temperatura	293k

riormente comparar y analizar estos resultados con medidas de campo real para establecer el grado de precisión de la técnica de trazado de rayos utilizada por la herramienta de predicción de propagación.

a. Plan de pruebas

El plan de pruebas inicial para determinar la ubicación del transmisor consistió en la realización de un número suficiente de simulaciones que permitieron establecer el mejor punto de transmisión para brindar la mejor cobertura en el escenario seleccionado. Un total de 100 puntos de transmisión fue suficiente para identificar el mejor sitio de transmisión en el escenario propuesto.

En la Tabla 4 se muestran las simulaciones más significativas donde se presenta una posición óptima, una media y una menos favorable para la ubicación del transmisor del sistema en el escenario a nivel de cobertura.

Tabla 4. Simulaciones más significativas

Número de simulación	Número de receptores	Separación entre receptores (m)	Cobertura
1	3094	0.5	Óptima
2	3050	0.6	No favorable
3	3121	0.45	Media

Con estas simulaciones se visualizó de manera general la potencia en cada punto de recepción del escenario. A continuación se muestra el análisis realizado a la simulación 1, la cual presentó la condición de mejor cobertura, se seleccionaron específicamente 21 puntos de recepción en todo el escenario.

Simulación 1

En esta simulación se ubicó el transmisor en el extremo izquierdo del inicio del pasillo con la configuración de antenas establecida en la Tabla 3, como se muestra en la Figura 6, y se generó una grilla de recepción de 3.094 puntos ubicados por todo el escenario con una separación

de 0.5 m entre los distintos puntos de recepción que forman la grilla. Se ejecutó la simulación utilizando el método de predicción SBR y el modelo de propagación completo 3D. El resultado de la estimación de cobertura se muestra en la Figura 7.

El sistema presentó en el escenario definido una variación de potencia de recepción en un rango de 12.8 dBm a -143.7 dBm, teniendo en cuenta que la sensibilidad de los receptores es de -96 dBm, se determina una cobertura del 98.91% del área total del escenario, aproximadamente.

Para una mejor percepción de los resultados, se distribuyeron 21 puntos de recepción por todo el escenario, como se muestra en la Figura 8. En estos puntos específicos de recepción se visualizó la predicción de cobertura mediante el uso de la herramienta software, la cual hace uso del método de predicción SBR y el modelo de propagación completo 3D.

Una vez definido el escenario de trabajo, con los puntos de recepción y el punto de transmisión,

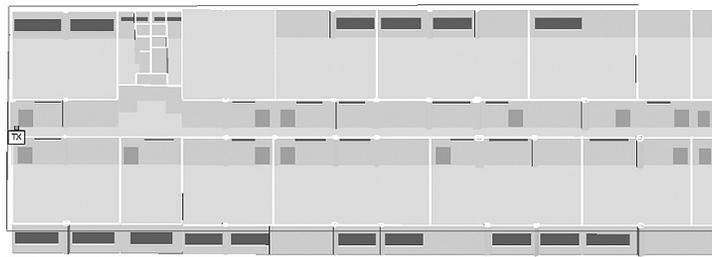


Figura 6. Ubicación del transmisor

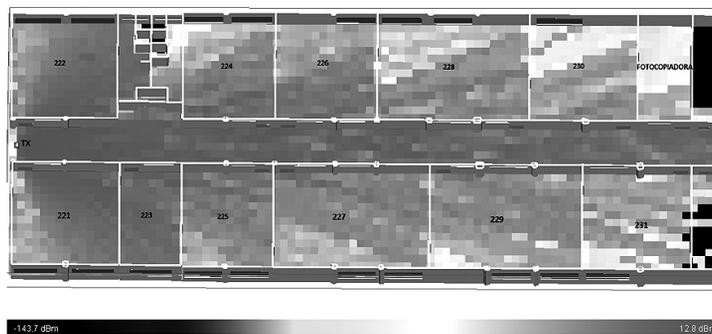


Figura 7. Cobertura del sistema en la simulación

se ejecutó el trazado de rayos entre el transmisor y cada uno de los 21 receptores distribuidos en el escenario, tal como se muestra en la Figura 9.

En la Tabla 5 se observan los resultados de las medias de campo real haciendo uso de la plataforma inalámbrica PowerSation 2® y los resultados obtenidos por la herramienta de predicción de cobertura Wireless InSite®.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y MEDIDAS OBTENIDAS EN EL ESCENARIO DE INTERIORES

En esta sección se analizan los resultados obtenidos con la herramienta de predicción de cobertura Wireless InSite®, para la simulación que presenta la mejor cobertura sobre el escenario de interiores en estudio, además se comparan dichos resultados con las medidas reales para estimar el grado de precisión de la técnica de trazado de rayos aplicando el método de predicción SBR y el modelo de propagación utilizado en la predicción de la cobertura del sistema Wi-Fi en un escenario de interiores.

Además se realiza un estudio de caracterización del canal de comunicación inalámbrico del es-

cenario de interiores con el fin de determinar la naturaleza de la propagación de las señales radioeléctricas sobre el escenario.

Validación de la técnica de trazado de rayos

Con el fin de calcular el grado de precisión de los datos obtenidos en la simulación con la herramienta de predicción de cobertura Wireless InSite®, se realizó una comparación puntual entre los resultados obtenidos con la herramienta de simulación y las medidas reales efectuadas sobre el escenario de interiores con la plataforma inalámbrica PowerSation 2®.

Teniendo en cuenta que la potencia de transmisión es fija y la potencia recibida es una variable aleatoria, se calculó la media, varianza y desviación estándar, además de diferentes medidas de dispersión y precisión, partiendo de la hipótesis de que los resultados estudiados representan una muestra de la población total.

Los cálculos estadísticos mencionados anteriormente se realizaron para identificar qué tan aproximados son los resultados obtenidos de

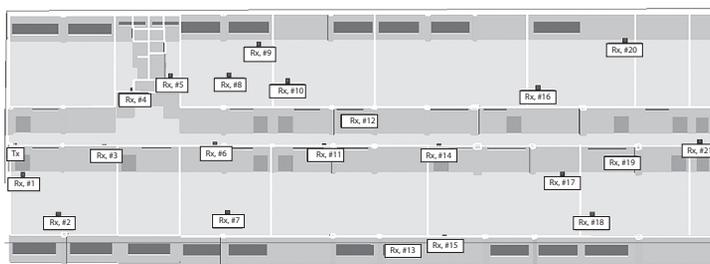


Figura 8. Ubicación puntual de receptores

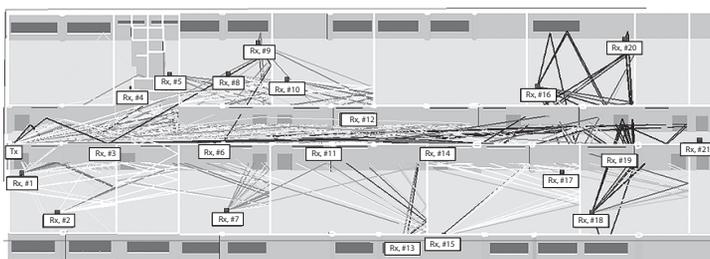


Figura 9. Trazado de rayos en el escenario para los 21 receptores

Tabla 5. Potencia de recepción estimada en la simulación 1 y medidas de campo real de los puntos de referencia

Número de receptor	Potencia de Rx Medida (dBm)	Potencia de Rx Estimada (dBm)	Distancia (m)
1	-16	-15.92	2.91
2	-17	-17.57	5.77
3	-7	-2.82	6.33
4	-25	-26.93	9.08
5	-32	-31.57	11.77
6	-4	-3.8	12.8
7	-35	-32.7	13.17
8	-40	-39.49	14.22
9	-37	-34.67	17.8
10	-53	-39.8	17.9
11	-14	-14.76	19.3
12	-30	-27.28	22.95
13	-41	-36.08	26.47
14	-13	-12.86	26.81
15	-39	-40.28	27.77
16	-44	-45.53	34.19
17	-33	-32.83	34.87
18	-41	-44.55	37.33
19	-16	-18.49	37.82
20	-49	-46.05	40.53
21	-28	-27.99	42.81

estimación de potencia por medio de la herramienta software en comparación con las medidas reales en el escenario de interiores [14].

En la Tabla 6 se presentan los resultados de los cálculos estadísticos obtenidos de estimación de potencia en comparación con las medidas reales.

La herramienta posee un porcentaje muy bajo de error en el cálculo de la cobertura y estimación de la potencia recibida en comparación con las medidas de campo real.

En la Figura 10 se observa la superposición de los resultados de potencia de recepción estimados por la herramienta de predicción cobertura Wireless InSite® y las medidas reales realizadas haciendo uso de la plataforma inalámbrica PowerSation 2® para los 21 puntos de recepción seleccionados, teniendo en cuenta la distancia

Tabla 6. Resultados estadísticos respecto a medidas estimadas y reales

Potencia de recepción	Potencia promedio (\bar{P})	Varianza (σ^2)	Desviación estándar (σ)
Estimada	--28.18	173.36	13.16
Medida	--29.23	196.19	14
Error medio relativo (%)	Error cuadrático medio	Desviación estándar de error	
8.65	12.89	3.67	

entre la antena transmisora y la antena receptora. Se debe considerar que existen diferentes condiciones en el canal de radio entre el transmisor y los puntos de recepción seleccionados.

Caracterización del canal

Una vez demostrada la alta precisión que posee la herramienta de predicción de cobertura Wireless InSite®, se realiza un análisis más profundo del canal de comunicación, gracias a las características que ofrece el uso de la técnica de trazado de rayos.

Para realizar un estudio sobre la naturaleza de los desvanecimientos producidos sobre el escenario de interiores, se analiza el nivel de potencia en diferentes puntos de recepción ubicados sobre tres rutas. La primera ruta se encuentra sobre el pasillo principal en línea de vista con el terminal transmisor; la segunda ruta se define a través de los salones que están en la parte superior del escenario, la cual no se halla en línea de vista con el terminal transmisor; y la tercera ruta intercepta las otras dos rutas, y se encuentra formada e incluye lugares en línea de vista y otros que no están en línea de vista con el terminal transmisor. En la Figura 11 se observa cada una de las rutas de estudio.

En las Figuras 12, 13 y 14 se aprecian las gráficas de potencia de recepción contra distancia para cada una de las rutas. Las rutas horizontales presentan desvanecimientos rápidos.

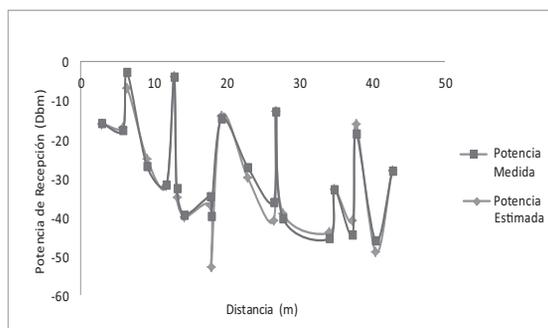


Figura 10. Potencia de recepción medida y estimada

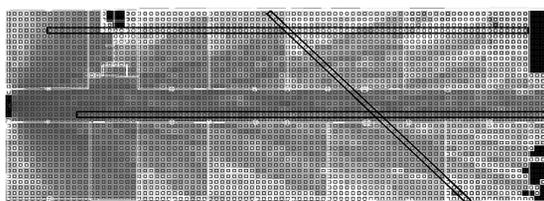


Figura 11. Rutas de puntos de recepción

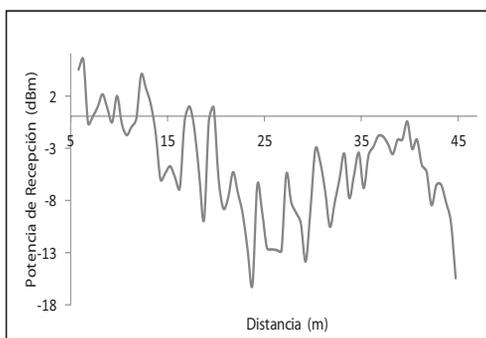


Figura 12. Potencia de recepción contra distancia sobre la ruta 1 de puntos de recepción en línea de vista

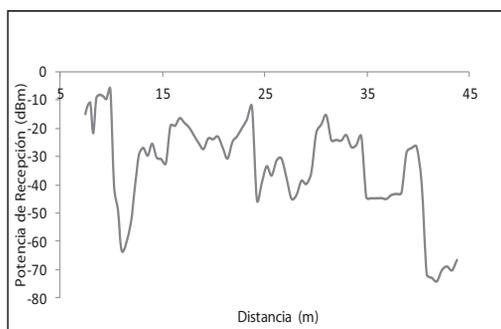


Figura 13. Potencia de recepción contra distancia sobre la ruta 2 de puntos de recepción sin línea de vista

En general, se observa en las Figuras 12, 13 y 14 que cuando no existe línea de vista los niveles de potencia de recepción son mucho más bajos.

En las Figuras 12 y 13 se detectan desvanecimientos rápidos, producidos por la multitrayectoria en el corredor principal del escenario definido, debido a las múltiples contribuciones de la señal que llegan a alcanzar al terminal receptor en diferentes instantes de tiempo y con diferentes niveles de amplitud y fase; en la Figura 14 existen desvanecimientos rápidos, además se observa un pequeño sector en donde se presentan desvanecimientos lentos y un desvanecimiento profundo al final de la ruta; los desvanecimientos lentos se originan por la interacción de la señal con los objetos de gran tamaño que se encuentran dentro del canal de propagación.

Debido al uso de la técnica de trazado de rayos como método de predicción, la herramienta de predicción de cobertura Wireless InSite® presenta un módulo de análisis del perfil de retardo temporal en donde se muestra cada una de las contribuciones en los puntos de recepción de la grilla.

Para un análisis más general, se tomaron los datos de la dispersión de retardo estimados por la herramienta en los mismos puntos usados en las medidas reales, además se calculó el ancho de banda de coherencia para cada uno de los valores de dispersión de retardo haciendo uso de la ecuación (3) [8].

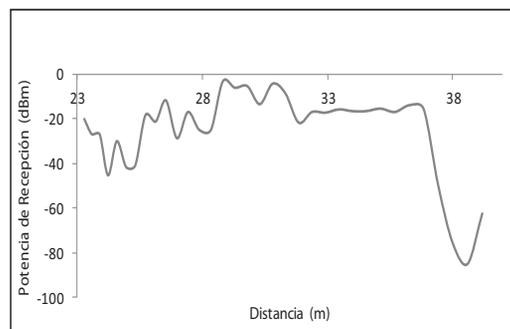


Figura 14. Potencia de recepción contra distancia sobre la ruta 3 de puntos de recepción

$$B_c = \frac{1}{2\pi\sigma_t} \quad (3)$$

Donde:

σ_t = Dispersión de retardo.

En la Tabla 7 se observa la dispersión de retardo estimada por la herramienta y el ancho de banda de coherencia calculado.

Tabla 7. Dispersión de retardo estimado por la herramienta y ancho de banda de coherencia calculado en los puntos de la campaña de medidas de campo

Número de receptor	Dispersión de retardo (ns)	Ancho de banda de coherencia (MHz)
1	4.88	32.61
2	9.08	17.52
3	1.66	95.87
4	6.68	23.82
5	12.6	12.63
6	2.42	65.76
7	12.8	12.43
8	20	7.95
9	13.1	12.14
10	13	12.24
11	2.77	57.45
12	1.28	124.33
13	17.8	8.94
14	2.03	78.40
15	1.46	109.01
16	16	9.94
17	3.37	47.22
18	5.8	27.44
19	1.55	102.68
20	6.4	24.86
21	1.26	126.31

Para una comprensión más detallada de la naturaleza de los retardos que presenta la señal sobre el canal de comunicación del escenario de interiores en puntos específicos, se analizó el retardo de cada una de las contribuciones que presenta la señal en 5 de los 21 puntos, elegidos

al azar, sobre los que se realizaron las medidas reales. Los puntos elegidos sobre la grilla y el número de rayos que contribuyen a la estimación de la potencia recibida son mostrados en la Tabla 8, en donde la columna número de contribuciones se refiere a la cantidad de rayos que llegan al terminal receptor en la simulación.

Se puede notar en la Tabla 8 que se eligieron 3 puntos de recepción que no se encontraban en línea de vista, y 2 que sí lo estaban. En la Figura 15 se observa la grafica del perfil de potencia contra retardo, en la que se aprecia el tiempo de llegada de cada una de las contribuciones en los 5 puntos de recepción seleccionados.

Los retardos de cada una de las contribuciones de la señal son más dispersivos para situaciones en las que no se presenta línea de vista. Mientras que en los casos en los que se presenta línea de vista directa, hay una dispersión menor de los valores, además el retardo en promedio de la señal aumenta respecto a la distancia del enlace.

Tabla 8. Número de contribuciones de los receptores elegidos

Número de receptor	Número de contribuciones	Línea de vista (LoS)
5	25	No
11	25	Sí
15	25	No
20	12	No
21	25	Sí

Por lo tanto, la dispersión de retardo en escenarios de interiores depende en gran medida de las obstrucciones que encuentre la señal en su propagación por el canal.

El ancho de banda de coherencia es una relación que se deriva de la dispersión de retardo, el cual es una medida estadística de rango de frecuencias sobre el cual el canal puede ser considerado plano en frecuencia, por lo tanto dos señales con un frecuencia de separación mayor

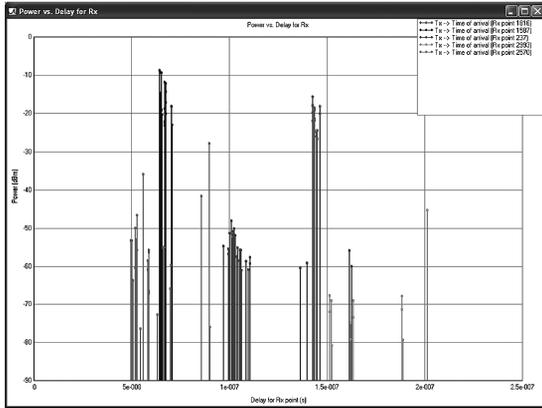


Figura 15. Perfil de potencia retardo

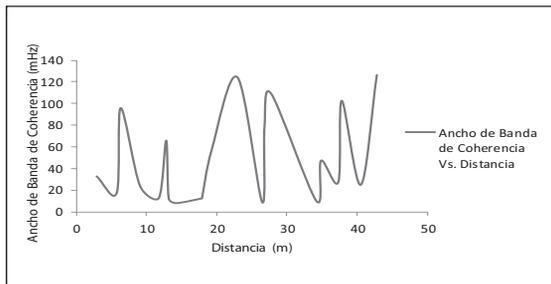


Figura 16. Ancho de banda de coherencia contra distancia

que el ancho de banda de coherencia son afectadas de manera diferente por el canal.

En la Figura 16 se observan los valores del ancho de banda de coherencia en los 21 puntos de estudio.

Teniendo en cuenta que se trabajó con el estándar IEEE 802.11b, el cual presenta un ancho de banda de canal de 22 MHz, usando la ecuación (3) se encuentra la dispersión de retardo umbral a la cual el canal se considera plano en frecuencia.

En el escenario de interiores se tiene que para valores de dispersión de retardo superiores a 7.23 ns el canal presenta un desvanecimiento selectivo en frecuencia.

Se puede apreciar en la Tabla 7 que la dispersión de retardo resulta ser menor al valor umbral para los casos en que se presenta línea de vista, por lo tanto se puede concluir que se tiene una mayor inmunidad a los desvanecimientos selectivos en frecuencia en estos casos.

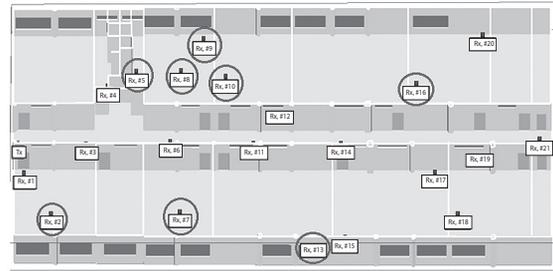


Figura 17. Desvanecimiento selectivo en frecuencia

En la Figura 17 se aprecian los puntos en los cuales se evidencia desvanecimiento selectivo en frecuencia, en donde se ve claramente que ninguno de los puntos que presentan línea de vista directa con el terminal transmisor muestra este fenómeno.

CONCLUSIONES

La técnica de trazado de rayos utilizada por la herramienta de predicción de propagación Wireless InSite® estima con alto grado de precisión la cobertura de un sistema Wi-Fi en escenarios de interiores.

El uso de la técnica de trazado de rayos no se limita a estimar los niveles de potencia dentro de un escenario o definir la cobertura, también permite realizar un estudio del canal de comunicaciones.

En el escenario de interiores existen desvanecimientos rápidos; en regiones donde no hay línea de vista con el terminal transmisor el desvanecimiento rápido se combina con el desvanecimiento lento.

Los terminales receptores que están en línea de vista con el terminal transmisor presentan mayores niveles de potencia recibidos y menor dispersión de retardo, ya que los rayos trazados alcanzan al terminal receptor con una diferencia de tiempo mínima, lo que permite una mayor inmunidad a generar interferencia inter símbolos (ISI).

Se observan regiones dentro del escenario de

interiores en donde hay desvanecimientos selectivos en frecuencia, en especial aquellos puntos donde no existe línea de vista con el terminal transmisor.

El uso de herramientas basadas en trazado de rayos es importante en la planificación y especialmente en la actividad relacionada con la estimación de cobertura de sistemas de comunicaciones inalámbricos, ofreciendo una gran precisión, un menor tiempo de diseño y reducción de costos de despliegue y operación.

La diferencia entre las medidas estimadas y las medidas reales se debe a la limitación de la herramienta de predicción en el modelado de personas y algunos elementos de la infraestructura como escaleras y columnas, así como la dificultad en la importación de objetos que hacen parte del escenario tales como asientos, mesas, armarios y equipos en general que ocasionan pérdidas relevantes en la señal de propagación de las ondas de radiofrecuencia.

El uso de herramientas software de predicción de cobertura requiere una descripción detallada y precisa del escenario de implementación o de análisis.

Agradecimientos

Los autores agradecen por su apoyo a la Universidad del Cauca y a la empresa Remmcom® por permitir el uso de su herramienta Wireless InSite®.

REFERENCIAS

- [1] M. Martínez, S. Vidal y J. Sosa. "Análisis de propagación en interiores en la banda de 2.4 GHz, para el diseño de cobertura de la red IEEE 802.11b, g de Esime Zacatengo"; Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. – Febrero 2006.
- [2] E. Castellanos, J. Talero, J. Rugeles y H. Ortega. "Análisis de Propagación Electromagnética en Espacios Cerrados: Herramienta Software en Matlab® para Predicción y Simulación". Grupo RadioGIS, Universidad Industrial de Santander – Abril 2005.
- [3] Y. Carreño, A. García, H. Ortega y D. Rosas. "Predicción de pérdidas por propagación por medio del modelo andino UIS®" Universidad Industrial de Santander, Colombia; Artículo publicado en Revista GTI, volumen. 4, número 8 año 2005.
- [4] J. L. Camargo y S. Hornillo. Proyecto de fin de carrera; "Modelo de cobertura para redes inalámbricas de interiores"; Universidad de Sevilla – Mayo 2009
- [5] N. García Fernández. Tesis doctoral; "Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo", Universidad de Oviedo – Marzo 2006.
- [6] J. Rábanos. "Comunicaciones móviles"; segunda edición, Editorial cetno de estudio Ramo Areces.
- [7] E. Castellanos, J. B. Talero y J. Rugeles; "Análisis de propagación electromagnética en espacios cerrados: herramienta software en matlab para predicción y simulación" Grupo RadioGIS, Universidad Industrial de Santander – Abril 2005.
- [8] D. Campos. Proyecto de fin de carrera; "Cobertura dentro de construcciones para comunicaciones personales móviles vía satélite"; Departamento de Ingeniería Electrónica; Universidad de las Américas, Puebla.
- [9] N. Beltrán y S. Dibán; "Aplicación del Modelo Ray-Tracing para determinar el comportamiento de la propagación al interior de edificios"; Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- [10] N. A. El. Gader; "Outdoor Propagation Prediction an Measurement Point to Point for Wireless LAN Application"; Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Malaysia; Junio de 2008.
- [11] V. Campillo y J. M. Molina. Proyecto de Fin de Carrera; "Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD"; Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cartagena - Junio 2008.

- [12] C. Pérez, J. M. Zamanillo y A. Casanueva. "Sistemas de Telecomunicación"; Universidad de Cantabria.
- [13] J. Schuster and R. Luebbers. "Hybrid SBR/GTD radio propagation model for site specific predictions in an urban environment", 12th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics; Monterrey, California; Vol. 1, pp. 84-92; 1996.
- [14] L. Pedraza y C. Hernández. Proyecto de fin de carrera "Análisis Experimental para un modelo de propagación de la telefonía móvil de la Universidad Militar"; Universidad Militar Nueva Granada; Diciembre de 2009.