



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Evaluación de Modelos de Canal para los Sistemas 5G

Autor: Saúl Adrián Inca Sánchez

Director 1: José Francisco Monserrat Del Rio

Director 2: Daniel Calabuig Soler

Fecha de comienzo: 26/11/2013

Lugar de trabajo: Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM

RESUMEN

Apenas se han puesto en marcha las primeras redes 4G o LTE (*Long Term Evolution*) y ya se espera para el año 2020 el inicio del despliegue de las redes móviles 5G, con las que se podrían alcanzar velocidades teóricas de un gigabit por segundo, frente a los 100 megabits por segundo de las redes 4G.

La inversión de la Unión Europea (UE) en la tecnología 5G, es relevante y tiene como finalidad reforzar los conocimientos técnicos de la UE y el liderazgo en el campo de la banda ancha. [1] Por tal motivo, en septiembre del 2013, la UE lanzó el proyecto METIS (*Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society*), como primera actividad internacional de investigación a gran escala sobre los sistemas 5G. Por otra parte, el mismo año, la UE anunció becas de investigación por valor de hasta 50 millones de euros para desarrollar la tecnología 5G [2]. Casos similares suceden alrededor del mundo, por ejemplo, el Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de Corea del Sur anunció una inversión de 1200 millones de euros para el desarrollo de una red móvil 5G estimando que las ventas con la infraestructura 5G podrían llegar a los 250 mil millones de euros entre 2020 y 2026 [3].

Que el interés por la nueva tecnología 5G sea tan alta no es sorprendente, ya que el desarrollo de las tecnologías de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas se vincula directamente a una gran demanda de usuarios. De hecho, el número de usuarios de teléfonos móviles llegarán a los 9.300 millones en 2019 de los cuales más del 60 por ciento, unos 5.600 millones serán usuarios de “*Smartphones*” según el informe de “*Mobility Report*” de la compañía Ericsson [4].

Una de las claves para el desarrollo y la implementación de la nueva tecnología 5G, consiste en resolver uno de los principales problemas asociadas a las nuevas tecnologías de comunicaciones inalámbricas que es, la propagación del canal radio. Por tal motivo, es de interés común establecer un modelo de propagación que sea válido para los diferentes entornos que incluyen entornos sub urbanas, urbanos y urbanos densos, con el cual se pueda analizar correctamente las pérdidas de propagación de los futuros sistemas de comunicaciones inalámbricas.

En consecuencia, el presente trabajo de fin de master, tiene como objetivo analizar los diferentes modelos de propagación del canal radio, para determinar un modelo de canal realista, que es esencial para una evaluación precisa del rendimiento y prestaciones de la nueva tecnología 5G. Este modelo será útil para establecer el número de emplazamientos de células necesarias para la cobertura de una red, también será útil en la determinación de la ubicación de las estaciones base para el rendimiento óptimo de la red.

Se toman los modelos de propagación propuestos por los grupos 3GPP, IMT-Advanced, WINNER y METIS como marco de referencia. Una vez completada la evaluación detallada de los modelos de propagación mediante simulaciones de entornos sintéticos y entornos reales, se realiza un análisis de cada uno de ellos que nos permite obtener una comparación cuantitativa de los valores de pérdidas de propagación.

Finalmente, con los resultados obtenidos, se concluye que el modelo de propagación de METIS es el apropiado para evaluar las prestaciones de los sistemas 5G, debido a su gran aproximación entre los resultados obtenidos entre este modelo y valores reales extraídos de una campaña de medidas.

Una extensión de esta tesina se puede hacer realizando más mediciones para cubrir áreas urbanas con otras características que no fueron incluidos en este trabajo. Será interesante conocer las propiedades de las pérdidas de propagación en estos escenarios para este tipo de modelos y utilizar estos resultados en el futuro para el ajuste fino de los modelos de canal móvil para la tecnología 5G.

Índice de contenido

Introducción y Objetivos	7
I.1 Introducción	7
I.2 Objetivos de la Tesina	7
Capítulo II	8
Estado del Arte	8
II.1 Canal Radio.....	8
II.2 Fenómenos básicos en la Propagación	8
II.2.1 Reflexión.....	8
II.2.2 Difracción	8
II.2.3 Dispersión.....	8
II.2.4 Entorno de propagación.....	9
II.2.4.1 Macrocela.....	9
II.2.4.2 Celda Pequeña.....	9
II.2.4.3 Microcela.....	9
II.2.4.4 Picocelda	9
II.2.5 Modelo de Canal	10
II.2.6 Tipos de desvanecimiento.....	10
II.2.6.1 Pérdidas de propagación.....	10
II.2.6.1.1 Modelo de propagación en el espacio libre	10
II.2.6.1.2 Modelos empíricos de pérdidas de propagación	11
II.2.6.2 Desvanecimiento Lento.....	17
II.2.6.3 Desvanecimiento Rápido.....	17
II.2.7 Link Budget.....	17
Capítulo III	19
Comparación de Modelos	19
III.1 Método de evaluación	19
III.2 Comparación de las ecuaciones de los modelos de propagación.....	19
III.2.1 Puntos con línea de vista (LoS).....	20
III.2.2 Puntos sin línea de vista (NLoS)	20
III.2.3 Puntos “Outdoor to Indoor” O2I	21
III.2.3.1 Puntos “Outdoor to Indoor” O2I sin línea de vista “NLoS”	21
III.2.3.2 Puntos “Outdoor to Indoor” O2I con línea de vista “LoS”	22
III.3 Comparación de los modelos de propagación en un escenario sintético	23
III.3.1 Escenario Sintético	23

III.3.2	Análisis OUTDOOR.....	24
III.3.2.1	Validación de los resultados de los modelos de propagación para puntos Outdoor.	28
III.3.2.2	Comparación de los resultados.....	30
III.3.3	Análisis INDOOR	31
III.3.4	Análisis Indoor + Outdoor	34
III.4	Campaña de medidas.....	35
Capítulo IV	39
Conclusiones	39
Bibliografía	40

Índice de figuras

Figura 1: Distancias para 3GPP 3D - Outdoor [10]	11
Figura 2: Distancias para 3GPP 3D - Indoor [10]	11
Figura 3 : Geometría del escenario - METIS [13].....	14
Figura 4 : Comparación de modelos de <i>Path loss</i> LoS @fc=2GHz, log.	20
Figura 5 :Comparación de modelos de <i>Path loss</i> LoS @fc=2GHz , lineal	20
Figura 6 :Comparación de modelos de <i>Path loss</i> NLoS @fc=2GHz, log	21
Figura 7: Comparación de modelos de <i>Path loss</i> NLoS @fc=2GHz, lineal.....	21
Figura 8 : Comparación de modelos de <i>Path loss</i> O2I NLoS @fc=2GHz, log.....	22
Figura 9: Comparación de modelos de <i>Path loss</i> O2I NLoS @fc=2GHz, lineal	22
Figura 10 : Comparación de modelos de <i>Path loss</i> O2I LoS @fc=2GHz, log.....	23
Figura 11 : Comparación de modelos de <i>Path loss</i> O2I LoS @fc=2GHz, lineal.....	23
Figura 12 :Vista 3D del escenario sintético	23
Figura 13 : Vista de alzada del escenario sintético 2D	24
Figura 14 : CDF - <i>Path loss</i> en el callejero (Ground).....	25
Figura 15 : Comparación de los resultados del modelo METIS en el escenario sintético.....	25
Figura 16 : Comparación de los resultados del modelo 3GPP en el escenario sintético	26
Figura 17 :Comparación de los resultados del modelo WINNER II en el escenario sintético	27
Figura 18 : Comparación de los resultados del modelo IMT-Advanced en el escenario sintético	27
Figura 19 : Comparación del resultado final de los modelos	27
Figura 20 : Escenario sintético y puntos aleatorios usados para la comparación.....	28
Figura 21 : Comparación de resultados entre los modelos.....	30
Figura 22 : CDF O2I, 1rst Floor.....	31
Figura 23 : CDF O2I, 2nd Floor.....	31
Figura 24 : CDF O2I, 3rd Floor	31
Figura 25 : CDF O2I, 4th Floor	31
Figura 26 : CDF O2I, 5th Floor	32
Figura 27 : CDF O2I, 6th Floor	32
Figura 28 : CDF O2I, 7th Floor	32
Figura 29 : CDF O2I, 8th Floor	32
Figura 30 : CDF O2I, 9th Floor	32
Figura 31 : CDF Outdoor + Indoor @2GHz	34
Figura 32: Ubicación de la antena de la BS	35
Figura 33 : Escenario de la campaña de medición	36
Figura 34: Escenario real, campaña de medidas.....	36
Figura 35 : Puntos de medición de RSCP en el escenario	37
Figura 36 : Mapa 3D sintético correspondiente al escenario real	37
Figura 37 : Ganancia de la antena (Azimut) [11].....	38
Figura 38 : CDF del escenario real vs modelos de propagación.....	38

Capítulo I

Introducción y Objetivos

I.1 Introducción

El entorno de propagación de radio es un aspecto crítico en la evaluación del rendimiento de los sistemas de comunicaciones móviles, debido principalmente a la sensibilidad de los canales físicos y a la naturaleza de las señales dentro de un entorno de radio.

Esta tesina, se centra en evaluar los modelos de propagación del canal radio empleados en la actualidad para la caracterización del rendimiento de los sistemas de 5G. En efecto, en estudios previos se ha demostrado que un modelado del canal radio realista es esencial para la evaluación precisa del rendimiento de nivel de enlace y nivel de sistema, el cual es fundamental para determinar las prestaciones de un sistema de comunicaciones móviles.

En concreto, se consideraron los modelos de propagación propuestos por los grupos 3GPP, por la ITU-R dentro del marco de evaluación de IMT-Advanced y por el proyecto europeo METIS. De entre ellos, el último se considera en la actualidad el marco de referencia para la evaluación de las pérdidas de propagación del canal radio, ya que el proyecto METIS es el primer proyecto de alcance mundial en estudiar las propuestas tecnológicas para la 5G.

En el desarrollo de la tesina, se hará una evaluación teórico-práctico de los modelos con la finalidad de determinar cuál de todos estos es el más realista. Este será el propuesto para la evaluación de las prestaciones de los futuros sistemas 5G.

I.2 Objetivos de la Tesina

- Implementar los modelos considerados, utilizando para ello la plataforma matemática Matlab.
- Evaluar los modelos de propagación propuestos por el 3GPP, IMT-Advanced y METIS mediante un escenario sintético para determinar su comportamiento en la evaluación de un canal radio.
- Determinar mediante una campaña de medidas cuál de los modelos de propagación es el más realista y, por lo tanto, el modelo más adecuado para evaluar las prestaciones de los sistemas 5G.

Capítulo II

Estado del Arte

A lo largo de este capítulo se analiza el estado del arte, donde se presentan los conceptos generales con el objetivo de mostrar una visión global del estado actual y de las principales tendencias del tema de investigación.

II.1 Canal Radio

El canal radio es el medio por el cual se transporta la información desde un transmisor hacia un receptor en forma de ondas electromagnéticas. La información es transportada mediante una onda portadora en el transmisor, la onda portadora se propaga a través del aire y se demodula en el receptor para recuperar los datos transmitidos [5].

La señal radio se enfrenta a varios obstáculos, no solo debido al ruido e interferencia. La señal puede propagarse de una manera simple pasando a través de una trayectoria con línea de vista (LoS) o compleja como cuando queda obstruida y se dispersa por la presencia de edificios, árboles u otros obstáculos (NLoS). Estos son los motivos por los cuales, el análisis de un canal móvil es bastante difícil debido a la aleatoriedad de la propagación inalámbrica.

II.2 Fenómenos básicos en la Propagación

Existen tres fenómenos básicos que influyen en la propagación de una señal llamados reflexión, difracción y dispersión.

II.2.1 Reflexión

La reflexión ocurre cuando una onda electromagnética choca en un objeto, que tiene dimensiones superiores comparadas con la longitud de onda de la onda de propagación [6]. En caso de reflexión la señal “rebota” cambiando la dirección de su trayectoria.

II.2.2 Difracción

La difracción toma lugar como resultado de una obstrucción entre las antenas del transmisor y receptor, generando una onda secundaria detrás de la obstrucción [5]. La difracción en su proceso atenúa el nivel de señal, pero no modifica la trayectoria de la propagación.

II.2.3 Dispersión

La dispersión llamado en inglés como *scattering*, se produce debido a la incidencia de una onda propagada en una superficie con dimensiones iguales o menores a la longitud de onda, dando

como resultado que la señal sea re direccionada por varias trayectorias, como consecuencia de la transmisión multi-camino; la atenuación, retardo y cambio de fase son acumuladas en el receptor. Esta superposición de las señales puede ser constructivas o destructivas.

II.2.4 Entorno de propagación

El entorno de propagación es el ambiente geográfico en donde la señal se propaga entre el transmisor y el receptor. Esto incluye parámetros físicos como los edificios, callejeros, vegetación, superficie, etc. La zona geográfica cubierta por una estación base (BS) y el tipo de antena utilizado determina el tipo de célula, entre los cuales se pueden definir cuatro tipos: macrocelda, celda pequeña, micro celda y pico celda.

II.2.4.1 Macrocelda

Una macrocelda cubre una gran área geográfica, en el orden de decenas de kilómetros como radio. Se emplea generalmente en zonas rurales o montañosas con la estación base situada a una altitud elevada.

II.2.4.2 Celda Pequeña

Se usa para dar cobertura a un número relativamente grande de usuarios en un área determinada, tal como en áreas urbanas. En este caso, el tamaño de la celda tiene que ser reducido para permitir la reutilización de las frecuencias dentro de distancias más cortas. El radio de la zona cubierta por una pequeña celda está en el orden de kilómetros. Generalmente, la estación base está posicionada en la azotea de un edificio (*rooftop*).

II.2.4.3 Microcelda

En las zonas urbanas densamente pobladas, el tamaño de la celda se reduce aún más. El radio de la zona de cobertura de una microcelda está en unos pocos cientos de metros, lo que permite la reutilización de frecuencias dentro de distancias mucho más cortas. Las antenas se sitúan por debajo del nivel del techo, mientras que las calles actúan como guías de ondas [5].

II.2.4.4 Picocelda

El radio del área de cobertura de una picocelda es de unas cuantas decenas de metros. La antena de la estación base es ubicada dentro del edificio donde ocurre la comunicación. En la actualidad, también se hace referencia al concepto de femtocelda, como una picocelda situada en entornos domésticos

II.2.5 Modelo de Canal

El modelo del canal tiene como objetivo estudiar los diferentes entornos en los cuales tienen lugar las transmisiones inalámbricas. Existen dos tipos de modelo de canal, los modelos estadísticos y los modelos determinísticos.

Los modelos estadísticos están basados en funciones de densidad de probabilidad de los parámetros de transmisión que definen cada entorno.

Los modelos determinísticos, por el contrario, tienen en cuenta la estructura del entorno de propagación. Reproducen todos los parámetros geométricos y electromagnéticos asociados a un escenario concreto

II.2.6 Tipos de desvanecimiento

La propagación radio a través de un canal móvil se suele caracterizar por medio de tres fenómenos: las pérdidas básicas de propagación o *path loss*, un término de pérdida a largo plazo conocido como *shadowing*, y un término de pérdidas a corto plazo que recibe el nombre de *fast Fading* [7].

A continuación se describen los tres tipos básicos de desvanecimiento que son generados por una señal inalámbrica:

- Pérdidas de propagación.
- Desvanecimiento lento.
- Desvanecimiento rápido.

II.2.6.1 Pérdidas de propagación

Las pérdidas de propagación, también conocidas como *path loss*, recogen la atenuación de potencia entre la señal transmitida y la señal recibida, en un entorno de propagación concreto [5]. El modelado de la pérdida de propagación juega un papel vital en el desarrollo de sistemas de comunicación móvil ya que determina el alcance medio de la celda. Existen diversos modelos de pérdidas de propagación que se explican a continuación.

II.2.6.1.1 Modelo de propagación en el espacio libre

El modelo de propagación en el espacio libre es el escenario más simple, en donde un transmisor y una antena receptora se encuentran libres de obstáculos y la potencia recibida se obtiene en función de la distancia [8].

La potencia recibida por la antena receptora, que se encuentra separada una distancia d , asumiendo una trayectoria libre de obstáculos, está dado por la ecuación de *Friss* [9].

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

donde, P_t es la potencia transmitida, G_t es la ganancia de la antena transmisora, G_r es la ganancia de la antena receptora, L las pérdidas del sistema y λ la longitud de onda en metros.

Las pérdidas de propagación o *path loss* se define como la diferencia entre la potencia efectiva del transmisor y la del receptor, por lo cual, las pérdidas de propagación en el espacio libre se define como:

$$PL = -10 \log_{10} \frac{P_r}{P_t} = -10 \log_{10} \left[\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \right]$$

II.2.6.1.2 Modelos empíricos de pérdidas de propagación

En esta sección se describen los distintos modelos que permiten calcular las pérdidas de propagación o *path loss* en escenarios urbanos.

II.2.6.1.2.1 Modelo 3GPP 3D-Channel

El modelo 3GPP-3D se propuso para realizar estudios de LTE, modela el rendimiento de la capa física y tiene como objetivo capturar los escenarios correspondientes a los modelos de canal 3D para los diferentes escenarios entre la estación base y el terminal móvil. El modelo de *path loss* está definido en [10].

En la Figura 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la Figura 2 se muestran la definición de las distancias que propone el modelo de 3GPP-3D.

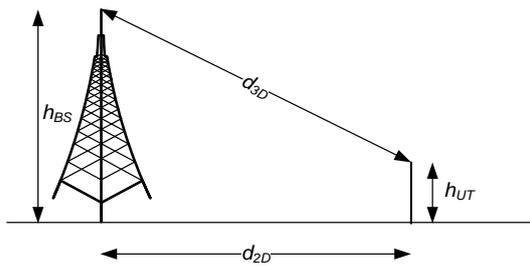


Figura 1: Distancias para 3GPP 3D - Outdoor [10]

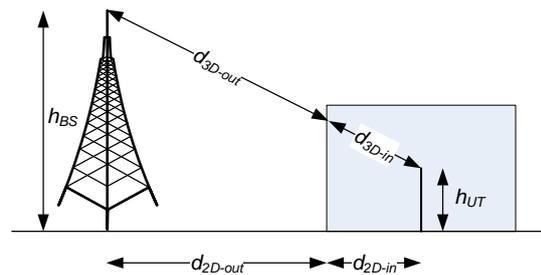


Figura 2: Distancias para 3GPP 3D - Indoor [10]

Se define la distancia de corte¹ mediante la expresión $d'_{BP} = 4h'_{BS}h'_{UT}f_c/c$ donde f_c es la frecuencia central en Hz, $c = 3.0 \times 10^8$ m/s es la velocidad de propagación en espacio libre, y h'_{BS} , h'_{UT} son las alturas efectivas de las antenas de la estación base y el terminal de usuario

¹ Break point distance

respectivamente. Para el escenario 3D-UMa se define $h'_{BS} = h_{BS} - 1$ y $h'_{UT} = h_{UT} - 1$ donde h_{BS}, h_{UT} son las alturas de las antenas reales.

Para el escenario donde existe línea de vista (3D-UMa LoS²) el cálculo del *path loss* se realiza como se muestra,

$$\text{Si } 10m < d_{2D} < d'_{BP}$$

$$PL = 22.0 \log_{10}(d_{3D}) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c),$$

$$\text{Si } d'_{BP} < d_{2D} < 5000m$$

$$PL = 40.0 \log_{10}(d_{3D}) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} + h_{UT})^2).$$

En cambio, para el caso donde no existe línea de vista (3D-UMa NLoS³) el cálculo se define como,

$$PL = \max(PL_{3D-UMa-LoS}, PL_{3D-UMa-NLoS}),$$

donde

$$\begin{aligned} PL_{3D-UMa-NLoS} &= 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 \\ &- 3.7(h/h_{BS})^2 \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.11 \log_{10}(h_{BS})(\log_{10}(d_{3D}) - 3) \\ &+ 20 \log_{10}(f_c) - (3.2(\log_{10}(17.625))^2 - 4.97 - \alpha(h_{UT} - 1.5) \end{aligned}$$

Se puede observar que, para el cálculo del *path loss* en el escenario NLoS es necesario obtener el *path loss* máximo entre $PL_{3D-UMa-LoS}$ y $PL_{3D-UMa-NLoS}$.

Según el documento [10], $\alpha = 0.6$.

Para el escenario 3D-UMa O2I, el cálculo se realiza como se muestra,

$$\text{Si } 10m < d_{2D-out} + d_{2D-in} < 1000$$

$$PL = \max(PL_{3D-UMa-LoS}, PL_{3D-UMa-NLoS})$$

donde

$$PL = PL_b + PL_{tw} + PL_{in}$$

$$PL_b = PL_{3D-UMa-LoS}(d_{3D-out} + d_{3D-in})$$

$$PL_{tw} = 20$$

$$PL_b = 0.5d_{2D-in} \text{ considerando que } 10m < d_{2D-in} < 25$$

² Line of Sight : Línea de vista

³ Non Line of Sight : Sin línea de vista

Adicionalmente, los valores de *Shadow Fading* (dB), se recogen en la Tabla 1 para cada escenario.

Modelo	Escenario	<i>Shadow Fading</i> std (dB)
3GPP-3D	UMa LoS	$\sigma = 4$
	UMa NLoS	$\sigma = 6$
	UMa O2I	$\sigma = 8$

Tabla 1 : Valores de *Shadow Fading* - 3GPP-3D

II.2.6.1.2.2 Modelo IMT-Advanced

El modelo de *path loss* de IMT – Advanced sólo describe ecuaciones para el cálculo de *Path loss* para escenarios “*Outdoor*” y, puede ser aplicado en el rango de 2-6 GHz y para diferentes alturas de antenas.

Las ecuaciones para calcular el *path loss* en puntos con línea a vista (LoS) son,

$$\text{Si } 10 \text{ m} < d_{2D} < d'_{BP}$$

$$PL = 22.0 \log_{10}(d_D) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c)$$

$$\text{Si } d'_{BP} < d_{2D} < 5000 \text{ m}$$

$$PL = 40.0 \log_{10}(d_1) + 7.8 - 18.0 \log_{10}(h'_{BS}) - 18.0 \log_{10}(h'_{UT}) + 2 \log_{10}(f_c)$$

Hay que destacar que en la segunda ecuación aparece el término d_1 el cual no está definido en el documento [11], sin embargo, se considera $d_1 = d_{2D}$, siendo d_{2D} la distancia entre la estación base y el terminal móvil.

El cálculo del *path loss* para puntos sin línea de vista (NLoS), se realiza como sigue:

$$\text{Si } 10 \text{ m} < d_{2D} < 5000 \text{ m}$$

$$PL = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS})(\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2(\log_{10}(17.625))^2 - 4.97) - \alpha(h_{UT} - 1.5)$$

Y finalmente, en la Tabla 2 se muestra los valores de *Shadow Fading* para el modelo de IMT Advanced.

Modelo	Escenario	<i>Shadow Fading</i> std (dB)
IMT-Advanced	UMa LoS	$\sigma = 4$
	UMa NLoS	$\sigma = 6$

Tabla 2 : Valores de *Shadow Fading* – IMT Advanced

II.2.6.1.2.3 Modelo METIS

Dentro del proyecto Europeo METIS [12], se está trabajando en la definición de la nueva tecnología móvil 5G. En este proceso se ha identificado la necesidad de desarrollar nuevos modelos de propagación que se ajusten más a escenarios realistas. Por ello, dentro de su modelo de *path loss*, se detallan ocho escenarios distintos entre los cuales se encuentran Urban Macro O2O⁴ (PS#3) y Urban Macro O2I⁵ (PS#4), en los que se centra esta tesina de máster. Las siguientes secciones detallan ambos modelos.

II.2.6.1.2.3.1 PS#3 – Urban Macro O2O

PS#3 se refiere al escenario donde la estación base está situada sobre un edificio (*rooftop*) y tiene una visibilidad dominante sobre los usuarios. Para los escenarios de Urban Macrocell, la mayoría de señal llega a los usuarios por difracción [13]

En la Figura 3, se muestra la geometría y los parámetros necesarios para el cálculo del *Path loss*.

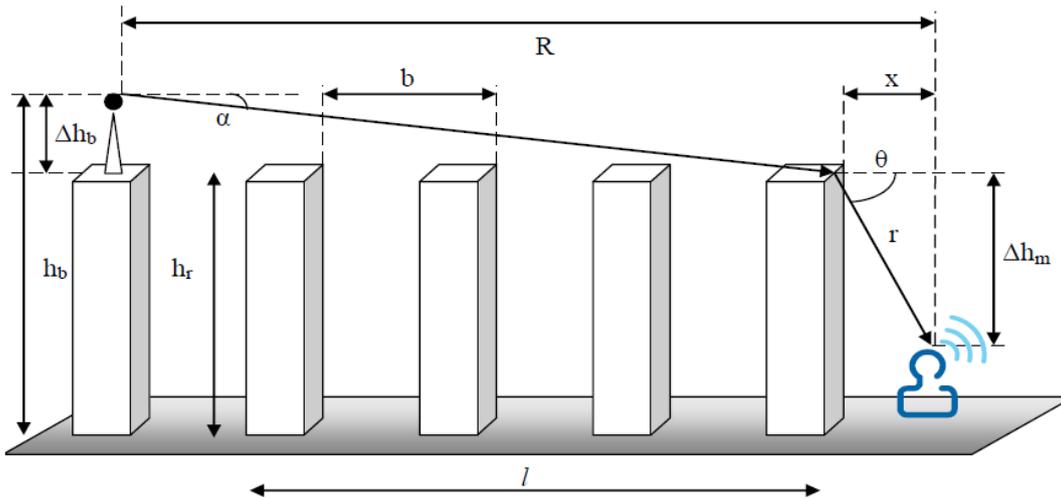


Figura 3 : Geometría del escenario - METIS [13]

La ecuación de pérdidas en el espacio libre está dada por:

$$L_{fs} = -10 \times \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)$$

Y la difracción desde la azotea hasta el nivel de la calle donde se ubican los usuarios está definida como:

⁴ O2O: *Outdoor to Outdoor*

⁵ O2I: *Outdoor to Indoor*

$$L_{rts} = -20 \times \log_{10} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctan \left(\text{sign}(\theta) \sqrt{\frac{\pi^3}{4\lambda} r(1 - \cos\theta)} \right) \right]$$

donde, de acuerdo a la geometría del escenario mostrado en la figura 3, se definen los siguientes parámetros:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta h_m}{x} \right)$$

$$r = \sqrt{(\Delta h_m)^2 + x^2},$$

Siendo Δh_m diferencia entre la altura del último edificio y la altura de la estación móvil y x la distancia horizontal entre el terminal móvil y la esquina donde se produce la difracción.

Se define d_s como,

$$d_s = \frac{\lambda R^2}{\Delta h_b^2}$$

donde Δh_b es la diferencia entre la altura de la estación base y el promedio de las alturas de los edificios.

Se considera este último parámetro (d_s) como condicional para hallar L_{mds} de la siguiente manera:

Si $l > d_s$

$$L_{mds} = L_{bsh} + K_a + K_d \log_{10}(R/1000) + L_{mds} \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{si } h_b > h_r \\ 0 & \text{si } h_b \leq h_r \end{cases}$$

donde L_{bsh} es un término que depende de la altura de la estación base de la siguiente manera,

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{si } h_b > h_r \\ 54 - 0.8\Delta h_b & \text{si } h_b \leq h_r \wedge R \geq 500 \\ 54 - 1.6\Delta h_b R/1000 & \text{si } h_b \leq h_r \wedge R \geq 500 \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{si } h_b > h_r \\ 18 - 15\Delta h_b/h_r & \text{si } h_b \leq h_r \text{ y} \end{cases}$$

$k_f = 0.1(f/925 - 1)$ para ciudades de tamaño mediano y centros sub urbanos con una densidad de árboles medios, mientras $k_f = 1.5(f/925 - 1)$ para centros metropolitano, considerando que para este modelo se debe trabajar con la frecuencia en MHz.

En el otro caso, cuando $l \leq d_s$, se considera,

$$L_{mds} = -10 \log_{10}(Q_M^2)$$

donde

$$Q_M = \begin{cases} 2.35 \left(\frac{\Delta h_b}{R} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0.9} & \text{si } h_b > h_r \\ \frac{b}{R} & \text{si } h_b \approx h_r \\ \frac{b}{2\pi R} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\vartheta} + \frac{1}{2\pi + \vartheta} \right) & \text{si } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$\vartheta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta h_b}{b} \right)$$

y

$$\rho = \sqrt{\Delta h_b^2 + b^2}$$

II.2.6.1.2.3.2 PS#4 Urban Macro O2I

PS#4 incorpora el cálculo del *Path loss* para un entorno *Indoor*. De acuerdo a este modelo, el *Path loss* en dB se calcula de la siguiente manera $PL = PL_{out} + PL_{th} + PL_{in}$, donde PL_{out} usa el modelo de *Path loss* de PS#3 y define $PL_{th} = 9.82 + 5.98 \log_{10}(f_c) + 15(1 - \sin(\theta))^2$ y $PL_{in} = 0.5d_{in}$. En este modelo d_{in} es la distancia desde la pared donde se experimenta mayor nivel de señal hasta el punto en cuestión. θ es el ángulo entre el rayo de incidencia y un vector normal de la pared y f_c es la frecuencia en GHz.

II.2.6.1.2.4 Modelo WINNER II

El modelo WINNER II ha sido desarrollado en base a los resultados de WINNER. Se diseñó para estimar canales de propagación inalámbrica en sistemas de tipo MIMO, SISO, MISO y SIMO, cubriendo un rango de frecuencias entre 2 a 6 GHz para diferentes entornos de propagación, por ejemplo, para nuestro caso de estudio se tiene para un escenario llamado C2 – Urban Macro – cell donde las pérdidas de propagación se calculan según la siguiente expresión,

$$PL = A \log_{10}(d[m]) + B + C \log_{10}((f_c [GHz])/5.0) + X,$$

siendo d la distancia entre la estación base y el terminal móvil, f_c la frecuencia central del sistema en GHz y A, B y C unas variables calculadas como se describe a continuación.

Para escenarios con línea de vista (LoS),

$$\text{Si } 30 \text{ m} < d_{2D} < d'_{BP}$$

$$A = 23.5, B = 41, C = 20$$

Si $d'_{BP} < d_{2D} < 5000 \text{ m}$

$$PL = 40.0 \log_{10}(d_1) + 11.65 - 16.2 \log_{10}(h_{BS}) - 16.2 \log_{10}(h_{UT}) + 3.8 \log_{10}(f_c/5.0),$$

donde la distancia de corte d'_{BP} se define igual que el modelo de IMT-Advanced.

Para los puntos sin línea de vista (NLoS) se tiene,

Si $50 \text{ m} < d_{2D} < 5000 \text{ m}$

$$PL = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + 34.46 + 5.83 \log_{10}(h_{BS}) + 23 \log_{10}(f_c/5.0),$$

En la Tabla 3 se muestra los valores de Shadow Fading para el modelo de WINNER II.

Modelo	Escenario	Shadow Fading std (dB)
WINNER II	UMa LoS 1	$\sigma = 4$
	UMa LoS 2	$\sigma = 6$
	UMa NLoS	$\sigma = 8$

Tabla 3 : Valores de Shadow Fading – WINNER II

II.2.6.2 Desvanecimiento Lento

El desvanecimiento lento o en inglés *slow fading* es causado por la propagación por trayectos múltiples de la señal recibida y por los cambios de la frecuencia *Doppler* [14].

Debido a que la señal transmitida se refleja en objetos como edificios, vegetación entre otros, se crean versiones retardadas de la señal transmitida, cada uno con una amplitud y fase diferente, por lo tanto, la respuesta de impulso de canal es la suma de estas señales dispersas [15].

II.2.6.3 Desvanecimiento Rápido

El desvanecimiento rápido o en inglés *fast fading* es ocasionado por una rápida variación de la amplitud de la señal recibida que se producen debido a la suma constructiva y destructiva de las multi trayectorias o *multipaths* en el canal radio [16].

Los modelos más populares para el desvanecimiento rápido o *fast fading* para escenarios con y sin línea de vista son los modelos *Rice* y *Rayleigh* respectivamente [17].

II.2.7 Link Budget

El *Link Budget* o balance de potencias de un enlace radio, consiste en el cálculo del valor máximo de las pérdidas de propagación que se pueden presentar en un enlace radio cumpliéndose ciertos requisitos a las prestaciones de dicho enlace [18].

Normalmente, el *Link Budget* se muestra en función a la potencia recibida, sin embargo, en algunos casos se presentan en función de la intensidad de campo (V/m) o la densidad de flujo (W/m^2) especialmente en estudios de interferencia [19].

Capítulo III

Comparación de Modelos

Un modelado realista del canal radio es esencial para la evaluación precisa del rendimiento de nivel de enlace y nivel de sistema. Este proceso es un punto clave y fundamental para la fase de planificación de la red de despliegue del sistema 5G.

Por tal motivo, en el presente capítulo, se analizan los modelos de propagación de los canales radio en entornos urbanos con el objetivo de determinar su comportamiento y sus prestaciones relativas. Además, se incluye el resultado de una campaña de medidas *outdoor* en la que se podrá comprobar hasta qué punto los distintos modelos se aproximan a la realidad.

III.1 Método de evaluación

El método empleado para la evaluación de los modelos de propagación (3GPP, IMT-A, WINNER II y METIS), se desarrollan en tres partes:

La primera, consiste en un análisis teórico de los distintos modelos de propagación para escenarios *outdoor* e *indoor*, en donde se puede observar el comportamiento de cada uno de ellos. La segunda parte, consiste en un análisis de los modelos de propagación dentro de un escenario sintético, en donde se calculan las pérdidas de propagación en distintos puntos del escenario (*outdoor* e *indoor*) los cuales son comparados y analizados. Por último, en la tercera parte, se realiza una campaña de medición en donde se obtienen las pérdidas de propagación reales en distintos puntos dentro de un escenario limitado por el área de cobertura de una celda, los cuales son comparados con las pérdidas de propagación calculados según los modelos estudiados.

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos para determinar cuál de los modelos de propagación es el modelo más realista, es decir, aquel cuyos resultados se ajustan a las medidas de pérdida de propagación reales.

III.2 Comparación de las ecuaciones de los modelos de propagación

En esta sección, se evalúan el comportamiento de los modelos de propagación. Para ello, se definen algunos parámetros de uso común como la frecuencia central de la estación base, la altura de la antena transmisora y la del terminal móvil, entre otros.

Dividimos este análisis en tres escenarios. El primero consta de los puntos donde existe línea de vista entre la estación base (BS) y el terminal móvil (MS), el segundo en donde la BS y la MS no tienen línea de vista y por último, el escenario en donde la MS está ubicado en el interior de un edificio (puntos *indoor*).

III.2.1 Puntos con línea de vista (LoS)

En esta sección se comparan de las ecuaciones de los distintos modelos de propagación para los puntos con línea de vista (LoS). Para ello, primero consideramos que la frecuencia central de la estación base es de 2.0 GHz, la altura de la estación base 37m y la del terminal móvil 1.5m.

Usando las ecuaciones de los distintos modelos, se calculan las pérdidas de propagación en función a la distancia.

En la Figura 4 y la Figura 5 se muestran los resultados del cálculo del *path loss* para los puntos con línea de vista (LoS) para los diferentes modelos.

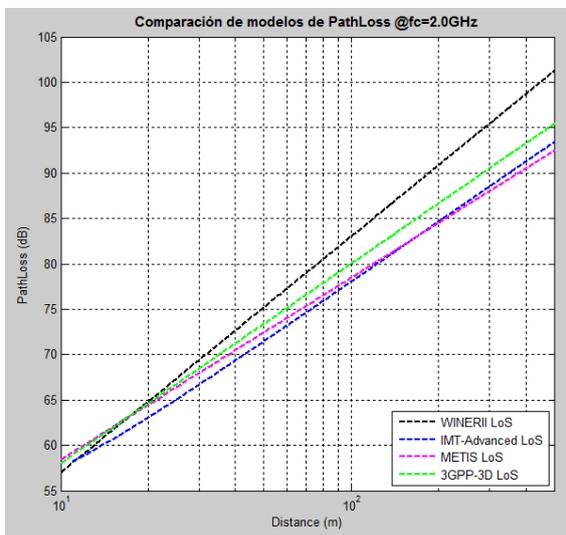


Figura 4 : Comparación de modelos de *Path loss* LoS @fc=2GHz, log.

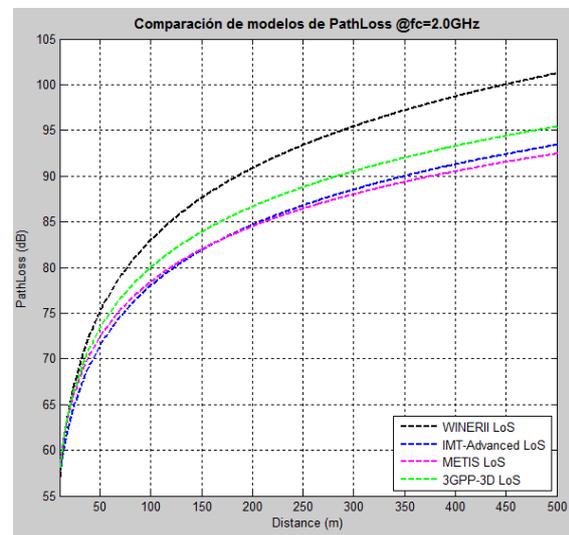


Figura 5 :Comparación de modelos de *Path loss* LoS @fc=2GHz , lineal

Como se puede apreciar, al evaluar los modelos, estos muestran una semejanza entre los valores de *path loss*, a excepción del modelo WINNER II que se tiene una diferencia de +5dB sobre los demás que se hace más notoria al aumentar la distancia.

III.2.2 Puntos sin línea de vista (NLoS)

Ahora, evaluaremos los puntos sin línea de vista (NLoS) y tomaremos las mismas variables propuestas en el punto anterior adicionando las siguientes variables: altura promedio de los edificios 30.0m, el ancho de las calles igual a 20m y el ancho de los edificios promedio 25m.

En la Figura 6 y Figura 7 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes modelos.

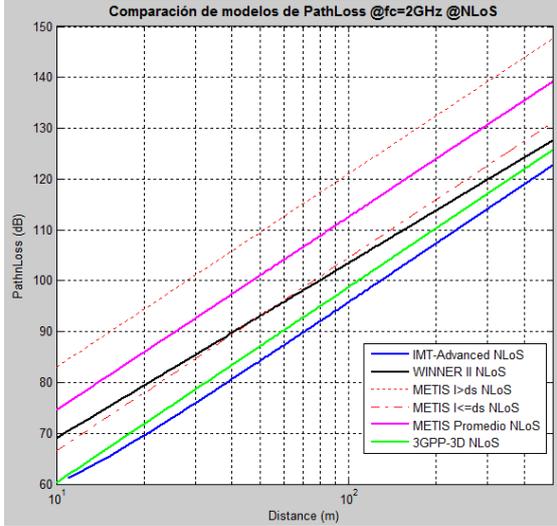


Figura 6 :Comparación de modelos de *Path loss* NLoS @fc=2GHz, log

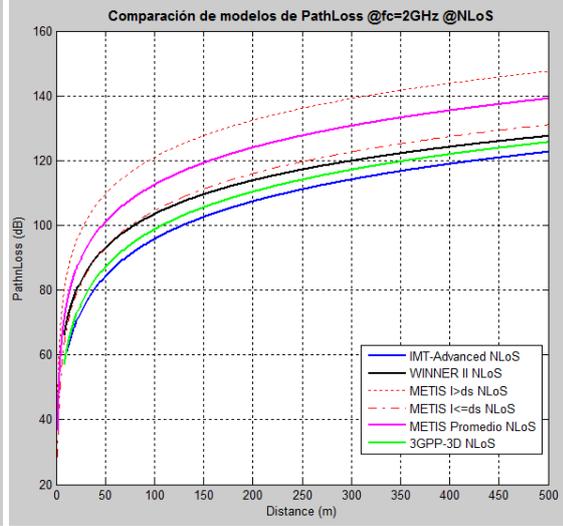


Figura 7: Comparación de modelos de *Path loss* NLoS @fc=2GHz, lineal

Podemos observar que los modelos 3GPP-3D, IMT-Advanced y WINNER II son similares con diferencias entre ± 5 dB. En cambio comparándolos con los resultados del modelo de METIS se puede apreciar que existe una diferencia de $+10$ dB. Sin embargo hay que tener en cuenta que para el modelo de METIS se obtienen dos resultados para los puntos con NLoS, uno cuando $l \leq d_s$ donde $L_{m_{ds}}$ se calcula $L_{m_{ds}} = -10 \log_{10}(Q_M^2)$ y el otro cuando $l > d_s$ donde $L_{m_{ds}}$ se calcula como $L_{m_{ds}} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(R/1000) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b)$.

Como se muestra, cuando $l \leq d_s$ los resultados de *path loss* son más cercanos a los demás modelos sólo con una diferencia de $+5$ dB, mientras que cuando $l > d_s$ existe una mayor diferencia de aproximadamente 20 dB entre el modelo de METIS y los demás.

III.2.3 Puntos “Outdoor to Indoor” O2I

Los puntos ubicados dentro de un edificio, reciben el nombre de puntos “*Indoor*”, para calcular las pérdidas de propagación de estos primero se debe de determinar si el último punto exterior es un punto con o sin línea de vista. Cabe destacar que sólo el modelo 3GPP-3D y el modelo METIS incluyen variantes para el cálculo O2I en caso de trabajar con propagación macrocelular. Es por ello que este análisis se restringe a ambos modelos.

III.2.3.1 Puntos “Outdoor to Indoor” O2I sin línea de vista “NLoS”

Las ecuaciones de cálculo de las pérdidas de propagación para los puntos *Indoor* cuyo último punto exterior no tiene línea de vista, se calculan mediante las ecuaciones de NLoS, agregando a ellas pérdidas debido al cruzar las paredes de los edificios “ P_{th} ” y otra pérdidas por la distancia interior “ P_{in} ” para los modelos de 3GPP y METIS.

En la Figura 8 y Figura 9 se muestran los resultados obtenidos para este escenario.

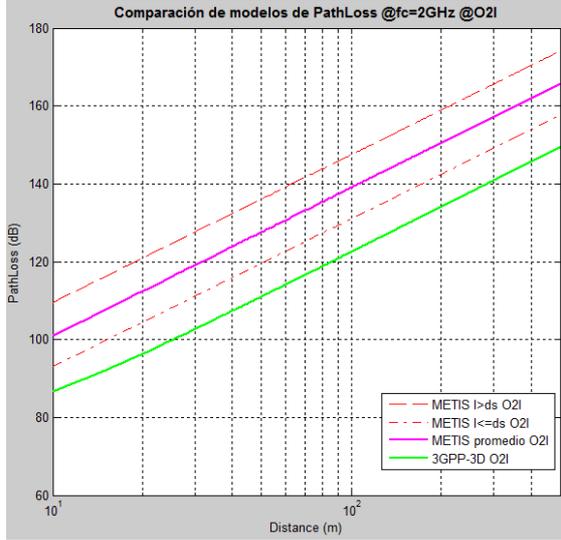


Figura 8 : Comparación de modelos de *Path loss* O2I NLoS @fc=2GHz, log

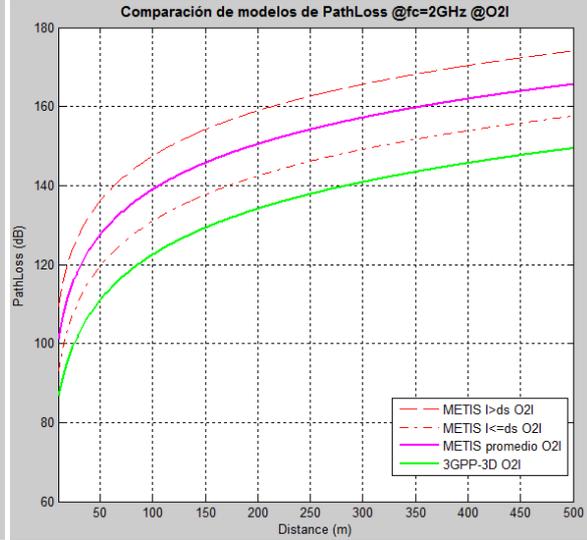


Figura 9: Comparación de modelos de *Path loss* O2I NLoS @fc=2GHz, lineal

Los resultados obtenidos para este escenario guardan relación con lo mostrado en el escenario con puntos sin línea de vista (NLoS). Se puede apreciar que el modelo de METIS en promedio tiene una diferencia de 10dB con el modelo de 3GPP-3D.

Hay que notar que METIS propone dos ecuaciones diferentes para la variable $l_{m_{ds}}$, de acuerdo a los valores de l y d_s , es por ello, que esta variable modifica considerablemente los resultados.

Cuando $l \leq d_s$, los resultados de *path loss* se acercan más a los obtenidos por el modelo 3GPP, siendo la diferencia de aproximadamente +5dB, por otro lado, si $l > d_s$ la diferencia entre ambos modelos aumenta considerablemente hasta +20dB.

III.2.3.2 Puntos “Outdoor to Indoor” O2I con línea de vista “LoS”

Para el caso de puntos O2I que tengan línea de vista con la BS, los valores obtenidos de *path loss* del modelo 3GPP-3D son mayores que los de METIS. Esto se explica, debido a que el factor de pérdidas adicionales por atravesar las paredes (P_{tw}) tiene un valor diferente para los dos modelos; para el de 3GPP-3D, “ P_{tw} ” es de 20 dB mientras que para METIS en media es de 12.5 dB⁶. Es por eso que en la gráfica podemos notar una diferencia de alrededor de 7.5 dB entre ambos.

⁶ Media obtenida de la simulación del PS3PS4.m en los escenarios sintéticos propuestos

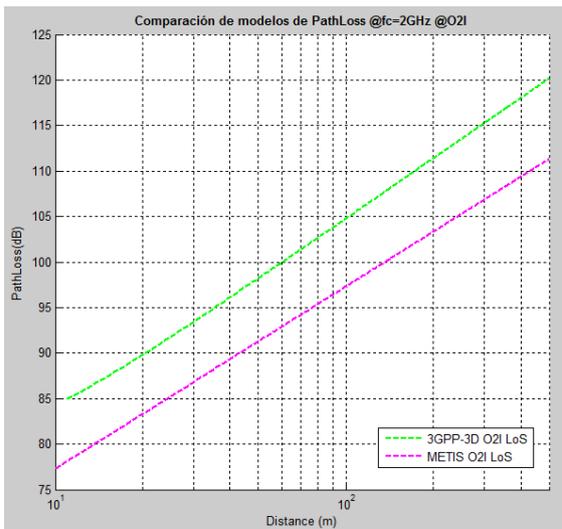


Figura 10 : Comparación de modelos de *Path loss* O2I LoS @fc=2GHz, log

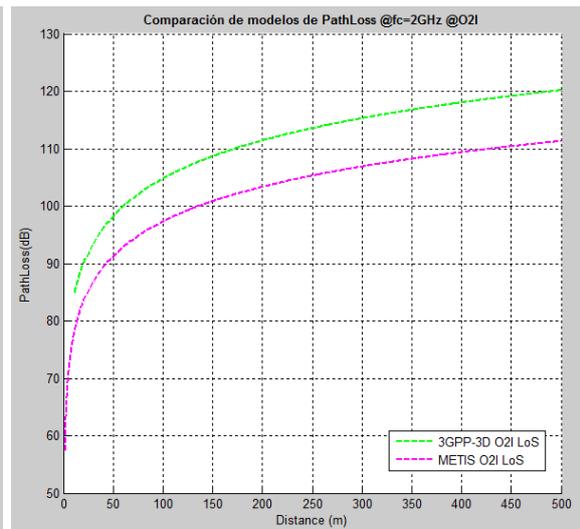


Figura 11 : Comparación de modelos de *Path loss* O2I LoS @fc=2GHz, lineal

III.3 Comparación de los modelos de propagación en un escenario sintético

III.3.1 Escenario Sintético

En esta sección los modelos de propagación para el cálculo del *path loss* serán comparados mediante la simulación de los mismos en un escenario sintético, con las características que se detallan a continuación.

En la Figura 12, se muestra una vista 3D del escenario sintético, indicando sus principales características.

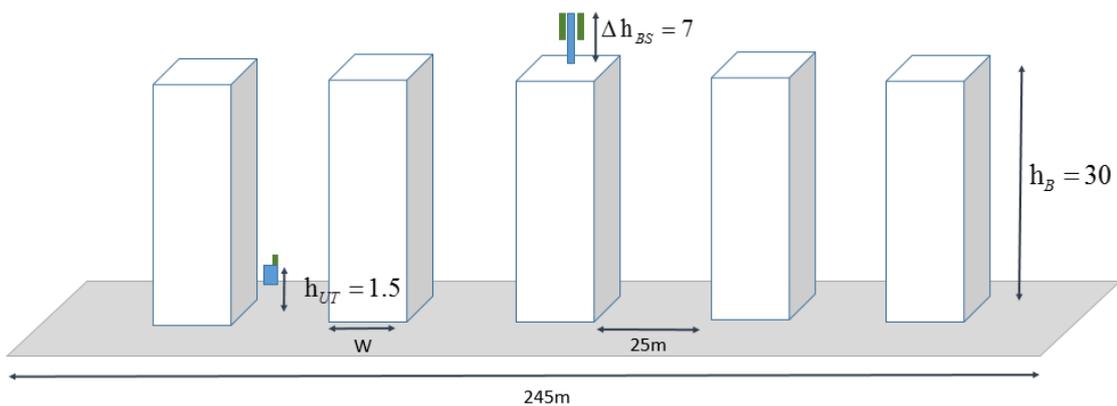


Figura 12 :Vista 3D del escenario sintético

El escenario considera una rejilla de 5 x 5 edificios separados por un callejero de 20 metros de ancho. El plano 2D del escenario sintético, de acuerdo a esta descripción, sería como se muestra en la Figura 13.

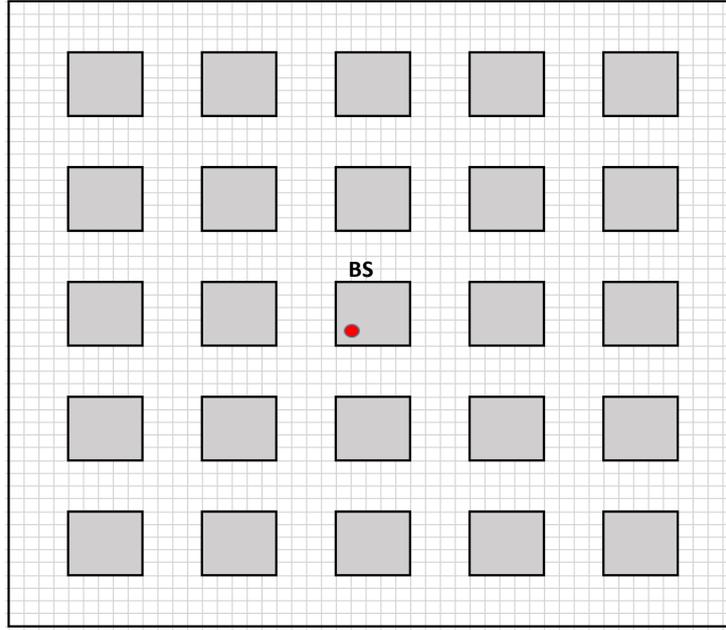


Figura 13 : Vista de alzada del escenario sintético 2D

La frecuencia central de la estación base (BS) es $f_c = 2.0$ GHz. La BS está ubicada en el centro del escenario sobre un edificio (*rooftop*) siendo su altura $h_{BS} = h_b + \Delta h_{BS}$ donde la altura del edificio $h_b = 30$ m y $\Delta h_{BS} = 7$ m, estando los edificios separados por un callejero de ancho $W = 20$ m y siendo la altura del terminal móvil $h_{UT} = 1.5$ m.

Con estos datos, se halla la distancia de corte $d'_{BP} = 4h'_{BS} \cdot h'_{UT} \cdot f_c / c$, que será usada en los distintos modelos. Reemplazando las variables, se obtiene $d'_{BP} = 480$ m. Considerando este resultado y debido a las características de nuestro escenario, en todos los puntos se cumplirá que $d_{2D} < d'_{BP}$.

Finalmente, se considera que en el escenario sintético existen 1500 usuarios, de los cuales el 20% se encuentran ubicados en el callejero (puntos *Outdoor*) y el restante, 80%, se encuentran ubicados dentro de los edificios (puntos *Indoor*).

III.3.2 Análisis OUTDOOR

Para realizar el análisis *Outdoor*, se distribuye aleatoriamente el 20% de los usuarios del escenario en el callejero, calculando para cada uno de ellos, la pérdida de propagación o *path loss* usando los diferentes modelos de propagación.

La comparación entre los modelos de propagación se realizará mediante gráficos de distribución acumulada (CDF) y gráficos de medidas de pérdidas en función a la distancia.

En la Figura 14, se muestra el gráfico de CDF del resultado del cálculo de las pérdidas de propagación o *path loss* de los puntos que se encuentran en el callejero del escenario. Se puede observar claramente que existe una diferencia importante entre los modelos.

Si tomamos como referencia el percentil 50 de la gráfica, podemos observar que IMT-Advanced y 3GPP son similares y tienen una diferencia de -6 dB con el modelo de WINNER II y de -18dB con respecto al modelo de METIS que refleja valores más altos de pérdidas de propagación, siendo al mismo tiempo el más realista respecto a la topología subyacente.

A continuación se explica el motivo por el cual se presentan estas diferencias, con el objetivo de dar validez de los resultados mostrados.

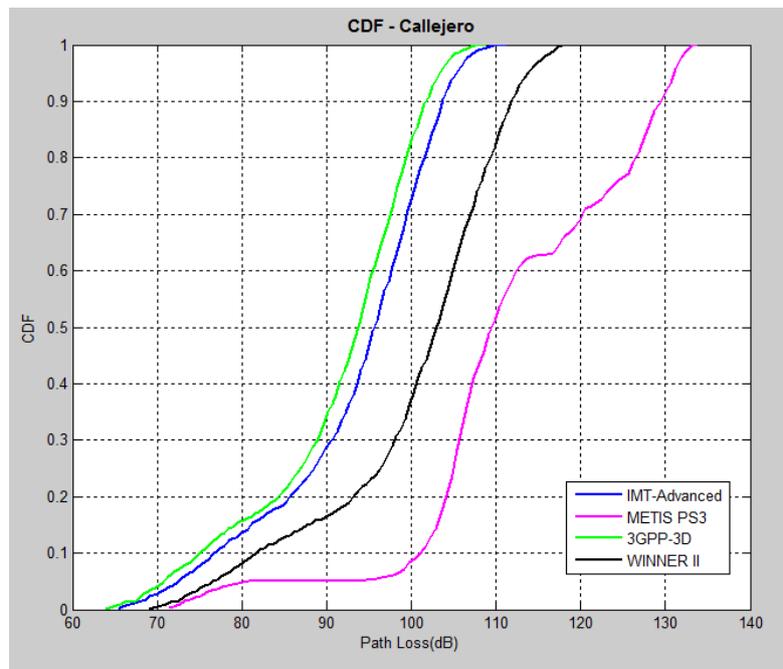


Figura 14 : CDF - Path loss en el callejero (Ground)

Primero representaremos los valores de *path loss* del modelo METIS en función de la distancia para ver el comportamiento. En la Figura 15 podemos observar los resultados del cálculo del *path loss* que se representan con “*” de color magenta.

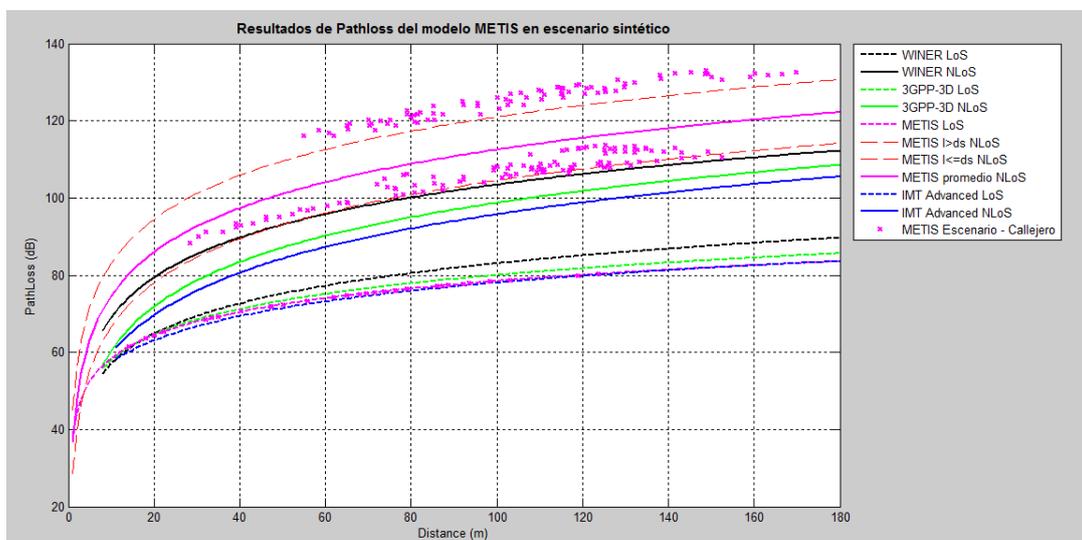


Figura 15 : Comparación de los resultados del modelo METIS en el escenario sintético

Rápidamente podemos observar que los puntos de *path loss* representados del modelo METIS tienen correspondencia con sus ecuaciones de cálculo, un primer grupo se representa cercana al modelo de METIS para puntos con línea de vista LoS, y un segundo grupo donde se encuentran los puntos sin línea de vista (nLoS) que se divide en dos subgrupos uno que se ajusta a la condición $l > d_s$ y el otro a $l \leq d_s$.

Los resultados mostrados en la Figura 15 guardan concordancia con el gráfico de CDF mostrado en la Figura 14.

Seguiremos representando los demás modelos al igual como se hizo con el de METIS, para ver su comportamiento y comentarlos.

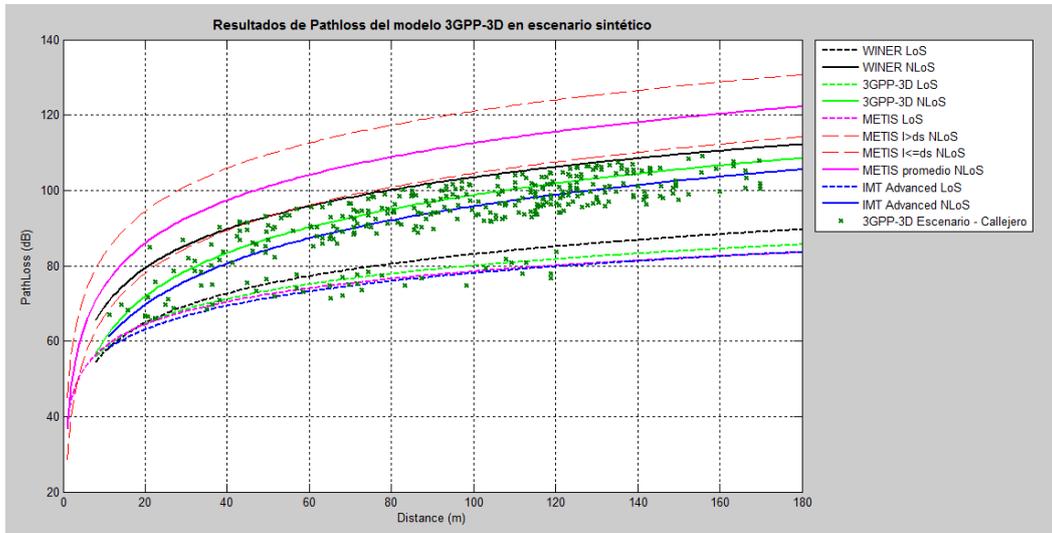


Figura 16 : Comparación de los resultados del modelo 3GPP en el escenario sintético

En la Figura 16 podemos observar el resultado del *path loss* calculado para el modelo de propagación de 3GPP-3D. En ella se puede ver claramente el efecto del *Shadow Fading* y diferenciar los puntos que se encuentran con y sin línea de vista.

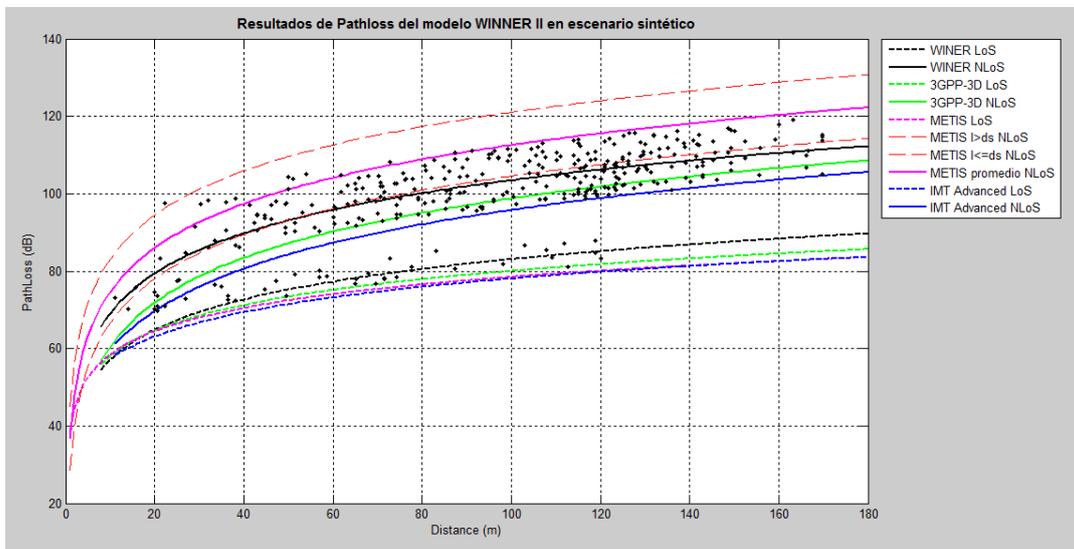


Figura 17 :Comparación de los resultados del modelo WINNER II en el escenario sintético

En la Figura 17 se muestra los resultados para los modelos de IMT Advanced, y al igual que el modelo de WINNER y 3GPP-3D, se notan claramente los puntos LoS y NLoS y el efecto del Shadow Fading.

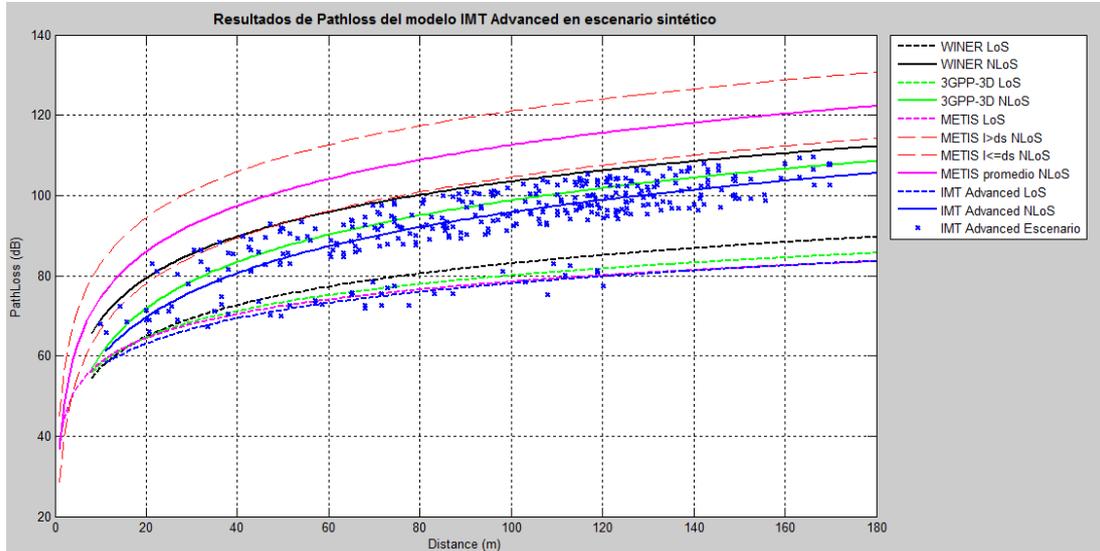


Figura 18 : Comparación de los resultados del modelo IMT-Advanced en el escenario sintético

Finalmente, en la Figura 19 se muestra el resultado de todos los modelos juntos. De nuevo, cabe destacar que el modelo de METIS es el más pesimista en cuanto a las pérdidas de propagación, aunque también es el más realista en términos de definición del modelo, ya que tiene en cuenta el escenario concreto bajo análisis. Será pues necesario realizar una campaña experimental para poder determinar la mayor o menor validez de los distintos modelos analizados.

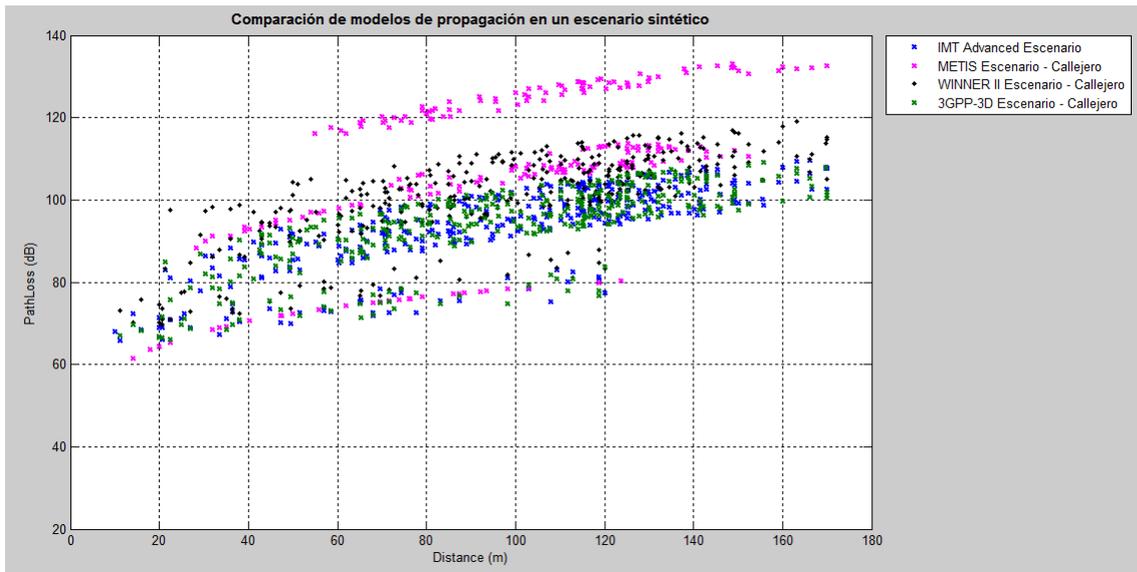


Figura 19 : Comparación del resultado final de los modelos

III.3.2.1 Validación de los resultados de los modelos de propagación para puntos Outdoor.

En esta sección se pretende validar los resultados obtenidos en la simulación del escenario sintético, para lo cual se toman aleatoriamente 10 puntos en el callejero para calcular el *path loss* siguiendo cada uno de los modelos para comparar los resultados.

En la Figura 20 se muestran los 10 puntos que serán analizados.

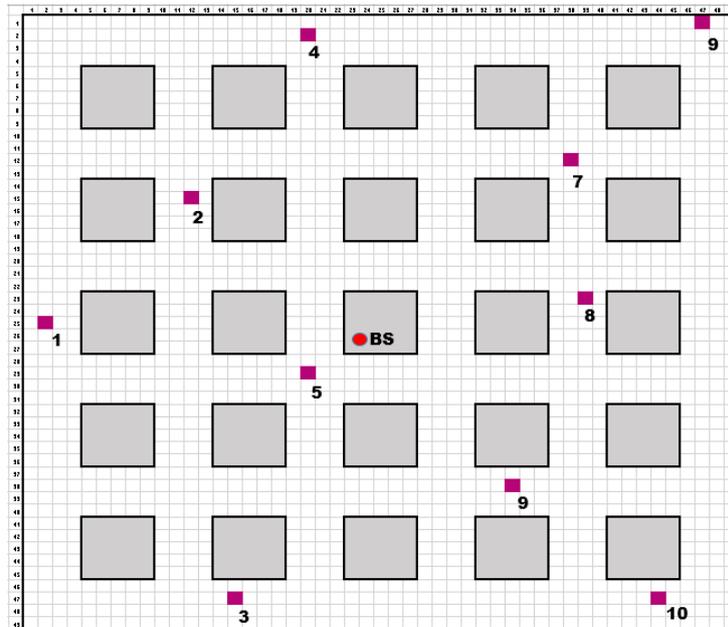


Figura 20 : Escenario sintético y puntos aleatorios usados para la comparación

A continuación, haremos el cálculo de las variables necesarias para calcular las pérdidas de propagación para el modelo de METIS, En la Tabla 4 se muestran los resultados de los cálculos de todas las variables del modelo METIS. Con estos resultados, obtenemos los valores de las pérdidas parciales de propagación, las cuales se muestran en la Tabla 5

Punto	$R[m]$	x	θ	r	ds	l
1	110.11	12.20	1.17	31.00	37.11	72.30
2	81.39	7.50	1.31	29.47	20.28	25.56
3	114.24	7.32	1.32	29.43	39.95	38.39
4	121.66	73.55	0.37	78.88	45.31	46.22
5	25.00	16.01	1.06	32.69	1.91	0.00
6	78.10	10.01	1.23	30.21	18.67	7.23
7	99.00	10.01	1.23	30.21	30.00	35.36
8	76.48	12.74	1.15	31.22	17.91	26.70
9	169.85	24.75	0.86	37.75	88.31	98.99
10	145.00	12.75	1.15	31.22	64.36	84.85

Tabla 4 : Cálculo de las variables modelos METIS

Punto	L_{fs}	L_{rts}	L_{msd} $l > d_s$	L_{msd} $l < d_s$	Path loss METIS
1	79.30	39.82	8.30	-8.17	127.42
2	76.67	40.50	5.94	-10.54	123.11
3	79.62	40.52	8.59	-7.89	112.25
4	80.17	34.35	9.08	-7.39	123.60
5	66.42	39.30	3.29	-19.76	85.95
6	76.32	40.13	5.62	-10.86	105.58
7	78.38	40.13	7.47	-9.01	125.97
8	76.13	39.75	5.45	-11.02	121.33
9	83.06	38.22	11.69	-4.79	132.97
10	81.69	39.74	10.46	-6.02	131.88

Tabla 5 : Cálculo de *path loss* para METIS

Como para todos los casos $L_{rts} + L_{msd} > 0$ el cálculo del *path loss* para este modelo seguirá la siguiente ecuación $L(R) = L_{fs} + L_{rts} + L_{msd}$. También hay que notar que el valor de L_{msd} depende de la comparación de “ d_s ” y “ l ”. Como resultado de esta comparación los valores de L_{msd} usados para el cálculo final de las pérdidas de propagación se representan en la tabla sombreada de color verde.

A continuación, del mismo modo, haremos el cálculo de las variables para los modelos de 3GPP-3D, WINNER II e IMT-Advanced, y hallaremos las pérdidas de propagación para cada uno de ellos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 6.

Punto	dis_2D [m]	dis_3D [m]	Tipo	Shadow Fading [dB] ⁷	Path loss WINNER	Path loss 3GPP	Path loss IMT-Ad
1	110.11	115.69	NLoS	Rand	103.81	99.14	102.28
2	81.39	88.80	NLoS	Rand	93.16	98.32	94.27
3	114.24	119.63	NLoS	Rand	97.04	93.69	97.20
4	121.66	126.73	LoS	Rand	95.58	95.61	104.79
5	25.00	43.42	LoS	Rand	82.30	82.89	81.24
6	78.10	85.79	NLoS	Rand	98.70	87.53	93.02
7	99.00	105.17	NLoS	Rand	98.16	93.69	91.10
8	76.48	84.32	NLoS	Rand	91.62	93.95	93.40
9	169.85	173.52	NLoS	Rand	102.01	109.05	107.90
10	145.00	149.28	NLoS	Rand	102.43	104.50	104.32

Tabla 6 : Cálculo de las variables modelos IMT-Advanced, 3GPP-3D, WINNER II

⁷ Valores de *Shadow Fading* según tablas descritas en los modelos

III.3.2.2 Comparación de los resultados.

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de las pérdidas de propagación para los distintos modelos.

Punto	Path loss WINNER [dB]	Path loss 3GPP [dB]	Path loss IMT-Adv [dB]	Path loss METIS [dB]
1	103.81	99.14	102.28	127.42
2	93.16	98.32	94.27	123.11
3	97.04	93.69	97.20	112.25
4	95.58	95.61	104.79	123.60
5	82.30	82.89	81.24	85.95
6	98.70	87.53	93.02	105.58
7	98.16	93.69	91.10	125.97
8	91.62	93.95	93.40	121.33
9	102.01	109.05	107.90	132.97
10	102.43	104.50	104.32	131.88

Tabla 7 : Resultados obtenidos para la validación de los modelos

En la Figura 21 se muestra una representación de estos resultados de los puntos aleatorios que se ha tomado en el escenario sintético.

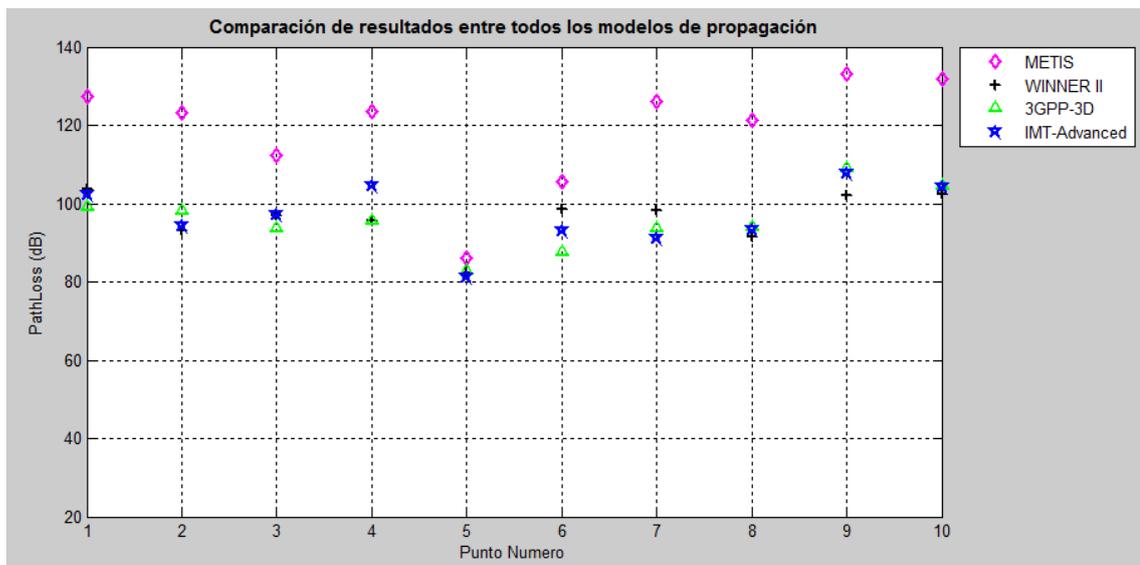


Figura 21 : Comparación de resultados entre los modelos

Con los resultados mostrados, podemos comprobar que efectivamente existe una diferencia entre los valores obtenidos entre los modelos de 3GPP-3D, IMT Advanced, WINNER II y el de METIS, con lo cual se demuestra que los cálculos obtenidos en la simulación en el escenario sintético son correctos y se ajustan a las ecuaciones propuestas en cada uno de los modelos. Cabe destacar que el modelo propuesto por METIS es el más pesimista en comparación con los otros modelos, sobre todo en situación de altas pérdidas de propagación sin línea de vista.

III.3.3 Análisis INDOOR

Hasta ahora hemos analizado los puntos ubicados en el callejero (puntos *Outdoor*), ahora nos toca analizar los puntos ubicados dentro de los edificios (*Indoor*). Para ello, utilizaremos el mismo escenario sintético propuesto y evaluaremos los puntos en el interior de las plantas de los edificios.

Para realizar el análisis, tomaremos el 80% del total de usuarios del escenario sintético que se distribuirán aleatoriamente dentro de las diferentes plantas de los edificios del escenario. En esos puntos se calcularán las pérdidas de propagación o *path loss*, considerando que para este análisis sólo podemos usar los modelos de propagación de METIS y 3GPP-3D debido a que estos modelos incluyen el escenario O2I dentro de sus especificaciones.

Realizaremos los gráficos de CDF separando los resultados de cada una de las plantas de los edificios con la finalidad de obtener gráficos independientes por planta para poder comparar ambos modelos.

A continuación, en las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos.

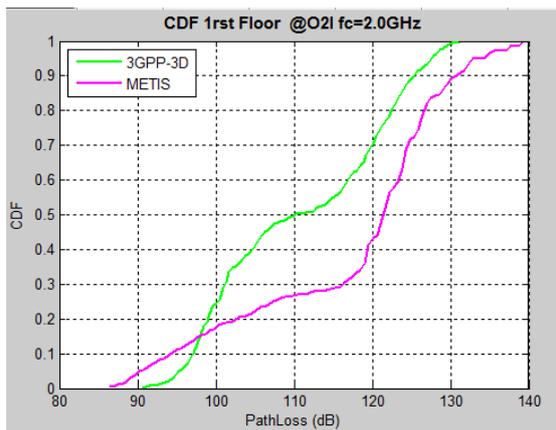


Figura 22 : CDF O2I, 1st Floor

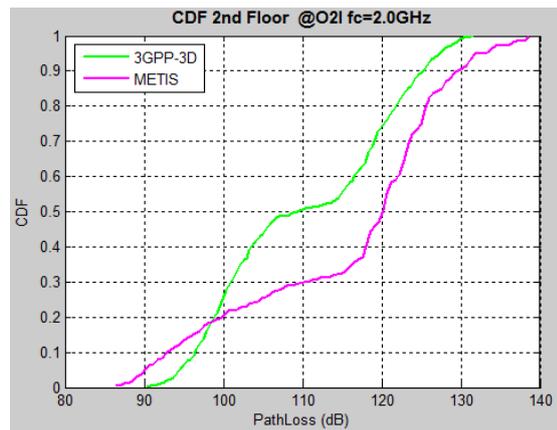


Figura 23 : CDF O2I, 2nd Floor

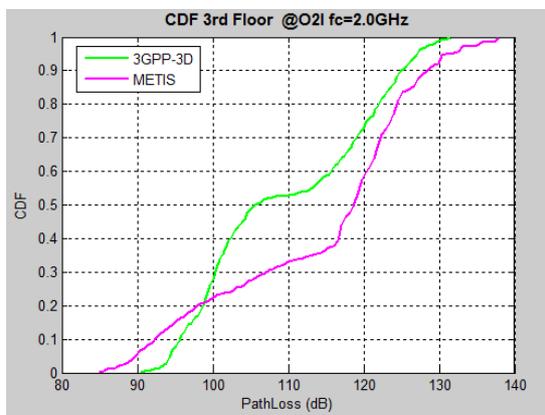


Figura 24 : CDF O2I, 3rd Floor

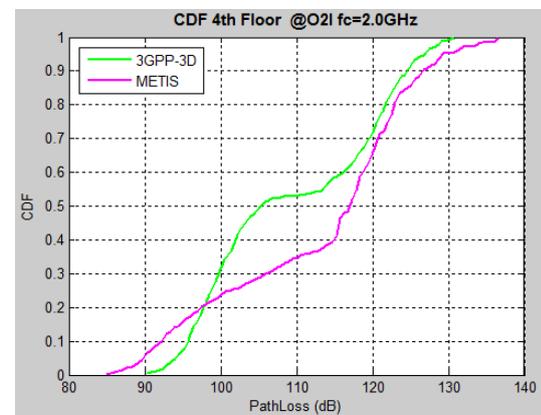


Figura 25 : CDF O2I, 4th Floor

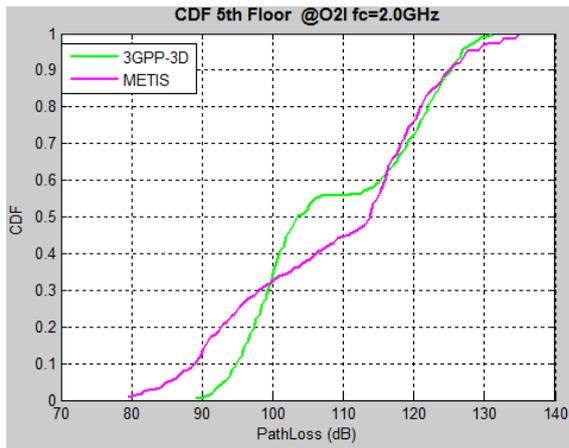


Figura 26 : CDF O2I, 5th Floor

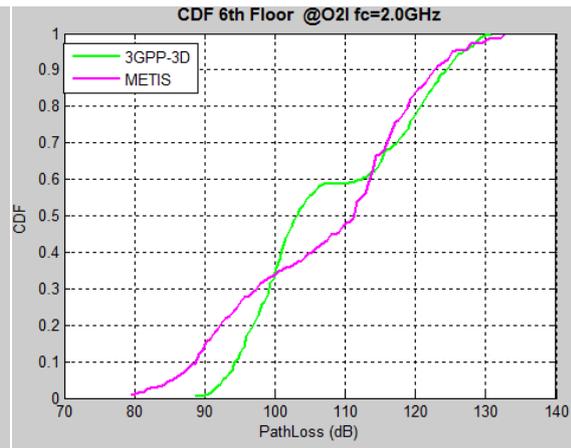


Figura 27 : CDF O2I, 6th Floor

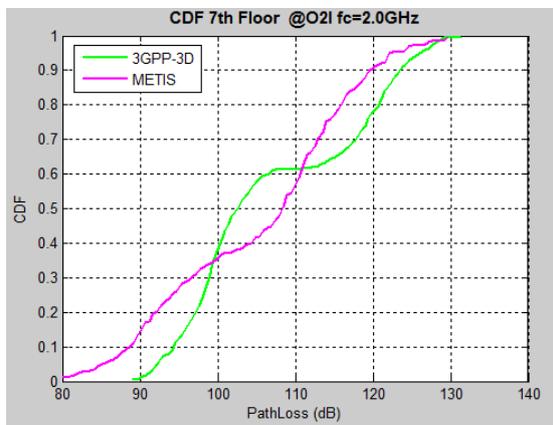


Figura 28 : CDF O2I, 7th Floor

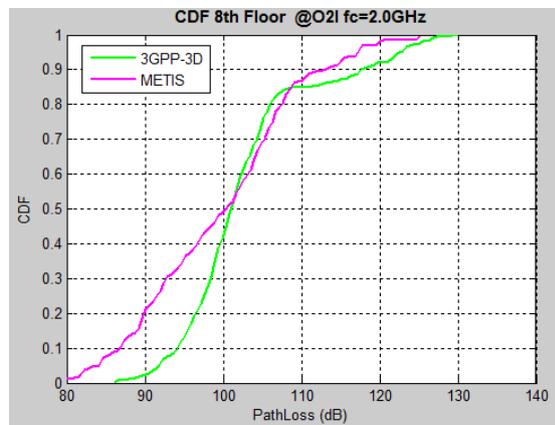


Figura 29 : CDF O2I, 8th Floor

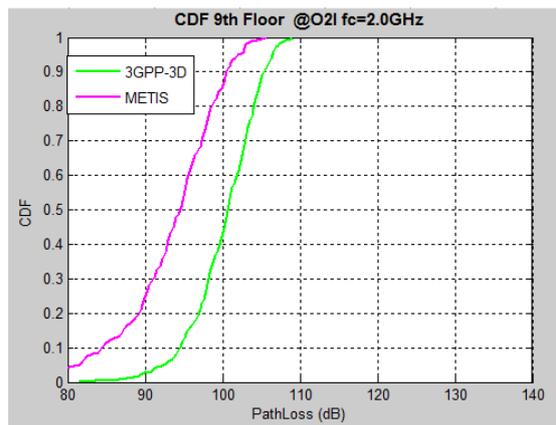


Figura 30 : CDF O2I, 9th Floor

Al observar los resultados de CDF, parecen no tener concordancia con los resultados obtenidos en el primer análisis, por tal motivo, a continuación, analizaremos detalladamente estos resultados para poder validarlos.

Debido a que el cálculo de *path loss* para los puntos O2I, tienen como base las ecuaciones usadas para los puntos *Outdoor*, en la Tabla 8 se muestran las diferencias iniciales que se obtuvieron para ambos modelos en ese escenario (*outdoor*).

ESCENARIO <i>OUTDOOR</i>	P	Modelo METIS	Modelo 3GPP-3D	Diferencia (METIS – 3GPP)	
	<i>LOS</i>	L_f	LoS 3GPP-3D	0-1 dB	
	<i>NLOS</i>	$L_f +$ $L_{rts} +$ L_{mds}	NLoS 3GPP-3D	+18-20 dB	+7.5-10 dB

Tabla 8 : Diferencias iniciales escenario *Outdoor* para los modelos METIS y 3GPP

En los gráficos de CDF de las plantas inferiores, se puede observar que la diferencia entre los valores de ambos modelos disminuye en comparación al escenario de *Outdoor*, en la Tabla 9 se muestra la comparación entre las variables para determinar cuál de estas es la causante de acortar la diferencia entre los modelos para el escenario O2I.

Variable	O2I METIS	O2I 3GPP-3D	METIS - 3GPP- 3D $l > d_s$	METIS - 3GPP- 3D $l \leq d_s$
Path loss	$L_f +$ $L_{rts} +$ L_{mds}	NLoS 3GPP-3D	+18dB ⁸	+7.5dB ⁹
PL_{tw}	$PL_{tw} = 12.5$	$PL_{tw} = 20\text{dB}$	-7.5 dB	-7.5 dB
PL_{in}	$0.5 * d_{in}$	$0.5 * d_{in}$	+0dB	+0dB
		Diferencia	+10.5dB	+0dB

Tabla 9 : Diferencias entre los modelos para escenarios O2I con NLoS

Si observamos los gráficos de CDF de las plantas superiores, nos damos cuenta que el modelo de 3GPP-3D, tiene valores de *path loss* superiores a los de METIS. Estos resultados parecen no ser los correctos, comparándolos con los cálculos realizados en los puntos *Outdoor* en la primera parte. Sin embargo, analizando el escenario, podemos ver claramente que todas las plantas superiores tienen línea de vista con respecto a la BS y como se mostró en la Figura 4, los valores de *path loss* para escenarios con línea de vista son iguales para los dos modelos.

Tomando esto en consideración, en la Tabla 10 se muestra que la diferencia entre los modelos para los puntos *Indoor* que tienen línea de vista se encuentra en las pérdidas de penetración de las paredes, para el modelo de 3GPP se considera 20dB para todos los casos, mientras que para el de METIS el valor medio de esta pérdida es de 12.5dB.

⁸ Diferencia entre Path Loss METIS – UMa NLOS 3GPP cuando $l > d_s$, ver Figura 6

⁹ Diferencia entre Path Loss METIS – UMa NLOS 3GPP cuando $l \leq d_s$, ver Figura 6

Variable	METIS	3GPP-3D	METIS - 3GPP-3D
Path loss	L_f	LoS 3GPP-3D	+0dB ¹⁰
PL_{th}	$P_{hw} = 12.5$	$P_{hw} = 20$	-7.5 dB
PL_{in}	$0.5 \times d_{in}$	$0.5 \times d_{in}$	+0 dB
		Diferencia Aprox.	-7.5 dB

Tabla 10 : Diferencias entre los modelos para escenarios O2I con LoS

Con lo descrito anteriormente, se sustenta los resultados obtenidos en las gráficas de CDF realizadas nivel a nivel para el escenario sintético que se ha planteado.

III.3.4 Análisis Indoor + Outdoor

Ahora compararemos los modelos de 3GPP-3D y METIS tomando el 100% de los usuarios y distribuyendo el 20% en el callejero y el restante en las diferentes plantas de los edificios del escenario en puntos aleatorios.

En la Figura 31 se muestran los resultados obtenidos. Se puede observar las diferencias entre ambos modelos que guardan relación con los presentados hasta el momento. De nuevo cabe destacar que el modelo METIS es más realista que el modelo 3GPP-3D en sus suposiciones, aunque también concluye una pérdidas de propagación mayores. Habrá por tanto corroborar la validez de ambos modelos con medidas reales.

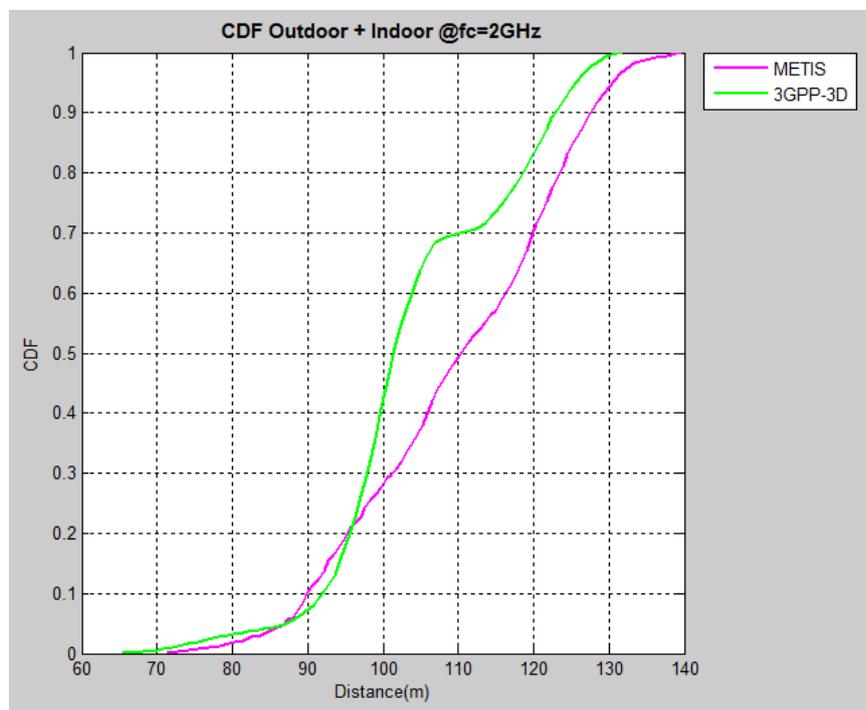


Figura 31 : CDF Outdoor + Indoor @2GHz

¹⁰ Diferencia entre Path Loss METIS – UMa LOS 3GPP, ver Figura 4

III.4 Campaña de medidas

Después de haber analizado el comportamiento de los modelos de propagación y con la finalidad de saber cuál de estos modelos se acerca más a un escenario real, es necesario hacer una campaña de medidas para poder sacar conclusiones que nos permitan determinar cuál de estos modelos es el más eficiente y certero.

En esta sección se pretende comparar los resultados en un escenario real, haciendo la comparación de los resultados teóricos con los medidos mediante un drive test.

La campaña de medidas se realizó en un entorno urbano, en la ciudad de Valencia, con las siguientes características: edificios con una altura media de treinta metros, estación base ubicada en la azotea de un edificio con una vista predominante frente a los demás, con una altura aproximada total a 37 metros, ancho del callejero de 20 metros y edificios con una media de 10 plantas con altura promedio de 3 metros por piso.

En la Figura 32 se muestra la ubicación de la antena de la estación base y el entorno urbano donde se realizará las mediciones.



Figura 32: Ubicación de la antena de la BS

En la Figura 33, se muestra el escenario donde se realizó la campaña de medidas, la ubicación de estación base y el azimut de la antena del sector que será sujeto a estudio.



Figura 33 : Escenario de la campaña de medición

Usando un terminal móvil con una aplicación que permite medir el nivel de RSCP¹¹ e identificar el CID de un sector de la BS, se realizó un *drive test* dentro del escenario propuesto, obteniendo los valores de RSCP, CID y las coordenadas de los puntos.

En la Figura 34 se muestra el escenario creado para evaluar los modelos mediante simulaciones.

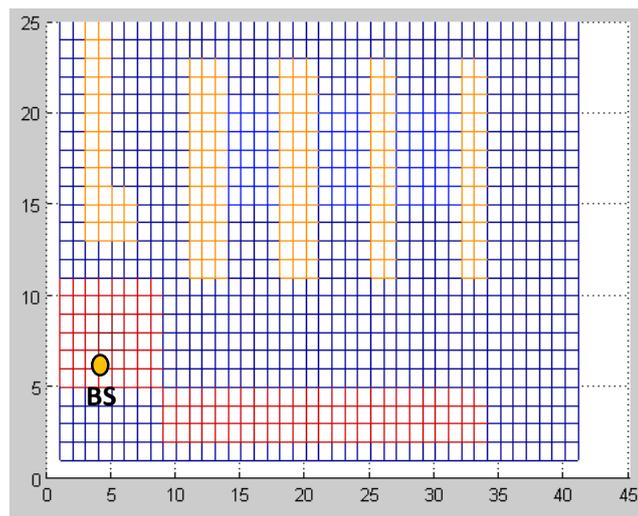


Figura 34: Escenario real, campaña de medidas

¹¹ RSCP: *received signal code power*

En la Figura 35, se muestran los puntos en los cuales se obtuvieron los valores de RSCP que corresponden a una misma celda (CID). Con estos resultados obtenidos de los niveles de RSCP obtendremos los valores aproximados del *path loss* en cada punto tomando en cuenta la potencia de la estación base, la ganancia del terminal móvil y la ganancia de la antena para cada punto calculando los valores aproximados de azimut y elevación.



Figura 35 : Puntos de medición de RSCP en el escenario

En la Figura 36 se muestra el desarrollo del plano sintético para realizar la evaluación de los modelos de propagación.

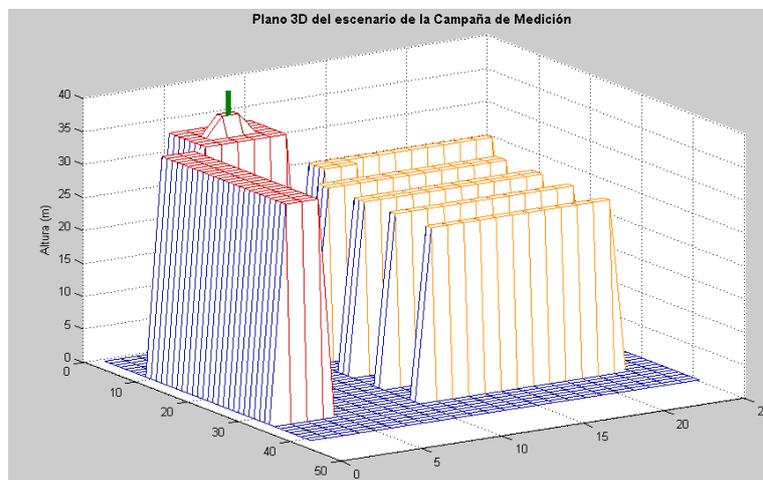


Figura 36 : Mapa 3D sintético correspondiente al escenario real

Para realizar el cálculo del *path loss* a partir de los valores de RSCP, se utilizó la siguiente ecuación proporcionada por [20],

$$PathLoss[dB] = P_{tx}[dB] - RSCP[dB] - G_{antenna}[dB],$$

donde $P_{tx} = 20 \text{ dB}$ y $G_{antenna}[dB]$ depende del azimut y *tilt* de la antena de la estación base, siguiendo el modelo de [11].

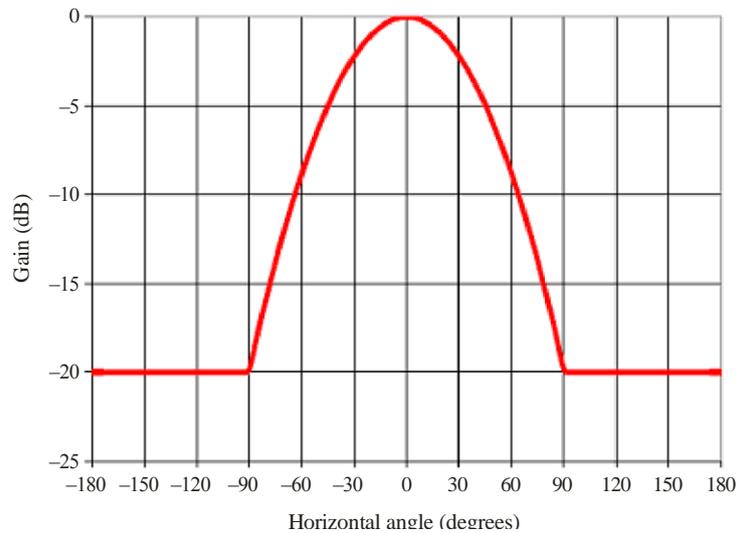


Figura 37 : Ganancia de la antena (Azimut) [11]

Realizando los cálculos de *path loss* con los datos de RSCP obtenidos en la campaña de medidas, y desarrollando los modelos de propagación de METIS, 3GPP-3D e IMT-Advanced obtenemos los resultados mostrados en la Figura 38.

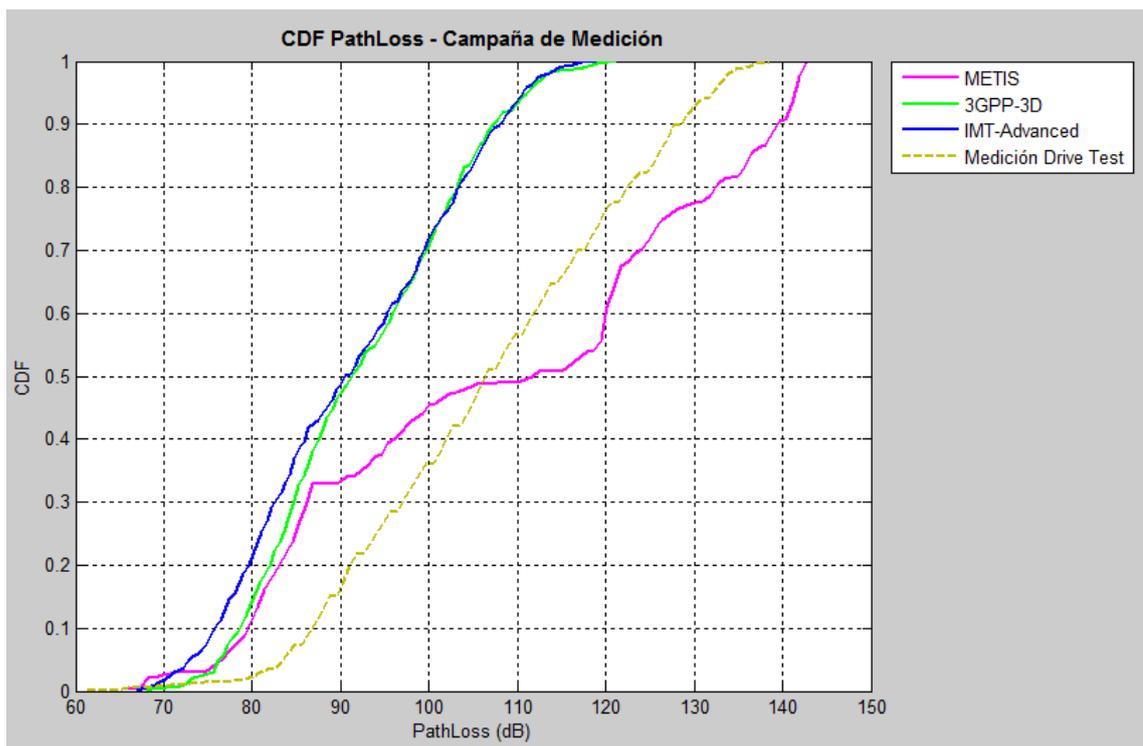


Figura 38 : CDF del escenario real vs modelos de propagación

Se puede observar que los resultados obtenidos en la campaña de medidas se ajustan al modelo de METIS, y que los modelos de propuestos por 3GPP-3D e IMT-Advanced tienen un comportamiento similar pero en media tienen una diferencia de 10dB entre las mediciones reales y sus modelos.

Finalmente, podemos concluir que el modelo de propagación más realista es el de METIS.

Capítulo IV

Conclusiones

Como primera conclusión podemos resaltar que los modelos de propagación propuestos por 3GPP-3D e IMT-Advanced guardan relación entre sí. Con estos modelos se obtienen resultados de pérdidas de propagación similares para los distintos escenarios de evaluación, ya sea puntos con o sin línea de vista. Sin embargo, estos resultados tienen una diferencia importante respecto a las medidas reales.

Podemos decir también, que el modelo de pérdidas de propagación de METIS, es un modelo de propagación más “pesimista” en comparación a los de 3GPP-3D e IMT-Advanced. Además, este modelo tiene como principal diferencia que para el cálculo de las pérdidas de propagación se analiza en cada punto la geometría completa del escenario, dando como resultado valores de pérdidas de propagación más exactos.

Tras la evacuación realizada basada en un conjunto de medidas de drive test, se puede concluir claramente que el modelo de METIS es el modelo más realista en comparación a los modelos de 3GPP-3D e IMT-Advanced y a pesar de mostrarse como un modelo pesimista, es el que se ajusta más a los resultados medidos en campo.

Finalmente, es importante indicar y recomendar que para las futuras evaluaciones de las prestaciones de los sistemas 5G, es necesario usar el modelo de propagación METIS que permitirá analizar correctamente las prestaciones del sistema.

Como líneas futuras de trabajo, se destaca la necesidad de validar el modelo de pérdidas también en entornos *indoor*. Este es un trabajo más costoso de realizar, puesto que en ocasiones es difícil poder caracterizar adecuadamente la propagación dentro de los edificios por no disponer de permisos para ello.

Bibliografía

- [1] D. A. F. Europe, «A Europe 2020 Initiative,» [En línea]. Available: <http://ec.europa.eu/digital-agenda/en/towards-5g>.
- [2] METIS, «METIS2020,» [En línea]. Available: www.metis2020.com.
- [3] CNN, «Edition CNN,» CNN, 22 01 2014. [En línea]. Available: <http://edition.cnn.com/2014/01/22/tech/mobile/south-korea-5g/>.
- [4] Ericsson, «Mobility Report,» [En línea]. Available: <http://www.ericsson.com/res/docs/2013/emr-august-2013.pdf>.
- [5] S. N. K. Marwat, LTE Channel Modelling for System Level Simulations, University of Bremen, 2011.
- [6] J. J. Carr, Practical Antenna Handbook, McGraw-Hill, 2002.
- [7] J. F. M. d. Río, Mejora de la Arquitectura de Acceso Radio UMTS mediante Multinodos B, Valencia: UPV, 2007.
- [8] A. F. Molisch, Wireless Communications, Wiley IEEE, 2011.
- [9] J. D. Gibson, The Communications Handbook, IEEE Press, 1997.
- [10] 3GPP, «3GPP TR 36.873 V1.0.0 (2013-09),» 2013.
- [11] ITU, «REPORT ITU-R M.2135».
- [12] METIS, «The METIS 2020 Project,» [En línea]. Available: <https://www.metis2020.com/>.
- [13] METIS, « ICT-317669-METIS/D6.1,» p. 44, 2013.
- [14] J. G. Proakis, Digital Communications, McGraw-Hill Higher Education, 1995.
- [15] A. F. Molisch, Review of Wireless Communications, 2005.
- [16] E. K. T. a. A. R. N. Zhenyu Wang, «Statical Peer-to-Peer Channel Models for Outdoor Urban Enviroments at 2 GHz and 5 GHz,» *IEEE*, Vols. %1 de %20-7803-8521-7/04, 2004.
- [17] S. F. João Figueiras, Mobile Positioning and Tracking, 2010.
- [18] J. J. O. M. G. J. F. M. Narcis Cardona, 3GPP LTE: Hacia la 4G móvil, Marcombo, 2011.
- [19] P. M. E. F. Pérez Fontán, Modeling the Wireless Propagation Channel, Wiley, 2008.
- [20] S. Afsardoost, Radio Channel Measuremten in 3G Networks, Chalmers, 2009.
- [21] I. T. M. B. S. Sesia, LTE - The UMTS Long term Evolution: From Theory to Practice, John Willey & Sons, 2009.