



Universidad
Politécnica
de Cartagena

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estudio y Simulación del Canal Radio a 94 GHz
mediante una herramienta de trazado de rayos.**

AUTOR: Miguel Macanás Jiménez.

DIRECTOR: Juan Pascual García.

Septiembre / 2016





Universidad Politécnica de Cartagena

Autor	Miguel Macanás Jiménez
E-mail del Autor	miguelmacanas@hotmail.com
Director	Juan Pascual García
E-mail del Director	juan.pascual@upct.es
Título del TFE	Estudio y Simulación del Canal Radio a 94 GHz mediante una herramienta de Trazado de Rayos
Resumen	<p>La banda de frecuencias situadas entre los 90 GHz y los 110 GHz representa una oportunidad para el desarrollo de aplicaciones de alta velocidad de transmisión de datos en entornos interiores. Para poder desarrollar dichos sistemas de comunicación inalámbrica es necesario realizar una planificación cuidadosa para garantizar una cobertura adecuada. En el presente proyecto se utilizará una herramienta de trazado de rayos para analizar el canal radio en un laboratorio en la banda de interés.</p> <p>El trazador de rayos constituye una técnica determinista que gracias a una aproximación de alta frecuencia considera las ondas transmitidas como rayos. Gracias a ello el trazador de rayos permite la simulación completa del canal. De este modo, se obtendrá la función de transferencia en frecuencia para diversos receptores y a partir de dicha función se obtendrá la función en el dominio del tiempo que posibilita la estimación final del Perfil de Retardo Normalizado (PDP según las siglas en inglés).</p> <p>Las simulaciones realizadas serán comparadas con medidas experimentales realizadas en el laboratorio estudiado. El presente proyecto tiene como objetivo la aplicación del método semi-determinista conocido como trazado de rayos en el estudio del canal radioeléctrico en la banda de 92.5 GHz a 95.5 GHz. Este método está basado en la obtención de una serie de imágenes que permiten eliminar las paredes del entorno de interior. El estudio de todas las réplicas posibilita no solo el cálculo de las coberturas sino también un estudio profundo del canal tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. En este proyecto se espera caracterizar el canal radio en la banda bajo estudio de una forma más completa y precisa que en los trabajos presentados en la literatura científica de este campo.</p>
Titulación	Grado en Sistemas de Telecomunicación
Departamento	Departamento Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Fecha de Presentación	Octubre 2016

Agradecimientos

A mis profesores de la carrera, por dotarme no sólo de los conocimientos de las asignaturas, sino por ir más allá y despertarme el interés y la pasión por las Telecomunicaciones.

A mi director de proyecto, D. Juan Pascual García, por su ayuda y la predisposición a ayudar que ha tenido en todo momento, por su dedicación y consejos que han hecho que lo difícil terminara pareciendo fácil.

A mis padres, a mi hermana y a mi pareja Elena, por estar siempre que los he necesitado, por creer y confiar en mí en todo momento, porque una parte de vosotros está presente en este trabajo, gracias.

Índice

Índice	1
1. Introducción	3
1.1 Objetivos	5
1.2 Fases del proyecto	5
2. Modelo geométrico del entorno	7
3. Caracterización electromagnética de materiales	10
4. La herramienta de simulación. El Trazador de Rayos	15
4.1 Programación de paredes triangulares para simulaciones con reflexiones.....	18
5. Simulaciones y Resultados	21
5.1 Medidas experimentales realizadas en el laboratorio	21
5.2 Configuración de los parámetros de entrada del trazador de rayos.....	26
5.3 Parámetros del canal radio	27
5.3.1 PDP (Perfil de retardo normalizado).....	27
5.3.2 Exceso de retardo medio (“mean excess delay”)	28
5.3.3 RMS delay spread	28
5.3.4 Otros parámetros	29
5.4 Simulaciones con una reflexión	29
5.5 Simulaciones con dos reflexiones	35
5.6 Simulaciones completas.....	37
6. Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo	40
6.1 Conclusiones	40
6.2 Futuras Líneas de Trabajo	41
Referencias	43
Anexo I	45
Anexo II	73

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas de comunicación inalámbricos de corto alcance se están expandiendo a una gran velocidad. La falta de bandas de frecuencia desocupadas que puedan albergar un gran ancho de banda está llevando a la utilización de frecuencias situadas en las bandas de ondas milimétricas (entre los 30 GHz y los 300 GHz [1]). Esta región es la correspondiente a las microondas. Estas frecuencias representan una oportunidad para el desarrollo de aplicaciones de alta velocidad de transmisión de datos en entornos interiores. En concreto, nos centraremos en el rango de frecuencias de 92.5 GHz a 95.5 GHz. Este rango se enmarca dentro de la banda W (que abarca desde los 75 GHz a los 111 GHz).

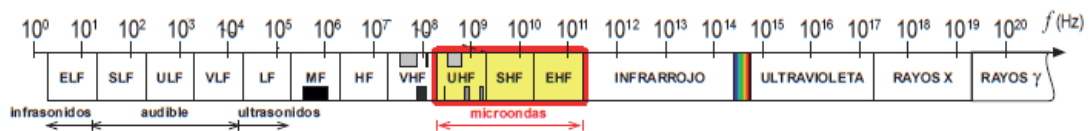


Figura 1. División del espectro electromagnético [2].

Banda	P	L	S	C	X	K _u	K	K _a	Q	U	V	E	W	F	D
Inicio (GHz)	0.2	1	2	4	8	12	18	26.5	30	40	50	60	75	90	110
Final (GHz)	1	2	4	8	12	18	26.5	40	50	60	75	90	110	140	170

Tabla I. Bandas de frecuencia de microondas

Para poder desarrollar dichos sistemas de comunicación inalámbrica es necesario realizar una planificación cuidadosa para garantizar una cobertura adecuada. En estos sistemas que utilizan el aire como medio de transmisión, la caracterización de la respuesta del canal radio es la pieza clave para el correcto diseño y funcionamiento de los sistemas de comunicaciones móviles. La respuesta del canal radio es muy variable, tanto en tiempo como en espacio. Esta es una de sus características fundamentales. El parámetro básico que se debe conocer de una comunicación inalámbrica son las pérdidas que sufre la señal desde que ésta sale de la antena transmisora hasta que es recibida por la antena receptora.

En la banda mencionada anteriormente apenas se han realizado estudios del canal inalámbrico [3] [4]. En el presente proyecto se utilizará una herramienta de trazado de rayos para analizar el canal radio dentro de un laboratorio en la banda de interés.

El trazador de rayos constituye una técnica determinista que gracias a una aproximación de alta frecuencia considera las ondas transmitidas como rayos. Debido a esto, y para obtener unos resultados precisos, será necesario una correcta caracterización del entorno bajo estudio mediante la obtención de un modelo numérico del mismo. Asimismo, también será muy importante llevar a cabo una correcta caracterización electromagnética de los materiales presentes en el entorno.

Con todo esto, el trazador de rayos permite la simulación completa del canal. De este modo, se obtendrá la función de transferencia en frecuencia para diversos receptores y a partir de dicha función se obtendrá la función en el dominio del tiempo que posibilita la estimación final del Perfil de Retardo Normalizado (PDP según las siglas en inglés). El PDP permite obtener parámetros del canal tan importantes como la dispersión temporal o las pérdidas básicas de propagación.

Las simulaciones realizadas serán comparadas con medidas experimentales realizadas en el laboratorio estudiado. El presente proyecto tiene como objetivo la aplicación del método semi-determinista conocido como trazado de rayos en el estudio del canal radioeléctrico en la banda de 92.5 GHz a 95.5 GHz. Este método está basado en la obtención de una serie de imágenes que permiten eliminar las paredes del entorno de interior. Desde cada imagen se traza un rayo que constituye una réplica de la señal transmitida. El estudio de todas las réplicas posibilita no solo el cálculo de las coberturas sino también un estudio profundo del canal tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es poder validar el correcto funcionamiento del trazador de rayos en la banda de 94 GHz mediante la comparación de las simulaciones obtenidas con las medidas experimentales realizadas en el laboratorio estudiado.

El primer paso será el estudio del funcionamiento del trazador de rayos ya programado en Matlab. Dentro de los parámetros que tendremos que tener en cuenta para su correcto funcionamiento se encuentran:

- La generación de un modelo geométrico del laboratorio en el que se realizaron las medidas del canal radio a 94 GHz.
- La búsqueda de parámetros a la frecuencia de estudio tales como la permitividad, conductividad y atenuación que nos permitan caracterizar de forma adecuada los materiales presentes en el laboratorio.
- La ubicación y el diagrama de radiación correspondiente tanto a la antena transmisora como receptora.

El siguiente paso será realizar las simulaciones con el trazador de rayos para las diferentes posiciones en las que se tomaron las medidas obteniendo así:

- El Perfil de Retardo Normalizado (PDP) que nos servirá para discernir las diferentes réplicas que llegan al receptor y saber en qué instante de tiempo y con qué potencia lo hacen.
- Parámetros tales como el valor cuadrático medio del ensanchamiento del retardo ("rms delay spread"), el exceso de retardo medio ("mean excess delay") y la atenuación total ("path loss") obtenidos a partir del PDP.

Por último, y con el fin de validar las simulaciones realizadas, llevaremos a cabo una comparación con las medidas que se tomaron en el laboratorio.

1.2 Fases del proyecto

Con el fin de realizar un seguimiento continuo y organizado, el proyecto se ha dividido en diferentes fases:

- Fase1: Obtención del modelo geométrico del laboratorio.
- Fase 2: Estudio de la caracterización electromagnética de los materiales de un entorno de interiores en la banda de 92.5 GHz a 95.5 GHz y estudio del funcionamiento del trazador de rayos programado en Matlab.

- Fase 3: Programación de paredes triangulares en el trazador de rayos. Esto es debido a que el trazador de rayos sólo podía simular entornos con paredes rectangulares. Debido a la geometría del laboratorio bajo estudio, fue necesaria la inclusión de paredes triangulares.
- Fase 4: Simulación con la herramienta de trazado de rayos del canal inalámbrico en el entorno seleccionado.
- Fase 5: Recolección de medidas en el entorno interior seleccionado en la banda bajo estudio.
- Fase 6: Comparación de las simulaciones realizadas con el trazador de rayos.
- Fase 7: Análisis del canal y del rendimiento y precisión del trazador de rayos.
- Fase 8: Redacción del proyecto.

Capítulo 2

Modelo geométrico del entorno

El entorno en el que se llevaron a cabo las medidas experimentales y, por tanto, el lugar del que hay que obtener el modelo geométrico para posteriormente introducirlo en el trazador de rayos para realizar las simulaciones es un laboratorio que se encuentra en el Edificio de Investigación (ELDI) perteneciente a la Universidad Politécnica de Cartagena. Concretamente se encuentra en la segunda planta, habitación 2.11. Las dimensiones del laboratorio son 9.1 x 4.8 x 4.1 metros. En la figura 2 se puede ver una foto panorámica del interior del laboratorio. En la figura 3 podemos ver un esquema del laboratorio con los elementos más importantes presentes en él.



Figura 2. Panorámica del laboratorio.

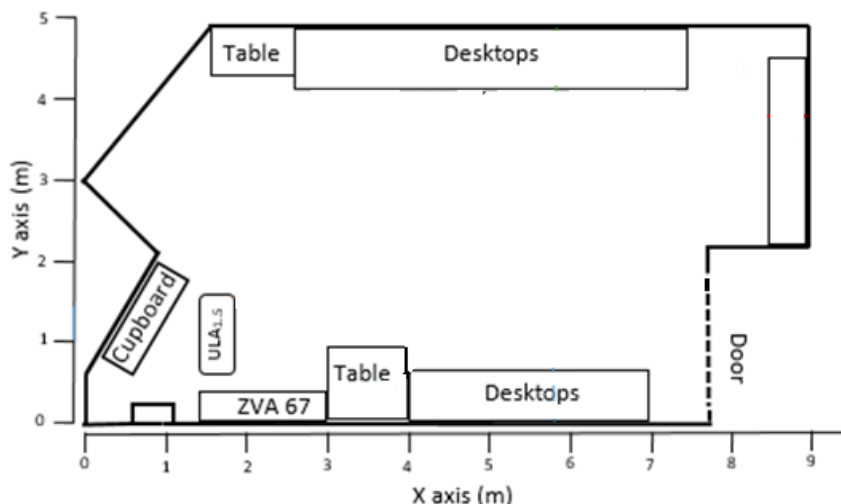


Figura 3. Esquema del laboratorio.

Como podemos ver, dentro del laboratorio hay una serie de elementos tales como armarios, estanterías, mesas etc. que tendremos que tener en cuenta e incluir en nuestro modelo geométrico para intentar tener una reproducción lo más parecida posible al entorno en el que se tomaron las medidas. Es importante realizar un modelo con una precisión elevada, ya que las simulaciones dependerán en gran parte de él. A mayor precisión, obtendremos simulaciones más ajustadas a la realidad.

La manera de introducir todos estos elementos a la herramienta de simulación es mediante el empleo de paredes rectangulares ortogonales definidas por sus cuatro vértices de tres coordenadas cada uno (espacio tridimensional) [5]. También utilizaremos paredes triangulares definidas a partir de las paredes rectangulares, pero teniendo en cuenta sólo los tres vértices que lo definen.

Nótese que la mayoría de elementos del laboratorio pueden ser modelados únicamente mediante rectángulos, salvo por la pared que se encuentra formando cuña, en la que será necesaria la inclusión de figuras triangulares para modelar tanto la parte del suelo como la del techo.

Todos los elementos son almacenados en un fichero en Matlab. Este fichero contiene todos los datos del entorno, las posiciones de cada uno de los elementos y también las características electromagnéticas de los materiales que forman estos elementos. Una vez está todo introducido en el fichero, éste se ejecuta devolviendo una variable que se almacena en el programa con el nombre "planes", que será leída e interpretada por el simulador.

El punto de referencia sobre el que definiremos todos los elementos que introduciremos se encuentra en el extremo inferior izquierda. Este punto será tomado como la coordenada (0,0,0). A partir de él y en una primera aproximación, definiremos los elementos más sencillos, es decir, las paredes exteriores del laboratorio, el suelo y el techo. El resultado se muestra en la figura 4.

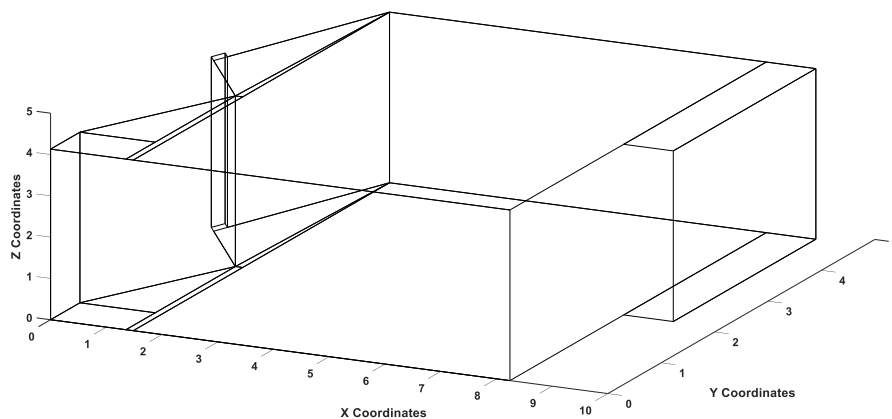


Figura 4. Modelo geométrico primera aproximación.

De esta misma manera, iremos introduciendo los demás rectángulos que irán modelando los elementos que se encuentran en el interior del laboratorio. Finalmente, el resultado obtenido se puede ver en la figura 5.

Hay que destacar también que no todos los elementos del interior del laboratorio han sido tenidos en cuenta en el modelo geométrico debido a que no tendrán mucha influencia en las simulaciones (como es el caso de las sillas) y otros han sido aproximados como por ejemplo las lámparas del techo, debido a que presentaban una forma pentagonal. Tampoco se define el grosor de los elementos.

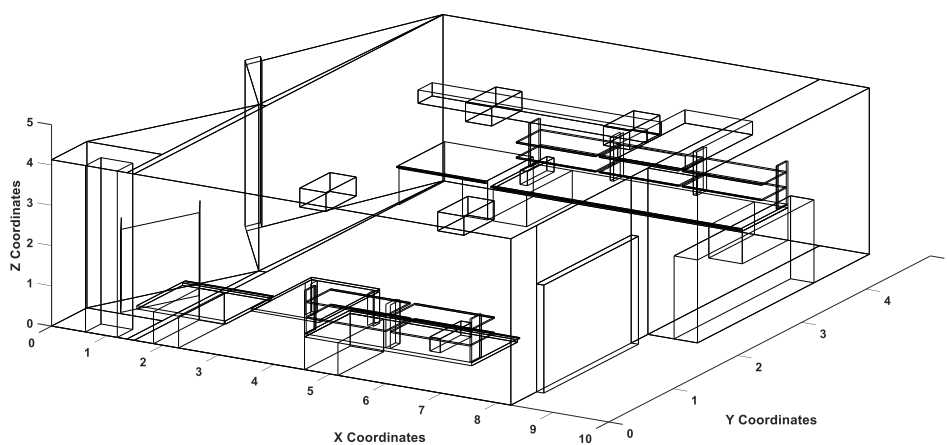


Figura 5. Modelo geométrico final

Capítulo 3

Caracterización electromagnética de materiales

En los últimos años, el estudio de los sistemas de comunicación inalámbricos con frecuencias portadoras alrededor de los 100 GHz se ha intensificado. El estímulo de este espacio espectral resulta de las tasas de datos estimadas requeridas para futuras aplicaciones inalámbricas. Se necesitarán decenas de Gbits, por lo que es obligatorio un gran ancho de banda y puede ser proporcionado por sistemas con frecuencias centrales entre 100 y 1000 GHz [6], lugares donde la atenuación gaseosa es relativamente baja. Antes de que estos sistemas puedan ser introducidos, el canal radio para entornos de interior debe estar caracterizado a fondo con el fin de entender los fenómenos de propagación, establecer balances del enlace y analizar escenarios de aplicación potenciales.

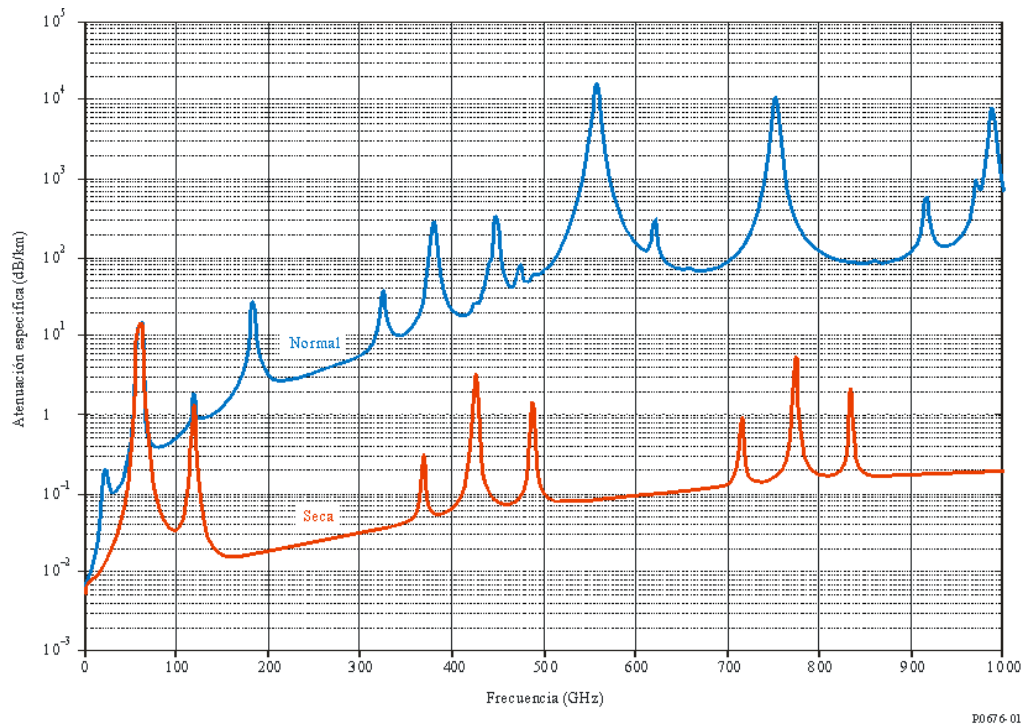


Figura 6. Atenuación específica debido a los gases atmosféricos [7]

Una parte muy importante a la hora de obtener unas simulaciones que se asemejen a la realidad dependerá de la caracterización de los materiales que se encuentren en el laboratorio. La medida de las propiedades dieléctricas juega un papel crucial para la caracterización de distintos materiales. Precisamente medir las propiedades electromagnéticas de los materiales es muy importante para predecir la actuación del sistema [8].

La fiabilidad de las simulaciones con el trazador de rayos dependerá de la precisión a la hora de estimar las propiedades electromagnéticas de los materiales en el entorno estudiado. Por lo tanto, sólo el conocimiento exacto de estos parámetros en un amplio rango de frecuencias permite simulaciones fiables de la propagación de la señal en futuras bandas inalámbricas de los sistemas de comunicación.

En nuestro caso necesitaremos de tres parámetros básicos para poder caracterizar de forma adecuada cada elemento del entorno: la conductividad (σ), la permitividad compleja (ϵ) y la atenuación (A).

Los materiales de los que debemos obtener estas características son los que conforman los elementos del laboratorio. En la tabla II se muestran los elementos del entorno que se han incluido en el modelo geométrico y el material que se les ha asignado para la simulación.

Elemento	Tipo de material asignado
Paredes	Placa de yeso
Suelo	Revestimiento de suelos
Techo	Hormigón
Conducto del aire	Revestimiento de techos
Puerta	Madera
Armarios	Aglomerado
Estanterías	Aglomerado
Mesas	Aglomerado
Ordenadores	Metal
Lámparas	Cristal

Tabla II. Materiales empleados para cada elemento.

Los parámetros anteriormente comentados varían con la frecuencia. Puesto que la frecuencia central de nuestra banda de trabajo es la de 94 GHz, tendremos que obtener estos parámetros de los materiales a esa frecuencia. Debido a que esta banda de frecuencias no es muy usual, los datos de las permitividades de todos los materiales que necesitamos para nuestra simulación a estas elevadas frecuencias no suelen estar especificados.

De los más comunes, como el cristal o la madera, sí que encontramos valores medidos experimentalmente [9] [10]. Los demás los obtendremos a partir de unas fórmulas aproximadas proporcionadas (obtenidas a partir de resultados experimentales tomadas en el rango comprendido entre 1 GHz y 100 GHz) que dependen de la parte real de la permitividad relativa (ϵ_r) y de unos parámetros que se definen para cada material, según la recomendación dada por el UIT-R P.1238-7 [11].

De esta manera, la fórmula que nos permite calcular la conductividad (expresada en Siemens/metro) viene dada por:

$$\sigma = c \times f^d \text{ [S/m]} \quad (1)$$

siendo “ f ” la frecuencia expresada en GHz. En la siguiente tabla se muestran los valores de la parte real de la permitividad relativa (ϵ_r) y las constantes “ c ” y “ d ” para cada material.

Tipo de material	Permitividad relativa	Conductividad		Gama de Frecuencias (GHz)
		c	d	
Hormigón	5.31	0.0326	0.8095	1-100
Ladrillo	3.75	0.038	0.0	1-10
Placa de yeso	2.94	0.0116	0.7076	1-100
Madera	1.99	0.0047	1.0718	0.001-100
Vidrio	6.27	0.0043	1,1925	0.1-100
Revestimiento de techos	1.50	0.0005	1.1634	1-100
Aglomerado	2.58	0.0217	0.7800	1-100
Revestimiento de suelos	3.66	0.0044	1.3515	50-100
Metal	1	10^7	0.0	1-100

Tabla III. Parámetros de la permitividad relativa y la conductividad de distintos materiales de construcción.

La parte imaginaria de la permitividad (ϵ_i) y la atenuación (A), son calculadas a partir de la conductividad, la frecuencia, y la parte real de la permitividad de la siguiente forma:

$$\epsilon_i = 17.98 \times \frac{\sigma}{f} \quad (2)$$

$$A = 1636 \times \frac{\sigma}{\epsilon_r} \text{ [dB/m]} \quad (3)$$

Aplicando estas fórmulas y teniendo en cuenta la Tabla III, podemos obtener los tres parámetros necesarios para las simulaciones. La Tabla IV muestra los valores obtenidos para los diferentes materiales a 94 GHz. Destacar que el valor de la atenuación obtenido de la fórmula es calculado en dB/m. A nosotros nos interesa un valor absoluto de atenuación, es decir, un valor en dB para un grosor del material dado. En nuestro caso calcularemos la atenuación para un supuesto grosor de 2.5 cm en todos los materiales. Recordemos que en la herramienta de simulación no se pueden definir los grosores de los elementos. No obstante, el valor de atenuación calculado no va a afectar mucho a la precisión de la simulación, ya que, debido al entorno de simulación y a la posición de la antena transmisora y receptora, los rayos que pueden atravesar elementos para llegar al receptor son mínimos o incluso nulos.

Además, trabajando a altas frecuencias como es nuestro caso, la atenuación es muy alta, y por tanto la mayoría de los posibles rayos que pudieran atravesar un elemento y llegar al receptor lo harían con una atenuación muy elevada.

Tipo de material	Permitividad compleja	Conductividad [S/m]	Atenuación [dB]
Hormigón	6.2-0.34j	1.2896	9.9332
Placa de yeso	2.25-0.06j	0.28883	4.018
Madera	1.99-0.1171j	0.6122	12.582
Revestimiento de techos	1.56-0.04j	0.09874	2.6932
Aglomerado	2.58-0.1436j	0.75	11.9015
Revestimiento de suelos	3.16-0.39j	2.0423	22.8232
Metal	1	10^6	1.636×10^{10}
Cristal	6.27-0.1853j	0.9692	1.2644

Tabla IV. Valores de permitividad, conductividad y atenuación para diferentes materiales a 94 GHz.

Capítulo 4

La herramienta de simulación. El Trazador de Rayos

La herramienta con la que trabajaremos para obtener las simulaciones ha sido el trazador de rayos programado en Matlab por el SiCoMo (Grupo de investigación de Sistemas de Comunicaciones Móviles). Esta herramienta supone que la propagación de los rayos sigue las reglas de la óptica física. El campo en el receptor será la suma de todos los rayos que lo interceptan. Los rayos se calculan mediante el método de las imágenes.

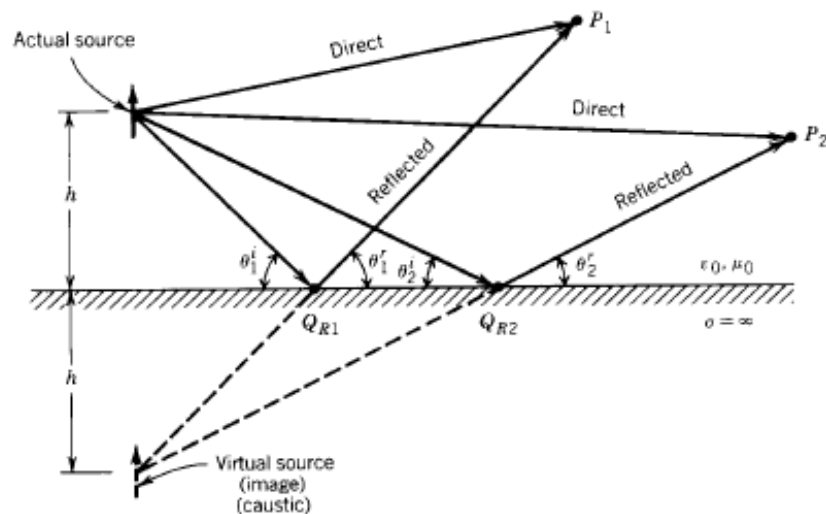


Figura 7. Dipolo vertical y su imagen para determinar la reflexión sobre un conductor plano.

Este método se utiliza para analizar el efecto de los rayos reflejados en los diferentes elementos. Se basa en generar fuentes radiantes virtuales, llamadas imágenes. Estas imágenes son imaginarias, y su combinación con las reales dan lugar a un nuevo sistema equivalente que reemplazaría al original, sólo con propósitos de análisis [5].

El trazador de rayos es capaz de realizar simulaciones teniendo en cuenta diferentes mecanismos de propagación [12]:

1. Reflexiones de primer orden: Las reflexiones se producen cuando la onda electromagnética incide sobre un objeto que tiene dimensiones muy grandes en comparación con la longitud de onda de dicha onda electromagnética. Para que exista reflexión el objeto contra el que choca la onda electromagnética debe tener propiedades electromagnéticas diferentes respecto al medio por el que se propaga la onda incidente.

Si consideramos sólo las de primer orden, serán aquellas que, tras incidir en un elemento, llegan al receptor sin incidir en ningún otro. Estas reflexiones serán las que habrá que tener más en cuenta a la hora de la obtención del perfil de retardo normalizado.

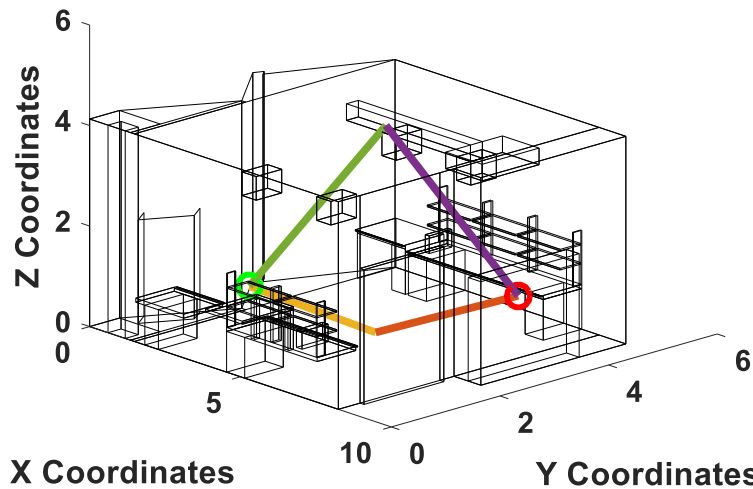


Figura 8. Ejemplo de reflexiones de primer orden en suelo y techo.

2. Reflexiones de primer y segundo orden: En este caso se tienen en cuenta los rayos que inciden en dos puntos distintos antes de llegar al receptor. El procedimiento es el mismo que las reflexiones de primer orden, con la diferencia de que se aplica dos veces.

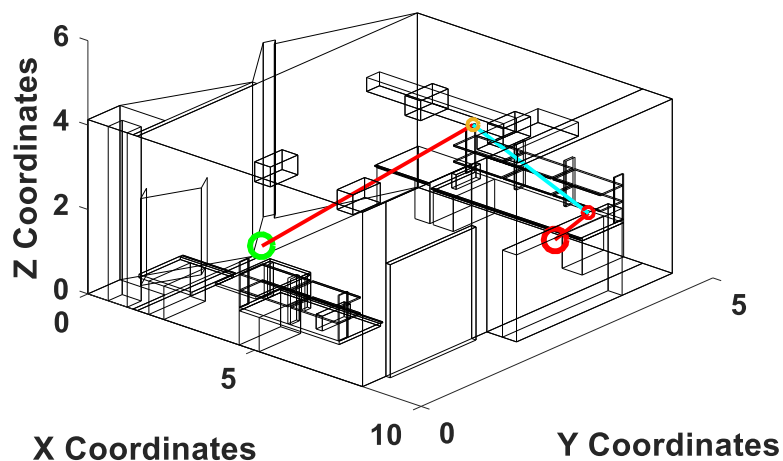


Figura 9. Ejemplo de reflexión de segundo orden.

3. Difracción: La difracción es un mecanismo de propagación que permite a las ondas electromagnéticas llegar hasta el receptor cuando no existe visión directa o no aparecen contribuciones debidas a la reflexión. Este efecto surge cuando la onda electromagnética incide sobre un obstáculo que presenta irregularidades afiladas o puntiagudas. Este mecanismo se explica gracias al principio de Huygens, que indica que todos los puntos de un frente de ondas se pueden considerar fuentes de producción de ondas secundarias [13].

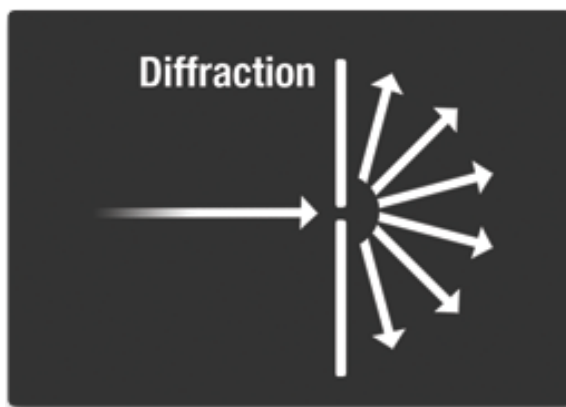


Figura 10. Mecanismo de difracción.

4. Reflexiones de primer orden y difracción: No es más que la combinación de un primer rayo que sufre una reflexión en un objeto y posteriormente se difracta en un obstáculo con forma puntiaguda difractándose hasta llegar al receptor.
5. Difusión (“Scattering”): El “scattering” o difusión se produce cuando la onda electromagnética choca sobre objetos cuyo tamaño es pequeño comparado con la longitud de onda o cuando el número de obstáculos por unidad de volumen es alto (obstáculos rugosos). En este caso la energía reflejada se difunde en todas las direcciones del espacio.

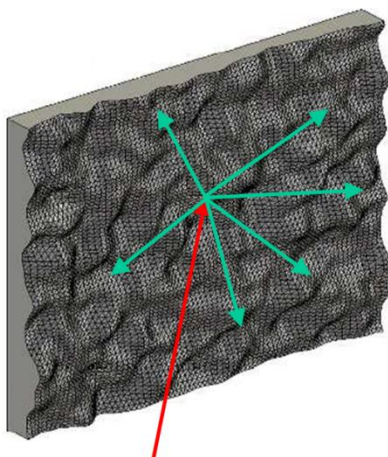


Figura 11. Mecanismo de difusión o “scattering” [14].

4.1 Programación de paredes triangulares para simulaciones con reflexiones

El trazador de rayos está programado de tal forma que únicamente permitía simular entornos que estuvieran formados por formas rectangulares. El laboratorio donde se llevaron a cabo las medidas presentaba una forma un tanto peculiar, de forma que una de las paredes tenía un entrante en forma de triángulo que no podía ser modelado solamente con rectángulos. Para poder representar de forma adecuada el laboratorio, se introdujo la posibilidad de poder definir estructuras triangulares.

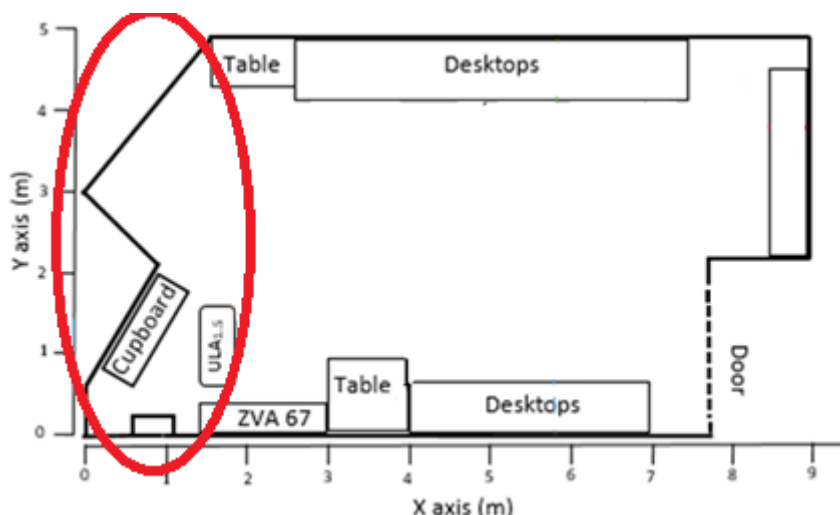


Figura 12. Zona triangular del laboratorio.

La programación de los triángulos se ha realizado a partir de la de los rectángulos. Por ello es de interés dar un breve repaso sobre cómo se introducen los rectángulos en el programa para posteriormente entender mejor cómo se han programado los triángulos.

Los rectángulos se introducen en Matlab de forma matricial, siguiendo un determinado orden [5]. En la siguiente tabla se puede ver el formato empleado:

	Vértice 1	Vértice 2	Vértice 3	Vértice 4	5	6
1	Coord. X	Coord. X	Coord. X	Coord. X	Hor/Vert	At
2	Coord. Y	Coord. Y	Coord. Y	Coord. Y	ϵ_r	Perf_cond
3	Coord. Z	Coord. Z	Coord. Z	Coord. Z	σ	-

Tabla V. Formato antiguo de las paredes rectangulares de la estructura

Cada elemento del entorno es una matriz de 3 x 6 donde se especifica lo siguiente:

- Columna 1: Se especifica el punto en el espacio tridimensional del vértice 1 del rectángulo
- Columna 2: Se especifica el punto en el espacio tridimensional del vértice 2 del rectángulo
- Columna 3: Se especifica el punto en el espacio tridimensional del vértice 3 del rectángulo
- Columna 4: Se especifica el punto en el espacio tridimensional del vértice 4 del rectángulo
- Columna 5: En la fila 1 se especifica si la pared es horizontal (cuyo valor se representa con un cero) o si es vertical (en cuyo caso el valor del campo será un 1). En la fila 2 se especifica la permitividad relativa correspondiente al material

que forma dicho elemento. En la fila 3 se especifica la conductividad correspondiente al material que forma dicho elemento.

- Columna 6: En la fila 1 se especifica el valor de atenuación asociado a ese material. En la fila 2 se especifica si ese elemento es un conductor perfecto (en cuyo caso el valor de este campo sería un 1) o si por el contrario no lo es (con lo que el valor del campo sería 0). El valor que corresponde a la fila 3 de la columna 6 no era relevante, ya que el programa no lo utilizaba.

Precisamente, el campo correspondiente a la fila 3 de la columna 6 es el que se ha utilizado para especificar si el elemento introducido es un triángulo o un rectángulo. Si este campo (fila 3, columna 6) es un 0, se entiende que el elemento introducido es un rectángulo, y será tratado como tal. Si por el contrario es un 1, el elemento introducido será un triángulo. Como un triángulo está formado únicamente por tres vértices, el valor de la cuarta columna no será tenido en cuenta en este caso (estos valores serán indiferentes, ya que no serán utilizados en el programa).

Por tanto, el formato común a ambas estructuras queda de la siguiente forma (en caso de triángulo los valores correspondientes a la columna 4 son indiferentes):

	Vértice 1	Vértice 2	Vértice 3	Vértice 4	5	6
1	Coord. X	Coord. X	Coord. X	Coord. X	Hor/Vert	At
2	Coord. Y	Coord. Y	Coord. Y	Coord. Y	ϵ_r	Perf_cond
3	Coord. Z	Coord. Z	Coord. Z	Coord. Z	σ	Rect/Triang

Tabla VI. Formato actual para ambas estructuras

Con esta modificación ya se pueden representar paredes triangulares. El problema ocurre a la hora de realizar simulaciones, ya que el trazador fue programado para paredes rectangulares, y muchos cálculos los hace a partir de la intersección de dos rectas perpendiculares. Por tanto, para llevar a cabo las simulaciones también había que hacer diferenciación en varias funciones programadas en Matlab del trazador. Para las reflexiones se ha conseguido adaptar, de tal forma que no supone ningún problema la simulación con triángulos. Pero, desgraciadamente, para simulaciones que incluyen difracción y difusión no se han podido adaptar estas funciones, por lo que solo se realizarán simulaciones de este tipo eliminando los elementos triangulares del entorno.

Capítulo 5

Simulaciones y Resultados

En el presente capítulo vamos a explicar paso a paso el proceso que se ha llevado a cabo para obtener las simulaciones. Partiremos de la configuración de los parámetros de entrada a la herramienta, seguiremos con las modificaciones que se realizaron para ajustar la simulación a las medidas obtenidas experimentalmente y finalmente obtendremos las simulaciones de una forma secuencial, es decir, primero obtendremos las simulaciones teniendo en cuenta únicamente una reflexión hasta llegar a simulaciones más completas.

Durante este proceso han ido apareciendo errores que han tenido que ser corregidos y que también mostraremos aquí con el fin de entender el proceso de simulación completo.

5.1 Medidas experimentales realizadas en el laboratorio

El estudio del canal radio en el laboratorio fue llevado a cabo mediante un analizador de redes vectorial (VNA), concretamente el R&S ZVA 67 y convertidores de alta frecuencia. En la Figura 13 se puede ver una foto del aspecto del VNA y de los convertidores:



Figura 13. Foto del VNA y el convertidor.

El convertidor R&S®ZVA-Z110E (banda W WR-10, 75 GHz a 110 GHz) fue utilizado tanto en la estación transmisora como la receptora.

Los parámetros de configuración del analizador de redes vectorial se resumen en la siguiente tabla:

Frecuencia	94 GHz
Ancho de banda	3 GHz
Frecuencia inferior	92.5 GHz
Frecuencia superior	95.5 GHz
Frecuencia intermedia (IF)	10 Hz
Número de puntos	1024
Separación de frecuencia	2.932 MHz

Tabla VII. Parámetros eléctricos de las medidas

Respecto a las antenas, se utilizaron tanto en recepción como en transmisión antenas omnidireccionales fabricadas por Mi-Wave (WR-10). Este modelo de antena opera a 94 GHz con un ancho de banda de 3 GHz con un valor nominal de relación de onda estacionaria en tensión (VSWR) de 1.5:1. Presentan 2 dBi de ganancia con un ancho de haz de 30 grados en elevación y con un comportamiento omnidireccional en el plano horizontal. En la figura 14 podemos ver el diagrama de radiación en el plano azimutal correspondiente a las antenas utilizadas.

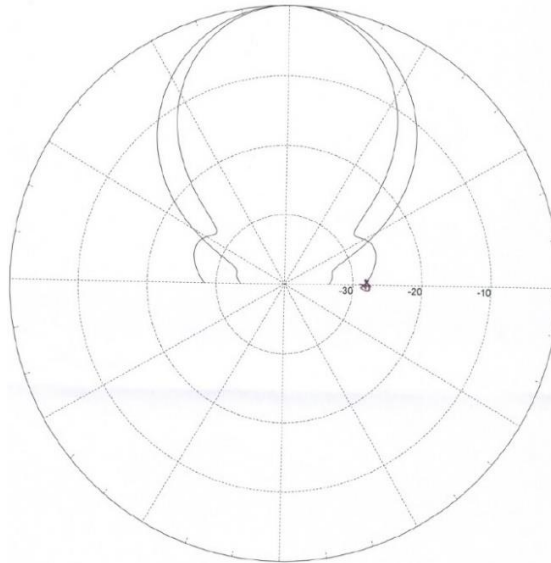


Figura 14. Diagrama de radiación de las antenas en el plano azimutal

Se llevaron a cabo 15 medidas diferentes. En todas ellas, el receptor es un array lineal uniforme virtual (ULA) que se encontraba siempre en el mismo punto del laboratorio, mientras que el transmisor es un array rectangular uniforme virtual (URA) que se ubicó en 15 posiciones uniformemente distribuidas dentro del laboratorio.

En la figura 15 podemos ver un esquema de las posiciones que tomó el transmisor (marcadas del número 1 al 15) y la única posición del receptor (marcada con el acrónimo ULA). Las posiciones del transmisor estaban separadas 1 m tanto en el eje X como en el Y, a excepción de las posiciones 5, 8 y 9, cuya separación entre ellas en la dirección X fue de 0.5 m. Respecto a las alturas, la antena transmisora se colocó a una altura de 0.886 m, mientras que la antena receptora se colocó a 0.784 m respecto del suelo.

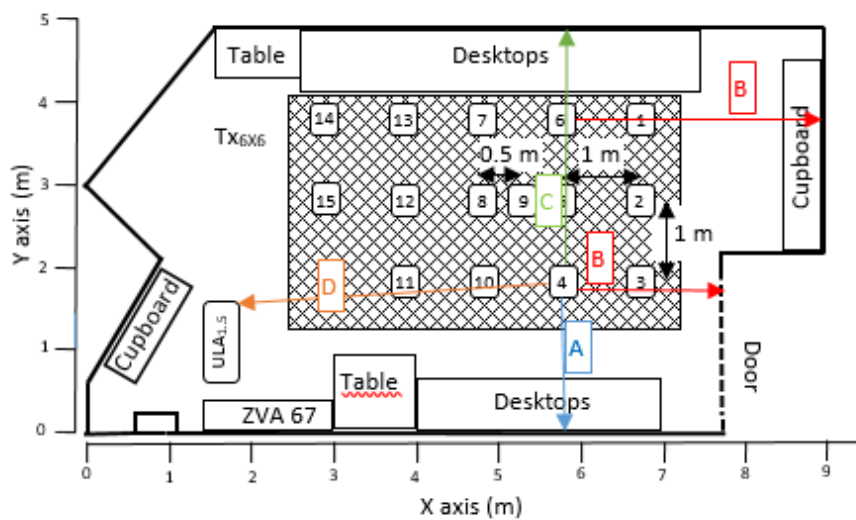


Figura 15. Esquema del laboratorio con posiciones.

También se especifica en la tabla VIII la ubicación exacta de todas las posiciones del transmisor respecto de las paredes del laboratorio. Además, la distancia “D” nos proporciona la distancia directa desde cada posición a la posición del receptor.

Posición	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)
1	3,835	1,423	1,009	5,491
2	2,831	1,431	2,015	5,147
3	1,828	1,077	3,026	4,923
4	1,798	2,056	3,008	3,923
5	2,797	2,809	2,024	4,095
6	3,787	2,835	1,059	4,386
7	3,794	3,825	1,030	3,682
8	2,742	3,828	2,092	3,143
9	2,765	3,325	2,059	3,586
10	1,796	3,088	3,015	2,895
11	1,874	4,045	2,947	1,955
12	2,788	4,814	2,037	2,258
13	3,784	4,856	1,028	2,871
14	3,772	5,874	1,036	2,330
15	2,805	5,856	2,012	1,468
Rx ULA				
	1,620	5,985	3,22	

Tabla VIII. Distancias A, B, C y D para el transmisor y todos los receptores.

De las quince posiciones distintas en las que se obtuvo el PDP experimentalmente, las posiciones de la 12 a la 15 ambas inclusive presentan errores. La medida en la posición 12 fue repetida más adelante, por lo que estos errores fueron corregidos. Sin embargo, las posiciones 13, 14 y 15 no se pudieron repetir. En éstas apenas aparecen réplicas, lo cual es bastante raro para un entorno de interior como éste, en el que la variedad y abundancia de elementos provoca que se produzcan muchas reflexiones y difracciones, y por tanto muchas réplicas que llegan al receptor. Además, el nivel de ruido del analizador de redes vectorial en estas posiciones aparece en -120 dB. Este nivel es demasiado alto teniendo en cuenta el nivel fijado en las demás posiciones, por lo que muchas réplicas llegan con una potencia relativa inferior y no se tienen en cuenta. Por tanto, los parámetros calculados (que se obtienen del PDP) también son erróneos. Esto se puede apreciar en la figura 16. Por tanto, realizaremos también las simulaciones de estas posiciones, pero no se compararán los parámetros con las medidas experimentales debido a que no tendría ningún sentido.

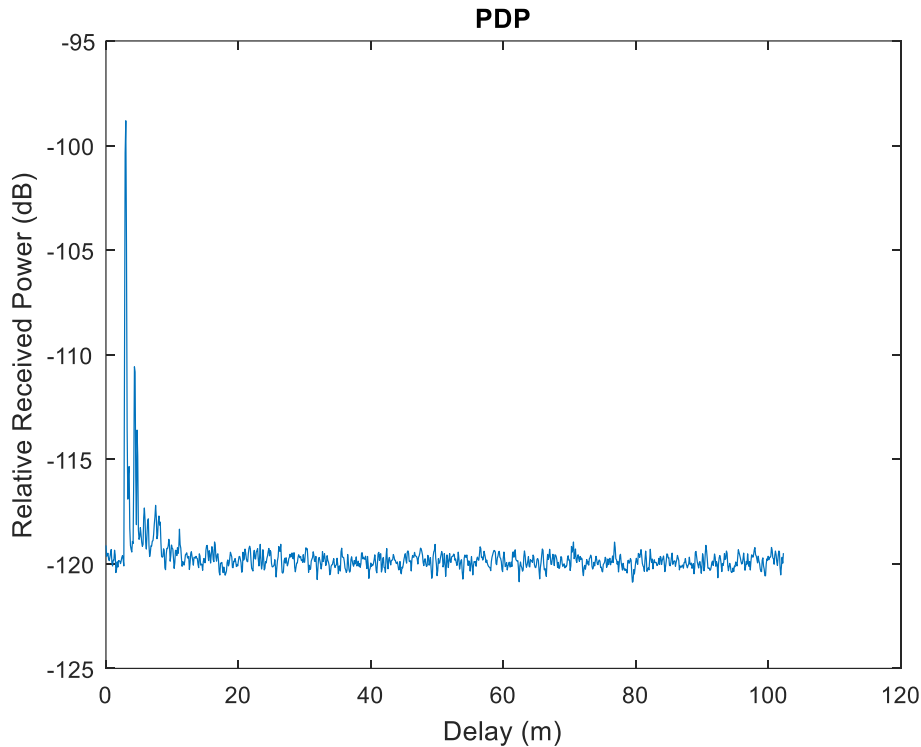


Figura 16. Representación del PDP para la posición 13 donde se aprecian los errores.

Como se ha mencionado para cada posición, las antenas transmisora y receptora son desplazadas virtualmente. En el caso de la antena transmisora, siguiendo una malla uniforme rectangular de 6×6 puntos con un espaciado entre cada punto respecto del eje X como del Y de 0.4λ (1.4 mm a 94 GHz). Para la antena receptora, se sigue una línea con 5 puntos uniformemente distribuidos sobre ella y con una separación entre puntos de 0.4λ (1.4 mm a 94 GHz) [15].

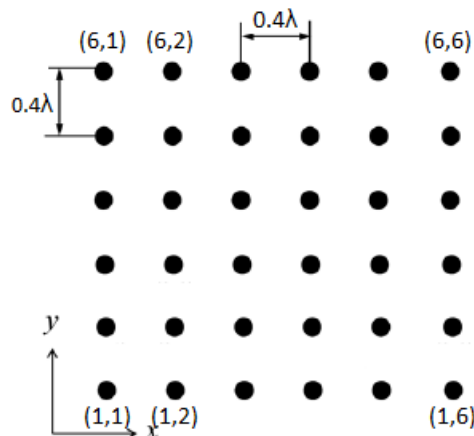


Figura 17. Distribución de la malla de puntos del transmisor

Se llevaron a cabo medidas para todas las combinaciones posibles de polarización en el par transmisor-receptor, esto es, vertical-vertical (VV), horizontal-horizontal (HH), vertical-horizontal (VH) y horizontal-vertical (HV). Las medidas se realizaron en condiciones estacionarias.

5.2 Configuración de los parámetros de entrada del trazador de rayos

Para obtener las simulaciones en las mismas condiciones en que se realizaron las medidas, el primer paso es configurar los parámetros de entrada de la herramienta. Los parámetros que hay que configurar son:

1. Valores de frecuencia inicial, frecuencia final y número de puntos. El número de puntos es el número de frecuencias utilizadas para estudiar el canal. Se configura al igual que se realizaron las medidas, es decir:

Frecuencia Inicial	92.5 GHz
Frecuencia Final	95.5 GHz
Número de puntos	1024

2. Elegir el entorno de simulación. En nuestro caso el entorno es el laboratorio. Una vez que tenemos el modelo geométrico del mismo el aspecto que presenta es el siguiente:

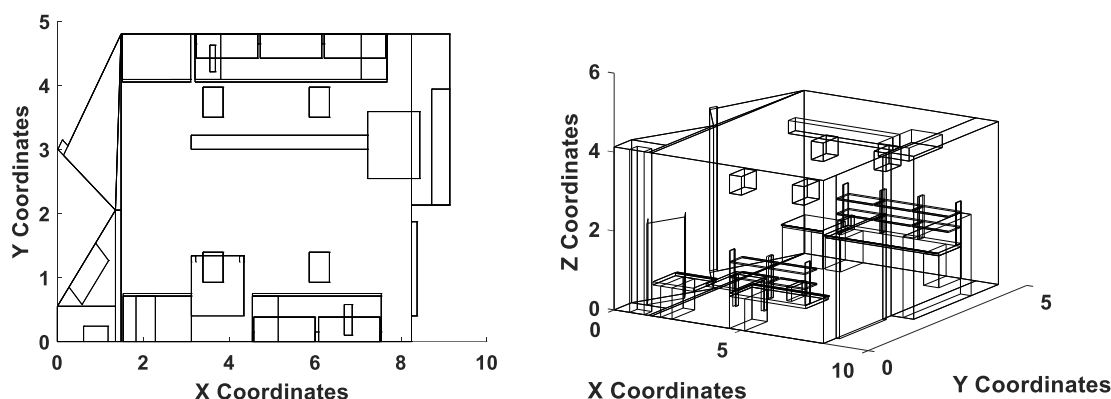


Figura 18. Representación del entorno vista desde arriba (izquierda) y lateral (derecha)

3. Definir las posiciones del receptor y del transmisor. Para agilizar el proceso de las simulaciones y dado que tenemos 15 posiciones distintas para el transmisor, lo que se hizo fue crear una función en Matlab (llamada `coordenadas_tx_rx.m`) que recibe como argumento la posición que se quiere simular, de tal forma que, dependiendo de ésta, se devuelven las coordenadas del transmisor y del receptor adecuadas.
4. Introducir el diagrama de radiación de las antenas. Las antenas utilizadas tanto en transmisión como en recepción son idénticas y ambas son omnidireccionales en el plano horizontal pero no lo son en el plano vertical (o azimutal). Por tanto, tendremos que crear una función en Matlab que nos devuelva el valor de ganancia que presenta la antena en cada dirección.

Disponemos del diagrama de radiación proporcionado por el fabricante en formato electrónico. Para que pueda ser leído en Matlab, necesitamos obtener

un archivo Excel que asocie cada par dirección (grados) – ganancia (dB). Por tanto, tenemos que digitalizar el diagrama. Para digitalizarlo utilizamos el programa Engauge Digitizer [16]. Este programa nos muestrea el diagrama de radiación en coordenadas polares devolviéndonos directamente el archivo en Excel (formato .xml). A continuación, se muestra una representación en Matlab del diagrama de radiación una vez digitalizado:

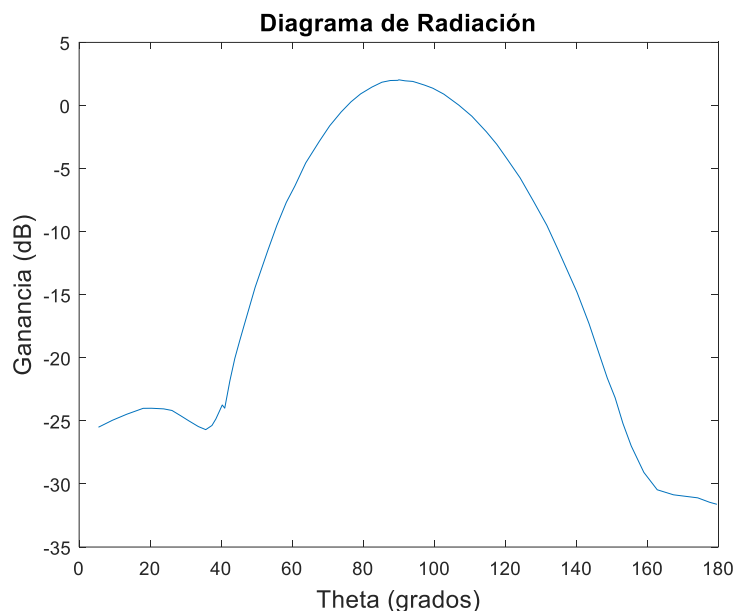


Figura 19. Representación del diagrama de radiación en azimut

Una vez tenemos todo configurado, podemos pasar a realizar las simulaciones.

5.3 Parámetros del canal radio

Los parámetros del canal radio que vamos a obtener de las simulaciones permiten al diseñador del sistema móvil tomar las decisiones oportunas para lograr una comunicación satisfactoria. Estos parámetros son:

5.3.1 El PDP (Perfil de retardo normalizado)

El PDP es la representación de la potencia recibida en el receptor en función del tiempo. Se define como:

$$P(\tau) = \overline{|h(t, \tau)|^2} \quad (4)$$

Es decir, es la media de los módulos al cuadrado de diversas respuestas impulsionales cronovariantes tomadas en diferentes puntos cercanos. Si el canal es estático, cada respuesta impulsional se puede obtener mediante la transformada de Fourier inversa de la respuesta en frecuencia del canal en el punto correspondiente:

$$h(\tau) = TF^{-1}[H(f)] \quad (5)$$

donde como el canal no cambia con el tiempo eliminamos la t , de $h(t,\tau)$.

Debido a que el canal es aleatorio, para realizar una medida certera del PDP se deben llevar a cabo varias medidas instantáneas del PDP en un área local. El perfil de retardo normalizado final se halla promediando las mencionadas medidas. Además, se debe evitar que el muestreo de cada medida instantánea corresponda a una medida de gran escala. Para ello, dependiendo de la resolución del método empleado en la medida del PDP y del tipo de canal estudiado, se suelen elegir muestras separadas $\lambda/4$ o sobre movimientos del receptor no superiores a los seis metros en canales en espacios abiertos y no superiores a los dos metros en entornos en el interior de edificios.

En nuestro estudio se cuenta con la respuesta frecuencial en 36 puntos posicionados en una malla rectangular uniforme de 6 x 6 como muestra la siguiente figura. Los puntos adyacentes están separados $\lambda/4$ donde λ es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda empleada:

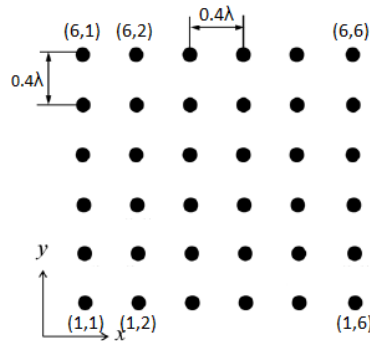


Figura 20. Distribución de la malla de puntos del transmisor

5.3.2 Exceso de retardo medio (“mean excess delay”)

El exceso de retardo medio es un parámetro temporal que se obtiene del PDP. Se define como el primer momento del PDP y su expresión, si se han discretizado los ejes, es:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k p(\tau_k) \tau_k}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (6)$$

Si el PDP no fuera discreto sino una función continua entonces la suma se transformaría en una integral. Este primer parámetro nos ofrece una idea del valor medio del exceso del retardo.

5.3.3 RMS delay spread (Valor cuadrático medio del ensanchamiento del retardo).

Es el segundo parámetro que se obtiene del PDP. Corresponde a la raíz cuadrada del segundo momento del PDP y su expresión es:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (7)$$

Donde:

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k p(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (8)$$

Este parámetro nos da una idea del “ensanchamiento” del retardo en torno al exceso de retardo medio, es decir, de la cantidad y potencia de las réplicas multicamino. Dos PDPs pueden tener un exceso de retardo medio similar y sin embargo valores de ensanchamiento muy diferentes. Aquel que tenga más réplicas multicamino o bien un número similar de réplicas pero dotadas todas ellas con una potencia parecida poseerá el mayor valor cuadrático medio de “ensanchamiento”. Cuantas más réplicas existan y más potencia posean, mayor será el valor del parámetro de ensanchamiento.

5.3.4 Otros parámetros.

Existen otros parámetros que nos serán de importancia a la hora de estudiar el comportamiento del canal. También nos servirán para comparar de una manera visual las simulaciones que realicemos con los resultados de las medidas. Estos parámetros son:

- Atenuación total.
- Distancia recorrida por el rayo directo.
- Valor máximo de potencia recibida.

Con estos parámetros del canal radio será suficiente para poder contrastar si las simulaciones se asemejan a los resultados obtenidos de las medidas experimentales.

5.4 Simulaciones con una reflexión

Las primeras simulaciones que vamos a realizar serán teniendo en cuenta sólo una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor. Los datos y los resultados con los que se va a realizar el estudio se corresponden a la posición 1 del transmisor. En el Anexo I se pueden encontrar los datos de las demás posiciones.

Los parámetros que vamos a obtener de las simulaciones son los comentados en el punto anterior. Con estos parámetros del canal radio será suficiente para poder contrastar si las simulaciones se asemejan a los resultados obtenidos de las medidas experimentales.

Estos parámetros dependen de la elección de un umbral que sirve para diferenciar el ruido térmico de las componentes multicamino recibidas. Si el umbral de ruido toma un valor muy pequeño entonces el ruido térmico se procesará como señal multicamino, el valor de los parámetros temporales se elevará artificialmente. Si por el contrario el umbral es demasiado elevado, despreciaremos varias réplicas multicamino de forma que los parámetros temporales se verán reducidos. En nuestras simulaciones trabajaremos con un umbral de 20 dB y otro de 30 dB con respecto del valor de la réplica de mayor potencia.

Al realizar las simulaciones, la herramienta también nos devuelve algunos datos de interés a la hora de saber si todo ha ido bien como por ejemplo la representación de los rayos que llegan al receptor desde el transmisor y los ángulos de salida y llegada de estos rayos al receptor y del transmisor respectivamente. A continuación, mostramos lo comentado anteriormente:

Ángulos de salida del transmisor (grados)	Ángulos de llegada al receptor (grados)
88.91	91.08
89.34	90.66
107.23	107.22
39.26	39.26
89.27	90.72
88.95	91.05

Tabla IX. Ángulos de llegada al receptor y salida del transmisor.

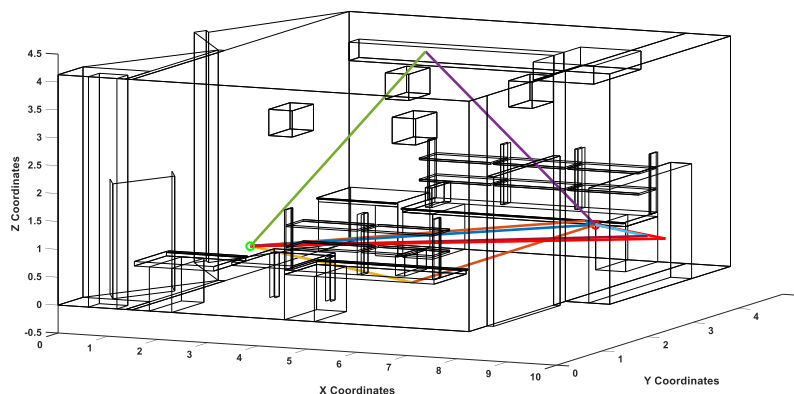


Figura 21. Representación de los rayos que inciden en el receptor.

Como se puede apreciar en este caso, sólo se producen cinco reflexiones de primer orden (hay seis rayos que llegan al receptor, pero uno de ellos es el rayo directo).

En la siguiente tabla, mostramos una comparativa de los parámetros comentados anteriormente entre lo que se midió y la simulación.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	1.10	5.31
	Retardo medio (ns)	18.25	21.33
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.26	7.21
	Retardo medio (ns)	18.30	22.6
Atenuación total (dB)		81.63	94.97
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		5.4	5.4
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-82.76	-103.7

Tabla X. Comparativa parámetros del canal radio entre lo simulado y lo medido.

También vamos a mostrar una gráfica comparando ambos PDP (simulado y medido). En la figura 22 se muestra el resultado:

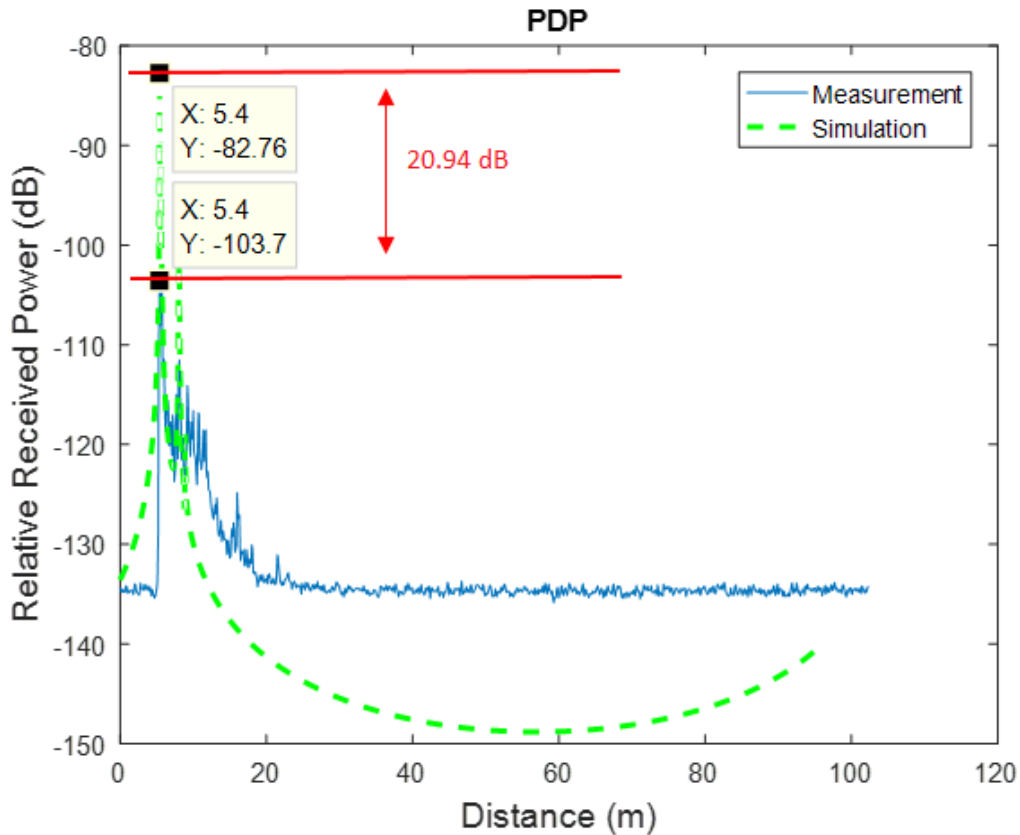


Figura 22. Comparación PDP simulado y medido.

Como se puede apreciar tanto en la tabla VIII como en la figura 22, existe una gran diferencia en la potencia de las muestras recibidas entre lo simulado y lo medido. Esta diferencia para el rayo directo es de 20.94 dB. Sabemos que es el rayo directo porque es la primera réplica en llegar al receptor, ya que es la que menos distancia recorre puesto que no sufre ninguna reflexión.

En teoría, la atenuación que debería sufrir el rayo directo en su camino hacia el receptor viene determinada por la fórmula de las pérdidas básicas en espacio libre. Y si, además, tenemos en cuenta que la ganancia aproximada de la antena receptora y transmisora es de 2 dBi, la potencia relativa con la que debería llegar el rayo directo vendrá determinada por:

$$L(dB) = 20 \times \log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) - G_{tx} - G_{rx} \quad (9)$$

Donde:

d : Es la distancia recorrida por el rayo directo.

λ : Es la longitud de onda, que es igual a: $\lambda=c/f$

G_{tx} : Es la ganancia de la antena transmisora.

G_{rx} : Es la ganancia de la antena receptora.

Con lo cual queda que:

$$L(dB) = 20 \times \log_{10}\left(\frac{4\pi \times 5.4}{3 \times 10^8}\right) - 2 - 2 = 82.55 \text{ dB} \quad (10)$$

$$\frac{94 \times 10^9}{94 \times 10^9}$$

Por tanto, la atenuación teórica que vemos que debería de sufrir el rayo directo es prácticamente idéntica a la que se obtiene mediante la simulación. Sin embargo, difiere mucho de la obtenida en la medida.

Se realizó un estudio de la antena mediante medidas para comprobar si efectivamente el diagrama de radiación era el correcto y de esta forma se descubrió que el máximo de radiación de la antena en lugar de encontrarse en $\theta = 90^\circ$ como se pensaba en un primer momento, en realidad se encontraba en $\theta = 50^\circ$. Esto explica esa gran diferencia entre el valor obtenido en las medidas y el valor teórico. Por tanto, como las antenas se encuentran aproximadamente alineadas en el plano horizontal ($\theta = 90^\circ$), la ganancia del rayo directo será la correspondiente a la que muestra el diagrama de radiación para $\theta = 90^\circ$, pero en este caso ya no serán los 2 dBi que se pensaba en un primer momento, sino que, al desplazar el máximo del diagrama de radiación, el valor correspondiente de la ganancia para $\theta = 90^\circ$ es de -8.6 dBi. Este cambio se aprecia en la figura 23. Utilizando esta ganancia en la ecuación 10, las pérdidas teóricas calculadas son 103.75 dB. Este valor es casi idéntico al que se obtiene en las medidas.

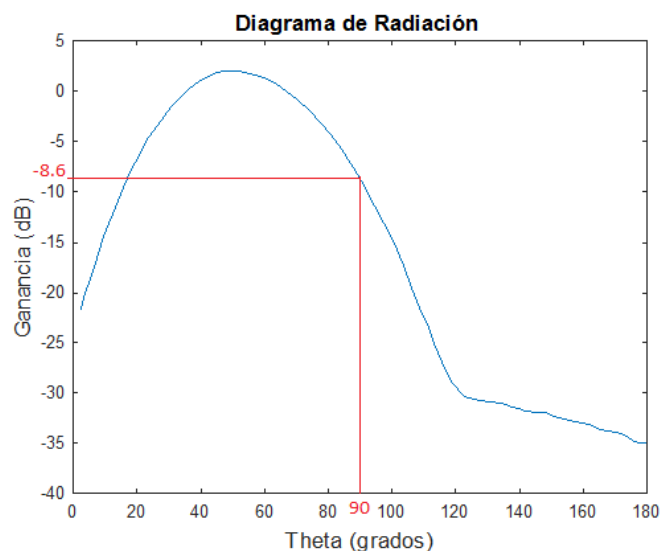


Figura 23. Representación del diagrama de radiación corregido en azimut

Otro factor que también influye en el valor de potencia relativa recibida correspondiente al rayo directo es el apuntamiento entre las antenas. Cualquier variación en el alineamiento entre las antenas al realizar las medidas, puede provocar un cambio drástico en la ganancia. Esto provocaría que el rayo directo no saliera de la

antena transmisora ni llegara a la antena receptora con un ángulo $\theta = 90^\circ$ (ya que se encuentran en el mismo plano), sino que posiblemente lo hiciera con un ángulo de llegada y de salida distinto, con la consiguiente penalización en la ganancia. Esto explica por qué hay otras posiciones en las que el valor teórico calculado no es igual al obtenido con las medidas. En el peor de los casos, existe una diferencia entre el valor teórico calculado y el valor obtenido de las medidas de 5.74 dB (para la posición 3), que puede ser debido a un mal apuntamiento entre las antenas al realizar las medidas. En la siguiente tabla se muestra la diferencia entre el valor teórico y medido de potencia relativa recibida para el rayo directo para las diferentes posiciones una vez aplicada la corrección en el diagrama de radiación.

Posición	Valor teórico de potencia relativa recibida para el rayo directo (dB)	Valor medido de potencia relativa recibida para el rayo directo (dB)	Diferencia (dB)
1	-103.75	-103.70	0.05
2	-103.25	-100.80	2.45
3	-103.08	-97.34	5.74
4	-101.14	-95.77	5.37
5	-101.56	-100.00	1.56
6	-102.16	-102.20	0.04
7	-100.46	-95.29	5.17
8	-99.20	-98.97	0.23
9	-100.46	-99.91	0.55
10	-98.64	-94.40	4.24
11	-95.54	-93.59	1.95

Tabla XI. Comparativa entre el valor teórico y medido de potencia relativa recibida para el rayo directo.

Estas diferencias que se aprecian en la tabla son las que se pueden deber a un mal apuntamiento entre las antenas transmisoras y receptoras.

Lo que se hizo para arreglar esto, es un ajuste del máximo de radiación en el diagrama de las antenas, de forma que se desplazó el máximo de radiación a $\theta = 50^\circ$. Realizando esta corrección, los resultados obtenidos para la posición 1 son los siguientes:

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	1.01	5.31
	Retardo medio (ns)	18.47	21.33
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.18	7.21
	Retardo medio (ns)	18.51	22.60
Atenuación total (dB)		100.21	94.97
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		5.4	5.4
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-103.5	-103.7

Tabla XII. Comparativa parámetros del canal radio entre lo simulado y lo medido.

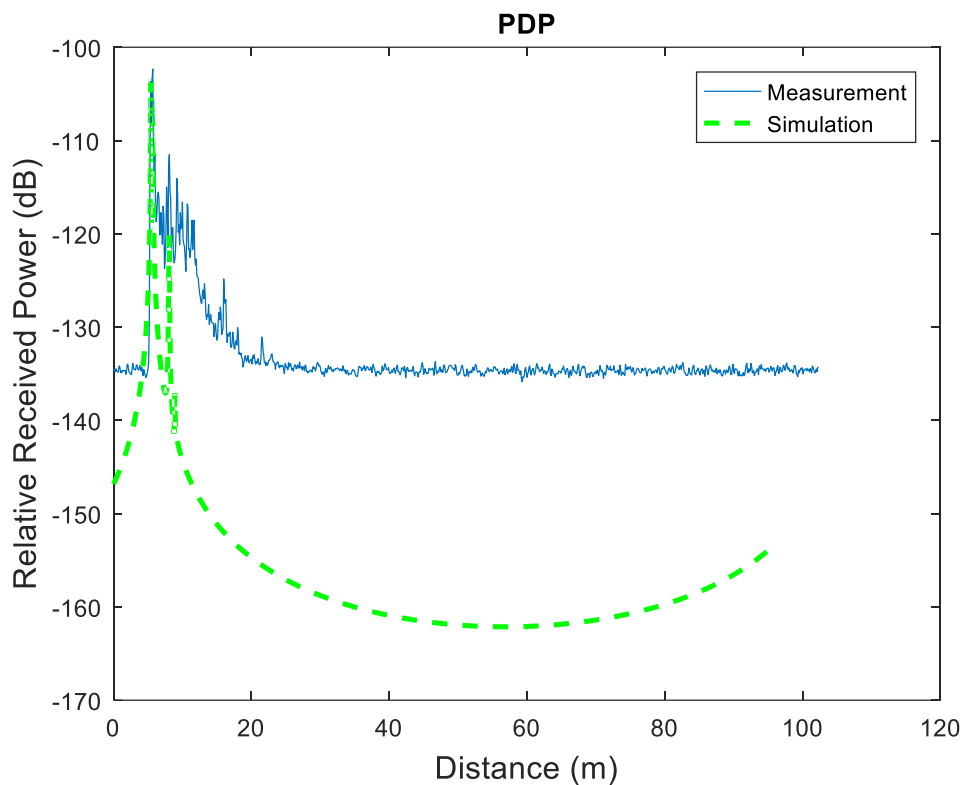


Figura 24. Comparación PDP simulado y medido.

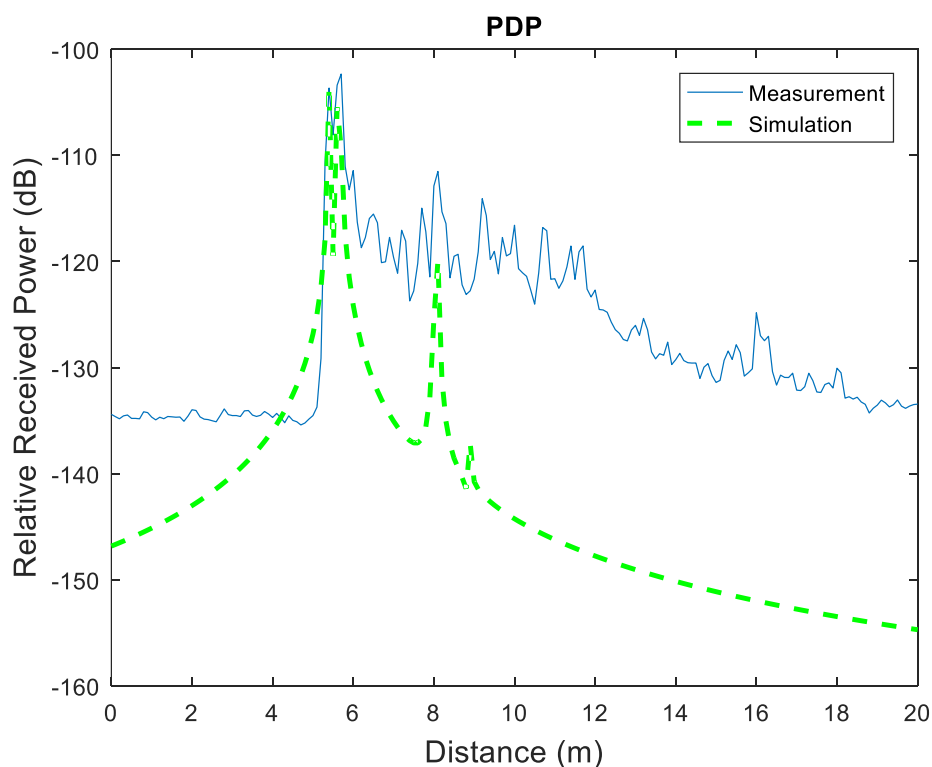


Figura 25. Comparación PDP simulado y medido ampliado a la zona de interés.

Podemos ver que los valores de RMS y del retardo medio están todavía lejos de ser parecidos. Esto es debido a que estamos teniendo en cuenta únicamente la

contribución del rayo directo y de los rayos que llegan al receptor tras una reflexión. En simulaciones más completas se tendrán en cuenta más contribuciones y, por tanto, estos valores se irán asemejando a los medidos.

5.5 Simulaciones con dos reflexiones

Las siguientes simulaciones que se realizaron fueron teniendo en cuenta tanto el rayo directo y los rayos que llegan al receptor tras una reflexión como los que llegan al receptor tras dos reflexiones. Siguiendo con el procedimiento del punto anterior, mostraremos los resultados para la posición 1, mientras que los resultados de las demás posiciones están disponibles para su consulta en el anexo I.

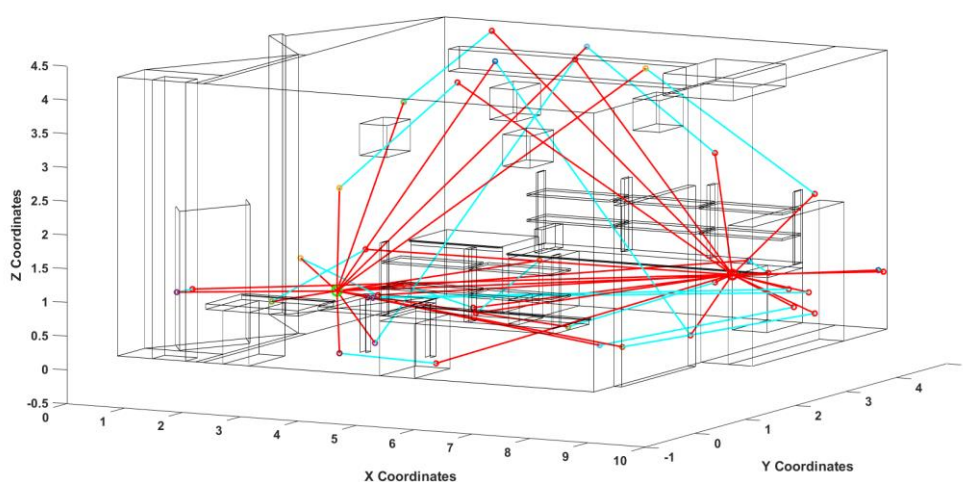


Figura 26. Representación de los rayos que inciden en el receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	5.41	5.31
	Retardo medio (ns)	21.46	21.33
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	5.54	7.21
	Retardo medio (ns)	21.66	22.60
Atenuación total (dB)		98.54	94.97
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		5.4	5.4
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-103.5	-103.7

Tabla XIII. Comparativa parámetros del canal radio entre lo simulado y lo medido.

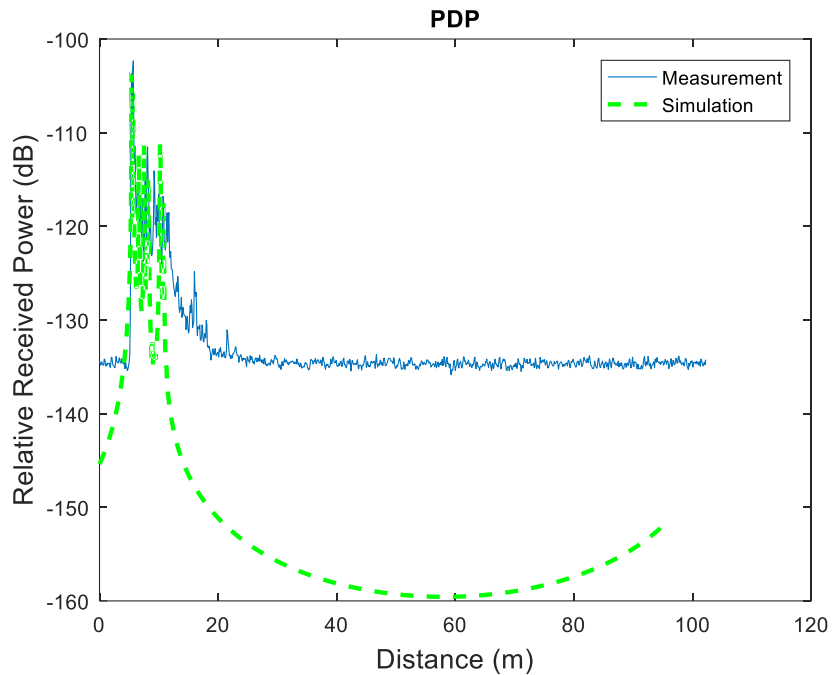


Figura 27. Comparación PDP simulado y medido.

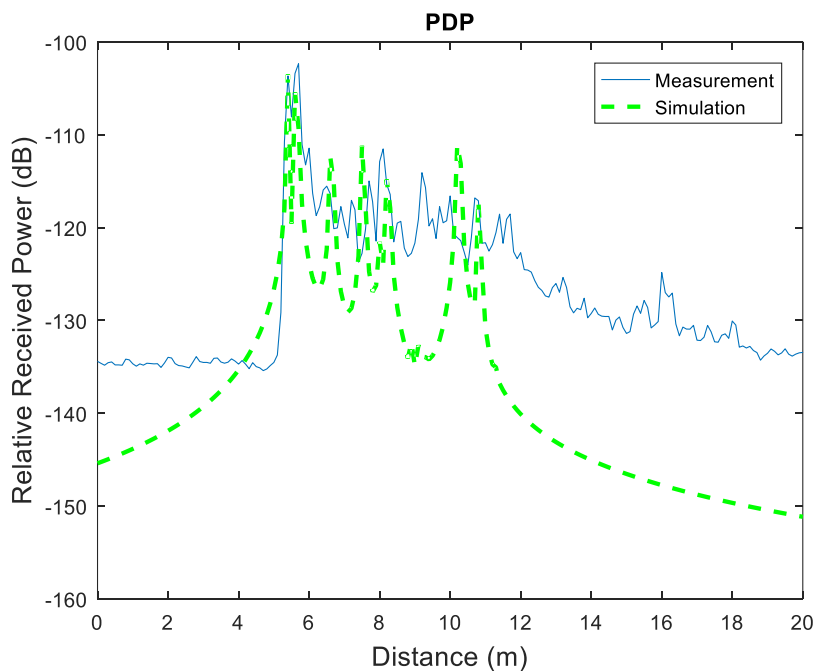


Figura 28. Comparación PDP simulado y medido ampliado a la zona de interés.

Como podemos observar, los valores obtenidos son muy parecidos entre sí. La mayor diferencia en el RMS delay spread se produce cuando tomamos un umbral de 30 dB, siendo esta diferencia de 1.67 ns. En cuanto al valor medio apenas hay diferencias entre lo medido y lo simulado, siendo en el peor de los casos de 0.13 ns. Esta poca diferencia es debida a que la diferencia entre la réplica de mayor contribución (la del rayo que llega directo al receptor) y las demás réplicas es muy grande, por tanto, el valor medio estará próximo al instante de tiempo en que se produce la llega de la réplica de mayor potencia. De hecho, si en lugar de en nanosegundos tomamos el valor medio en

metros (simplemente se obtiene esta conversión multiplicando por la velocidad de la luz, c , cuyo valor es de 3×10^8), el valor medio obtenido es de 6.44 metros. Este valor está muy cerca de la llegada del rayo directo, que se produce a los 5.4 metros.

5.6 Simulaciones completas

Estas simulaciones son las que tienen en cuenta más fenómenos. Abarcan reflexiones de segundo orden que los rayos sufren antes de llegar al receptor, el fenómeno de la difracción, y la combinación de ambos fenómenos, es decir, aquellos rayos que se reflejan una vez y posteriormente se difractan (reflexión + difracción) y viceversa, aquellos rayos que se difractan y después se reflejan una vez antes de llegar al receptor (difracción + reflexión).

Estas simulaciones conllevan un tiempo de simulación considerable en comparación con las anteriores. Con un procesador Intel® Core™ i7-3632QM a 2.2 GHz, el tiempo de simulación teniendo en cuenta dos reflexiones es de tan sólo 34 segundos, mientras que para las simulaciones completas el tiempo de simulación es de 21 minutos y 3 segundos, por lo que existe una gran diferencia a tener en cuenta. Concretamente hablamos de un tiempo 37.14 veces mayor para las simulaciones completas respecto a las que sólo tienen en cuenta dos reflexiones.

Para estas simulaciones se ha utilizado un modelo geométrico igual que en las simulaciones anteriores pero eliminando los elementos triangulares. Estos elementos tampoco tienen mucha influencia, ya que sólo son cuatro, y están situados en una zona del laboratorio en la que difícilmente se producirán reflexiones o difracciones, puesto que es una zona alejada de las posiciones de la antena transmisora y receptora. Se han eliminado los triángulos debido a que se incluye el fenómeno de difracción, que sólo funciona con figuras rectangulares. Aun así, como se apreciará más adelante en los resultados, esta simulación es la que arroja unos resultados más precisos.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	5.14	5.31
	Retardo medio (ns)	22.15	21.33
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	5.42	7.21
	Retardo medio (ns)	22.40	22.60
Atenuación total (dB)		97.50	94.97
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		5.4	5.4
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-103.5	-103.7

Tabla XIV. Comparativa parámetros del canal radio entre lo simulado y lo medido.

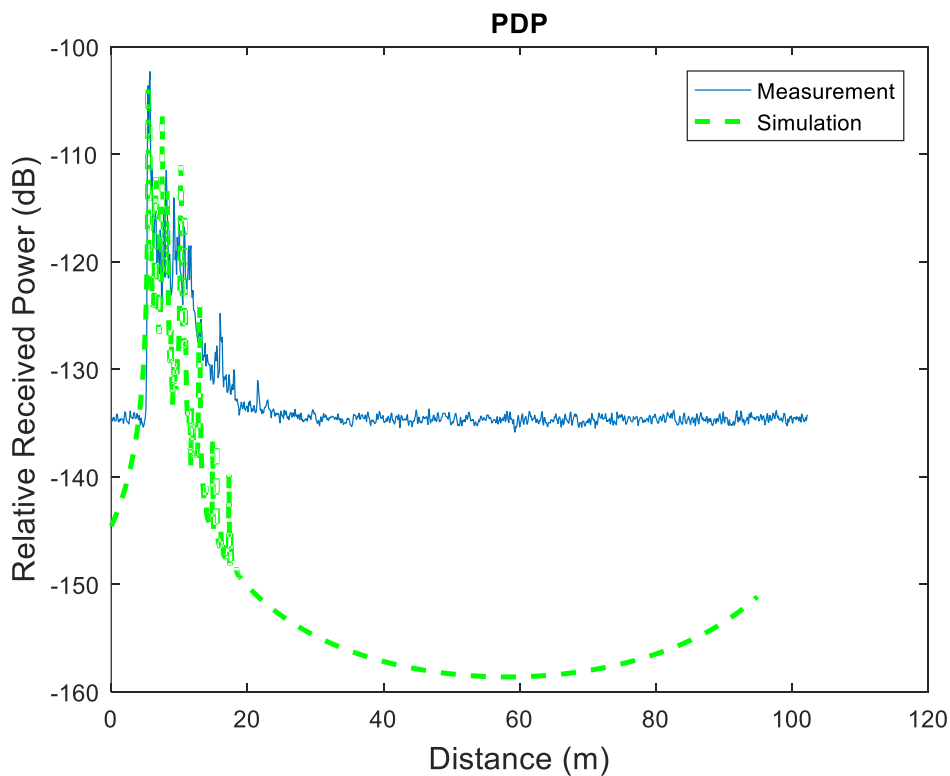


Figura 29. Comparación PDP simulado y medido.

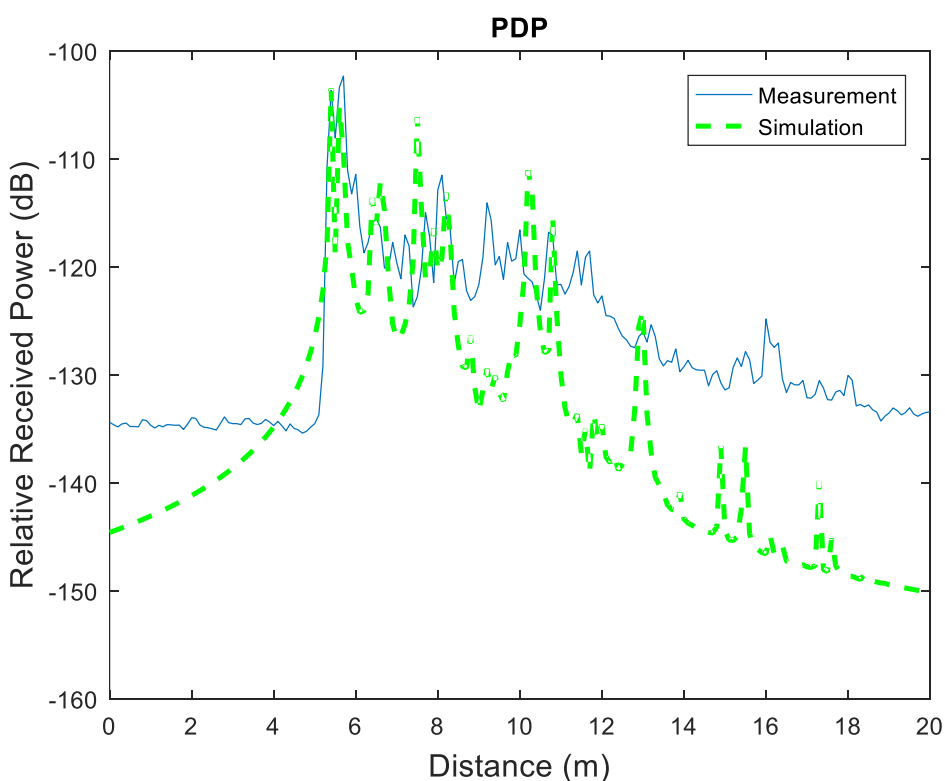


Figura 30. Comparación PDP simulado y medido ampliado a la zona de interés.

Lo primero que podemos destacar es la precisión de la simulación en el rayo directo. Tanto en la simulación como en las medidas la distancia que ambos recorren es de 5.4 metros. Esto confirma que las posiciones del transmisor y receptor han sido bien

ubicadas a la hora de realizar las simulaciones. También se puede apreciar fijándonos en el PDP que los instantes de llegada de las réplicas significativas para el caso de las medidas y de las simulaciones coinciden, por lo que el modelo geométrico utilizado es preciso. En cuanto a la potencia relativa de las réplicas, en el caso del rayo directo la diferencia entre lo simulado y lo medido es prácticamente nulo (0.2 dB), mientras que para las demás réplicas sí que existe una mayor diferencia, que seguramente será producida por los valores de permitividad escogidos para los materiales que conforman los elementos del entorno.

El valor de la atenuación total o “path loss” también es muy parecido, siendo la diferencia entre simulado y medido de 2.53 dB. El valor del retardo medio también es muy parecido tanto para el umbral de 20 dB como para el de 30 dB. Esto es debido a la gran diferencia de potencia que existe entre la réplica proveniente del rayo directo y las demás réplicas, que hace que el rayo directo tenga mucha mayor influencia que las demás réplicas, haciendo que el valor medio se sitúe cercano al instante de llegada del rayo directo. La diferencia en este caso entre la simulación y la medida es de 0.20 ns.

El RMS delay spread obtenido de las medidas con un umbral de 30 dB es de 7.21 ns, mientras que el obtenido para las simulaciones es de 5.42 ns. Ambos valores son más bien bajos, lo cual era de esperar, ya que aunque existen bastantes réplicas que llegan al receptor, éstas lo hacen con una potencia relativa bastante inferior a la potencia relativa de la réplica correspondiente al rayo directo, por lo que se produce un ensanchamiento más bien pequeño alrededor del valor medio.

En general podemos decir que la simulación se asemeja bastante a la medida, y nos puede servir para hacernos una primera idea aproximada de las características del canal.

Capítulo 6

Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo

6.1 Conclusiones

Hemos caracterizado el canal a 94 GHz en un entorno de interior mediante el empleo del trazador de rayos, que hace uso de la óptica geométrica (Geometric Optical, GO) y de la teoría uniforme de la difracción (Uniform Theory of Diffraction, UTD). Mediante esta técnica hemos obtenido el Perfil de Retardo Normalizado (Power Delay Profile, PDP). El PDP nos ha permitido distinguir los diferentes tiempos de llegada de cada réplica al receptor y la potencia de las mismas. También se han obtenido a partir del PDP los parámetros de dispersión temporal, que nos han dado una visión general de la simulación y una manera rápida de poder comparar las simulaciones con las medidas experimentales.

Los resultados que hemos obtenido son una buena aproximación a las mediciones que se realizaron. En la mayoría de las posiciones en las que se ha calculado el PDP, la distancia recorrida por el rayo directo y las principales réplicas (aquellas que tienen una mayor potencia) hasta llegar al receptor es prácticamente idéntica en las simulaciones y en las medidas. En el peor de los casos, este valor presenta una diferencia de 10 cm, un error que es más que asumible y seguramente sea debido a una imprecisión del modelo geométrico o en la ubicación de las posiciones de la antena transmisora o receptora. El valor de potencia relativa del rayo directo simulado también se asemeja bastante al valor medido, no llegando a superar esta diferencia los 3 dB.

En cuanto a los parámetros de dispersión temporal obtenidos del PDP, vemos que también se obtienen valores parecidos a las medidas cuando en las simulaciones se tienen en cuenta tanto los fenómenos de reflexión (con dos reflexiones de los rayos hasta llegar al receptor), difracción y reflexión + difracción. Estos valores sí que se alejan más de los medidos realizando simulaciones teniendo en cuenta solamente una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor. Esto es lógico, ya que los rayos que llegan al receptor habiéndose reflejado una sola vez son pocos (suele ser del orden de 5-6, dependiendo de la posición elegida), y en un entorno como éste, que es muy variado y se producirán bastantes reflexiones y difracciones debido a la gran cantidad de elementos que hay, tener solo en cuenta estos rayos nos devolverá unos valores alejados de los reales.

Aquí se produce cierto compromiso entre tiempo de simulación y precisión de la herramienta. El tiempo de simulación del trazador aumenta considerablemente para las simulaciones completas, por lo que puede ser que nos interese una simulación menos precisa pero más rápida. Por ejemplo, a la vista de los resultados obtenidos, vemos que realizando las simulaciones en la que los rayos pueden reflejarse dos veces antes de llegar al receptor, el PDP obtenido y los parámetros que derivan de él no son muy distintos de los medidos experimentalmente. Además, éstas simulaciones son mucho más rápidas que las que tienen en cuenta el fenómeno de la difracción, por lo que nos pueden servir para hacer una caracterización más rápida (aunque menos precisa) del entorno.

Otro aspecto que también suma un mayor tiempo de cómputo a la hora de realizar las simulaciones es la precisión con la que reproduzcamos en el modelo geométrico el entorno. A mayor número de elementos incluidos en nuestro modelo, el tiempo de simulación aumentará como es lógico. Por lo tanto, puede ser interesante estudiar hasta qué punto de detalle es necesario incluir en el modelo geométrico para obtener una simulación precisa sin necesidad de añadir elementos que lo único que pueden producir es un mayor tiempo de simulación.

Otro punto importante en los resultados de las simulaciones es el de la caracterización de los materiales presentes en el entorno. Nuestro estudio se ha realizado en la banda de los 94 GHz. Como es una banda poco estudiada, los artículos sobre caracterización de los materiales a esta frecuencia son escasos. Lo ideal hubiera sido poder caracterizar nosotros mismos los materiales que componían los elementos del laboratorio mediante un analizador de redes vectorial (Vector Network Analyzer, VNA), lo cual nos hubiera dado una mayor precisión en la simulación. No obstante, los valores empleados obtenidos de la ITU (International Telecommunication Union) nos han proporcionado unos buenos resultados.

6.2 Futuras Líneas de Trabajo

Las comunicaciones cada vez necesitan de mayores anchos de banda y parece que la banda de los THz (0.3 – 10 THz) ofrece grandes posibilidades y aún está en gran parte inexplorada. Las frecuencias del espectro que se sitúan más allá de los 300 GHz

está aún sin asignar, lo cual aumenta todavía más su interés. En este sentido, llevar a cabo la caracterización del canal es el primer paso para el posterior desarrollo de sistemas de comunicaciones [17]. Por lo tanto, las futuras líneas de investigación consisten en llevar a cabo un estudio similar al realizado en este trabajo pero a mayores frecuencias, como por ejemplo en la banda de los 300 GHz [18].

La caracterización de las propiedades de los materiales comunes encontrados en los entornos de interior (tales como yeso, madera, aglomerado etc.) también es otra de las posibles vías de investigación, tanto en la banda de nuestro estudio como en frecuencias superiores. De esta forma se conseguirán resultados más precisos utilizando la técnica de trazado de rayos.

Otra posibilidad es la mejora de la herramienta del Trazado de Rayos. Ahora mismo, el modelo geométrico que se puede introducir en la simulación solo acepta formas rectangulares para las simulaciones completas. Con el fin de obtener un modelo más preciso, se podría eliminar esta restricción haciendo que el modelo pudiera contener otro tipo de formas como triángulos (actualmente sólo es admitido para simulaciones que no incluyen la difracción) o círculos. También podría depurarse la herramienta de forma que se acortara el tiempo de cálculo de las simulaciones.

Referencias

- [1] Andrea Schiavoni, Alessandro Leoni, Domenico Arena, Roberto Lanzo “Ray tracing simulations at millimeter waves in different indoor and outdoor scenarios” 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).
- [2] Alejandro Díaz Morcillo, José Fayos Fernández, Juan Monzó Cabrera “Microondas: Líneas de transmisión, guías de onda y cavidades resonantes”. 2015.
- [3] Helminger J., Detlefsen J. and Groll H. “Propagation Properties of an Indoor-Channel at 94 GHz”, Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 1998. ICMMT '98. 1998 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology.
- [4] A. Kajiwara "Indoor propagation measurements at 94 GHz" Personal Indoor and Mobile Radio Communications 1995. PIMRC'95. Wireless: Merging onto the Information Superhighway. Sixth IEEE International Symposium on vol. 3 pp. 1026.
- [5] Valeriano Campillo Torrecillas. PFC “Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD”. 2008.
- [6] Cherry, S.: ‘Edholm’s law of bandwidth’, IEEE Spectr., 2004, 41, pp. 19–50.
- [7] Recomendación UIT-R P.676-10 (09/2013). “Atenuación debida a los gases atmosféricos” Propagación de las ondas radioeléctricas.
- [8] Sebastian, M. T. (2010). “Dielectric materials for wireless communication”. Elsevier.
- [9] Konstantin A. Korolev and Mohammed N. Afsar. “Complex Dielectric Permittivity Measurements of Materials in Millimeter Waves”. Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, 2005. IRMMW-THz 2005.
- [10] Shu Chen, Kim N. Nguyen, and Mohammed N. Afsar. “Complex Dielectric Permittivity Measurements of Glasses at Millimeter Waves and Terahertz Frequencies. Microwave Conference, 2006. 36th European.
- [11] Recomendación UIT-R P.1238-7 (02/2012). “Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en la gama de frecuencia de 900 MHz a 100 GHz”.
- [12] Juan Pascual García, José María Molina García-Pardo, Leandro Juan Llácer. “Caracterización del canal móvil”. 2010.
- [13] Baker, B. B., & Copson, E. T. (2003). *The mathematical theory of Huygens' principle* (Vol. 329). American Mathematical Soc.
- [14] L. Minghini, R. D’Emricom V. Degli-Esposti, E. M. Vitucci, “Electromagnetic simulation and measurement of diffuse scattering from building walls “, Euro-COST

- [15] María-Teresa Martínez-Ingles, Jose María Molina García-Pardo, Davy. P. Gaillot, Juan Pascual García, Jose Víctor Rodríguez, Leandro Juan Llácer y Martine Lienard “Polarimetric Indoor Measurements at 94 GHz” Antennas and Propagation (EuCAP) 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation
- [16] <http://markummitchell.github.io/engauge-digitizer>
- [17] Khalid, N., & Akan, O. B. (2016, May). Wideband THz communication channel measurements for 5G indoor wireless networks. In 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC) (pp. 1-6). IEEE.
- [18] Song, H. J., Ajito, K., Muramoto, Y., Wakatsuki, A., Nagatsuma, T., & Kukutsu, N. (2012). 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications. *Electronics Letters*, 48(15), 953-954

Anexo I

En este anexo se muestran los resultados de las simulaciones para todas las posiciones. Siguiendo con el formato utilizado en la memoria, se han realizado tablas comparando los resultados obtenidos de las simulaciones (primera columna) con los resultados obtenidos de las medidas experimentales (segunda columna). Las tablas están realizadas para todas las simulaciones que se hicieron, es decir, primero teniendo en cuenta una sola reflexión de los rayos antes de llegar al receptor; segundo teniendo en cuenta dos reflexiones; y por último teniendo en cuenta reflexiones de segundo orden, difracción y posterior reflexión y reflexión y posterior difracción (simulación más completa que se ha realizado). Después de las tablas también se muestra la representación del perfil de retardo medio obtenido con la simulación más completa. De esta manera tenemos en cuenta todos los parámetros destacables de las simulaciones y podemos compararlos de manera sencilla y rápida con los obtenidos de las medidas.

Resultados obtenidos para la posición 2

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	2.50	5.83
	Retardo medio (ns)	17.37	20.86
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	2.63	7.72
	Retardo medio (ns)	17.41	22.21
Atenuación total (dB)		96.76	94.53
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		5	5.1
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-101.2	-100.8

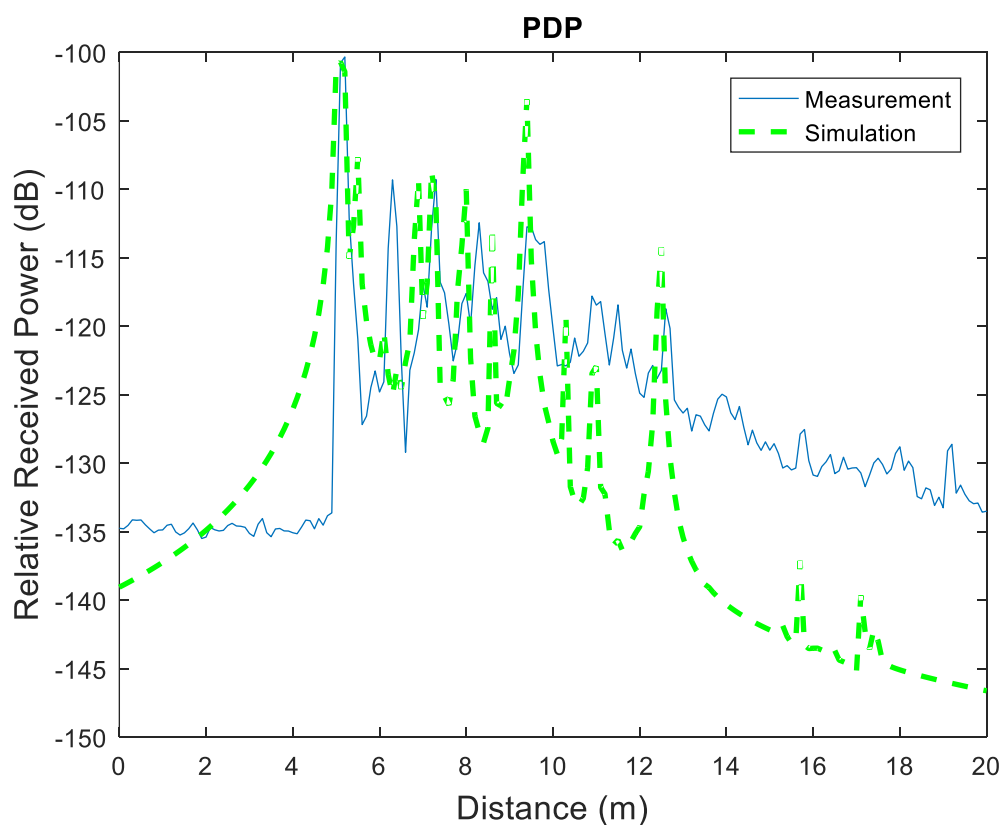
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	5.95	5.83
	Retardo medio (ns)	20.98	20.86
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	6.01	7.72
	Retardo medio (ns)	21.05	22.21
Atenuación total (dB)		94.92	94.53
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		5	5.1
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-101.2	-100.8

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	5.91	5.83
	Retardo medio (ns)	20.74	20.86
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	6.03	7.72
	Retardo medio (ns)	20.86	22.21
Atenuación total (dB)		93.67	94.53
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		5	5.1
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-101.1	-100.8

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 3.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0.77	6.47
	Retardo medio (ns)	16.47	20.43
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.73	7.25
	Retardo medio (ns)	16.62	21.36
Atenuación total (dB)		96.55	92.39
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		4.9	5
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-97.5	-97.34

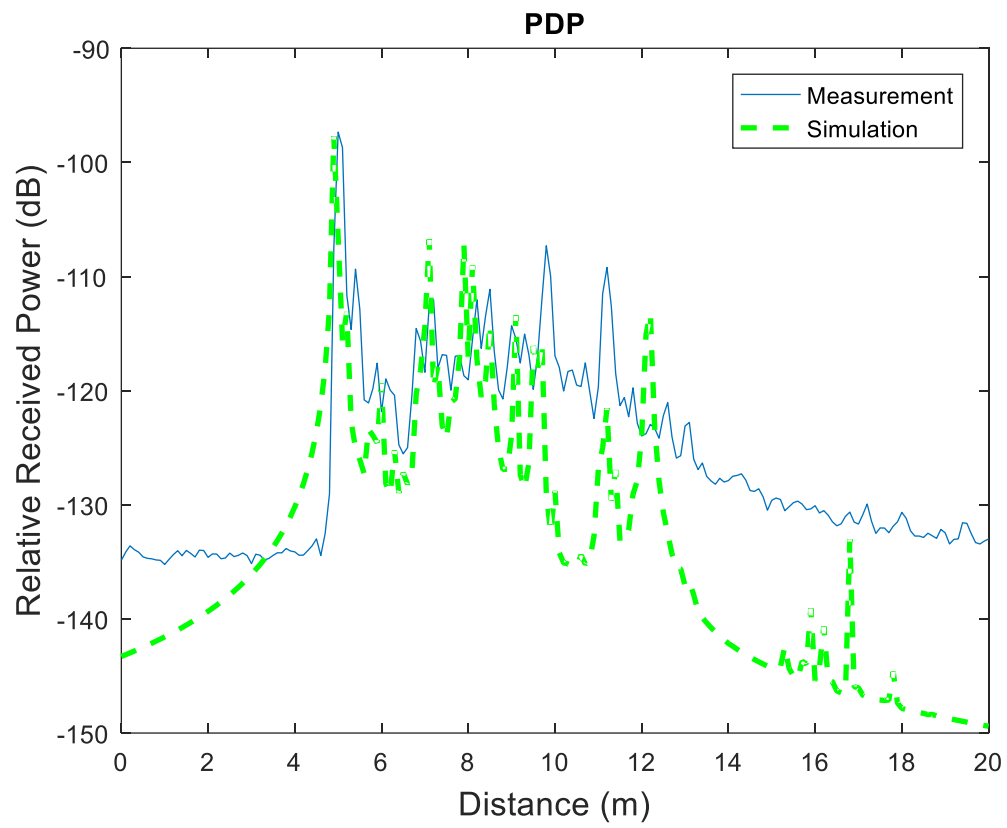
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	3.71	6.47
	Retardo medio (ns)	17.87	20.43
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	4.34	7.25
	Retardo medio (ns)	18.38	21.36
Atenuación total (dB)		95.77	92.39
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		4.9	5
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-97.5	-97.34

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	5.71	6.47
	Retardo medio (ns)	19.66	20.43
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	5.95	7.25
	Retardo medio (ns)	20.05	21.36
Atenuación total (dB)		95.01	92.39
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		4.9	5
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-97.71	-97.34

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 4.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	1.50	4.22
	Retardo medio (ns)	13.28	15.13
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.85	5.74
	Retardo medio (ns)	13.35	16.16
Atenuación total (dB)		93.71	90.79
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.9	4
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-96.5	-95.77

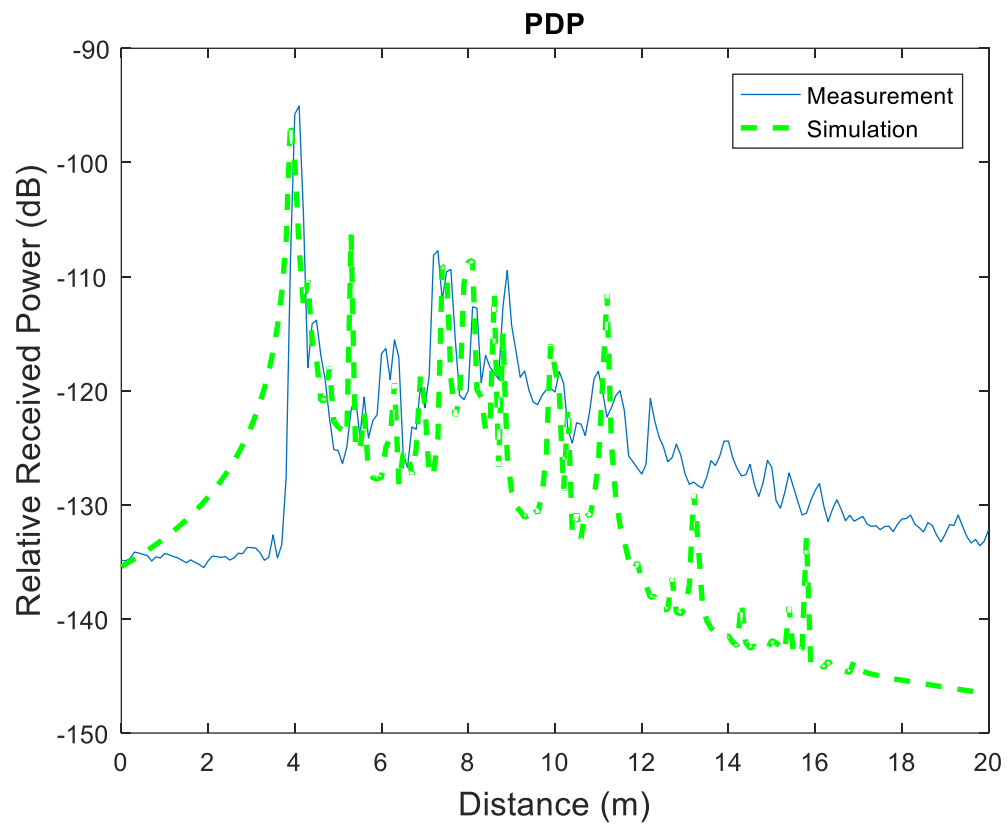
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	3.71	4.22
	Retardo medio (ns)	14.33	15.13
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	4.16	5.74
	Retardo medio (ns)	14.57	16.16
Atenuación total (dB)		93.19	90.79
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.9	4
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-96.5	-95.77

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	5.46	4.22
	Retardo medio (ns)	15.63	15.13
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	5.79	5.74
	Retardo medio (ns)	15.94	16.16
Atenuación total (dB)		92.67	90.79
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.9	4
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-96.38	-95.77

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 5.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	1.73	7.48
	Retardo medio (ns)	13.91	19.75
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	2.18	8.90
	Retardo medio (ns)	14.03	21.14
Atenuación total (dB)		98.01	94.48
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		4.1	4.2
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-98.74	-100

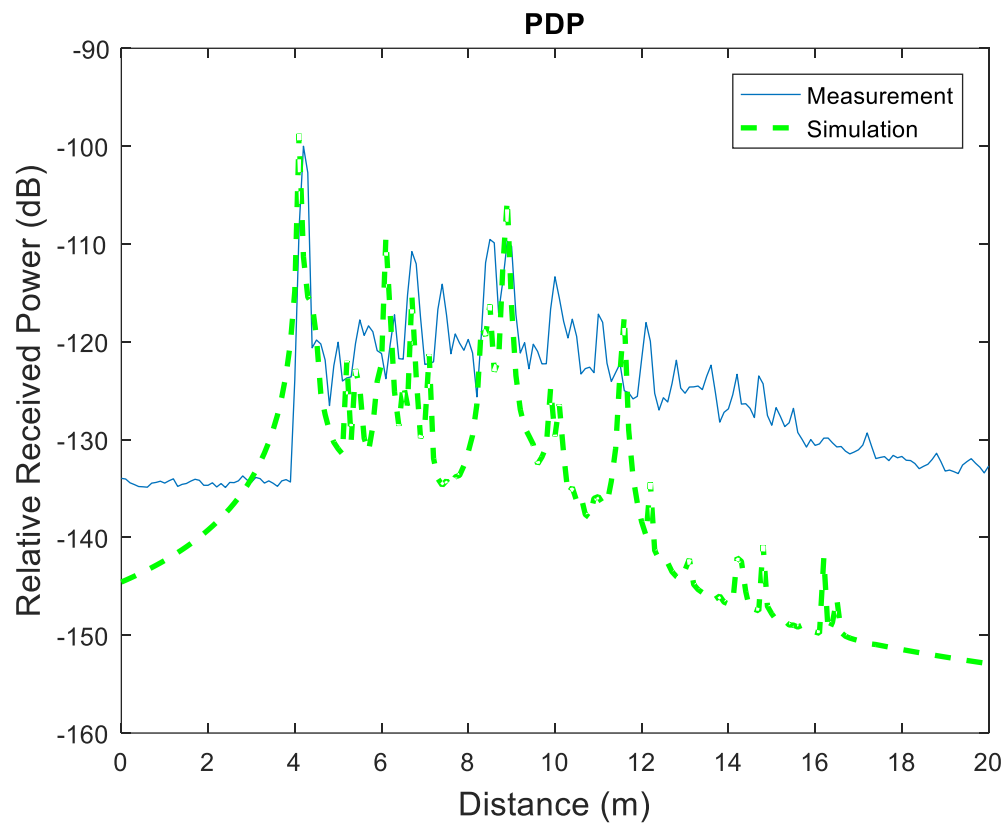
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	7.13	7.48
	Retardo medio (ns)	19.38	19.75
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	7.13	8.90
	Retardo medio (ns)	19.58	21.14
Atenuación total (dB)		95.64	94.48
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		4.1	4.2
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-98.74	-100

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	6.57	7.48
	Retardo medio (ns)	17.55	19.75
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	6.68	8.90
	Retardo medio (ns)	17.80	21,14
Atenuación total (dB)		96.49	94.48
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		4.1	4.2
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-98.74	-100

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 6.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	1.65	6.21
	Retardo medio (ns)	15.33	20.09
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.65	8.84
	Retardo medio (ns)	15.33	21.63
Atenuación total (dB)		98.08	94.82
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		4.5	4.5
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-99.54	-102.2

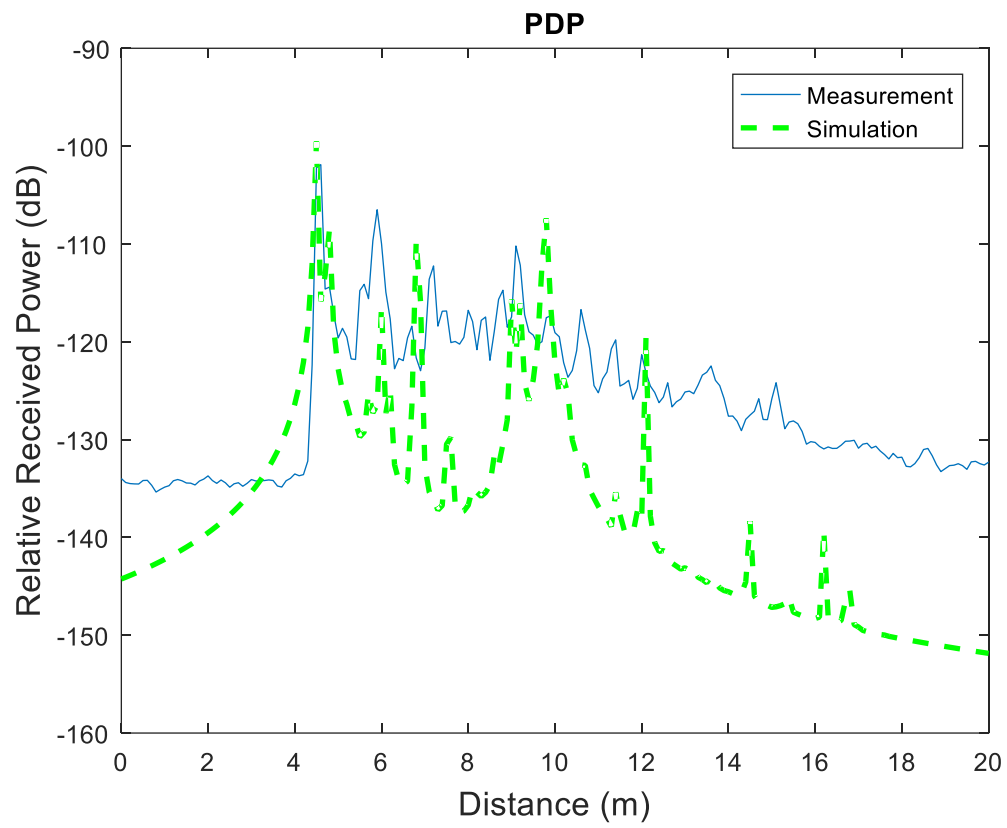
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	7.07	6.21
	Retardo medio (ns)	20.29	20.09
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	7.14	8.84
	Retardo medio (ns)	20.47	21.63
Atenuación total (dB)		95.79	94.82
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		4.5	4.5
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-99.54	-102.2

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	6.66	6.21
	Retardo medio (ns)	18.72	20.09
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	6.83	8.85
	Retardo medio (ns)	18.98	21.63
Atenuación total (dB)		96.95	94.82
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		4.5	4.5
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-99.54	-102.2

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 7.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	1.72	3.24
	Retardo medio (ns)	12.42	13.57
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.83	5.48
	Retardo medio (ns)	12.43	14.78
Atenuación total (dB)		90.73	90.31
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.6	3.7
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-95.46	-95.29

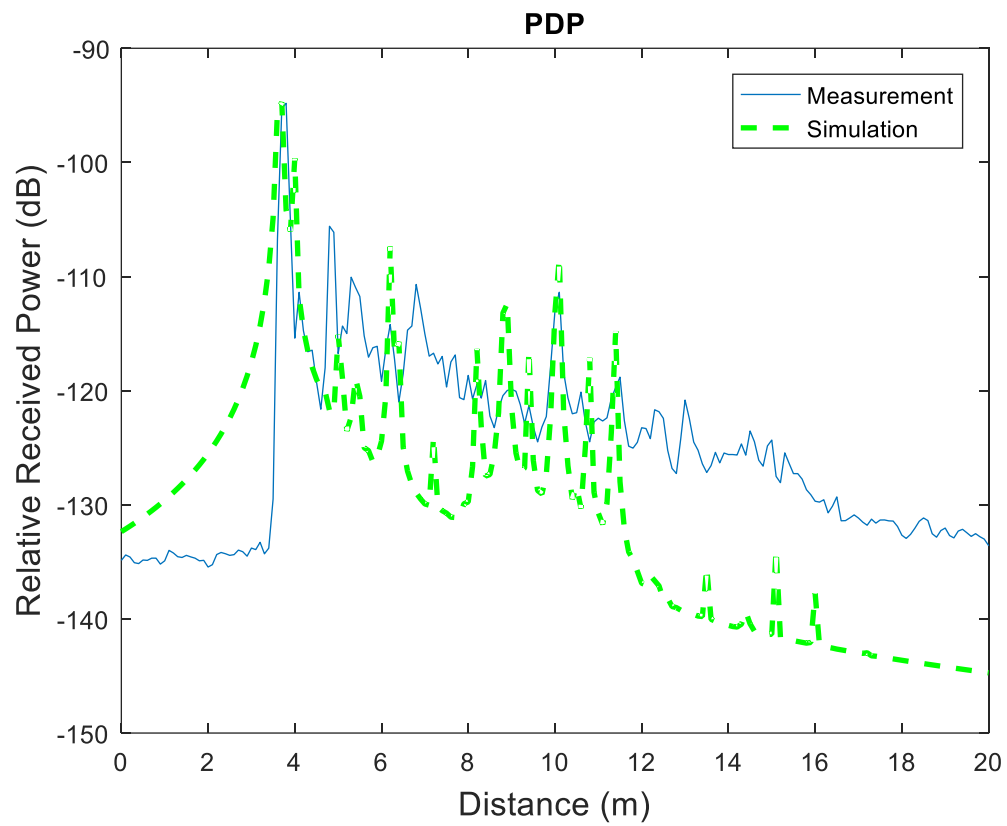
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	4.82	3.24
	Retardo medio (ns)	13.52	13.57
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	5.09	5.48
	Retardo medio (ns)	13.70	14.78
Atenuación total (dB)		90.41	90.31
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.6	3.7
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-95.46	-95.29

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	3.76	3.24
	Retardo medio (ns)	13.17	13.57
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	4.47	5.48
	Retardo medio (ns)	13.52	14.78
Atenuación total (dB)		90.18	90.31
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.6	3.7
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-95.49	-95.29

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 8.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	1.20	5.96
	Retardo medio (ns)	10.51	13.65
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	2.09	8.99
	Retardo medio (ns)	10.64	15.81
Atenuación total (dB)		95.66	93.59
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.1	3.2
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-97.61	-98.97

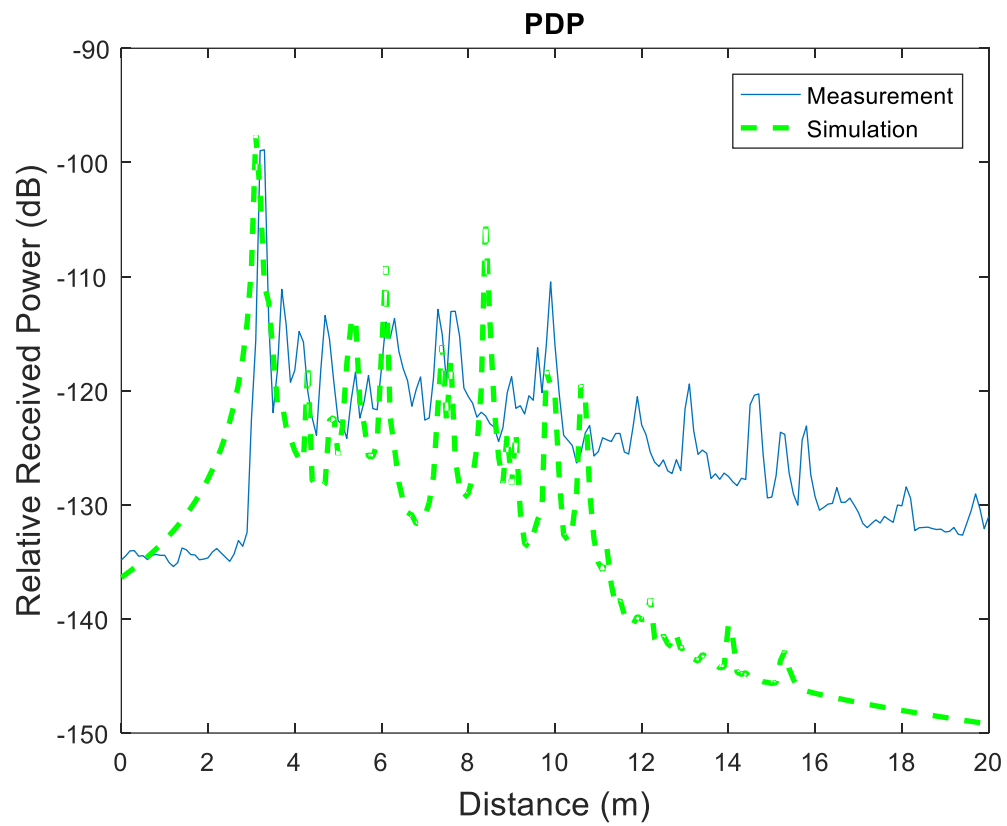
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	8.50	5.96
	Retardo medio (ns)	15.05	13.65
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	8.59	8.99
	Retardo medio (ns)	15.31	15.81
Atenuación total (dB)		94.41	93.59
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.1	3.2
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-97.61	-98.97

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	5.92	5.96
	Retardo medio (ns)	13.21	13.65
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	6.53	8.99
	Retardo medio (ns)	13.76	15.81
Atenuación total (dB)		94.50	93.59
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.1	3.2
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-97.61	-98.97

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 9.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0.08	5.09
	Retardo medio (ns)	12.01	14.79
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	2.15	8.83
	Retardo medio (ns)	12.29	17.30
Atenuación total (dB)		97.05	94.75
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.6	3.7
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-97.55	-99.91

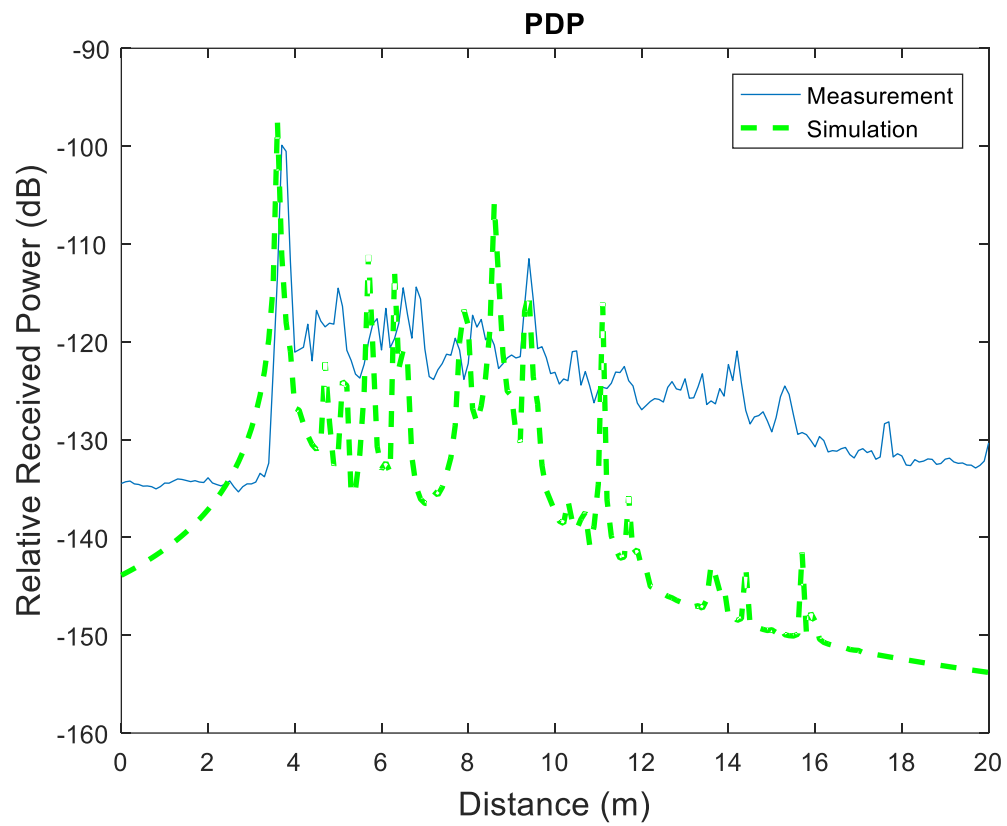
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	7.04	5.09
	Retardo medio (ns)	15.84	14.79
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	7.23	8.83
	Retardo medio (ns)	16.20	17.30
Atenuación total (dB)		95.77	94.75
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.6	3.7
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-97.55	-99.91

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	6.61	5.09
	Retardo medio (ns)	15.33	14.79
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	6.76	8.83
	Retardo medio (ns)	15.68	17.30
Atenuación total (dB)		95.85	94.75
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		3.6	3.7
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-97.54	-99.91

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 10.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0.04	3.88
	Retardo medio (ns)	9.67	11.30
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.45	6.73
	Retardo medio (ns)	9.79	13.01
Atenuación total (dB)		94.71	90.51
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.9	3
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-94.7	-94.4

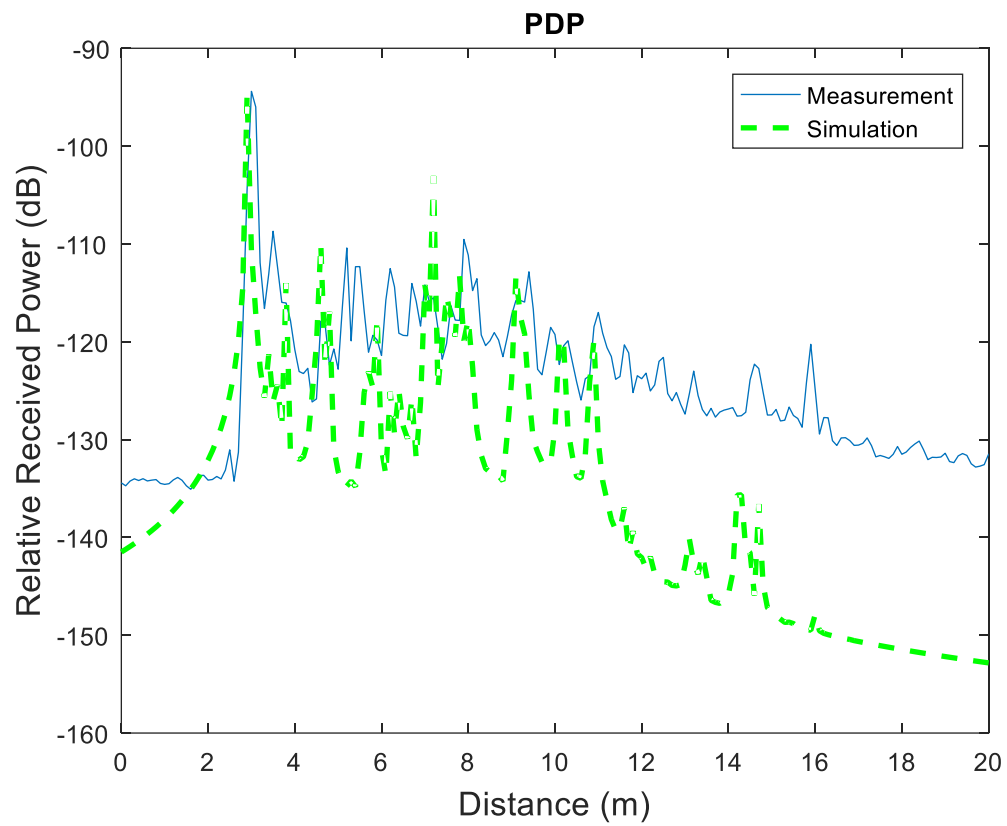
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	5.45	3.88
	Retardo medio (ns)	11.87	11.30
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	6.14	6.73
	Retardo medio (ns)	12.49	13.01
Atenuación total (dB)		93.64	90.51
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.9	3
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-94.7	-94.4

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	5.33	3.88
	Retardo medio (ns)	12.02	11.30
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	6.14	6.73
	Retardo medio (ns)	12.73	13.01
Atenuación total (dB)		93.32	90.51
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.9	3
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-94.69	-94.4

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 11.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0.25	5.08
	Retardo medio (ns)	6.60	8.99
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	0.45	6.95
	Retardo medio (ns)	6.60	10.24
Atenuación total (dB)		90.06	90.39
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2	2.1
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-91.84	-93.59

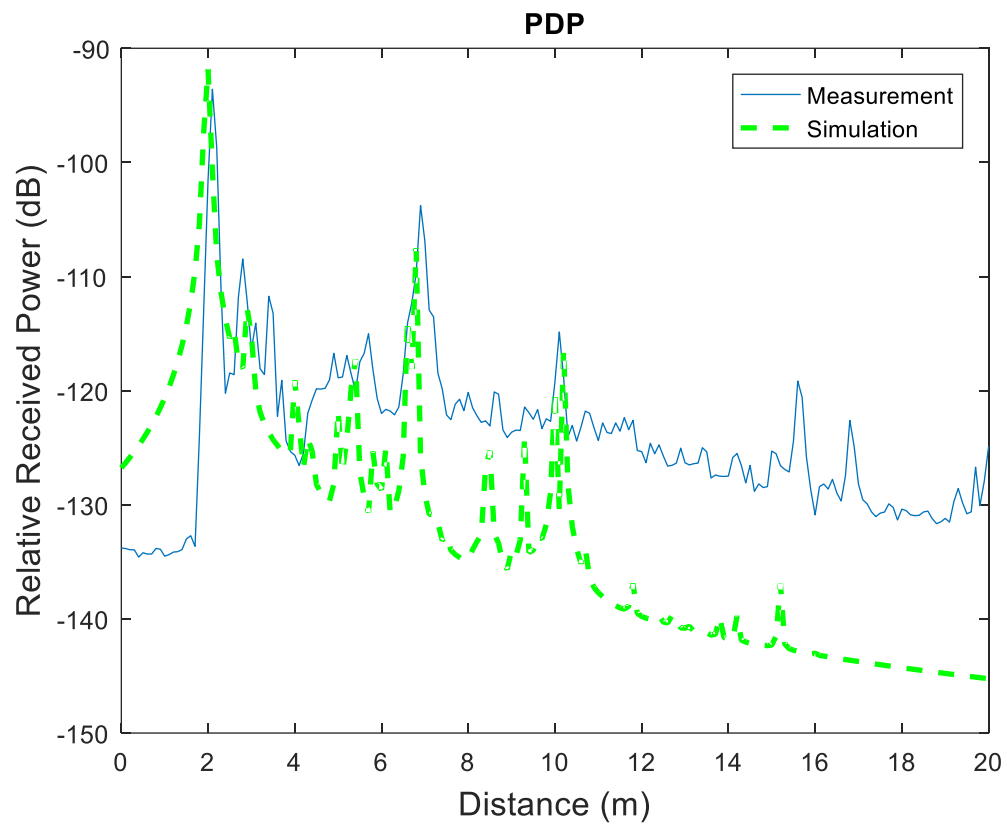
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	3.57	5.08
	Retardo medio (ns)	7.35	8.99
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	3.72	6.95
	Retardo medio (ns)	7.42	10.24
Atenuación total (dB)		89.80	90.39
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2	2.1
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-91.84	-93.59

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	2.12	5.08
	Retardo medio (ns)	6.90	8.99
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	2.90	6.95
	Retardo medio (ns)	7.12	10.24
Atenuación total (dB)		89.68	90.39
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2	2.1
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-91.84	-93.59

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 12.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0.22	5.01
	Retardo medio (ns)	7.60	8.94
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.79	6.89
	Retardo medio (ns)	7.75	10.43
Atenuación total (dB)		75.08	74.24
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.3	2.2
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-76.67	-78.26

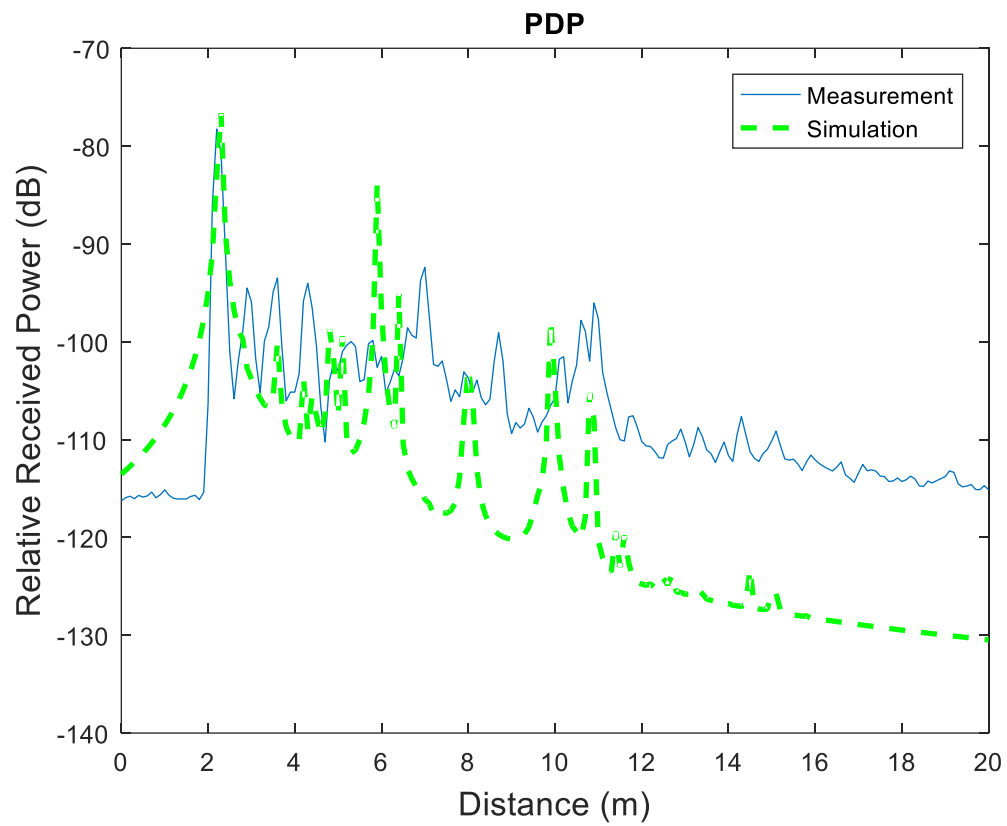
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	4.56	5.01
	Retardo medio (ns)	9.28	8.94
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	4.99	6.89
	Retardo medio (ns)	9.55	10.43
Atenuación total (dB)		74.41	74.24
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.3	2.2
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-76.67	-78.26

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones	Medidas
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	4.12	5.01
	Retardo medio (ns)	9.20	8.94
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	4.70	6.89
	Retardo medio (ns)	9.55	10.43
Atenuación total (dB)		74.35	74.24
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.3	2.2
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-76.67	-78.26

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 13.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0.34
	Retardo medio (ns)	9.75
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.63
	Retardo medio (ns)	9.84
Atenuación total (dB)		76.86
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.9
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-77.54

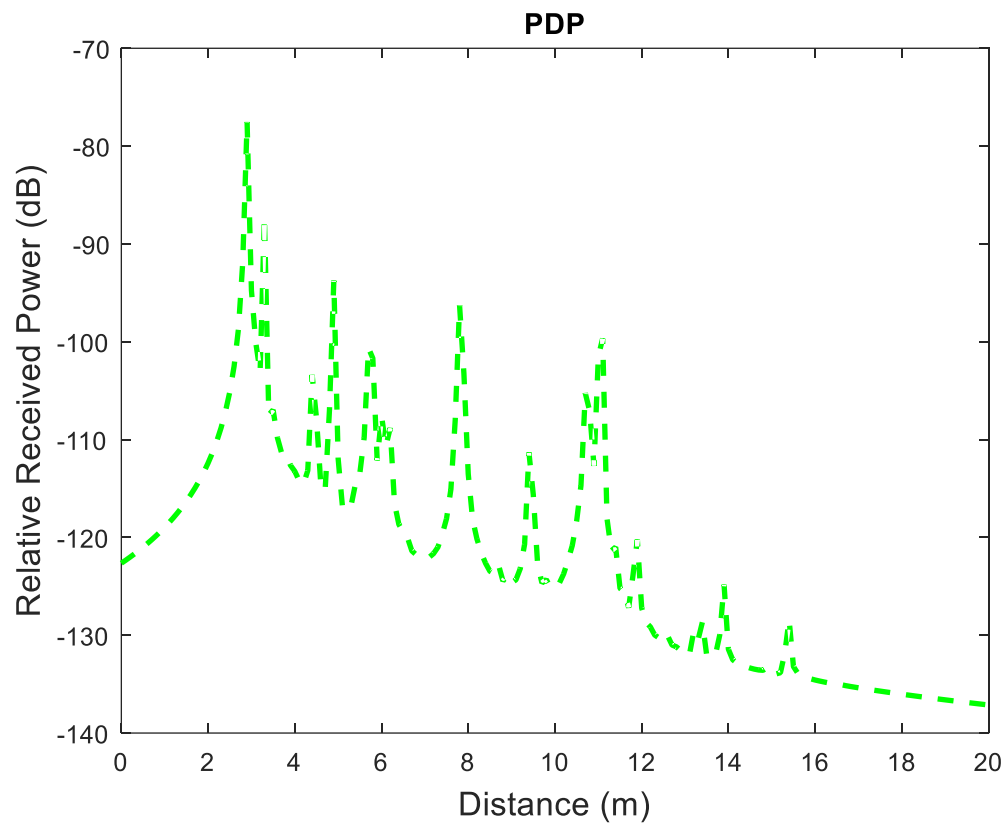
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	3.52
	Retardo medio (ns)	10.32
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	3.91
	Retardo medio (ns)	10.47
Atenuación total (dB)		76.66
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.9
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-77.54

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	1.96
	Retardo medio (ns)	10.09
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	3.47
	Retardo medio (ns)	10.47
Atenuación total (dB)		76.49
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.9
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-77.53

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 14.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0.23
	Retardo medio (ns)	7.73
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.76
	Retardo medio (ns)	7.88
Atenuación total (dB)		75.30
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.3
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-76.99

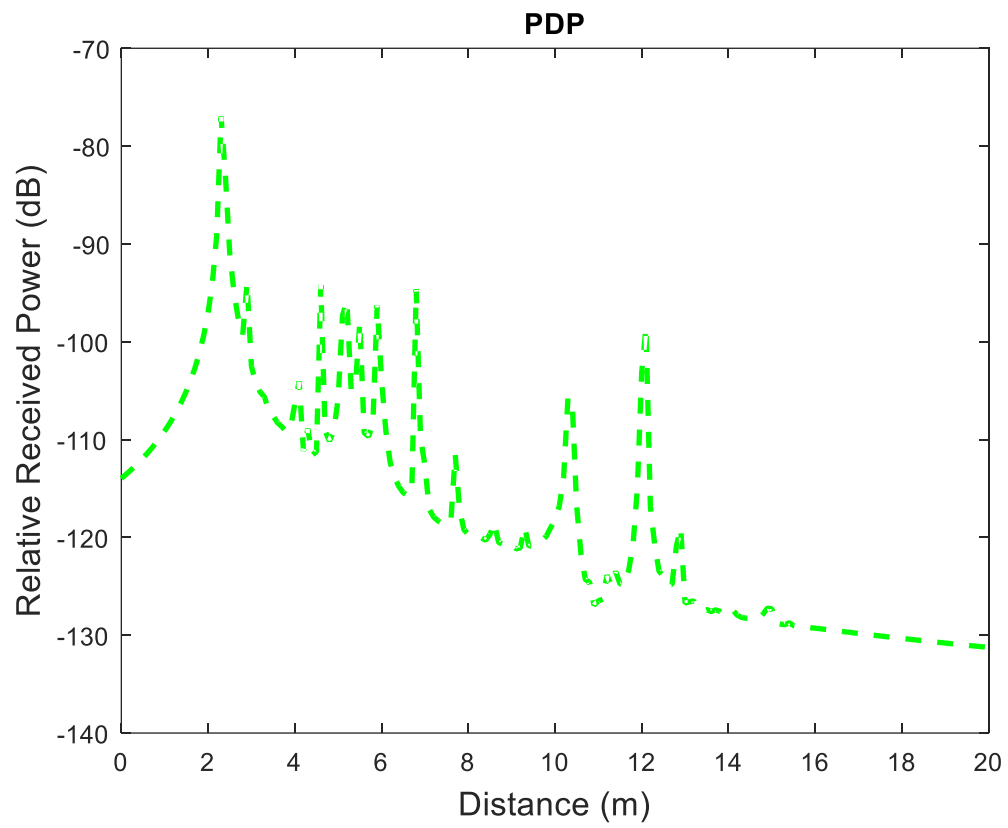
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	4.14
	Retardo medio (ns)	8.42
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	4.46
	Retardo medio (ns)	8.63
Atenuación total (dB)		75.11
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.3
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-76.99

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	2.28
	Retardo medio (ns)	8.21
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	3.70
	Retardo medio (ns)	8.59
Atenuación total (dB)		75.00
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		2.3
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-76.99

Representación del PDP (para simulación completa).



Resultados obtenidos para la posición 15.

Simulaciones teniendo en cuenta una reflexión de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0
	Retardo medio (ns)	5
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	1.02
	Retardo medio (ns)	5.10
Atenuación total (dB)		71.52
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		1.5
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-71.65

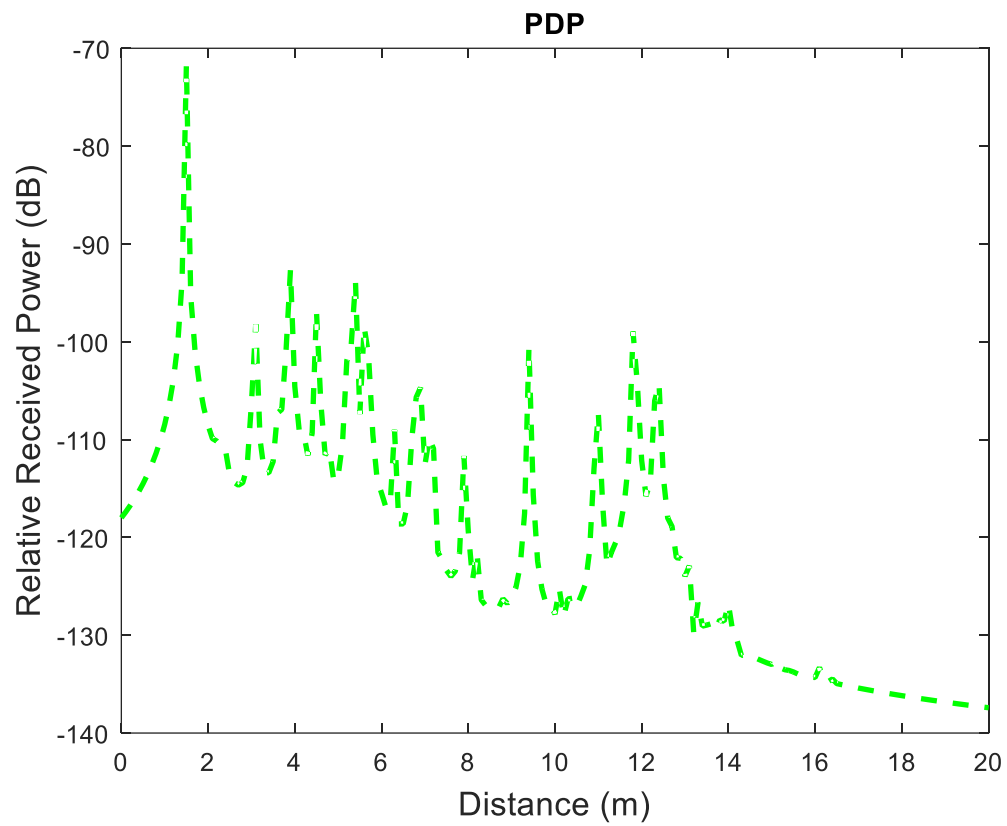
Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones de los rayos antes de llegar al receptor.

		Simulaciones
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0
	Retardo medio (ns)	5
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	2.39
	Retardo medio (ns)	5.27
Atenuación total (dB)		71.48
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		1.5
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-71.65

Simulaciones teniendo en cuenta dos reflexiones, difracción, difracción + reflexión y reflexión + difracción (Simulación completa).

		Simulaciones
Umbral 20 dB	RMS delay spread (ns)	0
	Retardo medio (ns)	5
Umbral 30 dB	RMS delay spread (ns)	2.35
	Retardo medio (ns)	5.34
Atenuación total (dB)		71.43
Distancia recorrida por el rayo directo (m)		1.5
Valor máximo de potencia relativa recibida (dB)		-71.65

Representación del PDP (para simulación completa).



Anexo II

Valores del diagrama de radiación tabulados:

grados	dB
0.68027	-26.336
2.6399	-25.985
5.44599	-25.502
9.3775	-24.951
13.3917	-24.475
18.0235	-24.005
20.3723	-23.999
23.8058	-24.048
26.1504	-24.175
28.6558	-24.602
30.914	-25.001
33.5819	-25.451
35.6547	-25.694
37.405	-25.365
38.513	-24.846
40.3064	-23.74
41.0029	-23.993
42.4569	-21.8151
43.8505	-20.0385
45.2222	-18.6435
46.5053	-17.38451
49.5802	-14.4009
53.1254	-11.501
55.6795	-9.505
58.3493	-7.681
60.7316	-6.399
63.8174	-4.552
67.6731	-2.828
70.5699	-1.612
73.8026	-0.513
76.5617	0.288
79.2795	0.919
82.475	1.46
85.2696	1.843
87.6307	1.979
89.7515	1.992
90.0339	2.034
91.7875	1.955
93.9618	1.907

9. ANEXO 2

95.337	1.788
97.3192	1.61
99.5947	1.37
102.706	0.9
106.92	0.03
110.603	-0.85
114.679	-2.08
117.626	-3.08
120.651	-4.29
124.202	-5.74
128.061	-7.64
131.727	-9.5
134.718	-11.33
137.449	-13.05
140.19	-14.78
143.604	-17.29
146.267	-19.53
148.755	-21.61
150.96	-23.17
153.162	-25.21
155.496	-26.99
159.041	-29.08
162.813	-30.46
167.391	-30.86
174.213	-31.1
177.559	-31.451
179.623	-31.612