

INDOOR PATH LOSS ANALYSIS IN 5G OVER FRECUENCIES 0,8/3,7/28 GHZ

ANÁLISIS DE PATH LOSS EN 5G PARA AMBIENTES INDOOR EN LAS BANDAS DE FRECUENCIA 0,8/3,7/28 GHZ

**Ing. Juan Carlos Martínez Quintero, MSc. Ing. Edith Paola Estupiñan Cuesta, MSc.
Diego Alejandro Vargas Ayala.**

Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería en Telecomunicaciones

Carrera 11 # 101-80, Bogotá, Colombia.

Tel.: 650 0000, ext. 1614

E-mail: {juan.martinezq, edith.estupinan, u1401171}@unimilitar.edu.co

Abstract: The 5G network planning allows optimizing the network resources, increasing the coverage in indoor/outdoor environments. This planning is more important at high frequencies because the propagation is affected by obstacles and common physics phenomena over propagated signals. This paper presents an indoor propagation study for 5G technology in (LOS) and (NLOS) scenarios in the Universidad Militar Nueva Granada. It was analyzed Path loss and Coverage area at frequencies 0.8-3.7-28GHz. Three scenarios are defined and simulated in Wireless Insite simulation tool. The Path loss results were compared with two theoretical models: Log-Distance and ITU-R-P.1238-10. LOS scenarios show that the Log-Distance model provides accurate results in comparison with high-quality simulators. NLOS scenarios have demonstrated that the results are between both theoretical models. Therefore, both models are considered as the best and worst propagation cases respectively.

Keywords: 5G, millimetric wave, Propagation, Coverage, Indoor, Path loss

Resumen: La planificación de redes 5G permite optimizar el uso de equipos y antenas ampliando cobertura en ambientes outdoor/indoor. Esta planificación es importante por el uso de bandas de mayor frecuencia donde la propagación es afectada por obstáculos y efectos físicos comunes a la propagación de cualquier señal. Este documento presenta un estudio de propagación 5G Indoor en línea de vista (LOS) y con obstáculos (NLOS) en la Universidad Militar Nueva Granada analizando Path loss y cobertura en las frecuencias 0.8-3.7-28GHz. Se definen 3 escenarios simulados en Wireless-Insite. Los resultados de Path loss se comparan con los modelos teóricos Log-Distance y ITU-R-P.1238-10. En LOS, se concluye el modelo Log-Distance es útil en ausencia de simuladores de alto desempeño gracias a que sus resultados son cercanos con los simulados. En NLOS, se demuestra que los resultados están acotados por las curvas de los dos modelos teóricos, permitiendo tener los dos modelos como el peor y el mejor caso en propagación con obstáculos.

Palabras clave: 5G, Onda milimétrica, Propagación, Cobertura, Indoor, Path Loss

1. INTRODUCCION

Las comunicaciones móviles han sido una herramienta de vital importancia para garantizar conexión y movilidad a los usuarios día a día. La evolución de estas tecnologías permite aumentar las tasas de transferencia y ampliar coberturas garantizando que el ancho de banda sea el suficiente para permitir la provisión de voz, video y datos de manera inalámbrica (CRC, 2017). Para el caso específico de 5G y la clara evolución de sus tecnologías antecesoras 1G, 2G, 3G y 4G. 5G se posiciona como una generación móvil que promete mejorar la experiencia en los usuarios finales (MinTIC, 2019), ofreciendo así nuevos servicios con velocidades de descarga de hasta 10

Gbit/s y una latencia inferior a 1 ms (ITU, 2018), además junto con la implementación de antenas MIMO se garantiza un sistema fiable y de alta disponibilidad, permitiendo así avanzar en tecnologías como internet de las cosas (IoT) e inteligencia artificial (IA) (GSMA, 2019). Dentro de los avances de las nuevas tecnologías de banda ancha móvil, el estudio de cobertura de la señal es un aspecto importante que permite mejorar problemas relacionados con la transmisión de las señales, con esto se puede reducir los gastos de energía de manera innecesaria por parte de la estación base (gNodeB) y de esta manera aumentar la cobertura. La propagación de las señales se ve afectada por factores como, el

terreno, el clima y los materiales de los obstáculos que se presentan en el trayecto. Esto último va ligado al tipo de entorno, indoor u outdoor. La evaluación de la propagación se realiza mediante modelos que permiten estimar variables como el Path loss, Delay spread y Excess Path loss, en los diferentes entornos. En entornos interiores fenómenos como la difracción, reflexión y absorción son comunes y requieren ser estudiados, (Liu et al., 2019), (Khaled & Talbi, 2019). De esta manera las simulaciones de radio propagación son fundamentales para el diseño y dimensionamiento de redes inalámbricas, de igual forma estas permiten gestionar el rendimiento de las mismas, (Peña & Bustamante, 2018).

A continuación se relacionan algunas de estas investigaciones para redes 5G: En (Hsiao et al., 2017) se presenta un análisis comparativo de potencia recibida y pérdidas de trayecto en frecuencias de 28 y 38 GHz, mediante simulaciones, en un ambiente real con el modelo de trazado de rayos para propagaciones de onda milimétrica en un entorno outdoor. Se propuso un recorrido de 200 m en una calle de Taipei-Taiwán y se concluyó que las simulaciones de trazados de rayos para frecuencias de onda milimétrica son necesarias para mejorar los campos de cobertura en el despliegue de la tecnología 5G ya que con esto ayudarían a mejorar la cobertura de las redes 5G. En (Alabdullah et al., 2017) se presentan simulaciones de propagación para la tecnología móvil 5G en escenarios de línea de vista (LOS) y no línea de vista (NLOS) correspondientes a un piso de la universidad de Bradford-Reino Unido, usando las frecuencias de 28, 39, 60 y 73 GHz. Las simulaciones realizadas utilizan el modelo 3D de trazado de rayos del software Wireless Insite, donde los escenarios que no tienen línea de vista están caracterizados como rutas, y el escenario restante se encuentra en la zona del transmisor caracterizado como una maya. Con esto se determina que la potencia recibida para los escenarios (NLOS) disminuye por la naturaleza de estas frecuencias (mm-wave). En (Peña & Bustamante, 2018) se realiza un análisis de cobertura, relación señal a ruido denominado por sus siglas en inglés (SNIR) y throughput mediante las simulaciones en el software ICS Telecom EV, del modelo propagación ITU-R 525/526 ajustado al modelo Delta Bullington diffraction geometry model a frecuencias de 28, 38 y 60 GHz en un entorno outdoor en la ciudad de Bogotá-Colombia, usando un sistema MIMO masivo de 128 elementos. Se concluye que los parámetros analizados tuvieron un mejor rendimiento en la frecuencia de 28 GHz debido a que es una frecuencia menor.

En (Sheikh et al., 2018) se presenta un estudio de propagación en un ambiente indoor-outdoor en el centro de NTT Docomo en Japón para la tecnología 5G en altas frecuencias, simulando con

trazado de rayos 3D usando el software “SAGA”. Las frecuencias estudiadas fueron 15, 28 y 60 GHz, donde se obtienen resultados asociados a la intensidad de la señal recibida y se concluye que hay diferencias en la intensidad de la señal en las diferentes frecuencias y que además las señales a altas frecuencia se atenúan de una forma más rápida debido a las altas pérdidas de penetración en las construcciones donde consideran un reto la implementación de esta tecnología a una frecuencia de 60 GHz en un entorno indoor.

En (Li et al., 2018) se presenta un análisis de propagación evaluando el Path loss a 60 GHz para la quinta generación en un entorno indoor. Se realiza una simulación la cual se basa en el método de trazado de rayos (SBR) donde los resultados obtenidos como potencia recibida y root mean square (RMS) son analizados en términos de línea de vista (LOS) y no línea de vista (NLOS). Se determina que estas simulaciones pueden ser útiles para sistemas de comunicaciones de onda milimétrica en ambientes indoor para redes 5G.

En (Liu et al., 2019) se presenta un análisis para las frecuencias de 5, 31 y 90 GHz. Se buscaba identificar el comportamiento de Path loss en los enlaces de 5G, mediante la simulación del método X3D ray-tracing en un entorno indoor en la universidad Swearingen en Carolina del sur y se compara con el ambiente real en condiciones de línea de vista (LOS) y no línea de vista (NLOS). Se determina un error del 0.3% en escenarios LOS y 0.6% en NLOS debido a esto reconocen la utilidad de las simulaciones de trazado de rayos en la implementación de la tecnología 5G.

En (Khaled & Talbi, 2019) se presenta un modelo de propagación indoor evaluando fenómenos como multitrayectoria y desvanecimiento que se presentan. Se realiza la simulación en la frecuencia de 37.2 GHz con diferentes ubicaciones de transmisores y receptores, el método de simulación utilizado fue el procesamiento de imágenes 2D, donde se determina la posibilidad de desarrollar una herramienta que prediga los puntos débiles relacionados a la intensidad de la señal, de esta manera ayudará a la implementación de ondas milimétricas en entornos indoor.

En (Hossain et al., 2019) se presenta un estudio de propagación indoor ubicado en el centro de comunicaciones inalámbricas de la universidad tecnológica de Malasia para la frecuencia de 28 GHz donde se utiliza el modelo ETRT, el cual es un método de trazado de rayos 3D, se utiliza otro modelo el cual es SBRT. Donde se realiza un montaje físico con los mismos parámetros de simulación como ganancias, potencia y frecuencia. Se determina que el modelo ETRT proporciona resultados más acertados a las mediciones frente al modelo SBRT.

Una vez realizado este análisis documental, se determina que la mayoría de los análisis están orientados al modelamiento del canal evaluando diferentes cálculos asociados a la propagación. Por su parte esta investigación se centra en realizar un análisis de propagación evaluando el Path loss en un ambiente indoor para frecuencias de 0.8, 3.7 y 28 GHz para la tecnología 5G. Se eligió como escenario el quinto piso de la universidad Militar Nueva Granada ubicada en Bogotá, Colombia. En relación con los antecedentes se pueden diferenciar con este trabajo en el siguiente aspecto: Se compara el resultado de la simulación de una herramienta especializada y de alto desempeño como lo es Wireless Insite, frente a dos modelos de propagación teóricos clásicos, los cuales han sido utilizados en redes inalámbricas como wifi. Este artículo se organiza inicialmente con la introducción. La sección 2 especifica los principales conceptos técnicos de 5G y propagación. En la sección 3 se define el escenario de prueba, la sección 4 evidencia el análisis de los resultados obtenidos y finalmente la sección 5 y 6 el reconocimiento y las conclusiones.

2. CONTEXTUALIZACIÓN TEÓRICA

A continuación, se destacan algunos de los conceptos importantes en el desarrollo de esta investigación.

2.1 5G (Quinta Generación)

Los estándares 5G asociados a esta tecnología han sido trabajados por varios organismos de estandarización como 3GPP, el cual destaca las bandas de frecuencia y anchos de banda para 5G New radio (NR), (GSMA, 2019). Por su parte en Colombia la Agencia Nacional del Espectro (ANE) y el Ministerio de las TIC (MinTIC) han expuesto los rangos de frecuencia para la tecnología 5G en el territorio. La tabla 1 resume las principales características de las frecuencias en 5G, (ANE, 2019), (3GPP, 2020).

Tabla 1: Relación cobertura-Capacidad para frecuencias 5G

Rangos frecuencia	Cobertura	Ancho de banda
< 1 GHz	Alta	5-20 MHz
1 – 6 GHz	Media	5-100 MHz
>6 GHz	Baja	50-400 MHz

Por otro lado la potencia y antenas para los gNodeB están relacionadas con el tipo de celda, de esta manera en entornos indoor se implementan picoceldas para las cuales su radio no excede los 0.2 Km y están destinadas para una cantidad de 30 a 100 usuarios por celda; la potencia que manejan está entre los 23.97 y los 30 dBm y el tipo de antenas comúnmente utilizado MIMO y en casos urbanos MIMO masivo (ANE, 2016), (Peña & Bustamante, 2018).

2.2 Modelo de propagación

Está definido como un modelamiento matemático que tiene como propósito determinar de qué manera el medio influye en la energía emitida de una estación transmisora a una estación receptora, donde las señales electromagnéticas son afectadas por fenómenos de difracción, reflexión y absorción, en ambientes indoor. Los modelos de propagación estiman un valor cercano con el cual ayudan a dimensionar los sistemas de telecomunicaciones (Constantino Pérez Vega, 2007). La tabla 2 muestra la clasificación de los modelos de propagación según su entorno, frecuencia y radio de la celda.

*Tabla 2: Características de los modelos de propagación *Modelos teóricos, I: Indoor, O: Outdoor, SR: sin restricciones.*

Modelo	I	O	Rango frecuencia (MHz)	Radio Celda (Km)
X3D	X	X	100-100000	≤ 10
Hata		X	150-1500	1-20
Vertical Plane		X	100-100000	≤ 100
Full 3D	X	X	100-20000	≤ 10
COST Hata		X	100-20000	1-20
*Log-Distance	X	X	SR	SR
*ITU-R SR P.1238-10	X		300-450000	≤ 1
*ITU-R OSR		X	300-100000	≤ 1
*SUI model	X	X	2500-2700	≤ 10

El comportamiento de los modelos puede ser visualmente analizado gracias a software específico que permite calcular variables como: Path loss, Delay spread, potencia recibida, Excess Path loss, Path gain, entre otros. Para esta investigación se seleccionaron las variables Path loss y la potencia recibida en el análisis.

2.2.1 Path loss

Se define como la relación de la potencia transmitida a la potencia recibida entre un par de antenas, se expresa en decibeles e incluye todas las pérdidas asociadas con la interacción de la onda con cualquier objeto presente entre la antena transmisora y receptora, (Saunders, 2007). La figura 1 ilustra dicho comportamiento.

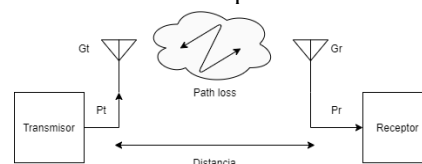


Fig. 1. Path loss "Elaboración propia"

2.3 Modelo X3D

El modelo de propagación denominado “X3D”, es un modelo de propagación 3D, capaz de correr sobre unidades de procesamiento gráfico (GPU) y mejorar el rendimiento en la simulación, se define como un modelo de trazado de rayos 3D mediante el algoritmo shouting and bouncing ray, (SBR). El proceso de este trazado de rayos consiste en emitir rayos desde los puntos transmisores los cuales serán propagados por el escenario, estos rayos interactúan con los obstáculos presentes, hasta llegar a los puntos receptores. Se puede destacar que el método de trazado de rayos tiene en cuenta fenómenos asociados a la propagación como la difracción y la reflexión. SBR es un algoritmo que utiliza Exact Path Calculations, (EPC) para corrección y reducción de errores en los cálculos asociados a la potencia y la fase. X3D entrega resultados con alto grado de precisión, además tiene características asociadas a la tecnología 5G como: Sistemas MIMO, tipos de terrenos, ambientes (indoor, outdoor, foliage) y especialmente es usado en frecuencias de onda milimétrica (*mm-wave*) (Remcom Inc., 2019). La ecuación (1) define el Path loss como:

$$L_{path}(dB) = P_t(dBm) - P_r(dBm) + G_t(dBi) + G_r(dBi) - L_s(dB) \quad (1)$$

Donde G_t y G_r son el valor de las ganancias de las antenas transmisora y receptora (dBi), P_t es la potencia transmitida (dBm), P_r es la potencia recibida (dBm) y L_s es la suma de todas las pérdidas en el sistema (dBm) (Remcom Inc., 2019).

2.4 ITU-R SR P.1238-10

Este modelo es conocido como indoor P.1238-10 aportado por la ITU, este asume que tanto el transmisor y el receptor deben estar dentro del mismo escenario o edificio. Para calcularlo, el modelo usa una aproximación del Path loss asociado con estadísticas de desvanecimiento, donde incluye una asignación implícita de coeficientes de pérdida de potencia asociados a la transmisión a través de paredes y obstáculos. La ecuación (2) define el modelo como:

$$PL_{total}(dB) = 20\log_{10}(f) + N\log_{10}(d) + Lf(n) - 28 \quad (2)$$

Donde N es el coeficiente de pérdidas de potencia; f es la frecuencia (MHz), d es la distancia de separación (m) entre el transmisor y el receptor, Lf es el factor de penetración con el suelo (dB) y n es el número de pisos entre el transmisor y el receptor, donde $n \geq 0$. $Lf = 0$ dB para $n = 0$. Los valores de N utilizados para el cálculo en este documento son 22.5, 27 y 29.9 respectivamente para las frecuencias mencionadas en condiciones de línea de vista y no línea de vista, (ITU, 2019).

2.5 Log-Distance

Este modelo de propagación ha sido utilizado en otras aplicaciones como wifi, el cual usa la variable path loss exponent (PLE) que depende

del tipo de ambiente y tiene en cuenta una distancia de referencia comúnmente de 1m. La ecuación (3) describe el modelo.

$$PL(dB) = PL_{d0} + 10 * n * \log_{10}\left(\frac{d}{d0}\right) \quad (3)$$

Donde PL_{d0} es el Path loss en espacio libre a una distancia de referencia (dB), n es el PLE y d es la distancia entre el transmisor y receptor. La ecuación (4) define el Path loss en espacio libre.

$$PL_{d0}(dB) = 20 * \log_{10}\left(\frac{4\pi d0}{\lambda}\right) \quad (4)$$

Para la ecuación (4), $d0$ es la distancia de referencia y λ la longitud de onda, (Rath et al., 2017). El valor del PLE utilizado fue 1.6 en escenarios de línea de vista y 4 en escenarios de no línea de vista para las tres frecuencias, (Srinivasa & Haenggi, n.d.).

3. DESARROLLO Y ENTORNO DE SIMULACION

El escenario en estudio se muestra en las figuras 2 y 3, el cual corresponde al piso 5 de la Universidad Militar Nueva Granada, sede Bogotá, Colombia. En la figura 4 se evidencia el plano del escenario. Las dimensiones corresponden a un largo de 72 m, un ancho de 17 m y una altura de 3 m. Se compone por 13 salones, 2 baños, un ascensor y dos accesos de escaleras. Los materiales de construcción de este escenario son, ladrillo, concreto, vidrio, madera y metal.



Fig. 2. Corredor quinto piso de la universidad Militar Nueva Granada vista norte



Fig. 3. Corredor quinto piso de la universidad Militar Nueva Granada vista sur

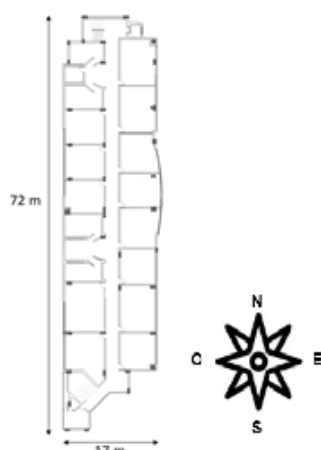


Fig. 4. Plano de planta quinto piso de la universidad Militar Nueva Granada

Para la simulación en este escenario se ubicó el transmisor en un punto central del escenario. Se seleccionaron 3 rutas de receptores separados 1m en el corredor principal del escenario con un recorrido de 28 m hacia el sur, 35 m hacia el norte y 24m en sentido noroeste con respecto al transmisor, aparte de esto se configura una zona de receptores separados 1.5 m para evidenciar el comportamiento de la cobertura en todo el escenario a las frecuencias de 0.8, 3.7 y 28 GHz. En la tabla 3 y la figura 5 se evidencian las características de los escenarios de medición y la configuración en Wireless Insite respectivamente. Los parámetros de simulación para las frecuencias en estudio se definen en la tabla 4.

Tabla 3: características de los escenarios para la simulación y calculo

Características	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
Longitud	28 m	35 m	24 m
Escenario	LOS	LOS	NLOS
Espaciamiento	1 m	1 m	1 m
PLE	1,6	1,6	4
N	22.7,27,29.9	22.7,27,29.9	22.7,27,29.9

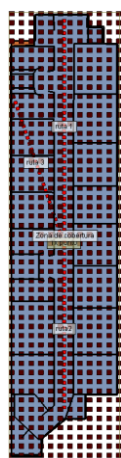


Fig. 5. Diagrama del plano de planta en Wireless Insite

Tabla 4: Parámetros de simulación a 0.8, 3.7 y 28 GHZ

Parámetro	Valor		
Frecuencia	0.8 GHz	3.7 GHz	28 GHz
Ancho de banda	10 MHz	10 MHz	10 MHz
Potencia Tx	23.97 dBm	23.97 dBm	23.97 dBm
Ganancia antena Tx	6 dBi	6 dBi	10 dBi
Ganancia antena Rx	6 dBi	6 dBi	10 dBi
Altura antena Tx	2.8 m	2.8 m	2.8 m
Altura antena Rx	1.5m	1.5m	1.5m
Arreglo MIMO	4x4	4x4	4x4
Nº reflexiones	6	6	6
Nº difracciones	1	1	1

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados. Inicialmente son comparados los resultados asociados al Path loss obtenidos con la herramienta de simulación Wireless Insite, frente a los dos modelos teóricos anteriormente descritos en las tres frecuencias seleccionadas.

4.1 Análisis de Path loss

Para este análisis se realiza una comparación en la plataforma de uso libre Júpiter, exportando los resultados simulados. Allí se comparan frente a los dos modelos teóricos seleccionados. Los resultados se muestran en las figuras 6-11 y en la tabla 5.

A. 0.8 GHz

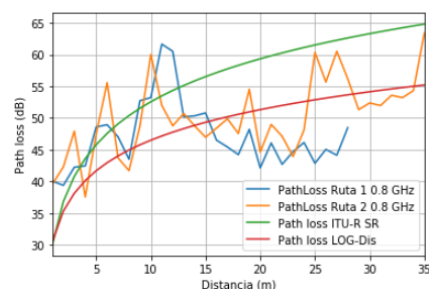


Fig. 6. Comparación modelo WI, ITU, Log-Distance a 0.8 GHz

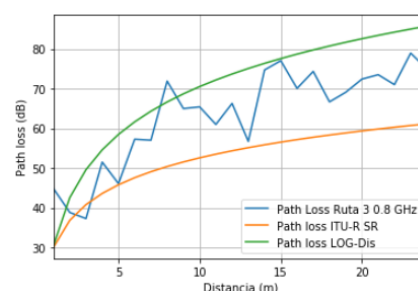


Fig. 7. Comparación modelo WI, ITU, Log-Distance a 0.8 GHz con obstáculos

B. 3.7 GHz

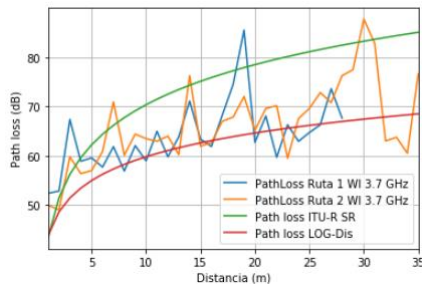


Fig.8. Comparación modelo WI, ITU, Log- Distance a 3.7 GHz

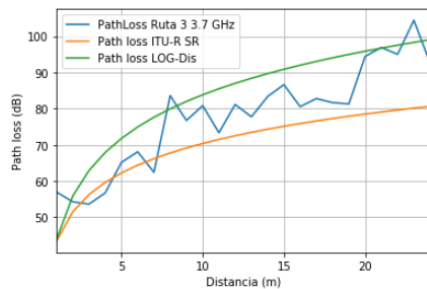


Fig.9. Comparación modelo WI, ITU, Log- Distance a 3.7 GHz con obstáculos

C. 28 GHz

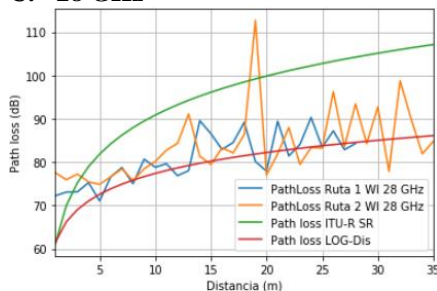


Fig.10. Comparación modelo WI, ITU, Log- Distance a 28 GHz

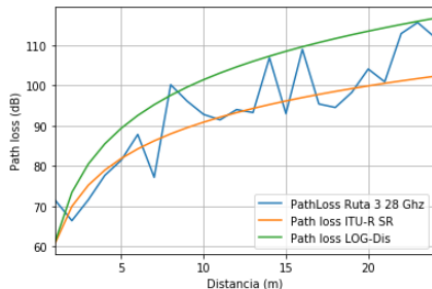


Fig.11. Comparación modelo WI, ITU, Log- Distance a 28 GHz con obstáculos

Tabla 5: Error porcentual de los resultados teóricos frente a los simulados, f : frecuencia

f (GHz)	Modelos	Error experimental ruta 1			
		5m	15m	25m	NA
0,8	WI -ITU-R	6,1%	10,1%	30,3%	NA
	WI-Log-Dis	16,6%	3,0%	18,9%	NA
3,7	WI -ITU-R	4,3%	15,6%	20,2%	NA
	WI-Log-Dis	8,3%	1,2%	2,2%	NA
28	WI -ITU-R	13,2%	9,9%	18,8%	NA
	WI-Log-Dis	2,1%	7,9%	0,4%	NA
	Modelos	Error experimental ruta 2			
		5m	15m	25m	35m
0,8	WI -ITU-R	3,6%	16,9%	1,9%	2,2%
	WI-Log-Dis	13,8%	4,8%	14,2%	14,8%
3,7	WI -ITU-R	8,4%	17,5%	14,2%	9,9%

28	WI-Log-Dis	3,7%	1,1%	5,2%	11,8%
	WI -ITU-R	7,8%	16,4%	18,0%	19,8%
	WI-Log-Dis	3,1%	0,9%	0,6%	1,5%
		Error experimental ruta 3			
0,8	Modelos	5m	10m	15m	20 m
	WI -ITU-R	0,6%	24,4%	36,2%	22,0%
3,7	WI -ITU-R	4,7%	14,9%	15,3%	20,3%
	WI-Log-Dis	9,2%	3,6%	4,7%	1,5%
28	WI -ITU-R	0,5%	2,1%	3,3%	4,2%
	WI-Log-Dis	8,9%	8,5%	14,3%	8,3%

En las figuras 6 a 11 se pueden identificar los resultados de Path loss vs distancia en las diferentes frecuencias para la simulación realizada con la herramienta Wireless Insite. En estas gráficas se incluye el comportamiento de los modelos teóricos. Se observa que los resultados de la simulación siguen la tendencia de los modelos teóricos con los que se compara. De la tabla 5 se observa que los errores más altos se presentan en la frecuencia más baja (0.8 GHz) cuando hay línea de vista, es decir, para las rutas 1 y 2. En este caso como se observa en la figura 6 a medida que aumenta la distancia los resultados son más cercanos al modelo Log-Distance. Para la frecuencia de 3.7 GHz y especialmente para la de 28 GHz se hace más evidente este comportamiento como se aprecia en las figuras 8 y 10. En presencia de obstáculos (ruta 3) se observa un comportamiento muy similar para las tres frecuencias, la simulación se mantiene entre las dos curvas sin que existan picos que sobresalgan en gran medida por encima o por debajo de estas dos curvas. De esto último se puede concluir que el modelo ITU-R SR P.1238-10 puede tomarse como el peor de los casos para la propagación indoor con obstáculos y que una buena aproximación podría estar en una curva media entre los dos modelos. Por último cabe resaltar que los datos en general fluctúan debido a las reflexiones y difracciones configuradas en la simulación para todos los casos.

Se comparan los resultados obtenidos de la simulación para la ruta 2 en las diferentes frecuencias y se ven en la figura 12. En esta figura se evidencia claramente que a mayor frecuencia las pérdidas son mayores.

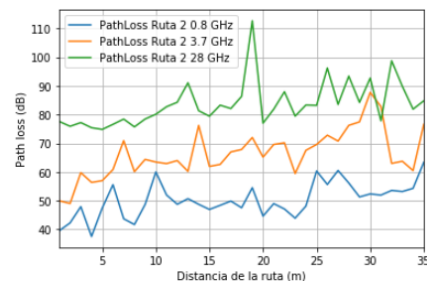


Fig. 12. Comparación Path loss a 0.8/3.7 y 2.8 GHz WI

4.2 Propagación en el escenario

Una vez evidenciado el comportamiento del Path loss en las tres frecuencias en las rutas establecidas, se analiza la potencia recibida en todo el escenario. A partir de un mapa de colores se puede observar la disminución de potencia recibida de acuerdo con la distancia y los obstáculos ubicados en la zona de cobertura, estos resultados se muestran en las figuras 13,14 y 15. Las tablas 6, 7 y 8 muestran los colores que representan los niveles de potencia recibida para cada frecuencia.

Tabla 6: Niveles de potencia recibida a 0.8 GHz

Potencia (dBm)	Color
-2.1 a -20.0	Rojo
-20.0 a -37.9	Naranja
-37.9 a -55.8	Amarillo
-55.8 a -73.7	Verde
-73.7 a -91.6	Azul
-91.6 a -109.5	Púrpura

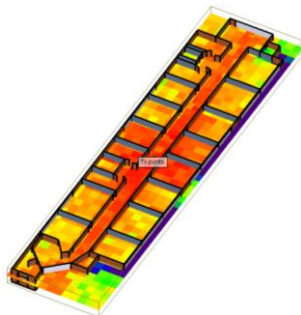


Fig. 13. Mapa de cobertura a 0.8 GHz

Tabla 7: Niveles de potencia recibida a 3.7 GHz

Potencia (dBm)	Color
-2.4 a -23.6	Rojo
-23.6 a -44.8	Naranja
-44.8 a -66.0	Amarillo
-66.0 a -87.2	Verde
-87.2 a -108.4	Azul
-108.4 a -129.6	Púrpura

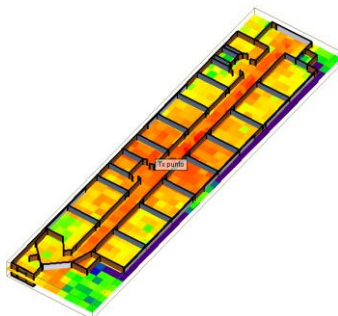


Fig. 14. Mapa de cobertura a 3.7 GHz

Tabla 8: Niveles de potencia recibida a 28 GHz

Potencia (dBm)	Color
-2.4 a -27.2	Rojo
-27.2 a -52.0	Naranja
-52.0 a -76.7	Amarillo
-76.7 a -101.5	Verde
-101.5 a -126.3	Azul
-126.3 a -151.1	Púrpura

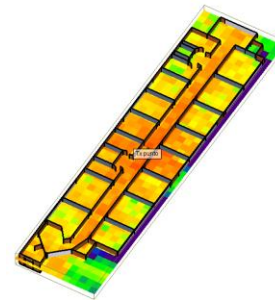


Fig. 15. Mapa de cobertura a 28 GHz

La cobertura en el escenario se puede validar comparando los resultados del nivel potencia recibida en la simulación frente a los niveles de referencia de algunos operadores de servicio internacionales y nacionales como Vodafone, Orange, Claro, Tigo y Movistar. En la tabla 8 se muestra un referente de potencia recibida vs cobertura de acuerdo con estos operadores, (Vodafone, 2020),(Claro, 2020).

Tabla 8: Estado de cobertura según nivel de potencia recibida

Nivel de señal	Estado de cobertura
-30 a -80 dBm	Con cobertura
-81 a -90 dBm	Con cobertura
-90 a -102 dBm	Con cobertura
-102 a -115 dBm	Sin cobertura
<-115 dBm	Sin cobertura

Comparando con los resultados obtenidos a las tres frecuencias se evidencia que a 0.8 y 3.7 GHz, se garantiza una cobertura total del escenario. En la frecuencia de 28 GHz, en algunos puntos extremos del escenario la potencia recibida es débil, esto puede mejorarse usando antenas con ganancias mayores. Con los resultados de este tipo de simulaciones se puede planificar de mejor forma la implementación de redes 5G sin sobredimensionar la infraestructura que será instalada.

5. RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada y Grupo de investigación GISSIC, semillero Maxwell por el apoyo en la realización de este trabajo y a REMCOM por la provisión de la licencia del software de simulación utilizado.

6. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha analizado la propagación en interiores de señales 5G a partir del Path loss de manera teórica y simulada para frecuencias de 0.8, 3.7 y 28 GHz. Los modelos de propagación son analizados en condiciones de LOS y NLOS en un entorno indoor. La simulación fue llevada a cabo en el software Wireless Insite y los datos fueron tratados y comparados con los modelos de propagación Log-Distance e ITU-R P.1238-10. Se concluye que en línea de vista el modelo más aproximado a la simulación es el Log-Distance en las tres frecuencias y a medida

que se aumenta la frecuencia la coincidencia con este modelo es mayor. En el caso de propagación con obstáculos se evidenció que los resultados están acotados por encima del modelo ITU-R P.1238-10 y por debajo del modelo Log-Distance, en muy pocos casos el comportamiento de la simulación se sale de esta tendencia y cuando lo hace es de forma leve. En este sentido se puede decir que el modelo ITU-R P.1238-10 es el peor de los casos para la propagación con obstáculos y el modelo Log-Distance es el mejor de los casos. En cuanto a cobertura, la propagación a una frecuencia de 28 GHz tiende a debilitarse demasiado en los extremos del escenario, sin embargo, este aspecto puede mejorar con la implementación de antenas MIMO con mayor ganancia. Esto último ratifica la importancia de la simulación de propagación en redes 5G en la fase de planificación para evitar problemas de dimensionamiento.

REFERENCIAS

- Peña, J. E. A., & Bustamante, R. A. G. (2018, July 2). Radiopropagation Simulations in 28 GHz, 38 GHz and 60 GHz with 128 Elements Massive MIMO Array for 5G Networks. *2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference, LAMC 2018 - Proceedings*.
- Liu, J., Matolak, D. W., Mohsen, M., & Chen, J. (2019). Path loss modeling and ray-tracing verification for 5/31/90 GHz indoor channels. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2019-September*.
- Alabdullah, A. A., Ali, N., Obeidat, H., Abd-Alhameed, R. A., & Jones, S. (2017). Indoor millimetre-wave propagation channel simulations at 28, 39, 60 and 73 GHz for 5G wireless networks. *2017 Internet Technologies and Applications, ITA 2017 - Proceedings of the 7th International Conference*, 235–239.
- Hossain, F., Geok, T., Rahman, T., Hindia, M., Dimiyati, K., Ahmed, S., Tso, C., & Abd Rahman, N. (2019). An Efficient 3-D Ray Tracing Method: Prediction of Indoor Radio Propagation at 28 GHz in 5G Network. *Electronics*, 8(3), 286.
- Li, S., Liu, Y., Lin, L., Sun, D., Yang, S., & Sun, X. (2018, October 17). Simulation and Modeling of Millimeter-Wave Channel at 60 GHz in Indoor Environment for 5G Wireless Communication System. *2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, ICCEM 2018*.
- Khaled, K., & Talbi, L. (2019). Case study of radio coverage in complex indoor environments for 5G communications. *7th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments, WiSEE 2019 - Conference Proceedings*, 105–110.
- Sheikh, M. U., Sæ, J., & Lempinen, J. (2018). Multipath Propagation Analysis of 5G Systems at Higher Frequencies in Courtyard (Small Cell) Environment. *IEEE 5G World Forum, 5GWF 2018 - Conference Proceedings*, 239–243.
- Hsiao, A. Y., Yang, C. F., Wang, T. S., Lin, I., & Liao, W. J. (2017). Ray tracing simulations for millimeter wave propagation in 5G wireless communications. *2017 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Proceedings, 2017-January*, 1901–1902.
- Constantino Pérez Vega, J. M. Z. S. de la M. A. C. L. (2007). *Sistemas de telecomunicación*. <https://books.google.com.co/books?id=y5s3XIaE46UC&pg=PA438&dq=que+son+modelos+de+propagacion&hl=es419&sa=X&ved=que+son+modelos+de+propagacion>
- Comisión de Regulación de Comunicaciones. (2017). *Resolucion 5161 de 2017*. <https://www.crcm.gov.co/resoluciones/00005161.pdf>
- GSMA. (2019). *Espectro 5G Posición de política pública de la GSMA*. <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/10/5G-Spectrum-Positions-SPA.pdf>
- Saunders, S. R. (2007). *ANTENNAS AND PROPAGATION FOR WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS* (Segunda Edición).
- Remcom Inc. (2019). *Wireless InSite Reference Manual. Version 3.3.3*, 1–500.
- Rath, H. K., Timmadasari, S., Panigrahi, B., & Simha, A. (2017). *Realistic Indoor Path Loss Modeling for Regular WiFi Operations in India*.
- ANE. (2019). *Documento de Consulta Pública sobre las Bandas De Frecuencia para 5G en Colombia*. http://portalanterior.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/consultapublica/5G/20190401_Consulta_Publica_5G_ANE_Colombia.pdf
- ITU. (2018). *Sentando las bases para la 5G: Oportunidades y desafíos*. https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-BB_5G_01-2018-PDF-S.pdf
- ITU. (2019). *RECOMMENDATION ITU-R P.1238-10 - Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz**. <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>
- José Javier Anguís Horno, J. R. C. B. (2008). *Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College*.
- ANE. (2016). *Resolución 754 de 2016* (p. 50). http://www.ane.gov.co/images/COMUNICACIONES2016/RESOLUCION_754_2016.pdf
- Srinivasa, S., & Haenggi, M. (n.d.). *Path Loss Exponent Estimation in Large Wireless Networks*.

SITIOS WEB

- Claro. (2020). *Consulta la cobertura de los servicios móviles de Claro Colombia*. <https://www.claro.com.co/personas/sopORTE/mapas-de-cobertura/>
- Vodafone. (2020). *Consultar el mapa de cobertura móvil 5G, 4G+,LTE 4G, 3G o 2G | Vodafone particulares*. <https://www.vodafone.es/c/conocenos/es/vodafone-espana/mapa-cobertura-movil/>
- 3GPP. (2020). *3GPP specification series: 38series*. <https://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm>