# ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS DE RADIO EN LA BANDA ISM 2.4 GHZ EN UN ESCENARIO EXTERIOR PARA EL DISEÑO DE REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

**MARLEDIS MARIA ARRIETA BENAVIDES**

**TUTOR:**
**ALEJANDRO MARULANDA TOBÓN**

**UNIVERSIDAD EAFIT**
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FÍSICAS**
**MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA**
**MEDELLÍN, COLOMBIA**
**2019**

## DEDICATORIA

A Tata, a Joche y a mi familia, aquella que no se conforma y quiere ser mejor cada día.

## AGRADECIMIENTO

A Dios, y todas sus manifestaciones para enseñarme sobre la calma.

A mi hermana y todas aquellas personas que me apoyaron para llegar hasta aquí. Al profesor Alejandro Marulanda, por confiar en mí, por su asesoría, su paciencia.

Gracias a mi familia por cada palabra de aliento, cada oración, cada gesto de cariño que me ayudó a alivianar los días y noches de duda y cansancio**.** Gracias también, a mi familia perruna por el amor incondicional.

Gracias a todos por su tiempo…

Para ustedes mi trabajo.

# INDICE GENERAL

DEDICATORIA....ii
AGRADECIMIENTO....iii
INDICE GENERAL....iv
INDICE DE FIGURAS....vii
INDICE DE TABLAS....ix
RESUMEN....x
1. INTRODUCCIÓN....1
2. JUSTIFICACIÓN....3
3. OBJETIVOS....5
3.1 Objetivo general....5
3.1 Objetivos específicos....5
4. MARCO TEÓRICO....6
4.1 Wireless Sensors Networks....6
4.2 Propagación de ondas de radio.....6
4.2.1 Reflexión.....7
4.2.2 Difracción.....8
4.2.3 Zonas de Fresnel.....9
4.2.4 Absorción.....9
4.2.5 Interferencia.....10
4.3 La Teoría Geométrica de la Difracción (GTD) y Teoría Geométrica Uniforme de la Difracción (UTD)....10
4.4. Pérdida de Trayectoria (PL, Path Loss) y Modelos de Propagación....11
4.4.1 Modelo de propagación en espacio libre.....11
4.4.2. Log Distance-Model....12

4.4.3 Log-Normal Shadowing ..... 12
4.5 Trazado Inteligente de Rayos (IRT) ..... 12
5. ESTADO DEL ARTE ..... 14
5.1 Métricas para caracterizar el canal ..... 14
5.2 WSN para monitorización en ambientes exteriores ..... 17
5.3. WSN y Protocolo ZigBee ..... 19
6. MATERIALES Y MÉTODO ..... 21
6.1 Plataforma y captura de datos ..... 21
6.1.1 Puesta a punto de la plataforma ..... 21
6.1.2 Configuración de los módulos XBee ..... 22
6.1.3 Programación de las tarjetas Waspmote ..... 22
6.1.4 Campañas de captura de datos ..... 23
6.2 Preparación de las simulaciones ..... 25
6.2.1 Preparación Base de datos ..... 25
6.2.2 Generación patrón antena 3D ..... 26
6.2.3. Parámetros Simulación ..... 27
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... 30
7.1 Análisis previos a la obtención del Modelo ..... 30
7.1.1 Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Biblioteca-atrás ..... 30
7.1.2 Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Plazoleta-estudiante ..... 32
7.1.3 Valores RSSI promedios para cada distancia ..... 34
7.1.4 Desviación Estándar ..... 36
7.1.5 Paquetes Perdidos ..... 37
7.2 Desarrollo del Modelo ..... 38
7.2.1 Regresión Lineal - Toma de datos 1 y 2 ..... 38

7.2.2 Regresión Lineal- Promedio datos 1 y 2 ..... 43
7.2.3 Normalidad y la variabilidad de los datos ..... 45
7.3 Efecto de Shadowing - Modelo Final ..... 46
7.4 Evaluación de los modelos propuestos ..... 47
7.4.1 Comparación con modelos teóricos ..... 47
7.4.2 Discusión ..... 49
7.5 Resultados Simulación ..... 50
7.5.1 Resultados Simulación One Slope Model (OSM) ..... 50
7.5.2 Comparación resultados simulación OSM con modelos mediciones ..... 52
7.5.3 Resultados Simulación IRT – WinProp ..... 53
7.5.4 Comparación resultados simulación IRT con modelos mediciones ..... 54
8. CONCLUSIONES ..... 57
9. TRABAJOS FUTUROS-RECOMENDACIONES ..... 60
BIBLIOGRAFÍA ..... 61

## INDICE DE FIGURAS

**Figura 1** Efecto de las superficies rugosas en la reflexión. (Saunders & Aragón, 2007) 8
**Figura 2** Principio de Huygen's para la difracción knife-edge. (Saunders & Aragón, 2007) ..... 8
**Figura 3** 1era Zona de Fresnel y Zona prohibida (Saunders & Aragón, 2007) ..... 9
**Figura 4** (izq): Módulos Xbee S2C, (der.): Tarjetas Libelium con batería ..... 21
**Figura 5** Programación del módulo XBee como Router en la interfaz X-CTU. ..... 22
**Figura 6** Interfaz Waspmote-Pro-IDE trama recibida por el coordinador. ..... 23
**Figura 7** Montaje Transmisor-Receptor en escenario Plazoleta-estudiante ..... 24
**Figura 8** Montaje Transmisor-Receptor en escenario Biblioteca-atrás ..... 24
***Figura 9*** *Base de datos para simulación: (a) Modelos SketchUP 3D Bloque 32 y Bloque 38. (b) Base datos WinProp* ..... 25
**Figura 10** Ajuste de la representación gráfica del patrón de antena en AMan ;(b) Dibujo de puntos del patrón en AMan; ..... 26
**Figura 11** Patrón antena interpolado antena whip. (a) Plano horizontal; (b) Plano vertical; (c) En modo 3D ..... 27
**Figura 12** Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Biblioteca-atrás toma de datos 1 ..... 31
**Figura 13** Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Biblioteca-atrás toma de datos 2 ..... 31
**Figura 14** Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Plazoleta-estudiante toma de datos 1 ..... 32
**Figura 15** Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Plazoleta-estudiante toma de datos 2 ..... 32
**Figura 16** Valores RSSI promedios para cada distancia Biblioteca-atrás..... 35
**Figura 17** Valores RSSI promedios para cada distancia Plazoleta-estudiante..... 35
**Figura 18** Desviación estándar de RSSI..... 36
**Figura 19** Path Loss para cada toma de datos en función Distancia [m]: (a) Biblioteca-atrás; (b) Plazoleta-estudiante ..... 39

**Figura 20** Path Loss para cada toma de datos en función de $\log_{10}(d)$: (a) Biblioteca-atrás; (b) Plazoleta-estudiante ..... 40
**Figura 21** Path Loss (ajuste) para cada toma de datos como función de Log (d) para los escenarios: (arriba) Biblioteca-atrás; (abajo) Plazoleta-estudiante. ..... 41
**Figura 22** Path Loss final como función de Log (d) para los escenarios: (izq.) Biblioteca-atrás; (der.) Plazoleta-estudiante. ..... 43
**Figura 23** Path Loss (ajuste) para cada toma de datos como función de Log (d) para los escenarios: (izq.) Biblioteca-atrás; (der.) Plazoleta-estudiante. ..... 44
**Figura 24** Gráficos residuales: (arriba.izq.) histograma, (arriba.der.) valores ajustados, (abajo) probabilidad ..... 45
**Figura 25** Comparaciones entre los modelos propuestos y modelos teóricos: (arr-izq.) Biblioteca-FSPL; (arr-der.) Plazoleta-FSPL; (abajo-izq) Biblioteca-Plazoleta-FSPL; (abajo-der.) Biblioteca-Plazoleta-FSPL-Two_ray. ..... 48
**Figura 26** Comparaciones entre los modelos propuestos - modelos teóricos -PL promedio datos ..... 49
**Figura 27** Predicción PL plazoleta OSM (valores LOS): (izq.) parámetros definidos (Iso), (der.) patrón 3D ..... 50
**Figura 28** Predicción PL OSM biblioteca (LOS): (izq.) parámetros definidos (der.) patrón 3D ..... 51
**Figura 29** Predicción PL OSM biblioteca (valores LOS/NLOS): (izq.) parámetros definidos (der.) patrón 3D, modo visual 3D ..... 51
**Figura 30** Comparación predicción PL OSM simulación vs modelos propuestos y FSPL: (izq.) Plazoleta, (der.) Biblioteca ..... 52
**Figura 31** Predicción PL IRT biblioteca (LOS): (izq.) parámetros definidos (der.) patrón 3D, modo visual 3D ..... 53
**Figura 32** Predicción PL IRT biblioteca (LOS/NLOS): (izq.) parámetros definidos (der.) patrón 3D, modo visual 3D ..... 54
**Figura 33** Comparación predicción PL IRT simulación vs modelos propuestos: (izq.) Biblioteca Iso/Patrón 3D, (der.) y OSM-FSPL Plazoleta y Biblioteca ..... 55
**Figura 34** Comparación predicción PL (sin ajuste) de IRT 3D y OSM 3D simulación vs modelos propuesto ..... 55

# INDICE DE TABLAS

**Tabla 1** Características del módulo XBee ZB (S2C). (Digi-International, 2018)..... 21
**Tabla 2** Resumen parámetros simulación One Slope Model (Modified Free Space Model) ..... 28
**Tabla 3** Resumen parámetros simulación 3D Ray Tracing (IRT)..... 28
**Tabla 4** Paquetes Perdidos..... 38
**Tabla 5** Resumen de los coeficientes calculados y parámetros de bondad del ajuste para escenario Biblioteca-atrás ..... 40
**Tabla 6** Resumen de los coeficientes calculados y parámetros de bondad del ajuste para escenario Plazoleta-estudiante ..... 40
**Tabla 7** Resumen de los coeficientes finales calculados y parámetros de bondad del ajuste para escenarios Biblioteca-atrás y Plazoleta-estudiante ..... 44
**Tabla 8** Resumen Predicción Path Loss (OSM) -WinProp..... 51
**Tabla 9** Resumen Predicción Path Loss (OSM) WinProp..... 54

## RESUMEN

Las redes de sensores inalámbricas (por sus siglas en inglés, *Wireless Sensor Networks*) pueden monitorear, estudiar, y hacer control del entorno a través de dispositivos llamados nodos, los cuales tienen la capacidad de sensar, procesar, transmitir y recibir información; esto hace que su campo de aplicación sea muy amplio. Para su óptimo diseño, es necesario conocer las características de la señal que viaja entre transmisor (Tx) y receptor (Rx); esto permite hacer estimaciones de cobertura, potencia y distancia a la que se deben colocar los dispositivos que conforman la red; de ahí la importancia de conocer la variabilidad de la intensidad de la señal y calcular las pérdidas en un entorno determinado.

En el proyecto que se sintetiza en el presente documento, se llevó a cabo un estudio experimental y con simulaciones de dichas pérdidas de propagación de ondas de radio en la banda ISM 2.4 GHZ. Las actividades de índole experimental se realizaron con mediciones de la intensidad de la señal recibida *(RSSI, Received Signal Strength Indicator)* entre dos módulos de radio que se encontraban a la misma altura (2m), y comunicando con protocolo *Zigbee,* esto con el fin de hallar el exponente de pérdida de trayectoria (*path loss exponent*); así, de esta manera, obtener un modelo semi-empírico que caracterice el comportamiento de la intensidad de la señal en dos escenarios en el exterior: uno, donde la transmisión se realiza sin obstáculos todo el tiempo, y otro, con presencia cercana de edificaciones, árboles y faroles metálicos entre los nodos.

Para evaluar los modelos propuestos, se realiza una comparación de estos con modelos teóricos. Se generan también algunas simulaciones de la radio-propagación para contrastar los valores medidos con un modelo determinista y estudiar la atenuación en la señal teniendo en cuenta la presencia de las edificaciones del escenario. Los módulos de radio utilizados fueron los Xbee S2C y para realizar las simulaciones se utilizó el programa WinProp de Altair Engineering Inc.

Los resultados de los modelos obtenidos de las mediciones mostraron que, el modelo teórico *FSPL* predice un valor de pérdida de trayectoria más bajo que el modelo

propuesto, en ambos escenarios. También se observó que, en el caso de escenario *Plazoleta-estudiante*, el modelo obtenido de la simulación One Slope Model (*OSM*, Modified Free Space Model) con el patrón de antena 3D es bastante cercano al modelo propuesto. Las simulaciones con el Modelo de Trazado Inteligente de Rayos (*IRT, por sus siglas en inglés, Intelligent Ray Tracing)* para el escenario Biblioteca-atrás con patrón 3D predijo valores de pérdida de trayectoria más altos que las mediciones, este error en la estimación pudo haber sido por imprecisiones en la caracterización de los materiales en la banda de frecuencia estudiada.

# 1. INTRODUCCIÓN

Con la evolución de la tecnología, las comunicaciones inalámbricas han tenido un crecimiento acelerado en los últimos años; esto favoreció el desarrollo de las redes de sensores inalámbricas o WSN.

Los dispositivos que componen las WSN (nodos) pueden ser diseñados para cumplir tareas de detección, almacenamiento, procesamiento y comunicación. Es posible con ello monitorear condiciones físicas o ambientales. (Dargie & Poellabauer, 2010). Estas características hacen que este tipo de redes se puedan adaptar a múltiples y variadas aplicaciones, por ejemplo, pueden ser de gran utilidad para el monitoreo de la salud, en la domótica, el monitoreo de algunas condiciones ambientales, en la agricultura de precisión, el control industrial, domótica, entre otras. (Manolakos, Logaras, & Paschos, 2009)

En una WSN intervienen diversos aspectos que relacionados directa o indirectamente afectan el consumo energético de la red. Dentro de estos aspectos importantes se encuentran los fenómenos físicos presentes en la propagación de la señal de radio y la separación entre el nodo trasmisor y receptor. Por lo anterior, es imperioso conocer los factores que afectan el canal inalámbrico, y que impiden una conexión apropiada entre los nodos. La pérdida de trayectoria *(Path loss)* se debe a la atenuación de la potencia irradiada por el transmisor, así como a los efectos del canal de propagación (Goldsmith, 2005). Para conocer esto, se utilizan los modelos de propagación de pérdida de trayectoria (*Path Loss Modeling*). “La mayoría de las métricas de rendimiento importantes comúnmente empleadas para WSN, como la disipación de energía, la optimización de rutas, la confiabilidad y la conectividad, se ven afectadas por el modelo de propagación utilizado.” (Kurt & Tavli, 2017)

El análisis de los efectos causados por los diferentes fenómenos puede describirse a través de modelos teóricos y/o generando simulaciones basadas en los mismos. También es posible hacer el análisis a través mediciones en un escenario real, a las

cuales, se pueden adicionar variables estadísticas. Estos métodos de análisis permiten la cuantificación de diferentes parámetros, los cuales pueden brindar información acertada para aplicar o desarrollar un modelado del canal inalámbrico de manera confiable y realista cuando se llevan a cabo mediciones en un escenario real. Kurt & Travli (2017) relatan en su trabajo que “una de las razones de la utilización de tales modelos de propagación poco prácticos es la falta de conocimiento de los modelos de propagación y pérdida de trayectoria específicos de WSN disponibles experimentalmente.”

En el presente trabajo existe el interés de conocer la variabilidad de la intensidad de la señal y calcular las pérdidas que conlleven a obtener los modelos de propagación en campo de estudio seleccionado; esto se realiza a través del exponente de pérdida de trayectoria, el cual se calcula con valores *RSSI* medidos en dicho escenario y haciendo simulaciones de radio-propagación que permitan aportar en la descripción de pérdidas para futuras aplicaciones que trabajen con módulos de radio en la banda de 2.4GHz y en espacios similares.

Este documento está organizado de la siguiente forma: después de las partes introductorias; en el capítulo 4, se hace una descripción teórica de los fenómenos a los que están expuestas las ondas de radio debido a su propagación y algunos modelos que se aplican a las WSN. Además, en el capítulo 5, se hace una revisión de los trabajos relacionados con la parte experimental y la simulación. En el capítulo 6, se encuentran los materiales y métodos, así como, la configuración de los dispositivos para las mediciones y la obtención de los escenarios representativos para las simulaciones. Seguidamente, se presenta los resultados en el capítulo 7 junto con: la discusión de las mediciones, la obtención del modelo de pérdida de trayectoria para los dos escenarios, la aplicación de las simulaciones y finalmente en el capítulo 8, las conclusiones; y trabajos futuros en el capítulo 9.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Las redes de sensores inalámbricas tienen un futuro prometedor, y esto es debido a la versatilidad de aplicaciones en las cuales pueden ser implementadas. Y aunque las investigaciones de las WSN se han incrementado a nivel práctico y teórico, es escasa la atención hacia los estudios de radio-propagación y los llamados modelos de propagación para este tipo de redes en particular. Como lo menciona Kurt & Tavli (2017), "…a excepción de un informe técnico sobre comunicaciones inalámbricas terrestres que proporciona una visión general limitada de los modelos de comunicaciones inalámbricas, no existe un documento de revisión sobre los modelos de propagación para WSN terrestres."

Así pues, un análisis previo de propagación permite caracterizar el escenario particular donde la WSN se quiere desplegar, brindando criterios importantes para su diseño, por ejemplo, la potencia de transmisión, *RSSI*, entre otros. De esta manera la WSN puede llegar a tener una conexión confiable, eficiente entre nodos, buena cobertura y eficiencia energética, es decir, se optimiza el tiempo de vida de la red.

Aunque actualmente han surgido propuestas para que las WSN trabajen con frecuencias más bajas o altas a 2.4GHz, la mayoría de las plataformas para WSN utilizan tecnología ZigBee. "De hecho, los estándares de WSN como Zigbee han hecho de 802.15.4 la tecnología de red predominante para el Internet de las cosas (IoT)." (ZigBee, 2019). Este protocolo fue diseñado para sistemas inalámbricos de bajo costo y consumo de energía, además trabaja en las bandas libres ISM (por sus siglas en inglés *Industrial, Scientific and Medical*) que normalmente son utilizadas en comunicaciones WLAN (*Wireless Local Area Network*) o WPAN (*Wireless Personal Area Network*), por lo tanto, este protocolo se adapta muy bien con la diversidad de aplicaciones de este tipo de redes.

Una búsqueda bibliográfica exhaustiva muestra que, aunque actualmente existe un interés creciente por las WSN, los estudios de radio propagación para estas redes en ambientes exteriores, no avanzan al mismo ritmo. Por lo expuesto, existe una motivación

a realizar este tipo de experiencias y se observa oportuno llevar a cabo un estudio de la propagación ondas de radio en la banda ISM 2.4 GHz, empleando tecnología ZigBee en un escenario exterior como lo es el campus de la Universidad EAFIT. Se contribuiría así en la generación de un antecedente importante, no sólo para establecer algunos criterios en el diseño de una red inalámbrica de sensores que podría en un futuro desplegarse en esta Universidad, sino también, para caracterizar el comportamiento de señales que trabajen con módulos de radio en la banda de 2.4GHz para otro tipo de aplicaciones y en escenarios similares. Finalmente, se aportaría a la comprensión de una temática multidisciplinaria especialmente vigente a nivel mundial.

# 3. OBJETIVOS

## 3.1 Objetivo general

Realizar un estudio de la propagación de ondas de radio en un escenario exterior en la banda ISM 2.4 GHz, empleando el protocolo de comunicaciones ZigBee para el diseño de redes de sensores inalámbricas.

## 3.1 Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre la manera en que se lleva a cabo el análisis experimental y teórico de la propagación de ondas de radio, especialmente para diseño de redes de sensores inalámbricas.
2. Hacer una campaña de medidas de una red inalámbrica con topología punto a punto y tecnología ZigBee en un escenario exterior para determinar la intensidad de la señal recibida.
3. Analizar a través de una simulación de la radio-propagación, la interacción de la señal con los obstáculos presentes en el entorno de estudio seleccionado.
4. Estudiar los datos obtenidos en las campañas de medida y en la simulación para aplicar o desarrollar un modelo que pueda caracterizar la propagación de la señal en el escenario seleccionado.
5. Realizar un análisis sobre la predicción de la pérdida de trayectoria entre los modelos teóricos propuestos y los de terceros para evaluar el desempeño de los resultados obtenidos.

# 4. MARCO TEÓRICO

## 4.1 Wireless Sensors Networks

Una WSN se compone de muchos sensores que monitorean cooperativamente, se comunican no solo entre sí, sino también con una estación base (BS) utilizando sus radios inalámbricos, lo que les permite difundir sus datos adquiridos a sistemas remotos de procesamiento, visualización, análisis y almacenamiento.

El Estándar IEEE 802.15.4, Estándar inalámbrico de redes área personal LR-WPAN, utilizado ampliamente en WSN. Se desarrolló específicamente para comunicaciones en redes de sensores de baja potencia, baja transmisión de datos y mejor duración de batería. (Dargie & Poellabauer, 2010)

Este tipo de redes se pueden organizar de tal forma (topologías) que permitan un óptimo gasto de energía, mejor comunicación entre nodos y cubrimiento; existen entonces: topología estrella: la comunicación entre dispositivos o nodos finales y una puerta de en enlace (Gateway); topología árbol: los nodos enrutadores (routers) se unen de manera jerárquica; y topología de malla: cada dispositivo o nodo final puede interactuar y comunicarse con los otros. (Libelium, 2018)

## 4.2 Propagación de ondas de radio.

En general, una onda electromagnética que se propaga en entornos reales lo hace en medios con diversas características. Dependiendo de las propiedades de estos medios, pueden ocurrir varios mecanismos de propagación en la interfaz entre ambos, que incluyen reflexión, refracción, absorción, dispersión y difracción. (Salous, 2013). A continuación, se presentan los conceptos base que se tuvieron en cuenta a la hora de realizar el proyecto que genera el documento actual, y que se consideran importantes para la lectura del mismo texto.

### 4.2.1 Reflexión.

Las ondas de radio pueden reflejarse cuando entran en contacto con ciertos materiales. Buenos reflectores de estas ondas son las superficies metálicas y superficies de agua. Cuando los efectos de reflexión se complican en ambientes hostiles para la radio propagación como áreas urbanas, aparecen los *multipath effects,* los cuales hay que tener muy presentes en redes inalámbricas. (Butler, 2013, p.14).

Una onda electromagnética que incide en un medio cuyas dimensiones son considerablemente más grandes que su longitud de onda sufre una reflexión, que puede ser especular o difusa según las propiedades del medio. (Salous, 2013)

#### 4.2.1.1 Reflexión difusa / Dispersión

La reflexión difusa se produce cuando la onda incidente incide en una superficie rugosa con dimensiones comparables a la longitud de onda. la velocidad de propagación no es la misma en todas las direcciones. Cuando la superficie se vuelve cada vez más áspera, la onda reflejada se dispersa desde un gran número de posiciones en la superficie, El grado de dispersión depende del ángulo de incidencia y de la rugosidad de la superficie en comparación con la longitud de onda. (Saunders & Aragón, 2007).

Una medida de la rugosidad viene dada por el criterio de Rayleigh, C. (Ecuación.1, figura. 1)

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta i} \qquad (1)$$

Se sugiere que las superficies solo se consideren lisas si la rugosidad es menor que un cuarto del valor indicado por el criterio de Rayleigh (es decir, la diferencia de fase es menor que π/8). Y las superficies de cualquier rugosidad se pueden considerar lisas para Θi=$90^0$, ya que todos los rayos reflejados llegan con el mismo corrimiento de fase.

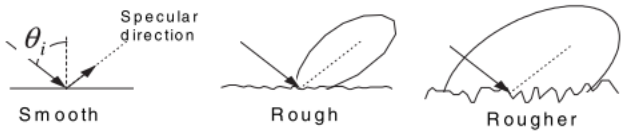



***Figura 1*** *Efecto de las superficies rugosas en la reflexión.* (Saunders & Aragón, 2007)

### 4.2.2 Difracción.

La difracción tiene gran importancia en la comunicación inalámbrica, donde las ondas de radio son difractadas por el borde de un edificio. Dependiendo del tipo de obstáculo, dos fenómenos diferentes son explicados por la teoría de la difracción. Una de ellas es la aparente curvatura de la onda, el segundo es la propagación de las ondas a través de pequeñas aberturas. La difracción se describe en el principio de Huygens-Fresnel, que establece que cada punto en un frente de onda actúa como una fuente puntual para una onda radial secundaria, Las nuevas ondas interfieren mediante la adición constructiva o destructiva, dando lugar a máximos y mínimos a lo largo del camino de propagación. (Salous, 2013).

En la difracción, las ondas entran en la sombra de un obstáculo. Para comprender mejor éste fenómeno se utiliza el concepto de *knife-edge*. (ver figura 2). La relación de las intensidades de la señal sin y con el obstáculo se conoce como la pérdida de difracción. La pérdida de difracción se ve afectada por la geometría de la trayectoria y la frecuencia de operación. (Haslett, 2008).

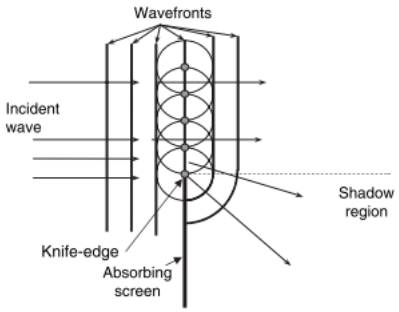



***Figura 2*** *Principio de Huygen's para la difracción knife-edge.* (Saunders & Aragón, 2007)

El principio de Huygen's puede aplicarse de forma matemática para predecir la intensidad de campo real que se difracta por *knife-edge*. El resultado final se puede expresar como una pérdida de propagación, que expresa la reducción en la intensidad de campo debida al proceso de difracción de *knife-edge* en decibelios, en términos de un parámetro de difracción, $v$. Una aproximación para valores $v$ mayores que aproximadamente -0.7 es: (Haslett, 2008)

$$loss = 6.9 + 20\,log\left(\sqrt{(v-0.1)^2+1}\ + v - 0.1\right) dB \quad (2)$$

### 4.2.3 Zonas de Fresnel.

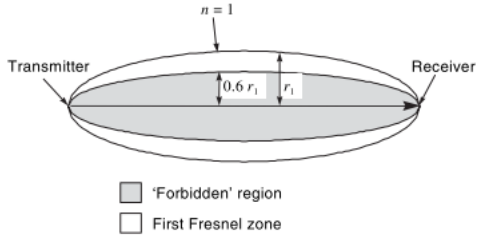



***Figura 3*** *1era Zona de Fresnel y Zona prohibida* (Saunders & Aragón, 2007)

Estas zonas pueden ayudar a resolver problemas por diferencias de fase debido a los fenómenos anteriormente mencionados. Las zonas de Fresnel se enumeran, siendo las impares causantes de interferencia fuera de fase; y las pares, interferencia de fase. Estas zonas se representan con un elipsoide que tiene en sus extremos un transmisor, y un receptor de las ondas. La primera zona es el círculo más concéntrico, este círculo es una sección transversal del elipsoide. Para que haya un buen enlace inalámbrico, hay que asegurar que la primera zona de Fresnel esté al menos 60% libre de obstáculos, ver figura 3). (Acevedo, 2016, p. 147).

### 4.2.4 Absorción.

Las ondas electromagnéticas generalmente se amortiguan si atraviesan un material. Esto depende de su frecuencia y del material. Para las microondas los materiales más

absorbentes son el metal y el agua. Para saber qué tanto afecta el material a la onda se utilizan los coeficientes de absorción. (Acevedo, 2016, p.148)

#### 4.2.5 Interferencia.

En el contexto de redes inalámbricas, se refieren a las perturbaciones causadas por otro tipo de redes y otra fuente de microondas que trabajen a la misma frecuencia. Este es uno de los principales problemas en radio enlaces en áreas urbanas. (Butler, 2013, p.19)

### 4.3 La Teoría Geométrica de la Difracción (GTD) y Teoría Geométrica Uniforme de la Difracción (UTD)

La teoría geométrica de la difracción (*GTD*, por sus siglas en inglés, *Geometrical Theory of Diffraction*) proporciona un método para predecir la intensidad de la señal en situaciones físicas complejas, donde es necesario tener en cuenta la estructura de la obstrucción de una manera más específica, incluida su forma y los materiales con los que está construida. *GTD* es parte de la familia de métodos de "trazado de rayos" para predecir la intensidad de la señal. La primera parte del método de predicción implica identificar los principales 'mecanismos de propagación' por los cuales la onda de radio puede viajar desde el transmisor al receptor (ya sea por difracción, reflexión o una combinación de los dos) y luego evaluar la contribución de cada mecanismo de forma aislada antes de sumarlos para estimar la intensidad de una señal en una ubicación particular. (Haslett, 2008)

La teoría uniforme de difracción (*UTD*, por sus siglas en inglés, *Uniform Theory of Diffraction*) por su parte, identifica una región alrededor del límite de la sombra donde las predicciones de *GTD* son inexactas, y utiliza una predicción más precisa, basada en el método integral de Fresnel, para calcular la intensidad de campo en estas regiones. (Haslett, 2008)

## 4.4. Pérdida de Trayectoria (PL, Path Loss) y Modelos de Propagación

El *Path Loss* entre un par de antenas es la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida. Se debe a la disipación de la potencia irradiada por el transmisor, así como a los efectos del canal de propagación. (Goldsmith, 2005)

Los modelos de propagación se utilizan para obtener información de la red inalámbrica como la cobertura y el rendimiento. Se clasifican en: modelos deterministas, estadísticos-empíricos y semi-deterministas. El algoritmo de Trazado de Rayos (*determinista*) utiliza las teorías geométricas de la propagación para establecer la señal que llega al receptor. Se intenta calcular las contribuciones de los mecanismos de propagación (componentes reflejadas, refractadas y difractadas) que llegan al receptor línea de vista ó *LOS* (por sus siglas en inglés, *Line-of-Sight*). En los modelos *estadísticos* se hacen correcciones entre las medidas generadas en el escenario de aplicación del modelo y los datos obtenidos del modelo; estos modelos dependen de parámetros experimentales y el escenario. Los modelos *semi-deterministas* son adecuados para requerimientos específicos; utilizan la técnica del Trazado de Rayos y distribuciones estadísticas para determinar los principales rayos que llegan en un sitio específico. (Salous, 2013)

Los modelos de propagación a gran escala son muy útiles para las estimaciones de cobertura. Los efectos de propagación a gran escala son una dispersión de la potencia radiada en el canal de propagación y el *shadowing*, que es causado por obstáculos en la trayectoria entre el transmisor y el receptor. Estos modelos brindan información sobre la intensidad media de la señal con variaciones de distancia entre el Tx y Rx. Los modelos a pequeña escala *(fading),* brindan información de las variaciones de la intensidad de la señal en una escala espacial-temporal pequeña. (Goldsmith, 2005).

### 4.4.1 Modelo de propagación en espacio libre.

Es la base para entender los otros modelos. Para hacer uso de él con precisión, se debe evitar obstáculos en la trayectoria entre el Tx y el Rx. Se estima la relación de potencia entre éstos en función de la distancia que los separa *(path-loss)*. (Kurt & Tavli, 2017).

$$PL\ dB\ = 10log_{10}\ \frac{Pt}{Pr} = -10log_{10}\frac{GtGr\ \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (3)$$

Donde $Pt$ (potencia transmitida), $Pr$ (potencia recibida), $GtGr$ las ganancias de la antena transmisora y receptora, $d$ la distancia entre ellas, y $\lambda$ la longitud de onda.

### 4.4.2. Log Distance-Model

La potencia media de la señal recibida exhibe una disminución logarítmica con la distancia T-R. Combina los resultados teóricos y las mediciones de campo, En su forma general, en dB se expresa como: (Kurt & Tavli, 2017)

$$PL\ (avg) = PL\ (d_0\ ) + 10nlog_{10}(\frac{d}{d_0})\ (4)$$

Donde, *n* es el exponente de pérdida de trayectoria y $PL\ (d_0\ )$ es la pérdida trayectoria a una distancia de referencia.

### 4.4.3 Log-Normal Shadowing

Este modelo captura la caída de potencia en función de la distancia como el Log Distance-Model junto con la atenuación aleatoria no determinista sobre esta pérdida de ruta por el *shadowing. En dB, se expresa como:*

$$PL\ (avg) = PL\ (d_0\ ) + 10nlog_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (5\ )$$

Donde $X_\sigma$ es una variable aleatoria distribuida gaussiana de media cero con desviación estándar *σ* (en dB).

## 4.5 Trazado Inteligente de Rayos (IRT)

En las técnicas ópticas de rayos diferentes rayos emitidos por la antena transmisora están sujetos a encontrarse con múltiples objetos en el entorno que producen copias reflejadas, difractadas o dispersas de la señal transmitida. Estas técnicas, se aproximan a la propagación de las ondas electromagnéticas representando los frentes de onda como partículas simples y se utiliza la *GTD (UTD)* o los modelos empíricos de la difracción para realizar los análisis.(Goldsmith, 2005).

El trazado de rayos consume gran cantidad de tiempo de cálculo, debido a que se determinan todos los rayos posibles y se calculan muchos reflejos y difracciones. Este algoritmo determina casi los mismos rayos para los puntos de predicción vecinos y para cada uno de estos puntos son necesarios los mismos cálculos. El Modelo *IRT* realiza un preprocesamiento de la base de datos que permite reducir este tiempo. Este preprocesamiento consiste en la reducción de las operaciones idénticas, donde las combinaciones de objetos pueden restringirse a las combinaciones donde dos objetos vecinos pueden verse entre sí. (Terhi Rautiainen, 2002).

Después de esto, las condiciones de visibilidad entre estos diferentes elementos (posibles rayos) se determinan y almacenan en un archivo. El resultado de este preprocesamiento se puede representar en la forma de un "árbol de visibilidad" (ver referencia Terhi Rautiainen, 2002). Para una ubicación de transmisor diferente, solo se deben calcular nuevamente las ramas más altas de este árbol, es decir, determinar qué elementos están en línea de visión con respecto al transmisor.

# 5. ESTADO DEL ARTE

Así como han evolucionado las comunicaciones inalámbricas, el mercado mundial de las WSN y sus diversas aplicaciones tiene un gran crecimiento; y, por ende, el interés en indagar sobre ellas. Un resumen de la búsqueda bibliográfica para este trabajo, se presenta continuación:

Se consultaron investigaciones realizadas es escenarios exteriores (Alsayyari, Kostanic, & Otero, 2014; Azpilicueta et al., 2014; Lara y Merino, 2017; Olasupo, Alsayyari, Otero, Olasupo, & Kostanic, 2017; Payal, Rai, & Reddy, 2015; Sales de, Rodriguez, Da Silva, & Silva, 2015); y en un escenario interior (Machedon-Pisu, 2014). Se revisaron estudios de diseño de WSN para monitorización en espacios exteriores (Cama-Pinto et al., 2016; Ramírez, Buitrago, & Marín, 2014). También, se examinaron: un estudio de revisión de diferentes modelos de pérdida de trayectoria con su comparación (Kurt & Tavli, 2017); y estudios de revisión de modelado del canal inalámbrico a través del Trazado de Rayos (Navarro, Guevara, & Gómez, 2014) y (Terhi Rautiainen, 2002). En (Fakhri, Gharghan, & Mohammed, 2018) realizaron el modelado para WSN con *Log-Normal Shadowing Model*. Estudios con otras aplicaciones de la medida de la intensidad de señal recibida: para localización (Tarrío, 2011); para detección de personas (Lin, Seah, & Li, 2011) y (Horvat, Sostaric, & Žagar, 2015).

En las investigaciones consultadas se proponen diferentes maneras de análisis de propagación de ondas de radio para WSN. Así mismo, dentro de estos estudios, se proponen varios tipos de mediciones y herramientas de análisis para estimar la cobertura de los dispositivos de radio utilizados en estas redes. Se sugieren modelos de propagación empíricos y también simulaciones basadas en el escenario real para estimar la intensidad de la señal entre el transmisor y el receptor.

## 5.1 Métricas para caracterizar el canal

Para caracterizar el canal del escenario, en (Azpilicueta et al., 2014) por ejemplo, se realizó una simulación con la técnica de lanzamiento de rayos *3D Ray Launching* basado en la Óptica Geométrica *(GO)* y la *GTD* teniendo en cuenta fenómenos electromagnéticos como la reflexión, la refracción y la difracción. Con los resultados de la simulación se estimó la potencia recibida de un dispositivo con la antena transmisora a 2.4GHz ubicada en un punto fijo para diferentes alturas y para dos puntos diferentes de la antena transmisora para la misma altura. También realizaron un perfil de retardo de potencia (PDP*)* y la dispersión de retardo para estudiar la influencia de la propagación *multipath (multitrayecto)* y los efectos de la dispersión. Además, se hizo un análisis de radio-planificación en el cual se midió el nivel de potencia recibido y la capacidad del canal. En la configuración experimental, se realizaron dos campañas de medida, en la primera se midió el nivel de potencia recibido para diferentes posiciones del receptor dentro de la vegetación, y en la segunda se obtuvo el porcentaje de paquetes que se pierden o no llegan correctamente al receptor (PER*)*. Así, con esta configuración se validaron los resultados de la simulación.

Respecto al Trazado de Rayos, utilizado en el estudio mencionado, en (Navarro et al., 2014) se hace una revisión de esta técnica. Los autores concluyen a través de las investigaciones revisadas que es una técnica válida como alternativa a los modelos de propagación empíricos. “La caracterización de los dispersores (i.e., edificaciones, árboles, vehículos, etc.), mediante sus coeficientes de permitividad y conductividad, mejoran la precisión de los resultados, pero también exigen un procesamiento más arduo.” (Navarro et al., 2014, p. 88)

En la mayoría de los estudios consultados se utiliza el parámetro *RSSI* como métrica para modelar las pérdidas de propagación. En (Lara & Merino, 2017) realizan la caracterización del canal inalámbrico haciendo el despliegue de una red punto a punto, en la que se varía la distancia entre un dispositivo final y un punto coordinador, así como también, las alturas entre ellos. El primero envía paquetes con información aleatoria a otro dispositivo, en el cual sólo se tiene en cuenta el valor *RSSI*; este parámetro se considera para obtener el modelo de propagación haciendo interpolaciones de estas

mediciones y ajustando las curvas resultantes al modelo matemático de pérdida de trayectoria *Log Distance Model.* Particularmente en este estudio se obtuvo una discontinuidad en el modelo de propagación, en donde a medida que aumenta la altura entre los dispositivos, dicha discontinuidad se aproxima al transmisor hasta cierta distancia límite a partir de la cual la altura de los dispositivos deja de influir.

Payal et al. (2015) analizan algunos modelos de propagación de radio y evalúan experimentalmente dos de ellos: *Free Space Path Loss model (FSPL)* y *Log-distance model*; el escenario seleccionado para la realización de las pruebas de campo fue un campus universitario, el cual se encuentra rodeado de edificios de seis plantas. Se tomaron muestras del valor *LQI (Link Quality Indicador)* variando la distancia entre un nodo transmisor y el receptor. El parámetro *RSSI* se obtuvo haciendo uso del *LQI*, haciendo uso de una expresión matemática y se utilizó para medir la pérdida de trayectoria. Se concluyó que el *Log-distance model* se puede usar en entornos exteriores con *LOS*. De igual manera en los análisis experimentales en (Alsayyari et al., 2014; Machedon-Pisu, 2014; Sales de et al., 2015) se decantan en su trabajo por hacer uso de los valores *RSSI* correlacionados con los modelos de propagación, para estimar las pérdidas de potencia. Sales et al. (2015) tomaron 14 puntos de medición en el bosque con 100 muestras de *RSSI* en cada punto; y en un campo agrícola se tomaron 45 puntos de medición con 100 muestras *RSSI* en cada punto. A partir de diferentes análisis estadísticos, estas muestras se aproximaron a varios modelos matemáticos consultados. Los autores reportan en su artículo que el modelo que mejor resultado arrojó para el escenario seleccionado fue el modelo *Log-Distance Shadowing*. En (Alsayyari et al., 2014) se recogieron gran cantidad de muestras: 128 puntos medidos y un promedio de 300 muestras de *RSSI* a partir de nodos de sensores; los datos se convirtieron en los valores de pérdida de trayectoria gracias al ajuste de los parámetros del mismo modelo *Log-Normal Shadowing.*

Un análisis de radio-propagación en un escenario *indoor* para analizar los fenómenos que afectan la señal en una WSN se presenta en el estudio de (Machedon-Pisu, 2014), en donde además de medir el *RSSI* como indicador de calidad de enlace, se mide el PER

como se hace en el trabajo de (Azpilicueta et al., 2014). Sin embargo, (Olasupo et al., 2017), analizan los datos de su estudio con otras métricas diferentes al *RSSI*: SNR, BER y la relación de pérdida de paquetes (*PLR*). Los autores consideran que los modelos establecidos con parámetros como estos son más confiables que los formados sin tener en cuenta este tipo de métricas. Aquí los autores proponen modelos de pérdida de trayectoria obtenidos de manera empírica para el despliegue de sensores inalámbricos en ocho escenarios diferentes. Estos se comparan con modelos teóricos, y concluyen que estos son inadecuados para predecir la pérdida de trayectoria en los escenarios seleccionados.

En (Fakhri et al., 2018), utilizaron las mediciones del indicador de *RSSI* en ambientes exteriores e interiores para la pérdida de la trayectoria basada en el *Log Normal Shadowing* normal de registro (LNSM). Además, se investigaron las variaciones de los valores *RSSI* recibidos y la desviación estándar para estos valores, para las mediciones utilizaron el módulo de radio XBee S2C, el cual también se utiliza en el presente trabajo.

### 5.2 WSN para monitorización en ambientes exteriores

En cuanto a los casos revisados que realizan un diseño de una WSN para monitorización en un ambiente exterior, se encuentra que en (Cama-Pinto et al., 2016), se llevó a cabo tres pruebas de campo para evaluar el equipo de radio-comunicación. : “Prueba Indoor” (ambiente urbano con obstáculos), “Prueba Urban” (sin obstáculos, con *LOS*, parqueadero, edificios y autos, se hizo para simular los efectos de *Shadowing* sobre la transmisión inalámbrica); y “Prueba Rural” (a las afueras ciudad, en la carretera). Para las tres pruebas se tomaron medidas de *RSSI*, pérdida de paquetes, errores de transmisión para el módulo de radio, y de éxito de la transmisión. Estos valores se compararon con los arrojados por el software libre *Radio-Mobile*. Se estimó el perfil de un enlace entre los nodos de la red diseñada. En el estudio de Ramírez et al. (2014), se llevó a cabo una campaña de medidas de potencia con la cual se identificó el mínimo de potencia en el receptor para diferentes distancias y condiciones de propagación. Se

compararon estas estimaciones con las realizadas con el software *Radio Mobile* para determinar criterios de diseño para la red de sensores como por ejemplo la ganancia de las antenas.

Considerando las propiedades del entorno, un buen análisis a este respecto lo hacen Azpilicueta et al. (2014), en donde se realizó un modelo simulado de la vegetación (no homogénea) que tuvo en cuenta propiedades como: la constante dieléctrica, la conductividad de la madera y el follaje del árbol de fresno; además, la variabilidad de estas con la temperatura y humedad. Con esto, los autores logran mostrar la gran importancia de la morfología y topología del escenario en la radio-propagación.

En otro estudio al aire libre y sin obstrucciones (Alsayyari et al., 2014) se calcula el *multipath fading* y el coeficiente *shadowing* para una superficie de concreto a través de la ecuación *log-normal shadowing,* Se obtiene además el valor medio las desviaciones estándar de las mediciones recopiladas; este se compara con los obtenidos en otros dos estudios: uno en entorno de pasto largo y el otro en árbol disperso, de los cuales, este último tiene el valor más alto debido a la presencia de obstrucciones y el *multipath fading* que está presente por las reflexiones y la dispersión causadas por los árboles y el follaje. En (Olasupo et al., 2017) también se utiliza el modelo de pérdida de trayectoria *log-distance* con la misma ecuación, considerando el efecto *multipath* y *shadowing* a través de la misma variable aleatoria. Aquí, se proponen modelos de pérdida de trayectoria empíricos a partir de campañas de medidas con nodos sensores desplegados en el suelo en diferentes entornos: arena, árboles, concreto, hierba natural alta y corta, estacionamientos interiores y exteriores *LOS.*

En este estudio (Lin et al., 2011) calculan la fluctuación entre el *RSSI* de los paquetes recibidos en un receptor durante un período de tiempo para la detección y conteo de personas. Igualmente, en (Horvat et al., 2015) también realizaron una serie de mediciones con presencia humana en movimiento y concluyeron que si se induce a este tipo de interferencia cerca del nodo, el valor de *RSSI* tiende a disminuir.

Además, para definir los parámetros de la simulación con el *IRT*, se consideraron las propiedades del ladrillo dentro del escenario, como permitividad, permeabilidad, conductividad y el grosor en el rango de frecuencia cercano de operación bajo análisis. Para esto se hizo una importante búsqueda bibliográfica sobre los parámetros eléctricos del ladrillo alrededor de la banda de frecuencia bajo estudio, (Rudd, Craig, Ganley, & Hartless, 2014), (Ahmed, Alvarez, & Masa, 2013), (Safaai-Jazi, Riad, Muqaibel, & Bayram, 2002), (Fügen, Member, Maurer, Kayser, & Wiesbeck, 2006), (Greenberg & Klodzh, 2015),

Una extensa revisión y comparación de los modelos de pérdida de trayectoria verificados experimentalmente para las WSN en escenarios exteriores lo realizan Kurt & Tavli, (2017). En dicho trabajo se discute la importancia de utilizar correctamente los modelos de propagación para WSN, pues los autores consideran que son usados de manera errónea por la falta de conocimiento de estos.

### 5.3. WSN y Protocolo ZigBee

En cuanto a la tecnología utilizada en las WSN, se encontró que la tecnología ZigBee es la más usada. Se basa en el estándar IEEE 802.15.4 y opera en la banda abierta ISM 2.4GHz sin necesidad de licencia. Exceptuando (Alsayyari et al., 2014) el cual utiliza para los experimentos la banda 1925MHz por considerar que la banda 2.4GHz es bastante ruidosa, los demás estudios consultados en donde se realizan experimentos de radio-propagación, seleccionaron el protocolo ZigBee con módulo de radio Xbee de la compañía Digi; (Machedon-Pisu, 2014; Payal et al., 2015) utilizan otros módulos de radio. Ramírez et al. (2014) presenta la factibilidad de usar tecnología ZigBee para el diseño de WSN de larga distancia usando un *bridge* inalámbrico (XBee XTender Wireless Bridge) manteniendo el bajo consumo de potencia. Los autores también mencionan la importancia de tener en cuenta los efectos de interferencia causados por otras redes como WiFi, y que estas pueden coexistir con la planificación adecuada. Para esto, sugieren una solución basada en el mismo protocolo, el cual hace un escaneo del canal con menor interferencia y lo asigna. Otro estudio (Machedon-Pisu, 2014) en donde se

evalúa el desempeño de las *MicaZ Motes* basadas en protocolo ZigBee; aquí se analiza la influencia de radio interferencia sobre las WSN en la banda 2.4GHz con otras tecnologías como WiFi, Bluetooth y hornos microondas. Los autores llegaron a las siguientes conclusiones: para la interferencia con Bluetooth, el canal ZigBee elegido no es importante debido a una frecuencia de 1MHz entre dos canales vecinos de Bluetooth; en cambio, dentro de la banda WiFi con alta velocidad de datos, ZigBee debería evitar las transmisiones.

La Tesis de (Tarrío, 2011) se centra en la localización basada en medidas de potencia de señal recibida. En localización el objetivo es conseguir una determinada precisión en las medidas de los parámetros de la señal (la potencia de señal recibida, por ejemplo) que se utilizarán para calcular la posición de los nodos. Aquí se llevaron a cabo algunas pruebas experimentales para evaluar la precisión y la eficiencia energética del algoritmo propuesto en un ambiente interior real utilizando una red de sensores basada en el estándar IEEE 802.15.4.

# 6. MATERIALES Y MÉTODO

## 6.1 Plataforma y captura de datos

### 6.1.1 Puesta a punto de la plataforma

- 2 Módulos radio XBee ZB (S2C) TH de Digi International Inc. La programación se hizo con la aplicación X-CTU; Las características de los módulos se observan en la tabla 1. (Digi-International, 2018)
- 2 tarjetas Waspmote V1.2 de Libelium con batería programadas con el software Waspmote-Pro-IDE. (Ver figura 1). (Libelium, 2018)

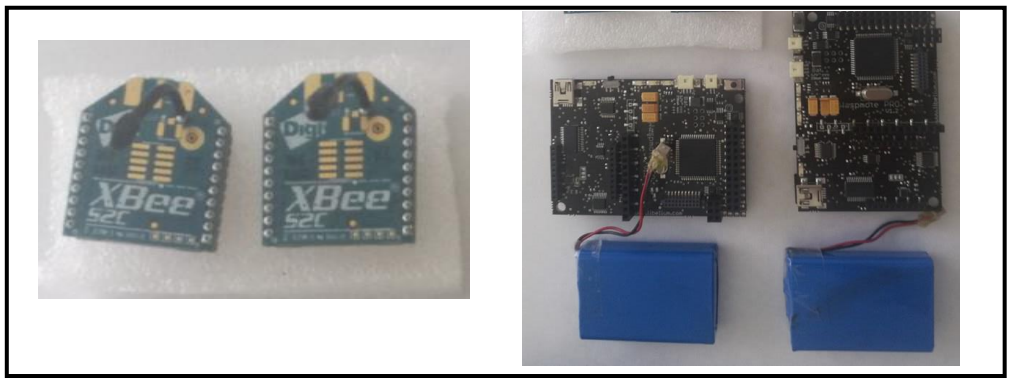



***Figura 4*** *(izq): Módulos Xbee S2C, (der.): Tarjetas Libelium con batería*

***Tabla 1*** *Características del módulo XBee ZB (S2C).* (Digi-International, 2018)

| Características | XBee ZB (S2C) TH |
|---|---|
| Distancia Indoor/urban | Hasta 60m |
| Distancia RF Outdoor LOS | Hasta 1200m |
| Potencia transmisión | (+8 dBm) Modo Boots<br>(+5 dBm) Modo Normal |
| Sensibilidad recepción | (-102 dBm) Modo Boots<br>(-100 dBm) Modo Normal |
| Banda de frecuencia | ISM 2.4GHz-2.5GHz |
| Tasa datos RF | 250Kbps |
| Topologías de red soportadas | Point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer, and DigiMesh |
| Canales | 16 canales (11-26) con DSSS |
| Antena | Monopolo Whip (Ganancia 1.5 dBi) |

### 6.1.2 Configuración de los módulos XBee

Se programaron dos módulos, uno para enviar paquetes, llamado router y el otro para recibir, llamado coordinador. A continuación, se observa una imagen de la interfaz de la aplicación X-CTU con algunas configuraciones importantes. En este caso, del módulo XBee (router). La potencia de transmisión se configuró como la máxima del módulo (+8dBm).

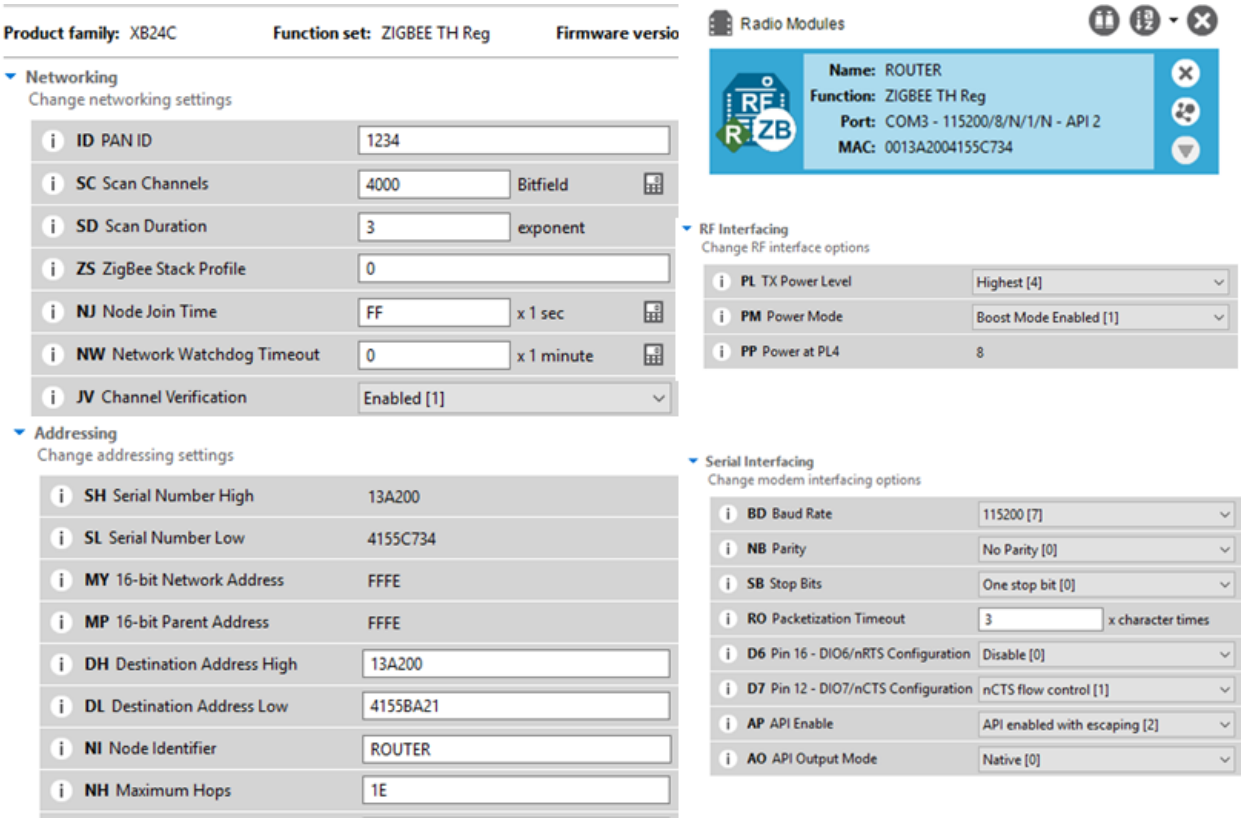



***Figura 5*** *Programación del módulo XBee como Router en la interfaz X-CTU.*

### 6.1.3 Programación de las tarjetas Waspmote

Se realizó la programación del envío de una trama de 84 bits cada 2000ms y tiempo de espera de recibido de 4000ms con un *baud rate* de 115200 (igual al ya programado en X-CTU). A continuación, se observan una imagen de la interfaz de Waspmote-Pro-IDE

para el envío de paquetes del router al coordinador y otra con la trama elaborada que recibida por el coordinador con el valor *RSSI* (dBm).

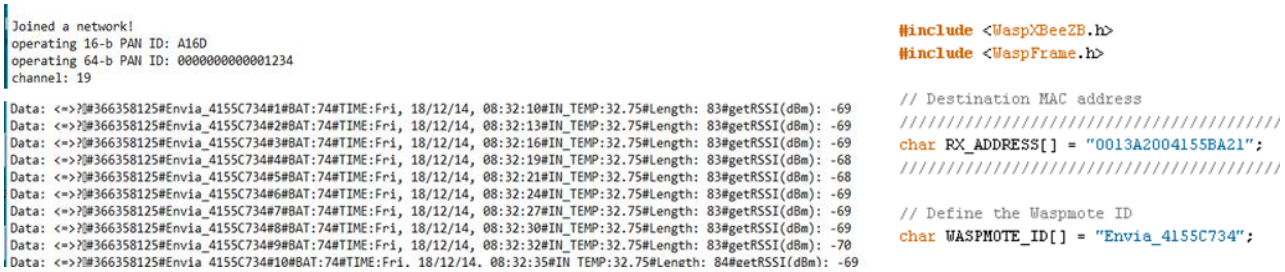



***Figura 6*** *Interfaz Waspmote-Pro-IDE trama recibida por el coordinador.*

### 6.1.4 Campañas de captura de datos

Para el estudio experimental se utilizaron dos dispositivos (transmisor y receptor), cada uno conformado por un módulo de radio XBee acoplado a una tarjeta Waspmote V1.2. dentro de una cubierta y sujetos a un soporte de 2m de altura, (Figura 7). Uno de los dispositivos se programó para enviar paquetes de datos constantemente y el otro para obtener el valor *RSSI* del último paquete recibido. El receptor entonces se conectó a un PC para almacenar los valores obtenidos.

La toma de datos se hizo entre los dispositivos Tx y Rx se realizó en dos escenarios del campus de la Universidad EAFIT, los cuales llamamos: *Plazoleta-estudiante* y *Biblioteca-atrás.* Para cada escenario se realizaron dos tomas de datos (en días diferentes). En el escenario *Biblioteca-atrás* se registraron valores *RSSI* en 34 puntos entre 1 y 90 m, de los cuales los 20 primeros (1 m a 20 m) se registraron cada un metro, y desde 25 m a 90 m cada cinco metros. Para el escenario *Plazoleta-estudiante* se registraron valores de *RSSI* en 28 puntos fijos entre 1 y 60 m; en ambos casos, se almacenaron 100 muestras del valor *RSSI* en cada uno de los puntos.

El escenario *Biblioteca-atrás* no es completamente libre de obstáculos, presenta variados objetos alrededor y en medio de los nodos, lo que podría afectar el radioenlace. En el

escenario *Plazoleta-estudiante* la transmisión se realiza sin obstáculos y *LOS* entre los nodos en todas las pruebas, pero con objetos circundantes. (Ver figura 7 y 8).

***Figura 7*** *Montaje Transmisor-Receptor en escenario Plazoleta-estudiante*

***Figura 8*** *Montaje Transmisor-Receptor en escenario Biblioteca-atrás*

## 6.2 Preparación de las simulaciones

En esta sección se muestran los resultados las simulaciones generadas con el WinProp Software Package. La pérdida de trayectoria de los modelos obtenidos de las mediciones se compara con las predicciones realizadas con dos modelos del software: One Slope Model (Modified Free Space Model) y el 3D *IRT*, en este caso se eligió para la predicción de la pérdida de trayectoria a lo largo del camino los coeficientes de Fresnel y la *UTD*; este modelo utiliza cuatro parámetros físicos del material permitividad, permeabilidad, conductividad y grosor, con esto se simula el ladrillo a la banda frecuencia cercana a 2400MHz. También se probaron diferentes configuraciones para definir el número de interacciones: Máximas reflexiones, difracciones y dispersiones. En cuanto a la configuración de antena, las simulaciones se generaron de dos formas: con la definición de los parámetros de una antena omnidireccional y con un patrón 3D generado con uno de los paquetes del software. En las tablas 2 y 3se resumen los parámetros usados en la simulación.

### 6.2.1 Preparación Base de datos

La base de datos que se utilizó para la simulación se obtuvo de modelos 3D representativos de los escenarios *Biblioteca-atrás Plazoleta-estudiante* los cuales se encuentran disponibles para descargar y fueron elaborados con la aplicación SketchUP (Patiño, 2014). Estos modelos se importaron en WallMan (una de las aplicaciones de WinProp) en formato .dwg (AutoCAD® drawing databases) y se convirtieron a una base de tipo WinProp en donde se realizaron unas simplificaciones en los objetos para evitar errores. Ver figura a continuación.

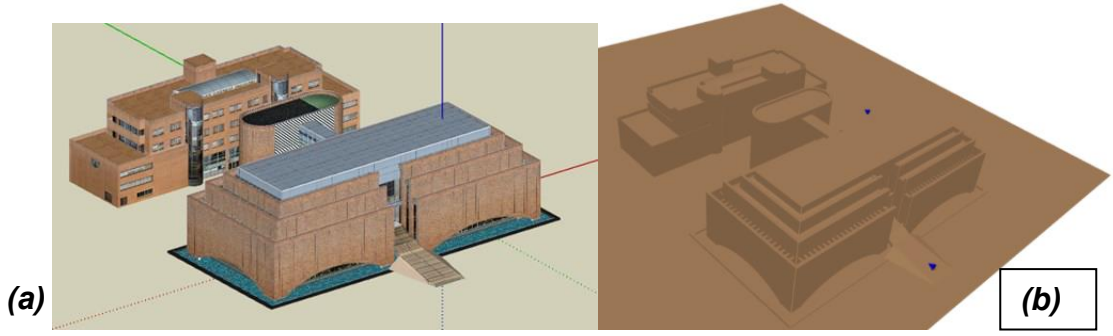


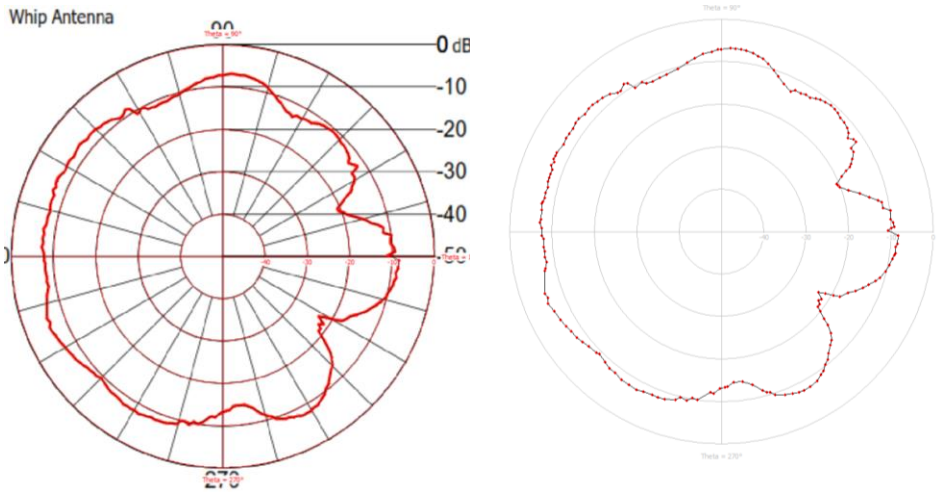

***Figura 9*** *Base de datos para simulación: (a) Modelos SketchUP 3D Bloque 32 y Bloque 38. (b) Base datos WinProp*

El modelo de Trazado Inteligente de Rayos requiere un preprocesamiento de la base de datos para optimizar el tiempo de cálculo, como se explicó en la sección 4.4 del marco teórico. En el preprocesamiento, los datos del edificio se preparan para la predicción. También se corrigen los errores en la base de datos, (AWE-Communications, 2006b).

### 6.2.2 Generación patrón antena 3D

La creación del patrón 3D de la antena, se realizó con Aman, una de las aplicaciones del paquete de simulación usando una representación gráfica del patrón de radiación aproximado de la antena whip proporcionada por el fabricante Digi.

La gráfica del patrón proporcionada se guardó en formato * .bmp (mapa de bits estándar). Este mapa de bits se importó a Aman y el patrón se puede dibujar sobre el mapa de bits después de ajustar el sistema de coordenadas de Aman al sistema del mapa de bits escaneado, (AWE-Communications, 2006a). Ver figuras, a continuación.




***(a)*** ***(b)***

***Figura 10*** *Ajuste de la representación gráfica del patrón de antena en AMan ;(b) Dibujo de puntos del patrón en AMan;*

Una vez definidos los puntos, se interpoló usando el algoritmo Interpolación bilineal ponderada (WBI), (AWE-Communications, 2006a). Para aumentar la precisión donde no hubo puntos definidos en la gráfica, se interpoló el patrón entre los píxeles, se escogió un incremento del ángulo de 1 grado.

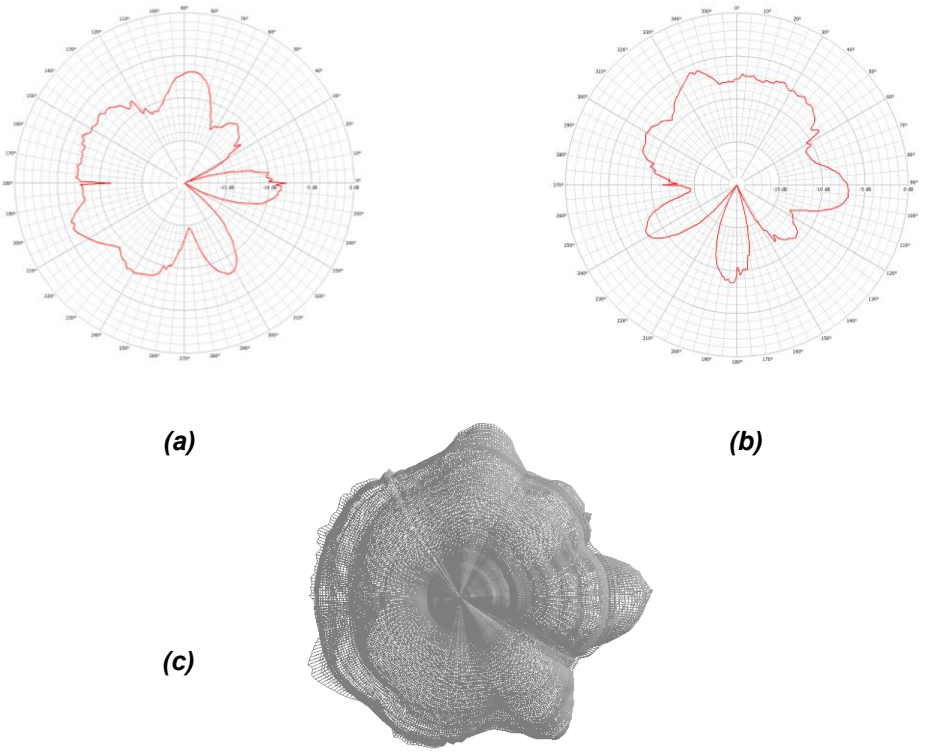



***Figura 11*** *Patrón antena interpolado antena whip. (a) Plano horizontal; (b) Plano vertical; (c) En modo 3D*

### 6.2.3. Parámetros Simulación

One Slope Model (Modified Free Space Model) y 3D *IRT* fueron los dos modelos de ProMan (paquete de software de propagación dentro de WinProp) que se utilizaron para la simulación. El modelo de una sola pendiente o de espacio libre modificado analiza la situación de *LOS / NLOS* en el plano vertical entre el transmisor y cada punto receptor, (por sus siglas en inglés, *No Line-of-Sight*); este se aplicó a los dos escenarios en este estudio. En este modelo se consideran diferentes exponentes y compensaciones de pérdida de trayectoria para *LOS / NLOS*, (AWE Communications GMBH, 2014). Para este caso, se calibró el modelo utilizando los exponentes de pérdida obtenidos de las mediciones y para la situación *NLOS* se utilizó un exponente de 3, según la teoría indica en estas situaciones, (Goldsmith, 2005), (Rappaport, 2001). Esto se resume en la tabla a continuación.

En cuanto a la configuración de antena, las simulaciones se generaron de dos formas: con el patrón 3D generado como se explicó en la sección anterior y con la definición de los parámetros en ProMan de una antena omnidireccional con la altura (2m), la potencia (8dBm) y la frecuencia (2400MHz) en concordancia con el módulo de radio utilizado en las tomas de datos.

***Tabla 2*** *Resumen parámetros simulación One Slope Model (Modified Free Space Model)*

| **Parámetros Simulación WinProp- One Slope Model (Modified Free Space Model)** | | |
|---|---|---|
| Resolución de los resultados de predicción:1m | | |
| **Antena Tx (2m): Localización Plazoleta-Estudiante** | | |
| **Parámetro** | **Antena WinProp Iso** | **Antena patrón 3D** |
| n (LOS) | 1,77 | 1,77 |
| n (NLOS) | 3 | 3 |
| **Antena Tx: Localización Biblioteca-atrás** | | |
| **Parámetro** | **Antena WinProp Iso** | **Antena patrón 3D** |
| n (LOS) | 2,31 | 2,31 |
| n (NLOS) | 3 | 3 |

El modelo *IRT* se basa en la Óptica Geométrica y la *UTD*, teniendo en cuenta fenómenos electromagnéticos como la reflexión, la refracción y la difracción. Se probaron diferentes configuraciones para definir el número de interacciones (Máximas reflexiones, difracciones y dispersiones). Además, se consideraron las propiedades del ladrillo dentro del escenario, como permitividad, permeabilidad, conductividad y el grosor en el rango de frecuencia cercano de operación bajo análisis. Para esto se hizo una importante búsqueda bibliográfica sobre los parámetros eléctricos del ladrillo alrededor de la banda de frecuencia bajo estudio, como se mencionó en la sección 5. Teniendo en cuenta esto, los parámetros elegidos para aplicar el *IRT* se resumen en la siguiente tabla.

***Tabla 3*** *Resumen parámetros simulación 3D Ray Tracing (IRT)*

| **Parámetros Simulación WinProp- IRT (Trazado Inteligente de Rayos)** | |
|---|---|
| Resolución de los resultados de predicción:1m | |
| **Antena Tx (2m): Localización Biblioteca-atrás** | |

| Parámetro | Antena WinProp Iso / Patrón 3D |
|---|---|
| Ladrillo | **20cm** |
| Dielectricidad (Relativo) | **5,8** |
| Permeabilidad (Relativo) | **1** |
| Conductividad (Relativo) | **0,001 S/m** |
| Pérdidas Dispersión (Svv=Shh/Svh=Shv) | **0,4/0,126** |
| Cálculo de los niveles de señal en el camino: Fresnel Coeficientes (Transmisión, Reflexión) y GTU/UDT(Difracción) | |
| Máx. Reflexiones Y Difracciones Y Dispersión | **3** |
| Máx. Transmisiones | **0** |
| Máx. Reflexiones | **3** |
| Máx. Difracciones | **2** |
| Máx. Dispersión | **1** |

# 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este análisis inicia con la realización de gráficas entre los valores *RSSI* registrados y la distancia entre el nodo transmisor y receptor, esto con el fin de observar de forma general el comportamiento estas dos cantidades para cada escenario; posteriormente, se promediaron los 100 valores de *RSSI* registrados en cada distancia; estos valores se ajustaron a una regresión lineal obteniendo una ecuación para cada toma de datos (1 y 2, como se explicó en la sección 6.1.4) en cada uno de los escenarios, estas ecuaciones se correlacionan con el *Log-Distance Path-Loss Model*, y de esta forma se obtener el *Path Loss* para cada experiencia; después, se promedian los valores de toma de datos 1 y 2 y se obtiene la ecuación *Path Loss* final para cada escenario, a las cuales se les adicionó el efecto *Shadowing* y se obtuvo el modelo final de propagación (*Log-Normal Shadowing Model*) con los parámetros que revelan la caída de potencia en función de la distancia. Los modelos obtenidos se comparan con modelos teóricos. Además, se calcula la desviación estándar de los valores *RSSI*, un análisis estadístico y se presentan los paquetes perdidos en la transmisión.

## 7.1 Análisis previos a la obtención del Modelo

### 7.1.1 Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Biblioteca-atrás

Las figuras 12 y 13 corresponden al escenario: *Biblioteca-atrás Universidad Eafit*. Los datos de la figura 12 corresponden a la *toma de datos 1* y los datos de la figura 13 corresponden a la *toma de datos 2*, (ver sección 6.1.4 del apartado metodología). Vale recordar que la altura para ambos módulos transmisor y receptor fue 2m, la potencia de transmisión fue la misma en ambas experiencias (+8 dBm), y los módulos trabajaron en el canal 19.

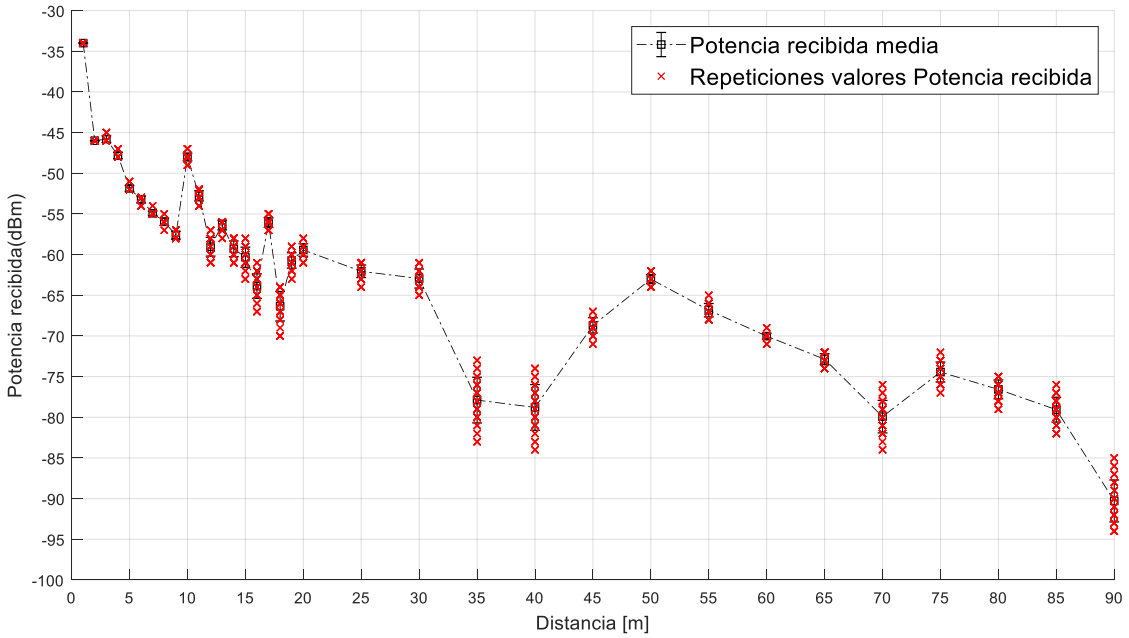



***Figura 12*** *Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Biblioteca-atrás toma de datos 1*

En las figuras 12 y 13, el eje *x* muestra la distancia en metros, tiene 34 puntos de 1 a 90m, de los cuales los 20 primeros (1m a 20m) se registraron cada metro y desde 25m a 90m cada 5m. El eje *y* muestra el nivel de señal recibido a través de los valores *RSSI* en dBm (decibelio mili vatio); los cuales, se registraron 100 muestras en cada punto. La marca roja y la caja con línea punteada representa los diferentes valores de las potencias obtenidas para cada distancia y su valor medio.

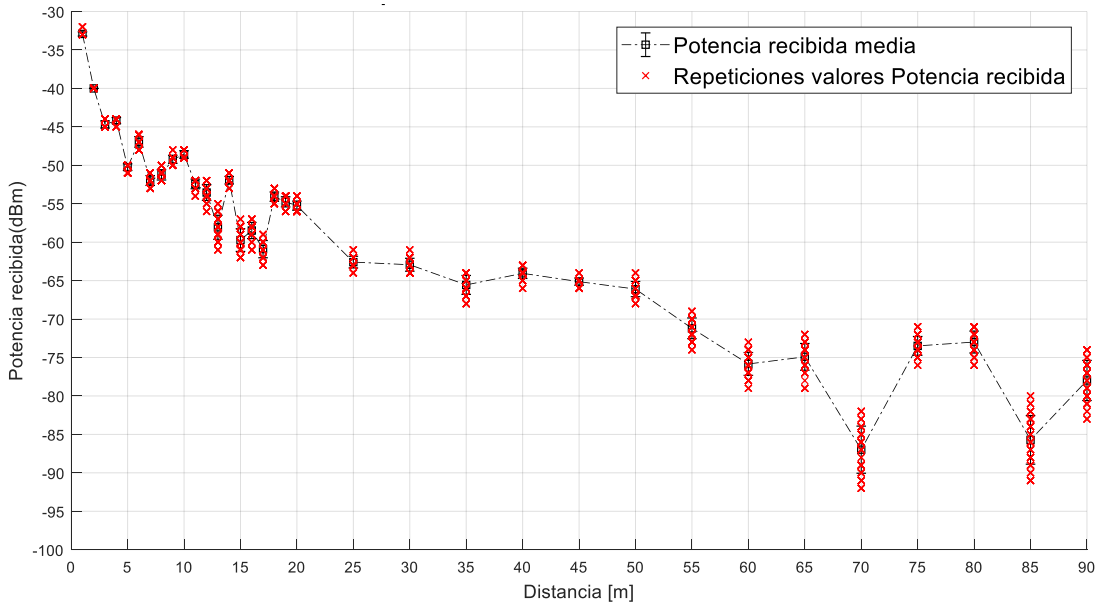



***Figura 13*** *Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Biblioteca-atrás toma de datos 2*

### 7.1.2 Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Plazoleta-estudiante

Las figuras 14 y 15 corresponden al escenario: *Plazoleta-estudiante Universidad Eafit.* Los datos de la figura 14 corresponden a la *toma de datos 1* y los datos de la figura 15 corresponden a la *toma de datos 2*; esta experiencia presenta las mismas características en la toma de datos que el escenario anterior, pero en este caso se registraron valores de *RSSI* para 28 puntos de 1 a 60m. Los módulos trabajaron con la misma potencia (+8 dBm) y canal 19 en las diferentes tomas de datos del experimento.

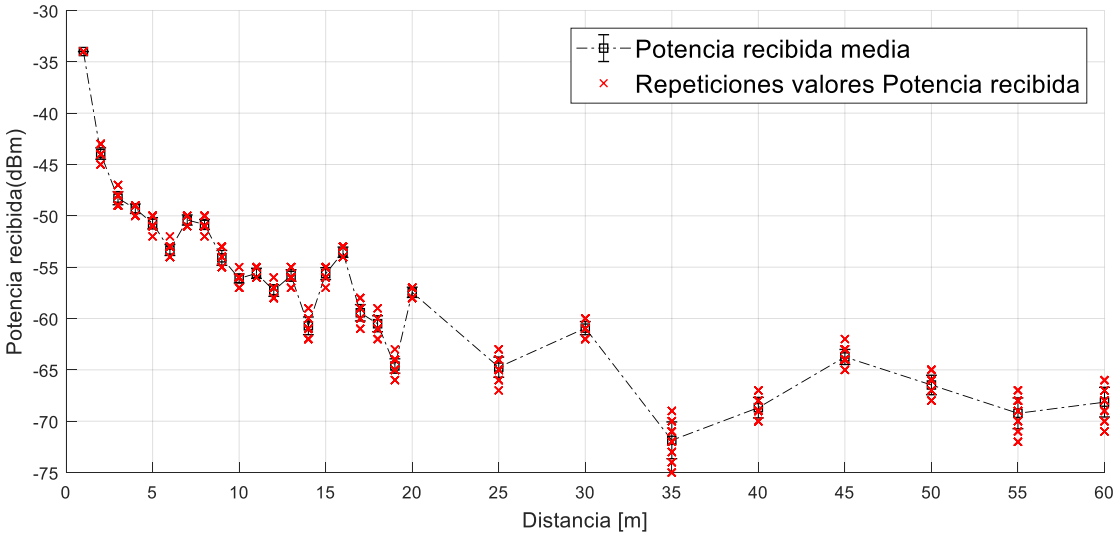



***Figura 14*** *Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Plazoleta-estudiante toma de datos 1*

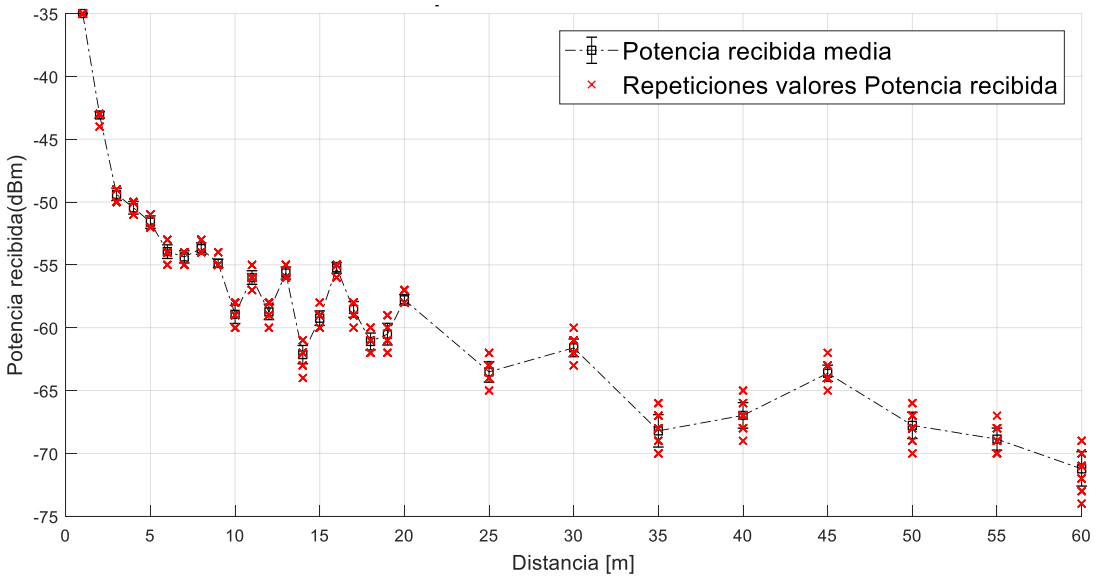



***Figura 15*** *Valores RSSI para cada distancia - Escenario: Plazoleta-estudiante toma de datos 2*

Las figuras 14 y 15 muestran el valor *RSSI* en cada punto de distancia para cada toma de muestras y escenarios diferentes. Cabe recordar que, el escenario *Biblioteca-atrás* no es completamente libre de obstáculos, presenta muchos objetos alrededor y en medio del nodo transmisor y receptor que podrían afectar el radioenlace. Y en el escenario *Plazoleta-estudiante* la transmisión se realiza sin obstáculos fijos entre Tx y Rx todo el tiempo, pero tiene objetos circundantes.

En las medidas anteriores se visualiza la complejidad de la propagación de la señal en ambos escenarios, aunque la potencia recibida decrece con la distancia entre transmisor y receptor, no estrictamente sigue a una atenuación suave y específicamente la caída es más rápida en distancias cortas, especialmente en los dos primeros metros. Esto también puede verse incluso en experimentos con cámara anecoica presentados por (Tarrío, 2011).

Se puede notar en forma general, para ambos escenarios, que la fluctuación del valor *RSSI* va en aumento en cuanto la separación entre transmisor y receptor crece. Para el escenario *Biblioteca-atrás* se nota un crecimiento después de los 70m; y para el escenario *Plazoleta-estudiante* después de los 50 o 55m. Específicamente en la figura 12, hay dos puntos (35 y 40m) que presentan bastante fluctuación, esto podría ser por la influencia de algo en particular en el momento en que se tomó la medida, ya que esto no se aprecia en un día diferente, para el mismo escenario, en los mismos lugares; como se ve en la figura 13.

Con respecto a lo anterior, también hay que tener muy presente que hubo presencia de personas caminando en medio de los nodos mientras se registraban las medidas; esto es un factor muy importante a considerar debido a que las señales inalámbricas fluctúan en presencia del movimiento humano, lo que resulta en la distribución extendida de la variación de *RSSI* (Lin et al., 2011), incluso, en este estudio calculan la fluctuación entre el *RSSI* de los paquetes recibidos en un receptor durante un período de tiempo para la detección y conteo de personas. En (Horvat et al., 2015) también realizaron una serie de

mediciones con presencia humana en movimiento y concluyeron que si se induce a este tipo de interferencia cerca del nodo, el valor de *RSSI* tiende a disminuir.

Para el escenario *Biblioteca-atrás*, especialmente entre los 10 a 20 metros, se aprecian los efectos de los mecanismos de propagación *(shadowing y multipath)* que afectan la propagación de la señal a través de la reflexión, dispersión y difracción producidos por la presencia de objetos entre transmisor y receptor (Kurt & Tavli, 2017); es importante recordar que, en este escenario hay presencia cercana de edificaciones, árboles y faroles metálicos a los nodos Tx y Rx que adiciona estos efectos (Kurt & Tavli, 2017). Para el escenario *Plazoleta-estudiante* con *LOS,* podemos ver que se podrían presentar los mismos efectos debido a las reflexiones con los objetos, arboles circundantes y el suelo. También es importante recordar, que hay más puntos muestreados en los primeros 20 metros, al parecer, el valor *RSSI* tiende a afectarse más alrededor estas distancias. (Lara et al., 2016).

### 7.1.3 Valores RSSI promedios para cada distancia

Esta sección comprende el análisis de *RSSI* promedio y la desviación estándar del mismo; “los modelos de *path loss* generalmente incluyen descriptores estadísticos (por ejemplo, valores medios y desviaciones estándar).” (Kurt & Tavli, 2017). En ambientes no ideales, el canal se deteriora con las contribuciones del *multipath*, *shadowing* y otros efectos no esperados, esto puede disminuirse con el promedio de las mediciones de la potencia recibida (Goldsmith, 2005). Entonces, se promediaron los valores de *RSSI* para cada punto distancia; y así con este valor, derivar el modelo de propagación.

A continuación, se observan en una misma gráfica, los promedios de los días diferentes de la toma de datos para cada uno de los escenarios como se explicó anteriormente, (figura 16: *Biblioteca-atrás* y figura 17: *Plazoleta-estudiante*). Hay que recordar que los módulos estaban trabajando con la misma potencia de transmisión (+8 dBm), en el canal 19.

### 7.1.3.1 Escenario: Biblioteca-atrás

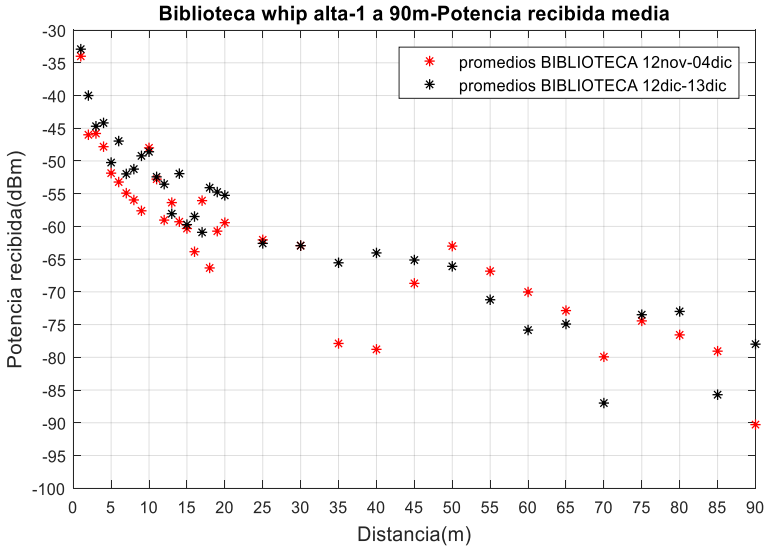



***Figura 16*** *Valores RSSI promedios para cada distancia Biblioteca-atrás*

Según los promedios obtenidos, en estas experiencias, la intensidad de la señal recibida por el módulo Xbee S2C se encuentra en un nivel máximo, entre -33dBm y -35dBm para ambos escenarios; y en un nivel mínimo, entre -87dBm y -90dBm para escenario *Biblioteca-atrás;* y entre -71dBm y -72dBm para escenario *Plazoleta-estudiante.*

### 7.1.3.2 Escenario: Plazoleta-estudiante.

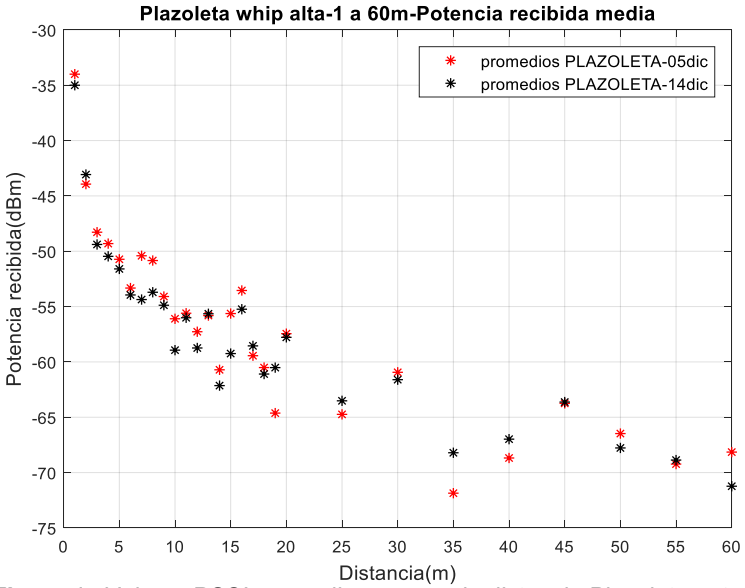


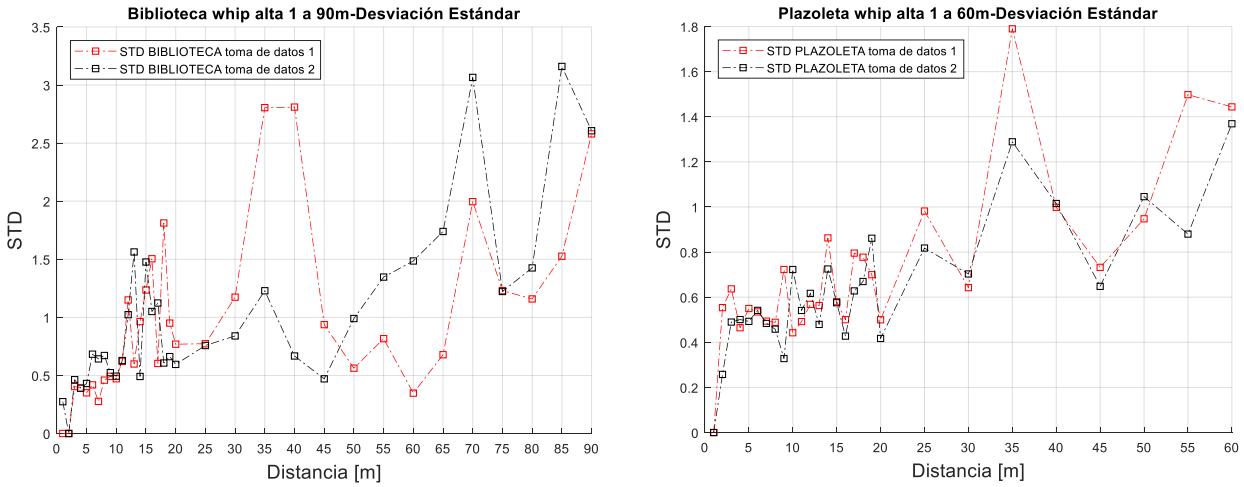

***Figura 17*** *Valores RSSI promedios para cada distancia Plazoleta-estudiante*

En las figuras anteriores, comparando los puntos en la misma distancia entre la toma de datos 1 y 2, se observa que, para el escenario *Plazoleta-estudiante* se observa más concordancia en los valores *RSSI*; para más precisión, las diferencias oscilan entre 0.1 dBm y 4dBm y para *Biblioteca-atrás* entre 0 dBm y -14dBm.

Teniendo en cuenta las especificaciones técnicas para el módulo Xbee S2C, los datos muestran que la intensidad media de la señal para los dos escenarios está por encima del nivel de referencia de -100dBm (sensibilidad de recepción). Se puede apreciar que, para el caso de *Plazoleta-estudiante*, el rango del módulo no llega a su límite en la distancia máxima de muestra (60m); tal que *RSSI* es aproximadamente 70dBm. Para el ambiente *Biblioteca-atrás* se aprecia que también se supera el límite de esa sensibilidad en la distancia máxima muestreada, 90m.

### 7.1.4 Desviación Estándar

Las siguientes figuras muestran la desviación estándar de *RSSI* promedio con respecto a la distancia entre transmisor y receptor para los escenarios elegidos, *Biblioteca-atrás,* (a) y *Plazoleta-estudiante,* (b).




**(a)** **(b)**

***Figura 18*** *Desviación estándar de RSSI*

Si se tienen en cuenta todos los valores, la desviación estándar de *RSSI* promedio para figura 18 (a) oscila en la toma de datos 1 (línea roja) entre 0dBm y 2.8 dBm y toma de datos 2 (línea negra) entre 0dBm y 3.1 dBm. Para la figura 18 (b) La desviación estándar se oscila entre 0dBm y 1.8dBm en la toma de datos 1 (línea roja) y entre 0dBm y 1.4dBm en toma de datos 2. Es decir, el valor máximo en el escenario con obstáculos entre Tx y Rx fue 3.1dBm y en el escenario sin obstáculos en medio fue 1.8dBm. También se puede observar que, en general, los valores *RSSI* se desvían más cuando aumenta la separación entre nodo transmisor y el nodo receptor. Y como se realizaron repeticiones del experimento, esto genera un aumento según lo planteado en (Tarrío, 2011).

Si se comparan los puntos en la misma distancia entre la toma de datos 1 y 2 con más precisión, se observa que, para el escenario *Plazoleta-estudiante* las desviaciones de *RSSI* van de 0dBm a 0.6dBm; y para *Biblioteca-atrás* entre 0 dBm y 2.1dBm.

Exceptuando valores atípicos, en el escenario *Biblioteca-atrás*, la desviación estándar de *RSSI* oscila entre 0dBm y 2.5 dBm y entre 0dBm y 2 dBm para toma de datos 1 y 2 respectivamente. Para *Plazoleta-estudiante,* la desviación estándar de *RSSI* oscila entre 0dBm y 1.5dBm en ambas tomas de datos.

### 7.1.5 Paquetes Perdidos

En la siguiente tabla se encuentran el resumen de los paquetes perdidos en el nodo Rx en ambos escenarios por las fechas de toma de datos. He de recordar que los datos de las gráficas anteriores provienen de fechas diferentes.

Se puede inferir que para escenario *Biblioteca-atrás* hubo recepción del 100% de paquetes para la *toma de datos 1* entre distancias 1m a 80m, exceptuando 1 fallo en 90m; para la *toma de datos 2,* hubo fallo para 1m (1%), 70m (3%) y 80m (1%), en los demás puntos hubo éxito de 100%. Para *Plazoleta-estudiante* se recibieron todos los paquetes en todos los puntos *(toma de datos 1),* y en la *toma de datos 2* hubo éxito en la entrega del 99%. Comparando los escenarios, en *Biblioteca-atrás* hubo más pérdidas de paquetes.

***Tabla 4*** *Paquetes Perdidos*

| FECHA/ESCENARIO | Paquetes perdidos | Distancia de pérdida (m) |
|---|---|---|
| RSSI_BIBLIOTECA_WHIP_ALTA_ATRAS (Toma de datos 1) | 1 | 90 |
| RSSI_BIBLIOTECA_WHIP_ALTA_ATRAS (Toma de datos 2) | 1 | 1 |
| | 3 | 70 |
| | 1 | 80 |
| PLAZOLETA_WHIP_ALTA (Toma de datos 1) | 0 | --- |
| RSSI_PLAZOLETA_WHIP_ALTA (Toma de datos 2) | 1 | 55 |

## 7.2 Desarrollo del Modelo

Para obtener el modelo de pérdida de trayecto, se correlacionaron las variables experimentales y el *Log Distance-Model* (Goldsmith, 2005):

$$PL(d)\,[dB] = PL(d0) + 10n\,log10\,(d/d0) \qquad (6)$$

Donde, $PL(d)$ es el *Path Loss,* $PL(d0)$ es el *Path Loss* a una distancia de referencia $(\mathrm{d0})$, que para este estudio es 1m y $n$ es el exponente de pérdida.

Para estimar el valor de $n$, y $PL(d0)$ se relacionó (6) con la ecuación lineal obtenida por regresión lineal de los datos de pérdida de trayectoria calculados. A continuación, se detalla la obtención del modelo y el análisis de los resultados obtenidos.

### 7.2.1 Regresión Lineal - Toma de datos 1 y 2

El ajuste de los datos para los dos escenarios se realizó con el método de mínimos cuadrados, adicionalmente, para la validación estadística del mismo se presentan los

errores de estimación y parámetros de bondad del ajuste. Este desarrollo se realizó con el programa Matlab.

Aunque se utilizaron hasta ahora los valores *RSSI*, para el resto de este documento el interés se centra en las pérdidas de propagación, las cuales serán calculadas para cada valor a partir promedio del nivel de potencia recibida (Goldsmith, 2005)*:*

$$PL(d)[dB] = Pt\,[dBm] + Gt\,[dBi] + Gr\,[dBi] - Pr(d)\,[dBm] \qquad (7)$$

Donde $Pt\,[dBm]$ es la potencia de transmisión (+8 dBm), $\mathrm{Gt}$ es ganancia de la antena del transmisor (1.5dBi), y $\mathrm{Gr}$ es ganancia de la antena del receptor (1.5dBi). Esta conversión se ve reflejada en la figura 19; las cuales no representan una ecuación lineal, sin embargo, al usar la escala logarítmica para la distancia, la potencia recibida parece ajustar a una ecuación lineal (ver figura 20).

Las regresiones lineales realizadas para ambos escenarios están representadas en la figura 21. En las tablas 5 y 6 se resumen los parámetros de la regresión y de bondad del ajuste del *Log Distance-Model* para los valores de pérdida de trayectoria en ambos escenarios; donde (#obs) es el número total de observaciones, SE representa el error estándar, $R^2$ el factor de correlación y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*, por sus siglas en inglés, Root mean squared error).

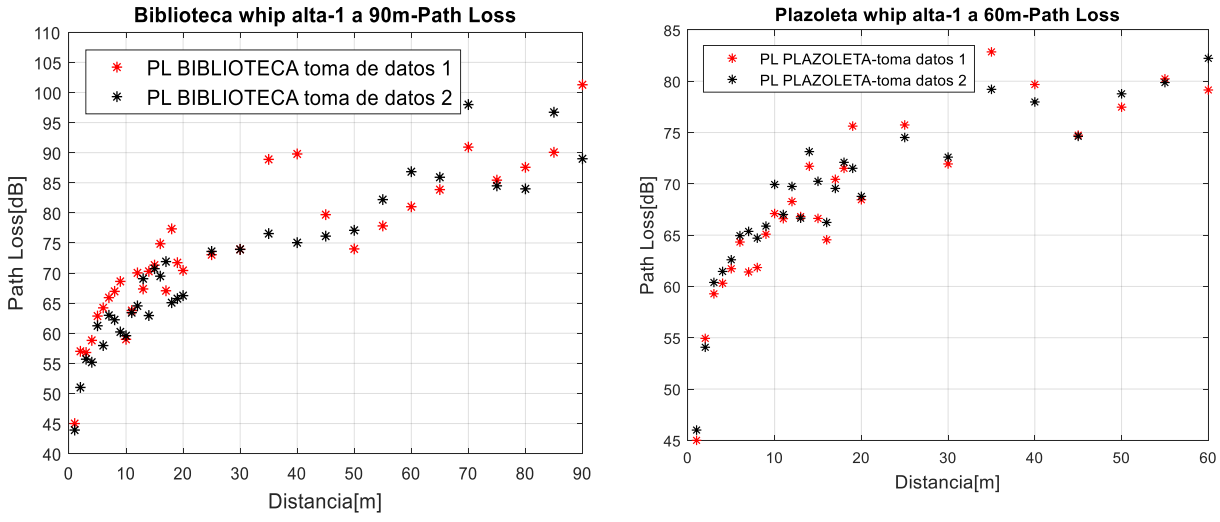



***Figura 19*** *Path Loss para cada toma de datos en función Distancia [m]: (a) Biblioteca-atrás; (b) Plazoleta-estudiante*

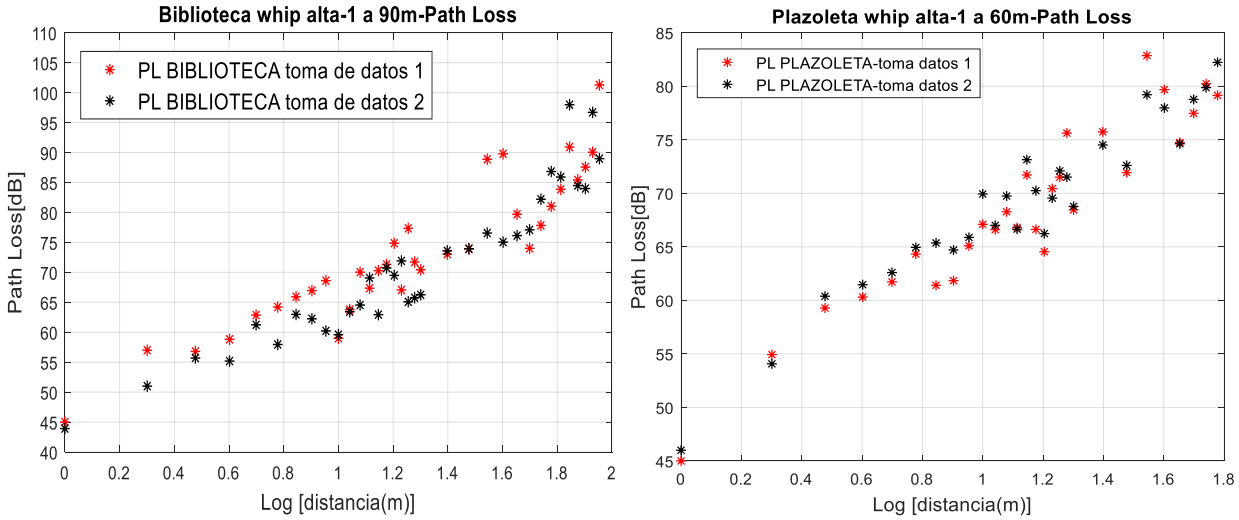



***Figura 20*** *Path Loss para cada toma de datos en función de $log_{10}(d)$: (a) Biblioteca-atrás; (b) Plazoleta-estudiante*

***Tabla 5*** *Resumen de los coeficientes calculados y parámetros de bondad del ajuste para escenario Biblioteca-atrás*

| | **Biblioteca_1_a_90m_toma datos 1** | | **Biblioteca_1_a_90m toma datos 2** | |
|---|---|---|---|---|
| | Pendiente | Intercepto | Pendiente | Intercepto |
| Coeficientes | 22.163 | 45.373 | 24.063 | 40.402 |
| SE | 1.6836 | 2.265 | 1.4889 | 2.0031 |
| $R^2$ | 0.844 | | 0.891 | |
| RMSE | 4.81 | | 4.26 | |
| #obs | 34 | | 34 | |

Hay que recordar que en el escenario *Plazoleta-estudiante* las medidas se hicieron sobre menos puntos por las restricciones de espacio.

***Tabla 6*** *Resumen de los coeficientes calculados y parámetros de bondad del ajuste para escenario Plazoleta-estudiante*

| | **Plazoleta_1_a_60m_toma datos 1** | | **Plazoleta_1_a_60m_toma datos 2** | |
|---|---|---|---|---|
| | Pendiente | Intercepto | Pendiente | Intercepto |
| Coeficientes | 18.191 | 48.016 | 17.286 | 49.623 |
| SE | 1.1982 | 1.4351 | 0.94709 | 1.1343 |
| $R^2$ | 0.899 | | 0.928 | |
| RMSE | 2.74 | | 2.17 | |
| #obs | 28 | | 28 | |

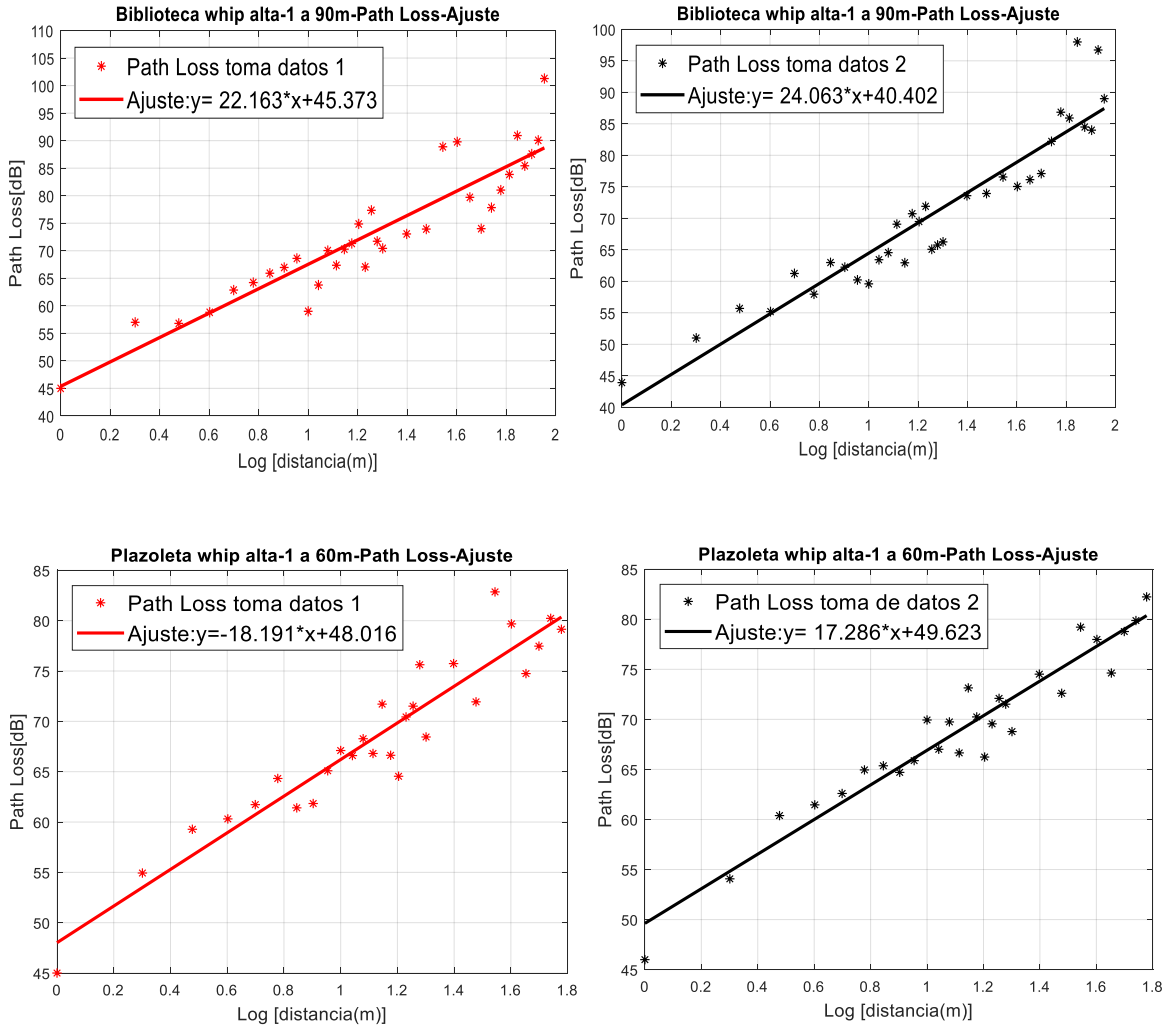



***Figura 21*** *Path Loss (ajuste) para cada toma de datos como función de Log (d) para los escenarios: (arriba) Biblioteca-atrás; (abajo) Plazoleta-estudiante.*

Las ecuaciones de la figura 21 que ajustan los datos son de la forma:

$$y = a + b * 10log10 * x \quad (8)$$

Donde, $y$ representa la pérdida de trayectoria promedio en dB; $x$ se refiere a la distancia (d) en escala logarítmica, en metros, $(10\log_{10}(\mathrm{d}))$; $a$ representa pérdida de trayectoria a una distancia de referencia (1m) y $b$ es la pendiente de la recta, la cual representa en el modelo al exponente de pérdida *-n.*

Correlacionando la ecuación (6) *Log Distance-Model* con la ecuación (8) que representa la regresión lineal, se obtiene la ecuación del *path loss* para cada experiencia de la siguiente forma:

$PL_{B1} = 45.3+22.1 \log10 (d);$ Escenario Biblioteca-atrás, toma datos1 (9)

$PL_{B2} = 40+24 \log_{10} (d);$ Escenario Biblioteca-atrás, toma datos2 (10)

$PL_{P1} = 48+18.1 \log_{10} (d);$ Escenario Plazoleta-estudiante, toma datos1 (11)

$PL_{P2} = 49.6+17.2 \log_{10} (d);$ Escenario Plazoleta-estudiante, toma datos2 (12)

Los resultados para *Biblioteca-atrás* muestran que el *exponente de pérdida* estimado tiene valores de *n = 2.2, y n = 2.4;* esto quiere decir que la intensidad de la potencia recibida cae -22.163dB y -24.063dB por década para cada una de esas experiencias. Y para *Plazoleta-estudiante* el *exponente de pérdida* tiene valores de *n = 1.8, y n = 1.7* para la 05dic y 14dic respectivamente; esto quiere decir que la intensidad de la potencia recibida cae -18.191dB y -17.286dB por década para cada una de esas experiencias. Además, se aprecia el valor del intercepto, que representa las pérdidas de propagación a la distancia de 1m.

La bondad del ajuste del modelo ($R^2$), ayuda a explicar la relación entre la distancia y la potencia recibida (es decir, si tienen o no, una relación lineal y qué tanto es la fuerza de dicha relación), toma valores de 0.844 y 0.891; este valor sugiere que los modelos para *Biblioteca-atrás* $\mathrm{PL_{B1}}$ y $\mathrm{PL_{B2}}$ explican aproximadamente el 84% y el 89% de la variabilidad en los valores *RSSI* medidos respectivamente. Para $\mathrm{PL_{P1}}$ y $\mathrm{PL_{P2}}$ la bondad del ajuste es 0.899 y 0.928 respectivamente. Los resultados son bastante aceptables en ambos escenarios, siendo mejor para *Plazoleta-estudiante.*

El error estándar (SE) de $\mathbf{n}$ y $\mathrm{PL(1m)}$, representa la distancia promedio que los valores observados se desvían de la línea de regresión. Por ejemplo, en el caso *Biblioteca-atrás* la distancia promedio de los valores *path loss* de la línea ajustada es 1.68. El RMSE es

la desviación estándar de los residuos (errores de predicción). Según este valor, el modelo del escenario *Plazoleta-estudiante* tiene mejor desempeño que el de *Biblioteca-atrás;* la diferencia de este valor es aproximadamente el doble.

### 7.2.2 Regresión Lineal- Promedio datos 1 y 2

Para obtener el modelo final se obtuvo un promedio de los valores de pérdida de trayectoria, se tuvo en cuenta las características de los días diferentes de medición para cada escenario. A continuación, se observan las gráficas *path loss* promedio de los datos 1-2 y el ajuste lineal, además, en la tabla 7 se resumen los parámetros de la regresión y de bondad del ajuste del *Log Distance-Model* promedio de los datos 1-2 para cada escenar io.

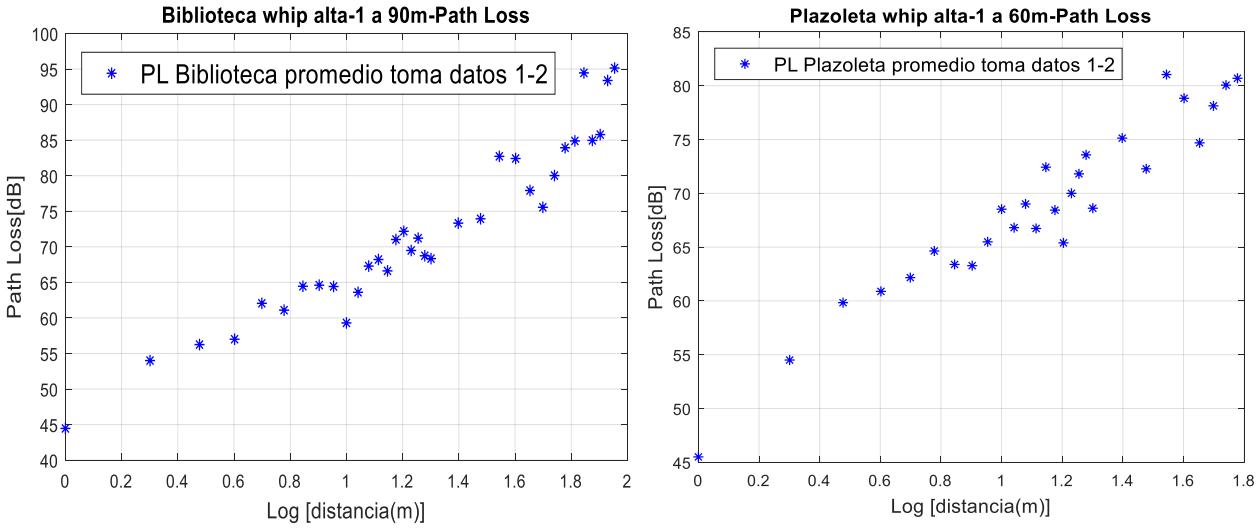



***Figura 22*** *Path Loss final como función de Log (d) para los escenarios: (izq.) Biblioteca-atrás; (der.) Plazoleta-estudiante.*

Al igual que con los modelos anteriores, se correlaciona la ecuación (6) *Log Distance-Model con* la ecuación (8) que representa la regresión lineal, se obtiene la ecuación del *path loss* promedio de los datos 1-2 para cada escenario:

$PL_B = 42.8+23.1\log_{10}(d);$ *Pérdida trayectoria* Biblioteca-atrás (13)

$PL_P = 48.8+17.7\log_{10}(d);$ *Pérdida trayectoria* Plazoleta-estudiante (14)

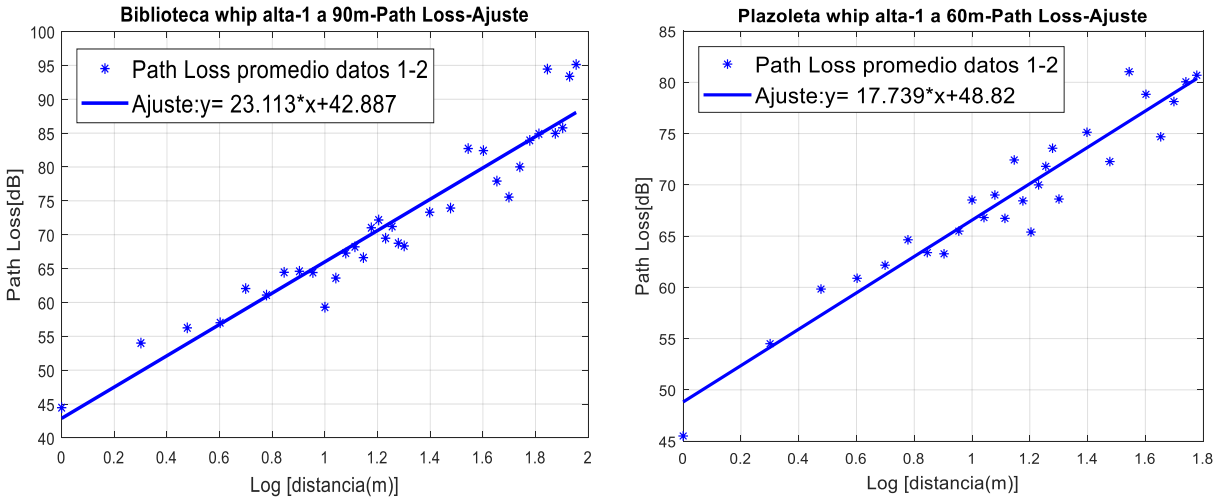



***Figura 23*** *Path Loss (ajuste) para cada toma de datos como función de Log (d) para los escenarios: (izq.) Biblioteca-atrás; (der.) Plazoleta-estudiante.*

La tabla 7 muestra que el *exponente de pérdida* estimado tiene el valor de *n = 2.31;* esto quiere decir que la intensidad de la potencia recibida cae -23.113dB por década para el escenario *Biblioteca-atrás*. Y para *Plazoleta-estudiante* el *exponente de pérdida* es de *n = 1.77*; esto quiere decir que la intensidad de la potencia recibida cae 17.739dB por década. Además, se aprecia el valor del intercepto, que representa las pérdidas de propagación a la distancia de 1m.

***Tabla 7*** *Resumen de los coeficientes finales calculados y parámetros de bondad del ajuste para escenarios Biblioteca-atrás y Plazoleta-estudiante*

| | **Biblioteca_promedio datos 1 y 2** | | **Plazoleta_promedio datos 1 y 2** | |
|---|---|---|---|---|
| | Pendiente | Intercepto | Pendiente | Intercepto |
| Coeficientes | 23.113 | 42.887 | 17.739 | 48.82 |
| SE | 1.2569 | 1.691 | 0.99882 | 1.1963 |
| $R^2$ | 0.914 | | 0.924 | |
| RMSE | 3.59 | | 2.28 | |
| #obs | 34 | | 28 | |

Se puede ver que, en este caso, la bondad del ajuste del modelo ($R^2$) tuvo una mejoría al tener en cuenta la toma de datos 1 y 2; este valor sugiere que el modelo para *Biblioteca-atrás* $\mathrm{PL_B}$ explica aproximadamente 91% de la variabilidad en los valores *RSSI*

medidos. Para *Plazoleta-estudiante,* $PL_P$, la bondad del ajuste es 0.924, en este caso prácticamente se mantuvo constante. Ambos resultados son bastante aceptables.

Los demás valores estadísticos, para ambos escenarios, sugieren mejoría en el desempeño de los modelos teniendo en cuenta los datos 1 y 2, los cuales, vale recordar capturan características de diferentes días de medición.

### 7.2.3 Normalidad y la variabilidad de los datos

Los gráficos residuales ayudan a probar los supuestos de normalidad y la variabilidad del modelo, esto sugiere que los datos podrían producir un buen modelo.(Olasupo, Otero, Olasupo, & Kostanic, 2016).

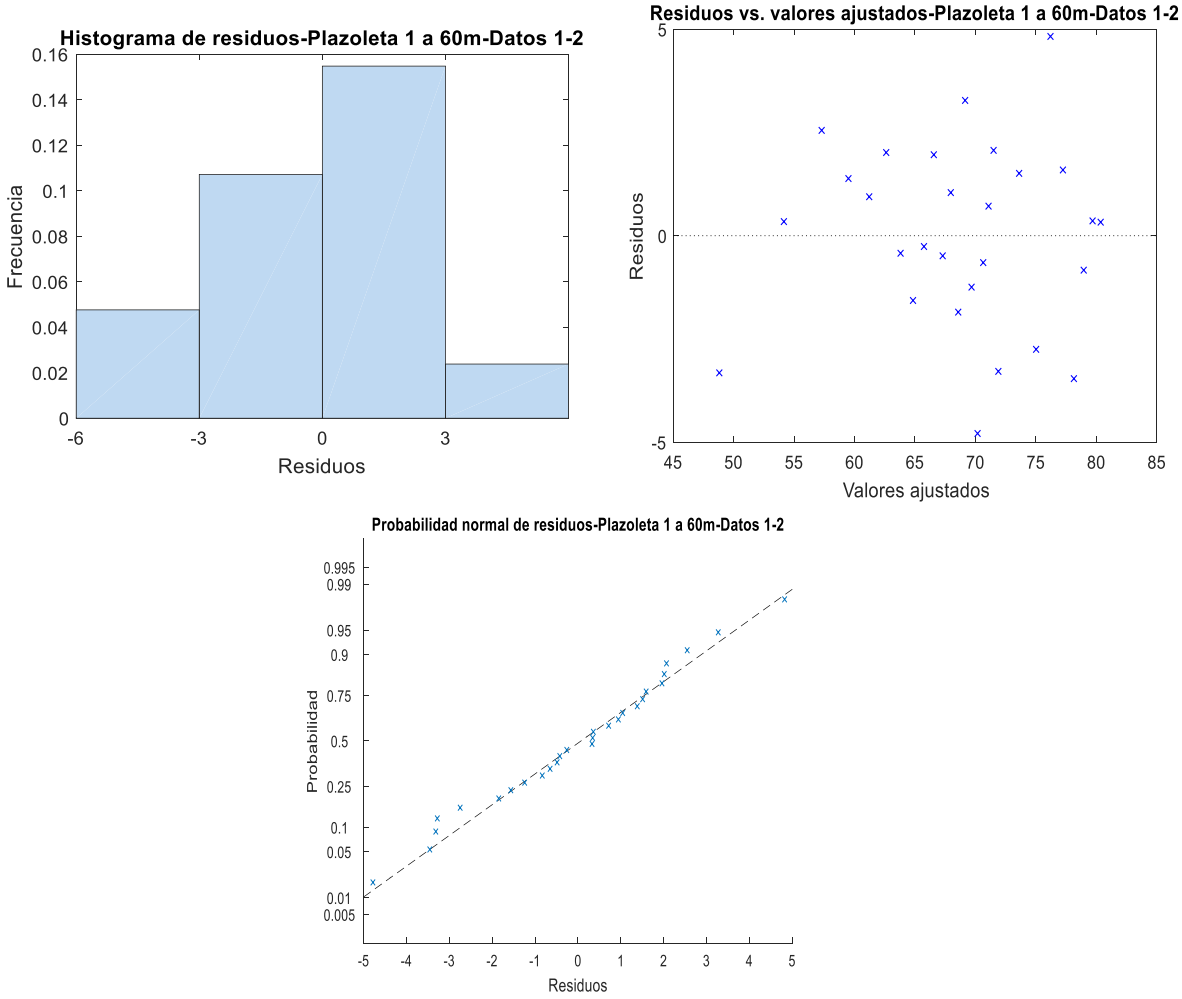



***Figura 24*** *Gráficos residuales: (arriba.izq.) histograma, (arriba.der.) valores ajustados, (abajo) probabilidad .*

La gráfica probabilidad muestra que los datos están cayendo cerca de una línea recta. Por lo tanto, están normalmente distribuidos y la gráfica de residuos vs valores ajustados verifican la aleatoriedad de los residuos, así que, en general, en su mayoría, se muestra que los datos siguen normalidad y variabilidad.

### 7.3 Efecto de Shadowing - Modelo Final

Para obtener el modelo final para cada escenario se superpone el modelo hallado en el apartado anterior ($\mathrm{PL_{B\ y}}\ \mathrm{PL_P}$) y la atenuación aleatoria sobre la pérdida de trayectoria debida al *shadowing* ($X_{dB}$). Este efecto se describe a través de la desviación estándar del *shadowing* ($\sigma\psi_{dB}$). Esto se obtiene utilizando el *path loss* medido (PL measured) y ajustado (PL model) como se muestra a continuación. (Goldsmith, 2005).

$$\sigma^2\psi_{dB} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[PLmeasured(di) - PLmodel(di)]^2 \qquad (15)$$

Donde N es el número de observaciones. Entonces de acuerdo con lo anterior, la desviación estándar del desvanecimiento de la sombra en el trayecto Tx y Rx para cada escenario es $\sigma\psi_{dB}$: *3.48 dB* (*Biblioteca-atrás) y* $\sigma\psi_{dB}$ (*Plazoleta-estudiante): 2.20 dB.*
Es así como, el modelo final describe la pérdida de trayectoria y la variación de potencia recibida a cierta distancia en los escenarios seleccionados es basado en el *Log-Normal Shadowing Model,* (Rappaport, 2001)

$$PL(d)\ [dB] = PL(d0) + 10\boldsymbol{n}\ log_{10}\ (d/d0) + X_{dB} \qquad (16)$$

Biblioteca-atrás*:* $PL_{\boldsymbol{B}} = 42.8+23.1\ log_{10}\ (d)\ con\ \sigma\psi_{dB} = 3.48dB$ (17)

Plazoleta-estudiante: $PL_{\boldsymbol{P}} = 48.8+17.7\ log_{10}\ (d)\ con\ \sigma\psi_{dB} = 2.20\ dB$ (18)

## 7.4 Evaluación de los modelos propuestos

Para evaluar los modelos se realiza una comparación de los modelos propuestos con modelos teóricos y se hace una discusión de los resultados obtenidos con la teoría relacionada y con otros trabajos relacionados presentados a continuación.

### 7.4.1 Comparación con modelos teóricos

La figura 25 muestra la comparación de los modelos obtenidos con el Modelo del Espacio Libre y el Modelo de dos Rayos. La pérdida de trayectoria para el modelo *FSPL* se calcula para frecuencia de 2.4GHz, de acuerdo con ecuación (2.9) en Goldsmith, 2005 y el modelo de dos rayos con ecuación (9) en Kurt & Tavli, 2017.

En la comparación se puede decir que el modelo *FSPL* predice un valor de pérdida de trayectoria más bajo que el modelo propuesto para ambos escenarios, ver figura 25 (arriba); en 60m la diferencia con respecto al modelo *FSPL* es de 8-12dB, siendo mayor con el modelo *Biblioteca-atrás* debido a las condiciones del escenario explicadas anteriormente. En la figura 25 (abajo-izq.) para distancias menores a 20m, se puede apreciar que la pérdida de trayectoria predicha por los modelos en los dos escenarios es muy similar hasta 20m. Acerca de la figura 25 (abajo-der.) donde se compara con el modelo de dos rayos, es evidente que este modelo subestima por mucho (20dB) pérdida de trayectoria; esto podría deberse a que la altura en la que se encuentran las antenas (2m) favorece las condiciones de *LOS* para el rango de distancia en ambos escenarios. Es decir, esto confirma los cálculos hechos para este estudio según (Zekavat, 2012) donde se calcula el valor crítico $(\mathrm{H})$ para la altura de la antena debajo de la cual la pérdida de trayectoria se vuelve significativa.

Entonces, $\mathrm{H} \leq 0.3\sqrt{d\lambda}$. Donde d es la distancia entre Tx y Rx. Para el presente estudio teniendo en cuenta las distancias máximas de los escenarios:

- $\mathrm{H} \leq 0.82\mathrm{m}$ para $60\mathrm{m}$

- $H \leq 1m$ para $100m$.

De acuerdo con estos resultados, no habría pérdida de trayectoria significativa debida a la altura de las antenas transmisora-receptora. Así que este modelo

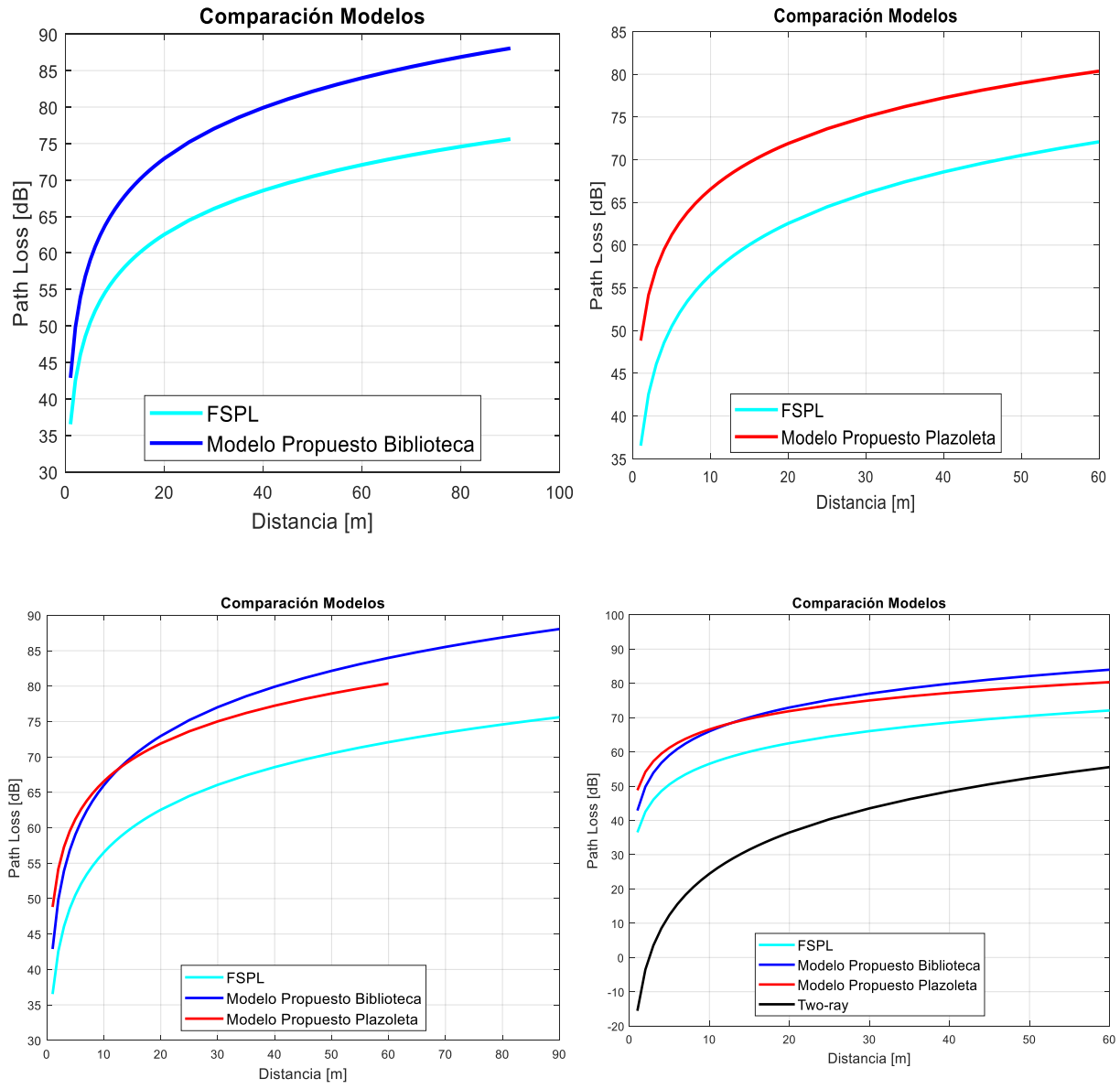



***Figura 25*** *Comparaciones entre los modelos propuestos y modelos teóricos: (arr-izq.) Biblioteca-FSPL; (arr-der.) Plazoleta-FSPL; (abajo-izq) Biblioteca-Plazoleta-FSPL; (abajo-der.) Biblioteca-Plazoleta-FSPL-Two_ray.*

En la figura siguiente, adicionalmente a las anteriores, también aprecia el valor de pérdida de trayectoria promedio obtenido de las mediciones.

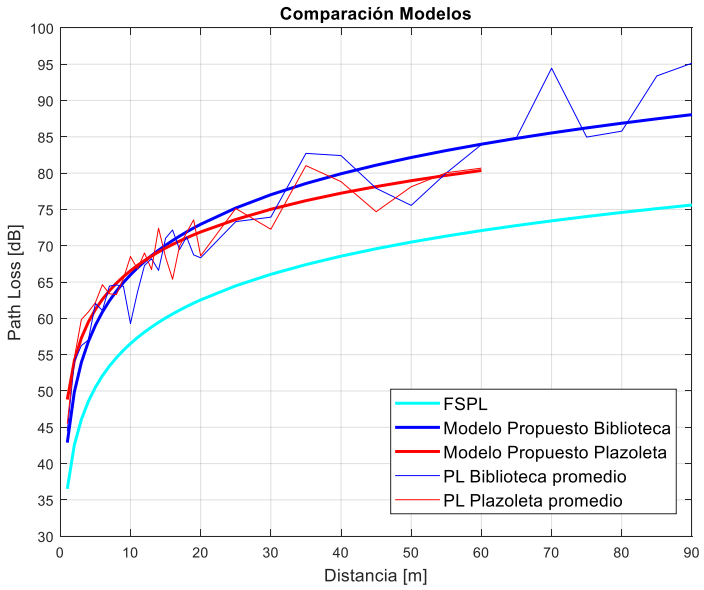



***Figura 26*** *Comparaciones entre los modelos propuestos - modelos teóricos -PL promedio datos*

### 7.4.2 Discusión

Aunque se realizó una gran consulta bibliográfica y no se encontraron estudios con todas las características iguales a este; se hallaron otros con ciertas similitudes con los cuales se puede establecer una comparación.

De los resultados presentados en 7.2.2 y 7.2.3 sobre el exponente de pérdida en el escenario *LOS Plazoleta-estudiante* es de $n = 1.77$, este es ligeramente más bajo que el valor teórico del modelo de espacio libre $(n=2)$, este resultado es consistente con el cálculo hecho (Fakhri et al., 2018) utilizan los mismos módulos de radio que el presente para tomar medidas *RSSI* que derivan en el *LNSM*, en donde $n= 1.74.$ en un escenario exterior. Los valores de *RSSI* para distancia inicial 1m son muy similares (aproximadamente 35dB), igualmente los valores para la distancia máxima de *Plazoleta-estudiante (alrededor de 70dB).*

En (Payal et al., 2015) el entorno de medición fue un bloque de la universidad rodeado por edificios de 6 pisos, los resultados del log-distance-model y la pérdida de trayectoria medida es mayor en aproximadamente 5dB. No mencionan el exponente de pérdida. (Cama-pinto & Pin, 2017) en una de las pruebas en una plaza dentro de un campus universitario realizaron el cálculo de pérdida de trayectoria con módulos de radio XBee Pro S1 y S2 y los resultados cercanos a este estudio arrojaron un *n=1.86*, con *σ= 3.25.*

En cuanto a los datos teóricos típicos para para el exponente de pérdida proporcionados por (Rapapport,2001) los valores obtenidos en el presente trabajo se encuentran cercanos al del ambiente espacio libre con *n=2,* Y Para ambientes más complejos de 2 a 4. En (Vazquez, Vilajosana, & Vicario, 2013) mencionan que la mayoría de estudios empíricos muestran desviaciones estándar entre 0.4dB y 4dB. Y en (Goldsmith, 2005) La mayoría de los estudios empíricos para canales al aire libre admiten una desviación estándar de $\sigma\psi_{dB}$ que varía de 4 dB a 13dB. En este caso, se obtuvieron valores de $3.48dB$ y $2.20\ dB$.

## 7.5 Resultados Simulación

### 7.5.1 Resultados Simulación One Slope Model (OSM)

A continuación, está la presentación gráfica de ProMan de la predicción de pérdida de trayectoria calculada con parámetros definidos (Iso) y el patrón 3D para ambos escenarios y la tabla que resume los resultados.

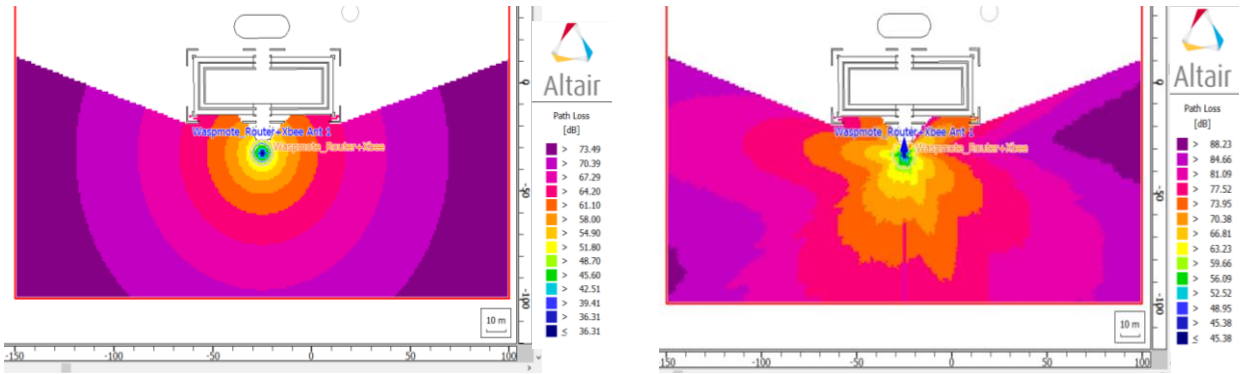



***Figura 27*** *Predicción PL plazoleta OSM (valores LOS): (izq.) parámetros definidos (Iso), (der.) patrón 3D*

***Tabla 8*** *Resumen Predicción Path Loss (OSM) -WinProp*

| **Resultados Simulación WinProp-One Slope Model (Modified Free Space Model)** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Resolución de los resultados de predicción:1m | | | | |
| **Path Loss Resultados** | **Antena WinProp Iso** | | **Antena patrón 3D** | |
| **Antena Tx (2m): Localización Plazoleta-Estudiante** | **Área** | **LOS** | **Área** | **LOS** |
| Mínimo Valor (dB) | 33.21 | 33.21 | 41.81 | 41.81 |
| Máximo Valor (dB) | 108.83 | 76.59 | 133 | 91.80 |
| STD (dB) | 15.238 | 4.520 | 17.7 | 5.118 |
| **Path Loss Resultados** | **Antena WinProp Iso** | | **Antena patrón 3D** | |
| **Antena Tx: Localización Biblioteca-atrás** | **Área** | **LOS** | **Área** | **LOS** |
| Mínimo Valor (dB) | 31.590 | 31.590 | 41.06 | 41.06 |
| Máximo Valor (dB) | 108.46 | 90.140 | 123.8 | 112.44 |
| STD (dB) | 10.866 | 6.056 | 11.247 | 7.143 |

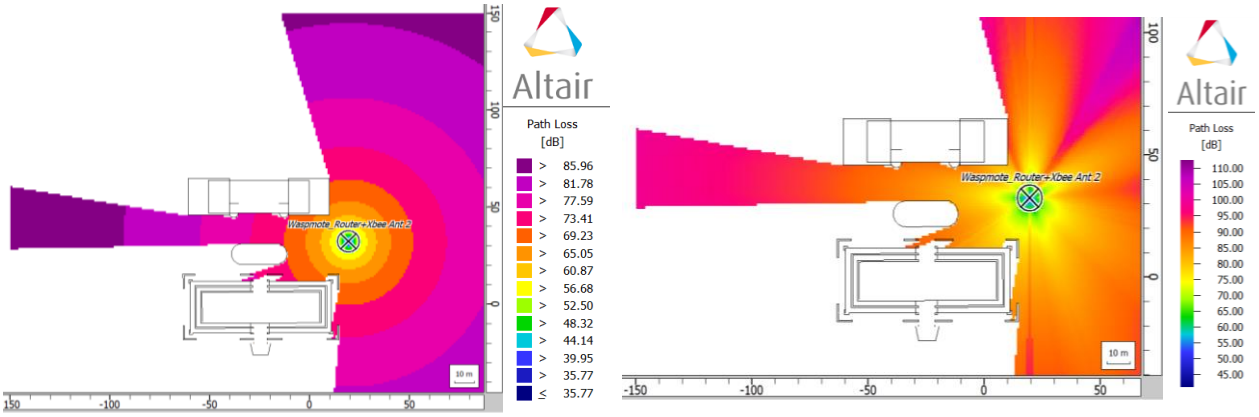



***Figura 28*** *Predicción PL OSM biblioteca (LOS): (izq.) parámetros definidos (der.) patrón 3D*

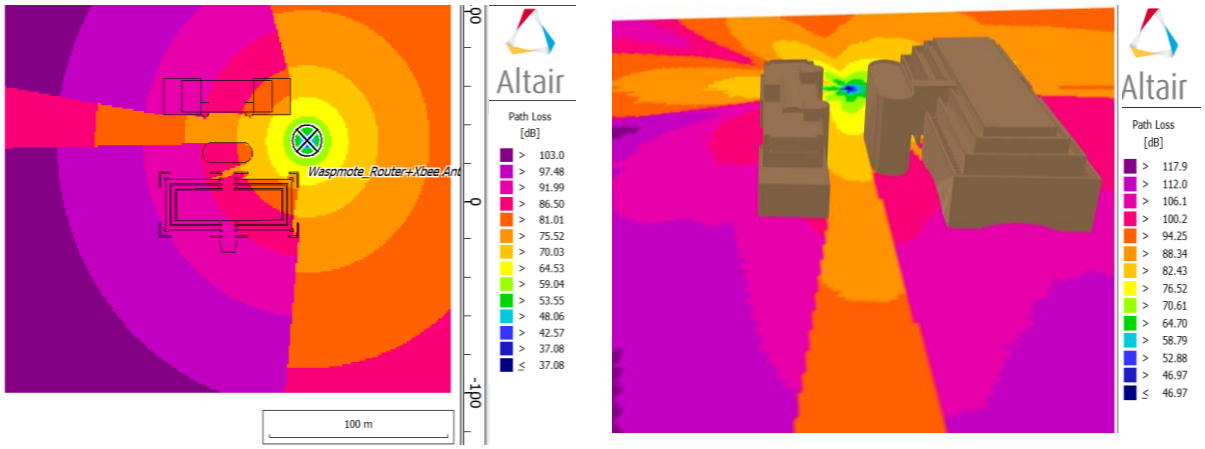



***Figura 29*** *Predicción PL OSM biblioteca (valores LOS/NLOS): (izq.) parámetros definidos (der.) patrón 3D, modo visual 3D*

Según los resultados presentados en la tabla, los valores de la pérdida de trayectoria en ambos escenarios, para todas las predicciones hechas con el patrón 3D es significativamente mayor que los predichos con la antena con parámetros definidos en el simulador. Comparando las desviaciones estándar del PL calculado sobre toda el área y los filtrados para lugares definidos por ProMan como *LOS* de cada escenario, vemos que este aumenta, aunque por muy poco (2.46 para *Biblioteca-atrás* y 0.38 para *Plazoleta*). Las gráficas mostradas corresponden a los resultados de la tabla en el modo de visualización de WinProp 2D Y 3D.

### 7.5.2 Comparación resultados simulación OSM con modelos mediciones

Se extrajeron los valores de pérdida de trayectoria de la simulación a las distancias correspondientes con las mediciones y se les aplicó el ajuste por mínimos cuadrados en Matlab para realizar las comparaciones con los modelos propuestos.

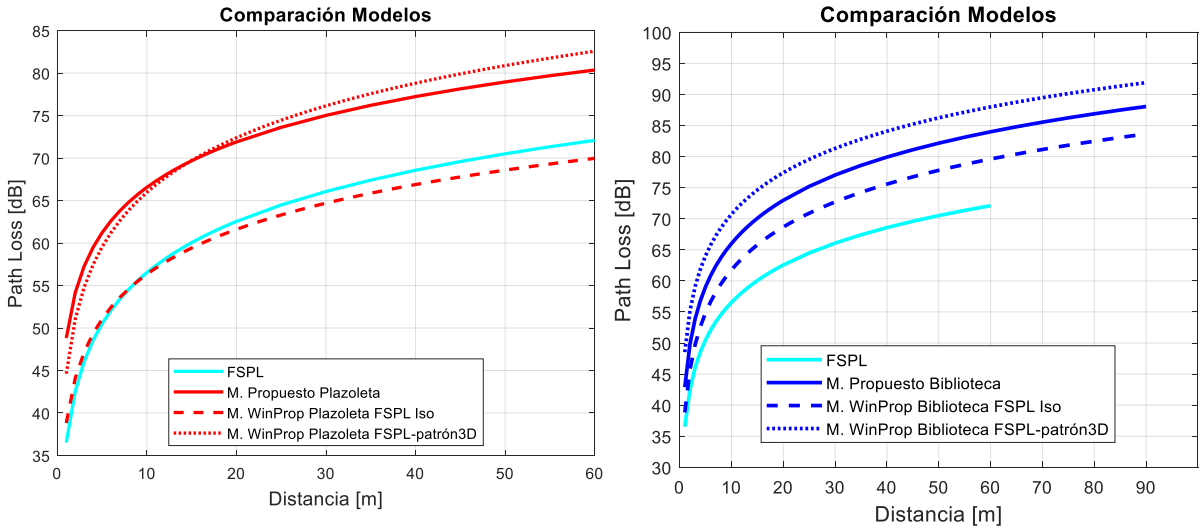



***Figura 30*** *Comparación predicción PL OSM simulación vs modelos propuestos y FSPL: (izq.) Plazoleta, (der.) Biblioteca*

En la figura 30, se observa, para cada escenario, la comparación del modelo de pérdida de trayectoria obtenido de las mediciones junto con *Log-Normal Shadowing Model* y los modelos obtenidos de las predicciones del simulador.

Se observa que, en el caso de escenario *Plazoleta* (en el rango de la distancia estudiada), el modelo predicho en la simulación con el patrón de antena 3D es bastante cercano al modelo propuesto, a diferencia de la antena definida con parámetros en WinProp. En el modelo *OSM* es prácticamente igual al teórico *FSPL*, debido a que el cálculo en la simulación se calibró con el exponente de pérdida obtenido en las mediciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, los datos transmitidos desde la ubicación de Tx cubrirían el área de *LOS* (calculada en simulador) del escenario *Plazoleta* dentro de los límites de la sensibilidad del módulo de radio utilizado, (alrededor de 100dBm). Para el escenario *Biblioteca-atrás*, la simulación subestima el valor PL para *LOS* calculado con la antena-iso y sobreestima el valor PL para *LOS* con la antena-patrón.

### 7.5.3 Resultados Simulación IRT – WinProp

A continuación, está la presentación gráfica de ProMan de la predicción de pérdida de trayectoria calculada con parámetros definidos (Iso) y el patrón 3D para ambos escenarios y la tabla que resume los resultados.

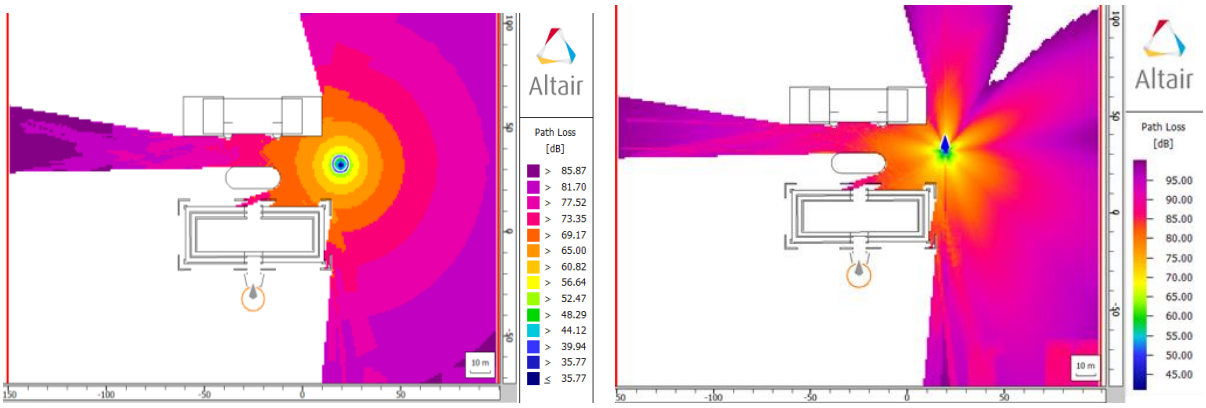



***Figura 31*** *Predicción PL IRT biblioteca (LOS): (izq.) parámetros definidos (der.) patrón 3D, modo visual 3D*

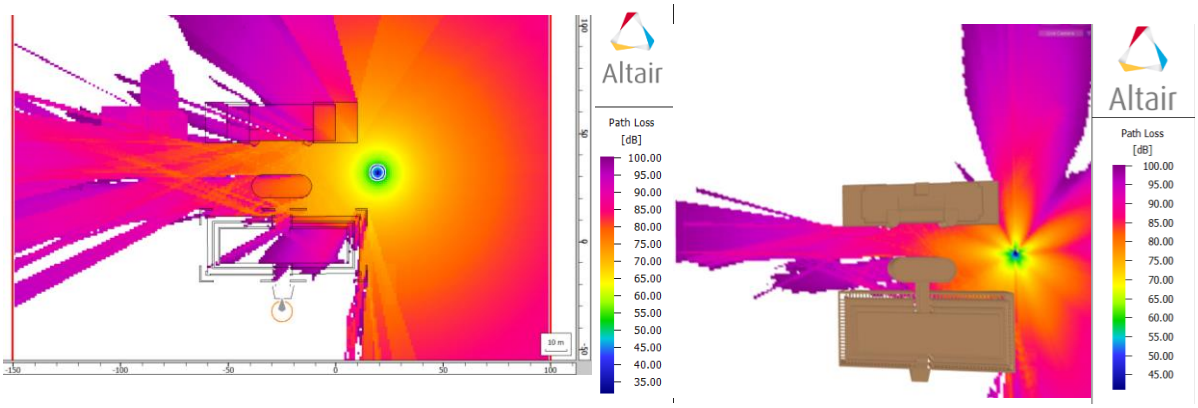



***Figura 32*** *Predicción PL IRT biblioteca (LOS/NLOS): (izq.) parámetros definidos (der.) patrón 3D, modo visual 3D*

A continuación, se observa una tabla resumen de los resultados de predicción del *IRT* para antena con valores definidos en WinProp y con el patrón 3D, para ambos casos se pueden ver los valores máximos y mínimos del área que se configuró para todas las simulaciones y los valores que el programa define con *LOS*.

***Tabla 9*** *Resumen Predicción Path Loss (OSM) WinProp*

| **Resultados Simulación WinProp- IRT (Trazado Inteligente de Rayos)** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Resolución de los resultados de predicción:1m | | | | |
| **Path Loss Resultados** | **Antena WinProp Iso** | | **Antena patrón 3D** | |
| **Antena Tx: Localización Biblioteca-atrás** | **Área** | **LOS** | **Área** | **LOS** |
| Mínimo Valor (dB) | 31.590 | 31.590 | 41.06 | 41.06 |
| Máximo Valor (dB) | 100.14 | 90.05 | 100.01 | 99.98 |
| STD (dB) | 7.778 | 5.867 | 5.948 | 5.974 |

Sobre los resultados mencionados en la tabla, hay que tener presente que en este modelo la distribución del número de puntos con datos calculados es diferente en todos los casos mostrados (Antena-Iso y Antena-Patrón) tanto para el cálculo área completa y los valores que el programa define con *LOS*.

### 7.5.4 Comparación resultados simulación IRT con modelos mediciones

Se extrajeron los valores de pérdida de trayectoria de la simulación a las distancias correspondientes con las mediciones y se les aplicó el ajuste por mínimos cuadrados para realizar las siguientes comparaciones en Matlab.

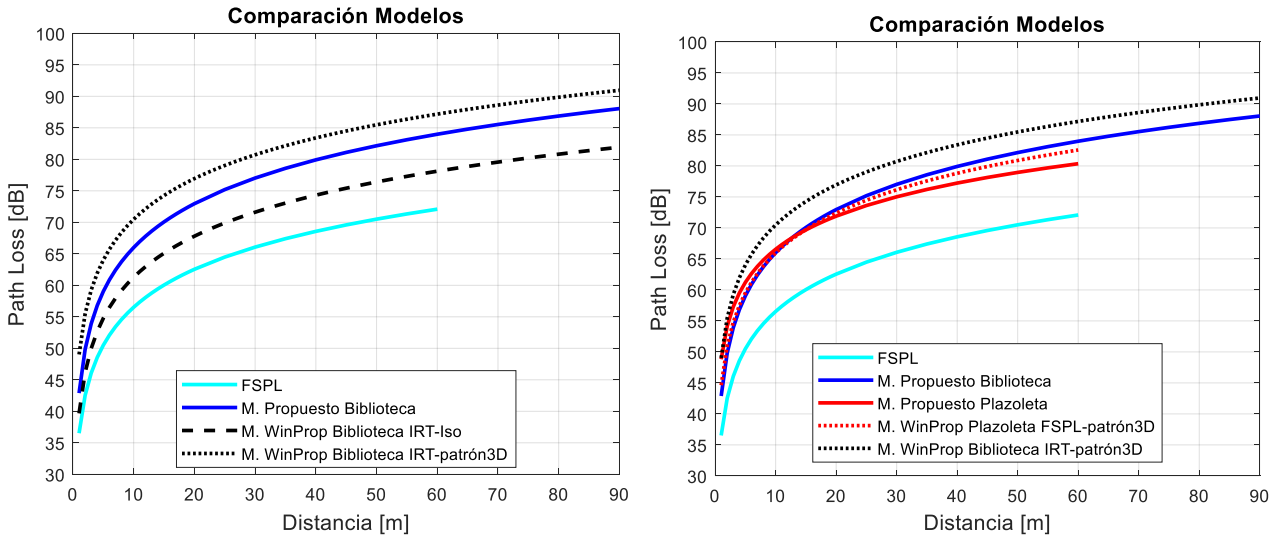



***Figura 33*** *Comparación predicción PL IRT simulación vs modelos propuestos: (izq.) Biblioteca Iso/Patrón 3D, (der.) y OSM-FSPL Plazoleta y Biblioteca*

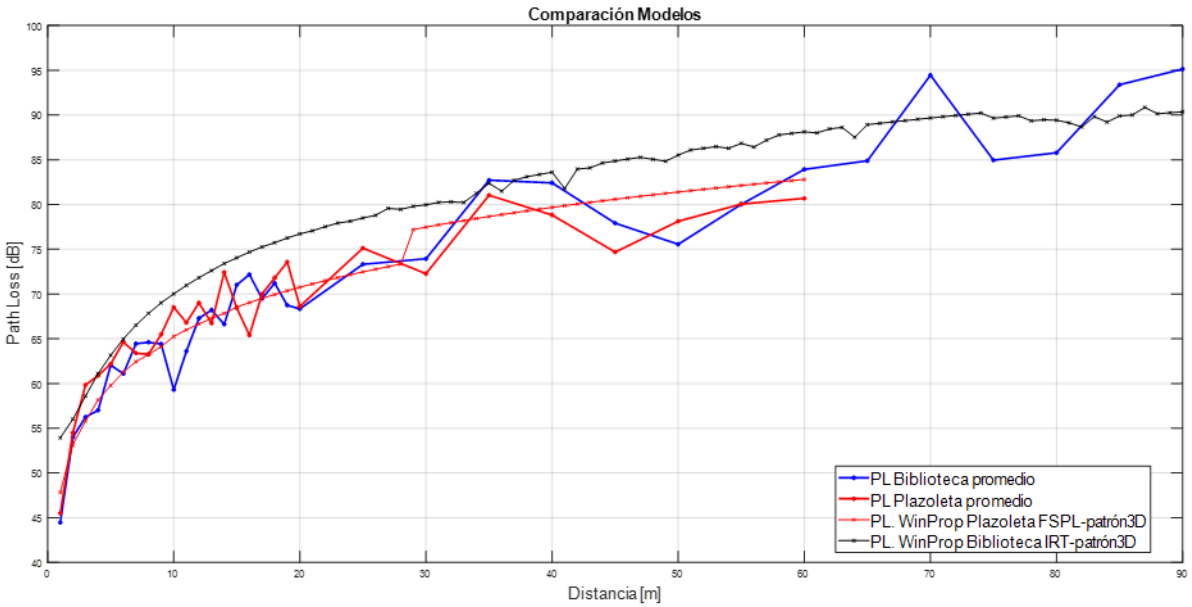



***Figura 34*** *Comparación predicción PL (sin ajuste) de IRT 3D y OSM 3D simulación vs modelos propuesto*

Según los resultados presentados en la tabla 9 y la figura 33, el mínimo valor (en el rango de la distancia estudiada) para la pérdida de trayectoria obtenida con el *IRT* aumenta para el cálculo hecho con el patrón 3D, es decir que la antena-iso subestima este valor. Con respecto al modelo de PL propuesto según las mediciones, la simulación con patrón 3D, en el rango de distancias estudiado, predice valores mayores con el patrón 3D y menores valores con la antena iso. En la figura 34 se observan las comparaciones de los modelos PL propuestos y las simulaciones con patrón 3D de los dos escenarios, aquí se

puede notar que, el modelo PL de espacio libre mejorado del simulador es cercano al modelo propuesto de las medidas para escenario *Biblioteca-atrás* en el rango de 60m. Sin embargo, observando la figura 34, donde se comparan los valores PL (sin ajuste), se ve que los valores predichos de PL con *IRT* (patrón 3D) para distancias mayores a 60m representan mejor a las mediciones. También se observan las pequeñas fluctuaciones de los valores PL con este modelo que no se aprecian a esas distancias en los valores PL predichos por el *OSM*.

Estas pequeñas fluctuaciones que se aprecian pueden darse por los efectos de los mecanismos de propagación *(shadowing y multi-trayecto)* que afectan la propagación de la señal el reflejo en las paredes de los edificios presentes en este escenario, y las difracciones; estos efectos son considerados en modelos como el *IRT* que se aplicó. Esto se puede apreciar en las figuras 31 y 32, en donde se ven los rayos reflejados propagándose por un pasillo formado por los dos edificios y la difracción en las esquinas produciendo contribuciones de señal en zonas definidas como *NLOS* por la simulación. Por ejemplo, comparar figura 31 (der.) con 32 (der.)

# 8. CONCLUSIONES

En general, se puede concluir que:

1. Se realizó una revisión bibliográfica en la cual se examinaron estudios de obtención de modelos para WSN en escenarios exteriores con diferentes características y alturas de antena. Dentro de estos estudios, la mayoría proponen mediciones RSSI para modelar la pérdida de trayectoria. Además, los modelos que se destacaron en la revisión fueron Log-Distance-Model y Log-Normal-Shadowing, así como también el Two Slope-Log Normal Model para antenas sobre nivel el suelo. Se encontraron estudios escasos con simulaciones en escenarios 3D, en este caso, el modelo utilizado es el de Trazado de Rayos. En cuanto al protocolo de comunicación, se encontró en la revisión, que ZigBee es bastante adecuado para las WSN.

2. Se hicieron campañas de medidas de una red inalámbrica con topología punto a punto en dos espacios del campus de la Universidad Eafit; se utilizaron dispositivos con protocolo ZigBee, específicamente los módulos radio XBee ZB de Digi International Inc., con los cuales, se midió la intensidad de la señal recibida.

3. También, se generaron simulaciones 3D en donde se calculó el valor de pérdida de trayectoria y observó la interacción de la señal con el entorno. Para realizar las simulaciones se utilizó el programa WinProp de Altair Engineering Inc.

4. Se obtuvo un modelo semi-empírico de pérdida de trayectoria para cada escenario seleccionado. Los parámetros del modelo se obtuvieron a través del ajuste de curva de mínimos cuadrados de los datos medidos, y la correlación con Log-Distance Path-Loss Model y Log-Normal Shadowing Model.

5. Se evaluó el desempeño de los resultados obtenidos comparando los modelos obtenidos con los de terceros, así como también, con el Modelo de Espacio Libre y el Modelo determinístico de Trazado Inteligente de Rayos.

   En particular, se puede concluir que:

- Teniendo en cuenta las especificaciones técnicas para el módulo Xbee S2C, los datos muestran que la intensidad media de la señal recibida (*RSSI*) para los dos escenarios está por debajo del nivel de referencia de -100dBm (sensibilidad de recepción). Esto se ve reflejado también en el envío exitoso de los paquetes de datos, los cuales, sólo se presentaron 7 pérdidas de paquetes teniendo en cuenta todas las tomas de datos realizadas.

- Las mediciones obtenidas, mostraron que la fluctuación del valor *RSSI* va en aumento en cuanto la separación entre transmisor y receptor crece, esto se vio reflejado en ambos escenarios. En cuanto a la altura en la que se colocaron los dispositivos (2m), esta fue adecuada para favorecer las condiciones de *LOS* para el rango de distancia estudiado en ambos escenarios, sin embargo, hay que tener muy presente que la presencia de personas caminando en medio de los dispositivos transmisor y receptor afectan este tipo de señales inalámbricas, esto es un aspecto importante para tener en cuenta en el diseño de las WSN en cuanto a la elección de la altura en la que se deberían colocar los dispositivos.

- Los resultados de los modelos obtenidos de las mediciones muestran que, el modelo teórico *FSPL* predice un valor de pérdida de trayectoria más bajo que el modelo propuesto, en ambos escenarios; esto da cuenta de la importancia de realizar este tipo de estudios antes de realizar un diseño de WSN.

- Se observa que, en el caso de escenario *Plazoleta-estudiante*, el modelo obtenido de la simulación *OSM* con el patrón de antena 3D es bastante cercano al modelo propuesto. Las simulaciones con el *IRT* para el escenario Biblioteca-atrás con

patrón 3D predice valores de pérdida de trayectoria más altos que las mediciones y con la configuración de la antena iso predice valores de PL menores que las mediciones, esto sucede en el rango de distancia de 60m, sin embargo, para distancias mayores, la simulación representa mejor a las mediciones. También se aprecian fluctuaciones en los valores PL que hace notar que el *IRT* considera los efectos *multipath* sobre la señal.

- Se sabe por la consulta bibliográfica que, los modelos con Trazado de Rayos arrojan valores muy acertados en la estimación de pérdidas de propagación, pero esto depende de la adecuada caracterización de los materiales (las propiedades electromagnéticas) en la banda de frecuencia estudiada. En este estudio se asumió una sola clase de material (ladrillo) en la base de datos utilizada para la simulación y las propiedades de extrajeron de investigaciones realizadas; también hicieron falta otros elementos como las farolas metálicas y los árboles circundantes, lo que llevó a errores en la estimación con *IRT*.

# 9. TRABAJOS FUTUROS-RECOMENDACIONES

Para trabajos futuros se propone:

- Realizar una campaña de medidas para caracterizar con más detalle las pérdidas de propagación en la señal producidas por objetos como los árboles, las ventanas u otros materiales.
- Hacer mediciones a mayores distancias y en un escenario interior, en diferentes pisos entre el transmisor y receptor.
- Utilizar un analizador de espectro para mediciones más precisas.
- Hacer mediciones más detalladas para obtener un patrón de radiación de la antena más acorde al escenario donde se realizan las mediciones.
- Realizar simulaciones del despliegue de una red WSN con los resultados de este estudio.

# BIBLIOGRAFÍA


Acevedo, M. F. (2016). *Real-Time Environmental Monitoring*. Boca Raton, United States: CRC Press.

Ahmed, B., Alvarez, I., & Masa, J. L. (2013). Materials' Insertion Loss AT 2.4, 3.3 and 5.5GHz Bands. *Progress In Electromagnetics Research*, *30*(May), 107–122.

Alsayyari, A., Kostanic, I., & Otero, C. (2014). An Empirical Path Loss Model for Wireless Sensor Network Deployment in a Concrete Terrain Environment. In *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (pp. 218–223). Cocoa Beach, FL, USA. https://doi.org/10.1109/WAMICON.2015.7120311

AWE-Communications. (2006a). Aman User Reference Guide - WinProp Antenna Pattern Editor. In *AMan User reference Guide*.

AWE-Communications. (2006b). Wallman User-Reference Guide. In *WallMan User reference Guide* (pp. 1–32).

AWE Communications GMBH. (2014). ProMan Manual. In *ProMan User reference Guide*.

Azpilicueta, L., López-Iturri, P., Aguirre, E., Mateo, I., Astrain, J. J., Villadangos, J., & Falcone, F. (2014). Analysis of Radio Wave Propagation for ISM 2.4 GHz Wireless Sensor Networks in Inhomogeneous Vegetation Environments. *Sensors*, *14*, 23650–23672. https://doi.org/10.3390/s141223650

Cama-pinto, A., & Pin, G. (2017). Received strength signal intensity performance analysis in wireless sensor network using Arduino platform and XBee wireless modules. *International Journal of Distributed Sensor Network*, *13*(7). https://doi.org/10.1177/1550147717722691

Cama-Pinto, A., Piñeres-Espitia, G., Zamora-Musa, R., Acosta-Coll, M., Caicedo-Ortiz, J., & Sepúlveda-Ojeda, J. (2016). Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, *24*(4), 581–599. https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000400005

Dargie, W., & Poellabauer, C. (2010). *Fundamentals of Wireless Sensor Networks*. United Kingdom: WILEY.

Digi-International. (2018). XBee/XBee-PRO® S2C Zigbee® RF Module. Retrieved from

https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90002002/Default.htm#Concepts/c_90002002_start.htm%3FTocPath%3DXBee%252FXBee-PRO%25C2%25AE%2520S2C%2520Zigbee%25C2%25AE%2520RF%2520Module%7C_____0

Fakhri, A. B., Gharghan, S. K., & Mohammed, S. L. (2018). Path-loss modelling for WSN deployment in indoor and outdoor environments for medical applications. *International Journal of Engineering & Technology*, (August). https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.15409

Fügen, T., Member, S., Maurer, J., Kayser, T., & Wiesbeck, W. (2006). Capability of 3-D Ray Tracing for Defining Parameter Sets for the Specification of Future Mobile Communications Systems, *54*(11), 3125–3137.

Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications* (Cambridge). Cambridge: Cambridge University Press.

Greenberg, E., & Klodzh, E. (2015). Comparison of deterministic, empirical and physical propagation models in urban environments. *2015 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, COMCAS 2015*, (November), 2–4. https://doi.org/10.1109/COMCAS.2015.7360394

Haslett, C. (2008). *Essentials of Radio Wave Propagation*. Ofcom, UK: Press, Cambridge University.

Horvat, G., Sostaric, D., & Žagar, D. (2015). Response surface methodology based power consumption and RF propagation analysis and optimization on XBee WSN module, 437–452. https://doi.org/10.1007/s11235-014-9904-5

Kurt, S., & Tavli, B. (2017). Path-Loss Modeling for Wireless Sensor Networks. *IEEE ANTENNAS & PROPAGATION MAGAZINE*, *59*(February), 18–37. https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2630035

Lara, R., Garcés, K., & Lanchimba, R. (2016). Propagation channel modeling with Zigbee for outdoor scenarios. *Revista Iberoamericana de Las Ciencias Computacionales E Informática*, *5*. Retrieved from http://www.reci.org.mx/index.php/reci/article/view/39

Lara, R., & Merino, D. (2017). On Modeling Wireless Channel for point to point links by using Zigbee technology in Outdoors Scenarios. *ReCIBE. Revista Electrónica de Computación, Informática*, *6*(May), 151–166. Retrieved from

http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=512253717010

Libelium. (2018). Development 2.1. Retrieved from http://www.libelium.com/v12/development/

Lin, W. C., Seah, W. K. G., & Li, W. (2011). Exploiting radio irregularity in the Internet of Things for automated people counting. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, (September 2011), 1015–1019. https://doi.org/10.1109/PIMRC.2011.6139649

Machedon-Pisu, M. (2014). The Impact of Propagation Media and Radio Interference on the Performance of Wireless Sensor Networks with MicaZ Motes. In *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)* (pp. 866–872). Bran, Romania. https://doi.org/10.1109/OPTIM.2014.6850911

Manolakos, E., Logaras, E., & Paschos, F. (2009). Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences , Social-Informatics and Telecommunications Engineering. *Sensor Applications, Experimentation, and Logistics*.

Navarro, A., Guevara, D., & Gómez, J. (2014). Modelado de canal inalámbrico empleando técnicas de trazado de rayos : Una revisión sistemática. *Sistemas & Telemática*, *12*(30), 87–101. Retrieved from https://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/sistemas_telematica/article/download/1859/2397.

Olasupo, T. O., Alsayyari, A., Otero, C. E., Olasupo, K. O., & Kostanic, I. (2017). Empirical Path Loss Models for Low power Wireless Sensor Nodes Deployed on the Ground in Different Terrains. In *IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*. Aqaba, Jordan. https://doi.org/10.1109/AEECT.2017.8257747

Olasupo, T. O., Otero, C. E., Olasupo, K. O., & Kostanic, I. (2016). Empirical path loss models for wireless sensor network deployments in short and tall natural grass environments Modelos de pérdida de ruta empírica para despliegues de red de sensores inalámbricos en entornos de hierba natural cortos y altos. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *64*(9), 4012–4021. https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2583507

Payal, A., Rai, C. S., & Reddy, B. V. R. (2015). Experimental Analysis of Some Radio Propagation Models for Smart Wireless Sensor Networks Applications. In *SAI Intelligent Systems Conference 2015 November 10-11, 2015 | London, UK Experimental* (pp. 338–342). London, UK. https://doi.org/10.1109/IntelliSys.2015.7361164

Ramírez, J. A., Buitrago, J. A., & Marín, J. I. (2014). Red de sensores de larga distancia usando zigbee para el monitoreo y la gestión del riesgo en el departamento del quindío-colombia. *Rev. Invest. Univ. Quindío. (Col.)*, *25*(1), 63–72. Retrieved from http://blade1.uniquindio.edu.co/uniquindio/revistainvestigaciones/adjuntos/pdf/fec1_ID7.pdf

Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications- Principles And Practice* (Prentice H).

Rudd, R., Craig, K., Ganley, M., & Hartless, R. (2014). *Building Materials and Propagation: Final Report*. *Ofcom*.

Safaai-Jazi, A., Riad, S. M., Muqaibel, A., & Bayram, A. (2002). Ultra-wideband Propagation Measurements and Channel Modeling DARPA NETEX Program Through-the-Wall Propagation and Material Characterization. *DARPA NETEX, Arlington*, (August 2014).

Sales de, T., Rodriguez, J. A., Da Silva, S., & Silva, J. (2015). Accuracy of Propagation Models to Power Prediction in WSN ZigBee Applied in Outdoor Environment. In *2015 Sixth Argentine Symposium and Conference on Embedded Systems (CASE)* (pp. 19–24). Argentine. https://doi.org/10.1109/SASE-CASE.2015.7295842

Salous, S. (2013). *Radio Propagation Measurement and Channel Modelling*. *Radio Propagation Measurement and Channel Modelling*. https://doi.org/10.1002/9781118502280

Saunders, S., & Aragón, A. (2007). *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2nded, John Wiley & Sons, Chichester*. England. Retrieved from http://www.elcom-hu.com/Electrical/Antennas /Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems 2nd Ed.pdf

Tarrío, P. (2011). *Métodos de Localización Eficiente para Redes de Sensores Basados en la Medida de la Potencia de la Señal Recibida*. *Tesis Doctoral*.

Terhi Rautiainen. (2002). Verifying path loss and delay spread predictions of a 3D ray

tracing propagation model in urban environment, 2470–2474.

Vazquez, A. A., Vilajosana, X., & Vicario, J. L. (2013). Experimental evaluation of the PHY layer of WSN focused on smart city applications.

Zekavat, M. I. A. S. A. R. (2012). New channel path loss model for near-ground antenna sensor networks, (June 2011), 103–107. https://doi.org/10.1049/iet-wss.2011.0096

ZigBee, A. (2019). ZigBee Alliance. Retrieved from https://www.zigbee.org/