UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

TRABAJO FIN DE GRADO

Caracterización experimental de canales direccionales de Radio a 5.5, 3.3 y 2.4 GHz en diferentes entornos

Autora: Miriam Esteban Plaza
Tutor: Bazil Taha Ahmed

JULIO 2015

Caracterización experimental de canales direccionales de Radio a 5.5, 3.3 y 2.4 GHz en diferentes entornos

Autor: Miriam Esteban Plaza

Tutor: Bazil Taha Ahmed

Grupo RFCAS

Departamento de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autonóma de Madrid

Julio 2015

Resumen

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el de realizar una campaña de medidas para el cálculo de las pérdidas de propagación en diferentes escenarios interiores del Edificio C de la Escuela Politécnica Superior a tres frecuencias distintas, 5.5 GHz, 3.3 GHz y 2.4 GHz, y a tres alturas distintas: 1 metro, 1.4 metros y 1.8 metros.

Se estudiarán enlaces de 10 y 20 metros de distancia total entre antenas evaluando el efecto que producen el tipo de paredes, las personas o la existencia de mobiliario en los distintos escenarios. Las medidas se realizarán utilizando señales de onda continua que serán transmitidas por una de las antenas y recibida por la otra. Esta señal será analizada por el analizador de redes.

Los resultados se mostrarán:

-En forma de gráfica y contarán con: los datos de las medidas tomadas, la atenuación teórica, el ajuste de las medidas en dos rectas, el histograma de la diferencia de medidas al valor medio y su función de probabilidad. Las funciones de distribución en todos los casos se han aproximado por una combinación de una función Gaussiana y una función de Rayleigh.

-En forma de ecuación (modelo de propagación) que define el ajuste de las medidas en dos rectas.

Palabras clave:

Enlace inalámbrico

Pérdidas de propagación

Modelo de propagación

Banda de trabajo

Analizador de redes

Abstract

The aim of this project is to carry out a measurement campaign focused on the calculation of propagation loss different indoor in Escuela Politécnica Superior. I will work with three different frequencies (5.5 GHz, 3.3 GHz and 2.4 GHz) and three different heights: 1m, 1.4m y 1.8m.

In this study I will do 10 and 20 meters wireless links, which depend on the scenario. I will evaluate the effect that produce the type of walls, people or piece of furniture in different scenarios. The measurements will be made by using continuous wave signals to be transmitted by one antenna and received by the other. This signal is analyzed by the network analyzer.

The results will show:

-Graphical data that will have: measures data, theorical loss, two curves adjustment, measurements to mean value histogram, and its cumulative distribution function. The cumulative distribution functions will be aproximated by a combination of at least one Gaussian functions and one Rayleigh function.

-Propagation model that is defined with two curves equations.

Key Words

Wireless link

Propagation loss

Propagation model

Working band

Network analyzer

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor Bazil Taha su ayuda, su apoyo y su paciencia para conmigo. A Ana Morán y a Raúl Lara por echarme una mano al comienzo de mi TFG y al grupo de RFCAS por el buen ambiente de trabajo que creáis.

Gracias a mis amigas de siempre por esos ratitos de desconexión, gracias al “ChanchuTeam” y a muchos compañeros más por todos esos momentos que nos permitían los estudios, las prácticas y los exámenes. Gracias por estar ahí.

También agradecer a Paula Sánchez, a Raquel Villena, a David Olano y a mi propio tutor su tiempo y dedicación en la toma de medidas para los escenarios 2 y 3.

Y sobre todo quiero dar las gracias a mis padres por su apoyo incondicional, por sus consejos y por su infinita paciencia en mis días malos. Sin ellos esto no hubiera sido lo mismo.

Gracias.

Índice general

1 Introducción 19
1.1 Motivación del trabajo 19
1.2 Objetivo y enfoque 19
1.3 Metodología, plan de trabajo y organización de la memoria 19
1.4 Estado del Arte 20
2 Teoría aplicada 25
2.1 Mecanismos de propagación 25
2.2 Modelos de propagación 26
2.2.1 Modelo de pendiente única 26
2.2.2 Modelo de doble pendiente 26
2.2.3 Modelo multi-pared 26
2.2.4 Modelo de atenuación lineal 27
2.3 Pérdidas en espacio libre 27
2.4 El problema del multi-trayecto. 28
2.5 Modelos de desvanecimiento. 29
2.5.1 Introducción. 29
2.5.2 Fenómenos de propagación. 29
2.5.3 Presentación de los modelos de desvanecimiento 30
2.5.4 Distribuciones de probabilidad 32
2.5.4.1 Distribución Normal o Gaussiana 32
2.5.4.2 Distribución Rayleigh 32
2.5.4.3 Combinación de distribución Rayleigh y Gaussiana 33
2.5.4.4 Distribución Hypo-Rayleigh 33
3 Preparación de la campaña de medidas 37
3.1 Análisis del material disponible y utilizado 37
3.1.1 Antenas 37
3.1.2 Cableado 37
3.1.3 Soportes 38
3.1.4 Generador de señal y analizador de espectros 38
3.1.5 Analizador de redes 39
3.1.5.1 Analizador de redes Rohde & Schwarz ZVL 39
3.1.5.2 Analizador de redes Agilent Technologies E5063A 40
3.1.6 Medidor láser 43
3.1.7 Otros recursos utilizados 44
4 Campaña de medidas 47
4.1 Escenario 1: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C 47
4.1.1 Banda de 2.4 GHz 47

4.1.2 Banda de 3.3 GHz 55
4.1.3 Banda de 5.5 GHz. 63
4.2 Escenario 2: Medidas del efecto de la presencia humana longitudinal en los canales directivos 72
4.2.1 Banda de 2.4 GHz 72
4.2.2 Banda de 3.3 GHz. 74
4.2.3 Banda de 5.5 GHz. 76
4.3 Escenario 3: Medidas del efecto de la presencia humana transversal en los canales directivos 78
4.3.1 Banda de 2.4 GHz 78
4.3.2 Banda de 3.3 GHz. 80
4.3.3 Banda de 5.5 GHz 82
5 Conclusiones y trabajo futuro 87
5.1 Conclusiones 87
5.2 Trabajo futuro 87
Referencias 89
A Escenarios 91
B Publicación 92

Índice de ilustraciones

Figura 2.1: Reflexión. 25
Figura 2.2: Difracción. 25
Figura 2.3: Dispersión. 25
Figura 2.4: Ensanchamiento del frente de onda. 27
Figura 2.5: Pérdidas en el espacio libre para antenas de 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz. 28
Figura 2.6: Radioenlace LOS. 28
Figura 2.7: Radioenlace NLOS. 29
Figura 2.8: Modelo de desvanecimiento generalizado 30
Figura 2.9: Rice Fading. 30
Figura 2.10: Rayleigh Fading. 31
Figura 2.11: Hyper-Rayleigh Fading 31
Figura 2.12: CDF para los modelos de desvanecimiento e Hyper-Rayleigh 32
Figura 3.1: Antena 2.4 GHz 37
Figura 3.2: Antena 3.3 GHz 37
Figura 3.3: Antena 5.5 GHz 37
Figura 3.4: Cable con conectores tipo N, cable con conectores SMA y adaptador respectivamente. 38
Figura 3.5: Soporte para antenas. 38
Figura 3.6: Analizador de espectros. 39
Figura 3.7: Generador de señal. 39
Figura 3.8: Analizador de redes Rohde & Schwarz ZVL. 39
Figura 3.9: Analizador de redes Agilent Technologies E5063A 40
Figura 3.10: Parámetro S11 de la antena 1 y 2 de la banda de 2.4 GHz respectivamente 41
Figura 3.11: Parámetro S11 de la antena 1 y 2 de la banda de 3.3 GHz respectivamente 42
Figura 3.12: Parámetro S11 de la antena 1 y 2 de la banda de 3.3 GHz respectivamente 43
Figura 3.13: Medidor láser Bosch 43
Figura 4.1: Esquema Pasillo central, Planta Baja, Edificio C 47
Figura 4.2: Ejemplo de la toma de medidas 47
Figura 4.3: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro 48
Figura 4.4: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro 49
Figura 4.5: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro 49
Figura 4.6: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro 50
Figura 4.7: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro 50
Figura 4.8: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros 51
Figura 4.9: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros 51
Figura 4.10: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros 52
Figura 4.11: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros 52
Figura 4.12: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros 53
Figura 4.13: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros 53
Figura 4.14: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros 54
Figura 4.15: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros 54
Figura 4.16: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros 55
Figura 4.17: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros 55
Figura 4.18: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro 56
Figura 4.19: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro. 57
Figura 4.20: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro 57
Figura 4.21: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro 58

Figura 4.22: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro ... 58
Figura 4.23: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros ... 59
Figura 4.24: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros. 59
Figura 4.25: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros ... 60
Figura 4.26: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros ... 60
Figura 4.27: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros ... 61
Figura 4.28: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros ... 61
Figura 4.29: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros. 62
Figura 4.30: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros ... 62
Figura 4.31: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros ... 63
Figura 4.32: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros ... 63
Figura 4.33: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro ... 64
Figura 4.34: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro ... 65
Figura 4.35: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro ... 65
Figura 4.36: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro ... 66
Figura 4.37: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro ... 66
Figura 4.38: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros ... 67
Figura 4.39: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros ... 67
Figura 4.40: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros ... 68
Figura 4.41: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros ... 68
Figura 4.42: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros ... 69
Figura 4.43: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros ... 69
Figura 4.44: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros ... 70
Figura 4.45: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros ... 70
Figura 4.46: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros ... 71
Figura 4.47: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros ... 71
Figura 4.48: Esquema del Escenario 2 ... 72
Figura 4.49: Representación del efecto de las personas en la banda de 2.4 GHz ... 73
Figura 4.50: Comparativa de pérdidas entre hombres y mujeres en la banda de 2.4 GHz ... 73
Figura 4.51: Comparativa entre todas las personas para la banda de 2.4 GHz ... 74
Figura 4.52: Representación del efecto de las personas en la banda de 3.3 GHz ... 75
Figura 4.53: Comparativa de pérdidas entre hombres y mujeres en la banda de 3.3 GHz ... 75
Figura 4.54: Comparativa entre todas las personas para la banda de 3.3 GHz ... 76
Figura 4.55: Representación del efecto de las personas en la banda de 5.5 GHz ... 77
Figura 4.56: Comparativa de pérdidas entre hombres y mujeres en la banda de 5.5 GHz ... 77
Figura 4.57: Figura 4.58: Comparativa entre todas las personas para la banda de 5.5 GHz ... 77
Figura 4.59: Esquema del Escenario 3 ... 78
Figura 4.60: Efecto de Bazil en tramo horizontal para la banda de 2.4 GHz ... 79
Figura 4.61: Efecto de Paula en tramo horizontal para la banda de 2.4 GHz ... 79
Figura 4.62: Efecto de David en tramo horizontal para a banda de 2.4 GHz ... 80
Figura 4.63: Efecto de Raquel en tramo horizontal para la banda de 2.4 GHz ... 80
Figura 4.64: Efecto de Bazil en tramo horizontal para la banda de 3.3 GHz ... 81
Figura 4.65: Efecto de Paula en tramo horizontal para la banda de 3.3 GHz ... 81
Figura 4.66: Efecto de David en tramo horizontal para la banda de 3.3 GHz ... 82
Figura 4.67 Efecto de Raquel en tramo horizontal para la banda de 3.3 GHz ... 82
Figura 4.68: Efecto de Bazil en tramo horizontal para la banda de 5.5 GHz ... 83
Figura 4.69: Efecto de Paula en tramo horizontal para la banda de 5.5 GHz ... 83
Figura 4.70: Efecto de David en tramo horizontal para la banda de 5.5 GHz ... 84
Figura 4.71: Efecto de Raquel en tramo horizontal para la banda de 5.5 GHz ... 84

Índice de Tablas

Tabla 3-1: Comparativa de antenas empleadas 37
Tabla 3-2: Resumen de bandas de trabajo para las antenas de 2.4 GHz 41
Tabla 3-3: Resumen de bandas de trabajo para las antenas de 2.4 GHz 42

1

Introducción

1 Introducción

1.1 Motivación del trabajo

El aumento notable de dispositivos móviles en la sociedad, ya sean ordenadores portátiles, smartphones u otros dispositivos, han hecho que sea necesario la caracterización de nuevos enlaces radioeléctricos para encontrar así el camino óptimo (LOS) entre una torre emisora y su dispositivo receptor. Como se explicará más adelante son muchos los fenómenos que entorpecen la propagación directa de la onda creando multi-trayecto, es decir, una misma onda puede llegar al receptor por caminos diferentes dando lugar a retrasos, pérdida o duplicación de información. Como estos fenómenos se acentúan en interiores se ha querido realizar un estudio para determinar qué banda de trabajo de las tres frecuencias propuestas es la más recomendable usar para minimizar el efecto de estos fenómenos.

1.2 Objetivo y enfoque

En cualquier sistema de telecomunicaciones es necesario tener una exhaustiva caracterización del medio de transmisión para garantizar una calidad de servicio al usuario.

Este Trabajo de Fin de Grado se centrará en el estudio de las pérdidas de propagación y el efecto de la presencia humana en los canales directivos a tres frecuencias propuestas: 5.5 GHz, 3.3 GHz y 2.4 GHz. A partir de la toma de medidas y aproximaciones a los diferentes modelos de propagación por medio de la caracterización de los escenarios en forma gráfica y matemática, se decidirá qué banda o bandas de frecuencia son las mejores para nuestra transmisión.

Para este estudio se han elegido seis escenarios distintos repartidos entre la planta baja y la planta uno del Edificio C de esta escuela.

Los escenarios principales que aparecerán en esta memoria son:

Escenario 1: Pasillo central de la planta baja del edificio C, en el que se representarán las pérdidas de propagación, a las tres frecuencias citadas anteriormente y a tres alturas distintas (1m, 1.4m y 1.8m), a una distancia máxima entre antenas de 20 metros.

Escenario 2: Medidas del efecto de la presencia humana longitudinal en los canales directivos en el pasillo central de la planta baja del edificio C.

Escenario 3: Medidas del efecto de la presencia humana transversal en los canales directivos en el pasillo central de la planta baja del edificio C.

El resto de escenarios se representan en el Anexo A.

1.3 Metodología, plan de trabajo y organización de la memoria

Con el fin de cumplir los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado, se ha seguido la siguiente metodología de trabajo.

- **Escenarios a estudiar:** se han seleccionado los escenarios más representativos, que poseen unas características muy atractivas para el estudio y que pueden encontrarse en cualquier edificio.

- **Adquisición de medidas:** se han tomado todas las medidas de campo necesarias para su posterior análisis en los diferentes escenarios. Este paso es crítico ya que todo el estudio depende de ello y por lo tanto, se ha realizado con el mayor cuidado y precisión posible.

- **Análisis de datos:** con las medidas recogidas se ha realizado un análisis para poder realizar la caracterización gráfica y comprobar si los datos estaban bien tomados o no. Una vez que se comprobó que los datos eran correctos, se caracterizó matemáticamente obteniendo una ecuación en función de la distancia para todos los escenarios.

- **Escritura y publicaciones:** La escritura se ha llevado a cabo a lo largo de todo el proyecto, condensando la mayor carga al terminar el análisis de datos. También se ha enviado una publicación con algunos resultados significativos de este trabajo.

La memoria está dividida en cinco capítulos. El primer capítulo es una introducción donde se expone la motivación y el objetivo de este trabajo, una breve explicación de cómo se ha desarrollado y el estado del arte. El capítulo dos presenta de un modo general los mecanismos de propagación, los modelos de propagación y de desvanecimiento. En el capítulo 3 se habla del material que se ha usado para llevar a cabo la caracterización de los escenarios. El capítulo cuatro hace referencia a la campaña de medidas: resultados obtenidos y escenarios estudiados así como el modelo de propagación que se ajusta más. Por último, en el capítulo quinto se recogen las conclusiones alcanzadas con este trabajo y algunas propuestas para el futuro. Finalmente, los anexos recogen el resto de escenarios y la publicación realizada.

1.4 Estado del Arte

En este capítulo se presentan uno de los artículos sobre la propagación en el interior ya que el estudio de la propagación en interiores es de vital importancia para comunicaciones en interiores y localizaciones [1-3]. En [4], el tratamiento teórico de propagación para interiores que se ha dado además en [5], basándose en el estudio de los modos de propagación simulando el escenario como guía de onda, obteniéndose la frecuencia de corte de cada modo de propagación. En [6] se presentan las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz en diferentes escenarios (pasillos cerrados, pasillos abiertos y clases). Cada resultado muestra la desviación de las pérdidas de propagación del valor medio, representado por una distribución Gaussiana con $\sigma = 1$ dB para todos los casos. En [7] las pérdidas de propagación han sido medidas en diferentes bandas de trabajo (1, 2.4 y 5.8 GHz) dentro de túneles arqueados. Los resultados muestran que el desvanecimiento rápido (fast fading) puede representarse como una distribución de Rayleigh. Las antenas usadas son antenas de bocina con una ganancia de 9.2 dBi a 2.4GHz y 10.1 dBi a 5.8 GHz. En [8] se han presentados las pérdidas de propagación en pasillos estrechos. Los resultados de las mediciones vienen dadas a 374 MHz, 915 MHz y 2400 MHz. Los escenarios estudiados son sin obstáculos, en línea directa (LOS), LOS obstaculizado, T-juntion NLOS y curvas tipo L NLOS. Los resultados muestran la desviación del valor medio representados por una distribución Gaussiana. Las antenas usadas son de 2.4 GHz, tienen una ganancia de 6.5 dBi. En [9], se han representado diferentes modelos de propagación para estudiar la cobertura de sistemas WIMAX en microceldas, picoceldas y femtoceldas a 3.5 GHz. Un modelo nuevo WLAN para interiores y exteriores se presenta en [10]. Basado en el estándar OPNET para nodos WLAN, la estimación de pérdidas de propagación para estos dos tipos de entornos han sido mejoradas. En el trabajo [11] se describe y se evalúa un nuevo algoritmo para la predicción de la propagación en interiores para ondas centrimétricas. En [12], se ha investigado la caracterización del canal de radio de una mina subterránea a 2.4GHz. Se ha representado la pérdida de propagación en función de la distancia entre el transmisor y el receptor dándose retardo de propagación. En [13], se estudian los modos de propagación y las variaciones temporales a lo largo del hueco del ascensor en la banda UHF. Por otra parte, la propagación en pasillos, así como túneles se han estudiado en [14, 15]. En [14], la propagación en la banda RF de radio de una sala a un pasillo se había estudiado mediante el análisis de los resultados de un canal MIMO multi-enlace. Los resultados muestran que a pesar de las condiciones NLOS, la propagación dominante era directa a través de paredes y con reflexiones especulares. En [15], se han estudiado con detalle los diferentes mecanismos de propagación asociados con el hueco del ascensor. Analizando los resultados de medición, se verifica la presencia de ondas electromagnéticas guiadas a lo largo del hueco del ascensor. El efecto guía de onda del hueco del ascensor ha sido un mecanismo de propagación importante. En [16], la pérdida de propagación para

escenarios en interiores a 5.5 GHz donde se han utilizado antenas con diferentes ganancias en las mediciones de pérdida de propagación. En [17], se ha estudiado la banda estrecha de un canal directivo para las pérdidas de propagación en interiores a 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz. Se ha observado que la pérdida de propagación puede ser modelada por un sólo modelo de propagación de una sola pendiente o de doble pendiente.

2

Teoría aplicada

2 Teoría aplicada

2.1 Mecanismos de propagación

El modelo de propagación en espacio libre es el modelo más básico de propagación que podemos emplear. Las ondas provienen de una fuente puntual que viajan en todas las direcciones en línea recta. La potencia de la señal recibida se atenúa conforme al cuadrado de la distancia entre la antena emisora y la antena receptora, lo que implica un decaimiento de 20dB por década.

Éste sería el caso ideal de la propagación no guiada pero rara vez se puede conseguir. Los fenómenos que interfieren en la propagación directa de la onda son la reflexión (Figura 2.1), la difracción (Figura 2.2) y la dispersión (Figura 2.3). Dichos fenómenos causan distorsiones en la señal y grandes pérdidas adicionales.

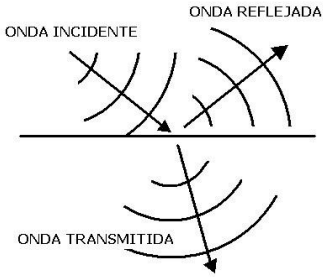


Figura 2.1: Reflexión.

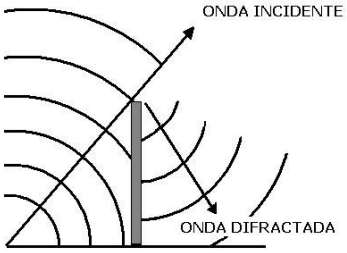


Figura 2.2: Difracción.

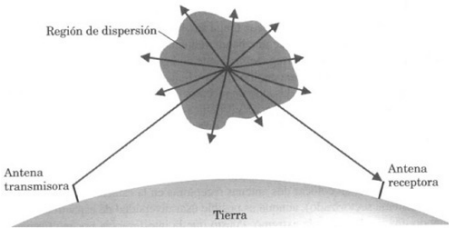


Figura 2.3: Dispersión.

En exteriores, los cambios en distancias muy pequeñas pueden dar lugar a fuertes fluctuaciones de la señal debido a que al estar formada por múltiples componentes multi-trayecto, todas ellas han podido verse modificadas y provocar un cambio considerable en la señal recibida. En interiores, todos estos efectos se ven acentuados ya que es prácticamente imposible evitar la difracción en las esquinas o la dispersión en paredes, techos o suelos. Llegaremos a la conclusión de que el modelo de espacio libre no es un modelo muy fiable para la comunicación en interiores, debido a que hay numerosas variables que provocarían un cambio significativo en el comportamiento de las pérdidas de propagación.

La existencia de un mecanismo de propagación, cambia los modelos de propagación dependiendo del escenario en el que se esté.

2.2 Modelos de propagación

En este capítulo de explicarán brevemente algunos de los modelos de propagación que existen. Algunos de ellos son para zonas abiertas y otros para interiores.

2.2.1 Modelo de pendiente única

Es el modelo de propagación más simple para aplicaciones normales de radioenlace. Representa una dependencia lineal entre la pérdida de propagación y la distancia y puede expresarse como:

$$\boldsymbol{P_{RX}(dBm) = P_{TX}(dBm) + G_{TX}(dB) + G_{RX}(dB) - L_p\ (dB)} \qquad (2.1)$$

donde $\mathbf{P_{RX}}$ es la media de la potencia recibida, $\mathbf{P_{TX}}$ la potencia transmitida, $\mathbf{G_{TX}}$ y $\mathbf{G_{RX}}$ son las ganancias de las antenas emisoras y receptoras respectivamente, **L** las pérdidas parásitas, **n** el índice de atenuación de la señal y **d** la distancia de separación entre la antena emisora y receptora.

Aunque la ecuación (2.1) se puede simplificar como:

$$\boldsymbol{L_p(dB) = L_0 + 10n \log_{10} d} \qquad (2.2)$$

donde $\mathbf{L_0}$ son las pérdidas a la distancia de referencia, **n** es el índice de propagación y **d** es la distancia entre emisor y receptor. En la ecuación (2.2) se presenta sólo el valor medio de las pérdidas de propagación. La desviación del valor medio, se presenta por una variable aleatoria que puede ser Gaussiana, Rayleigh o una combinación de las dos.

2.2.2 Modelo de doble pendiente

Es una variación del modelo de pendiente única, donde el camino para el cual se van a calcular las pérdidas de propagación, se divide en dos partes: la primera hasta una distancia d y la segunda después de ella.

La ecuación se puede definir como:

$$\boldsymbol{L_p(dB) = \begin{cases} L_{01} + 10n_1 \log_{10} d & d \le d_c \\ L_{02} + 10n_2 \log_{10}\left(\dfrac{d}{d_c}\right) & d_c < d \le d_{max} \end{cases}} \qquad (2.3)$$

donde $\mathbf{L_{0n}}$ son las pérdidas a la distancia de referencia, **n** es el índice de propagación, $\mathbf{d_c}$ es la distancia de corte y **d** es la distancia entre emisor y receptor. En la ecuación (2.3) se presenta sólo el valor medio de las pérdidas de propagación. La desviación del valor medio, se presenta por una variable aleatoria que puede ser Gaussiana, Rayleigh o una combinación de las dos

2.2.3 Modelo multi-pared

Este es el modelo empírico más complicado. Todas las paredes que atraviesa el rayo directo T-R son consideradas y entra en juego los materiales con los que están hechas cada una de ellas. La pérdida introducida por el número de plantas que se atraviesan en la comunicación no es una función lineal y viene dada por un factor b:

$$\boldsymbol{L(dB) = L_{fs} + L_c + \sum_{i=1}^{I} K_{wi} \times L_{wi} + L_f \times k_f^{\frac{k_f+2}{k_f+1}-b}} \tag{2.4}$$

donde $\mathbf{L_{fs}}$ son las pérdidas por espacio libre T-R, $\mathbf{L_c}$ es una constante de pérdidas, $\mathbf{K_{wi}}$ es el número de paredes que se atraviesan, $\mathbf{K_f}$ es el número de plantas distantes, $\mathbf{L_{wi}}$ es la pérdida de la pared tipo i, $\mathbf{L_f}$ es la pérdida entre plantas consecutivas, **b** es un parámetro empírico e **I** es el número de tipos de paredes.

2.2.4 Modelo de atenuación lineal

Es un modelo que asuma que el exceso de pérdida depende linealmente con la distancia y se expresa:

$$\boldsymbol{L(dB) = L_{fs} + \alpha \times d} \tag{2.5}$$

donde $\mathbf{L_{fs}}$ son las pérdidas por espacio libre T-R, **α** es el coeficiente de atenuación dado en (dB/m) y **d** es la distancia T-R.

2.3 Pérdidas en espacio libre

A la pérdida en el espacio libre se la conoce como la reducción de la potencia de la señal por el ensanchamiento del frente de onda, es decir, que su área es cada vez mayor a medida que nos alejamos de la antena transmisora por lo que su densidad de potencia disminuye.

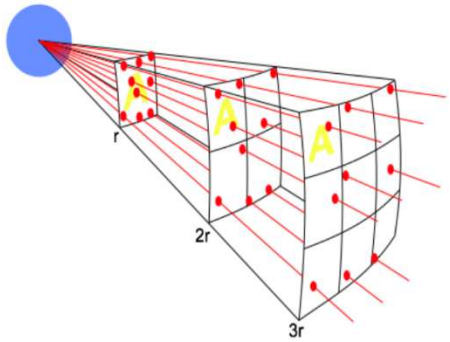


Figura 2.4: Ensanchamiento del frente de onda.

A lo largo de este trabajo se emplearán las pérdidas de espacio libre como referencia y para poder ver de manera directa el efecto que cada escenario tiene sobre las medidas.

Las pérdidas en el espacio libre a cualquier frecuencia se calculan como:

$$\boldsymbol{L_{fs}(dB) = 32.45 + 20\log_{10} d + 20\log_{10} f} \tag{2.6}$$

donde **d** es la distancia en metros y **f** es la frecuencia en GHz.

Aplicando la ecuación (2.6) se obtienen las pérdidas de propagación para las tres frecuencias que estamos estudiando a una distancia máxima entre antenas de 20 metros en pasos de 0.25m. Estas pérdidas han sido representadas en la siguiente figura:

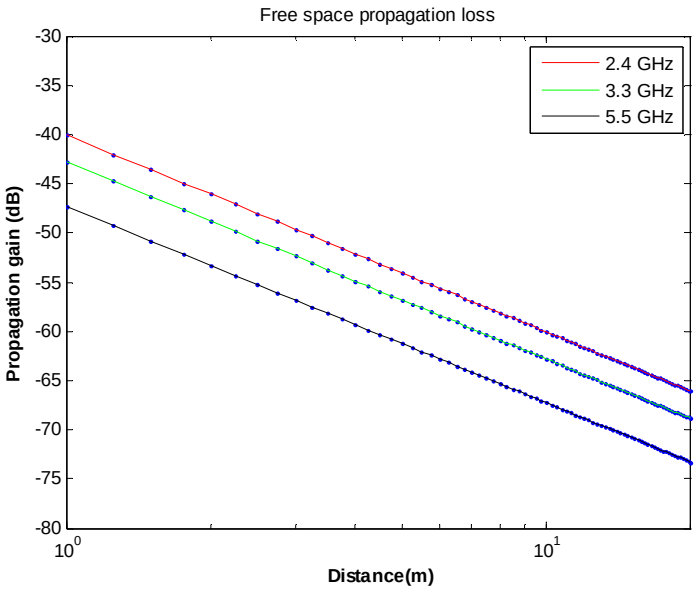


Figura 2.5: Pérdidas en el espacio libre para antenas de 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz.

2.4 El problema del multi-trayecto.

Las ondas electromagnéticas se propagan de acuerdo con numerosos mecanismos físicos: propagación en espacio libre, reflexión, transmisión, dispersión y guía de onda. Esto da como resultado que, teniendo un transmisor y un receptor puntuales, la onda transmitida no recorra un sólo camino, sino que ésta puede viajar por varios caminos distintos simultáneamente produciendo:

- Una desviación, en cuanto a pérdidas, de la trayectoria principal que es la que se parece a las pérdidas en espacio libre.
- Una modificación de la fase de las diferentes señales recibidas.
- Una diferencia temporal en la propagación, llamada retraso de propagación. Este efecto provoca interferencias en la recepción ya que se superponen varios flujos de datos.

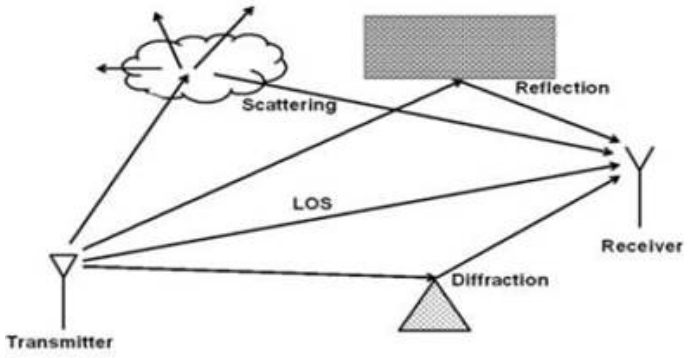


Figura 2.6: Radioenlace LOS.

En el caso en los que los radioenlaces sean LOS (figura 2.6), las reflexiones en paredes, techo y suelo son los efector que más van a afectar a las medidas. Sin embargo, en los escenarios donde no hay visión directa entre antenas (NLOS), la difracción y la dispersión serán los efectos más importantes (figura 2.7).

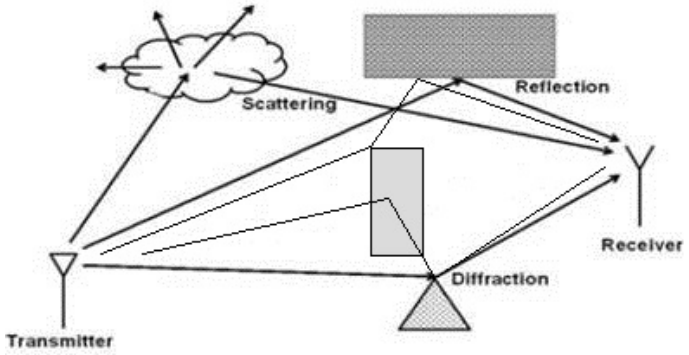


Figura 2.7: Radioenlace NLOS.

2.5 Modelos de desvanecimiento.

2.5.1 Introducción.

El modelado de la propagación de radio forma parte de los sistemas de comunicación inalámbricos ya que permiten predecir la potencia requerida para crear un enlace de comunicación y proporcionar así comunicaciones fiables. En este apartado se hablarán de los modelos de desvanecimiento a pequeña escala, Rice y Rayleigh, junto con sus respectivos modelos matemáticos y estadísticos. Además se presenta un modelo relativamente nuevo, Hypo-Rayleigh. Por último, se explicará la representación de la función de distribución acumulativa (CDF) que se utiliza en el análisis del desvanecimiento del canal.

2.5.2 Fenómenos de propagación.

En un entorno inalámbrico dado, hay dos modos de atenuación de la señal: propagación a gran escala y propagación a pequeña escala. La propagación a gran escala se define como la variación en la atenuación de la señal como resultado de grandes cambios en la distancia, en el tiempo o en la frecuencia. Por ejemplo, los modelos a gran escala predicen el cambio de intensidad de la señal si el enlace de comunicación aumentara de 1 km hasta 2 km. Por su parte, la propagación a pequeña escala, se refiere a las variaciones en el desvanecimiento de la señal debido a pequeños cambios en la distancia, el tiempo o la frecuencia. Un ejemplo sería la variación en la intensidad de la señal en un sistema en movimiento.

Para este trabajo nos interesan los modelos que predicen la trayectoria a pequeña escala: desvanecimiento Rice (Rice fading), desvanecimiento Rayleigh (Rayleigh fading) y, más recientemente el desvanecimiento Hyper-Rayleigh (Hyper-Rayleigh fading). En general, estos modelos se basan en modelos físicos o estadísticos. Un modelo físico tiene en cuenta la geometría exacta, es computacionalmente más complicado y necesita recalcularse cada vez que cambia la zona de los alrededores o el dispositivo inalámbrico se mueve. Un modelo estadístico se basa en características de propagación empíricas medidas en entornos específicos. Es menos exacto que el modelo físico ya que no se puede calcular la intensidad exacta de una señal en un lugar determinado. Lo que hace es describir el comportamiento de un canal en términos más generales, tales como el valor esperado o la varianza. Sin embargo, el modelo estadístico reduce la complejidad de los cálculos de propagación sin dejar de ser eficaz en la predicción. Los modelos aplicados a este trabajo son estadísticos.

2.5.3 Presentación de los modelos de desvanecimiento

Para este trabajo se va a utilizar, un modelo de desvanecimiento generlizado que recoge los tres tipos de desvanecimientos a pequeña escala. Presenta dos componentes dominantes y un conjunto de componentes difusas.

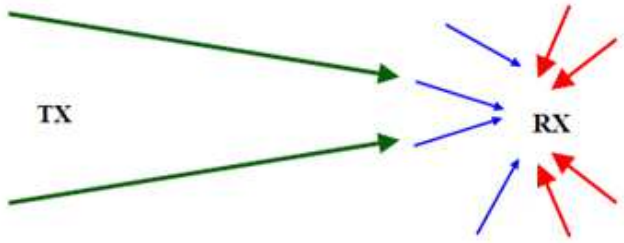


Figura 2.8: Modelo de desvanecimiento generalizado

$$\boldsymbol{V_{received} = V_1 e^{j\phi_1} + V_2 e^{j\phi_2} + \sum_{i=3}^{N} V_i e^{j\phi_i}} \tag{2.7}$$

A partir de este modelo de propagación se presentan los diferentes modelos que predicen la trayectoria a pequeña escala.

Modelo de desvanecimiento Rice (Rice Fading): se caracteriza por una línea de trayectoria de visión (LOS) y muchos componentes multi-trayecto relativamente débiles. El modelo de desvanecimiento de Rice se utiliza a menudo para el modelado de canales de radio móviles que tiene una trayectoria LOS como los teléfonos móviles y su torre. La figura representa el desvanecimiento Rice donde TX indica el elemento transmisor y RX el receptor. La flecha verde representa la ruta LOS, y las flechas azules más pequeñas representan las componentes multi-trayecto relativamente débiles.

Figura 2.9: Rice Fading.

El desvanecimiento Rice puede ser modelada como:

$$\boldsymbol{V_{received} = V_0 + \sum_{i=1}^{N} V_i e^{j\theta_i}} \tag{2.8}$$

donde V_0 es la componente LOS y el sumatorio es la suma de N trayectorias aleatorias, cada una de ellas con una amplitud compleja, V_i, y fase θ_i.

Modelo de desvanecimiento Rayleigh (Rayleigh Fading): se caracteriza por estar formado por muchas componentes mutitrayecto, resultado de señales de reflexión y difracción, cada una de ellas con una intensidad de señal relativamente similar entre sí y con una fase uniformemente distribuida. Está considerado el peor caso de escenario para comunicaciones móviles en entornos urbanos. La figura

muestra el desvanecimiento Rayleigh que contiene sólo componentes multi-trayecto, representadas por las flechas en rojo.

Figura 2.10: Rayleigh Fading.

La envolvente compleja de un canal de comunicación de radio que experimenta desvanecimiento Rayleigh puede ser modelada como:

$$V_{received} = \sum_{i=1}^{N} V_i e^{j\theta_i} \tag{2.9}$$

donde cada componente mantiene el mismo significado que en el caso de Rice definida por la ecuación (2.7).

Modelo de desvanecimiento Hyper-Rayleigh (Hyper-Rayleigh Fading): se caracteriza por estar formada por dos ondas con amplitud constante (V_1 y V_2) y fase aleatoria (φ_1 y φ_2).

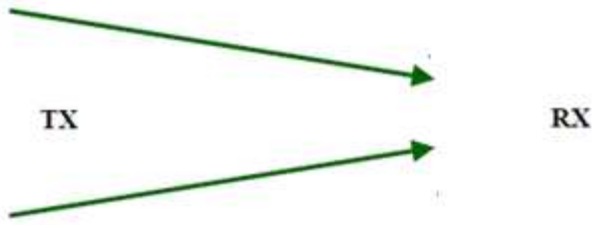


Figura 2.11: Hyper-Rayleigh Fading

$$V_{received} = V_1 e^{j\phi_1} + V_2 e^{j\phi_2} \tag{2.10}$$

La figura (2.12) muestra una CDF (Cumulative Distribution Function) que ilustra la probabilidad de predecir el desvanecimiento en los diferentes modelos. A partir de la figura se puede observar que CDF disminuye a medida que la profundidad del desvanecimiento (Loss) aumenta. La región entre Rayleigh con desvanecimiento y sin desvanecimiento se aproxima a Rice. La región por encima de la curva de Rayleigh se denomina desvanecimiento Hyper-Rayleigh. En la figura se ve que un desvanecimiento tiene mayor probabilidad de ocurrir en un modelo de dos rayos, modelo Rayleigh.

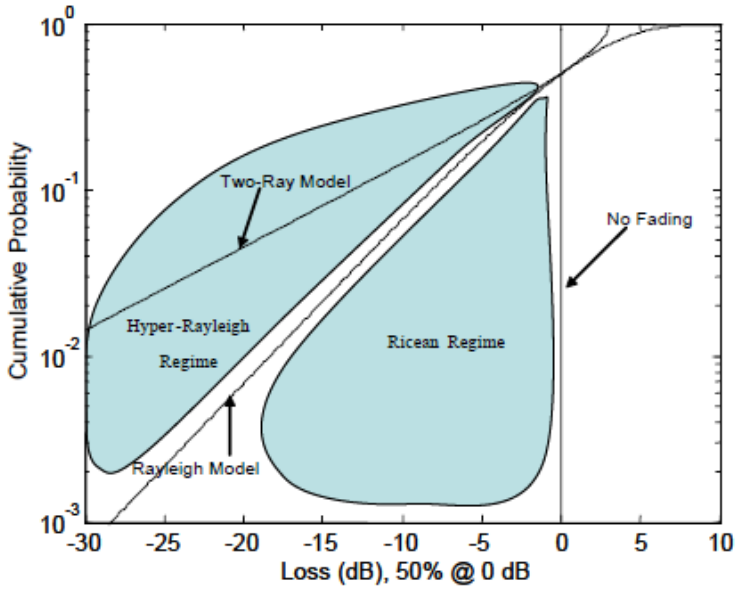


Figura 2.12: CDF para los modelos de desvanecimiento e Hyper-Rayleigh

2.5.4 Distribuciones de probabilidad

2.5.4.1 Distribución Normal o Gaussiana

La distribución normal o Gaussiana es una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece en fenómenos reales, por lo que es una de las distribuciones más usadas. Su gráfica de función de densidad tiene forma acampanada y es simétrica respecto de su media (μ).

Su correspondiente función de distribución CDF (Cumulative Distribution Function) viene dada por la ecuación:

$$\int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \tag{2.11}$$

En este trabajo, las medidas se aproximarán a una distribución Guassiana en caso de que no existir multi-trayecto o su efecto fuese muy pequeño o insignificante.

2.5.4.2 Distribución Rayleigh

Se dice que una variable aleatoria tiene una distribución de Rayleigh si su densidad de probabilidad viene dada por:

$$f(x;\sigma_{ray}) = \frac{x}{\sigma_{ray}} e^{\frac{-x^2}{2\sigma_{ray}^2}} \tag{2.12}$$

donde en nuestro caso x es la potencia (dB).

Esta distribución se pone de manifiesto cuando existe multi-trayecto. Cuando las señales alcanzan el receptor, la señal total recibida es una combinación de todas las señales que han alcanzado el receptor a través de los diferentes caminos posibles. Al ser una combinación de todas estas señales, la fase se convierte en un factor importante dado que hará variar la amplitud de la señal. Si todas están en fase,

todas sumarán, pero esto no es lo que ocurre en la práctica, si no que algunas estarán en fase y otras no, dependiendo de la longitud de los caminos recorridos, así mientras algunas sumarán, otras restarán.

Su correspondiente CDF viene dada por la ecuación:

$$\mathbf{1} - \boldsymbol{e}^{\frac{-\boldsymbol{x}^2}{2\sigma_{ray}^2}} \tag{2.13}$$

2.5.4.3 Combinación de distribución Rayleigh y Gaussiana

En la práctica nos encontramos con que en la gran mayoría de los enlaces radioeléctricos se pueden caracterizar por una mezcla de una distribución Rayleigh y distribución Gaussiana, cumpliendo la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{A} \times (\boldsymbol{CDF\ gaussiana}) + (\mathbf{1} - \boldsymbol{A}) \times (\boldsymbol{CDF\ Rayleigh}) \tag{2.14}$$

Donde A es la contribución de la distribución Gaussiana y $(1 - A)$ es la contribución de la distribución Rayleigh.

2.5.4.4 Distribución Hypo-Rayleigh

Se ha propuesto un nuevo modelo de distribución para modelar el desvanecimiento del canal en los segundos tramos de propagación. El desvanecimiento Hypo-Rayleigh se debe a la existencia de un rayo directo potente y unos rayos indirectos de menor potencia. [18]

La PDF de la nueva distribución viene dada por la ecuación:

$$PDF = \frac{(x-a)}{\sigma^2} \quad e^{-(x-a)^2/2\sigma^2} \quad x - a \geq 0$$

La CDF para la nueva distribución viene dada por la ecuación:

$$CDF = 1 - e^{-(x-a)^2/2\sigma^2} \quad x - a \geq 0$$

donde **a** es el parámetro de desviación.

3

Preparación de la campaña de medidas

3 Preparación de la campaña de medidas

En la primera fase del proyecto, se ha reunido el equipo necesario para la toma de medidas. Se han seleccionado los escenarios donde realizar dichas medidas, el modelo de representación, el tipo de gráficas a usar y el modelo de comparación de resultados.

3.1 Análisis del material disponible y utilizado

3.1.1 Antenas

Las antenas utilizadas en este trabajo son antenas comerciales que pueden ser adquiridas en el mercado. Son antenas directivas, de tipo panel y trabajan en bandas de frecuencias de 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz respectivamente, las mismas que están en el rango para la caracterización del canal estrecho para los sistemas WiFi y WiMax.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de las antenas empleadas en este trabajo.

Tabla 3-1: Comparativa de antenas empleadas

Frecuencia	Banda de trabajo	Ganancia	Polarización	Impedancia
2.4 GHz	2400-2500 MHz	18dBi	V/H	50 Ohm
3.3 GHz	3300-3400 MHz	18dBi	V/H	50 Ohm
5.4 GHz	5470-5850 MHz	19dBi	V/H	50 Ohm

Figura 3.1: Antena 2.4 GHz

Figura 3.2: Antena 3.3 GHz

Figura 3.3: Antena 5.5 GHz

3.1.2 Cableado

A la hora de conectar las antenas a los puertos del analizador de redes, se ha necesitado un cable de 20 metros para los escenarios largos (conexión entre analizador y antena receptora) y un cable de 5 metros para la conexión entre el analizador y la antena emisora. También ha sido necesario el uso de cables con conectores tipo N para la conexión con el analizador de espectros.

Hay que tener en cuenta que estos cables añadirán pérdidas adicionales que eliminaremos con el proceso de calibración que se explicará más adelante.

Figura 3.4: Cable con conectores tipo N, cable con conectores SMA y adaptador respectivamente.

3.1.3 Soportes

Las antenas, con ayuda de unos soportes metálicos, se fijarán a una vara para poder variar de altura. A su vez esta vara se fijará a un trípode con el cual podremos apoyar y orientar la antena según el escenario.

Figura 3.5: Soporte para antenas.

3.1.4 Generador de señal y analizador de espectros

A la hora de medir distancias superiores a 20 metros necesitaremos un equipo de generador de señal junto a la antena transmisora y un equipo de analizador de espectro junto a la antena receptora. De esta manera podremos crear enlaces a largas distancias sin problemas.

En los laboratorios dispondremos de un analizador de espectros **Anritsu MS2717B** (ver figura 3.6) y un generador de señal **Rohde & Schwarz SMB 100** (ver figura 3.7).

Figura 3.6: Analizador de espectros.

Figura 3.7: Generador de señal.

El **analizador de espectros** nos servirá para medir la potencia disponible en recepción. De esta manera, al conocer la potencia transmitida y la recibida podremos calcular las pérdidas de propagación entre transmisor y receptor.

Una de las características de este analizador es que muestra los valores máximos que va alcanzando cada punto dentro de la banda de frecuencias: **MKR ---->PICO**. Podremos guardar en un PEN-DRIVE un archivo con los valores del parámetro S21 que luego procesaremos con Matlab y apuntando en una hoja los valores de la potencia recibida para su estudio posterior. Para guardar un archivo, accedemos a **File menú ---> Shift ---> File ---> Save ---> Save Measurement** y para guardar la pantalla, es seguir los mismos pasos y dar **Save Screen as JPEG**

El **generador de señal** se conecta a la antena transmisora. Para realizar un barrido frecuencial primero hay que pulsar: **SETUP ----> RF ---->RF FREQ SWEEP.** Introducimos los valores de frecuencia inicial, frecuencia final y el número de puntos para realizar el barrido. Otra opción sería realizar la transmisión a una única frecuencia. Para ello habilitamos el modo **RF (RF-ON)** y seleccionamos la frecuencia central a la que queremos transmitir.

3.1.5 Analizador de redes

3.1.5.1 Analizador de redes Rohde & Schwarz ZVL

Para medir nuestro enlace radioeléctrico usaremos el analizador de redes **Rohde & Schwarz ZVL 9KHz a 6GHz** disponible en los laboratorios.

Figura 3.8: Analizador de redes Rohde & Schwarz ZVL.

Antes de medir la reflexión de las antenas, parámetro S21, tendremos que realizar una operación de calibración. Para ello conectaremos los cables en los respectivos puertos y a su vez, los uniremos entre sí con un dispositivo THRU (conectado). De esta manera podremos medir la reflexión de nuestras antenas de una manera muy precisa ya que eliminaremos así las pérdidas introducidas por los cables.
Una vez hecha la calibración, comprobaremos que el parámetro S21 vale 0dB en toda la línea de frecuencia.

Pasos a realizar:

1. Encender el equipo sin ningún tipo de conexión en sus puertos.
2. Añadir traza S21: **TRACE ----> ADD TRACE**. Con el botón **FORMAT** indicaremos que las unidades de medida serán en **dB**.
3. Con el botón **CENTER** indicaremos la frecuencia central y con el botón **SPAN** el ancho de banda de trabajo. Otra forma de indicar esta banda de trabajo es con los botones **START** y **STOP** que indicarán la frecuencia de inicio y final respectivamente y la frecuencia central lo ajustará automáticamente el aparato.
4. Con el botón **SWEEP** ----> **NUMBER OF POINTS** indicaremos el número de muestras que queremos en el barrido frecuencial.
5. Para terminar, con el botón **PWR BW** ----> **POWER** indicaremos el valor máximo de potencia permitido por el analizador de redes. Nuestro máximo será 20 dBm.
6. Para la calibración, unimos los cables y las terminaciones de los mismos se conectan a cada puerto del analizador.
7. Para eliminar la atenuación introducida en los cables: **CAL ----> START CAL ----> TWO PORTS P1 P2 ----> FORWARD CAL.** Seleccionamos Connector: **PC 3.5 (f); PC 3.5 (m)** y Calibration Kit: **PC 3.5 Ideal Kit** ---> **Enter.**
8. Para salvar la pantalla: **SETUP --->General Setup ---> More ---> Open Start Menu ---> Control Panel ---> Display ---> Screen Saver**
9. Para salvar datos: **TRACE --->Import/Export Data --->Export Data.**

3.1.5.2 Analizador de redes Agilent Technologies E5063A

Para medir la reflexión de las antenas vamos a utilizar el analizador de **redes Agilent Technologies E5063A** disponible en los laboratorios del grupo Rfcas. Mediremos el parámetro s11 de 6 antenas de frecuencias 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz cada par respectivamente. Una vez realizadas las medidas, obtendremos la banda de trabajo óptima para su transmisión.

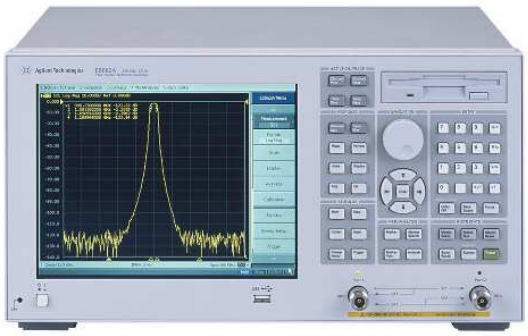


Figura 3.9: Analizador de redes Agilent Technologies E5063A

Los pasos a seguir son:

1. Encender el equipo.
2. Especificar la banda de frecuencia de cada antena con los botones **START** y **STOP**. Se dejará un margen del ±10%. Es decir, si la antena trabaja a 3.3 GHz de frecuencia central especificaremos una banda de 3-3.6 GHz.
3. Calibración. Para eliminar cualquier atenuación de cable y adaptador SMA deberemos realizar el proceso de calibración: **CAL ---> Calibrate---> Open---> Done.** Observaremos que la traza s11 estará a cero. Se

realizará la calibración cada vez que se cambie de banda de frecuencia o simplemente cuando se observe que el parámetro s11 no es cero.

4. Se añadirá un **Maker** y con la rueda nos iremos moviendo por la figura para ver en qué frecuencias la señal está a -10dB como máximo. Nuestro ancho de banda será aquel donde la señal quede igual o por debajo de -10dB.
5. Una vez obtenida la banda de trabajo, guardaremos la pantalla**: System ---> Dump Screen Image ---> Save**
6. Para guardar datos: **Channel next or Channel Prev --->Trace Next or Trace Prev --->Save/Recall ---> Save Trace Data ---> Save**

Aplicando los pasos anteriores se determinará la banda de trabajo en la que funcionarán nuestras antenas.

El ancho de banda óptimo para el par de antenas de 2.4 GHz es:

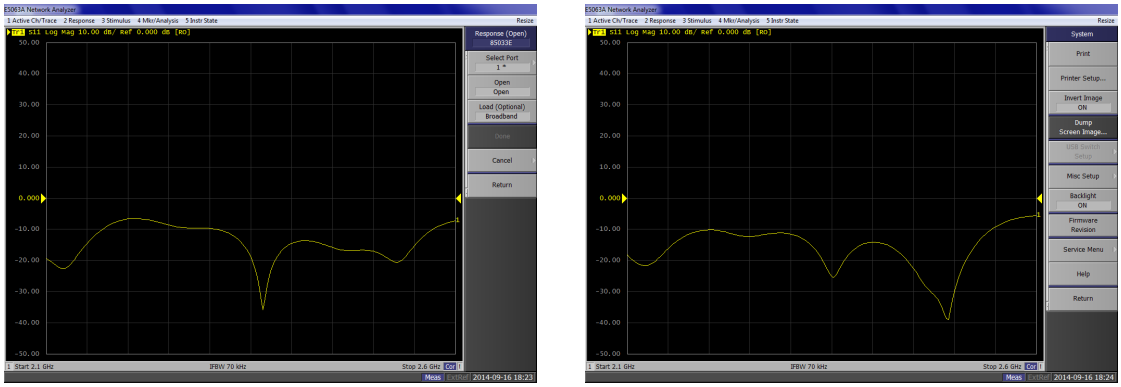


Figura 3.10: Parámetro S11 de la antena 1 y 2 de la banda de 2.4 GHz respectivamente

Tabla 3-2: Resumen de bandas de trabajo para las antenas de 2.4 GHz

Antenas 2.4 GHz	Ancho de banda	Banda de trabajo
Antena 1	2.29-2.57 GHz	2.29 – 2.54 GHz
Antena 2	2.04-2.54 GHz	

El ancho de banda óptimo para el par de antenas de 3.3 GHz es:

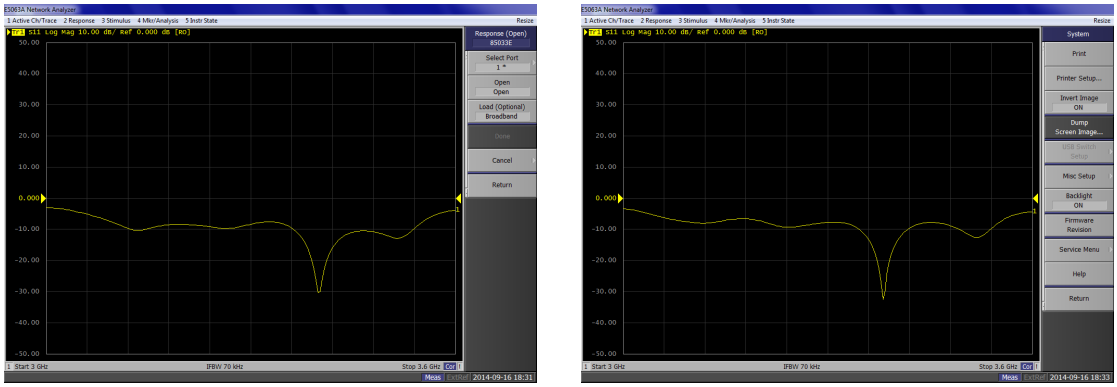


Figura 3.11: Parámetro S11 de la antena 1 y 2 de la banda de 3.3 GHz respectivamente

En la figura de la antena 1 se puede observar que hay un tramo en el que la señal está a -7 dB. El error en ese punto es demasiado alto como para obviarlo, comprobémoslo:

$$10^{\frac{-7}{10}} = 0.2; 1 + 0.2 = 1.2; 10\log_{10} 1.2 = 0.8$$

lo correcto sería:

$$10^{\frac{-10}{10}} = 0.1; 1 + 0.1 = 1.1; 10\log_{10} 1.1 = 0.4$$

por tanto, se puede concluir que nuestra antena 1 trabaja bien en las bandas: 3.11-3.28 y 3.37-3.54 GHz

En la figura de la antena 2 ocurre lo mismo pero se obviará ya que no afectará a nuestras medidas. Por tanto se puede concluir que nuestra antena 2 trabaja bien en la banda: 3.23 – 3.54 GHz. Superponiendo los anchos de banda de las dos antenas, se obtiene una banda de trabajo de: 3.2-3.5 GHz.

Tabla 3-3: Resumen de bandas de trabajo para las antenas de 2.4 GHz

Antenas 3.3 GHz	Ancho de banda	Banda de trabajo
Antena 1	3.11-3.28 y 3.37-3.54 GHz	3.2-3.5 GHz
Antena 2	3.23 – 3.54 GHz	

El ancho de banda óptimo para el par de antenas de 5.5 GHz es:

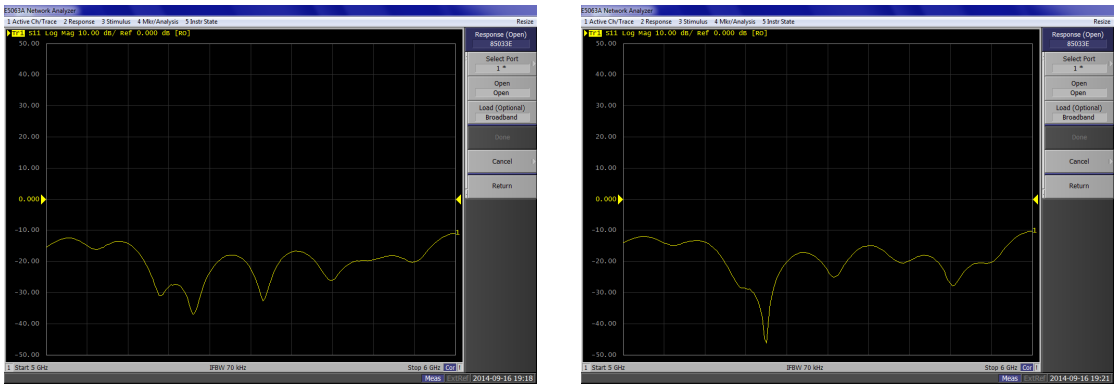


Figura 3.12: Parámetro S11 de la antena 1 y 2 de la banda de 3.3 GHz respectivamente

Se puede apreciar en ambas figuras que en todo su tramo la señal está por debajo de los -10dB, así que se puede concluir que nuestra banda de trabajo es 5-6 GHz.

RESUMEN:

-**Antena 2.4 GHz:** Ancho de banda 100 MHz. Banda de trabajo: 2.3-2.5 GHz.

-**Antena 3.3 GHz:** Ancho de banda 200 MHz. Banda de trabajo: 3.2-3.5 GHz.

-**Antena 5.4 GHz:** Ancho de banda 500 MHz. Banda de trabajo: 5-6 GHz.

En la práctica, se ha reducido la banda de trabajo para las antenas de 2.4 GHz a 80 MHz y para las antenas de 5.5 GHz a 320 MHz para que coincida con el ancho de banda de WLAN; para las antenas de 3.3 GHz se ha mantenido el ancho de banda teórico ya que coincide con la banda de WiMax.

3.1.6 Medidor láser

Para obtener una mayor precisión en la medida de la distancia entre las antenas y para orientar a las mismas para que estén enfrentadas, se ha usado un medidor láser, Bosch DLE40, disponible en el laboratorio Rfcas.

Figura 3.13: Medidor láser Bosch

Las características de este medidor son las siguientes:

-Diodo de láser: 635nm < 1mW
-Rango de medición interior: 0.05 -40m
-Precisión de medición: ±1.5 mm

A la hora de orientar la antena, se toma como referencia la pared que tiene enfrentada o posicionando la otra antena a una distancia mayor de la estudiada. Después se coloca la otra antena en posición y se orienta la segunda antena haciendo que el láser apunte justo al centro de la primera antena. Después se coloca la otra antena en posición y se orienta la segunda antena haciendo que el láser apunte justo al centro de la primera antena. También se comprueba que en la primera antena, el láser apunte justo al centro de la segunda. Así se mantiene durante las medidas una orientación precisa para que no sea un factor influyente.

3.1.7 Otros recursos utilizados

Se ha utilizado también otros recursos que no necesitan un análisis específico por lo que únicamente se procederá a listarlos:

-Memoria USB para la extracción de datos del analizador de redes.
-Ordenador para el procesamiento de datos y escritura de la memoria: Matlab y Word Office.
-Un alargador de 50 metros para la red eléctrica.

4

Campaña de medidas

4 Campaña de medidas

A continuación se presentarán los tres escenarios principales. El resto de escenarios bajo estudio, se encuentran representados en el Anexo A.

4.1 Escenario 1: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C

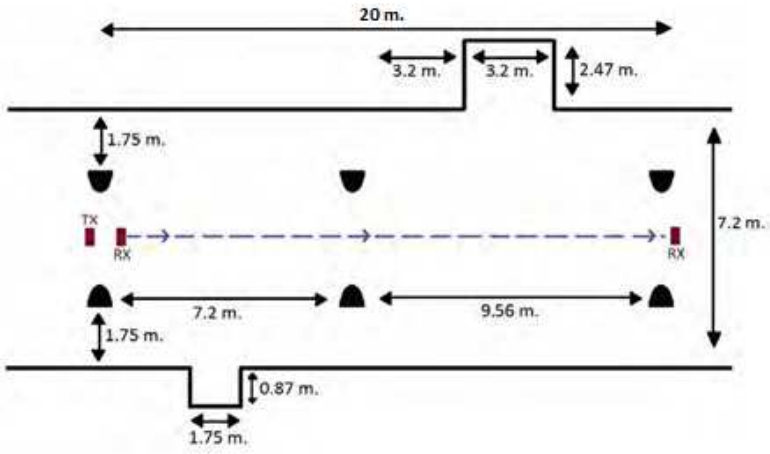


Figura 4.1: Esquema Pasillo central, Planta Baja, Edificio C

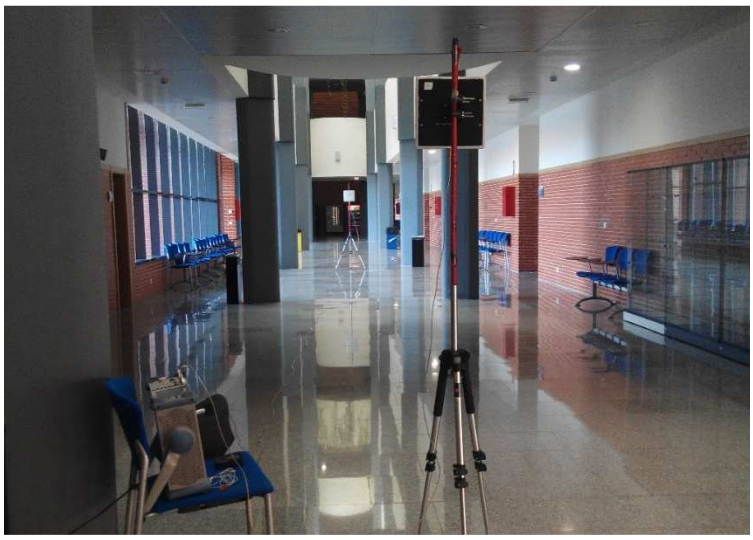


Figura 4.2: Ejemplo de la toma de medidas

4.1.1 Banda de 2.4 GHz

Entorno: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 2.4 GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a tres alturas diferentes: 1m, 1.4m y 1.8m.

Distancia: La antena emisora se mantendrá fija mientras que la antena receptora se colocará a una distancia de un metro de la emisora y luego se irá variando su posición 0.25m hasta llegar a los 20m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 2.36 GHz a 2.44 GHz. Ancho de banda de 80 MHz.

La figura (4.3) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [2.36-2.44] GHz a una altura de 1 metro, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

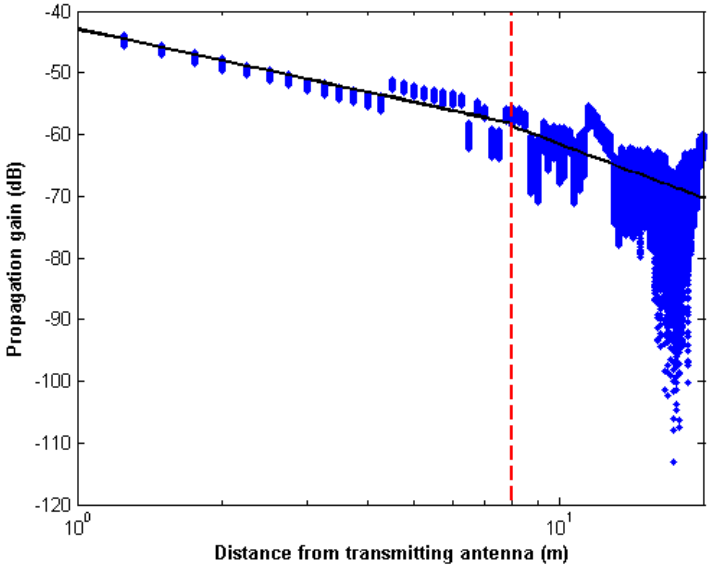


Figura 4.3: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

La aproximación del valor medio de las pérdidas de propagación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{L_p(dB) = \begin{cases} 42.9084 + 17.011\log_{10} d & d \leq 8 \\ 32.2298 + 29.343\log_{10}\left(\frac{d}{8}\right) & 8 < d \leq d_{max} \end{cases}} \tag{4.1}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos: n_1=1.7011 y n2=2.9343. El exponente n_1 es inferior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 supera el exponente de propagación en el espacio libre.

Hasta una distancia de 8 metros se modelará como espacio libre mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

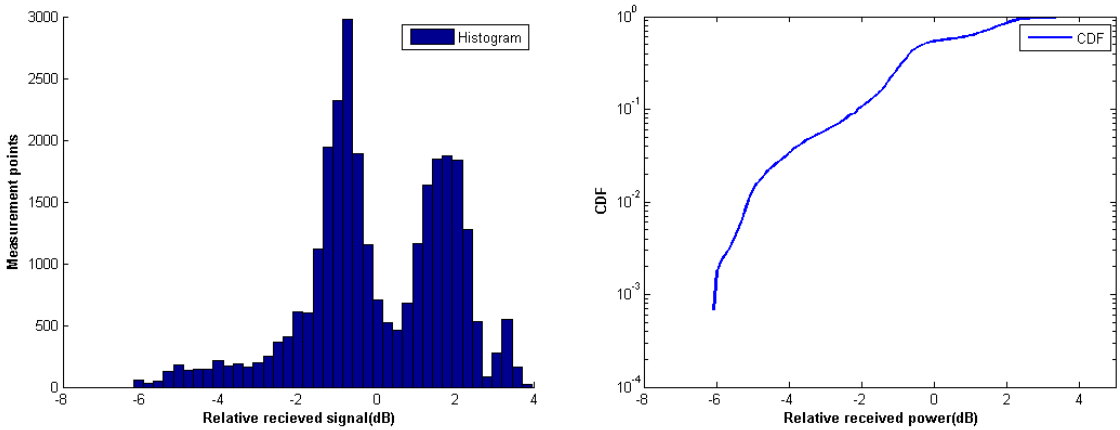


Figura 4.4: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

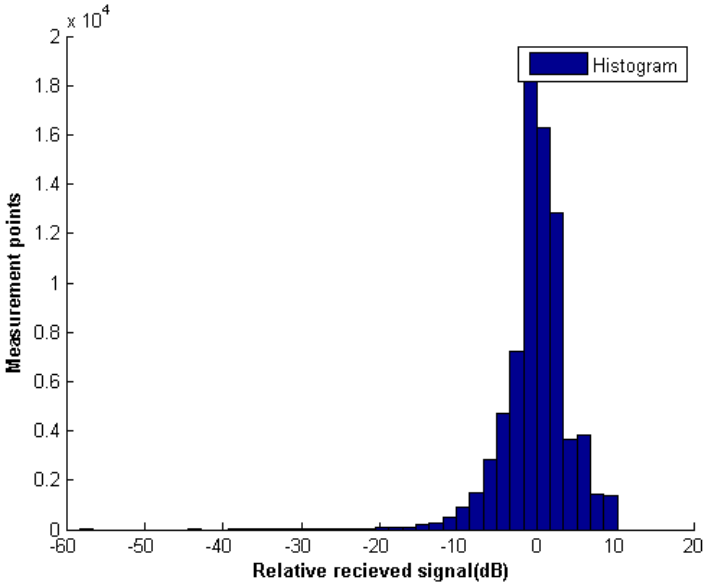


Figura 4.5: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

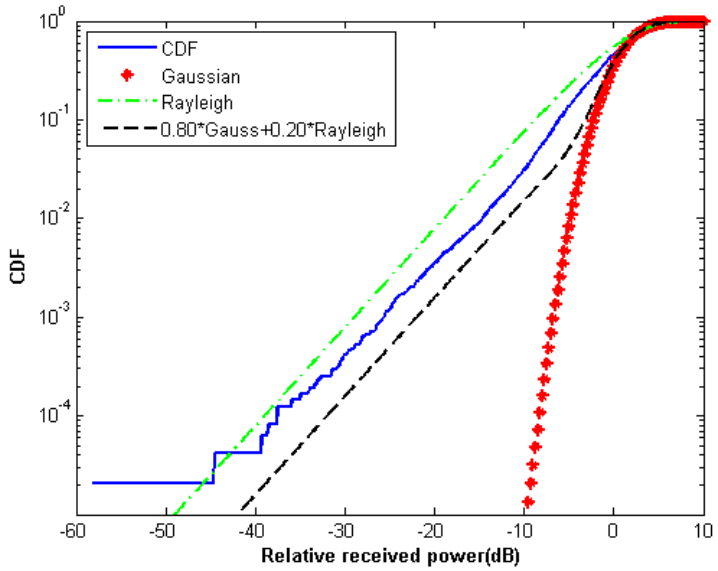


Figura 4.6: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (80%, μ=1, σ=2.5) y Rayleigh (20%).

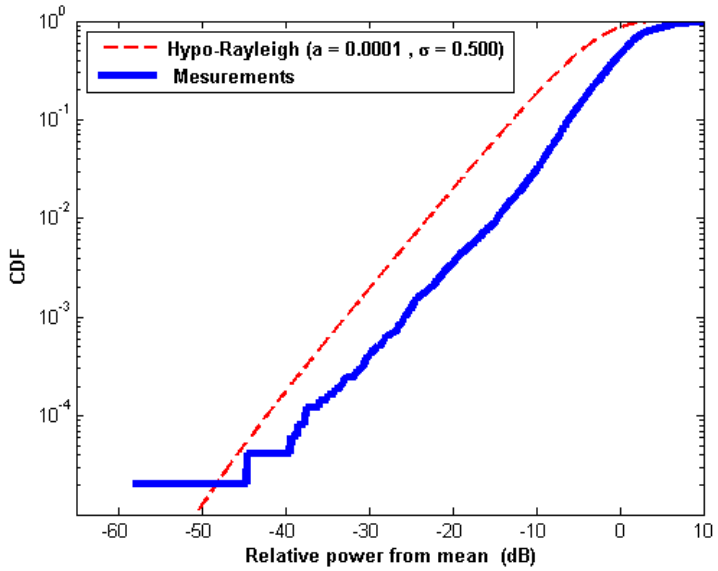


Figura 4.7: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución casi Hyper-Rayleigh (a=0.0001, σ=0.500).

La figura (4.8) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [2.36-2.44] GHz a una altura de 1.4m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

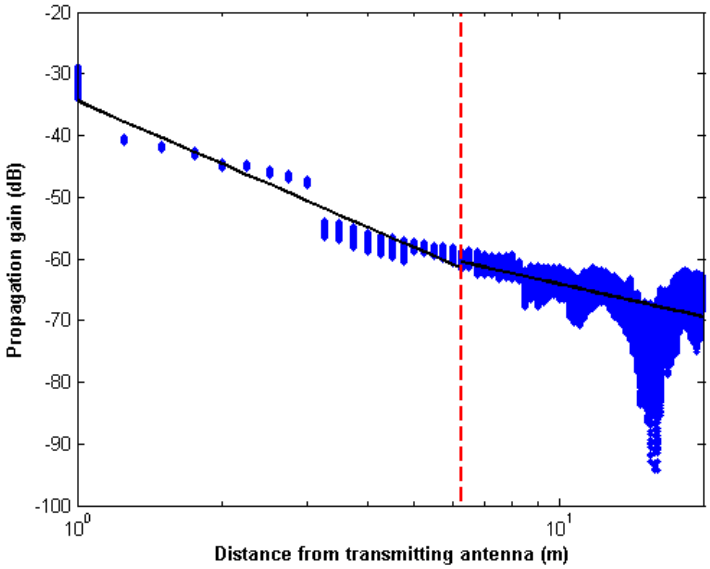


Figura 4.8: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 34.3728 + 34.079\log_{10} d & d \leq 6.25 \\ 46.3834 + 17.732\log_{10}\left(\frac{d}{6.25}\right) & 6.25 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (4.2)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos: n_1=3.4079 y n2=1.7732. El exponente n_1 es superior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 no supera el exponente de propagación.

Hasta una distancia de 6.25 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

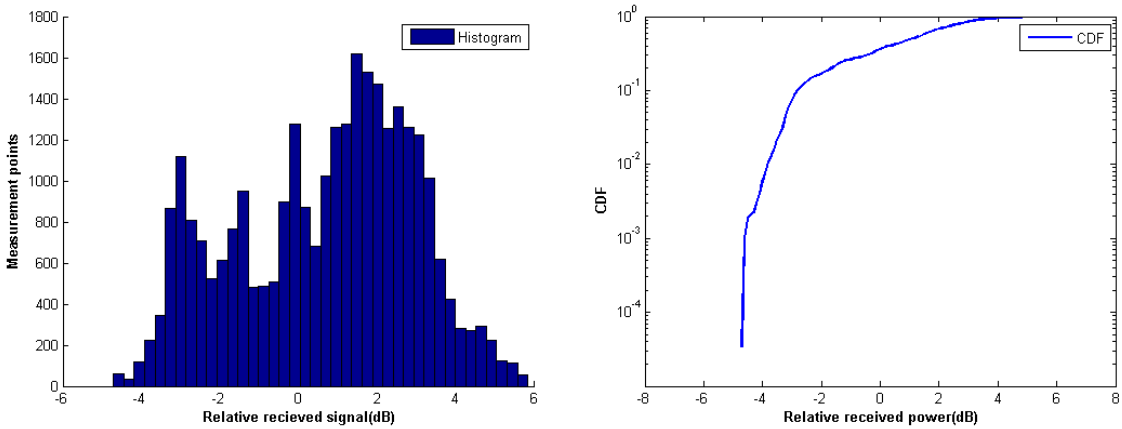


Figura 4.9: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

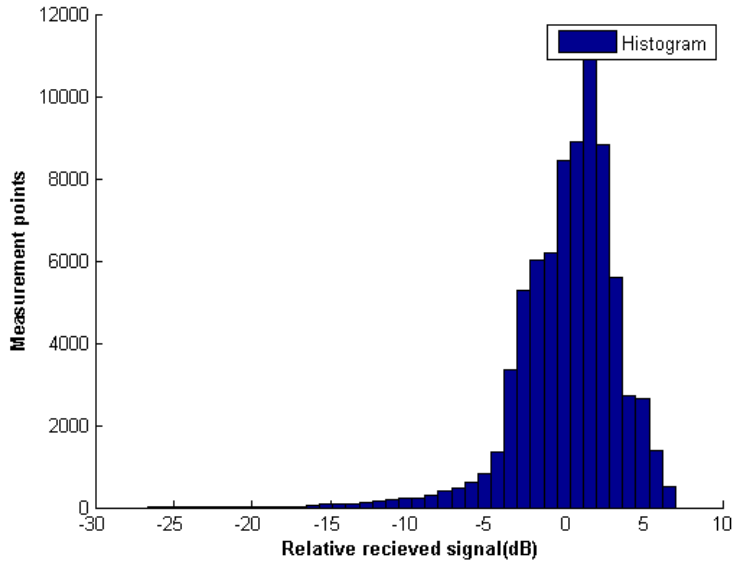


Figura 4.10: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

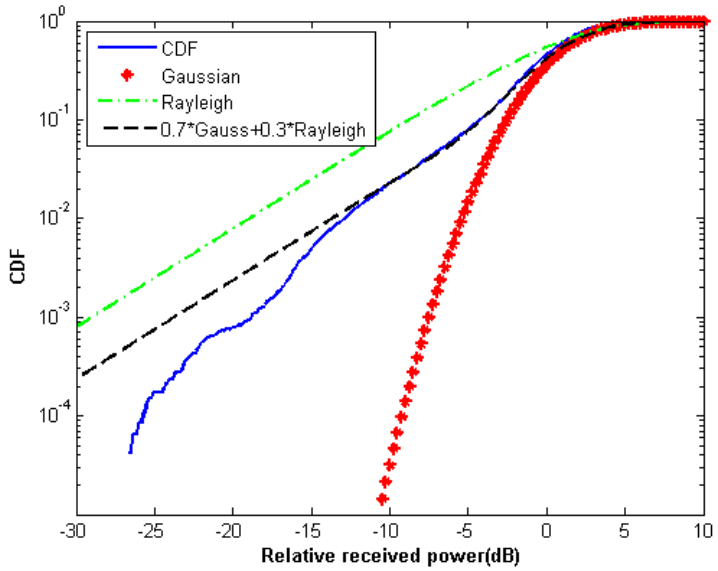


Figura 4.11: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (70%, μ=1, σ=2.75) y Rayleigh (30%).

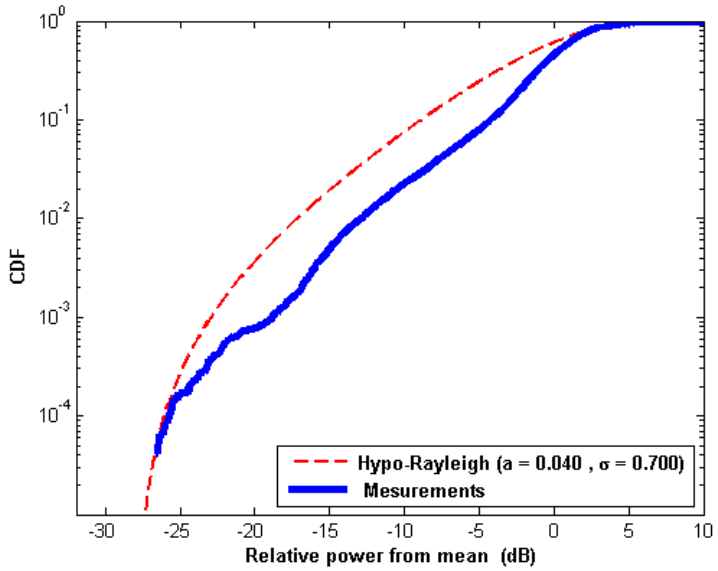


Figura 4.12: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.040, σ=0.700).

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [2.36-2.44] GHz a una altura de 1.8m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

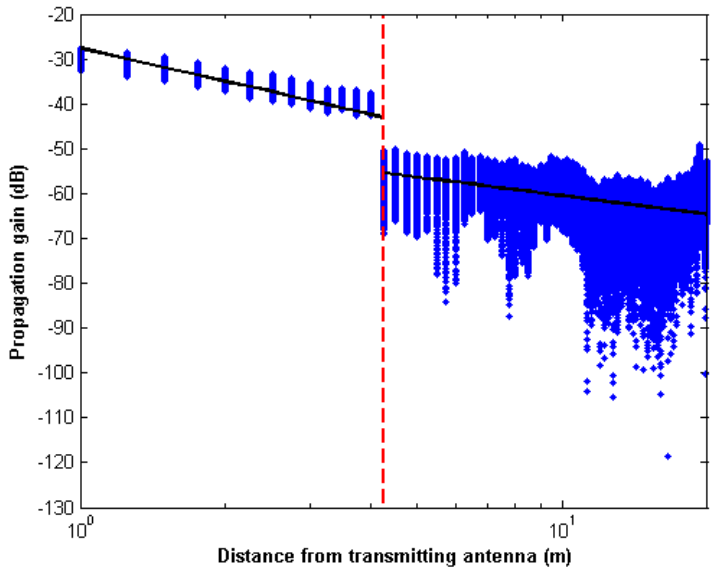


Figura 4.13: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 27.5949 + 24.529\log_{10} d & d \leq 4.25 \\ 46.7436 + 13.778\log_{10}\left(\frac{d}{4.25}\right) & 4.25 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (4.3)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=2.4529 y n2=1.3778. El exponente n_1 es superior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 no supera el exponente de propagación.

Hasta una distancia de 4.25 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

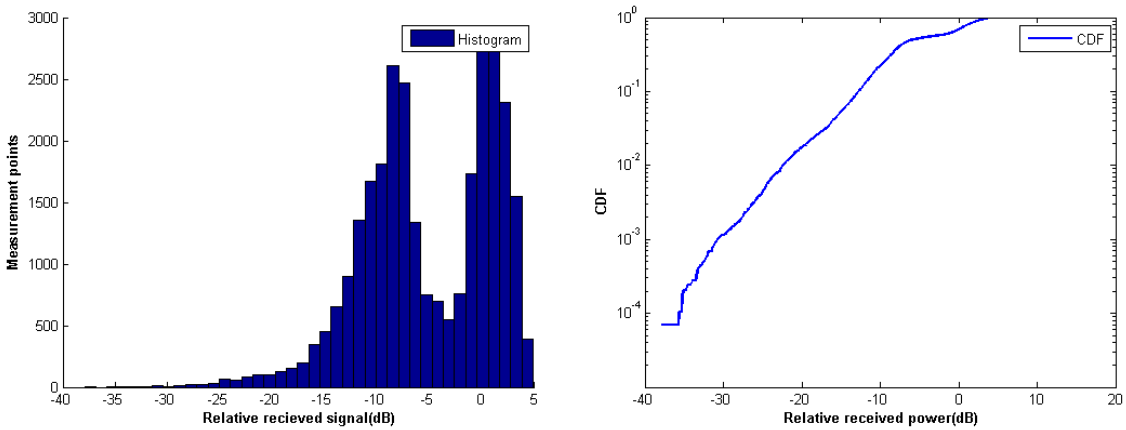


Figura 4.14: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

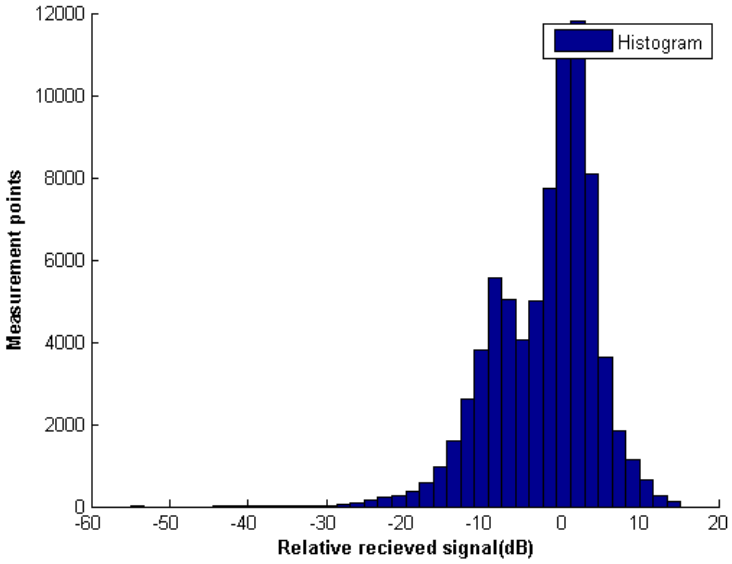


Figura 4.15: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

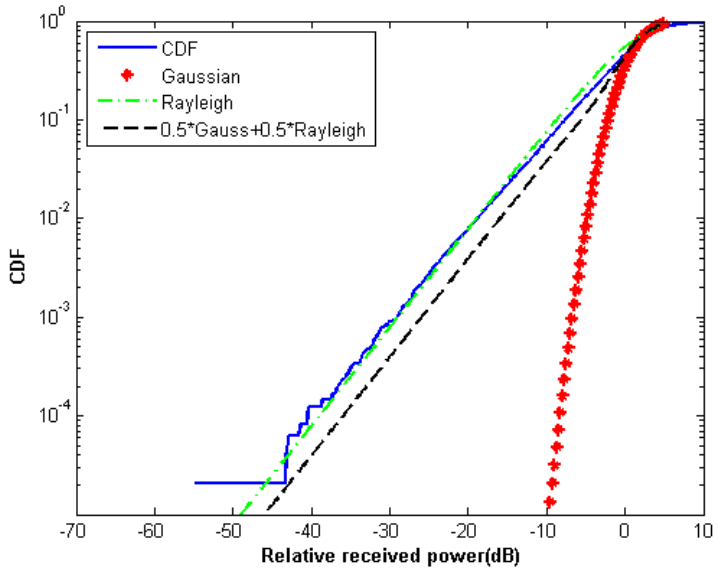


Figura 4.16: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (50%, μ=1, σ=2.5) y Rayleigh (50%). En los últimos metros del escenario se observa Hyper-Rayleigh.

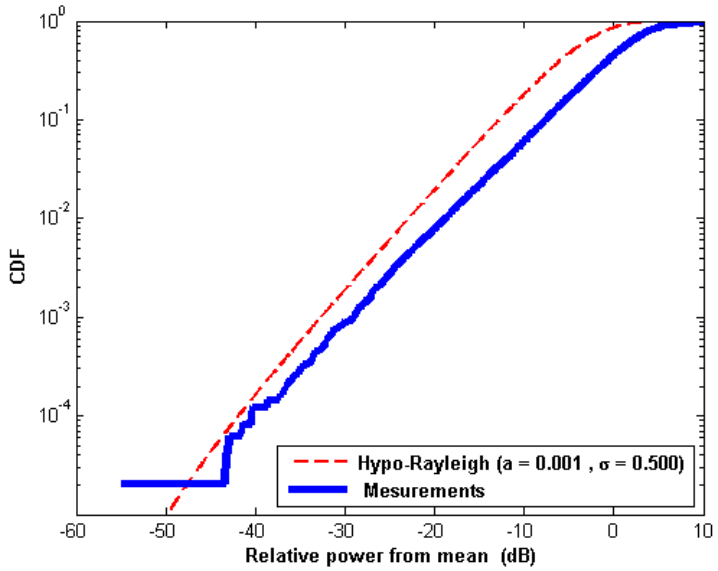


Figura 4.17: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.001, σ=0.500).

4.1.2 Banda de 3.3 GHz

Entorno: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 3.3GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a tres alturas diferentes: 1m, 1.4m y 1.8m.

Distancia: La antena emisora se quedará fija mientras que la antena receptora se colocará a una distancia de un metro de la emisora y luego se irá variando su posición 0.25m hasta llegar a los 20m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 3.2 GHz a 3.4 GHz. Ancho de banda de 200 MHz.

La figura (4.18) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [3.2-3.4] GHz a una altura de 1m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

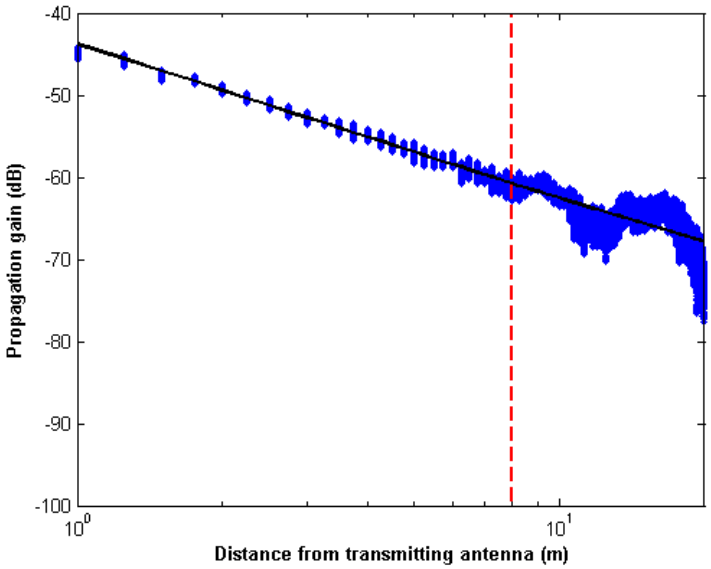


Figura 4.18: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB)\begin{cases} 43.7513 + 18.860\log_{10} d \;\; d \leq 8 \\ 44.7803 + 17.753\log_{10}\left(\frac{d}{8}\right) \;\; 8 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{4.4}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.886 y n_2=1.7753. Tanto el exponente n_1 como n_2 es inferior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 8m el escenario se modelará como espacio libre mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

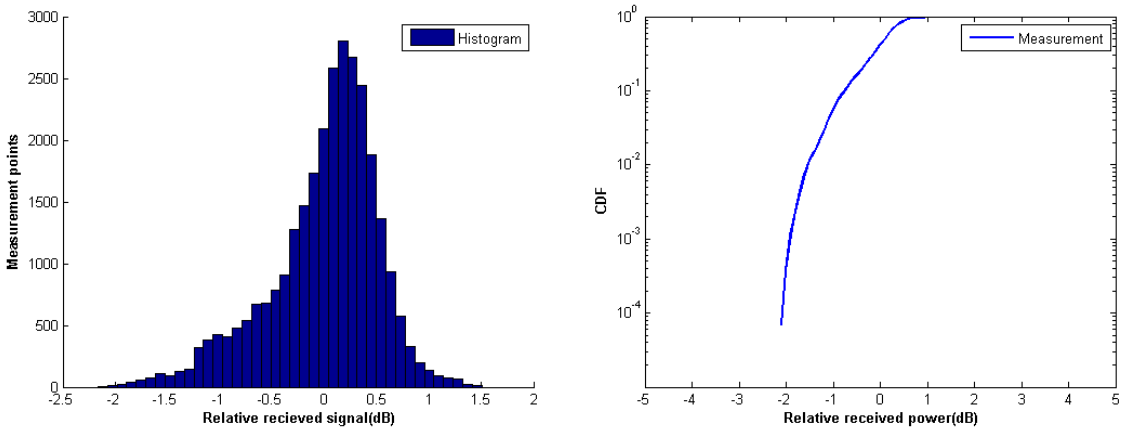


Figura 4.19: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

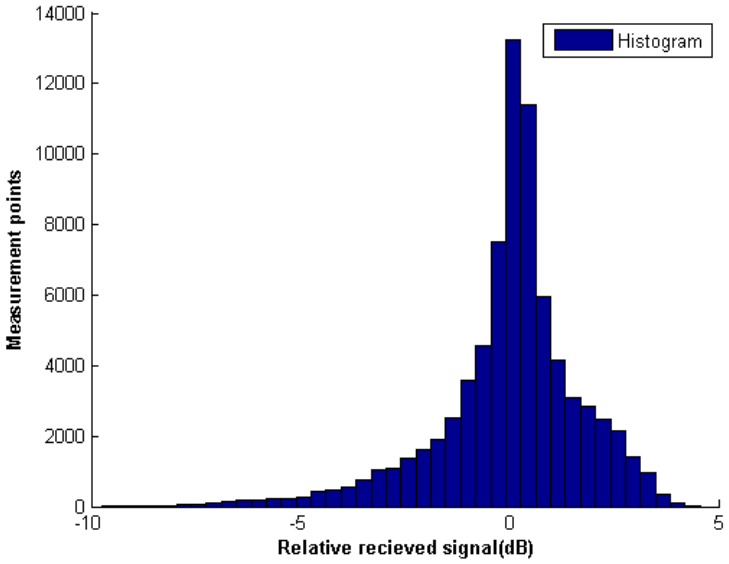


Figura 4.20: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

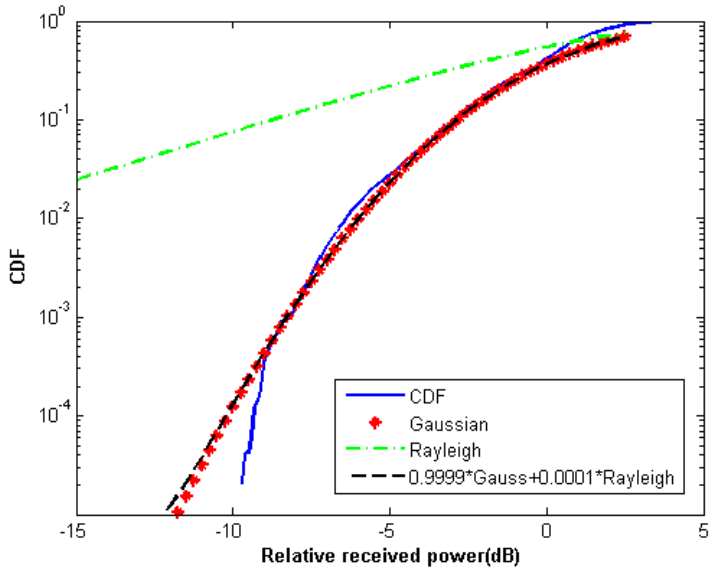


Figura 4.21: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (99.99%, μ=1, σ=3) y Rayleigh (0.01%).

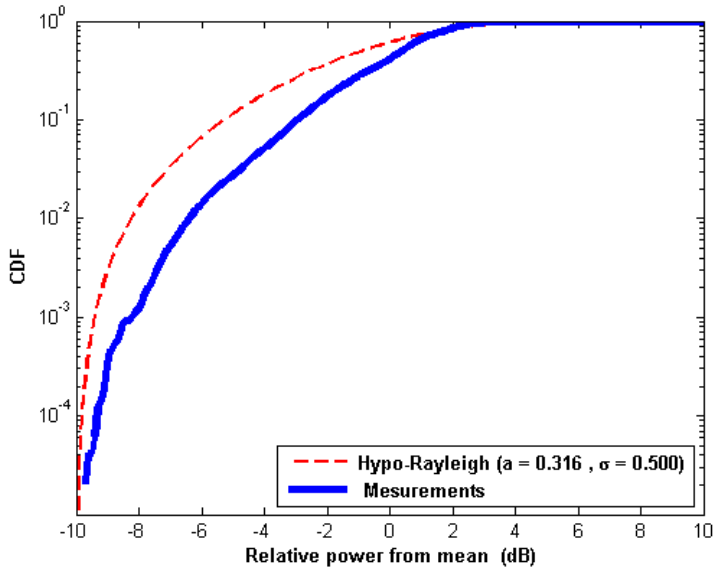


Figura 4.22: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.316, σ=0.500).

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [3.2-3.4] GHz a una altura de 1.4m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

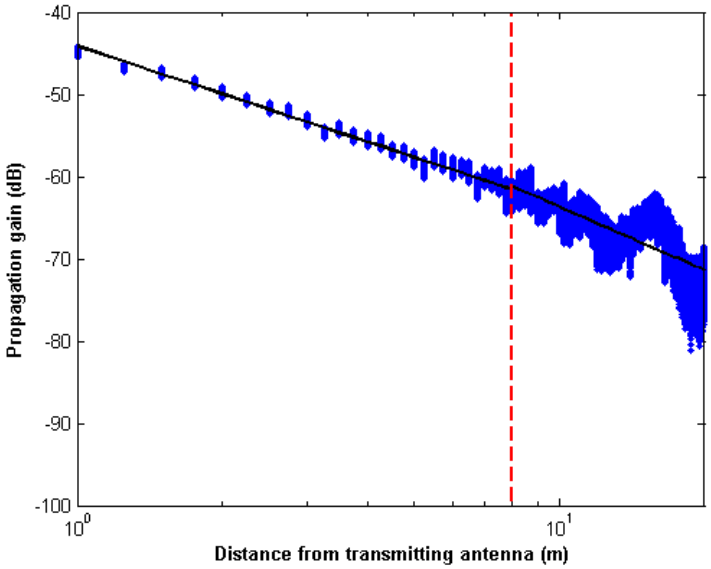


Figura 4.23: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 44.1595 + 19.32\log_{10} d & d \leq 8 \\ 38.0576 + 25.625\log_{10}\left(\frac{d}{8}\right) & 8 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (4.5)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.932 y n_2=2.5625. . El exponente n_1 es inferior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 supera el exponente de propagación.

Hasta una distancia de 8 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

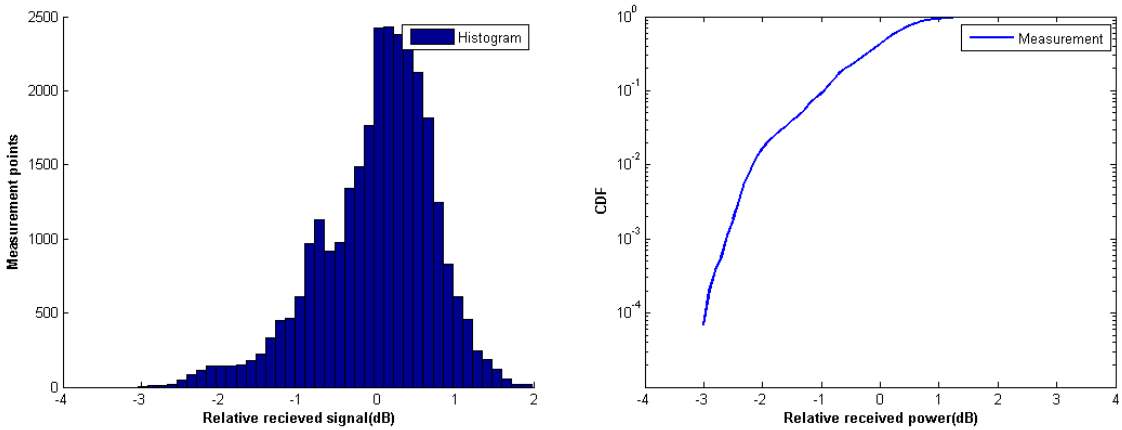


Figura 4.24: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

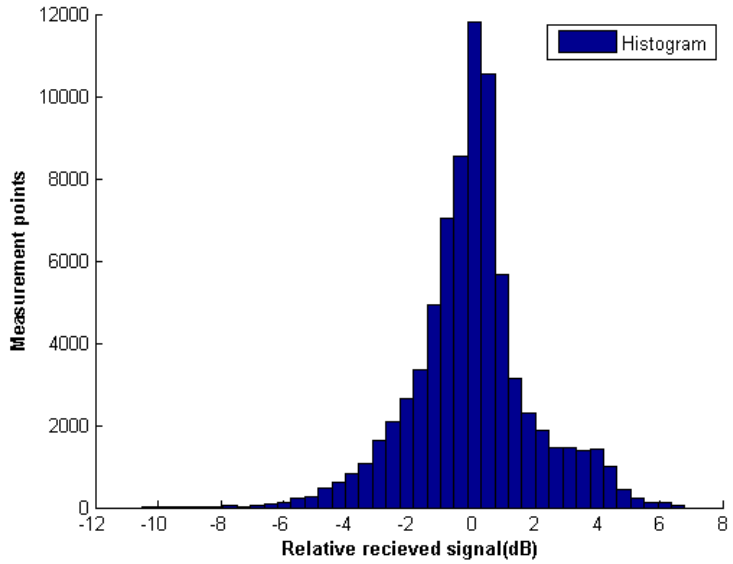


Figura 4.25: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

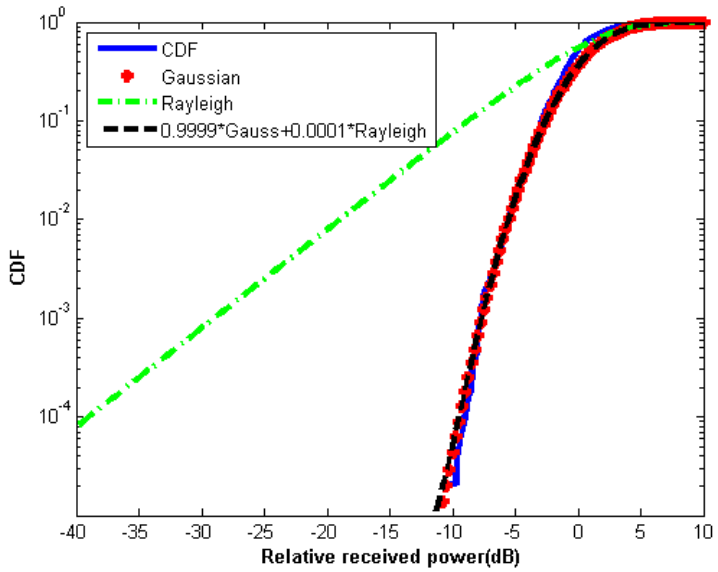


Figura 4.26: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (99.99%, μ=1, σ=2.8) y Rayleigh (0.01%).

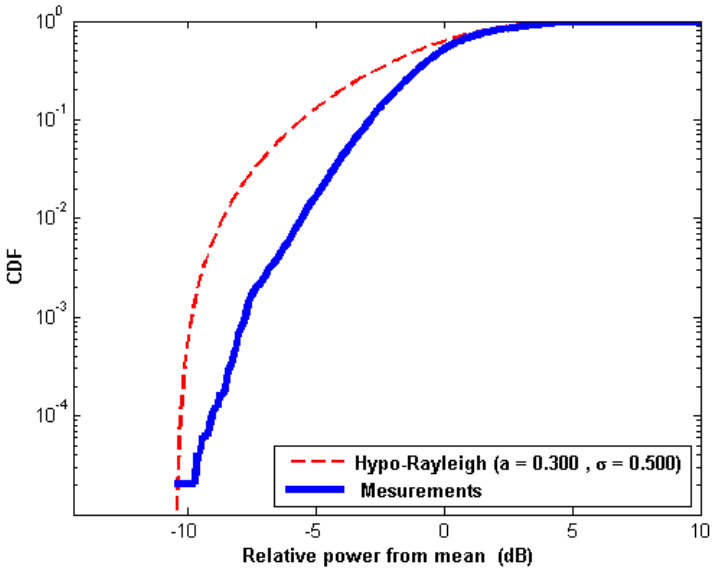


Figura 4.27: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.300, σ=0.500).

La figura (4.28) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [3.2-3.4] GHz a una altura de 1.8m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

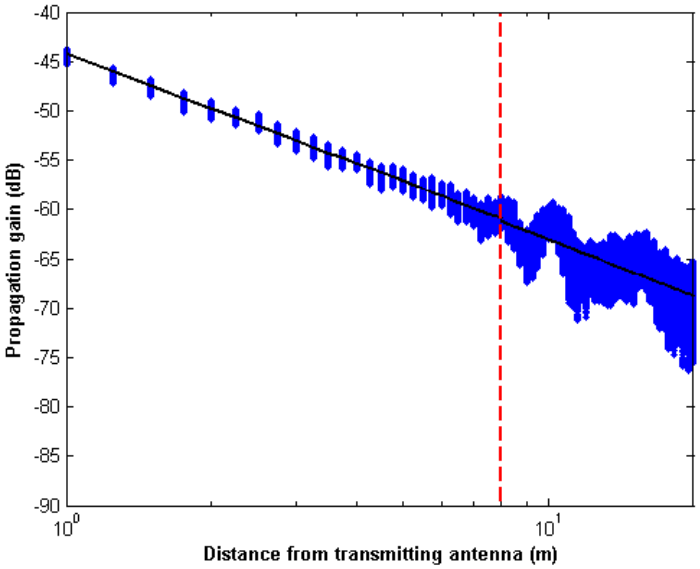


Figura 4.28: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 44.2042 + 18.515\log_{10} d \quad d \leq 8 \\ 44.0748 + 18.984\log_{10}\left(\frac{d}{8}\right) \quad 8 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{4.6}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.8515 y n2=1.8984. Tanto el exponente n_1 como n_2 es inferior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 8 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

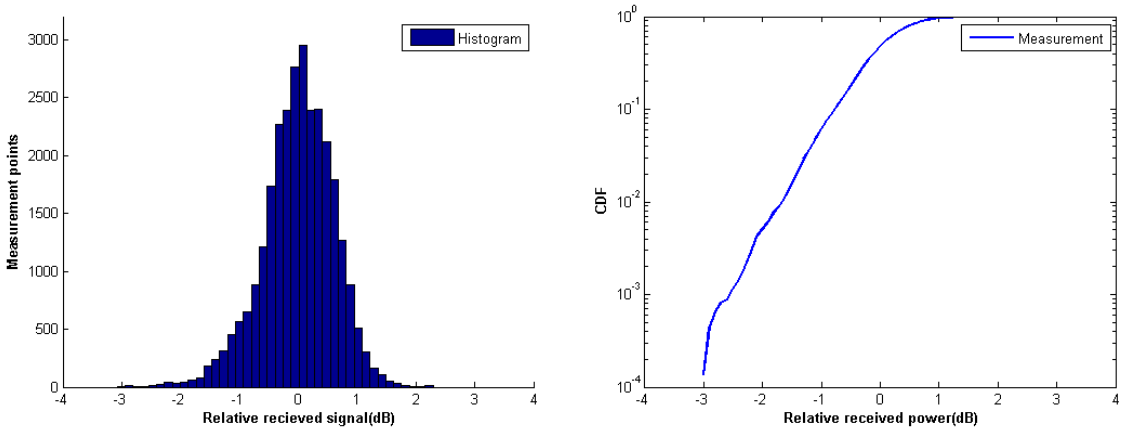


Figura 4.29: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

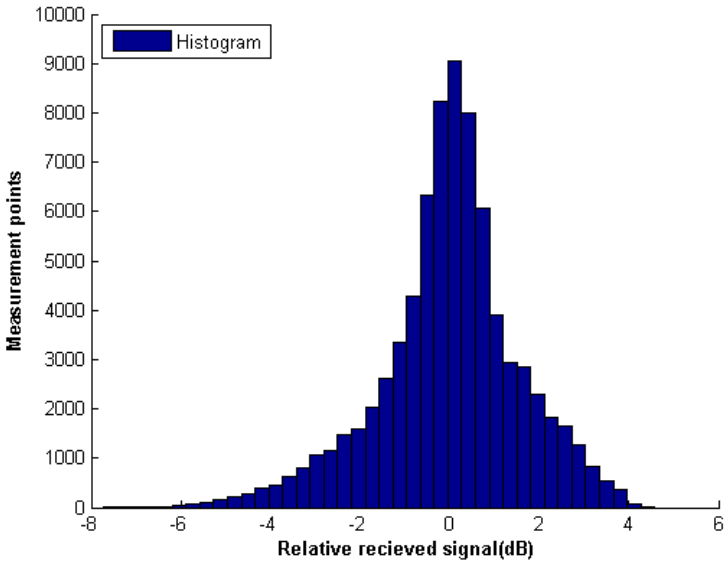


Figura 4.30: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

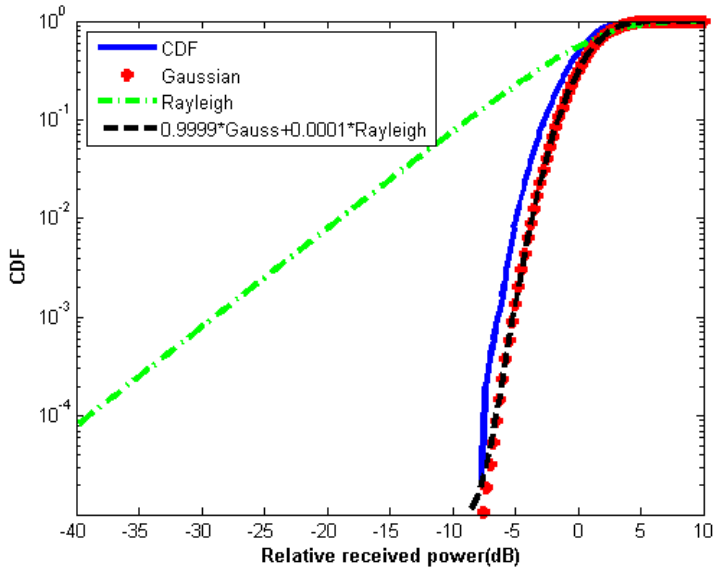


Figura 4.31: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (99.99%, μ=1, σ=2) y Rayleigh (0.01%).

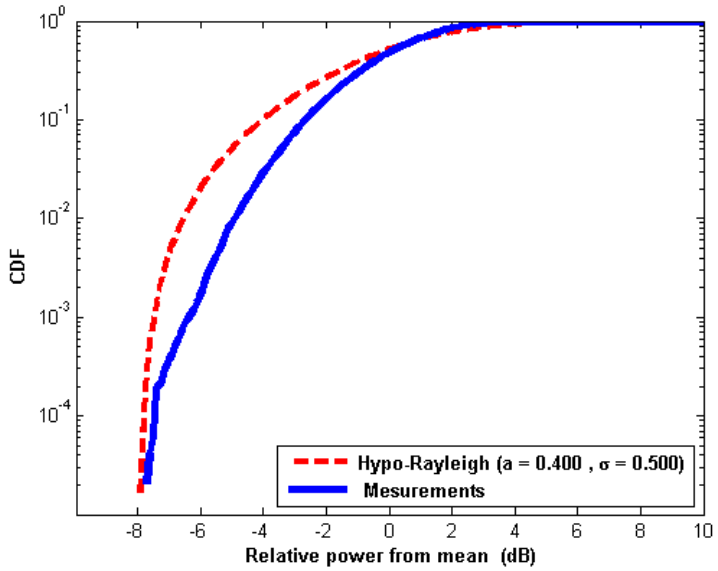


Figura 4.32: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.400, σ=0.500).

4.1.3 Banda de 5.5 GHz.

Entorno: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 5.5GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a tres alturas diferentes: 1m, 1.4m y 1.8m.

Distancia: La antena emisora se quedará fija mientras que la antena receptora se colocará a una distancia de un metro de la emisora y luego se irá variando su posición 0.25m hasta llegar a los 20m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 5.34 GHz a 5.66 GHz. Ancho de banda de 320 MHz.

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [5.34-5.66] GHz a una altura de 1m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

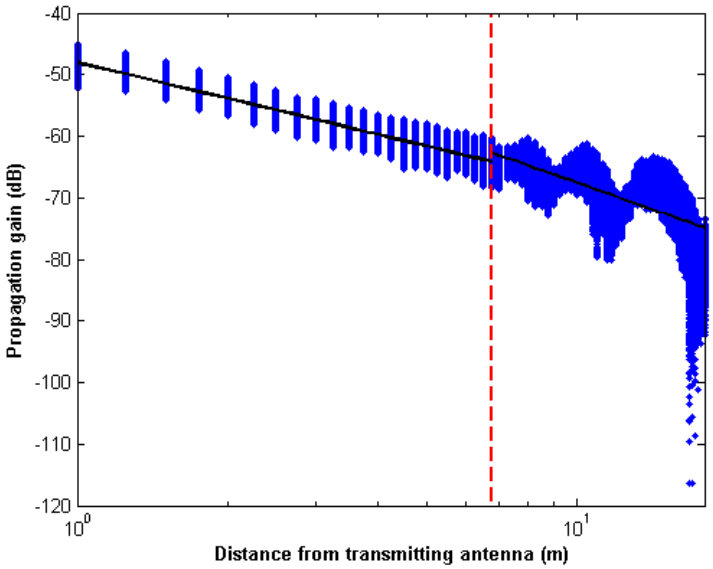


Figura 4.33: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB)\begin{cases} 48.0489 + 19.433\log_{10} d \;\; d \leq 6.75 \\ 38.8698 + 28.688\log_{10}\left(\frac{d}{6.75}\right) \;\; 6.75 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{4.7}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.9433 y n2=2.8688. El exponente n_1 es inferior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 supera el exponente de propagación.

Hasta una distancia de 6.75 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

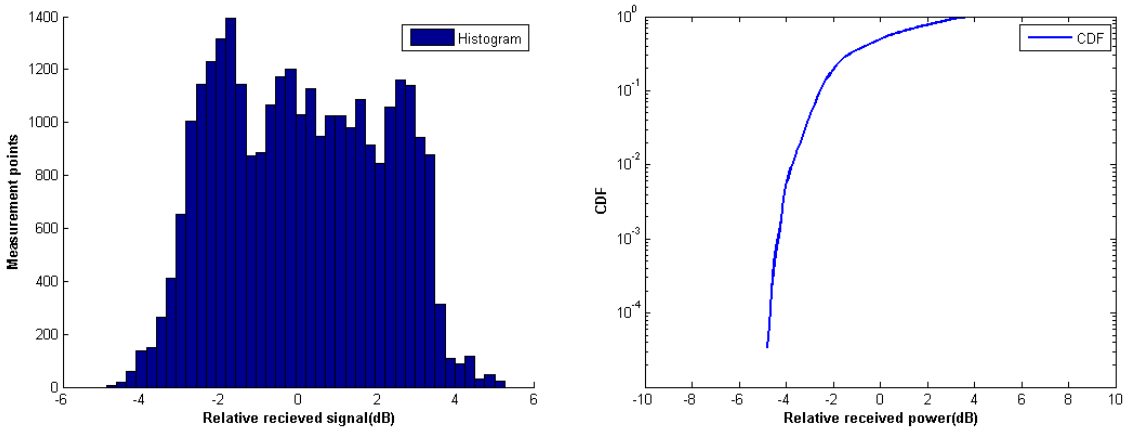


Figura 4.34: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

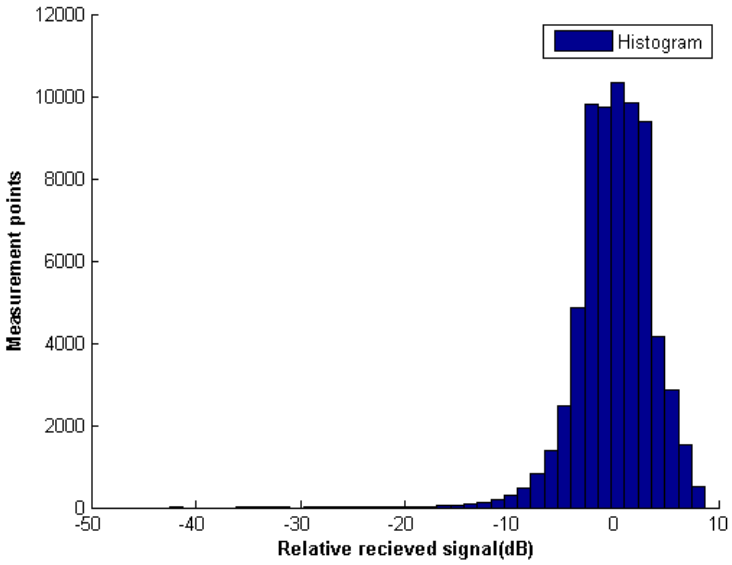


Figura 4.35: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

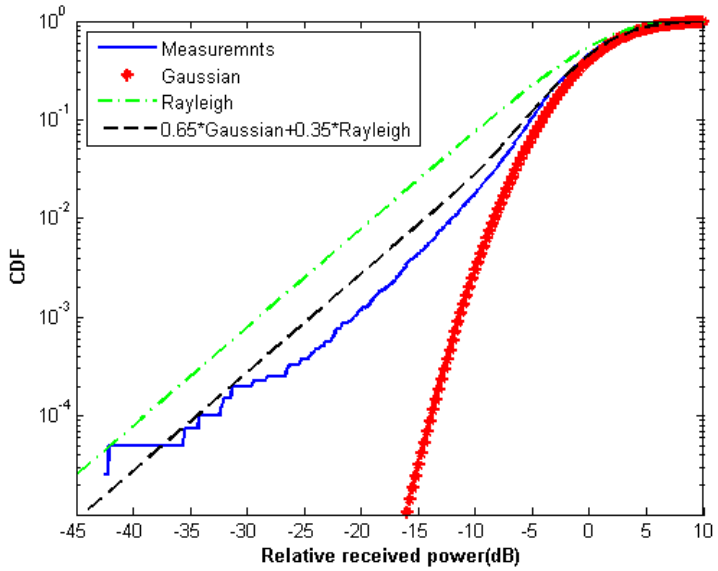


Figura 4.36: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (65%, μ=1, σ=2) y Rayleigh (35%).

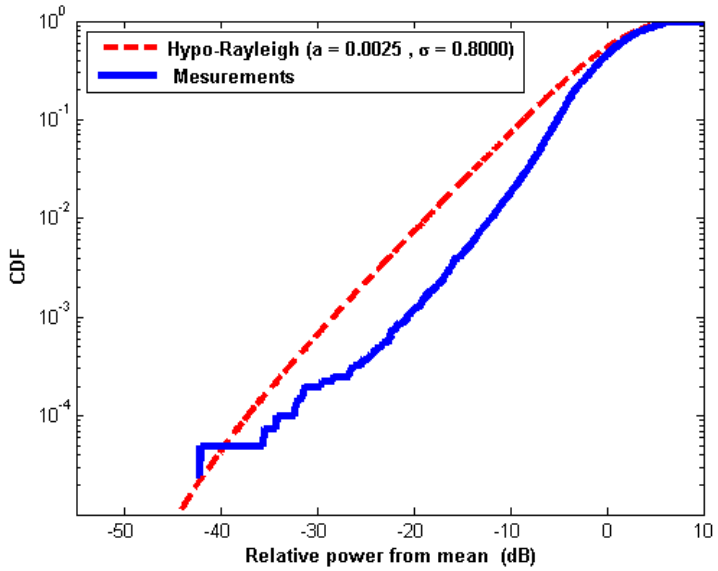


Figura 4.37: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.0025, σ=0.800).

La figura (4.38) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [5.34-5.66] GHz a una altura de 1.4m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

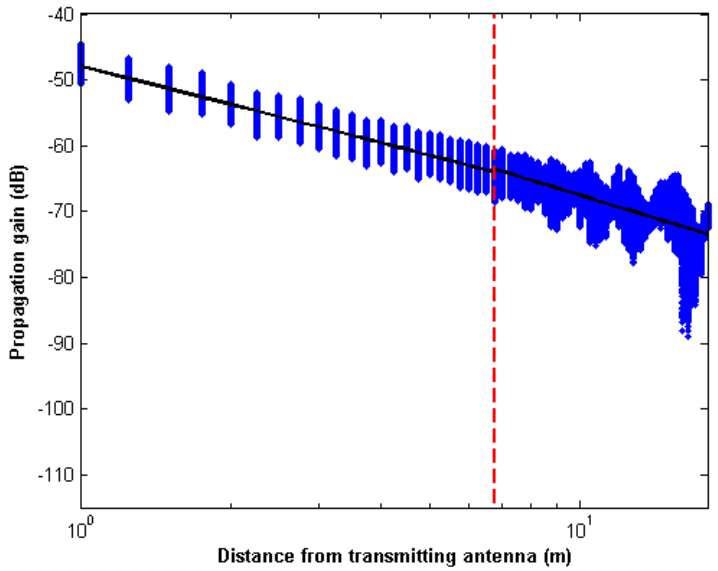


Figura 4.38: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 47.8941 + 19.459\log_{10} d & d \leq 6.75 \\ 44.3390 + 23.224\log_{10}\left(\frac{d}{6.75}\right) & 6.75 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (4.8)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.9459 y n2=2.3224. El exponente n_1 es inferior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 supera el exponente de propagación.

Hasta una distancia de 6.75 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

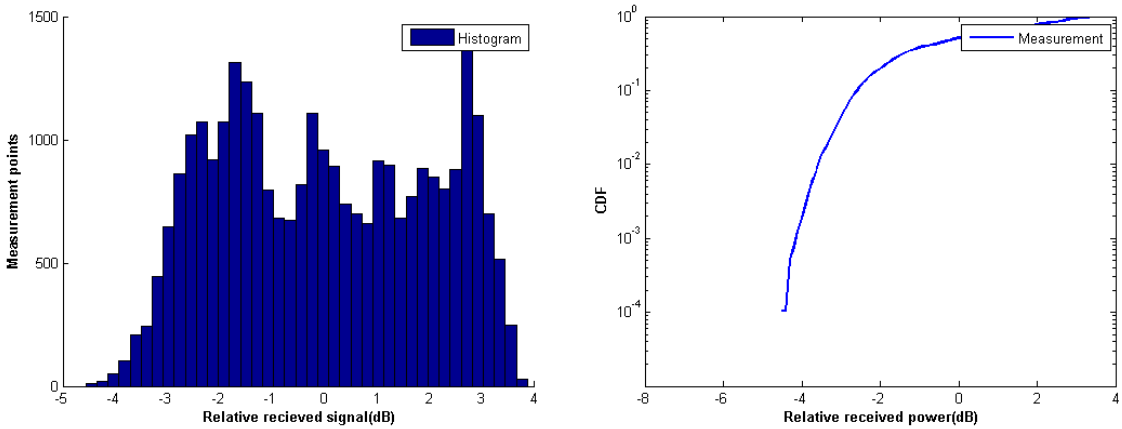


Figura 4.39: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

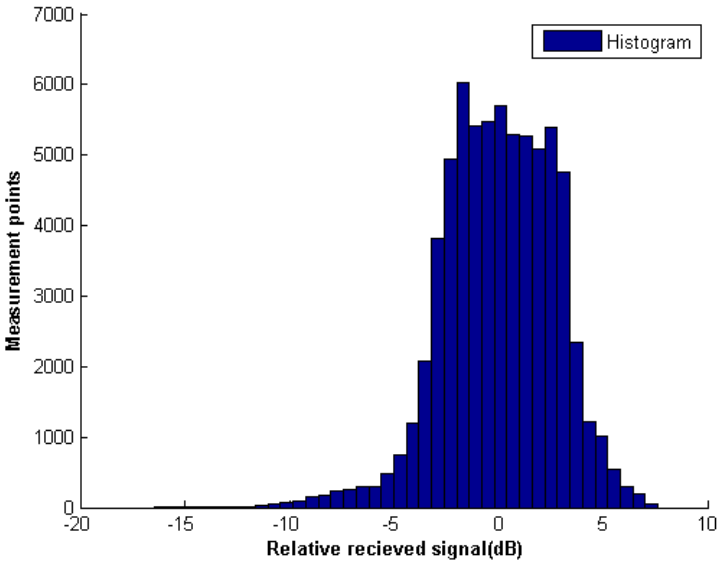


Figura 4.40: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

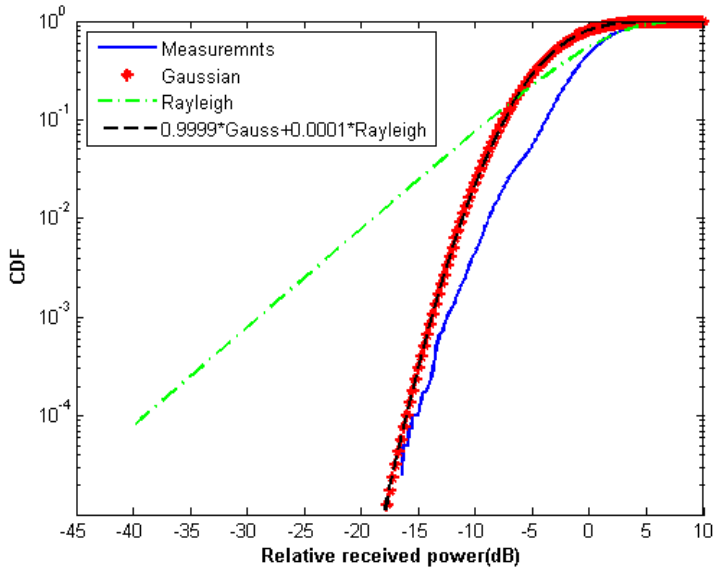


Figura 4.41: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (99.99%, μ=-3, σ=3.5) y Rayleigh (0.01%).

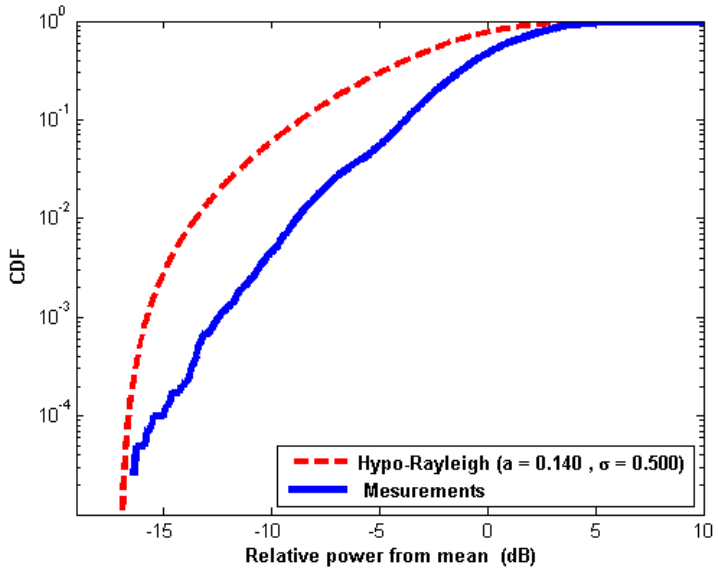


Figura 4.42: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.140, σ=0.500).

La figura (4.43) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [5.34-5.66] GHz a una altura de 1.8m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

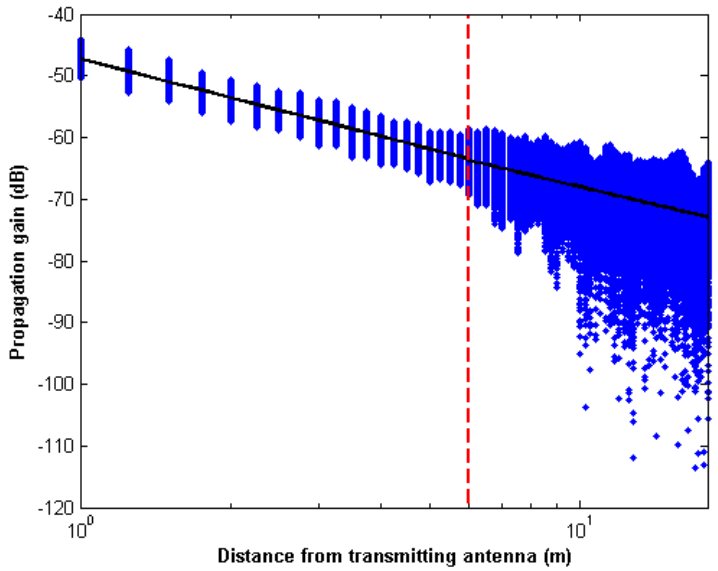


Figura 4.43: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 47.3259 + 20.824\log_{10} d & d \leq 6 \\ 48.7423 + 19.293\log_{10}\left(\frac{d}{6}\right) & 6 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (4.9)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=2.0824 y n2=1.9293. El exponente n_1 es ligeramente superior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 no supera el exponente de propagación.

Hasta una distancia de 6 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

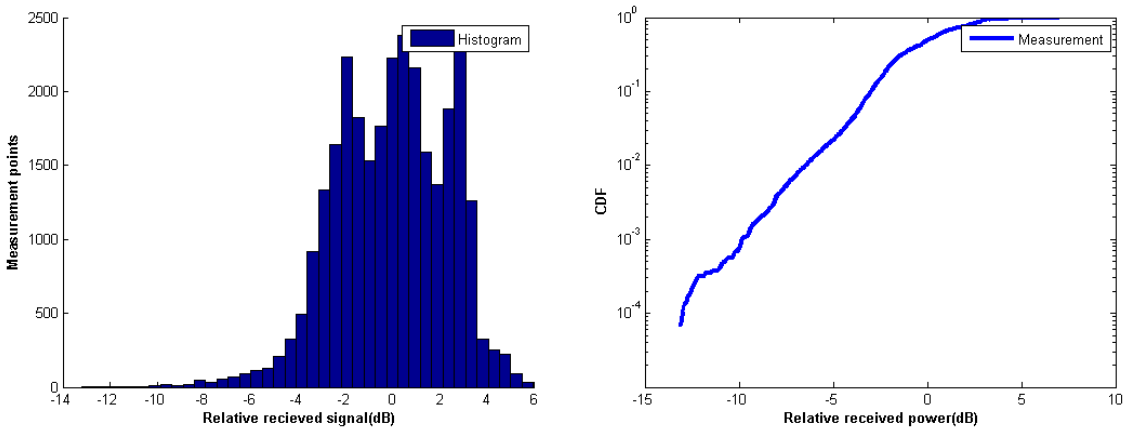


Figura 4.44: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

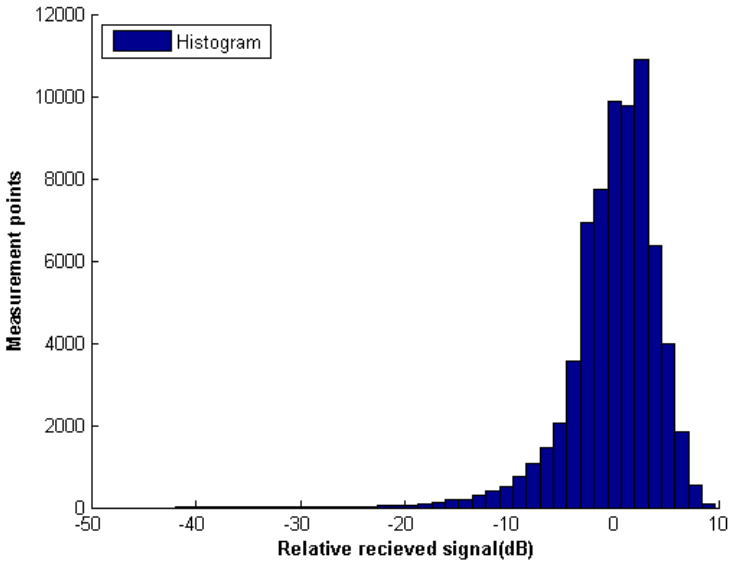


Figura 4.45: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

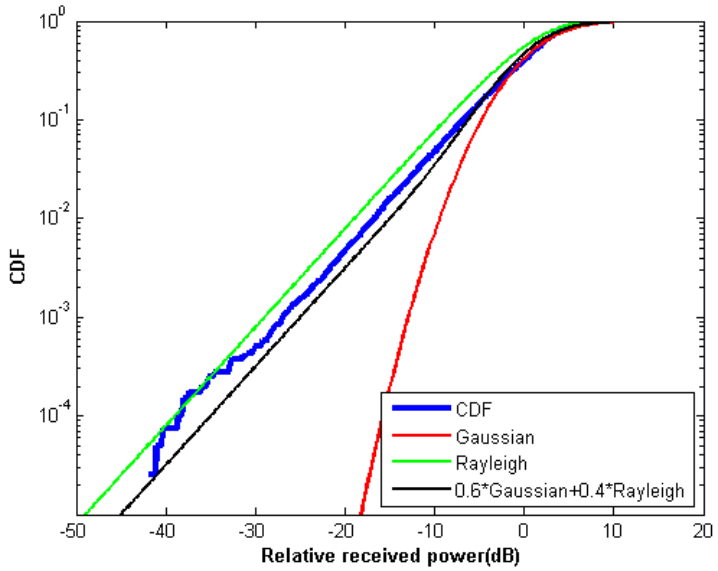


Figura 4.46: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (60%, μ=1, σ=4.5) y Rayleigh (40%).

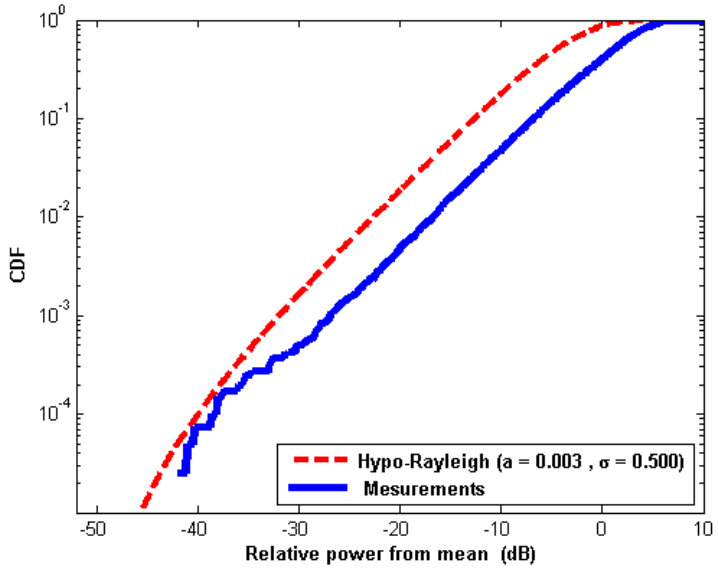


Figura 4.47: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.003, σ=0.500).

4.2 Escenario 2: Medidas del efecto de la presencia humana longitudinal en los canales directivos

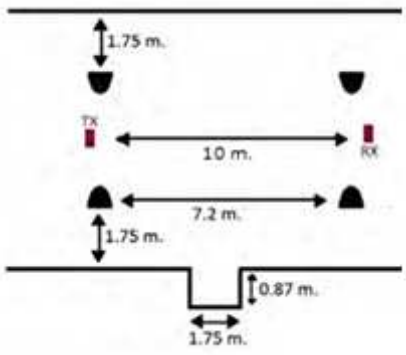


Figura 4.48: Esquema del Escenario 2

Las antenas tanto emisora como receptora se mantendrán fijas separadas a una distancia de 10m. Será la persona quien situada enfrente de la antena emisora se vaya desplazando de 1 metro en 1 metro.

Se han eliminado las pérdidas de los cables y de las antenas para que el analizador de redes sólo refleje las pérdidas que crea el sujeto al interponerse entre las antenas.

Se han elegido cuatro personas, dos hombres y dos mujeres, con diferencias notables entre ellos: altura y peso.

El objetivo es representar las pérdidas causadas por el cuerpo de la persona a medida que se aleja de la antena emisora y se acerca a la receptora. Las pérdidas se representarán de forma individual, hombres, mujeres y todos a la vez para que se aprecien las diferencias entre ellos.

4.2.1 Banda de 2.4 GHz

Entorno: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 2.4GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a una altura de 1.4m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 2.36 GHz a 2.44 GHz. Ancho de banda de 80 MHz.

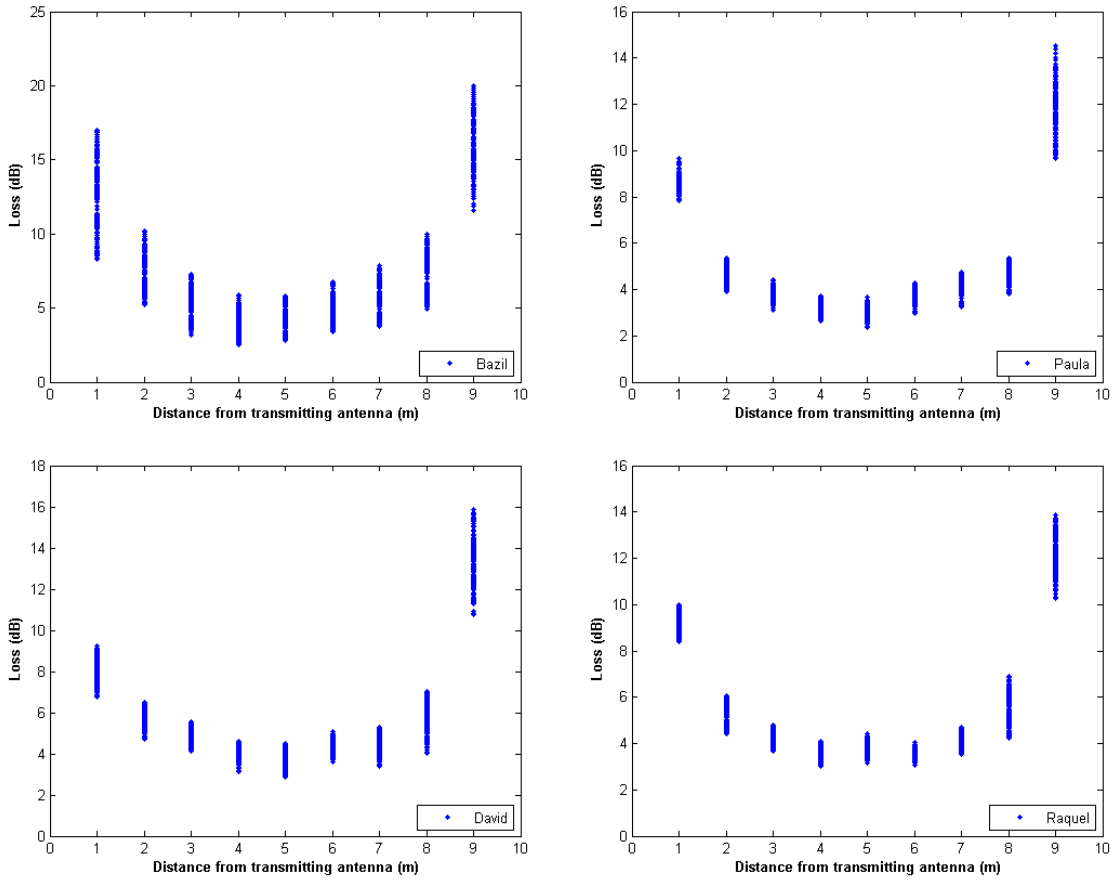


Figura 4.49: Representación del efecto de las personas en la banda de 2.4 GHz

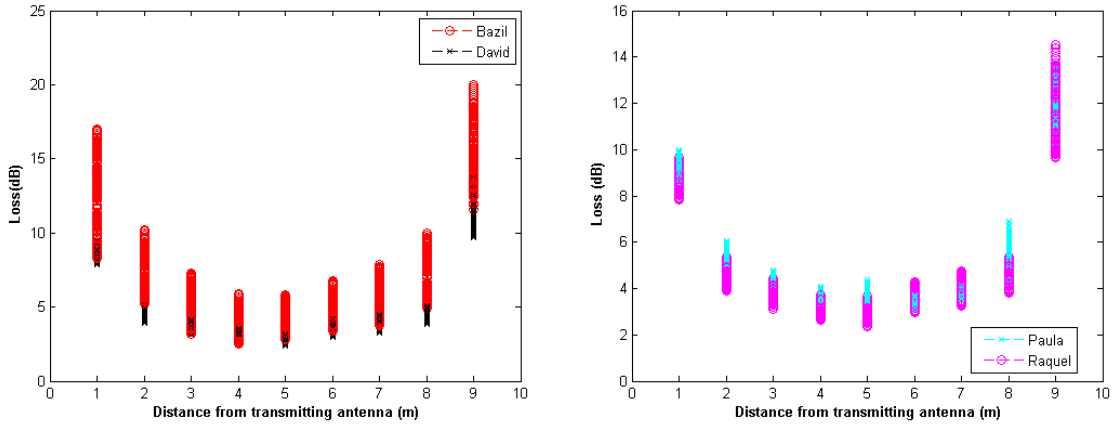


Figura 4.50: Comparativa de pérdidas entre hombres y mujeres en la banda de 2.4 GHz

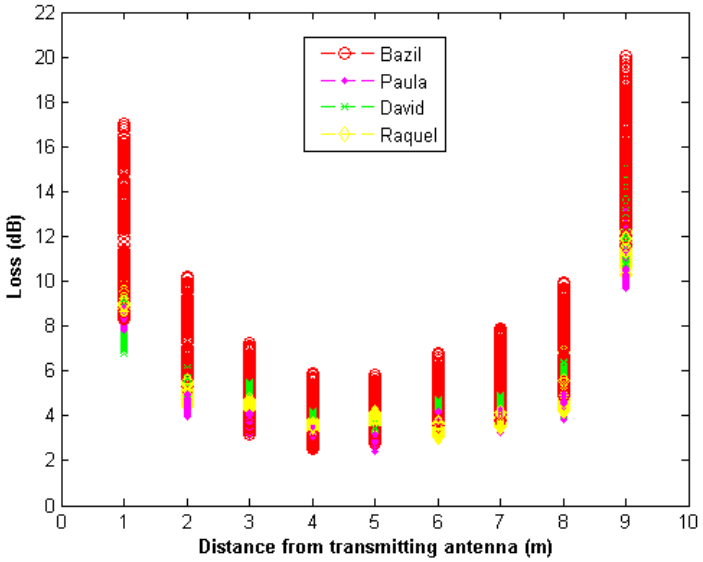


Figura 4.51: Comparativa entre todas las personas para la banda de 2.4 GHz

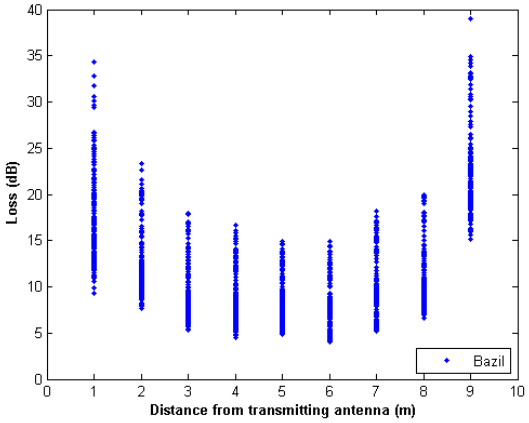
4.2.2 Banda de 3.3 GHz.

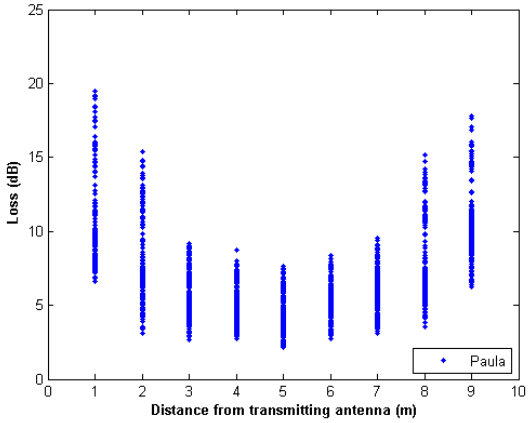
Entorno: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 3.3 GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a una altura de 1.4m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 3.2 GHz a 3.4 GHz. Ancho de banda de 200 MHz.





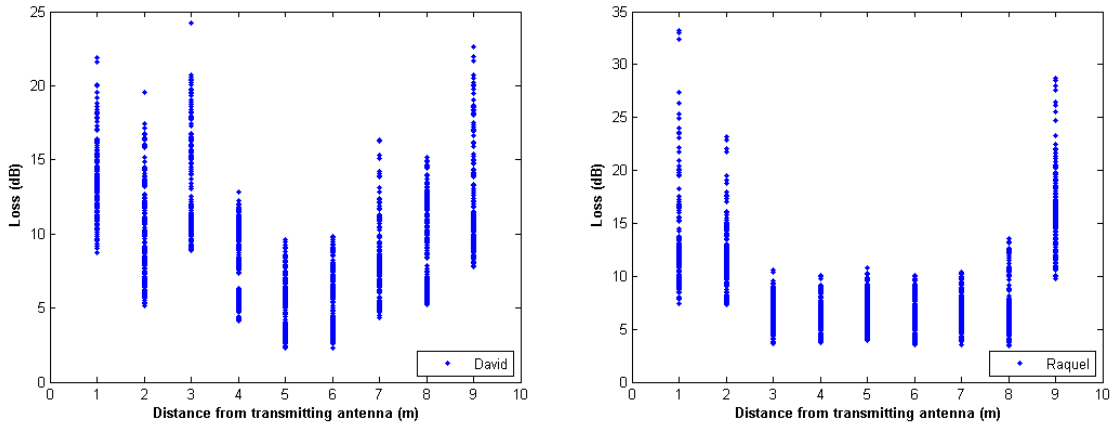


Figura 4.52: Representación del efecto de las personas en la banda de 3.3 GHz

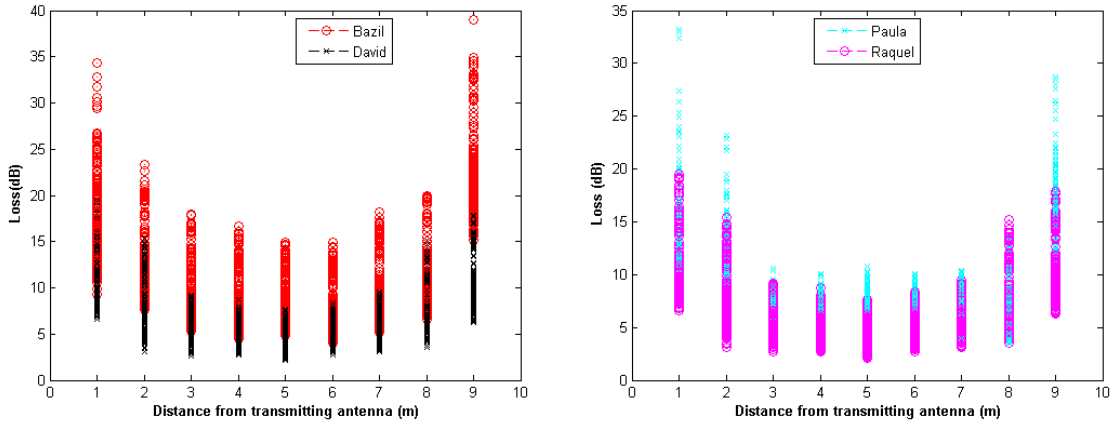


Figura 4.53: Comparativa de pérdidas entre hombres y mujeres en la banda de 3.3 GHz

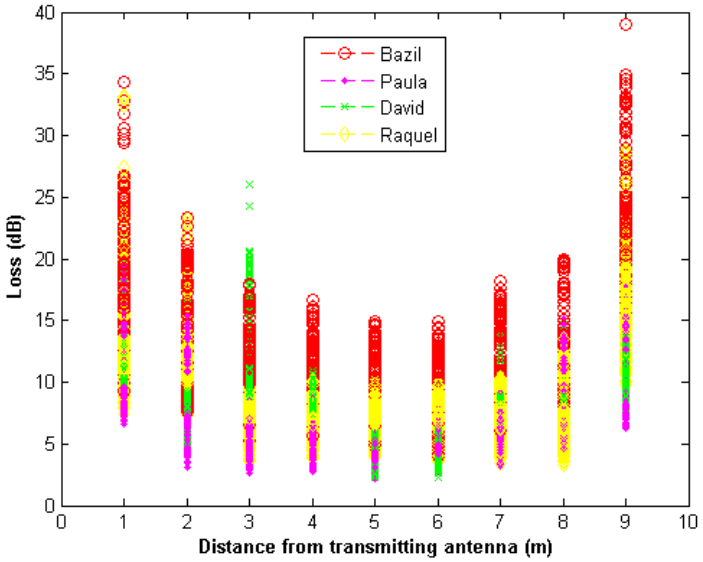


Figura 4.54: Comparativa entre todas las personas para la banda de 3.3 GHz

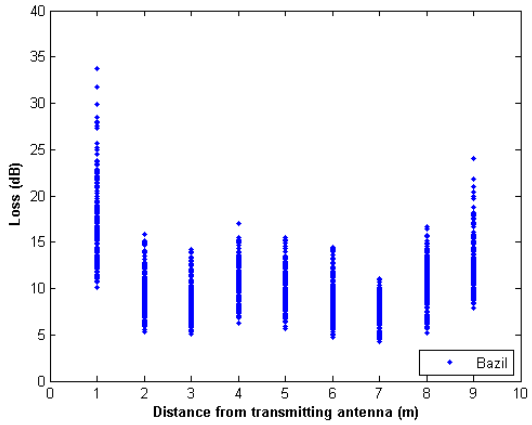
4.2.3 Banda de 5.5 GHz.

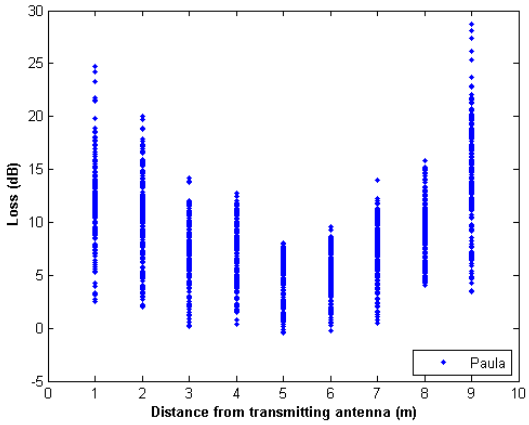
Entorno: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 5.5 GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a una altura de 1.4m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 5.34 GHz a 5.66 GHz. Ancho de banda de 320 MHz.





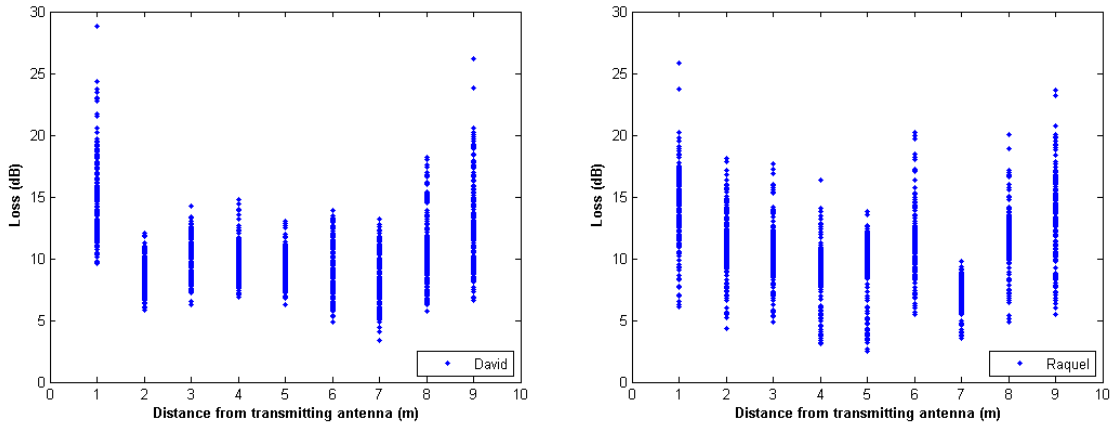


Figura 4.55: Representación del efecto de las personas en la banda de 5.5 GHz

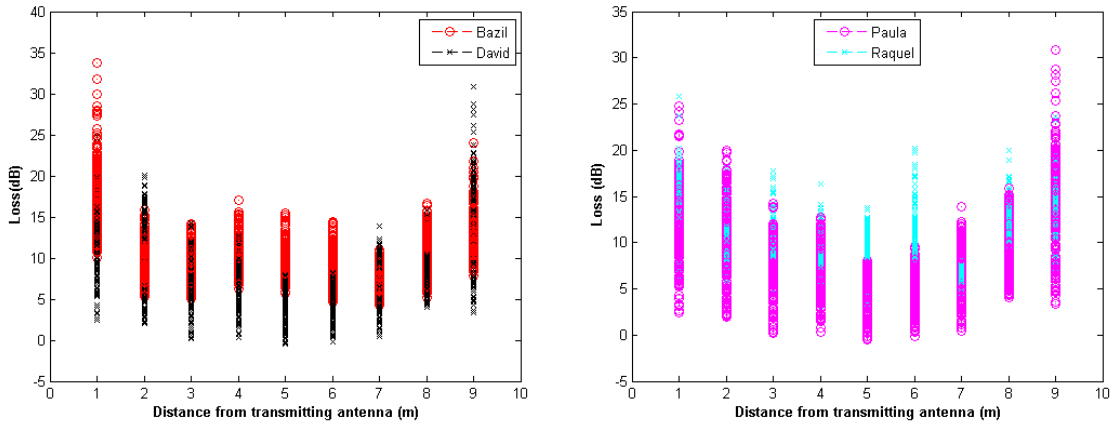


Figura 4.56: Comparativa de pérdidas entre hombres y mujeres en la banda de 5.5 GHz

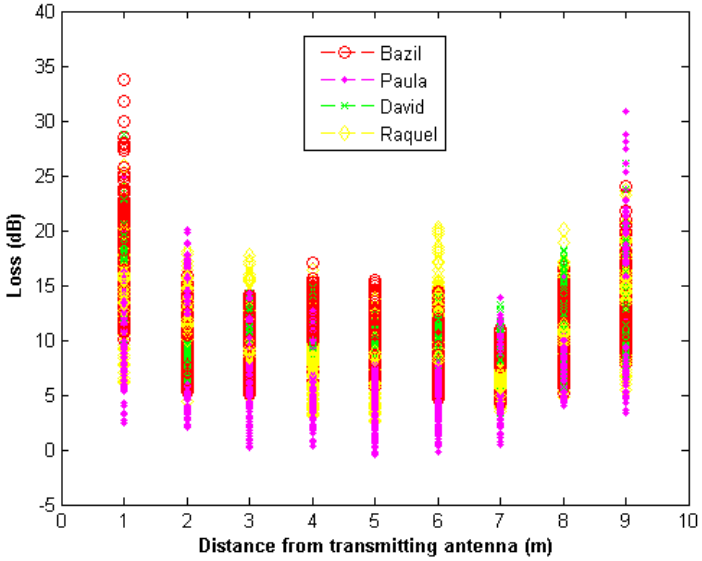


Figura 4.57: Figura 4.58: Comparativa entre todas las personas para la banda de 5.5 GHz

4.3 Escenario 3: Medidas del efecto de la presencia humana transversal en los canales directivos

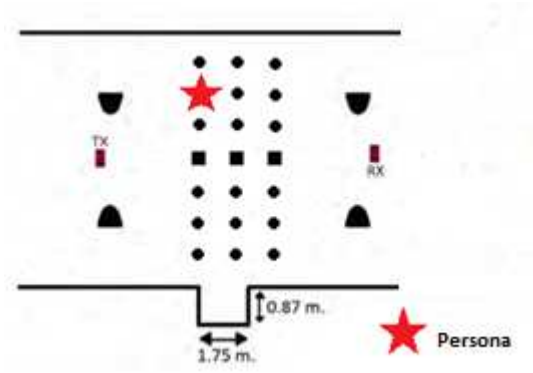


Figura 4.59: Esquema del Escenario 3

Las antenas tanto emisora como receptora se mantendrán fijas separadas a una distancia de 10m. Será la persona quien situada enfrente de la antena emisora, se vaya desplazando, a una distancia de 4, 5 y 6 metros de la antena emisora, 1, 2 y 3 metros a la izquierda y a la derecha.

Se han eliminado las pérdidas de los cables y de las antenas para que el analizador de redes sólo refleje las pérdidas que crea el sujeto al interponerse entre las antenas.

Se han elegido cuatro personas, dos hombres y dos mujeres, con diferencias notables entre ellos: altura y peso.

El objetivo es representar las pérdidas causadas por el cuerpo de la persona a medida que se desplaza a la izquierda y a la derecha a una distancia de la antena emisora de 4, 5 y 6 metros. Se representarán de forma individual incluyendo las tres distancias en una misma gráfica.

4.3.1 Banda de 2.4 GHz

Entorno: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 2.4GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a una altura de 1.4m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 2.36 GHz a 2.44 GHz. Ancho de banda de 80 MHz.

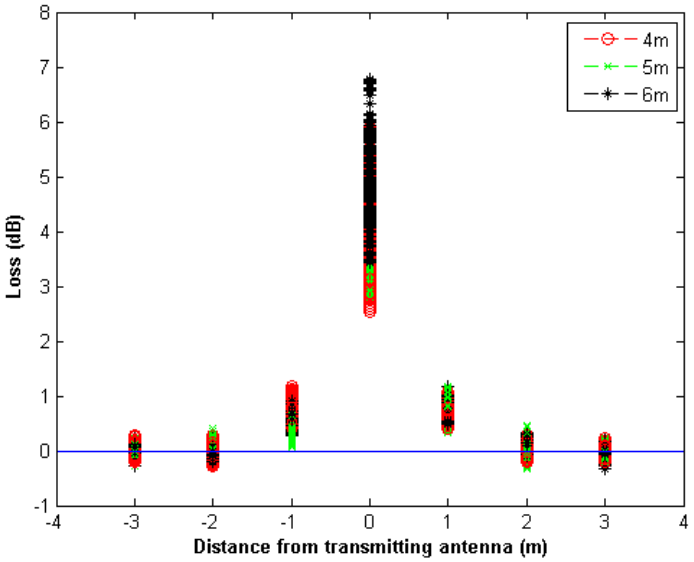


Figura 4.60: Efecto de Bazil en tramo horizontal para la banda de 2.4 GHz

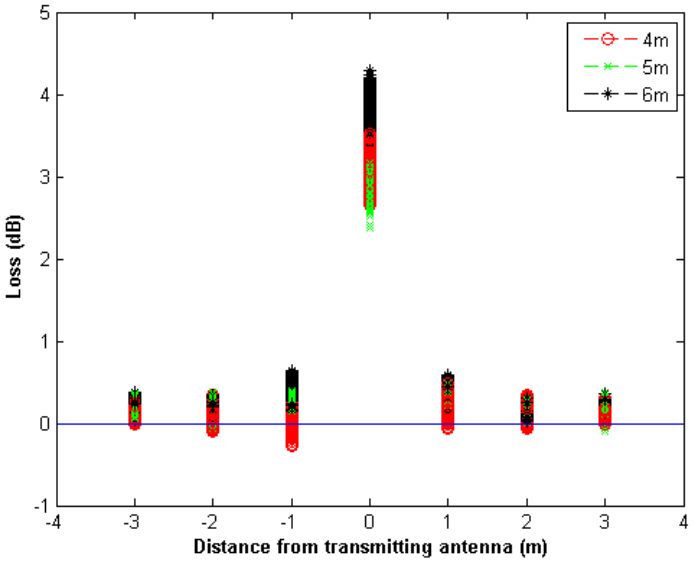


Figura 4.61: Efecto de Paula en tramo horizontal para la banda de 2.4 GHz

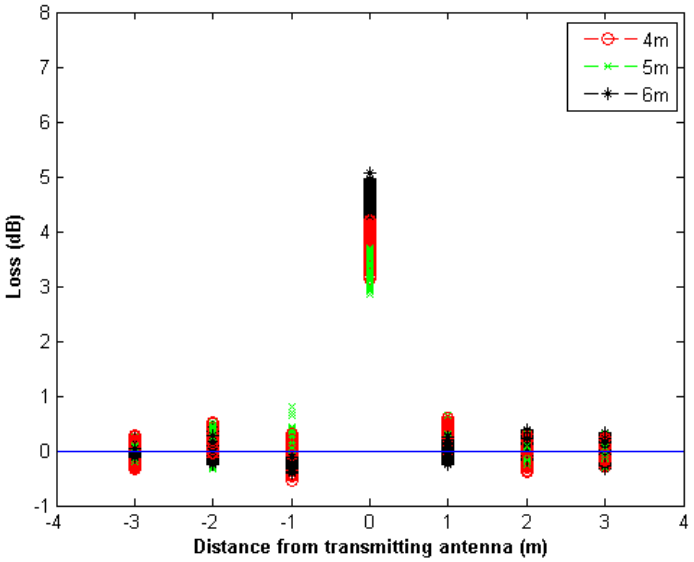


Figura 4.62: Efecto de David en tramo horizontal para a banda de 2.4 GHz

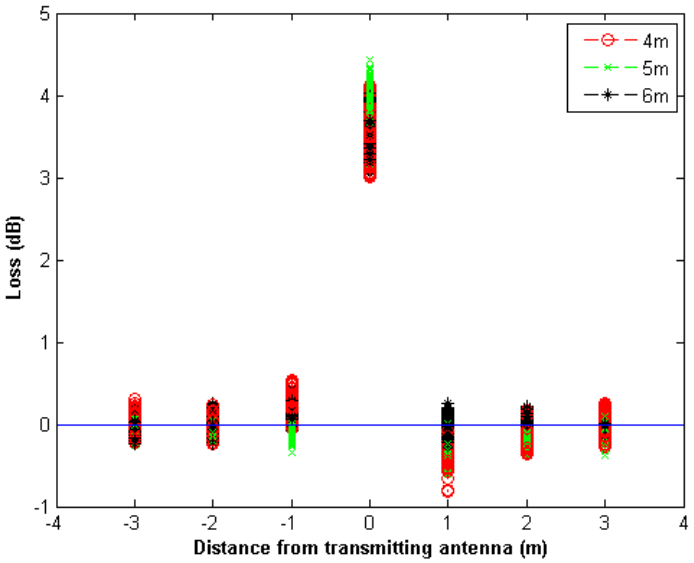


Figura 4.63: Efecto de Raquel en tramo horizontal para la banda de 2.4 GHz

4.3.2 Banda de 3.3 GHz.

Entorno: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 3.3 GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a una altura de 1.4m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 3.2 GHz a 3.4 GHz. Ancho de banda de 200 MHz.

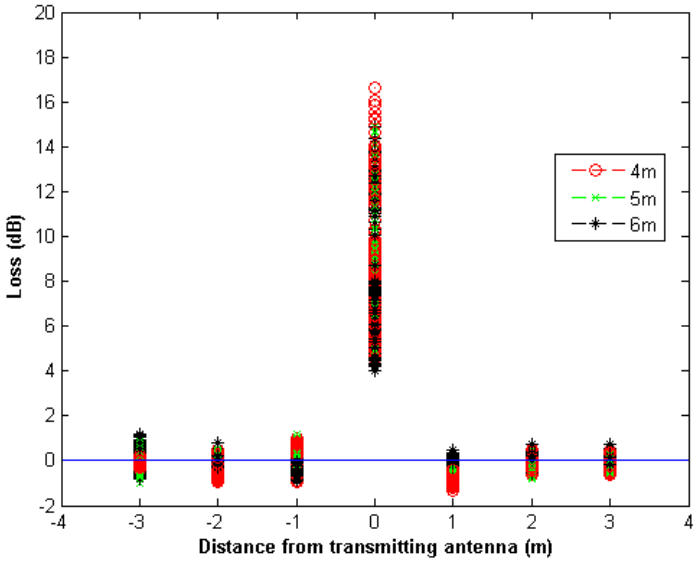


Figura 4.64: Efecto de Bazil en tramo horizontal para la banda de 3.3 GHz

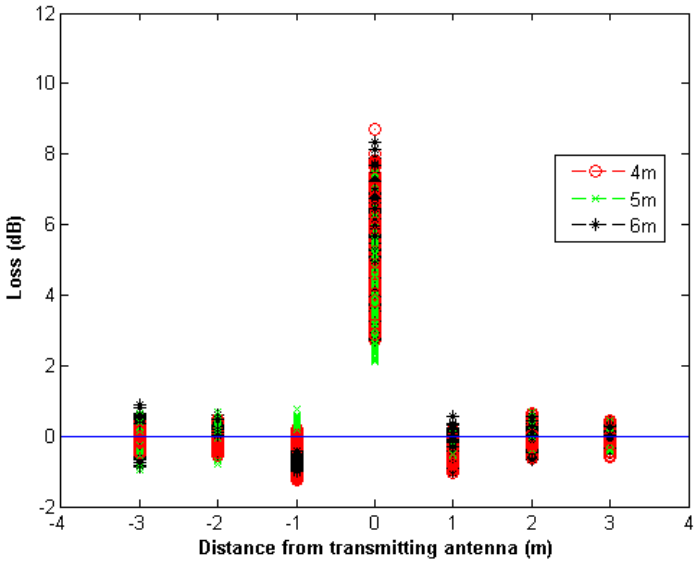


Figura 4.65: Efecto de Paula en tramo horizontal para la banda de 3.3 GHz

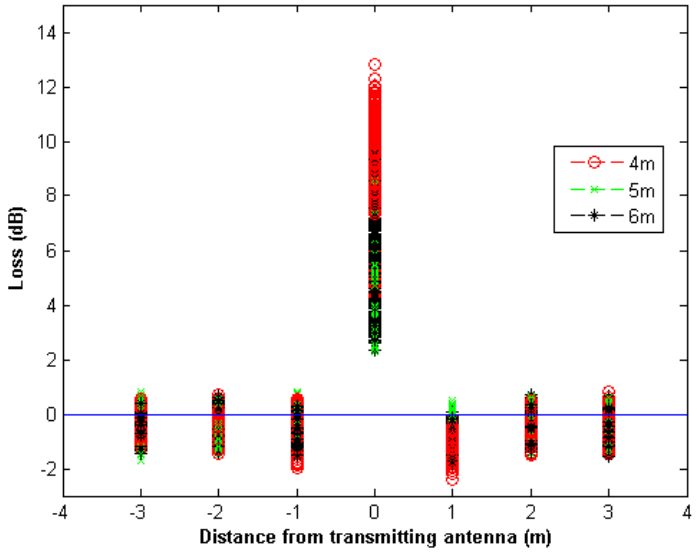


Figura 4.66: Efecto de David en tramo horizontal para la banda de 3.3 GHz

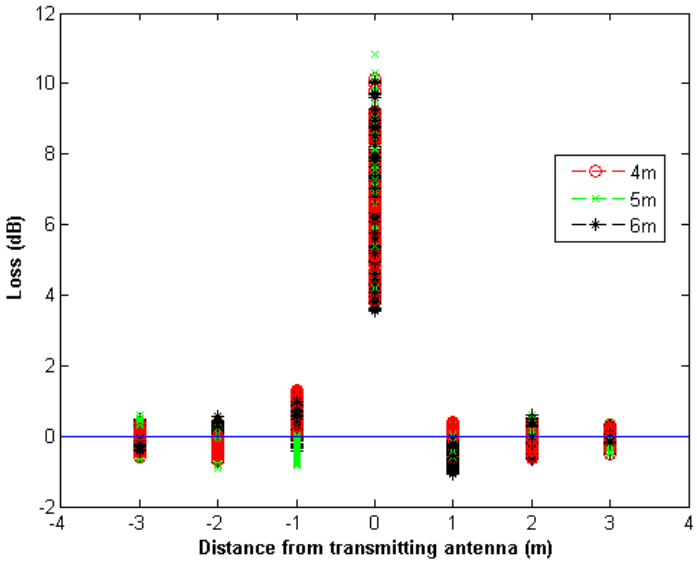


Figura 4.67 Efecto de Raquel en tramo horizontal para la banda de 3.3 GHz

4.3.3 Banda de 5.5 GHz

Entorno: Pasillo central, Planta Baja, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 5.5 GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a una altura de 1.4m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 5.34 GHz a 5.66 GHz. Ancho de banda de 320 MHz.

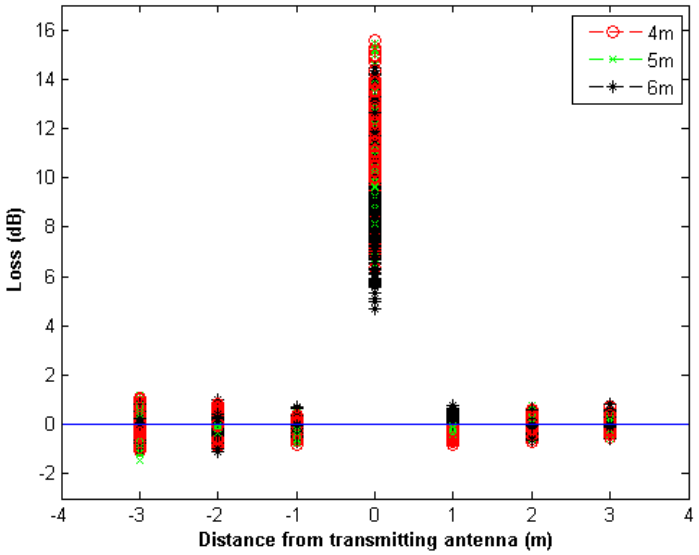


Figura 4.68: Efecto de Bazil en tramo horizontal para la banda de 5.5 GHz

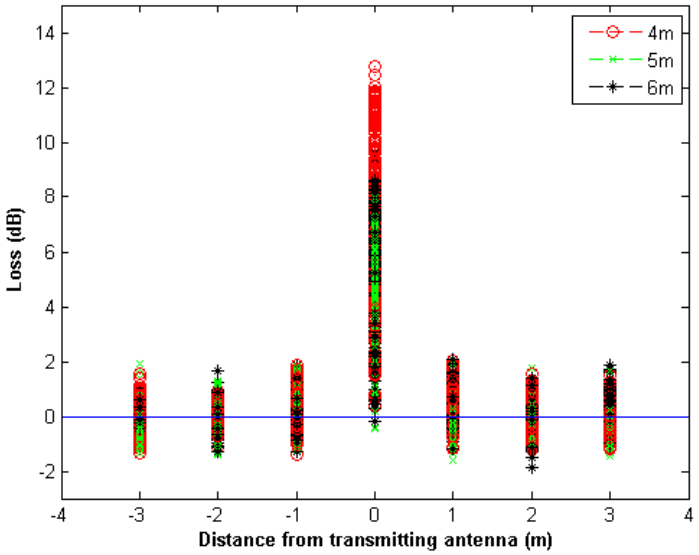


Figura 4.69: Efecto de Paula en tramo horizontal para la banda de 5.5 GHz

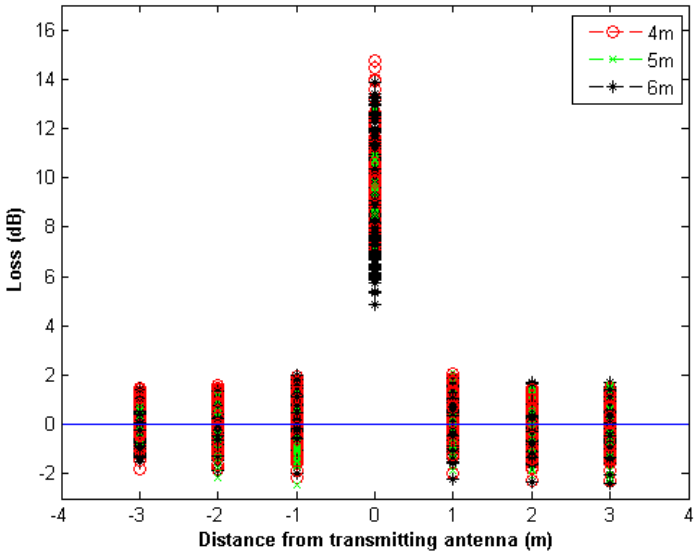


Figura 4.70: Efecto de David en tramo horizontal para la banda de 5.5 GHz

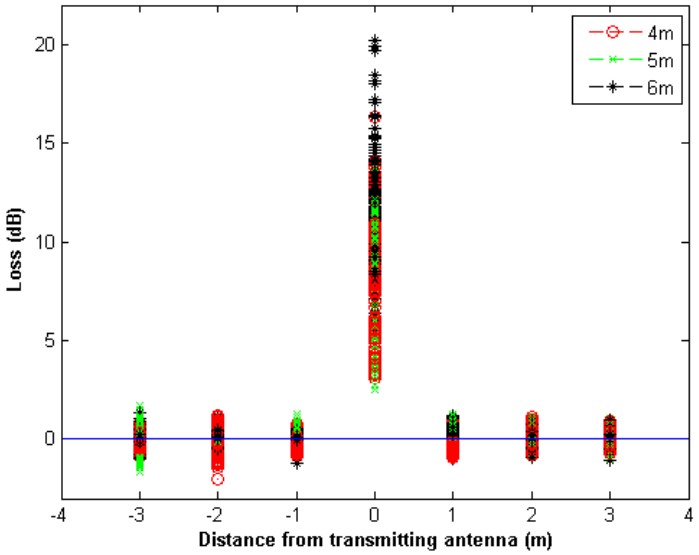


Figura 4.71: Efecto de Raquel en tramo horizontal para la banda de 5.5 GHz

5

Conclusiones y trabajo futuro

5 Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

En las tecnologías inalámbricas, es imprescindible realizar un estudio del entorno para la correcta implantación de dicho sistema, ya que el estudio nos proporciona datos y, y por lo tanto, herramientas de estimación para la correcta distribución de los distintos elementos que conforman dicha implantación.

El estudio del canal de propagación, pasillo central de la Planta Baja del Edificio C y a tres frecuencias distintas, es el centro de este Trabajo de Fin de Grado. Se han obtenido datos sobre pérdidas de propagación y pérdidas producidas por obstáculos, en este caso personas, que permiten dar una idea aproximada de la potencia de transmisión y la ganancia de las antenas necesarias para una transmisión óptima.

Las conclusiones obtenidas en los diferentes escenarios bajo estudio son:

- Cuanto más ganancia tiene una antena, menos sensible es la señal que se propaga al multi-trayecto menos dispersión presentan sus medidas y por lo tanto su componente Rayleigh en la CDF es menor.

- Entre los 1-8 metros prácticamente se ha podido aproximar a una distribución Normal, ya que apenas existe multi-trayecto y se puede aproximar a las pérdidas en espacio libre.

- Cuando la antena se encuentra cerca del suelo (altura 1 metro), o cerca del techo (altura 1.8 metros), presenta una mayor reflexión. Mientras que si el escenario está formado por paredes haciendo esquina (ver Anexo A), columnas o mobiliario presenta una mayor difracción. Todo en su conjunto dará lugar a una dispersión importante de la señal emitida que se verá reflejada en la señal recibida.

- Tener un obstáculo, en este caso una persona, delante de la antena emisora o receptora, absorbe el rayo directo emitido o recibido de la antena y sus pérdidas son prácticamente iguales. El punto de 5 metros es el que presenta menos pérdidas.

- Las pérdidas por obstáculos cuando estos se mueven a la izquierda o derecha del camino directo de la señal es mínimo debido a que no obstaculizan el rayo principal y sólo se ven afectados por rayos secundarios derivados del multi-trayecto. El conjunto de estos rayos secundarios ha llegado a producir ganancias mínimas entre 1-2 dB.

5.2 Trabajo futuro

Se propone como trabajo futuro:

- Estudio de otros escenarios como el Edificio A, el Edificio B, el edificio C y alrededores de la Escuela de la Politécnica Superior.
- Realizar campaña de medidas a distancias entre antenas mayor de 20 metros.
- Realizar campaña de medidas con polarización horizontal de las antenas.
- Estudio más exhaustivo de las pérdidas que producirían objetos hechos de diferentes materiales, por ejemplo usando la cámara anecoica.

Referencias

[1] M. Golparvar Roozbahani and E. Jedari, A. A. Shishegar, “A new link-level simulation procedure of wideband MIMO radio channel for performance evaluation of indoor WLANS”, Progress In Electromagnetics Research, PIER 83, 13–24, 2008.

[2] Tayebi, J. Gomez, F. Saez de Adana, and O. Gutierrez, “The application of ray-tracing to mobile localization using the direction of arrival and received signal strength in multipath indoor environments”, Progress In Electromagnetics Research, PIER 91, 1–15, 2009.

[3] J. Blas, Prieto , Fernández, R. M. Lorenzo, E. J. Abril , S. Mazuelas, A., S. M. Franco, A.B. Martinez, and D. Bulllid, “A model for transition between outdoor and indoor propagation” Progress In Electromagnetics Research, Vol. 85, 147–167, 2008.

[4] Bahillo, and D. Bullido, “A model for transition between outdoor and indoor propagation”, Progress In Electromagnetics Research, PIER 85, 147–167, 2008.

[5] N. Yarkoni, N. Blaunstein, “Prediction of propagation characteristics in indoor radio communication environment”, Progress in Electromagnetics Research, PIER 59, 151-174, 2006.

[6] L. Howitt, M.S. Khan, “A mode based approach for characterizing RF propagation in conduits”, Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 20, 49-64, 2010.

[7] Dinesh Tummala, "Indoor propagation modeling at 2.4 GHz for IEEE 802.11 networks", M.Sc Thesis, University of North Texas, December 2005.

[8] Emilie Masson et. al., "Radio wave propagation in arched cross section tunnels – Simulations and measurements". Journal of Communications, Vol. 4, No. 4, 276 - 283, May 2009.

[9 Erik Kjeldsen and Marshall Hopkins, "An experimental look at RF propagation in narrow tunnels". Scientific Research Corporation (SRC) Atlanta, Georgia.

[10] Marina Barbiroli , Claudia Carciofi , Vittorio Degli Esposti , Franco Fuschini , Paolo Grazioso , Doriana Guiducci, Daniel Robalo, Fernando J. Velez, “Characterization of WiMAX propagation in microcellular and picocellular environments”, 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 1-5, Barcelona, Spain, 2010.

[11] Zaballos, G.Corral, A.Carné, and J. L. Pijoan, “Modeling new indoor and outdoor propagation models for WLAN”, (On line) Available at: www.salle.url.edu/~zaballos/opnet/OPNET2004b.pdf.

[12] J. M. Gorce, K. Runser, G. de la Roche, “FDTD based efficient 2D simulations of Indoor propagation for wireless LAN”, (On line) Available at: www. katia.runser.free.fr/Fichiers/GORCE_IMACS_FINAL.pdf

[13] C. Nerguizian, C. L. Despins, S. Affes, M. Djadel, “ Radio-channel characterization of an underground mine at 2.4 GHz”, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 4, No. 5, 2441-2453, September 2005.

[14]J. Poutanen, K. Haneda, J. Salmi et al., “Analysis of radio wave propagation from an indoor hall to a corridor”, IEEE Antennas and Propagation Symposium /USNC/URSI, Vols. 1-6, 2683-2686, 2009.

[15] X. H. Mao, Y. H. Lee, B. C. Ng, “ Propagation modes and temporal variations along a lift shaft in UHF band”, IEEE Transactions on Antennas and propagation, Vol. 58, No. 8, 2700-2709, August 2010.

[16] Bazil Taha Ahmed, D. F. Campillo, and J. L. Masa Campos, “Short Range Propagation Model for a Very Wideband Directive Channel at 5.5 GHz Band”, Progress in Electromagnetics Research, PIER Journal, Vol. 130, pp. 319-346, 2012.

[17] Bazil Taha Ahmed, César Alfredo Naranjo Hidalgo and Josè Luis Masa Campos, ”Narrowband Short Range Directive Channel Propagation Loss in Indoor Environment at Three Frequency Bands”, Wireless Personal Communications, Vol. 78, pp. 507-520,2014.

[18] Bazil Taha Ahmed y Miriam Esteban.“Hypo-Rayleigh Distribution for Short Range Range Directive Indoor Channel Fading Modeling at 3.3 and 5.5 GHz Bands”

A

Escenarios

1 Escenario 4: Pasillo RFCAS, Planta 1, Edificio C

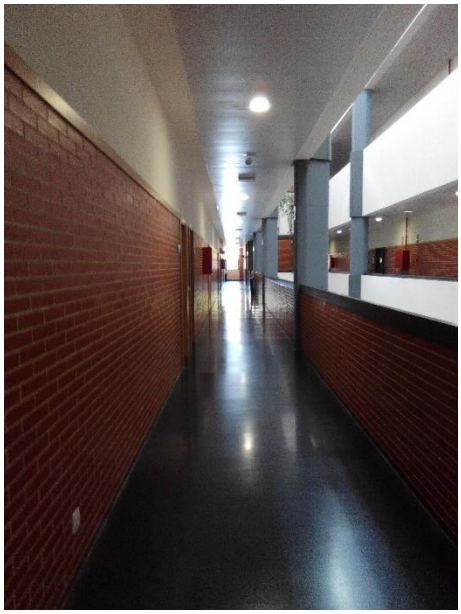


Figura 1.1.1: Escenario 4

1.1 Banda de 2.4 GHz

Entorno: Pasillo RFCAS, Planta 1, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 2.4 GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a tres alturas diferentes: 1m, 1.4m y 1.8m.

Distancia: La antena emisora se mantendrá fija mientras que la antena receptora se colocará a una distancia de un metro de la emisora y luego se irá variando su posición 0.25m hasta llegar a los 20m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 2.36 GHz a 2.44 GHz. Ancho de banda de 80 MHz.

La figura (1.2) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [2.36-2.44] GHz a una altura de 1 metro, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

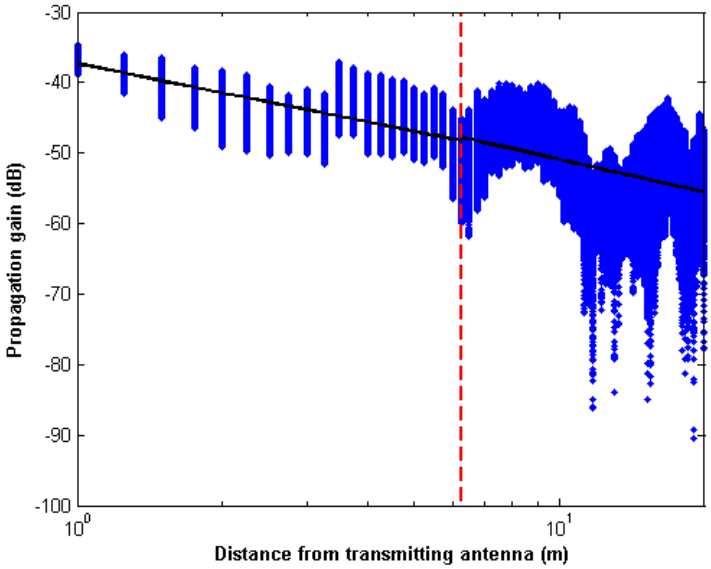


Figura 1.2: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 37.3345 + 13.750\log_{10} d \;\; d \leq 6.25 \\ 35.5018 + 15.422\log_{10}\left(\frac{d}{6.25}\right) \;\; 6.25 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{1.1}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos: n_1=1.3750 y n2=1.5422. Tanto el exponente n_1 y n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 6.25 metros se modelará como espacio libre mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

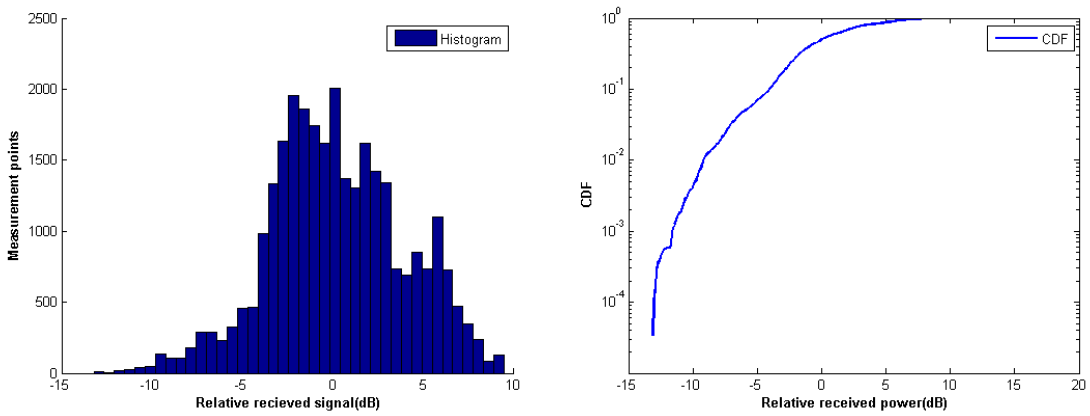


Figura 1.3: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

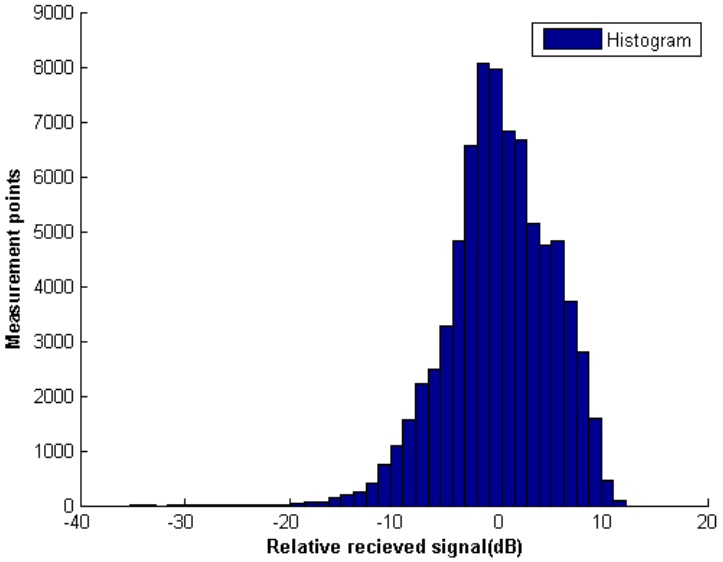


Figura 1.4: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

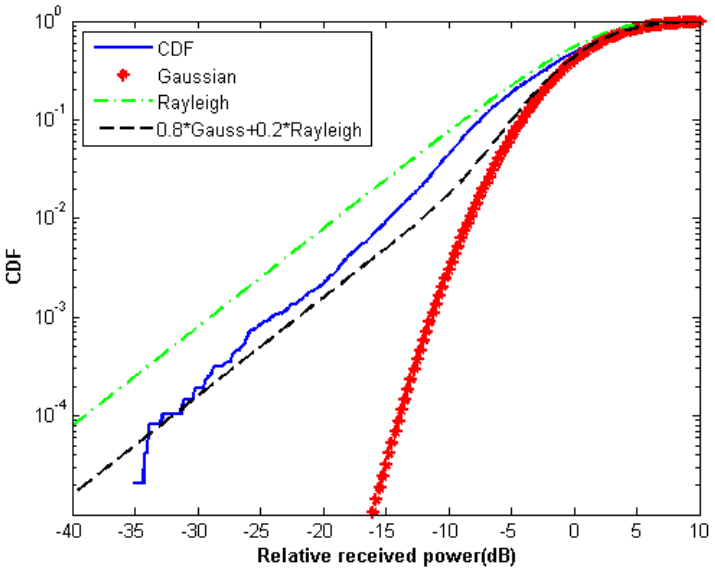


Figura 1.5: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (80%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (20%).

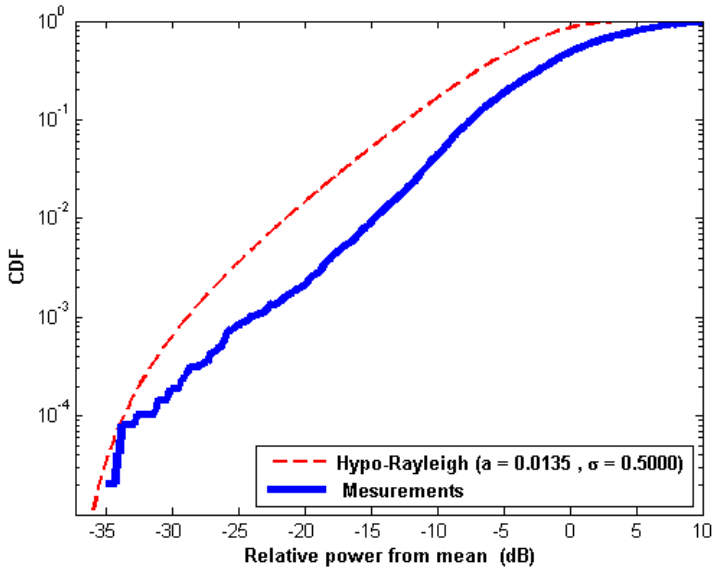


Figura 1.6: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.0135, σ=0.5000).

La figura (1.7) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [2.36-2.44] GHz a una altura de 1.4m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

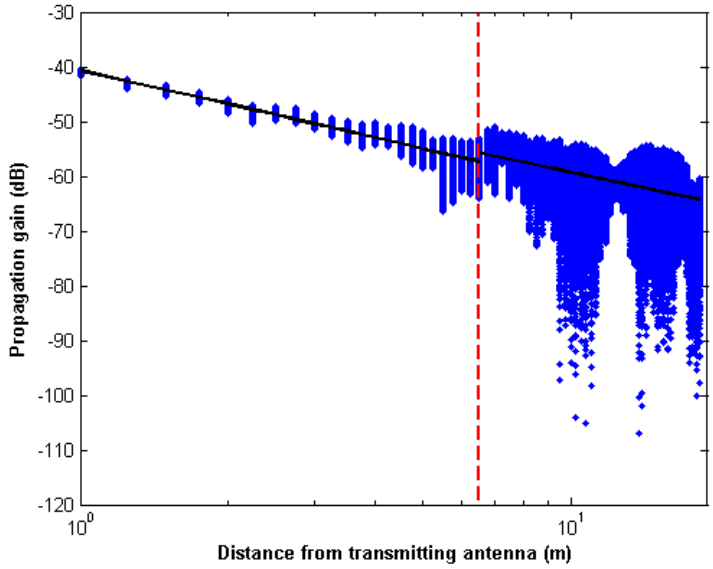


Figura 1.7: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.6524 + 20.522\log_{10} d & d \leq 6.5 \\ 40.2884 + 19.012\log_{10}\left(\frac{d}{6.5}\right) & 6.5 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (1.2)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos: n_1=2.0522 y n2=1.9012. El exponente n_1 es ligeramente superior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 no supera el exponente de propagación.

Hasta una distancia de 6.5 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

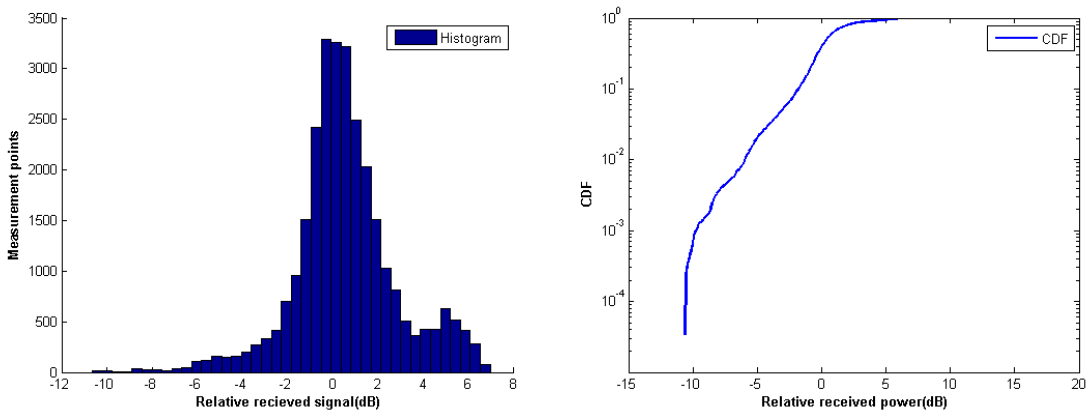


Figura 1.8: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metro.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

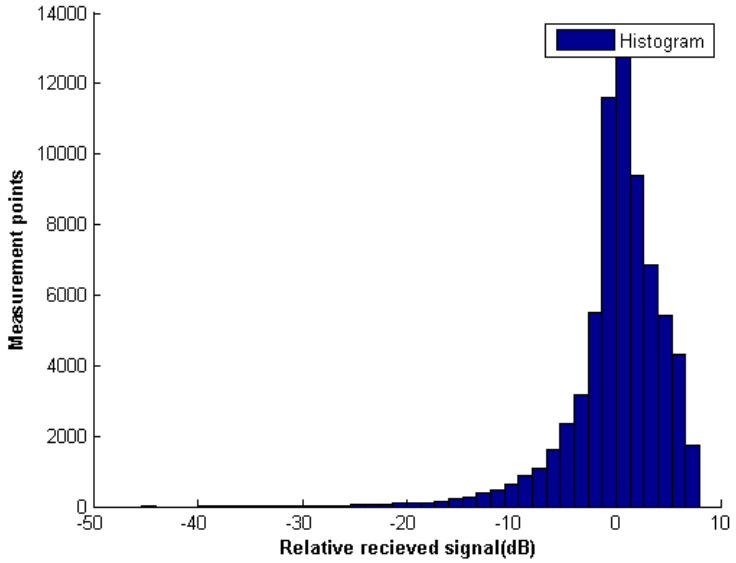


Figura 1.9: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

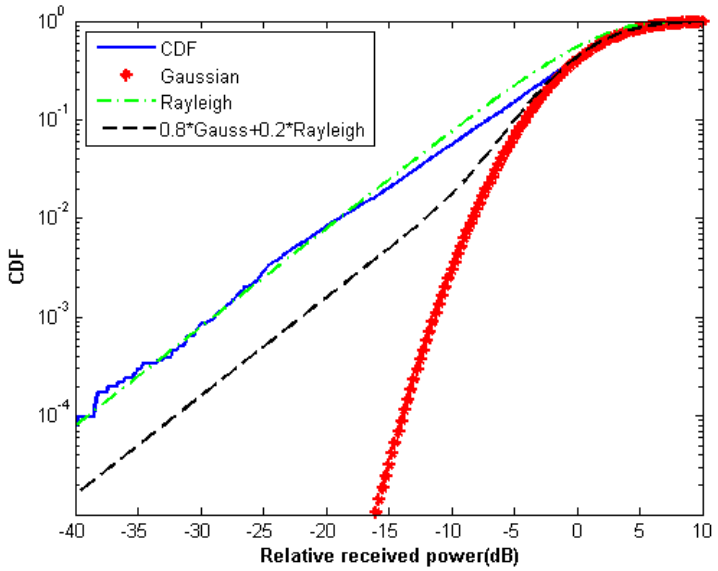


Figura 1.10: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (80%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (20%).

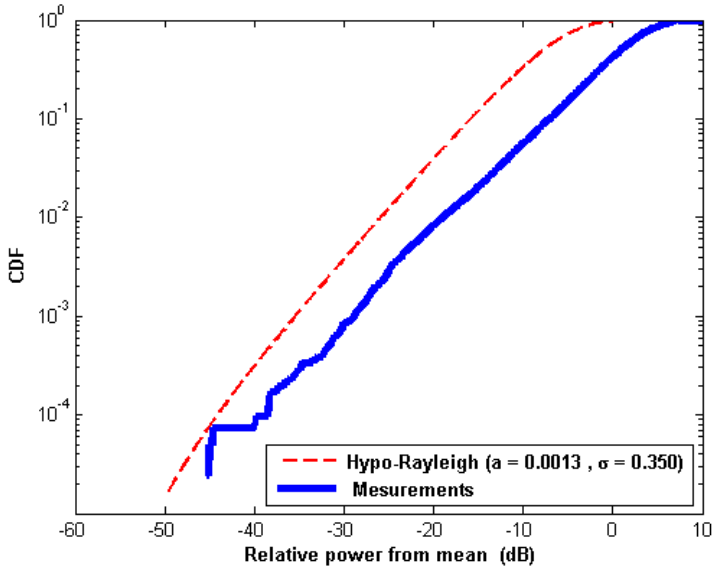


Figura 1.11: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.0013, σ=0.3500).

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [2.36-2.44] GHz a una altura de 1.8m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

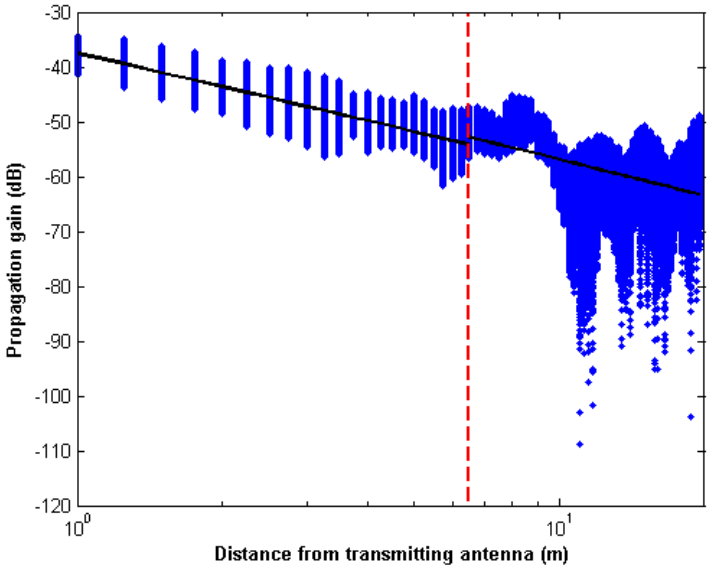


Figura 1.12: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 37.4744 + 20.557\log_{10} d \;\; d \leq 6.5 \\ 34.9589 + 21.948\log_{10}\left(\frac{d}{6.5}\right) \;\; 6.5 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{1.3}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=2.0557 y n2=2.1948. Tanto el exponente n_1 como n_2 son ligeramente superiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 6.5 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

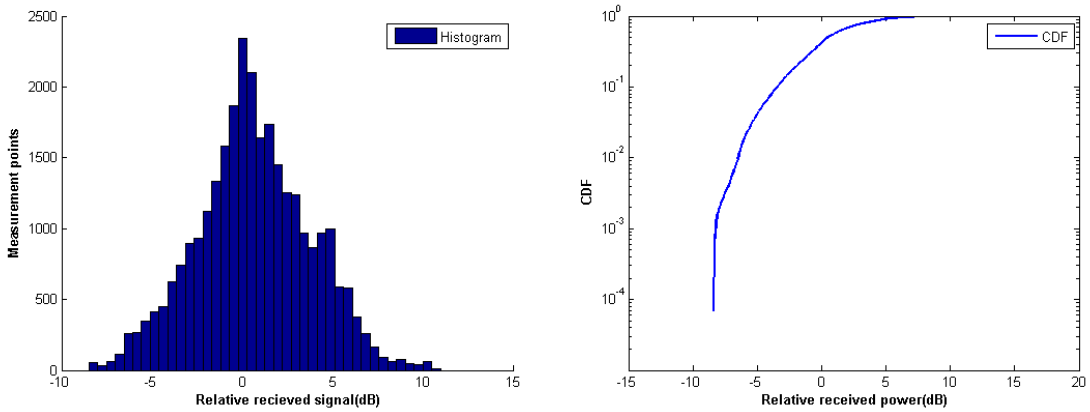


Figura 1.13: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros.

La figura anteriores representa el histograma y el CDF del primer tramo.

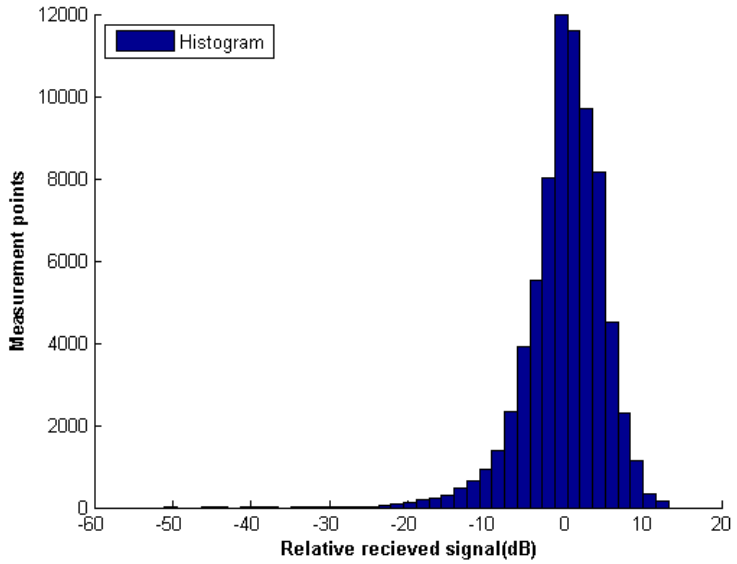


Figura 1.14: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

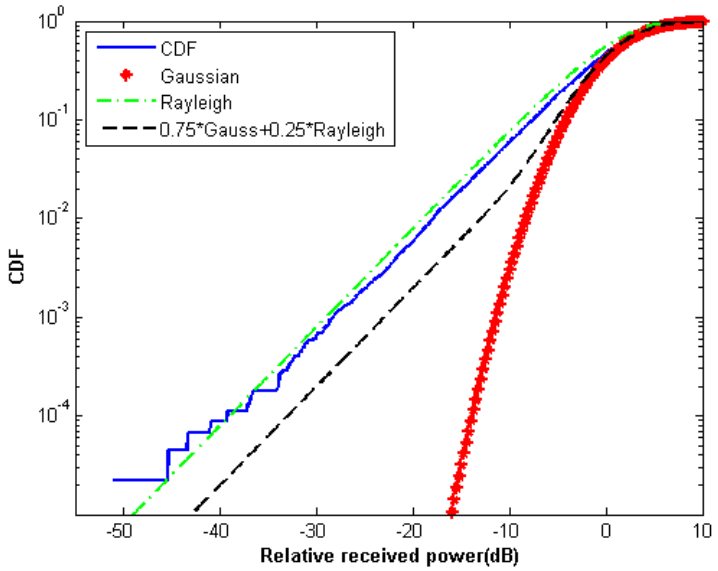


Figura 1.15: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (75%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (25%).

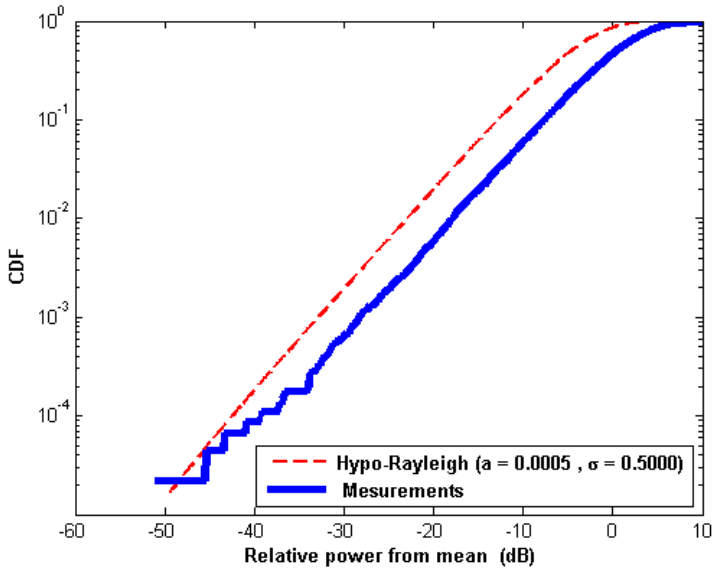


Figura 1.16: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.0005, σ=0.5000).

1.2 Antenas 3.3 GHz

Entorno: Pasillo RFCAS, Planta 1, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 3.3GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a tres alturas diferentes: 1m, 1.4m y 1.8m.

Distancia: La antena emisora se quedará fija mientras que la antena receptora se colocará a una distancia de un metro de la emisora y luego se irá variando su posición 0.25m hasta llegar a los 20m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 3.2 GHz a 3.4 GHz. Ancho de banda de 200 MHz.

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [3.2-3.4] GHz a una altura de 1m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

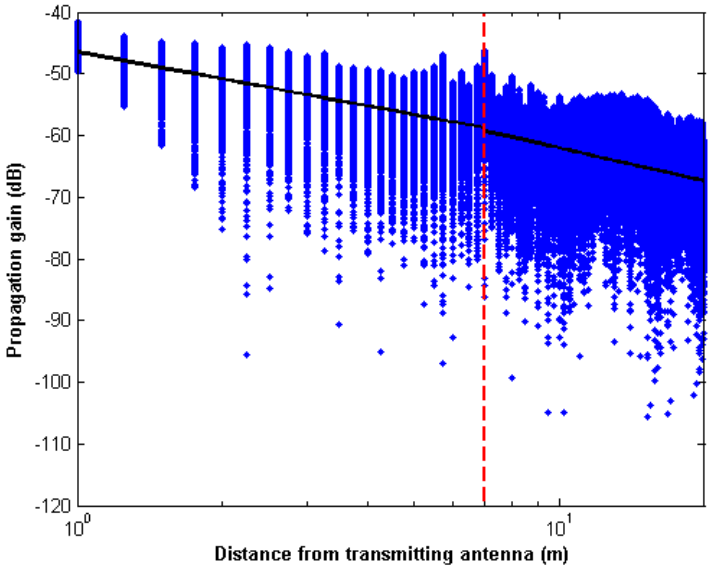


Figura 1.17: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 46.4541 + 14.622\log_{10} d & d \leq 7 \\ 44.2760 + 17.788\log_{10}\left(\frac{d}{7}\right) & 7 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{1.4}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.4622 y n_2=1.7788. Tanto el exponente n_1 como n_2 es inferior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 7m el escenario se modelará como espacio libre mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

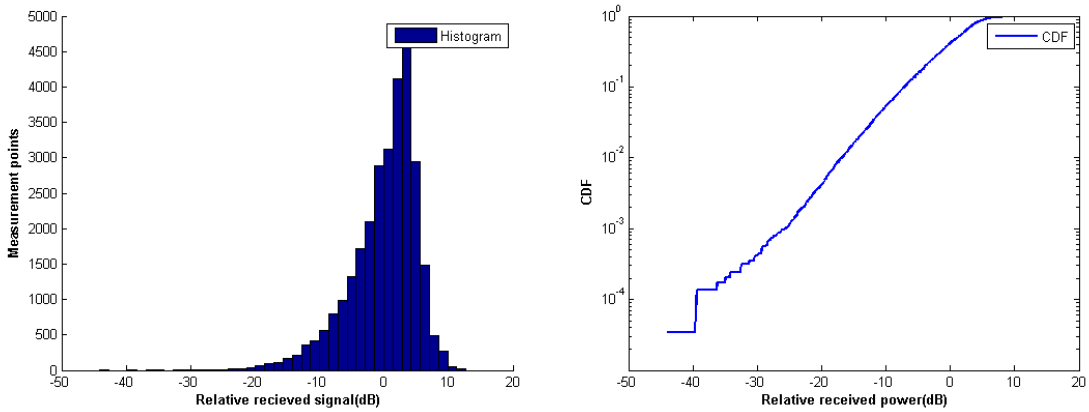


Figura 1.18: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

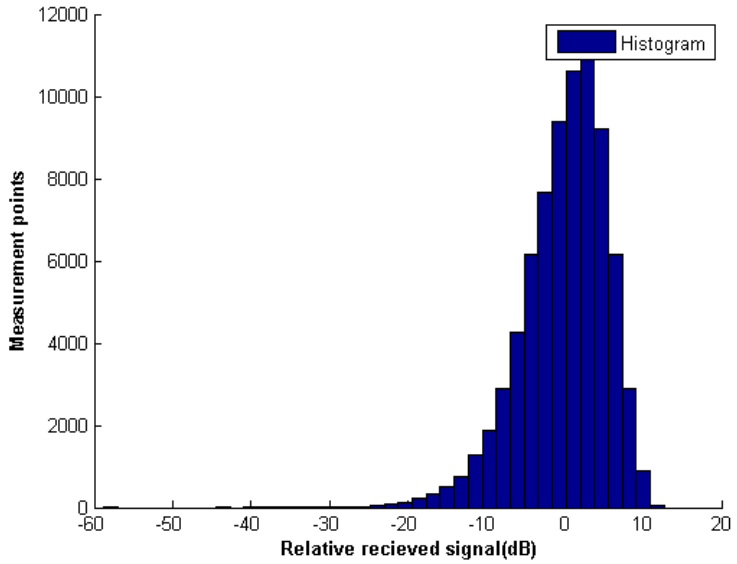


Figura 1.19: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

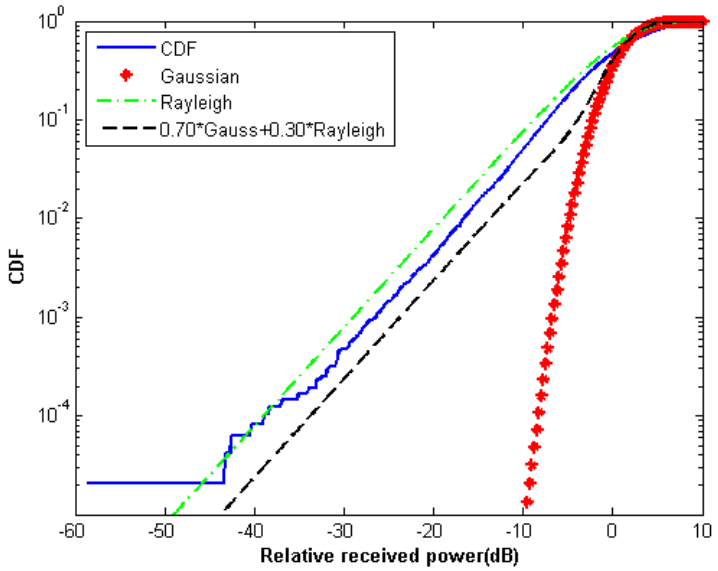


Figura 1.20: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (70%, μ=1, σ=2.5) y Rayleigh (30%).

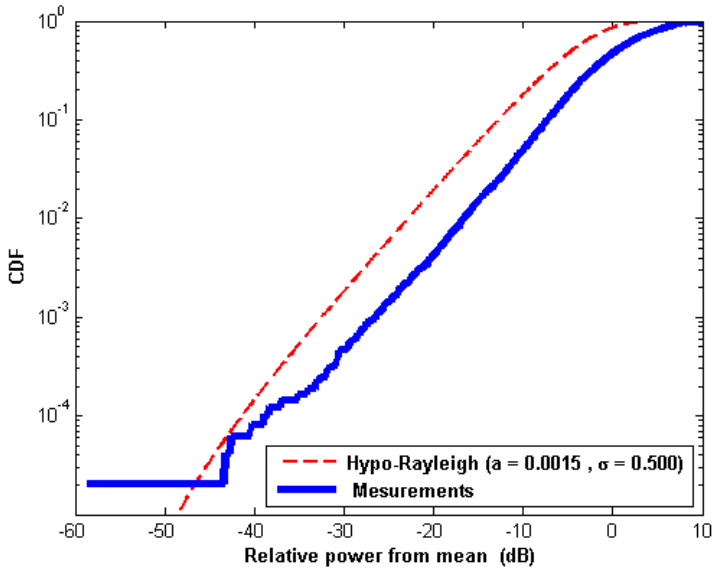


Figura 1.21: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.0015, σ=0.500).

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [3.2-3.4] GHz a una altura de 1.4m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

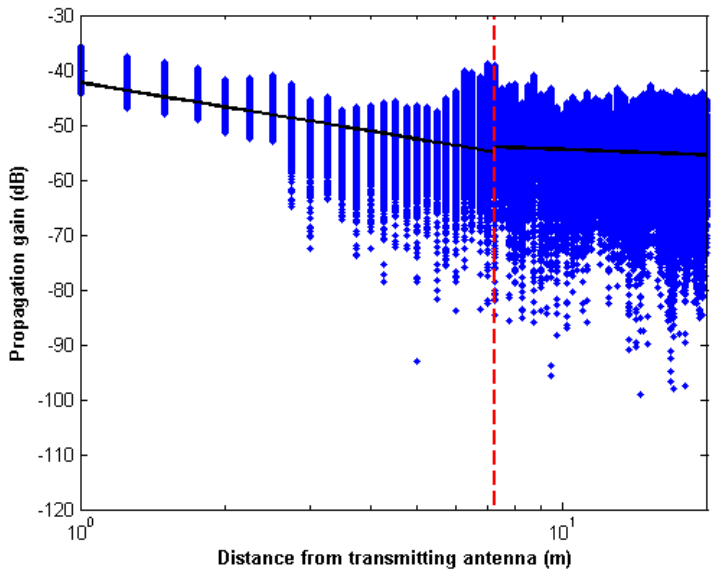


Figura 1.22: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 42.3216 + 14.691\log_{10} d & d \leq 7.25 \\ 51.0879 + 3.374\log_{10}\left(\frac{d}{7.25}\right) & 7.25 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (1.5)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.4691 y n_2=0.3374. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 7.25 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

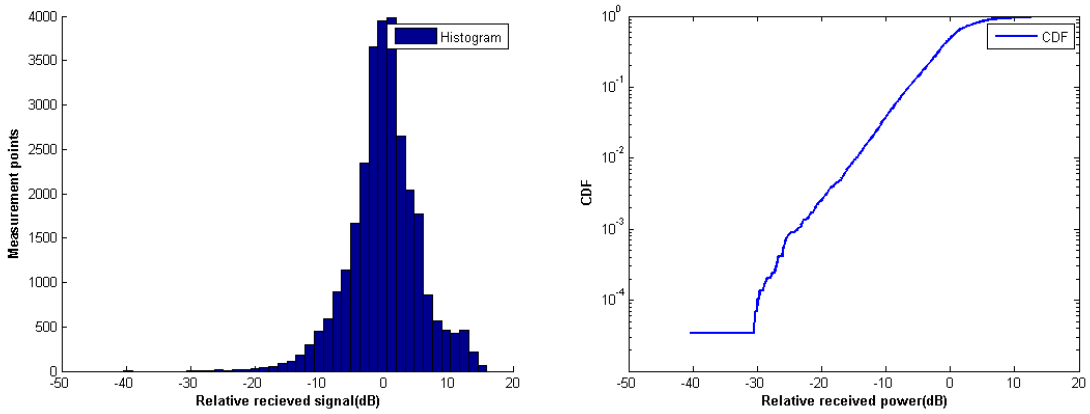


Figura 1.23: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

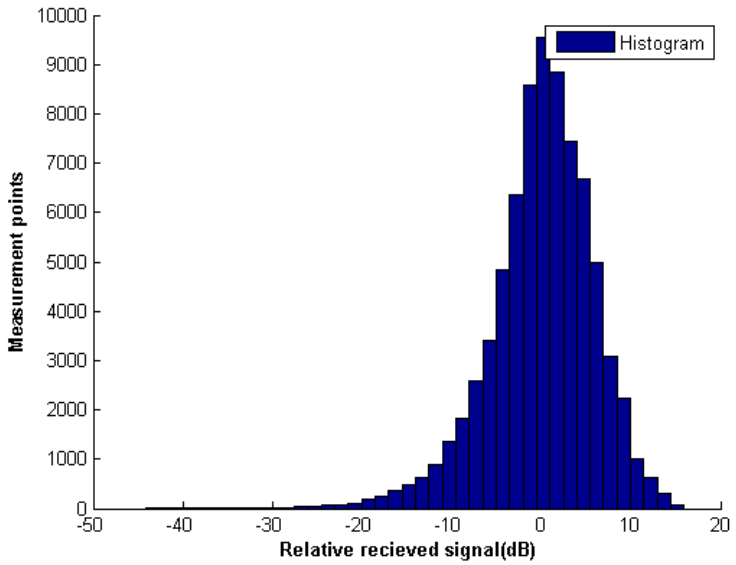


Figura 1.24: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

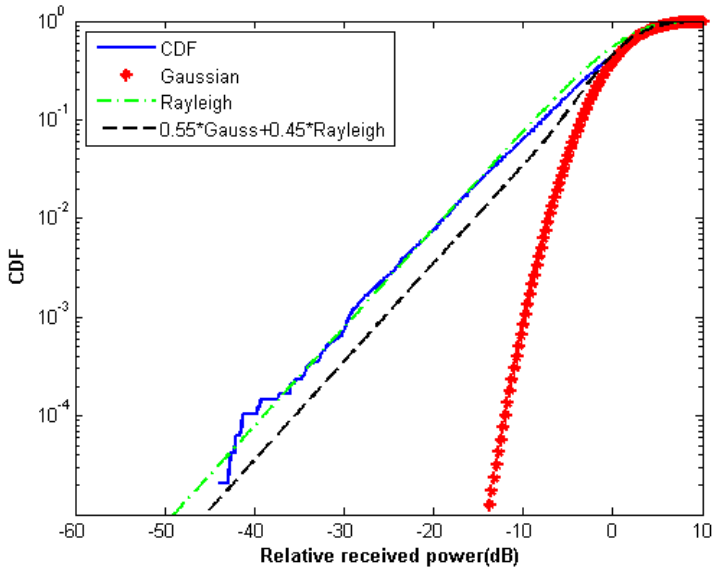


Figura 1.25. CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (55%, μ=1, σ=3.5) y Rayleigh (45%).

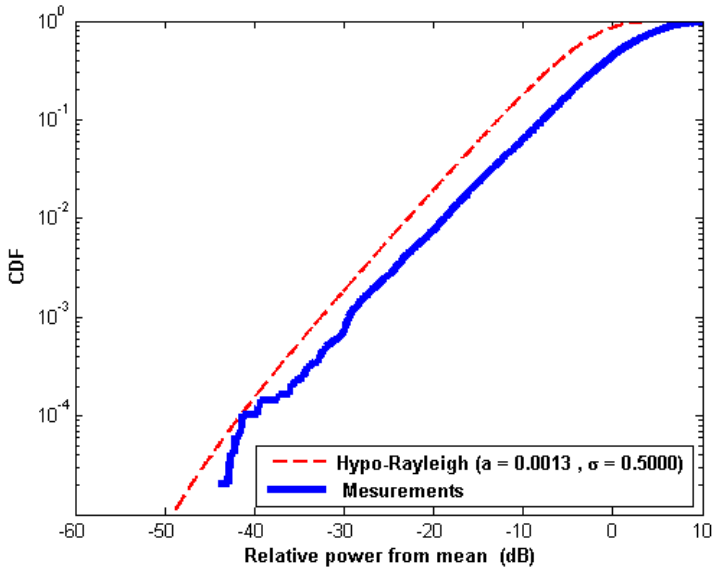


Figura 1.26: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.0013, σ=0.5000).

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [3.2-3.4] GHz a una altura de 1.8m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

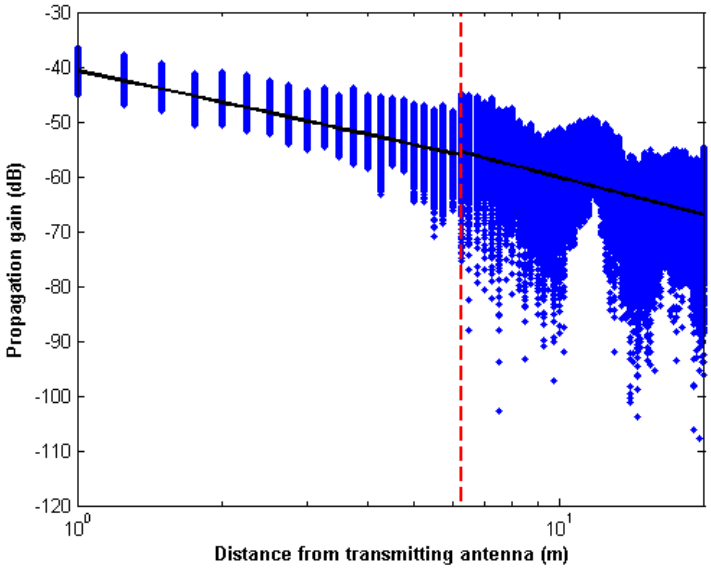


Figura 1.27: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.6531 + 19.415\log_{10} d \;\; d \leq 6.25 \\ 37.4147 + 22.746\log_{10}\left(\frac{d}{6.25}\right) \;\; 6.25 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{1.6}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.9415 y n2=2.2746. El exponente n_1 es inferior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 supera el exponente de propagación.

Hasta una distancia de 6.25 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

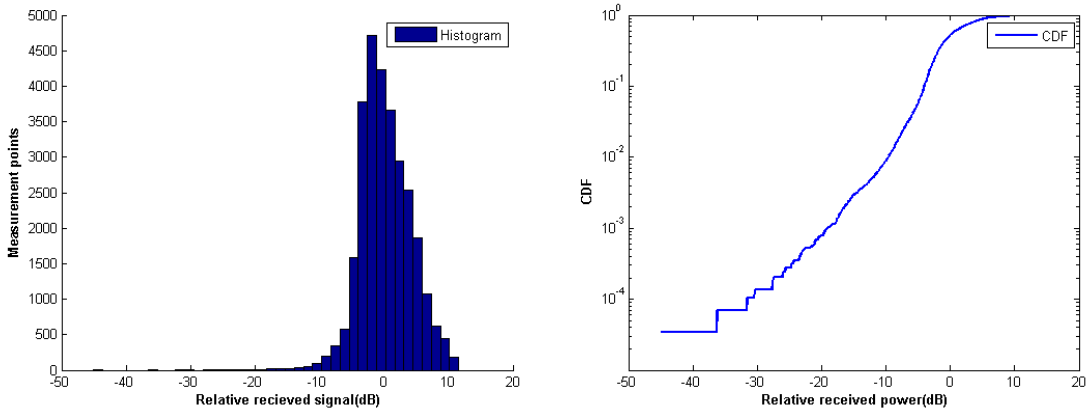


Figura 1.28: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

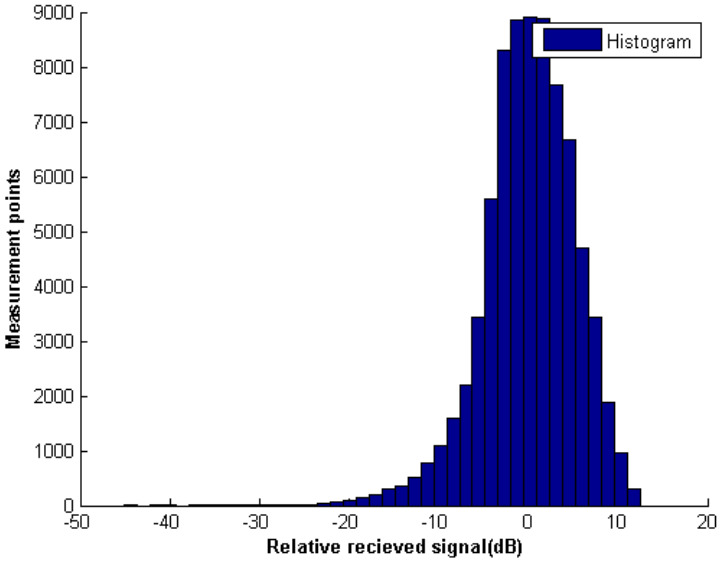


Figura 1.29: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

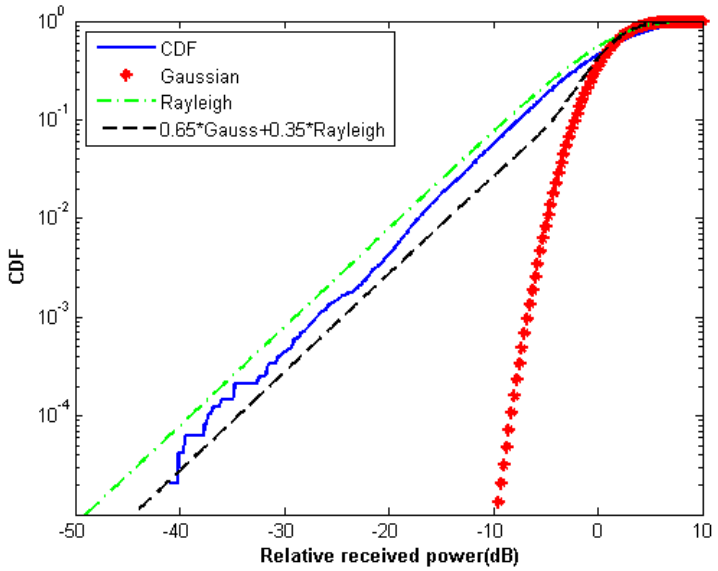


Figura 1.30: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (65%, μ=1, σ=2.5) y Rayleigh (35%).

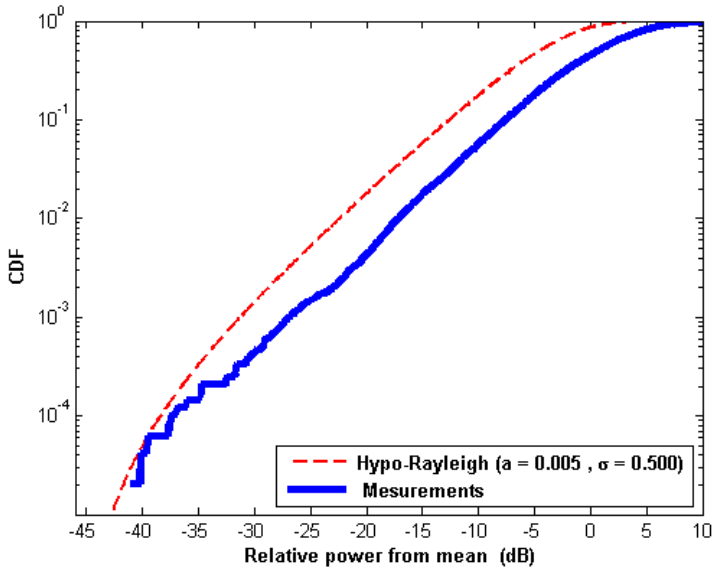


Figura 1.31: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.005, σ=0.500).

1.3 Banda de 5.5 GHz

Entorno: Pasillo RFCAS, Planta 1, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 5.5GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a tres alturas diferentes: 1m, 1.4m y 1.8m.

Distancia: La antena emisora se quedará fija mientras que la antena receptora se colocará a una distancia de un metro de la emisora y luego se irá variando su posición 0.25m hasta llegar a los 20m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 5.34 GHz a 5.66 GHz. Ancho de banda de 320 MHz.

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [5.34-5.66] GHz a una altura de 1m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

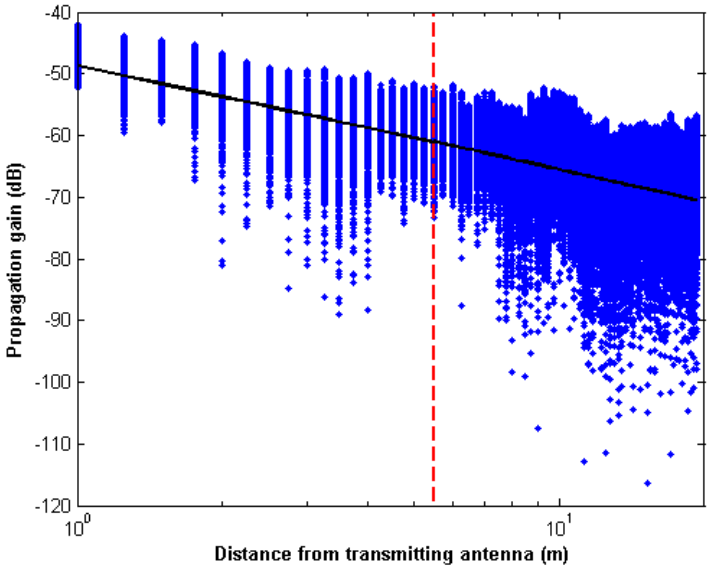


Figura 1.32: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 48.6575 + 16.863\log_{10} d & d \leq 5.5 \\ 48.1281 + 17.420\log_{10}\left(\frac{d}{5.5}\right) & 5.5 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (1.7)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.6863 y n2=1.7420. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 5.5 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

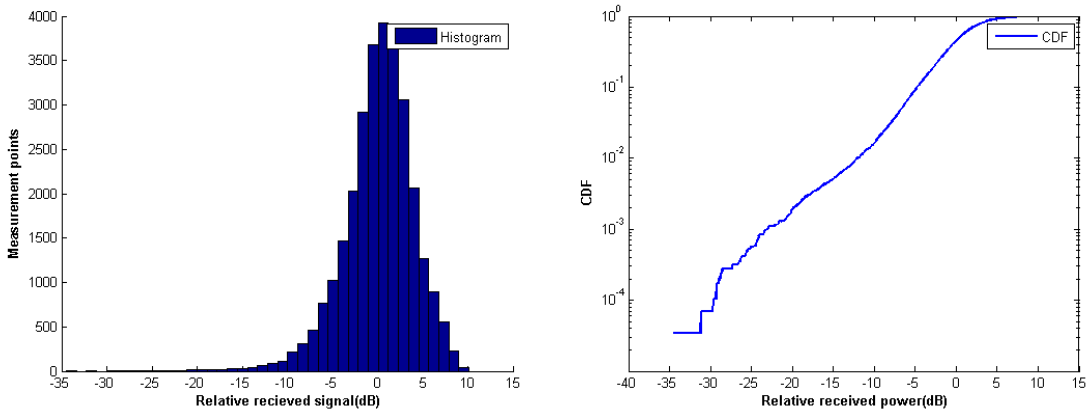


Figura 1.33: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

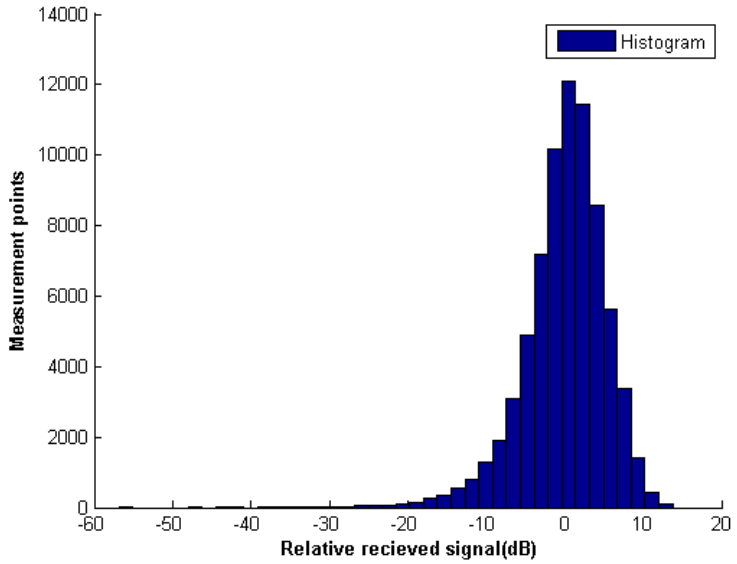


Figura 1.34: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

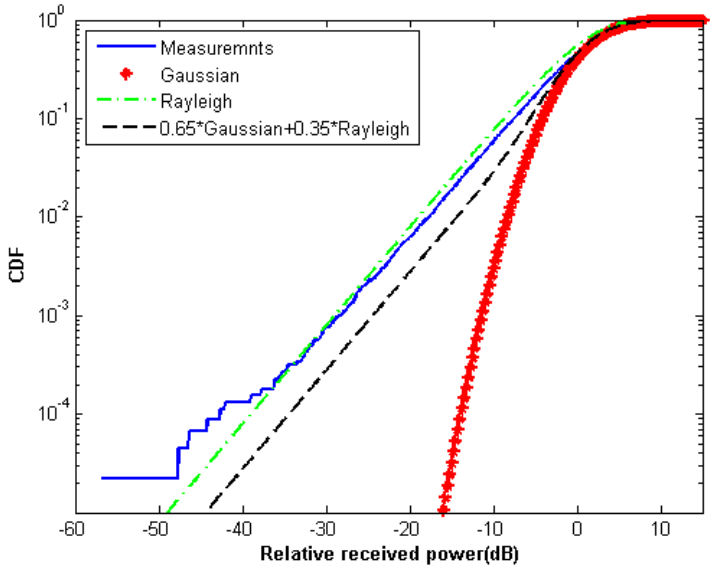


Figura 1.35: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (65%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (35%).

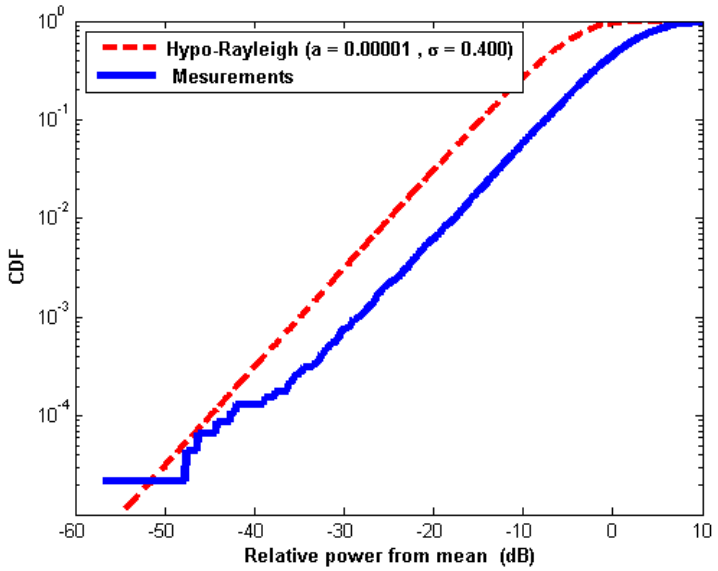


Figura 1.36: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.00001, σ=0.40000).

La figura (1.37) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [5.34-5.66] GHz a una altura de 1.4m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

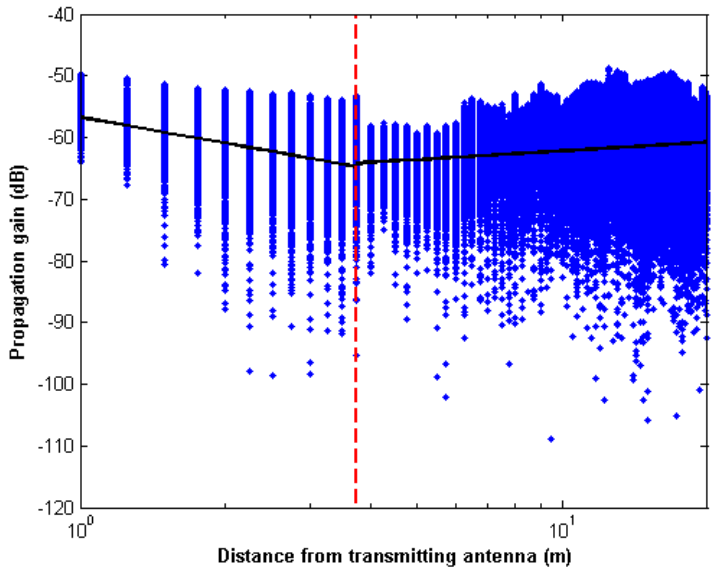


Figura 1.37: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 56.7214 + 13.981 \log_{10} d & d \leq 3.75 \\ 66.9167 - 4.707 \log_{10}\left(\frac{d}{3.75}\right) & 3.75 < d \leq d_{max} \end{cases} \qquad (1.8)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.3981 y n2=-0.4707. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 3.75 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

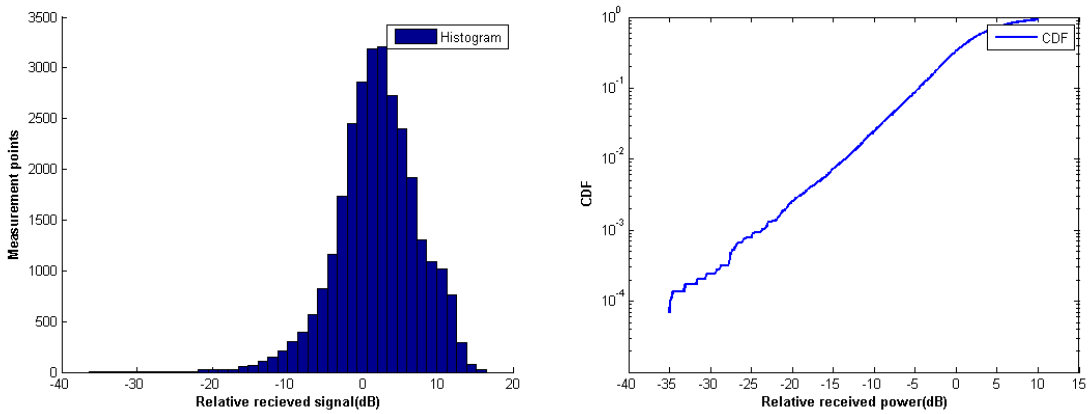


Figura 1.38: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

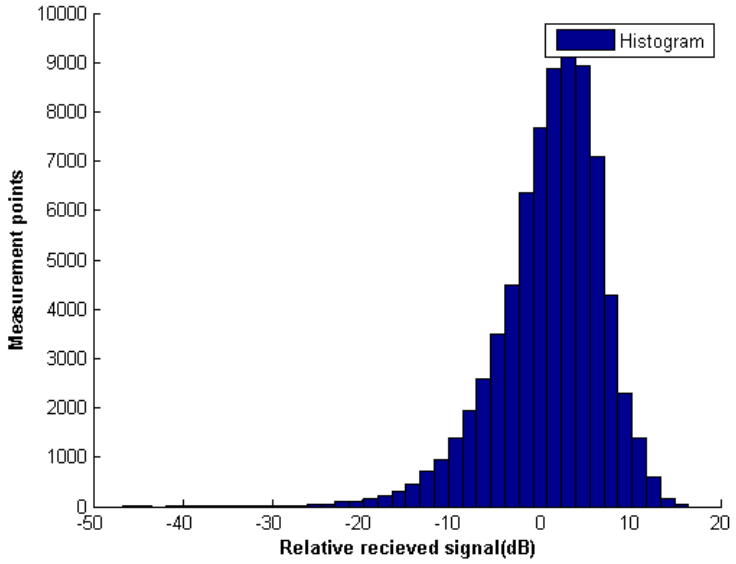


Figura 1.39: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

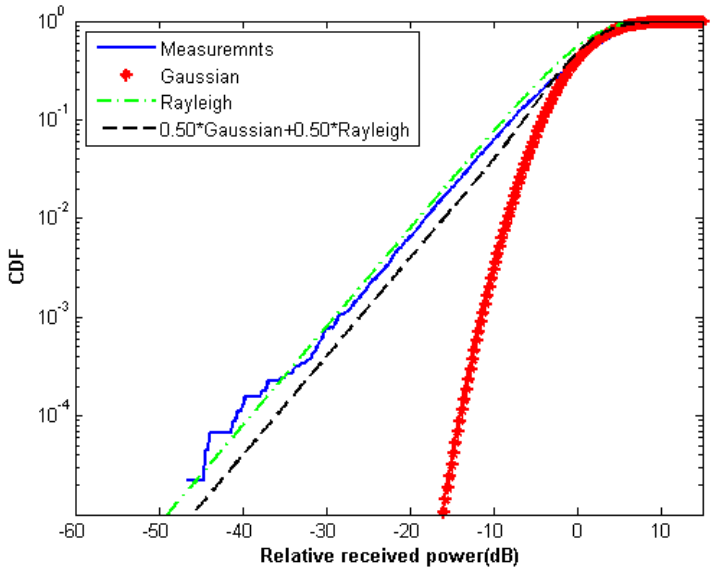


Figura 1.40: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (50%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (50%).

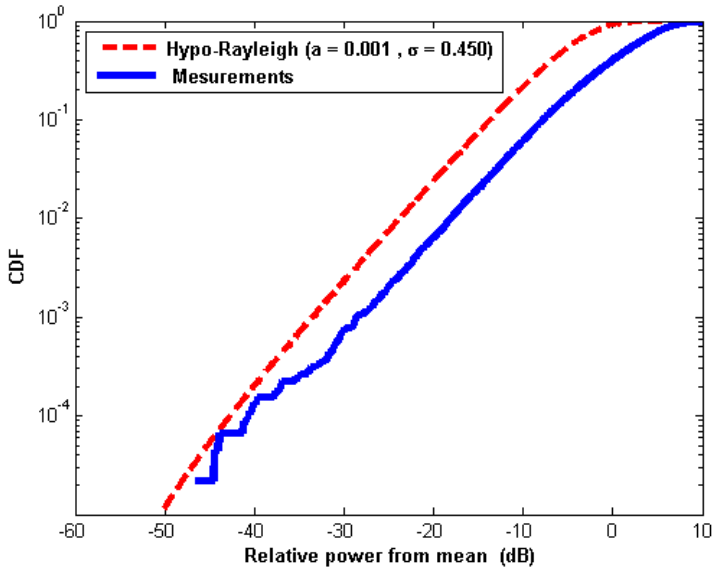


Figura 1.41: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.001, σ=0.450).

La figura (1.42) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [5.34-5.66] GHz a una altura de 1.8m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

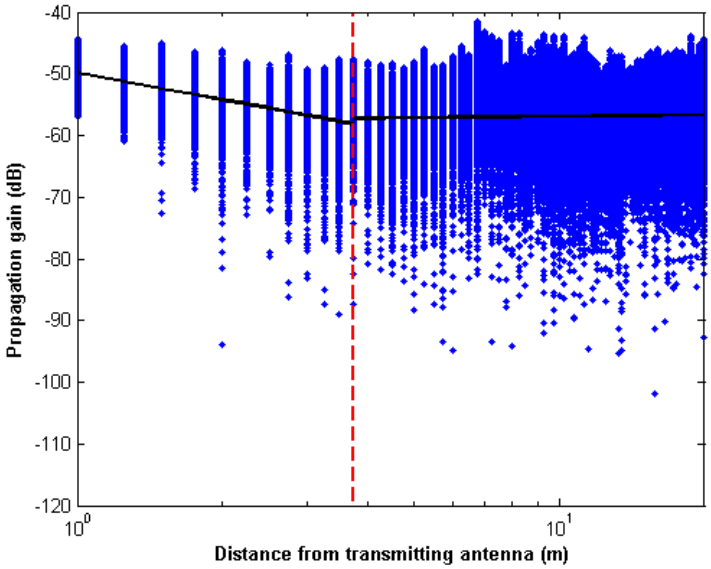


Figura 1.42: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 49.8820 + 14.418\log_{10} d & d \leq 3.75 \\ 57.6992 - 0.804\log_{10}\left(\frac{d}{3.75}\right) & 3.75 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (1.9)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.4418 y n2=-0.0804. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 3.75 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

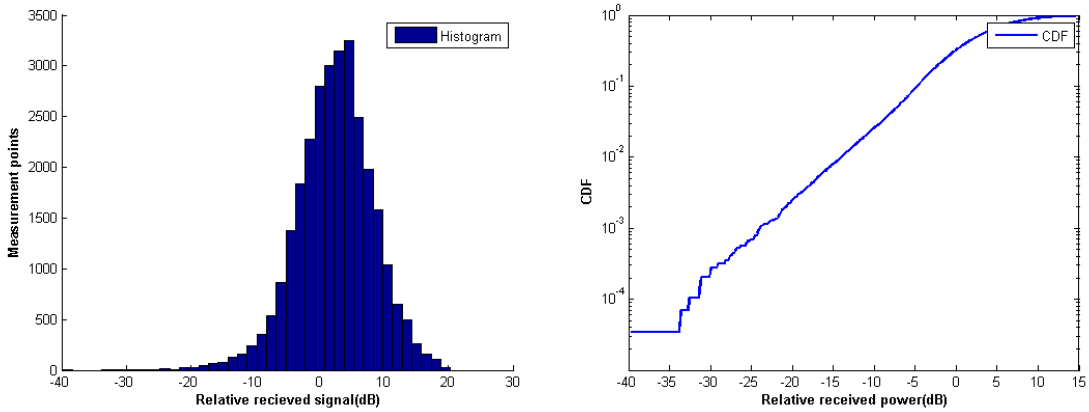


Figura 1.43: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

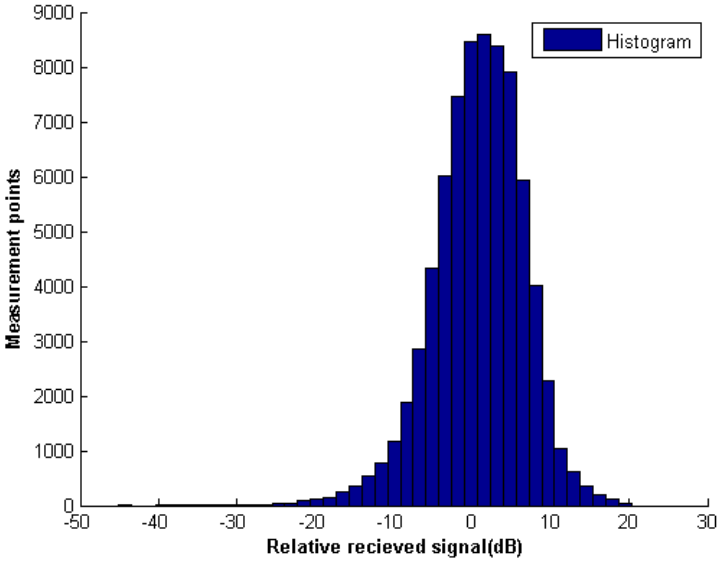


Figura 1.44: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

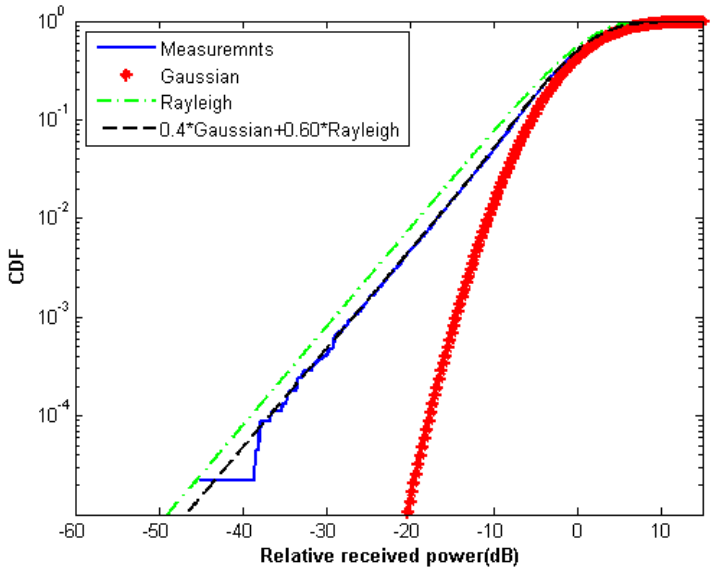


Figura 1.45: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (40%, μ=1, σ=5) y Rayleigh (60%).

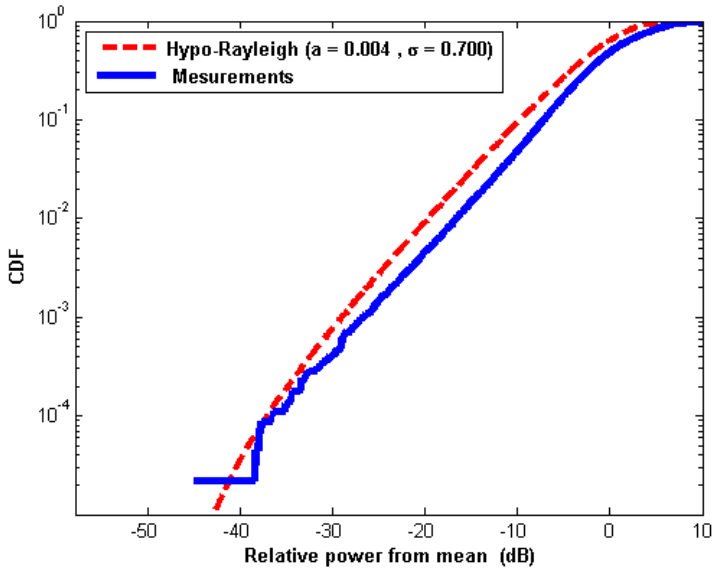


Figura 1.46: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.004, σ=0.700).

2 Escenario 5: Pasillo Cámara Anecoica, Planta 1, Edificio C

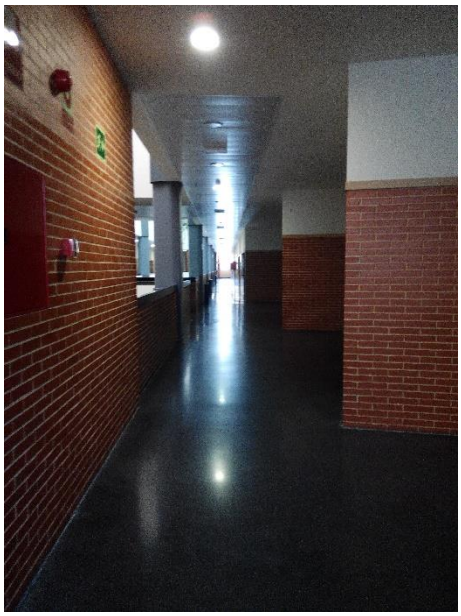


Figura 2.1: Escenario 5

2.1 Banda 2.4 GHz

Entorno: Pasillo Cámara Anecoica, Planta 1, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 2.4GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a tres alturas diferentes: 1m, 1.4m y 1.8m.

Distancia: La antena emisora se mantendrá fija mientras que la antena receptora se colocará a una distancia de un metro de la emisora y luego se irá variando su posición 0.25m hasta llegar a los 20m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 2.36 GHz a 2.44 GHz. Ancho de banda de 80 MHz.

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [2.36-2.44] GHz a una altura de 1 metro, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

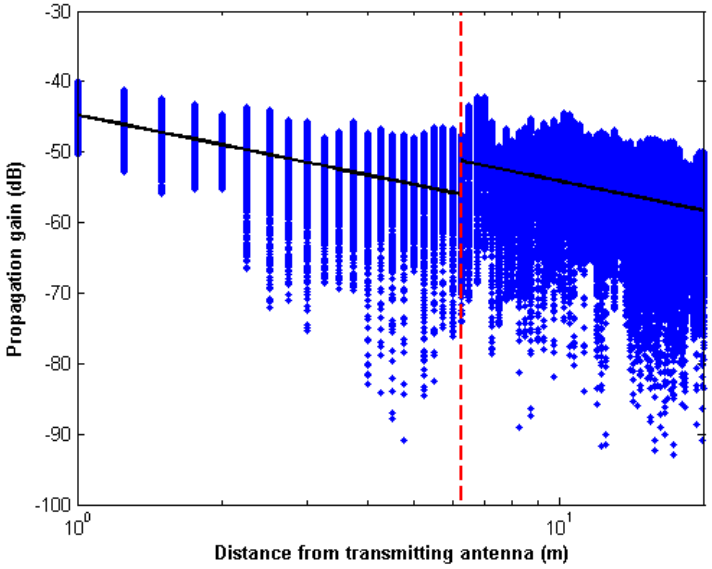


Figura 2.2: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 44.7599 + 14.140\log_{10} d & d \leq 6.25 \\ 40.0890 + 14.035\log_{10}\left(\frac{d}{6.25}\right) & 6.25 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (2.1)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos: n_1=1.4140 y n2=1.4035. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 8 metros se modelará como espacio libre mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

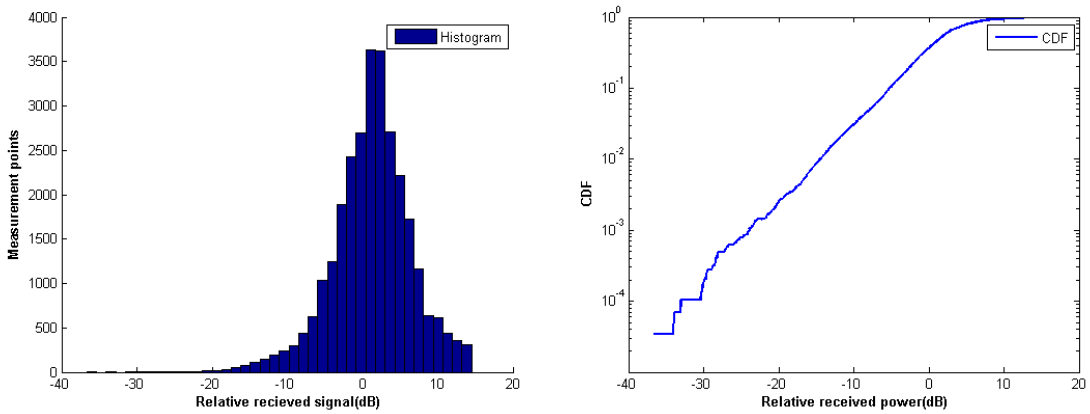


Figura 2.3: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

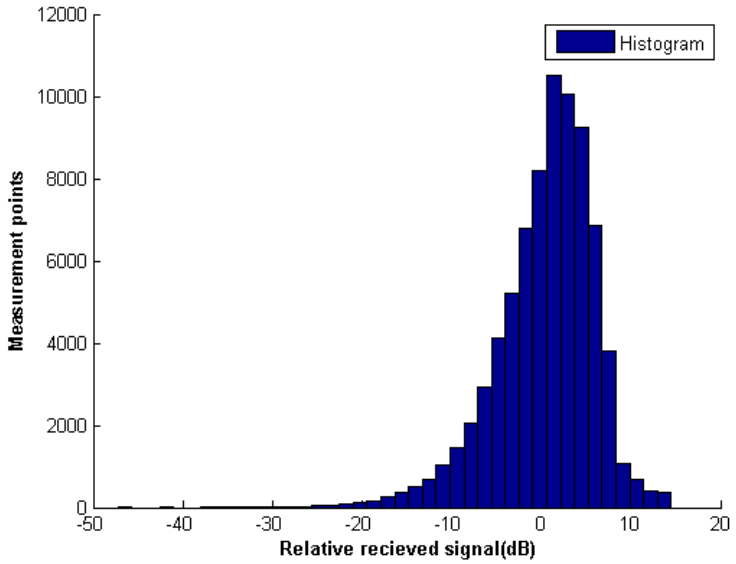


Figura 2.4: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

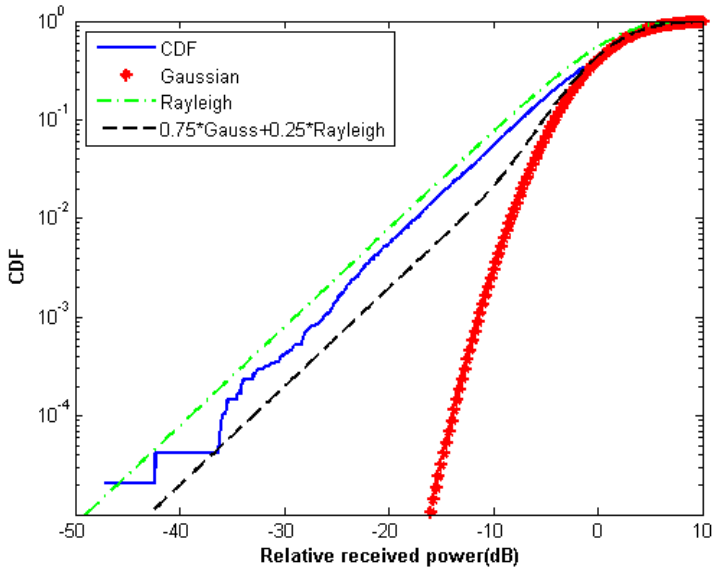


Figura 2.5: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (75%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (25%).

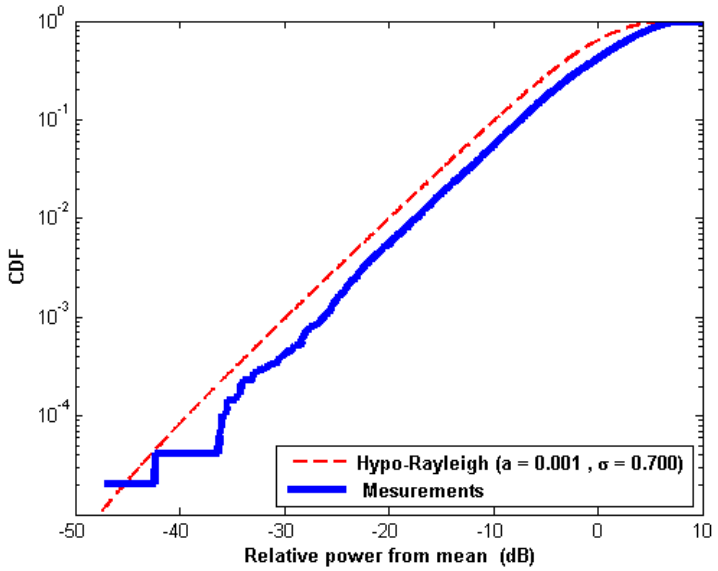


Figura 2.6: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1 metro

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución casi Hyper-Rayleigh (a=0.001, σ=0.700).

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [2.36-2.42] GHz a una altura de 1.4m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

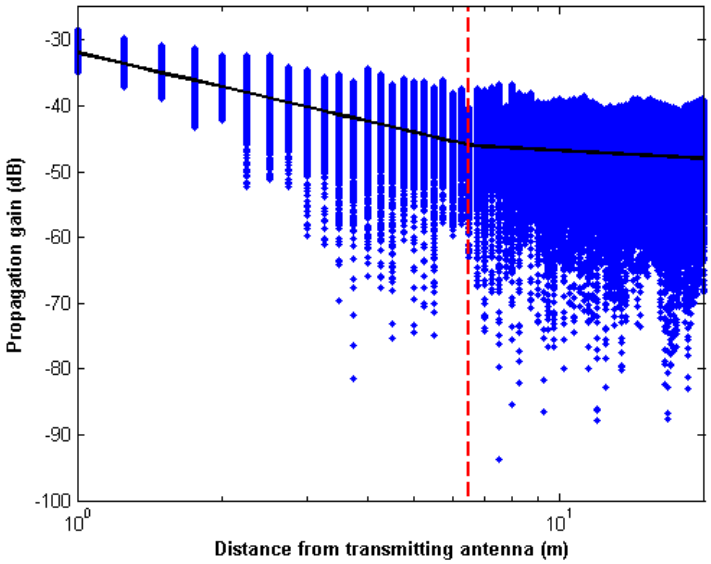


Figura 2.7: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 31.9362 + 17.305\log_{10} d & d \leq 6.5 \\ 42.7343 + 4.074\log_{10}\left(\frac{d}{6.5}\right) & 6.5 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (2.2)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos: n_1=1.7305 y n2=0.4074. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 6.25 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

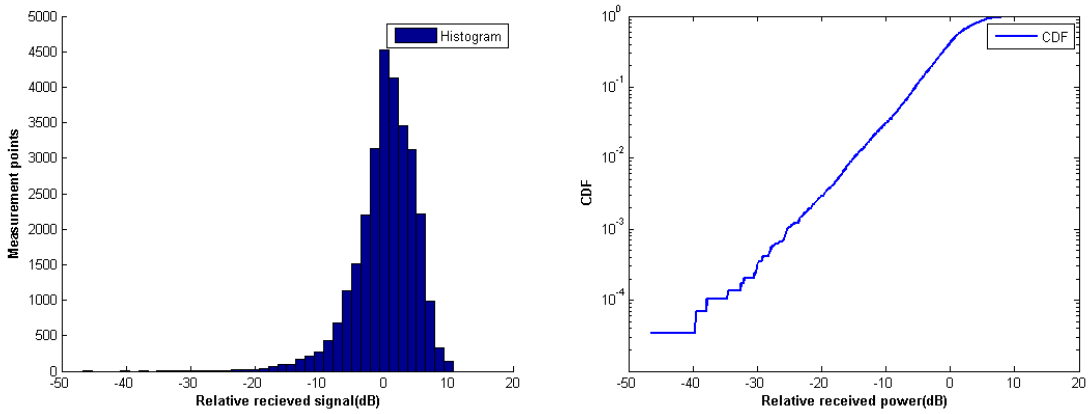


Figura 2.8: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

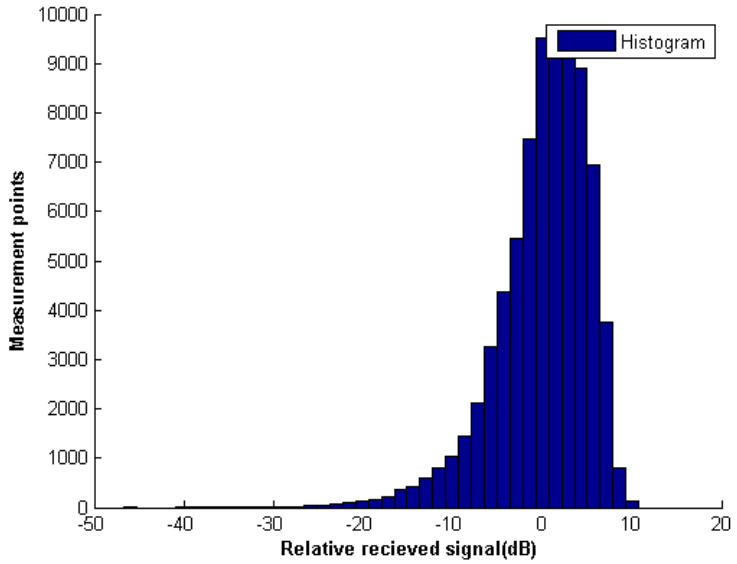


Figura 2.9: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

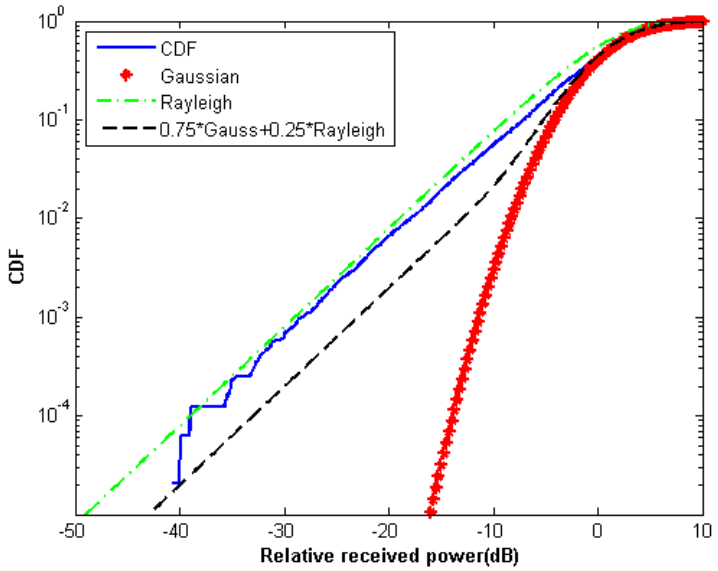


Figura 2.10: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (75%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (25%).

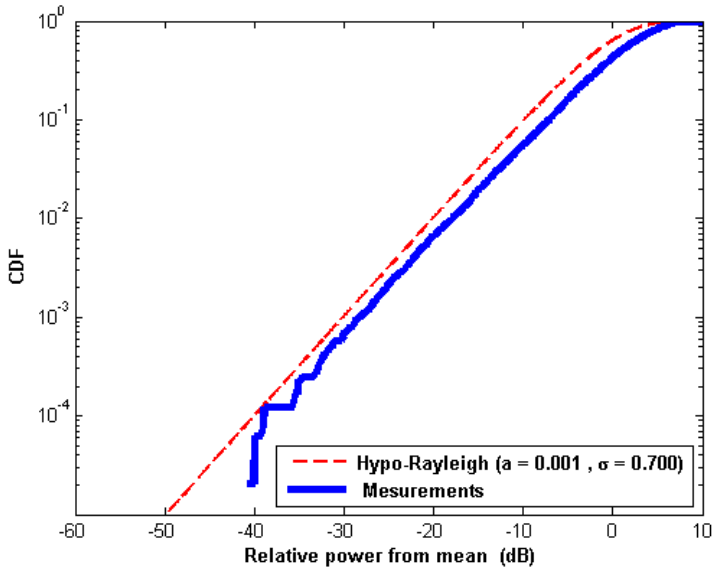


Figura 2.11: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.4 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.001, σ=0.700).

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [2.36-2.44] GHz a una altura de 1.8m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

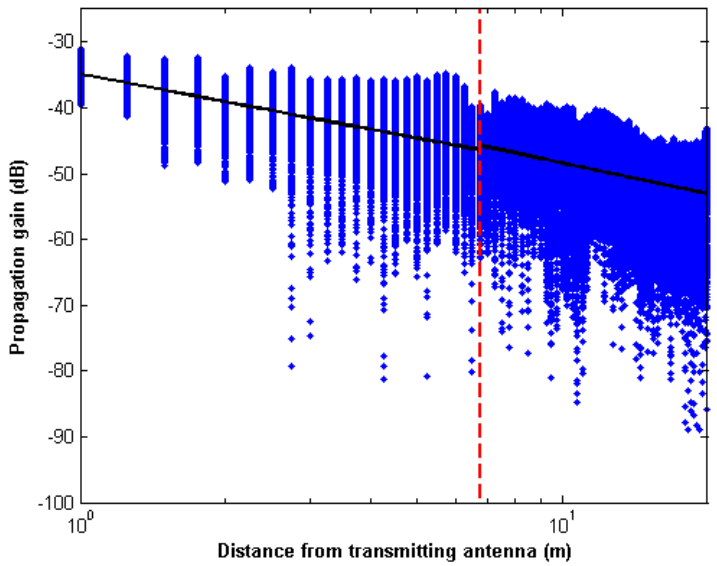


Figura 2.12: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB)\begin{cases} 34.9432 + 13.867\log_{10} d \;\; d \leq 6.75 \\ 32.8786 + 15.543\log_{10}\left(\frac{d}{6.75}\right) \;\; 6.75 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{2.3}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.3867 y n2=1.5543. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 6.75 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

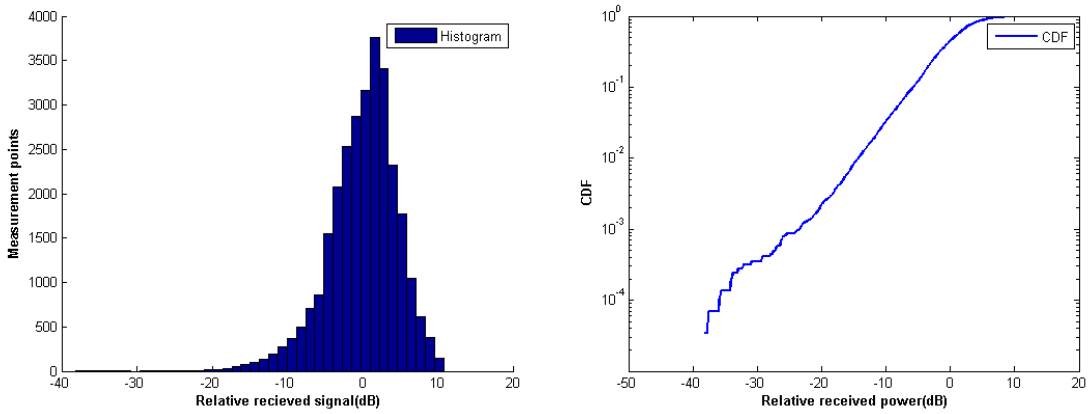


Figura 2.13: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

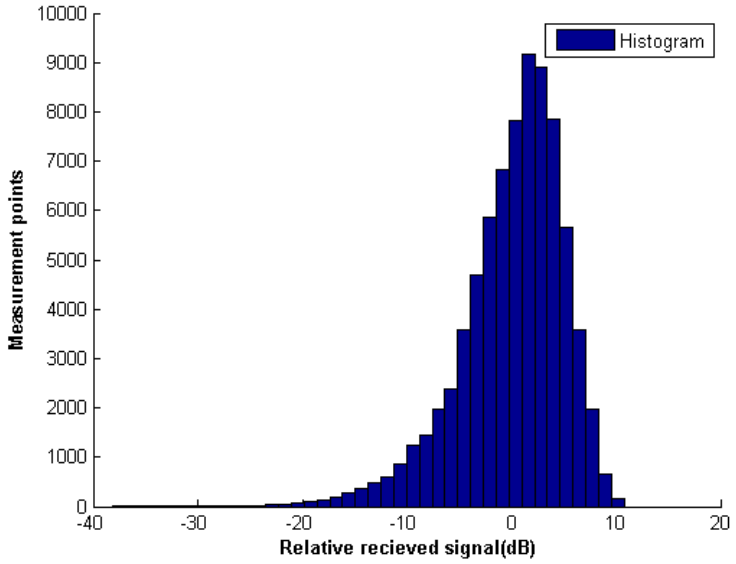


Figura 2.14: Histograma del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

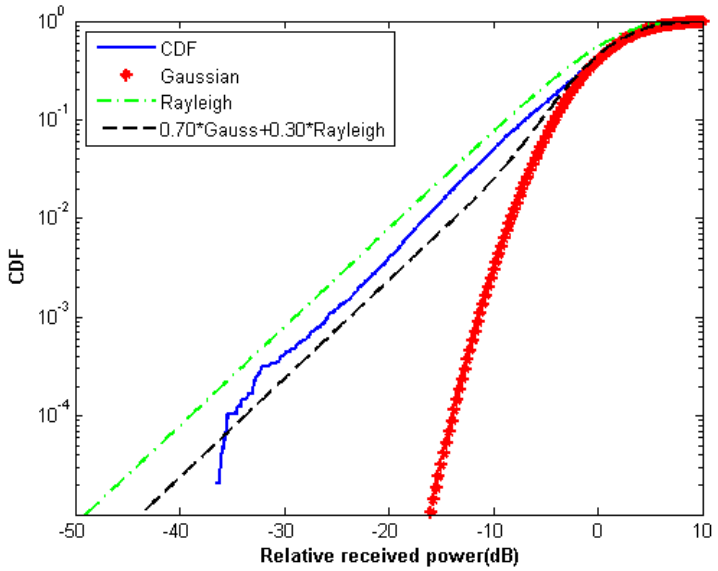


Figura 2.15: CDF del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (70%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (30%).

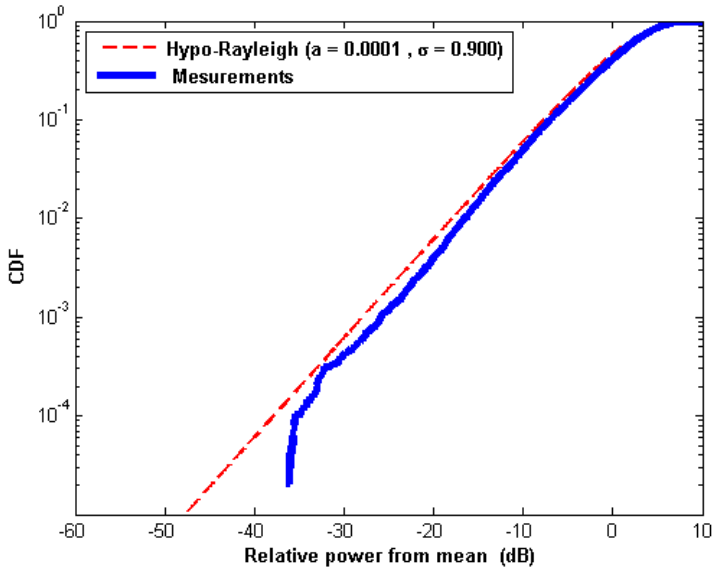


Figura 2.16: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 2.4 GHz a una altura de 1.8 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.0001, σ=0.900).

2.2 Banda de 3.3 GHz

Entorno: Pasillo Cámara Anecoica, Planta 1, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 3.3GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a tres alturas diferentes: 1m, 1.4m y 1.8m.

Distancia: La antena emisora se quedará fija mientras que la antena receptora se colocará a una distancia de un metro de la emisora y luego se irá variando su posición 0.25m hasta llegar a los 20m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 3.2 GHz a 3.4 GHz. Ancho de banda de 200 MHz.

La figura (2.17) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [3.2-3.4] GHz a una altura de 1m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

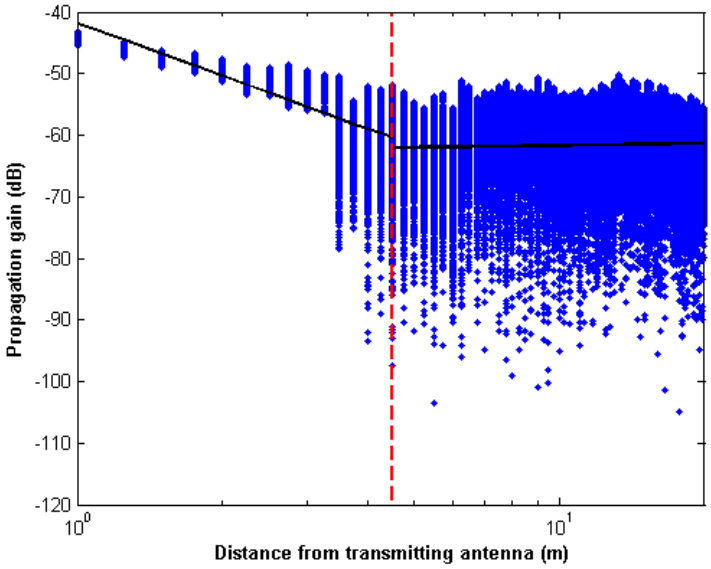


Figura 2.17: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 41.7868 + 28.483\log_{10} d & d \leq 4.5 \\ 62.7934 + 1.124\log_{10}\left(\frac{d}{4.5}\right) & 4.5 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{2.4}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=2.8483 y n_2=0.1124. El exponente n_1 es superior al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2, mientras que el exponente n_2 es inferior exponente de propagación en el espacio libre.

Hasta una distancia de 4.5m el escenario se modelará como espacio libre mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

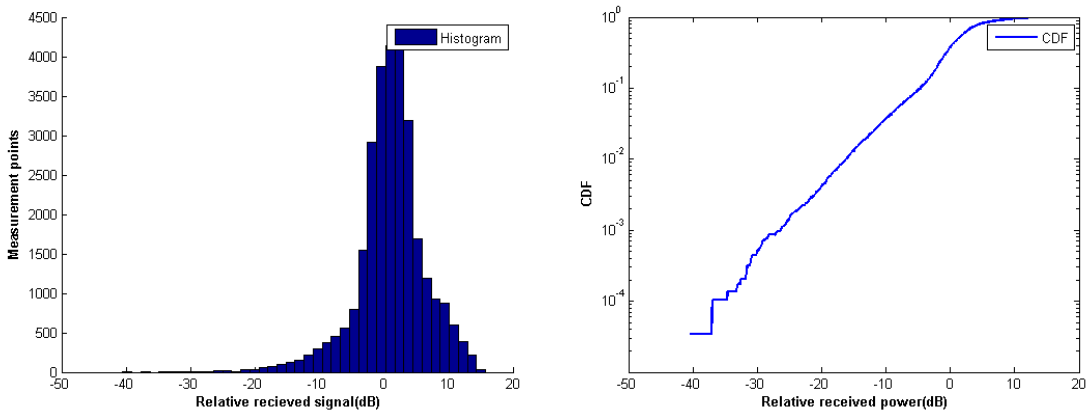


Figura 2.18: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

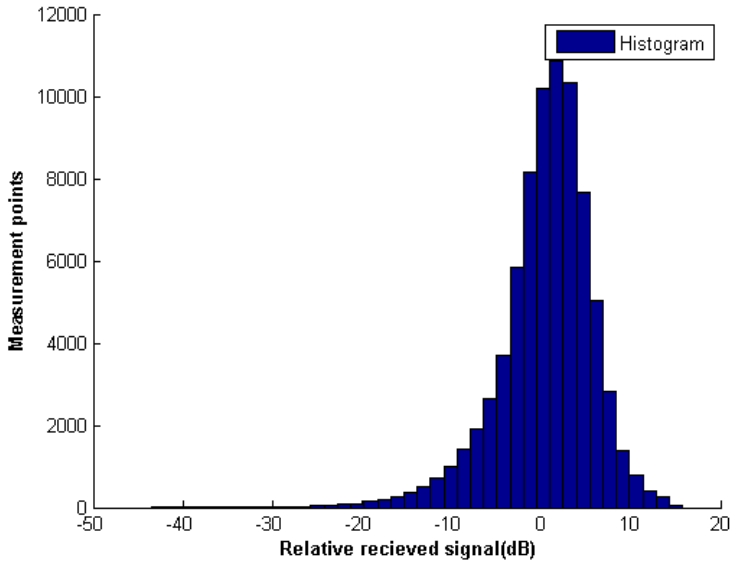


Figura 2.19: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

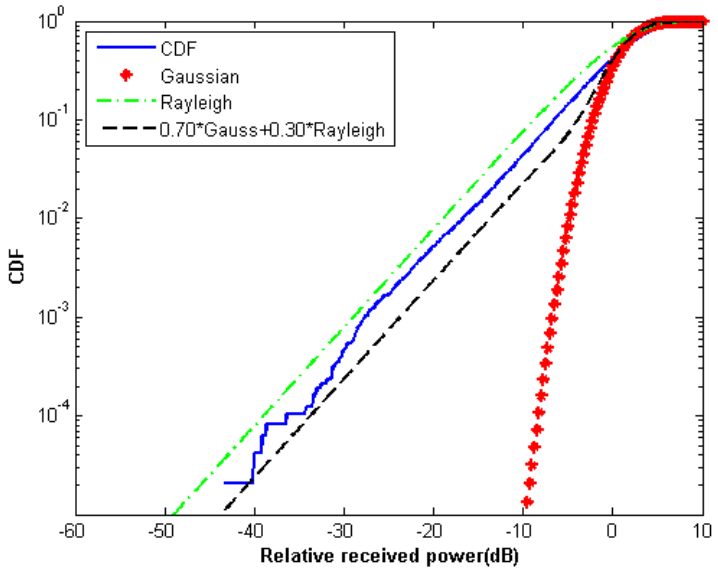


Figura 2.20: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (70%%, μ=1, σ=2.5) y Rayleigh (30%).

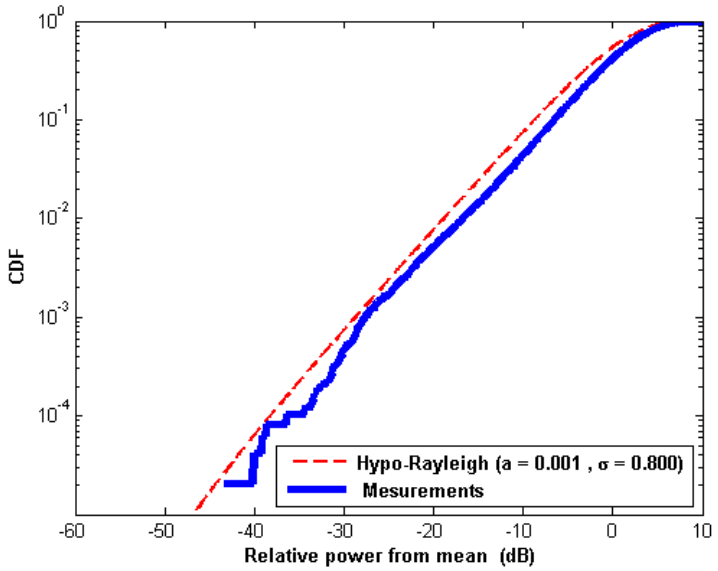


Figura 2.21: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1 metro

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.001, σ=0.800).

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [3.2-3.4] GHz a una altura de 1.4m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

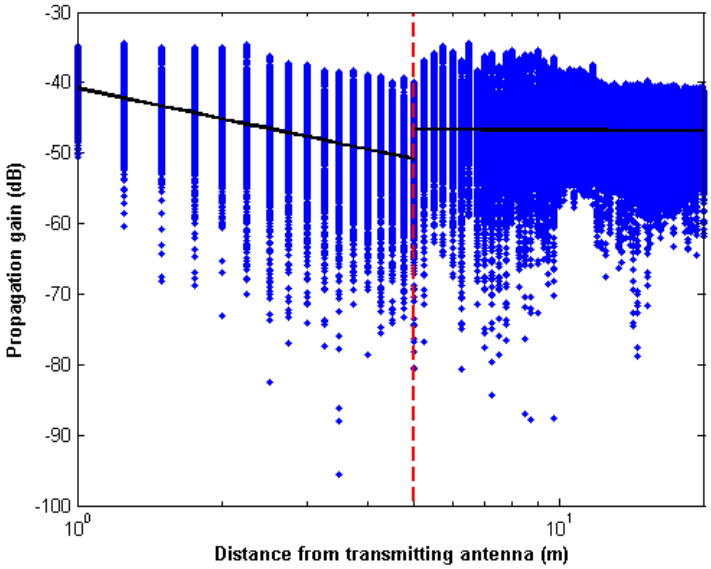


Figura 2.22: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.8181 + 14.373\log_{10} d & d \leq 5 \\ 46.3501 + 0.393\log_{10}\left(\frac{d}{5}\right) & 5 < d \leq d_{max} \end{cases} \tag{2.5}$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.4373 y n_2=0.0393. Tanto el exponente n_1 como el exponente n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 5 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

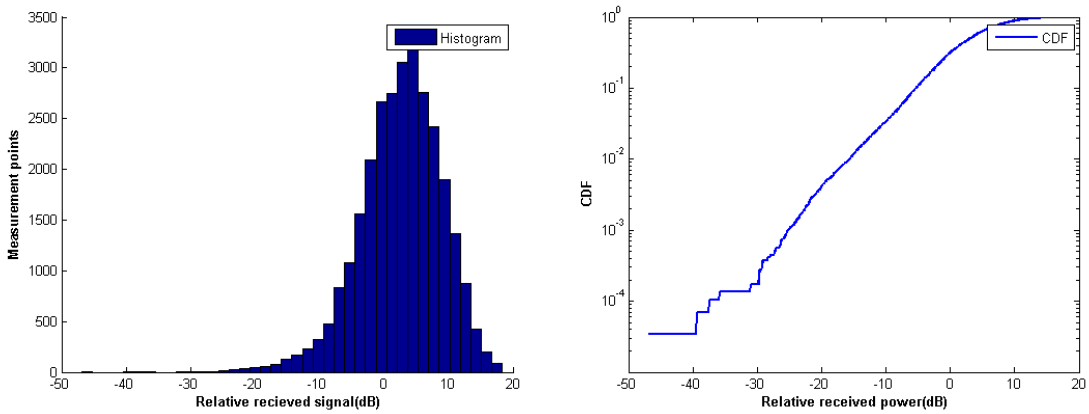


Figura 2.23: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

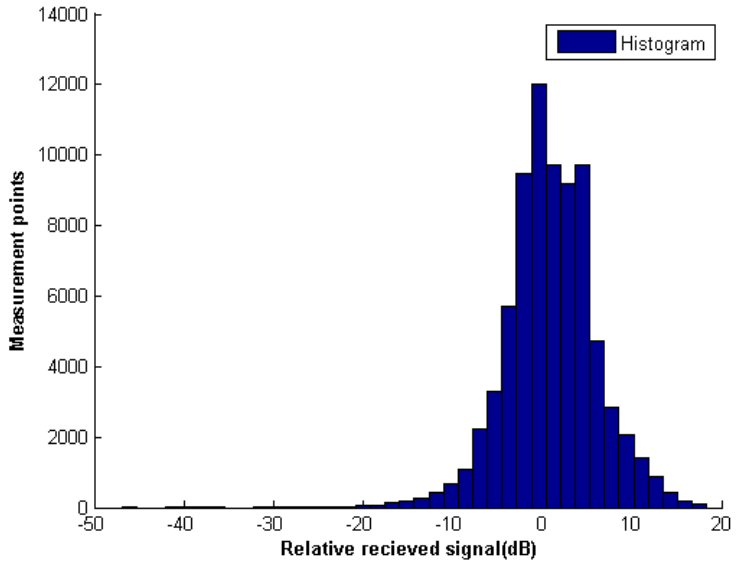


Figura 2.24: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

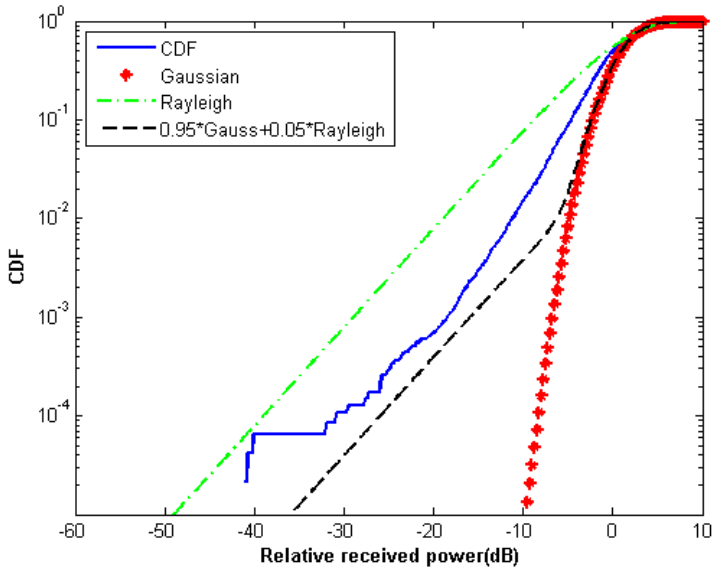


Figura 2.25: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (95%, μ=1, σ=2.5) y Rayleigh (0.5%).

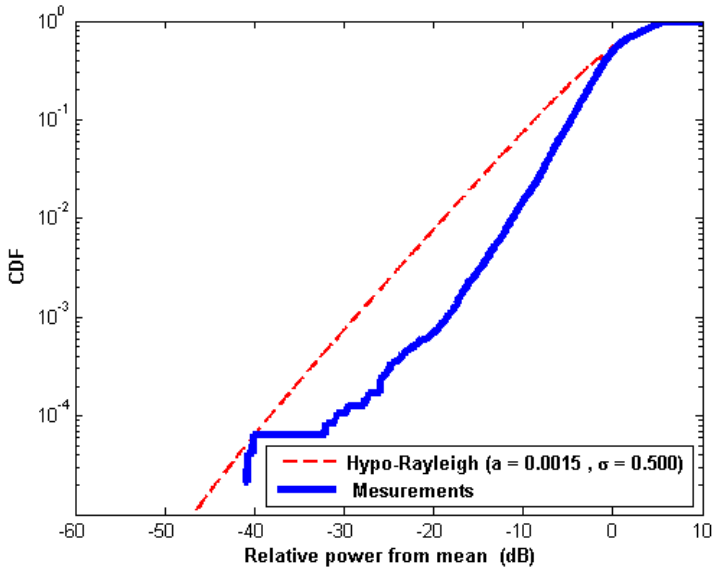


Figura 2.26: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.4 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.0015, σ=0.500).

La figura (2.27) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [3.2-3.4] GHz a una altura de 1.8m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

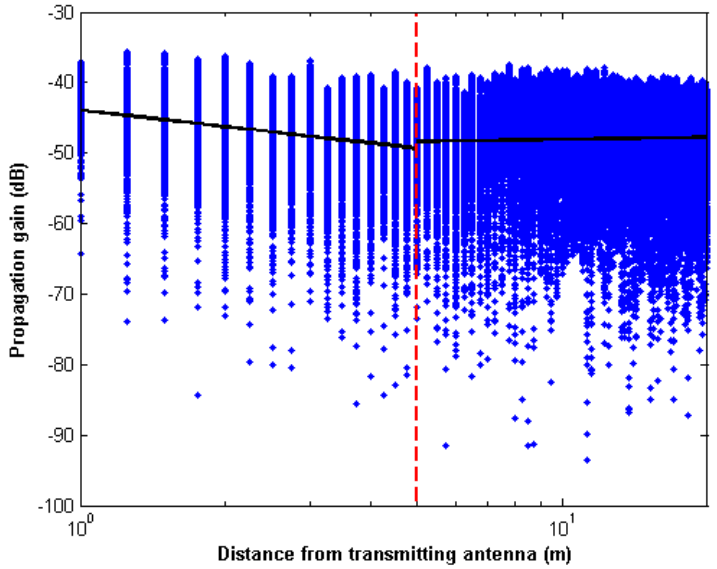


Figura 2.27: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 43.9503 + 7.736\log_{10} d & d \leq 5 \\ 49.0754 - 0.998\log_{10}\left(\frac{d}{5}\right) & 5 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (2.6)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=0.7736 y n2=0.0998. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 5 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

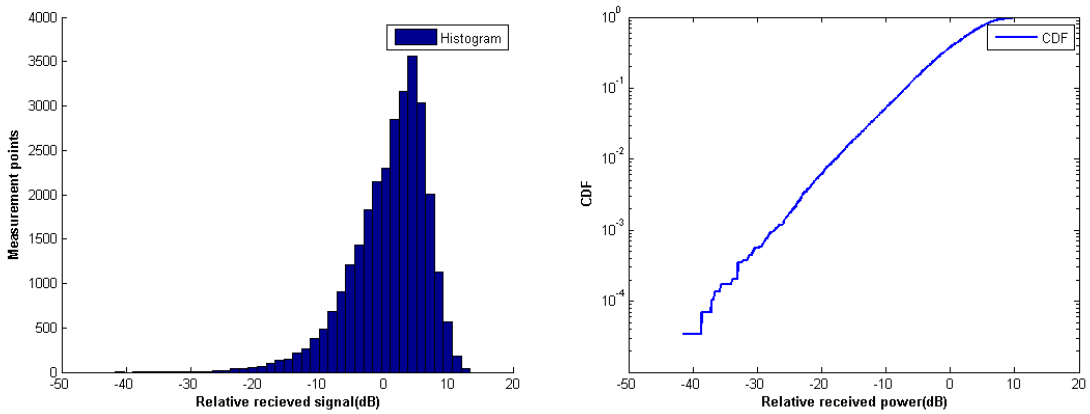


Figura 2.28: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros.

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

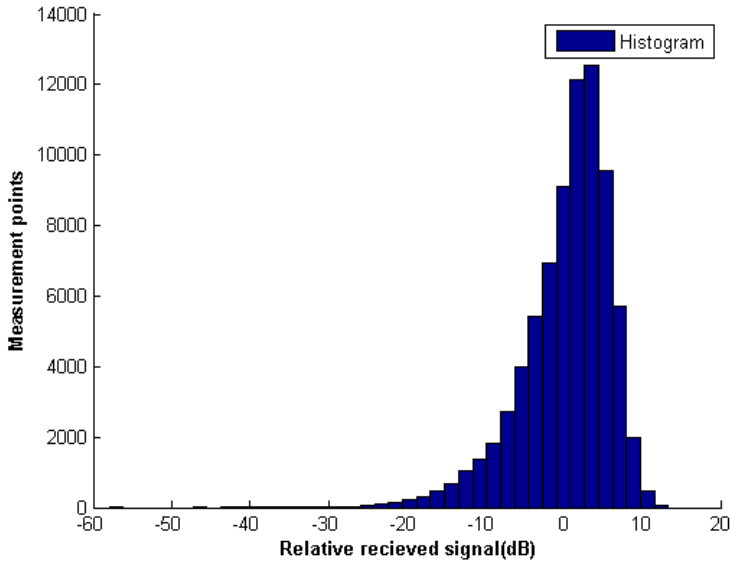


Figura 2.29: Histograma del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

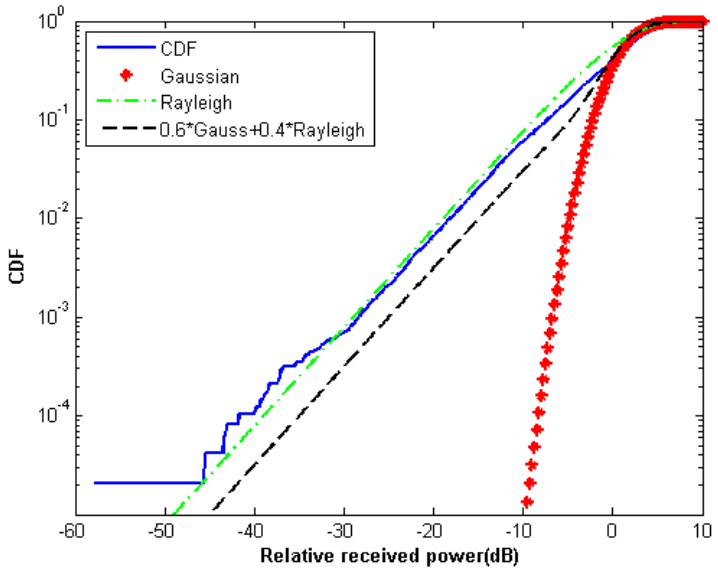


Figura 2.30: CDF del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (60%, μ=1, σ=2.5) y Rayleigh (40%).

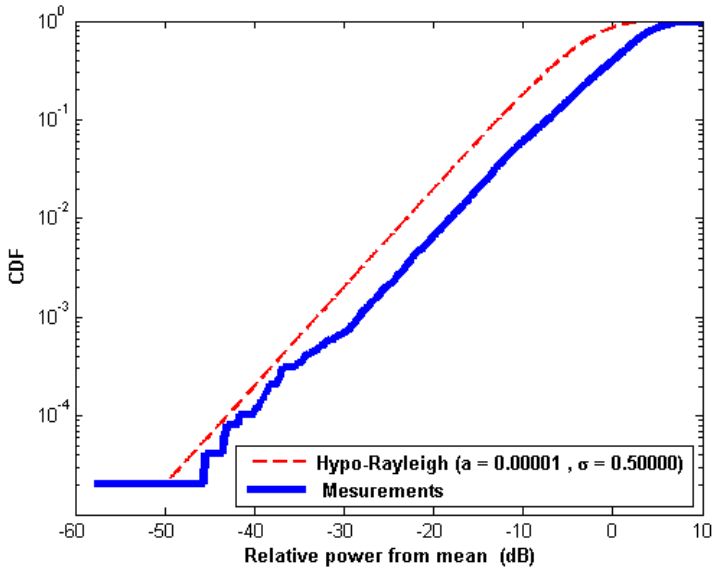


Figura 2.31: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 3.3 GHz a una altura de 1.8 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.00001, σ=0.50000).

2.3 Banda de 5.5 GHz

Entorno: Pasillo Cámara Anecoica, Planta 1, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan dos antenas de 5.5GHz, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a tres alturas diferentes: 1m, 1.4m y 1.8m.

Distancia: La antena emisora se quedará fija mientras que la antena receptora se colocará a una distancia de un metro de la emisora y luego se irá variando su posición 0.25m hasta llegar a los 20m.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 5.34 GHz a 5.66 GHz. Ancho de banda de 320 MHz

La figura representa las pérdidas de propagación en toda la banda [5.34-5.66] GHz a una altura de 1m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

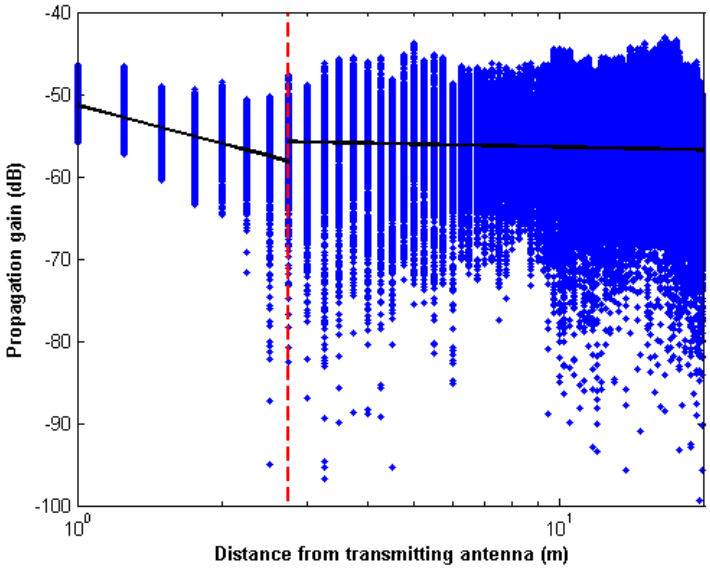


Figura 2.32: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 51.325 + 15.608\log_{10} d & d \leq 2.75 \\ 55.2636 + 1.162\log_{10}\left(\frac{d}{6.75}\right) & 2.75 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (2.7)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.5608 y n2=0.1162. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 2.75 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

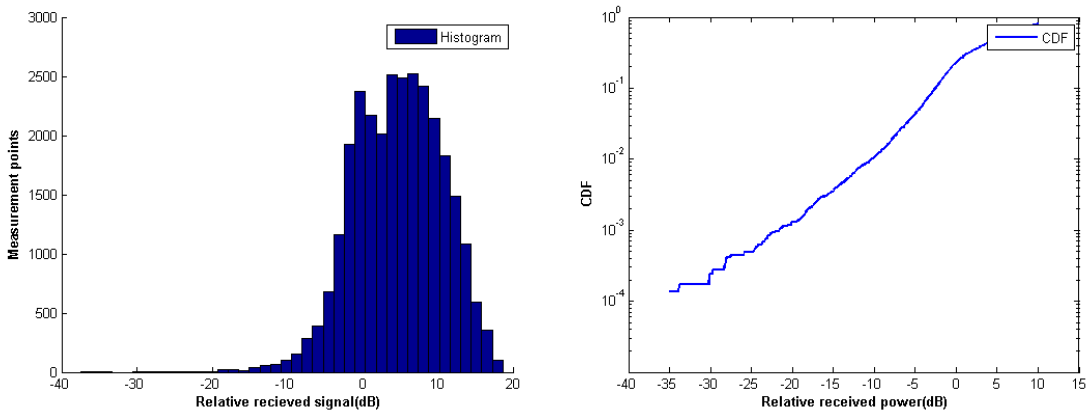


Figura 2.33: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

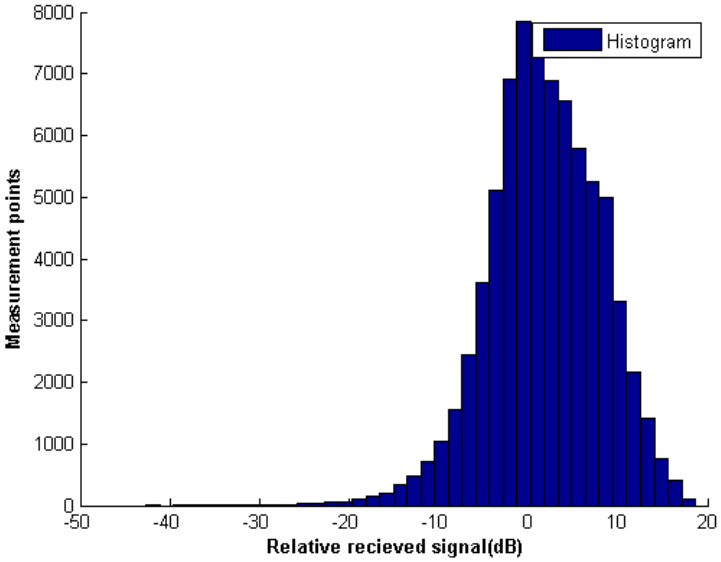


Figura 2.34: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

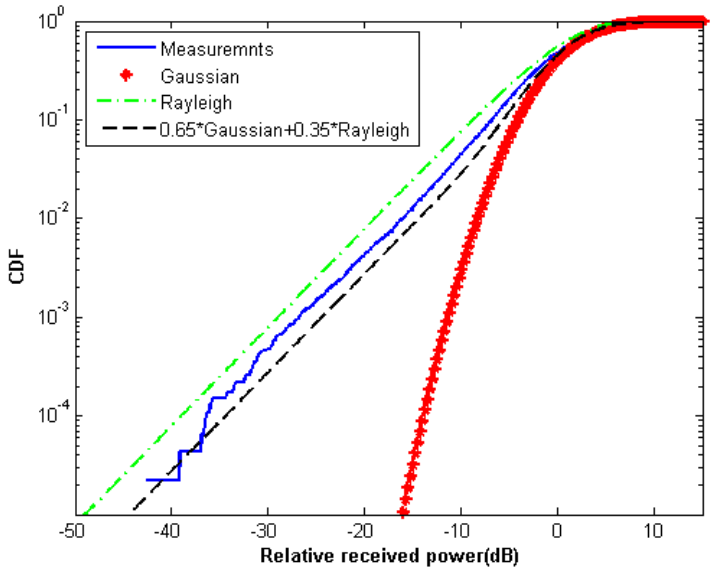


Figura 2.35: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (65%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (35%).

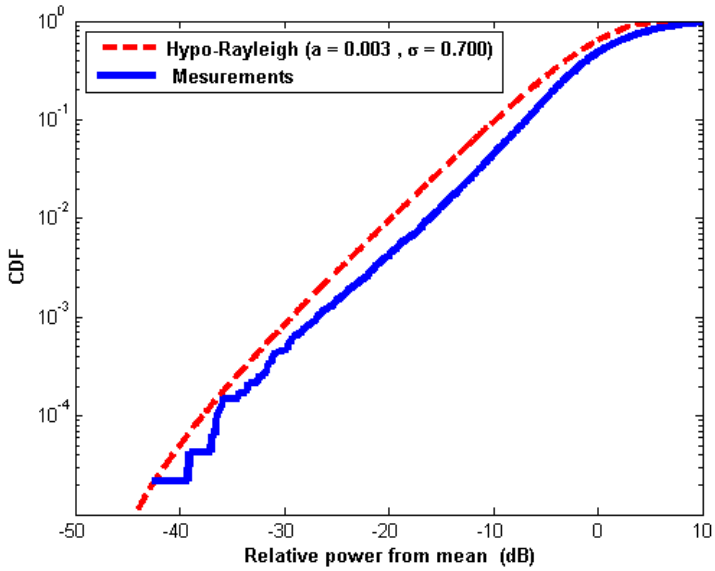


Figura 2.36: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1 metro

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.003, σ=0.700).

La figura (2.37) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [5.34-5.66] GHz a una altura de 1.4m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

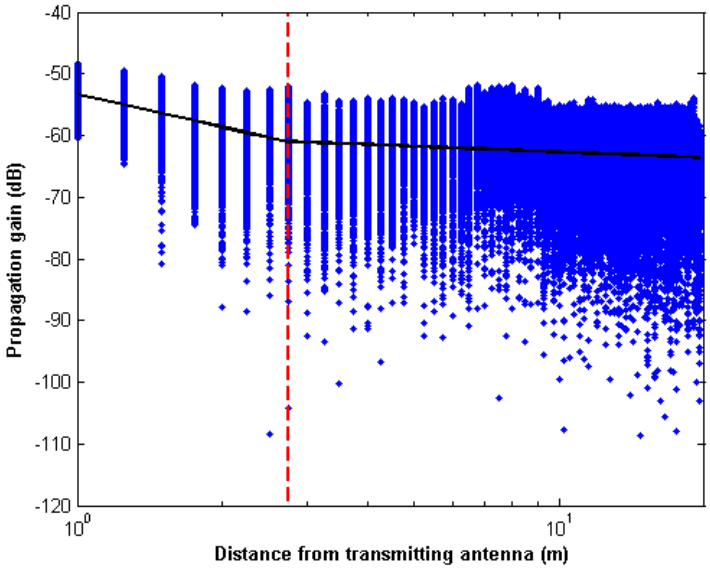


Figura 2.37: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 53.316 + 17.853\log_{10} d & d \leq 2.75 \\ 59.6555 + 3.015\log_{10}\left(\frac{d}{2.75}\right) & 2.75 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (2.8)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.7853 y n2=0.3015. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 2.75 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

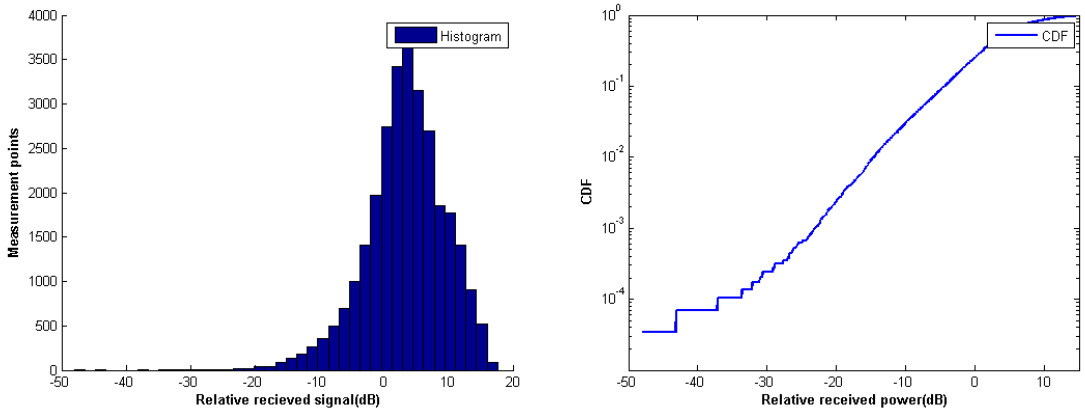


Figura 2.38: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

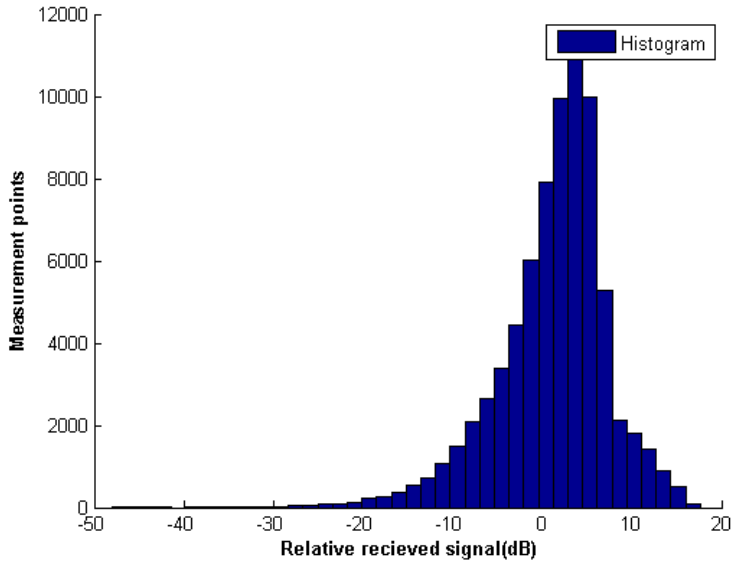


Figura 2.39: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

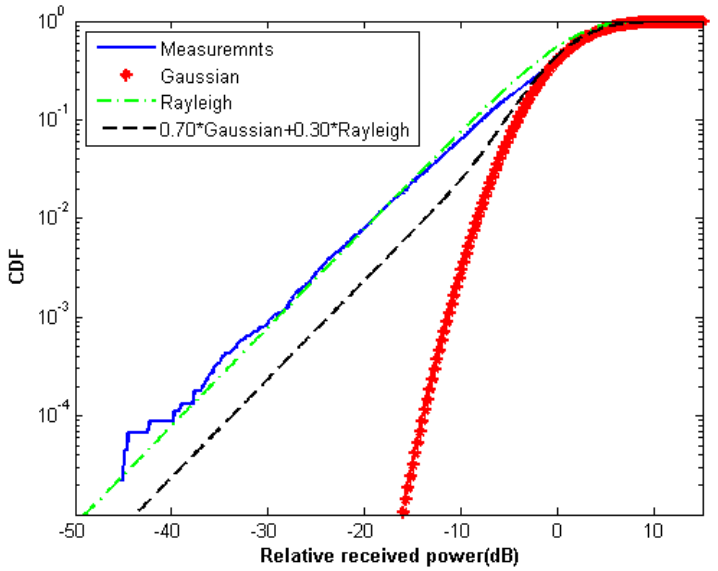


Figura 2.40: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (70%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (30%).

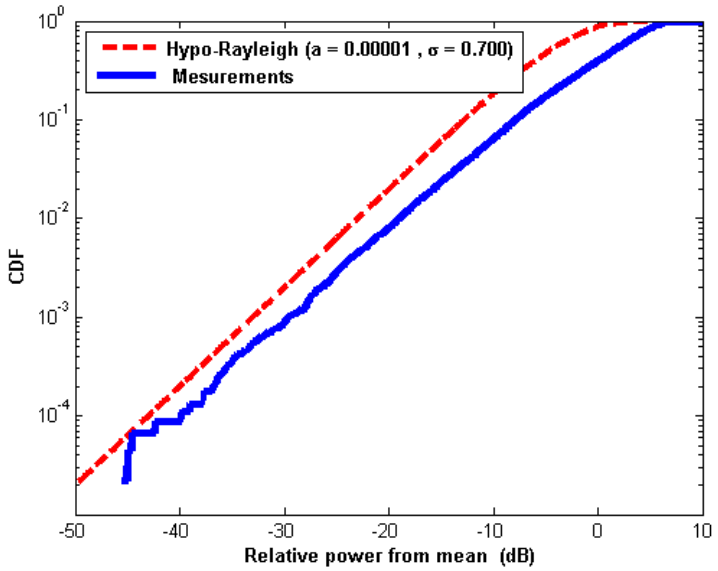


Figura 2.41: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.00001, σ=0.70000).

La figura (2.42) representa las pérdidas de propagación en toda la banda [5.34-5.66] GHz a una altura de 1.8m, con polarización vertical, en función de la distancia de separación entre antenas.

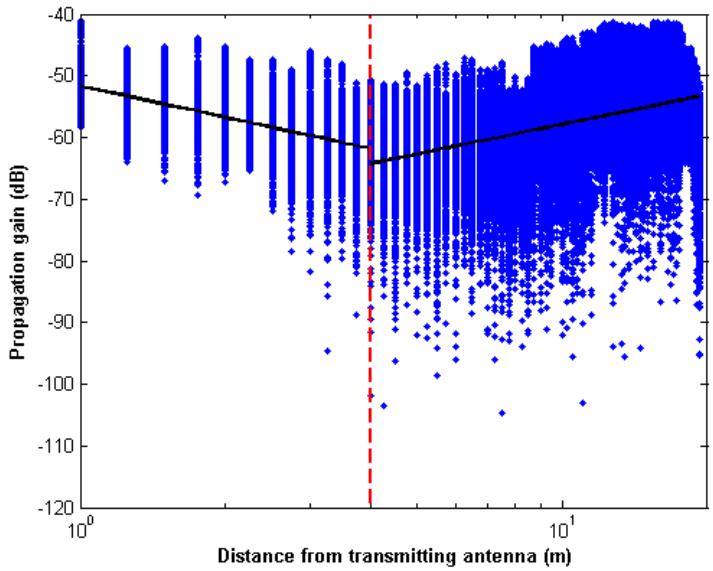


Figura 2.42: Representación de las pérdidas de propagación en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

La aproximación se ha realizado con un modelo de doble pendiente, modelado de la siguiente manera:

$$L_p(dB) = \begin{cases} 51.6846 + 16.892\log_{10} d & d \leq 4 \\ 73.8273 - 15.928\log_{10}\left(\frac{d}{4}\right) & 4 < d \leq d_{max} \end{cases} \quad (2.9)$$

En este modelo se pueden observar dos exponentes de propagación distintos, n_1=1.6892 y n2=-1.5928. Tanto el exponente n_1 como n_2 son inferiores al exponente de propagación en el espacio libre n_{fs}=2.

Hasta una distancia de 4 metros se modelará como espacio libre, mientras que en el segundo tramo se modelará como una combinación de Gaussiana y Rayleigh.

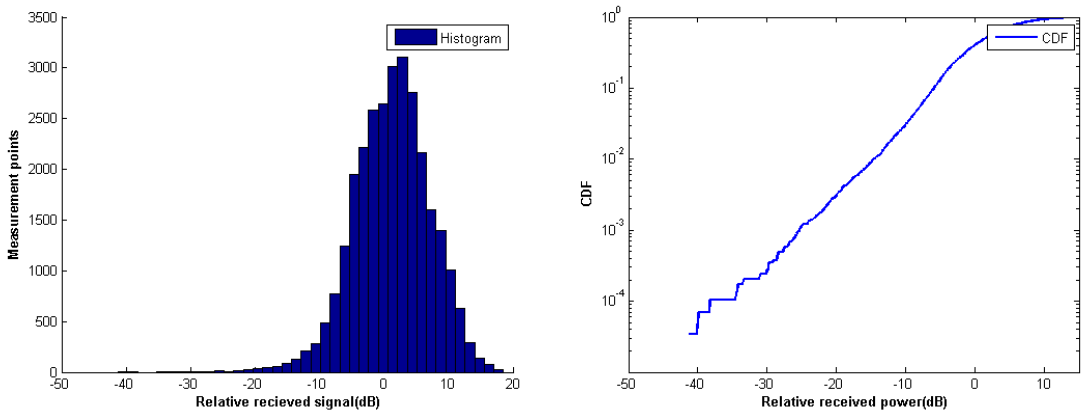


Figura 2.43: Histograma y CDF del primer tramo en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.4 metros

La figura anterior representa el histograma y el CDF del primer tramo.

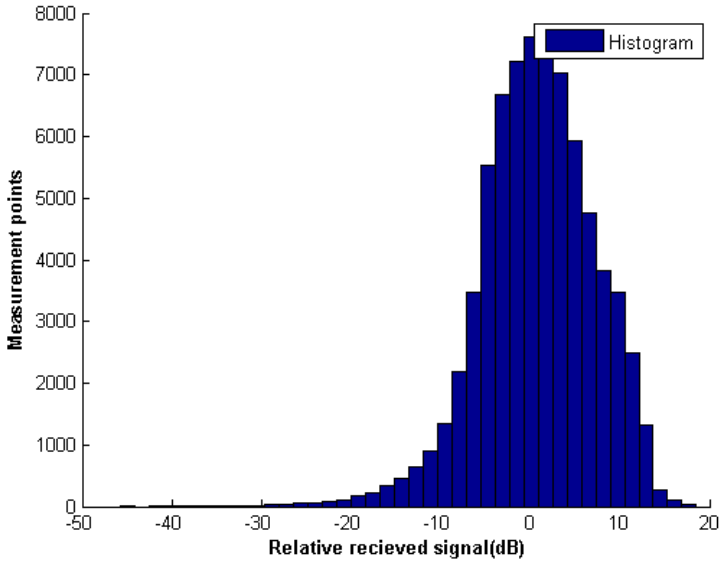


Figura 2.44: Histograma del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

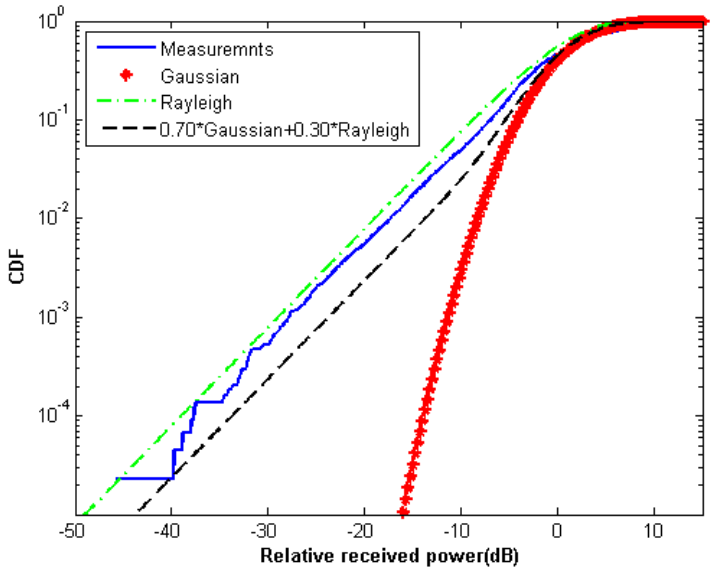


Figura 2.45: CDF del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

Las dos figuras anteriores muestran el histograma y el CDF del segundo tramo. Se ha aproximado a una combinación de Gaussiana (70%, μ=1, σ=4) y Rayleigh (30%).

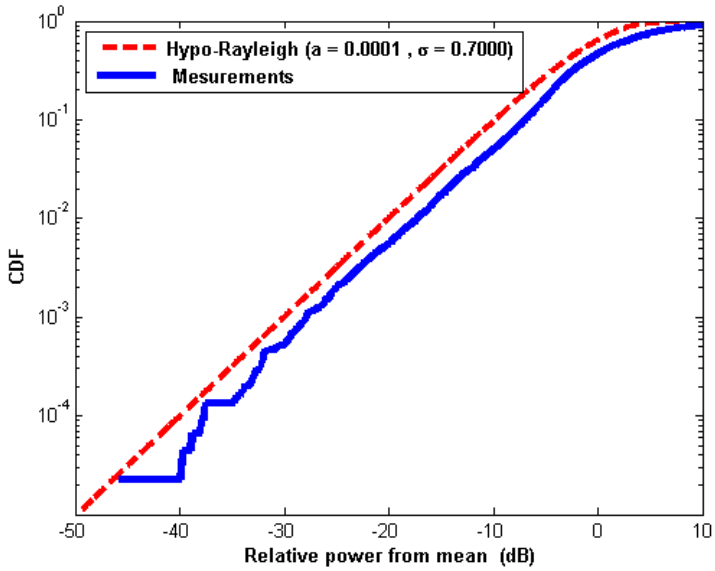


Figura 2.46: Distribución Hypo-Rayleigh del tramo 2 en la banda de 5.5 GHz a una altura de 1.8 metros

En la zona 2 se puede representar la desviación del valor medio por una distribución Hypo-Rayleigh (a=0.003, σ=0.500).

3 Escenario 6: Paredes, Planta 1, Edificio C

3.1 Pared hueco del ascensor

Figura 3.1: Pared hueco del ascensor

Entorno: Pared hueco del ascensor, Planta 1, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan un par antenas de 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz respectivamente, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a una altura de 1.4m.

Distancia: las antenas se situarán entre medias del muro a una distancia de un metro cada una del mismo.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 2.36 GHz a 2.44 GHz con ancho de banda de 80 MHz, toda la banda de 3.2 GHz a 3.4 GHz con ancho de banda de 200 MHz y toda la banda de 5.34 GHz a 5.66 GHz con ancho de banda de 320 MHz.

Calibración: Se han eliminado las pérdidas de los cables y de las antenas para que el analizador de redes sólo refleje las pérdidas que crea el sujeto al interponerse entre las antenas.

Objetivo: Representar las pérdidas causadas por el muro de hormigón y/o ladrillo junto con el ascensor y la caja metálica del extintor en las bandas propuestas.

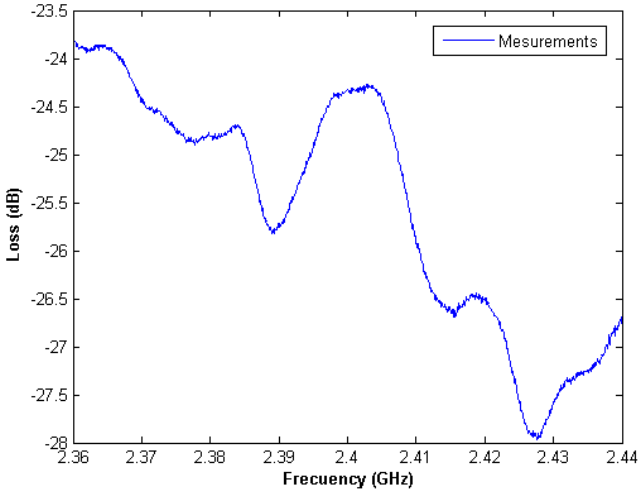


Figura 3.2: Pérdidas del muro del ascensor en la banda de 2.4 GHz

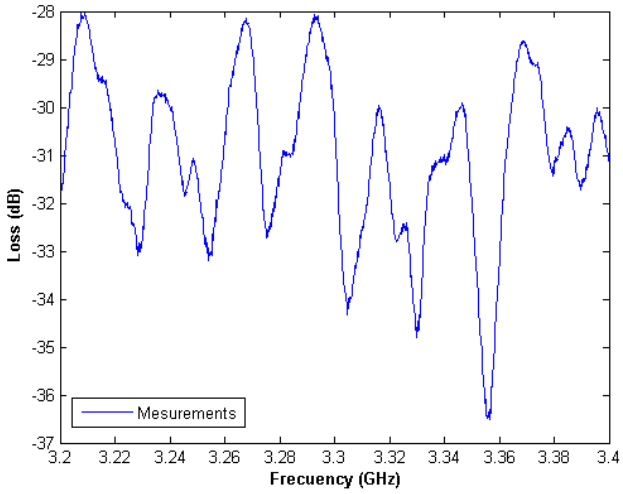


Figura 3.3: Pérdidas del muro del ascensor en la banda de 3.3 GHz

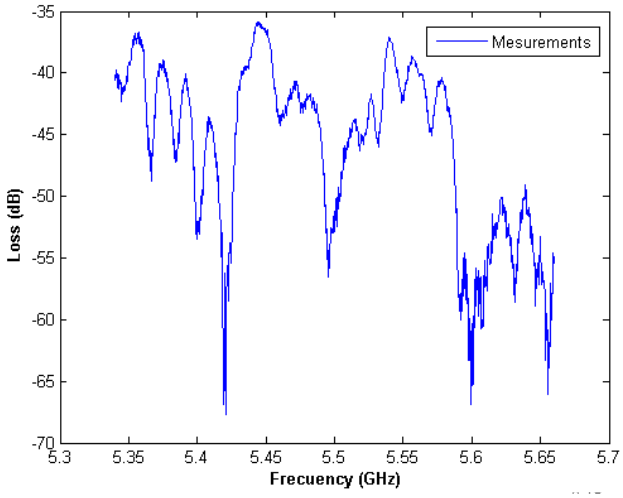


Figura 3.4: Pérdidas del muro del ascensor en la banda de 5.5 GHz

3.2 Muro de 1.1 metros de altura

Figura 3.5: Muro de 1.1 metros de altura

Entorno: Muro 1.1m de altura, Planta 1, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan un par antenas de 2.4GHz, 3.3GHz y 5.5GHz respectivamente, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a una altura de < 1m.

Distancia: las antenas se situarán entre medias del muro a una distancia de un metro cada una del mismo.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 2.36 GHz a 2.44 GHz con ancho de banda de 80 MHz, toda la banda de 3.2 GHz a 3.4 GHz con ancho de banda de 200 MHz y toda la banda de 5.34 GHz a 5.66 GHz con ancho de banda de 320 MHz.

Calibración: Se han eliminado las pérdidas de los cables y de las antenas para que el analizador de redes sólo refleje las pérdidas que crea el sujeto al interponerse entre las antenas.

Objetivo: Representar las pérdidas causadas por un muro de hormigón y/o ladrillo de 38.5 cm de grosor.

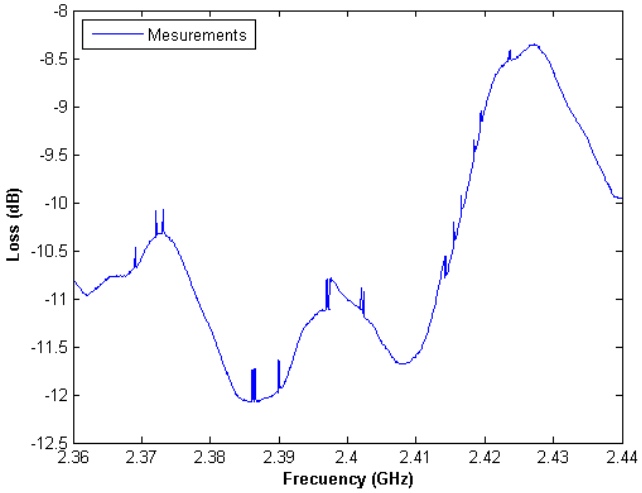


Figura 3.6: Pérdidas del muro 1.1m de altura en la banda de 2.4 GHz

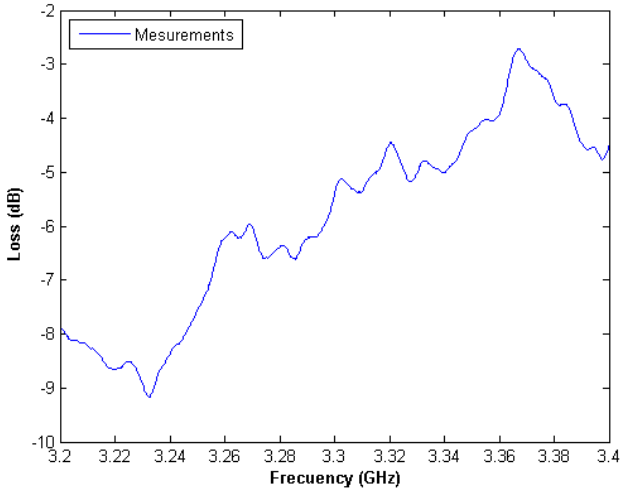


Figura 3.7: Pérdidas del muro 1.1m de altura en la banda de 3.3 GHz

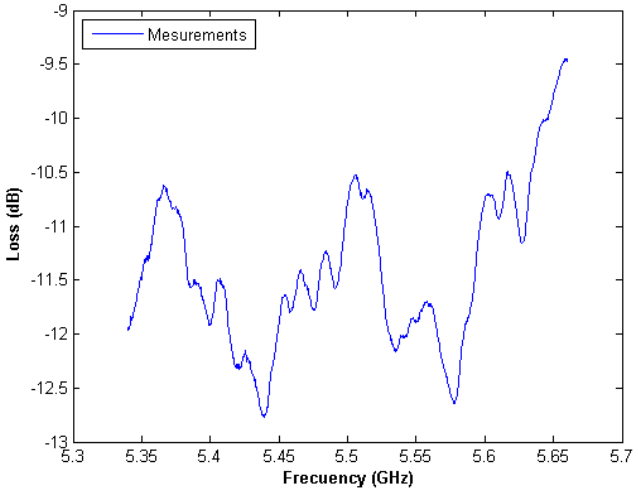


Figura 3.8: Pérdidas del muro 1.1m de altura en la banda de 5.5 GHz

3.3 Pared laboratorio RFCAS

Figura 3.9: Pared laboratorio RFCAS

Entorno: Pared laboratorio RFCAS, Planta 1, Edificio C.

Antenas usadas: Se utilizan un par antenas de 2.4GHz, 3.3GHz y 5.5GHz respectivamente, una como emisora y otra como receptora.

Alturas: Se realizarán medidas a una altura de 1.4m.

Distancia: las antenas se situarán entre medias del muro a una distancia de un metro cada una del mismo.

Rango de frecuencias estudiadas: Toda la banda de 2.36 GHz a 2.44 GHz con ancho de banda de 80 MHz, toda la banda de 3.2 GHz a 3.4 GHz con ancho de banda de 200 MHz y toda la banda de 5.34 GHz a 5.66 GHz con ancho de banda de 320 MHz.

Calibración: Se han eliminado las pérdidas de los cables y de las antenas para que el analizador de redes sólo refleje las pérdidas que crea el sujeto al interponerse entre las antenas.

Objetivo: Representar las pérdidas causadas por el muro de hormigón y/o ladrillo influenciado por una puerta anti-incendios, un armario y cartel del laboratorio.

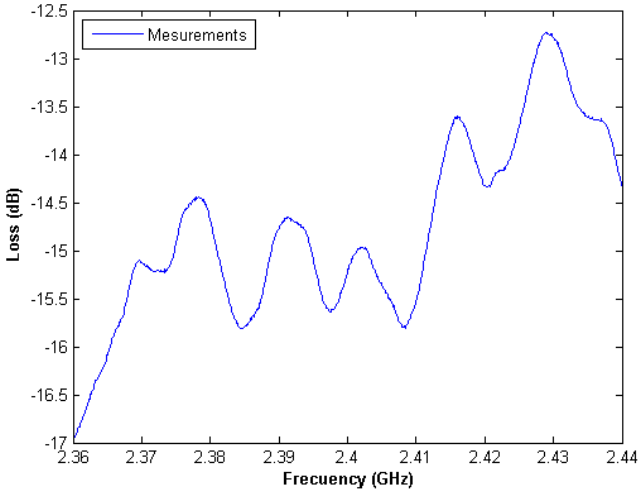


Figura 3.10: Pérdidas pared RFCAS en la banda de 2.4 GHz

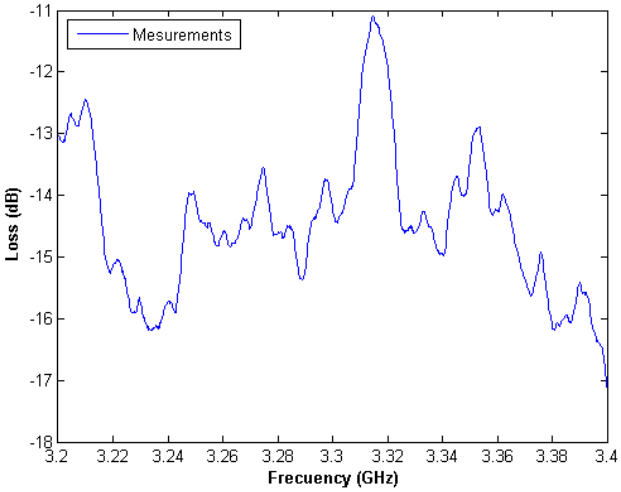


Figura 3.11: Pérdidas pared RFCAS en la banda de 3.3 GHz

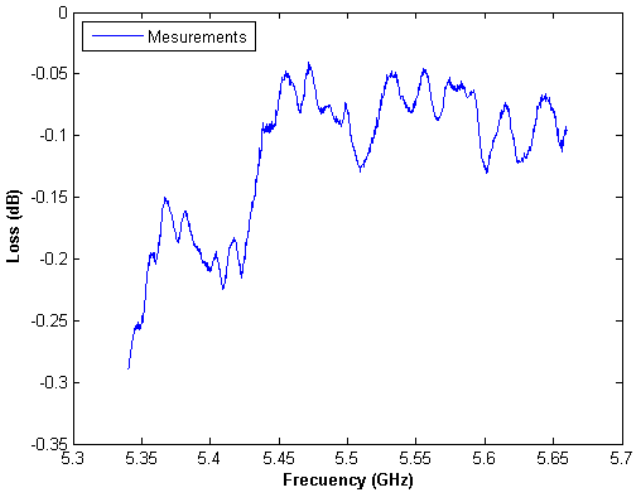


Figura 3.12: Pérdidas pared RFCAS en la banda de 5.5 GHz

B

Publicación

Hypo-Rayleigh Distribution for Short Range Wide -Band Directive Indoor Channel Fading Modeling at 3.3 and 5.5 GHz Bands

BAZIL TAHA AHMED, bazil.taha@uam.es, Miriam Esteban

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid- SPAIN

Abstract: Propagation loss models for indoor environment are presented. The directive channel propagation loss in indoor environment at frequency bands of 3.3 GHz with a channel bandwidth of 200 MHz and 5.5 GHz band with 320 MHz bandwidth is measured using vertical polarizations. A Set of directive panel antennas is used in the measurements. Network analyzer is used in the measurement campaign. It is noticed that the propagation loss can be modelled by two slopes propagation model giving a rise to two propagation zones. It is noticed that the first zone of propagation is almost free space propagation zone. In general, the second zone has a higher deviation from the mean value of propagation loss. **A new Hypo-Rayleigh distribution is proposed to model the channel induced fading in the second zone of the propagation zones.**