

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES
ELECTROMAGNETICAS EN EDIFICIOS EN BANDAS DE
Wi-Fi Y WiMAX**

PABLO ANDRÉS NÚÑEZ LÓPEZ

**ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES
ELECTROMAGNETICAS EN EDIFICIOS EN BANDAS DE
Wi-Fi Y WiMAX**

AUTOR: Pablo Andrés Núñez López

TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Radiocomunicaciones y Comunicaciones Ópticas

Dpto. de Ingeniería Informática

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Septiembre 2009

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi tutor, Bazil Taha Ahmed, por su esfuerzo y dedicación, gracias a su ayuda la elaboración de este Proyecto Fin de Carrera ha sido mas agradable y satisfactoria.

Gracias a mis padres, mi hermana y mis abuelas, que son los mayores responsables de la persona en la que me he convertido, gracias por su cariño y su consejo.

Y gracias también a mis amigos, los que conocí antes de la universidad y los que encontré en ella, gracias por su apoyo y por conseguir que todos los días valga la pena vivirlos con una sonrisa en la cara.

A todos os doy las gracias de corazón, sin vosotros esto no habría sido posible.

Palabras Clave

- ✓ *Wi-Fi*
- ✓ *WiMAX*
- ✓ *Wireless LAN*
- ✓ *Propagación en interiores*
- ✓ *Pérdidas de inserción*
- ✓ *Modelos de propagación*

Resumen

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera ha sido realizar una campaña de medidas basada en el cálculo de las pérdidas de propagación en interiores, para las bandas de trabajo 2.3-2.5 GHz y 3.3-3.5 GHz, usadas por los sistemas basados en Wi-Fi y WiMAX. Se han estudiado enlaces de 1 a 20 metros, y se han realizado medidas con distinta ganancia, polarización y altura de las antenas. Además, se propone un modelo de propagación completando el trabajo con la medida de las pérdidas de inserción introducidas por materiales usados en interiores. Estos resultados pretenden servir de apoyo para el estudio de la interferencia de sistemas de banda ancha con los sistemas Wi-Fi y WiMAX.

Key Words

- ✓ *WI-Fi*
- ✓ *WiMAX*
- ✓ *Wireless LAN*
- ✓ *Indro propagation*
- ✓ *Penetretion Loss*
- ✓ *Propagation Modeling*

ABSTRACT

The aim of this project was to carry out a measurement campaign focused on the calculation of propagation loss in indoor scenarios, the operating frequencies were 2.3-2.5 GHz and 3.3-3.5 GHz, used by systems based on Wi-Fi and WiMAX. Measurements are conducted over distances of 1-20 meters using different gain, polarization and height of the antennas. A propagation model is proposed and insertion loss introduced by materials used in indoor scenarios has been studied. These results could be used in the study of interference from broadband systems like Wi-Fi and WiMAX systems.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

<i>AGRADECIMIENTOS</i>	III
<i>Palabras Clave</i>	IV
<i>Resumen</i>	IV
<i>Key Words</i>	V
<i>ABSTRACT</i>	V
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	3
2. CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	5
2.1 PERDIDAS DE PROPAGACIÓN EN INTERIORES	5
2.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN	6
2.2.1 Modelo de pendiente única (One-Slope model).....	6
2.2.3 Modelo multipared (Multi-wall model).....	7
2.2.3 Modelo de atenuación lineal (Linear attenuation model).....	8
2.3 CÁLCULO TEÓRICO	8
2.4 Mecanismos de propagación	10
3. CAPÍTULO 3:TEORÍA RELACIONADA.....	13
3.1 REDES INALÁMBRICAS	13
3.1.1 Introducción.....	13
3.1.2 Tecnología Wi-Fi.....	15
3.1.3 Tecnología WiMAX.....	18
3.2 TEORÍA BÁSICA DE ANTENAS	20
3.2.1 Introducción.....	21
3.2.2 Diagrama de radiación.....	21
3.2.3 Regiones de campo	22
3.2.4 Directividad y Ganancia	23
3.2.4 Eficiencia y Ancho de banda	25
3.4 ANALIZADORES DE RED	26
3.5 BALANCE DE UN ENLACE RADIOELÉCTRICO.....	29
4. CAPÍTULO 4: PREPARACIÓN DE LA CAMPAÑA.....	31

4.1 ANÁLISIS DEL MATERIAL.....	31
4.1.1 Antenas	31
4.1.2 Cableado	39
4.1.3 Analizador de red (Rohde&Swartz)	40
4.1.4 Equipo Diverso	41
4.2 PROCEDIMIENTOS DE MEDIDA	41
4.3 ESCENARIOS.....	44
4.3.1 Pérdidas de propagación (Escenarios).....	44
4.3.2 Pérdidas de inserción (Escenarios).....	49
5. CAPÍTULO 5: CAMPAÑA DE MEDIDAS.....	51
5.1 Pérdidas de propagación	51
5.1.2 Primera zona: Laboratorio	51
5.1.3 Segunda zona: Corredores no cerrados	117
5.1.4 Tercera zona: Corredores cerrados	124
5.2 Pérdidas de inserción	135
6. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	167
6.1 CONCLUSIONES.....	167
6.2 TRABAJO FUTURO	170
7. BIBLIOGRAFÍA	171
8. ANEXOS	173
Anexo 1: Código MATLAB.....	173
Anexo 2: Compendio de medidas.....	182

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Pérdidas de propagación en el espacio libre para la banda de frecuencia 2.3-2.5 GHz.....	9
Figura 2-2: Pérdidas de propagación en el espacio libre para la banda de frecuencia 3.3-3.5 GHz.....	9
Figura 2-3: Reflexión de una onda	10
Figura 2-4: Onda con multitrayecto.....	10
Figura 2-5: Trayectorias de propagación en un escenario interior	11
Figura 3-1: Ejemplo de una red cableada e inalámbrica	14
Figura 3-2: Elementos básicos de una red Wi-Fi	17
Figura 3-3: Diagrama de radiación para una antena directiva.....	22
Figura 3-4: Regiones de campo en función del patrón de radiación de una antena	23
Figura 3-5: Variación de la ganancia de la antena en función de las regiones de campo	24
Figura 3-6: Dimensiones de una antena de parche	25
Figura 3-7: Circuito equivalente de una antena.....	25
Figura 3-8: Analizador de red ROHDE&SCHWARZ	27
Figura 3-9: Componente de radiofrecuencia de dos puertos	27
Figura 4-1: Resultado de la medida de la reflexión de la antena de 9 dB construida en la UAM.....	33
Figura 4-2: Resultado de la medida de la reflexión de la antena de 15 dB construida en la UAM.....	34
Figura 4-3: Resultado de la medida de la reflexión de la primera antena de 9 dB con frecuencia de trabajo de 2.4 GHz	35
Figura 4-4: Resultado de la medida de la reflexión de la segunda antena de 9 dB con frecuencia de trabajo de 2.4 GHz	35
Figura 4-5: Resultado de la medida de la reflexión de la primera antena de 18 dB con frecuencia de trabajo de 2.4 GHz	36
Figura 4-6: Resultado de la medida de la reflexión de la segunda antena de 18 dB con frecuencia de trabajo de 2.4 GHz	36
Figura 4-7: Resultado de la medida de la reflexión de la primera antena de 9 dB con frecuencia de trabajo de 3.3 GHz	37
Figura 4-8: Resultado de la medida de la reflexión de la segunda antena de 9 dB con frecuencia de trabajo de 3.3 GHz	37
Figura 4-9: Resultado de la medida de la reflexión de la primera antena de 18 dB con frecuencia de trabajo de 3.3 GHz	38
Figura 4-10: Resultado de la medida de la reflexión de la segunda antena de 18 dB con frecuencia de trabajo de 3.3 GHz	38
Figura 4-11: Resultado de la medida de la atenuación de los cables de 10 metros construidos en la UAM.....	40
Figura 4-12: Imagen de la conexión de la antena transmisora al analizador de red.....	42
Figura 4-13: Imagen del montaje de las antenas para la toma de una de las medidas ...	43
Figura 4-14: Imagen del montaje realizado para el cálculo de las pérdidas de inserción introducidas por un material	44
Figura 4-15: Imagen general del Laboratorio 7. Situado en la tercera planta del edificio A de la EPS-UAM	45
Figura 4-16: Imagen del pasillo 2 del Laboratorio 7.....	45
Figura 4-17: Imagen del pasillo 1 del Laboratorio 7.....	46

Figura 4-18: Imagen del pasillo semicerrado situado en la planta 3 del edificio A de la EPS-UAM.....	47
Figura 4-19: Imagen de la pasarela que une los pasillos laterales de la planta 3 del edificio A de la EPS-UAM.....	48
Figura 4-20: Imagen del pasillo de anchura variable situado en la planta 4 del edificio B de la EPS-UAM.....	48
Figura 4-21: Imagen del pasillo situado en la planta 4 del edificio B de la EPS-UAM.....	49
Figura 5-1: Esquema de la distribución del laboratorio 7 de la EPS-UAM y de las medidas realizadas en el.....	51
Figura 5-2: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 1 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.....	54
Figura 5-3: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 1 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.....	54
Figura 5-4: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 1 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.....	55
Figura 5-5: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.....	56
Figura 5-6: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.....	57
Figura 5-7: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.....	57
Figura 5-8: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.....	58
Figura 5-9: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.....	59
Figura 5-10: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.....	59
Figura 5-11: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.....	61
Figura 5-12: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.....	61
Figura 5-13: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.....	62
Figura 5-14: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.....	63
Figura 5-15: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.....	63
Figura 5-16: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.....	64
Figura 5-17: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.....	64
Figura 5-18: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.....	65
Figura 5-19: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.....	65
Figura 5-20: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 4 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.....	67
Figura 5-21: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 4 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.....	68

Figura 5-22: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 4 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.	68
Figura 5-23: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.	69
Figura 5-24: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.	70
Figura 5-25: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.	70
Figura 5-26: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.	71
Figura 5-27: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.	71
Figura 5-28: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.	72
Figura 5-29: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.	73
Figura 5-30: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.	73
Figura 5-31: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.	74
Figura 5-32: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.	74
Figura 5-33: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.	75
Figura 5-34: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.	75
Figura 5-35: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.	76
Figura 5-36: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.	76
Figura 5-37: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.	77
Figura 5-38: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.	78
Figura 5-39: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.	79
Figura 5-40: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.	79
Figura 5-41: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.	80
Figura 5-42: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.	80
Figura 5-43: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.	81
Figura 5-44: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 8 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.	82
Figura 5-45: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 8 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.	83
Figura 5-46: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 9 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz.	84

Figura 5-47: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 9 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz.....	84
Figura 5-48: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 9 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.....	85
Figura 5-49: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 9 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.....	85
Figura 5-50: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz.....	87
Figura 5-51: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz.....	87
Figura 5-52: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 completo para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz.....	88
Figura 5-53: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 completo para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz.....	88
Figura 5-54: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 completo para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.....	89
Figura 5-55: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 completo para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.....	89
Figura 5-56: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 11 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.....	91
Figura 5-57: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 11 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.....	91
Figura 5-58: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 11 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.....	92
Figura 5-59: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.....	93
Figura 5-60: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.....	94
Figura 5-61: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.....	94
Figura 5-62: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.....	95
Figura 5-63: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.....	95
Figura 5-64: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.....	96
Figura 5-65: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.....	97
Figura 5-66: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.....	97
Figura 5-67: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.....	98
Figura 5-68: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.....	98
Figura 5-69: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.....	99
Figura 5-70: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.....	99
Figura 5-71: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.....	100

Figura 5-72: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.....	100
Figura 5-73: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.....	101
Figura 5-74: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 14 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.	102
Figura 5-75: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 14 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.	103
Figura 5-76: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 14 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.	103
Figura 5-77: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.....	104
Figura 5-78: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.....	105
Figura 5-79: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.....	105
Figura 5-80: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.	106
Figura 5-81: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.	106
Figura 5-82: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.	107
Figura 5-83: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.....	108
Figura 5-84: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.....	108
Figura 5-85: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.....	109
Figura 5-86: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.	109
Figura 5-87: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.	110
Figura 5-88: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.	110
Figura 5-89: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.....	111
Figura 5-90: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.....	111
Figura 5-91: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.....	112
Figura 5-92: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 17 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.	113
Figura 5-93: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 18 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz.....	114
Figura 5-94: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 18 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.	115
Figura 5-95: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 19 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz.....	116
Figura 5-96: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 19 completo para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz.	116

Figura 5-97: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 19 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.	117
Figura 5-98: Esquema de las medidas tomadas en la segunda zona	118
Figura 5-99: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 20 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.	119
Figura 5-100: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 20 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.....	119
Figura 5-101: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 21 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.....	120
Figura 5-102: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 21 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.....	121
Figura 5-103: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 22 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.....	122
Figura 5-104: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 23 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.....	123
Figura 5-105: Esquema de las medidas tomadas en la tercera zona.....	124
Figura 5-106: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 24 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.....	125
Figura 5-107: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 24 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal modificada.....	125
Figura 5-108: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 24 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal modificada.....	126
Figura 5-109: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 25 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.....	127
Figura 5-110: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 25 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.....	128
Figura 5-111: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 26 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.....	129
Figura 5-112: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 26 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal modificada.....	130
Figura 5-113: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 27 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.....	131
Figura 5-114: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 28 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.....	132
Figura 5-115: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 28 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.....	132
Figura 5-116: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 29 para la frecuencia de trabajo de 3.37GHz, con aproximación lineal.....	133
Figura 5-117: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 29 para la frecuencia de trabajo de 3.47GHz, con aproximación lineal.....	134
Figura 5-118: Imagen de la puerta doble del laboratorio B 402 de la EPS-UAM. Primera posición de medida.	136
Figura 5-119: Imagen de la puerta doble del laboratorio B 402 de la EPS-UAM. Segunda posición de medida.	137
Figura 5-120: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para la puerta doble del laboratorio B 402.	138
Figura 5-121: Perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz	138
Figura 5-122: Perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz y polarización horizontal.	139

Figura 5-123: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para la puerta doble del laboratorio B 402.	140
Figura 5-124: Perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización vertical y horizontal.	141
Figura 5-125: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM.	142
Figura 5-126: Perdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización vertical y horizontal.	143
Figura 5-127: Perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz. Solo una puerta	144
Figura 5-128: Perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz. Ambas puertas	145
Figura 5-129: Perdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.	146
Figura 5-130: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para una pared interior de la EPS-UAM.	147
Figura 5-131: Perdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones vertical y horizontal.	148
Figura 5-132: Perdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz. Polarizaciones vertical y horizontal.	149
Figura 5-133: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para un cristal amplio en la entrada de la EPS-UAM.	150
Figura 5-134: Perdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones vertical y horizontal.	151
Figura 5-135: Perdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.	152
Figura 5-136: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para las distintas pizarras estudiadas.	153
Figura 5-137: Perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.	154
Figura 5-138: Perdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.	155
Figura 5-139: Perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarización horizontal	156
Figura 5-140: Perdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarización horizontal.	157
Figura 5-141: Perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.	158
Figura 5-142: Perdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.	159
Figura 5-143: Imagen del sujeto 1 analizado.	160
Figura 5-144: Imagen del sujeto 2 analizado.	161
Figura 5-145: Imagen del sujeto 3 analizado.	162
Figura 5-146: Imagen del sujeto 4 analizado.	163
Figura 5-147: Perdidas de inserción producidas por personas, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.	163
Figura 5-148: Perdidas de inserción producidas por personas de lado, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.	164

Figura 5-149: Perdidas de inserción producidas por personas, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.....	165
Figura 5-150: Perdidas de inserción producidas por personas de lado, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.	166

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Índices de propagación para el modelo de pendiente única.....	7
Tabla 3-1: Especificaciones para WiMAX.....	20
Tabla 5-1: Sumario de perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.....	139
Tabla 5-2: : Sumario de perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz y polarización horizontal.....	139
Tabla 5-3: Sumario de perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización vertical.	141
Tabla 5-4: Sumario de perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización horizontal.	142
Tabla 5-5: Sumario de perdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización vertical.	143
Tabla 5-6: Sumario de perdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización horizontal.	144
Tabla 5-7: Sumario de perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz. Solo una puerta.....	145
Tabla 5-8: Sumario de perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz. Ambas puertas.....	146
Tabla 5-9: Sumario de perdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.....	147
Tabla 5-10: Sumario de perdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones vertical.....	148
Tabla 5-11: Sumario de perdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones horizontal.....	148
Tabla 5-12: Sumario de perdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.....	149
Tabla 5-13: Sumario de perdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones vertical.	151
Tabla 5-14: Sumario de perdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones horizontal.....	151
Tabla 5-15: Sumario de perdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.....	152
Tabla 5-16: Sumario de perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.....	154
Tabla 5-17: Sumario de perdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.....	155
Tabla 5-18: Sumario de perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarización horizontal.....	156
Tabla 5-19: Sumario de perdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarización horizontal.....	157

Tabla 5-20: Sumario de pérdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz	158
Tabla 5-21 Sumario de pérdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.....	159
Tabla 5-22: Sumario de pérdidas de inserción producidas por personas, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz,	164
Tabla 5-23: Sumario de pérdidas de inserción producidas por personas de lado, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.....	164
Tabla 5-24: Sumario de pérdidas de inserción producidas por personas, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz,	165
Tabla 5-23: Sumario de pérdidas de inserción producidas por personas de lado, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.....	166
Tabla 6-1: Valores de pendiente y desviación para el modelo de propagación estudiado.	168
Tabla 6-2: Sumario general de pérdidas de inserción para la banda de trabajo 2.4-2.5GHz.....	169
Tabla 6-3: Sumario general de pérdidas de inserción para la banda de trabajo 3.4-3.5GHz.....	169

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

En los últimos años las redes inalámbricas están adquiriendo mucha popularidad en nuestra sociedad. Sus prestaciones y sobre todo su gran flexibilidad son la causa de su gran penetración en el mercado de las telecomunicaciones. Se han desarrollado numerosos estándares para este tipo de redes, de los cuales destacaremos el 802.11 para redes de área local inalámbricas (WLAN) y el 802.16 para redes de área metropolitana inalámbricas (WMAN).

Estas redes consisten en un radio enlace con uno o más emisores fijos y uno o más receptores fijos, portátiles o móviles. Generalmente las redes Wi-Fi¹ sitúan sus emisores y receptores en entornos cerrados, mientras que las redes WiMAX² suelen situar sus emisores en el exterior y sus receptores tanto en el interior como en el exterior.

En estos casos, la predicción de la propagación en interiores difiere en cierta medida de la que se efectúa en relación con los sistemas de exteriores. El objetivo, como sucede en el caso de los sistemas de exteriores, es garantizar una cobertura eficaz de la zona deseada (para garantizar un trayecto fiable, cuando se trata de sistemas punto a punto) y evitar la interferencia tanto dentro del sistema como con otros sistemas. No obstante, en interiores la cobertura depende notablemente de la geometría de los edificios, cuyos límites afectan además a la propagación. Aparte de la reutilización de frecuencias en el mismo piso de un edificio, suele ser necesario reutilizar una frecuencia entre diferentes pisos del mismo edificio, por lo cual hay que considerar una tercera dimensión en las cuestiones de interferencia.

Debido a la complejidad de estos factores, sería necesario un conocimiento detallado del lugar de instalación como por ejemplo, geometría, materiales, mobiliario y normas de utilización previstas, para proyectar concretamente un sistema radioeléctrico

¹ Nombre comercial del estándar 802.11

² Nombre comercial del estándar 802.16

en interiores. No obstante, durante la planificación inicial de un sistema hay que estimar el número de estaciones bases necesarias para proporcionar cobertura a estaciones móviles diseminadas dentro de la zona y estimar la interferencia que puede ocasionarse a otros servicios o producirse entre los sistemas. Para esa planificación de sistemas se necesitan modelos que representen en general las características de propagación en ese entorno. Actualmente existen pocos estudios sobre el tema, centrándose los ya existentes en frecuencias puntuales de redes Wi-Fi, como por ejemplo 2.4 GHz. En el caso de redes WiMAX, la información al respecto es prácticamente nula.

1.2 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Como ya hemos destacado en el punto anterior, las tecnologías inalámbricas de transmisión de datos, en especial Wi-Fi y WiMAX, son un referente importante en sociedades como la nuestra. Actualmente, ambas tienen una gran importancia en el mercado de las telecomunicaciones y se espera que en el futuro continúen liderando el sector de las redes inalámbricas. Por esta razón, es siempre estimulante intentar estudiar o incluso, como en este caso, realizar aportaciones que sirvan para poder mejorar un servicio, del que se espera que en el presente y en el futuro muchas personas se aprovechen para mejorar su calidad de vida. Desde el punto de vista de un estudiante o ingeniero de telecomunicaciones, en cualquier sistema de telecomunicación es necesario tener una exhaustiva caracterización del medio de transmisión, ya que de lo contrario, en muchos casos, sería imposible garantizar una determinada calidad de servicio al usuario.

Es este punto el que deseamos profundizar con este Proyecto de Fin de Carrera, aportando más datos sobre el canal de transmisión que actualmente se emplea en las tecnologías Wi-Fi y WiMAX. El trabajo que proponemos pretende profundizar en las pérdidas de propagación, a través de entornos cerrados, para ambos estándares.

En concreto, el objetivo del proyecto es caracterizar de forma gráfica y matemática las pérdidas por propagación que sufren las señales electromagnéticas que trabajan en las bandas de frecuencia de 2.3-2.5 GHz (usada por Wi-Fi y WiMAX) y 3.3-3.5 GHz (usada solo por WiMAX) en entornos cerrados en distancias cortas. Estos

datos serán un gran apoyo para realizar estudios de interferencia de banda ancha en las tecnologías Wi-Fi y WiMAX.

Para ello hemos analizado una gran cantidad de puntos en dichas bandas frecuenciales, que nos han permitido definir las pérdidas de propagación en toda la banda, con aproximaciones matemáticas lo mas realistas posibles destacando los puntos mas importantes de la banda (frecuencias mas usadas, puntos de resonancia, máximos, etc). Los entornos analizados han sido los siguientes³:

- Corredor cerrado
- Corredor semiabierto (delimitado por paredes que no llegan al techo)
- Corredor semicerrado (al menos una de las paredes cubrirá el corredor completamente)
- Espacio abierto

Con esos escenarios hemos analizado como puede afectar la distancia de nuestro receptor a los obstáculos. Además, hemos realizado estudios complementarios sobre el efecto que producen en las pérdidas de propagación ciertas modificaciones en el enlace, como son la polarización de las antenas y la ganancia. Para poder completar las pérdidas de propagación en interiores, también hemos calculado las pérdidas de inserción que añaden algunos obstáculos a nuestras señales: paredes, puertas, cristales y otro material de interés.

1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

La memoria esta dividida en seis capítulos. El primero de ello tiene como objetivo dar al lector una idea aproximada de los objetivos de este proyecto y los motivos que nos han llevado a la elaboración del mismo, así como lo que suponen las pérdidas de propagación para los sistemas de telecomunicaciones. En el segundo capítulo, se hace una presentación general de que son las pérdidas de propagación y por qué se producen, además, se ofrece un breve resumen de los modelos de propagación

³ Todos los entornos están situados en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM).

mas extendidos. También en este capítulo se incorpora un cálculo teórico para las bandas de frecuencia que se han estudiado. En el tercer capítulo se desarrolla la teoría general sobre las tecnologías y las herramientas que se han utilizado a lo largo del proyecto. El cuarto capítulo hace referencia al trabajo que se ha realizado antes del comienzo de la campaña de medidas. En el se detalla la validación que se ha realizado del material para que este contamine las medidas lo mínimo posible. También se explica la metodología que se ha seguido para la recopilación de los datos y una breve explicación de los escenarios en los que se ha trabajado. En el quinto capítulo se presentan los resultados obtenidos en la campaña de medidas, así como el modelo de propagación que se ha utilizado. Este quinto capítulo se divide en dos partes, la primera corresponde a las pérdidas de propagación y se estructura, a su vez, en tres partes en función de las tres zonas estudiadas, laboratorio, corredores no cerrados y pasillos cerrados. Por último, en el sexto capítulo se recogen las conclusiones alcanzadas con este trabajo y posteriormente algunos anexos importantes. Los anexos recogen el código MATLAB empleado en el análisis de los datos de campo y el cálculo del modelo de propagación; y en el segundo anexo se ofrecen todos los datos recopilados en un CD.

2. CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 PERDIDAS DE PROPAGACIÓN EN INTERIORES

La propagación en interiores difiere de la comunicación radio tradicional en que la distancia de radio de cobertura es mucho menor y la variación en el entorno de trabajo es mayor con un pequeño cambio de posición. Esto es debido a la influencia que tienen elementos como muros y paredes, los materiales usados, la forma del edificio, entre otros, lo cual nos introducirá pérdidas debido al multitrayecto sufrido por la señal.

En este tipo de escenarios se considera el estudio de los siguientes tipos de pérdidas:

1. **Atenuación temporal:** debido al movimiento de las personas y/o de los receptores.
2. **Retardo de propagación multitrayecto:** depende del tipo de edificio, del tamaño, altura y materiales empleados en su construcción. Este retardo es bastante pequeño debido a la distancia recorrida entre transmisor y receptor.
3. **Pérdida debida al trayecto:** suele ser un valor pequeño dado que la distancia recorrida no es muy grande. Las pérdidas de propagación en interiores debidas a la multitrayecto, suelen definirse con modelos basados en la propagación de ondas electromagnéticas por el espacio como el siguiente:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X\sigma$$

Los dos primeros sumandos son idénticos a la fórmula de las pérdidas de propagación de las ondas electromagnéticas por el espacio: el primero representa las pérdidas sufridas a un metro de distancia y el segundo añade las pérdidas debidas a la distancia a la que se encuentra el receptor. El último término del modelo asume un

desvío con respecto al modelo base. Los términos n y σ que representan la pendiente y la desviación típica dependerán del edificio en el que realicemos la toma de medidas.

Las degradaciones de la propagación en un canal radioeléctrico en interiores se deben principalmente a:

- La reflexión de los objetos (incluidas paredes y suelos) y la difracción en torno a éstos dentro de las salas.
- La pérdida de transmisión a través de paredes, suelos y otros obstáculos.
- La canalización de la energía, especialmente en pasillos a frecuencias elevadas.
- El movimiento de personas y objetos en la sala, lo que puede incluir uno o ambos extremos del enlace radioeléctrico.

y producir degradaciones tales como:

- La pérdida del trayecto, no sólo la pérdida en el espacio libre sino también la pérdida adicional debida a los obstáculos y la transmisión a través de materiales de construcción.
- La variación temporal y espacial de la pérdida del trayecto.
- Los efectos de los trayectos múltiples de los componentes reflejados y difractados de la onda.
- El desajuste de la polarización ocasionado por la alineación aleatoria del terminal móvil.

2.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN

2.2.1 Modelo de pendiente única (One-Slope model)

Es el modelo de propagación más simple que presenta una dependencia lineal entre la pérdida de propagación y la distancia. Es un método muy fácil de usar y de implementar y las pérdidas vienen dadas por:

$$L = L_0 + 10n \times \log(d)$$

L_0 son las pérdidas a la distancia de referencia, n es el índice de propagación y d es la distancia entre transmisor y receptor. Algunos valores para estas variables son:

Tabla 2-1: Índices de propagación para el modelo de pendiente única.

f (GHz)	L_0 (dB)	n (-)	comment
1.8	33.3	4.0	office [13]
1.8	37.5	2.0	open space [13]
1.8	39.2	1.4	corridor [13]
1.9	38.0	3.5	office building [14]
1.9	38.0	2.0	passage [15]
1.9	38.0	1.3	corridor [15]
2.45	40.2	4.2	office building [9]
2.45	40.2	1.2	corridor [9]
2.45	40.0	3.5	office building [16]
2.5	40.0	3.7	office building [17]
5.0	46.4	3.5	office building [18]
5.25	46.8	4.6	office building [17]

2.2.3 Modelo multipared (Multi-wall model)

Este otro modelo da la pérdida en espacio libre (LOS) más la pérdida introducida por las paredes y obstáculos. 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 :

$$L = L_{FS} + L_c + \sum_{i=1}^I K_{wi} \times L_{wi} + k_f^{\left[\frac{k_f+2}{k_f+1} \times b \right]} \times L_f$$

- L_{FS} son las pérdidas por el espacio libre entre transmisor y receptor
- L_c es una constante de pérdidas
- K_{wi} es el número de paredes que se atraviesan
- K_f es el número de plantas distantes
- L_{wi} es la pérdida de la pared tipo i
- L_f es la pérdida entre plantas consecutivas
- b es un parámetro empírico
- I es el número de tipos de paredes

2.2.3 Modelo de atenuación lineal (Linear attenuation model)

Es un modelo que asume que el exceso de pérdida depende linealmente con la distancia. Viene dado por:

$$L = L_{FS} + \alpha \times d$$

Siendo α es el coeficiente de atenuación dado en (dB/m).

2.3 CÁLCULO TEÓRICO

Para un análisis previo de los resultados de las medidas realizadas en los escenarios previstos, hemos realizado un primer acercamiento sobre los resultados teóricos que la fórmula de propagación por el espacio libre ofrece a las bandas de frecuencia bajo estudio. Hay que considerar que estos datos solo contemplan las pérdidas por propagación en el espacio libre y no otro tipo de pérdidas adicionales, como por ejemplo pérdidas por multitrayecto o fading, por lo que nuestros resultados experimentales darán unas pérdidas diferentes.

Las pérdidas teóricas de propagación para ondas electromagnéticas en el espacio están definidas por la ecuación:

$$L_p \text{ [dB]} = 10 \log_{10} ((4 * \pi * d) / \lambda)$$

Aplicando esta ecuación, vamos a representar a continuación las pérdidas de propagación para las bandas de frecuencia de 2.3 a 2.5 GHz y de 3.3 a 3.5 GHz tomando 5 frecuencias intermedias, para enlaces de entre 1 y 10 metros. Utilizaremos estos resultados como referencia en el estudio empírico de las pérdidas de propagación en interiores.

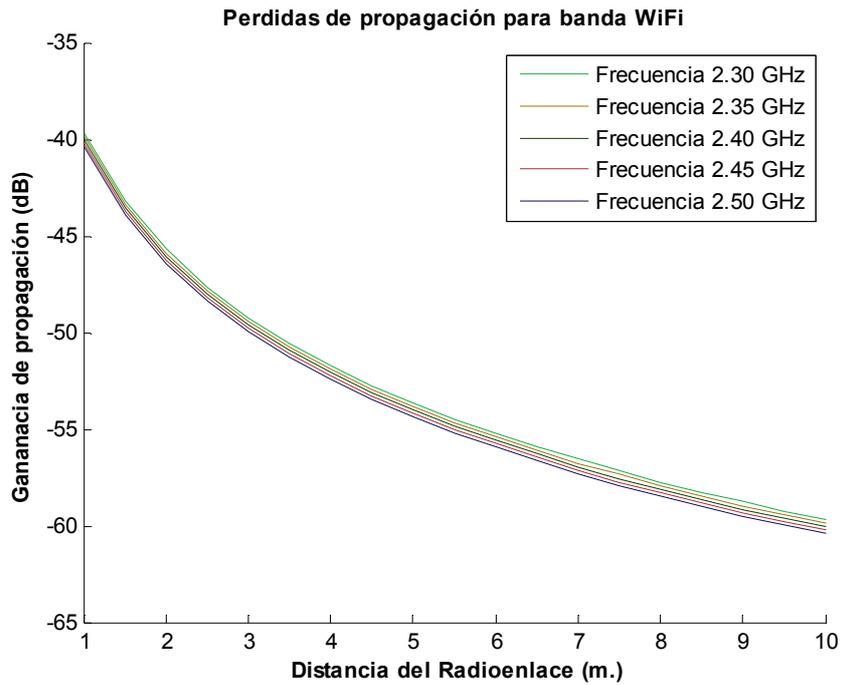


Figura2-1: Pérdidas de propagación en el espacio libre para la banda de frecuencia 2.3-2.5 GHz

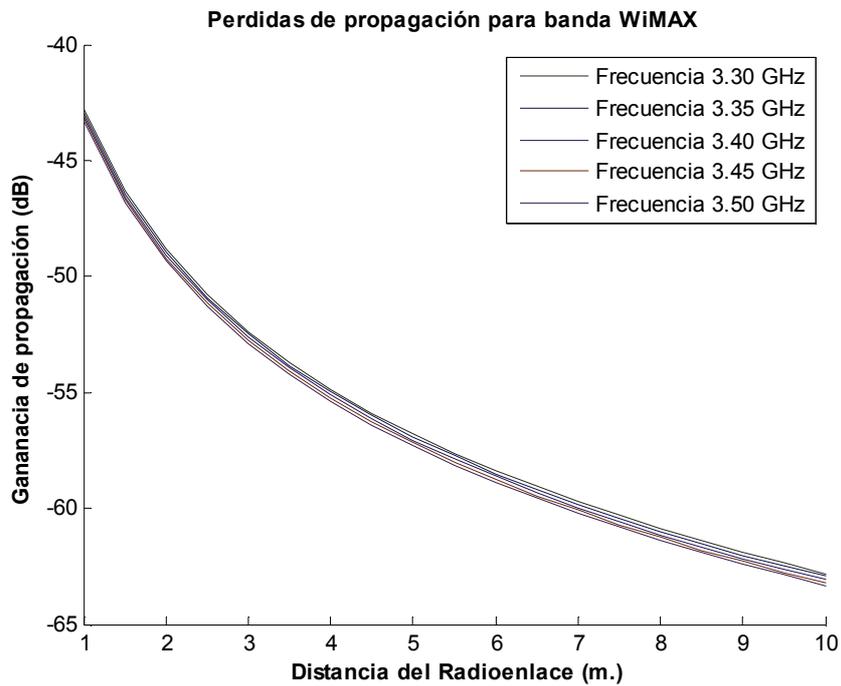


Figura 2-2: Pérdidas de propagación en el espacio libre para la banda de frecuencia 3.3-3.5 GHz

2.4 Mecanismos de propagación

Cuando una onda de radio choca con un obstáculo, parte o la totalidad de la onda se refleja y se observa una pérdida de la intensidad. La reflexión es tal que el ángulo de incidencia equivale al ángulo de reflexión.

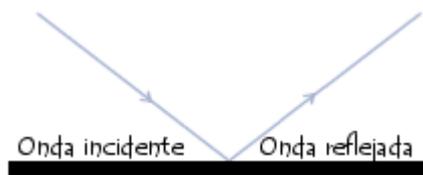


Figura 2-3: Reflexión de una onda

Por definición, una onda de radio es susceptible de propagarse en varias direcciones. Después de reflejarse varias veces, una señal de origen puede llegar a una estación o punto de acceso después de tomar muchas rutas diferentes (llamadas *multitrayectos*).

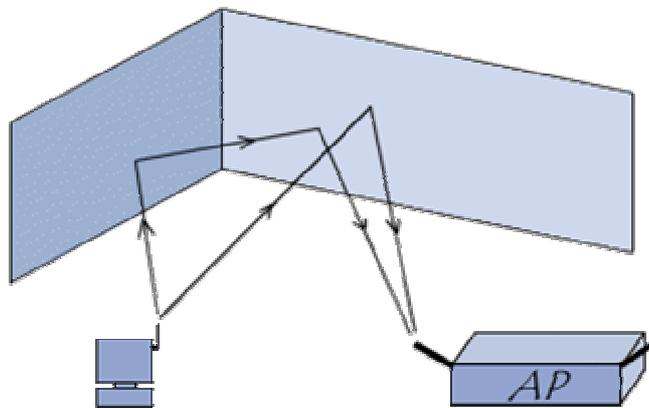


Figura 2-4: Onda con multitrayecto

La diferencia temporal en la propagación (llamada *retraso de propagación*) entre dos señales que toman diferentes rutas puede interferir en la recepción, ya que los flujos de datos que se reciben se superponen entre sí.

Al tener antenas directivas, la trayectoria principal es la que mas intensidad tiene, nos dará perdidas parecidas al espacio libre, las otras nos harán desviarnos mas o menos de las mismas.

En el caso de los escenarios en interiores, la situación general es tener 5 trayectorias de propagación significativos como se observa en la figura.

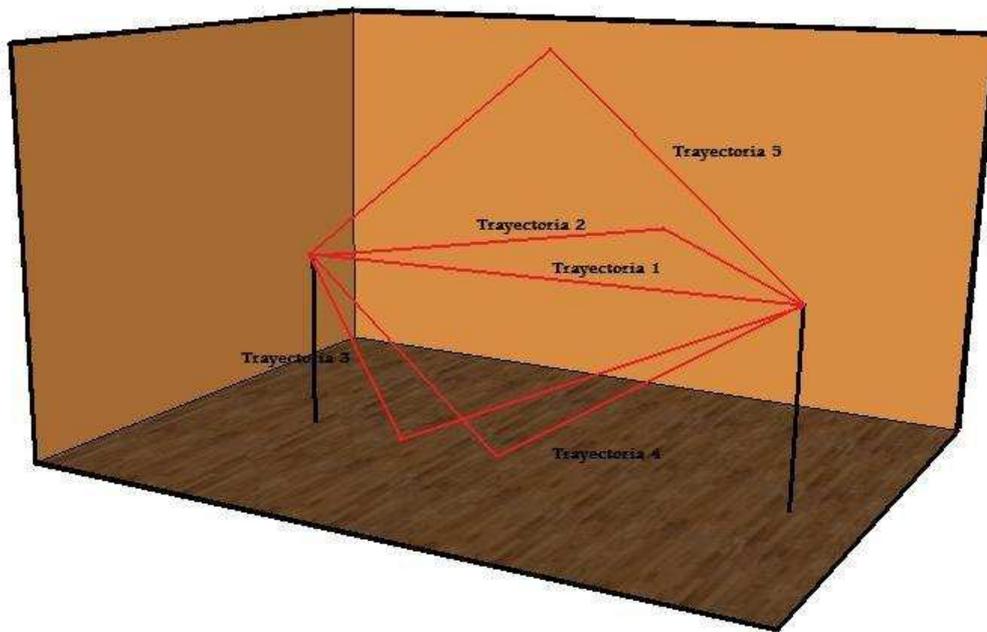


Figura 2-5: Trayectorias de propagación en un escenario interior

La trayectoria 1, es la que mayor intensidad de señal tiene ya que no se refleja en ningún sitio. Si tuviéramos en cuenta esta trayectoria, los resultados nos darían muy similares a la propagación por el espacio libre, pero la aportación de las otras cuatro trayectorias que sufren reflexión en algún punto de los planos superior, inferior y laterales, provocara que los resultados se acerquen o alejen de las pérdidas por el espacio libre.

En contraposición, en las medidas estudiadas en los escenarios exteriores, en general, solo tendremos el rayo principal y el reflejado en el plano inferior, y en algún caso particular los rayos reflejados en los planos laterales. Esto supone que las medidas en exteriores se aproximarán mas a las pérdidas en el espacio libre.

3. CAPÍTULO 3: TEORÍA RELACIONADA

3.1 REDES INALÁMBRICAS

3.1.1 Introducción

Como ya hemos comentado, en los últimos años el concepto de movilidad se ha ido implantando cada vez con mayor fuerza en la sociedad. La telefonía móvil, cuyo uso se limitó inicialmente a profesionales que necesitaban estar conectados con su entorno laboral independientemente de su ubicación, se ha ido democratizando y actualmente su uso es habitual incluso entre los menores de edad. Después de la telefonía el paso lo han dado las redes de datos. La creación de redes de datos inalámbricas ha permitido a los usuarios trabajar o conectarse con otros equipos y personas desde bibliotecas, estaciones de transporte o incluso cafeterías.

Estas redes inalámbricas tienen unas determinadas características que han provocado su rápida implantación y acogida. Una red de este tipo necesita una serie de estaciones base para proporcionar la conexión a los usuarios, sin embargo, una vez realizada esa instalación añadir más usuarios a la red solo requiere autorización, no comporta una revisión de la infraestructura, proporcionándonos una gran flexibilidad.

Una red de telecomunicaciones cableada transmite su señal a través de un medio controlado, el cable, sin embargo, en una red inalámbrica el medio de propagación es el aire, lo que a la vez de ofrecer mayor flexibilidad, exige la solución de dos problemas. Por un lado, los datos están expuestos a ser interceptados, lo que requiere establecer en los estándares de este tipo de redes una forma de autenticación segura para evitar el intrusismo no deseado y un cifrado de los datos suficientemente robusto. Y por otro lado, al utilizar un medio no controlado es preciso realizar una serie de estudios del mismo para garantizar una comunicación fiable.

Actualmente la implantación de las redes inalámbricas va en aumento, en 2007 Lexmark e Ipsos realizaron una encuesta en 18 países según la cual el 90% de los encuestados pensaba que las redes inalámbricas serán importantes en el futuro próximo, y además el 40% de los mismos ya disponía de redes de este tipo instaladas en su hogar. En los inicios del 2009, el mercado nos ofrece dispositivos electrónicos, a costes

asequibles, que ya vienen preparados para conectarse a este tipo de redes. Este hecho unido a la proliferación de “hot spots”, puntos de acceso gratuitos, ha provocado que sea común ver en el día a día personas trabajando o emplear su tiempo de ocio en cafeterías, estaciones de tren o autobús, o aeropuertos aprovechando la conexión a Internet que proveen las redes inalámbricas instaladas en dichas ubicaciones.

Sin embargo, esta situación no quiere decir que las redes cableadas vayan a ser suplantadas. Mas bien la instalación de redes inalámbricas servirá de complemento a las redes cableadas con el objetivo de proporcionar movilidad a un determinado número de usuarios, obteniendo una infraestructura parecida a la siguiente:



Figura 3-1: Ejemplo de una red cableada e inalámbrica

En el mercado de las redes inalámbricas se han desarrollado diversas tecnologías que requieren la creación de una serie de pautas que aseguren una cierta calidad y compatibilidad en los dispositivos. Según la ISO, la normalización es la actividad que tiene por objeto establecer, ante problemas reales o potenciales, disposiciones destinadas a usos comunes y repetidos, con el fin de obtener un nivel de ordenamiento óptimo en un contexto dado, que puede ser tecnológico, político o económico.

La normalización persigue fundamentalmente tres objetivos:

- **Simplificación:** Se trata de reducir los modelos quedándose únicamente con los más necesarios.

- Unificación: Para permitir la intercambiabilidad a nivel internacional.
- Especificación: Se persigue evitar errores de identificación creando un lenguaje claro y preciso.

Dicho esto, es razonable considerar que para que cualquier tecnología tenga una importante penetración en el mercado debe estar dotada de una serie de reglas o normas que recojan las propuestas y objetivos de fabricantes, usuarios y entidades reguladoras. Consecuentemente se han creado una serie de requisitos que se deben cumplir, a la hora de implantar nuestra tecnología, garantizando la compatibilidad de elementos contruidos independientemente y la calidad y fiabilidad de los mismos.

Para las redes inalámbricas se han elaborado una serie de normas, principalmente en función de su cobertura. A lo largo de este trabajo vamos a centrarnos en dos de ellas, la norma IEEE 802.11 para tecnología Wi-Fi, orientada a redes de área local, y la norma IEEE 802.16 para tecnología WiMAX, diseñada para redes de área metropolitana. En los siguientes puntos trataremos de hacernos una idea general de dichos protocolos.

3.1.2 Tecnología Wi-Fi

En el año 1999, varios líderes de la industria de las telecomunicaciones impulsaron la creación de una organización sin ánimo de lucro, con el objetivo de conseguir un estándar mundial para redes inalámbricas de área local. En un primer momento se conoció como WECA⁴. En 2000, la organización certificó la interoperabilidad de equipos según la norma IEEE 802.11 creando una marca conocida como Wi-Fi, garantizando que cualquier dispositivo con su sello puede trabajar sin problemas con independencia del fabricante. En 2003 cambian su nombre por el de Wi-Fi Alliance y actualmente cuentan con mas de 300 miembros en mas de 20 países.

Wi-Fi es pues una tecnología diseñada para redes LAN, que nos permite conectarnos a una red en cualquier parte sin cables. Ha tenido un gran éxito, implantándose con rapidez y solvencia en la sociedad. Lugares de acceso a esta

⁴ Wireless Ethernet Compatibility Alliance, Alianza de Compatibilidad Ethernet Inalámbrica.

tecnología se hallan cada vez mas presentes en nuestro día a día, proliferando puntos de acceso a Internet por medio de Wi-Fi en oficinas, hoteles, domicilios privados, cafeterías, etc. Además, en algunos casos se omite el uso de las contraseñas permitiendo una conexión abierta a cualquier usuario. En España, por ejemplo, algunos ayuntamientos han implantado redes cuyo uso es un servicio gratuito a los ciudadanos

La instalación se puede realizar de forma rápida con unos costes mínimos, siendo necesarios, únicamente, una tarjeta PCI y un punto de acceso inalámbrico para la conexión. La configuración de los dispositivos compatibles con Wi-Fi tienen una complejidad no mucho mayor que la que puede tener una red cableada, teniendo como dificultad destacable la configuración de la seguridad. Aún así, la característica mas importante es la excelente movilidad que nos proporciona esta tecnología, dándonos una nueva forma de movernos al permitirnos desplazarnos por su área de influencia, cuando y donde queramos, evitando el lastre del cableado.

El protocolo más popular para las redes de telecomunicación cableadas es Ethernet, se centra en las dos últimas capas del protocolo OSI, permite alta velocidad de transmisión, coste asequible y fácil instalación. Ethernet pertenece a la familia de normas IEEE 802 desarrollados por el IEEE. Dentro de este grupo de normas se encuentra la desarrollada para Wi-Fi, la norma IEEE 802.11. Desde el principio, se diseñó con la idea de crear una experiencia lo mas próxima a Ethernet pero para redes inalámbricas, de hecho algunas veces a Wi-Fi se le llama Ethernet inalámbrica y es totalmente compatible con los servicios ofrecidos por el protocolo de la red cableada.

Se puede decir que una red Wi-Fi se compone de tres elementos esenciales: puntos de acceso, medio inalámbrico y estaciones. El objetivo es la transmisión de datos entre las distintas estaciones de nuestra red y de otras redes conectadas a la nuestra.



Figura 3-2: Elementos básicos de una red Wi-Fi

Las estaciones son los dispositivos electrónicos que los usuarios utilizan para conectarse a la red, y han de tener una interfaz de red compatible con el estándar 802.11. El medio, es en este caso, el espacio libre por el que se transmiten las ondas electromagnéticas que llevan la información. Los puntos de acceso actúan como enlace entre el medio y el sistema de distribución que nos comunicara con la red troncal, estos dispositivos se conectan a la infraestructura de red, normalmente cableada, y proporcionan la comunicación entre esta y las estaciones.

El estándar 802.11 pertenece al grupo de estándares IEEE 802 desarrollado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, IEEE. La norma 802.11 se especifica para las dos últimas capas del modelo OSI, la subcapa MAC, de la capa de enlace de datos y la capa física.

Dentro de la capa física se establecen varias especificaciones en función del tipo de modulación empleada o la frecuencia de transmisión, como son 802.11a, 802.11b, 802.11g y 802.11n.

802.11a: El estándar 802.11a trabaja en la banda de frecuencias de 5 GHz y llega a alcanzar velocidades de 54 Mbps, con velocidades reales en torno a los 20 Mbps. Es capaz de soportar 64 usuarios por cada punto de acceso con 64 portadoras OFDM.

802.11b: El estándar 802.11b trabaja en la banda de 2.4 GHz con velocidades de 11 Mbps, que en la realidad están en torno a los 6~7 Mbps. Utilizando modulaciones de espectro ensanchado de tipo DSSS. Es el tipo de tecnología Wi-Fi mas extendida.

802.11g: La incompatibilidad de los sistemas anteriores lleva a la creación de este estándar, que al igual que el 802.11b trabaja en la banda de 2.4 GHz alcanzando velocidades de 54 Mbps, 22 Mbps reales. Utiliza tecnología OFDM, pero es capaz de implementar la tecnología DSSS del estándar 802.11b. Es compatible con el estándar 802.11b, pero no con el 802.11a. Sin embargo, el uso combinado de los estándares 802.11b y 802.11g provoca que la velocidad de transmisión se reduzca a la del de menor tasa binaria.

802.11n: Este estándar esta todavía bajo desarrollo pero se prevé que en un futuro cercano salga al mercado. Todo indica que trabajara en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz simultáneamente, y se espera que supere los 100 Mbps de velocidad. Se basa en la tecnología MIMO (Multiple input Multiple output). Las ondas de RF sufren un multitrayecto, y siempre existe una onda primaria y varias secundarias que no se tienen en cuenta, en este caso se aprovechan todas. Usa multiplexación en el tiempo para su transmisión.

3.1.3 Tecnología WiMAX

En Junio de 2001, se creo una organización sin ánimo de lucro llamada WiMAX Forum, es una agrupación análoga a Wi-Fi-Alliance. Su actuación se basa en establecer un proceso de certificación viable en términos de coste y tiempo, crear una serie de especificaciones técnicas y en general certificar la compatibilidad de distintos dispositivos basados en el estándar IEEE 802.16/ETSI HiperMAN, mas conocida como WiMAX. Actualmente, WiMAX Forum lo componen más de 500 miembros repartidos

en 52 países cuyo objetivo es hacer que la tecnología WiMAX sea líder en el mercado de las redes inalámbricas de banda ancha.

WiMAX es una tecnología desarrollada para redes de tipo WMAN, esto quiere decir que esta tecnología nos proporciona una cobertura mas amplia que la ofertada por Wi-Fi. Podemos conectar dos edificios en un área metropolitana o dar servicio a todo un campus universitario. Según hemos visto en el punto anterior, Wi-Fi nos proporciona una total libertad en oficinas, hogares y lugares públicos. El siguiente paso sería dar conexión a una mayor zona geográfica o interconectar dichas zonas sin estar atados a las tecnologías por cable.

La amplia cobertura de esta tecnología teóricamente llegaría a una distancia de hasta 50 Km., en la práctica en un entorno NLOS hasta 10 Km., y es capaz de alcanzar velocidades de hasta 75 Mbps. Además de las ventajas generales de las redes inalámbricas antes expuestas, sus características nos permitirían extender la cobertura de los sistemas inalámbricos actuales, pudiendo por ejemplo llevar el acceso a áreas de baja densidad de población actualmente marginadas por factores económicos. WiMAX puede integrarse con otro tipo de tecnologías en auge como puede ser la comunicación de voz basada en el protocolo de Internet o IP y algunas de sus normas se han diseñado para poder dar servicio a usuarios en movimiento, dando así un mayor empuje al concepto de movilidad.

Integra la familia de estándares IEEE 802.16 y el estándar HyperMAN del organismo de estandarización europeo ETSI. Esta diseñada para la subcapa MAC, dentro de la capa de enlace de datos, del protocolo OSI y con soporte de múltiples especificaciones para la capa física (PHY).

Igual que en el caso de Wi-Fi, se han establecido diversas especificaciones para WiMAX, de las que destacamos:

Tabla 3-1: Especificaciones para WiMAX

	802.16	802.16^a	802.16e
Espectro	10 - 66 GHz	< 11 GHz	< 6 GHz
Funcionamiento	Solo con visión directa	Sin visión directa (NLOS)	Sin visión directa (NLOS)
Tasa de bit	32 - 134 Mbit/s con canales de 28 MHz	Hasta 75 Mbit/s con canales de 20 MHz	Hasta 15 Mbit/s con canales de 5 MHz
Modulación	QPSK, 16QAM y 64 QAM	OFDM con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM	Igual que 802.16 ^a
Movilidad	Sistema fijo	Sistema fijo	Movilidad pedestre
Anchos de banda	20, 25 y 28 MHz	Seleccionables entre 1,25 y 20 MHz	Igual que 802.16 ^a con los canales de subida para ahorrar potencia
Radio de celda típico	2 - 5 Km. aprox.	5 - 10 Km. aprox. (alcance máximo de unos 50 Km.)	2 - 5 Km. aprox.

Además, se han elaborado algunos estándares adicionales basados en el 802.16a para incorporar detalles técnicos por parte de WiMAX Forum, por ejemplo el 802.16c se realizó para dar soporte a las bandas de 10 – 66 GHz.

3.2 TEORÍA BÁSICA DE ANTENAS

En una campaña de medidas los dispositivos utilizados durante la misma son elementos críticos y por lo tanto es necesario tener un apropiado conocimiento de los mismos. En nuestro caso las antenas usadas afectan directamente a las medidas realizadas y se ha de hacer un estudio detallado de las mismas para no contaminar las muestras tomadas. Por ello, exponemos a continuación las características mas

importantes de las mismas para poder realizar mas adelante un análisis practico que nos asegure una precisión aceptable en las medidas.

3.2.1 Introducción

La definición que nos da el IEEE de una antena es: “Una forma de de radiación y recepción de ondas de radio”. Una antena es el dispositivo que nos permite pasar las ondas guiadas presentes en líneas de transmisión, guías de ondas o cables a ondas radiadas que se propagarían por el espacio libre, y por supuesto también serian los elementos que nos permitirían realizar la operación inversa.

¿Cómo se consigue la radiación?. La línea de transmisión que se conecta a la antena, está conectada a su vez a una fuente de voltaje creando un campo eléctrico. Las líneas de fuerza de dicho campo excitan los electrones libres del conductor provocando un movimiento de cargas. Estas cargas a su vez tienen asociada una corriente que crea un campo magnético. La conjunción de un campo eléctrico variante con el tiempo y un campo magnético forma la onda electromagnética que se propaga por la línea de transmisión.

Ahora bien, las líneas de campo eléctrico pueden ir de una carga positiva a una negativa, de una positiva al infinito, del infinito a una negativa o pueden formar bucles cerrados. Las líneas de campo magnético forman bucles cerrados alrededor de la corriente eléctrica que las crea debido a que físicamente no existen cargas magnéticas. Las ondas electromagnéticas se propagan una detrás de otra desde la fuente a través de la línea de transmisión, durante este tiempo dependen de las cargas de los conductores, pero cuando son radiadas, es decir, se propagan por el medio, forman bucles cerrados y dejan de depender de dichas cargas.

3.2.2 Diagrama de radiación

Podemos definir el diagrama de radiación de la antena como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales. Normalmente se suele estudiar este patrón en la zona de campo lejano, que explicaremos en el siguiente epígrafe, representando el

patrón de campo, amplitud del campo eléctrico o magnético en función del espacio angular, y el diagrama de potencia del campo magnético o eléctrico en decibelios. Se suelen representar normalizados a su máximo valor y generalmente se pueden distinguir el lóbulo principal, que conlleva la dirección de máxima radiación, el lóbulo trasero, que se sitúa en sentido opuesto al lóbulo principal, y varios lóbulos laterales, de menor radiación que el principal. Todos estos lóbulos están separados por puntos donde no hay radiación.

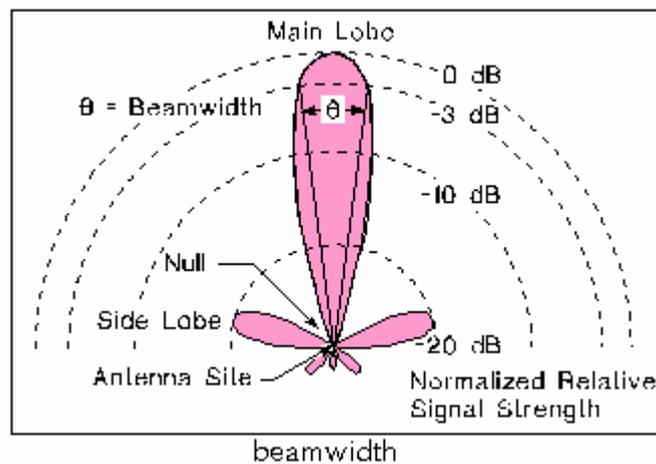


Figura 3-3: Diagrama de radiación para una antena directiva

3.2.3 Regiones de campo

El patrón de radiación varía en función de la distancia con respecto a la antena, por esta razón el campo situado alrededor de una antena se suele dividir en tres zonas diferenciadas. La primera región se conoce como campo cercano reactivo, el patrón de radiación se encuentra expandido, siendo casi uniforme y la zona se extiende desde la antena hasta $R < 0.62\sqrt{D^2 + \lambda}$. Siendo R la distancia del observador a la antena, D la dimensión máxima de la antena y λ la longitud de onda de la onda electromagnética radiada. La segunda región es el campo cercano de radiación o región de *Fresnel*, aquí en el patrón de radiación se empiezan a formar los primeros lóbulos. Esta zona se situaría a continuación de la anterior hasta $R < (2 \times D^2) = \lambda$. Por último, entraríamos en la región de campo lejano o región *Fraunhofer*, el patrón de radiación de esta zona

ya se encontraría plenamente formado distinguiéndose claramente el lóbulo o lóbulos principales y varios lóbulos secundarios.

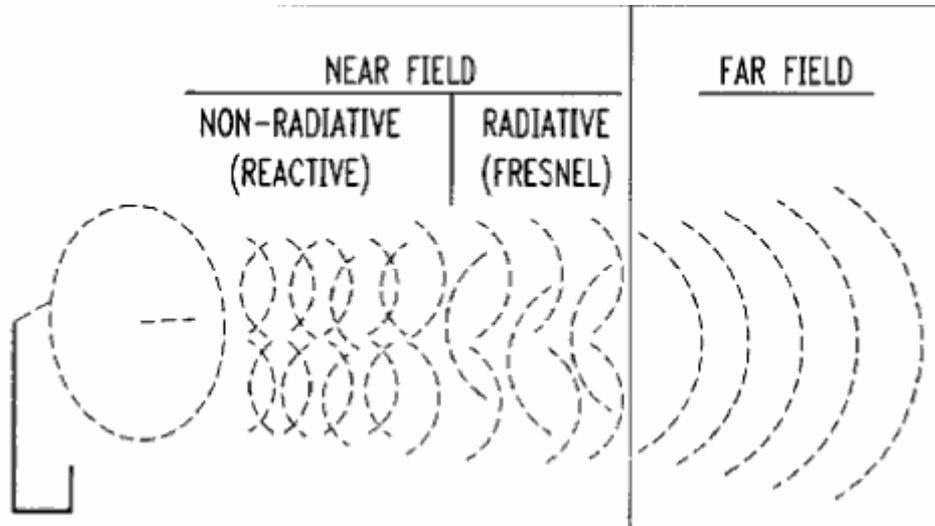


Figura 3-4: Regiones de campo en función del patrón de radiación de una antena

3.2.4 Directividad y Ganancia

La directividad y la ganancia son características relacionadas. Por una parte, la directividad es la relación entre la potencia radiada en la dirección de máxima radiación y la potencia radiada en todas direcciones dividida por el área de una esfera, $4 * \pi$. La ganancia a su vez sería la potencia radiada en la dirección de máxima radiación y la potencia total entregada a la antena dividida por el área de una esfera. La relación entre ambas sería la eficiencia de la antena.

Hemos visto anteriormente como el patrón de radiación se ve afectado por la distancia hasta la antena. La ganancia también se ve afectada por este hecho, de tal forma que, en función de la región de campo en la que nos hallemos, el valor de la ganancia de nuestra antena se puede ver ligeramente afectada. Nuestra ganancia aumentará con la distancia hasta un punto en el cual será prácticamente constante, que obviamente coincide con el campo lejano en el cual el patrón de radiación se estabiliza. A una distancia de D^2 / λ tenemos el 94% de la ganancia en el infinito, y a una distancia

de $2 \cdot D^2 / \lambda$ un 99% de la ganancia en el infinito, siendo D la dimensión máxima de la antena.

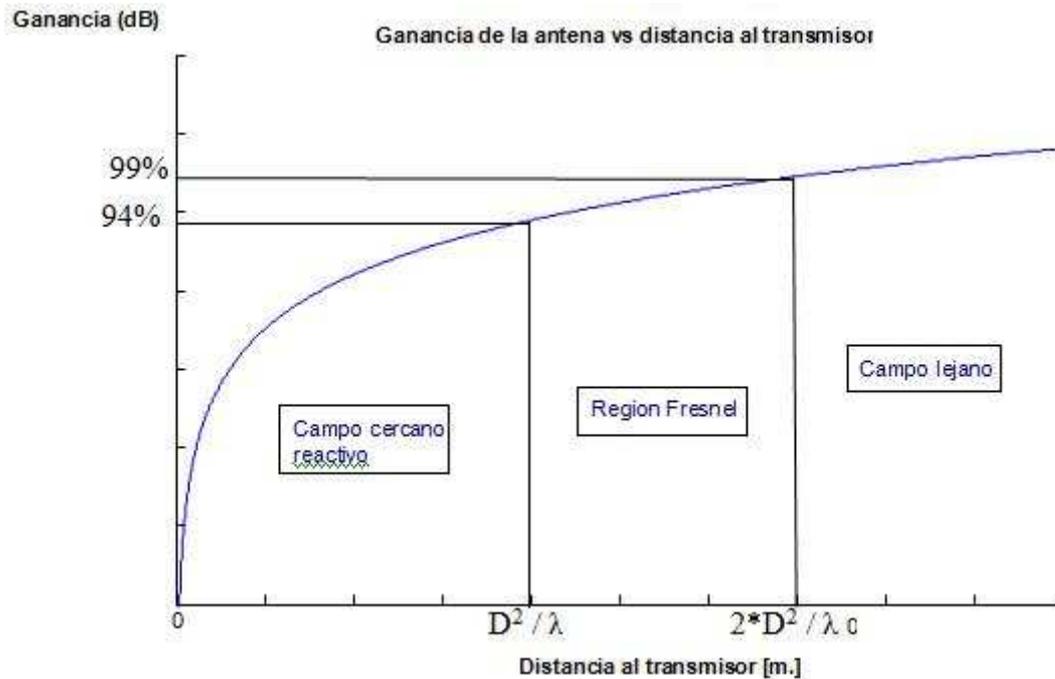


Figura 3-5: Variación de la ganancia de la antena en función de las regiones de campo

Ganancia y antenas de parche:

Entre los diversos tipos de antenas, podemos destacar las antenas de parche que son las utilizadas en este proyecto de fin de carrera. Consisten básicamente en un parche de metal tapado por una carcasa plano que normalmente es de plástico y lo protege de daños. La ganancia en este tipo de antenas se puede calcular en función de la dimensión del dispositivo, del rendimiento de la antena y de la frecuencia de trabajo. La ecuación de la ganancia en este caso es la siguiente:

$$G = (4 \cdot \pi \cdot \eta \cdot D^2) / \lambda^2$$

Siendo λ la longitud de onda, η el rendimiento de la antena y D la distancia máxima entre elementos tal como se indica en la siguiente figura de una antena de parche de cuatro elementos:

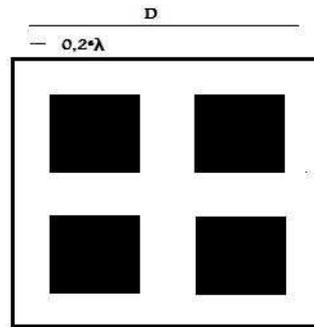


Figura 3-6: Dimensiones de una antena de parche

3.2.4 Eficiencia y Ancho de banda

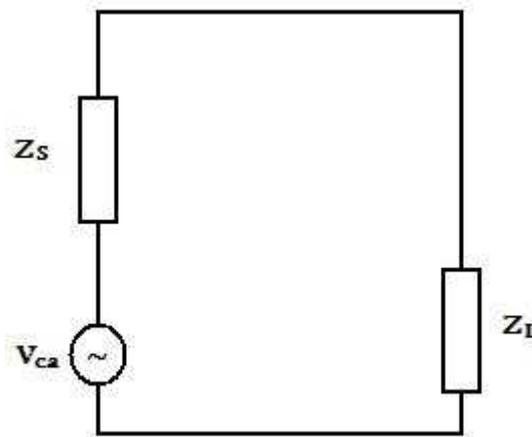


Figura 3-7: Circuito equivalente de una antena.

La figura 9 representa el circuito equivalente de una antena con su correspondiente transmisor. Por una parte tendremos la impedancia de la fuente, $Z_s = R_s + jX_s$, y por la otra la impedancia de la propia antena, $Z_L = R_r + R_l + jX_a$. La potencia disipada por la antena viene representada por R_r y corresponde a la potencia total radiada, R_l por su parte representa las pérdidas intrínseca de la antena. Solo resulta útil la potencia radiada por la antena, por lo que podemos definir la eficiencia de la misma como:

$$e = P_r \div P_t = R_r \div (R_r + R_l)$$

Para conseguir un acoplo ideal y obtener la máxima transferencia de potencia de la fuente a la antena, la impedancia de la fuente y la de la antena han de ser conjugadas,

es decir, $Z_s = Z_a^*$. Si el acoplo no es ideal, se define el siguiente coeficiente de reflexión para cuantificar esas pérdidas:

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{(Z_a + Z_s) \div (Z_a - Z_s)}$$

V_r Sería la amplitud de la onda reflejada de la antena al transmisor y V_i la amplitud de la onda incidente del transmisor a la antena. Normalmente este desacoplo entre el transmisor y la antena se suele representar por medio de VSWR, Voltage Standing Wave Ratio:

$$VSWR = \frac{(1 + |\rho|)}{(1 - |\rho|)}$$

El ancho de banda de una antena es la capacidad de dicho dispositivo para operar en un conjunto de frecuencias. Se define como el rango en el cual la ganancia de la antena no es menor que la ganancia máxima de la antena (menos 3 dB como máximo) ó como el rango en el cual el VSRW no es mayor que 2:1. Hay que considerar que fuera del ancho de banda el patrón de radiación puede verse afectado de forma importante.

3.4 ANALIZADORES DE RED

El analizador de redes es un equipo muy utilizado en electrónica de telecomunicaciones. Es un instrumento capaz de analizar las propiedades de las redes eléctricas, especialmente aquellas relacionadas con los parámetros de dispersión (Parámetros-S). Estos parámetros indican el nivel de transferencia de señal y adaptación de los puertos de cualquier componente, por lo que nos dan información sobre la reflexión y la transmisión de señales eléctricas.

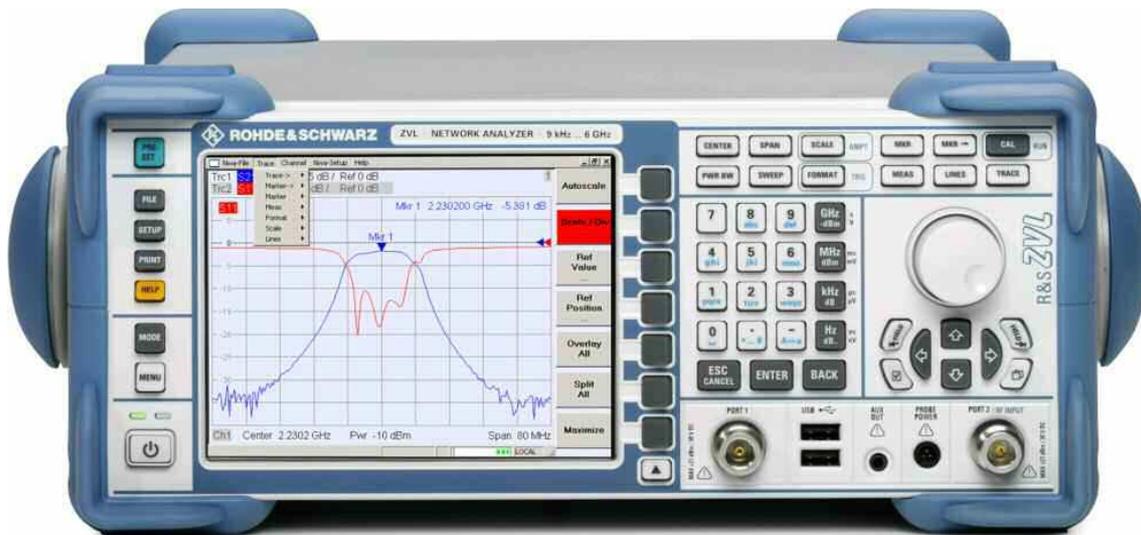


Figura 3-8: Analizador de red ROHDE&SCHWARZ

Los parámetros Scattering, o parámetros S, de un componente se definen como el nivel de señal que llega a un determinado puerto procedente desde cualquier otro. En el caso de un componente con dos puertos (entrada [1] -salida [2]) se definen los siguientes parámetros "S"



Impedancia característica de las líneas de entrada y salida: 50 ohmios

:

Figura 3-9: Componente de radiofrecuencia de dos puertos

$S_{11} = V1-/V1+$ Nivel de señal que se refleja en el puerto 1 por desadaptación de impedancias cuando el puerto de salida está cargado con la impedancia característica de la línea.

$S_{22} = V2-/V2+$ Nivel de señal que se refleja en el puerto 2 por desadaptación de impedancias cuando el puerto de entrada está cargado con la impedancia característica.

$S_{21} = V2-/V1+$ Transferencia de señal desde el puerto 1 hasta el puerto 2 cuando la salida se encuentra cargada.

$S_{12} = V1-/V2+$ Transferencia de señal desde el puerto 2 hasta el puerto 1 cuando la entrada se encuentra cargada.

Como se puede apreciar estos parámetros ofrecen relaciones de tensión. Por norma general los analizadores de redes medirán relaciones de potencia, esto es, el cuadrado de los parámetros S.

Los analizadores de redes son equipos que permiten la medida exhaustiva de componentes de radiofrecuencia. Existen dos tipos de analizadores de redes, los escalares y los vectoriales. Los primeros miden los parámetros scattering únicamente en amplitud, mientras que los segundos permiten su medida en amplitud y fase.

Entre los controles básicos en un analizador de redes destacan el control que determina la característica de la señal de RF que ataca al componente bajo medida (frecuencias, potencia, puntos, etc), y el control con el que se define el parámetro que se desea medir así como su formato y opciones de medida (amplitud, fase, promediado, etc).

En función de cada analizador existen otros muchos controles referentes a aspectos gráficos de la representación, división de pantalla o almacenamiento de medidas que son específicos de cada fabricante.

Lo primero que se debe hacer antes de medir cualquier componente es calibrar el equipo o bien recuperar de la memoria una calibración salvada con anterioridad. Para calibrar el equipo deberemos seguir los siguientes pasos:

1.- Rango de frecuencias y número de puntos. Al igual que en los analizadores de espectros se define frecuencia inicial y final de trabajo, o bien, frecuencia central y SPAN. El número de puntos indica la resolución de la medida, cuanto más puntos más resolución pero con mayor lentitud.

2°.- Potencia. El analizador mide los componentes utilizando una señal de RF cuya potencia debe ser fijada. Su valor suele estar comprendido entre 0 y 10dBm.

3°.- Menú de calibración. El equipo indicará en pantalla que se vayan conectando diversas terminaciones (circuitos abiertos, cortocircuitos, cargas, etc) que se tomarán de referencia en la posterior medida.

Una vez calibrado el equipo podemos empezar a medir cualquier parámetro del componente a través del menú de medida desde donde se despliega una lista con los distintos parámetros S que podemos medir (S_{11} , S_{21} , S_{12} y S_{22}). También podremos elegir el formato de representación a través de su correspondiente menú.

3.5 BALANCE DE UN ENLACE RADIOELÉCTRICO

El balance del enlace es la ecuación que relaciona la potencia disponible en el receptor en función de la potencia entregada por el transmisor y las diferentes pérdidas y ganancias que puedan existir entre ambos puntos. Para un enlace como el que hemos estudiado, tendremos el siguiente balance de potencias:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{atx} + G_{arx} - L_{prop} - L_c$$

Donde P_{rx} es la potencia de la señal en recepción, P_{tx} es la potencia de la señal en la transmisión, G_{atx} y G_{arx} son las ganancias de las antenas transmisora y receptora y L_{prop} y L_c son las pérdidas del enlace debidas a la propagación y al cableado respectivamente. Las pérdidas y las ganancias están en dB y las potencias del enlace en unidades logarítmicas, como dBW o dBm.

En nuestro caso, nos interesa valorar las pérdidas sufridas en el enlace debidas a la propagación en un entorno cerrado. Por lo tanto, a la hora de tomar las medidas, hemos calculado el resto de los parámetros de la ecuación, como son, potencias en transmisión y recepción, ganancias de las antenas, y pérdidas del enlace ajenas a las

deseadas (en este caso debidas a los cables). Una vez que hemos tomado esos datos, solo nos queda despejar las pérdidas de propagación del balance del enlace:

$$L_p = (P_{tx} - P_{rx}) + (G_{atx} + G_{arx}) - L_c$$

4. CAPÍTULO 4: PREPARACIÓN DE LA CAMPAÑA

El objetivo del proyecto es la toma de medidas para la caracterización de las pérdidas de propagación e inserción en entornos LOS y NLOS cerrados para señales trabajando en las bandas de frecuencia: 2.3 – 2.5 GHz y 3.3 – 3.5 GHz correspondientes a las tecnologías Wi-Fi y WiMAX.

En la primera fase del proyecto se ha reunido el equipo necesario para la toma de medidas, siendo necesario analizar las características más importantes de los dispositivos críticos resaltando sus capacidades y limitaciones para poder obtener unos resultados no condicionados al material. A continuación, se ha realizado un entrenamiento en el material y las técnicas de medida con las que se ha trabajado. Una vez realizados estos pasos previos se ha procedido a la toma de una gran cantidad de medidas en distintos escenarios para la caracterización de las pérdidas. Estos datos se han procesado, cuantificando la atenuación en los escenarios bajo estudio y realizando una aproximación matemática de las pérdidas de propagación e inserción. Adicionalmente se han variado algunos parámetros con el objetivo de reflejar el efecto que pueden tener en los resultados. Finalmente, se ha elaborado el texto explicativo del origen, la ejecución y los resultados del Proyecto de Fin de Carrera.

4.1 ANÁLISIS DEL MATERIAL

Para la elaboración del estudio, se ha utilizado el material que se presenta a continuación. Ha sido necesario analizar parte del mismo para caracterizar de una forma suficientemente aproximada algunos de sus parámetros y poder así obtener unas medidas fiables.

4.1.1 Antenas

Las antenas son los elementos mas importantes, ya que pueden afectar de diversas formas los resultados en cada escenario, por eso es muy importante

asegurarnos de estudiar parámetros como la ganancia y la reflexión de nuestras antenas, con el fin de obtener unos datos independientes de los dispositivos específicos.

Se han utilizado diez antenas de parche con polarización vertical, de distinta ganancia y distinta banda de trabajo. Dos de ellas han sido fabricadas en la UAM:

- Una antena de 9 dB de ganancia que trabaja en la banda de Wi-Fi comprendida entre 2.3 GHz y 2.5 GHz.
- Una antena de 13 dB de ganancia que trabaja en la banda de Wi-Fi comprendida entre 2.3 GHz y 2.5 GHz.

Y las otras ocho se han comprado a “TWIN antennas” (TWIN):

- Dos antenas de 9 dBi de ganancia que trabajan a la frecuencia de 2.4 GHz.
- Dos antenas de 9 dBi de ganancia que trabajan a la frecuencia de 3.3 GHz.
- Dos antenas de 18 dBi de ganancia que trabajan a la frecuencia de 2.4 GHz.
- Dos antenas de 18 dBi de ganancia que trabajan a la frecuencia de 3.3 GHz.

Las medidas se han realizado con las antenas de alta ganancia de “TWIN antennas”, ya que, como se verá más adelante, tienen una mayor banda de trabajo que las de baja ganancia. Las antenas de baja ganancia se han utilizado para realizar el estudio sobre el efecto que puede tener una mayor o menor ganancia en las pérdidas de propagación. Por otro lado, las antenas de la UAM han sido necesarias para la caracterización de las ganancias de las antenas anteriores.

Calculo de la reflexión:

La reflexión de la antena ha de ser, menor de -10 dB o de lo contrario estaríamos devolviendo demasiada señal. Por lo tanto, la banda de trabajo de cada una de las antenas será el grupo de frecuencias que satisfaga esa condición. Para cada antena se ha realizado

una captura del analizador de red y se han definido las frecuencias de trabajo para cada una.

La reflexión medida para las antenas de la UAM es la siguiente.

Antena de 9 dB:

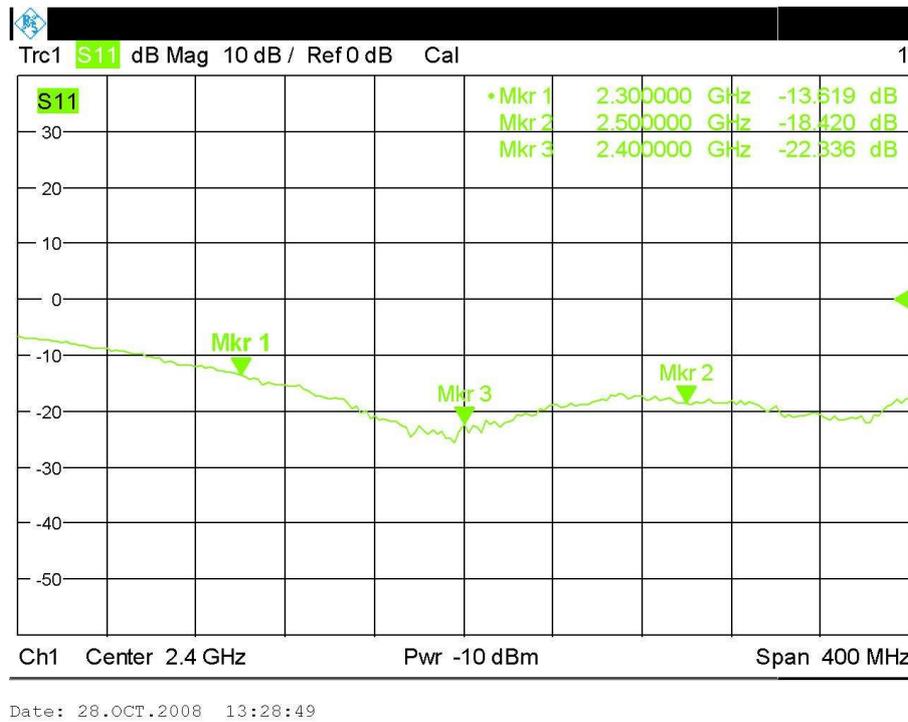


Figura 4-1: Resultado de la medida de la reflexión de la antena de 9 dB construida en la UAM

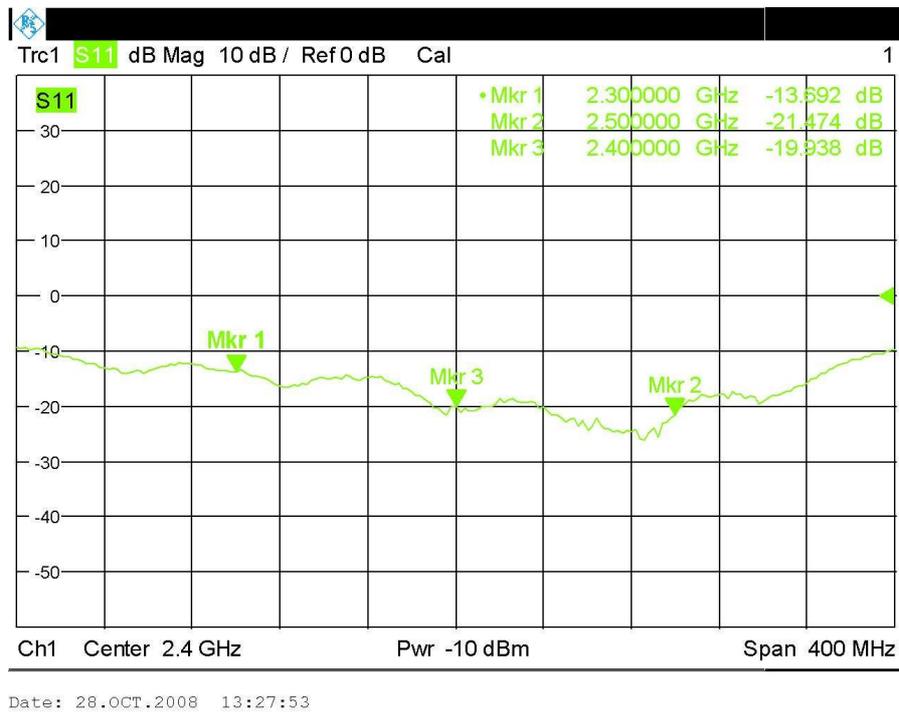
Antena de 15 dB:

Figura 4-2: Resultado de la medida de la reflexión de la antena de 15 dB construida en la UAM

En estas dos antenas podemos observar que la banda de trabajo posible se extiende desde 2.25 GHz hasta mas de 2.6 GHz para la antena de media ganancia y desde 2.2 GHz hasta 2.6 GHz para la antena de alta frecuencia.

La reflexión medida para las antenas “TWIN” es la siguiente:

Antenas de 9 dB trabajando a 2.4 GHz

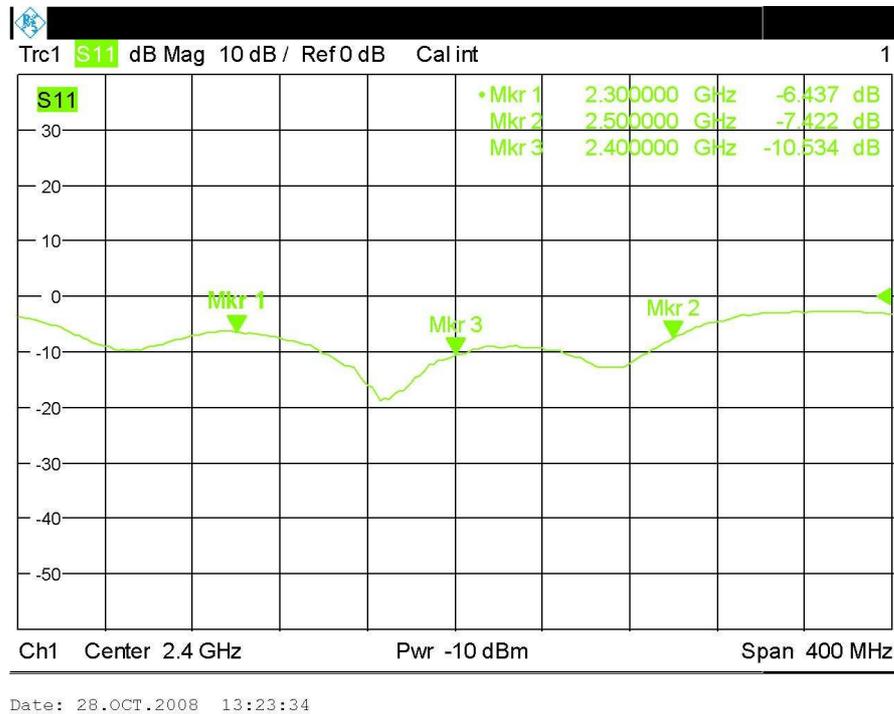


Figura 4-3: Resultado de la medida de la reflexión de la primera antena de 9 dB con frecuencia de trabajo de 2.4 GHz

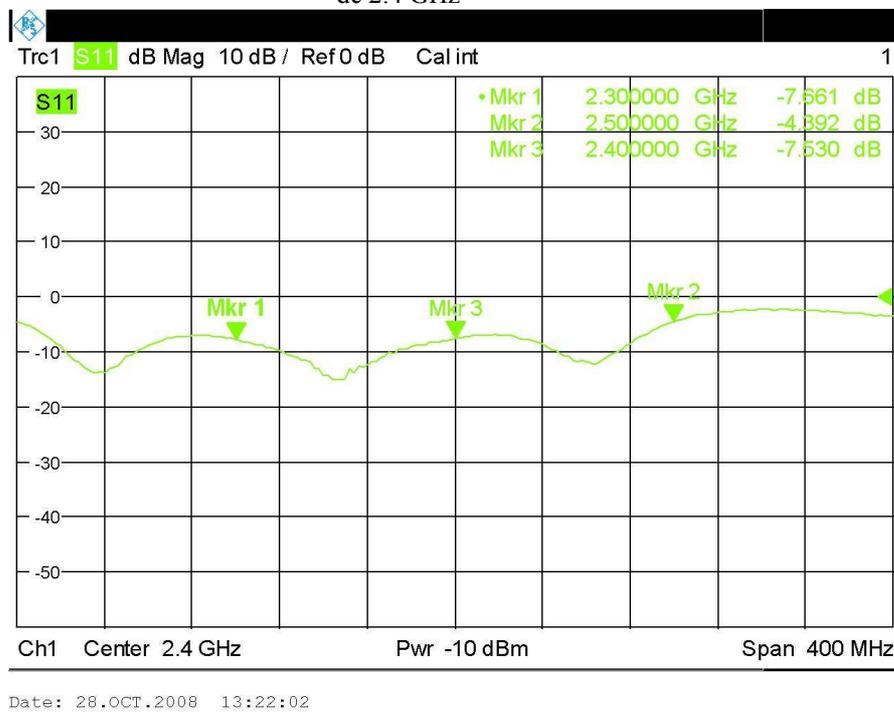


Figura 4-4: Resultado de la medida de la reflexión de la segunda antena de 9 dB con frecuencia de trabajo de 2.4 GHz

Antenas de 18 dB trabajando a 2.4 GHz

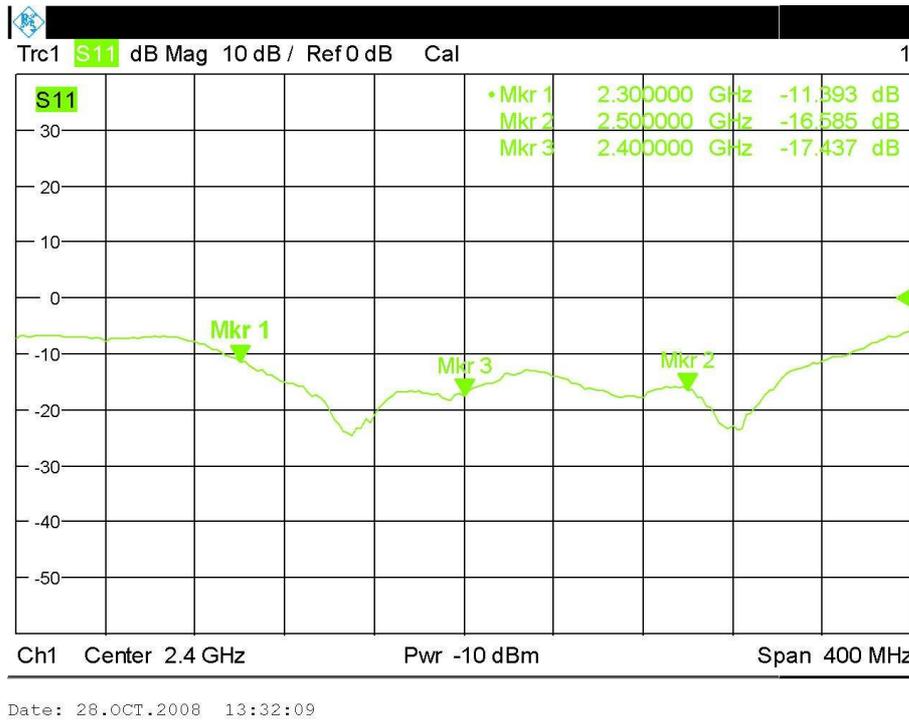


Figura 4-5: Resultado de la medida de la reflexión de la primera antena de 18 dB con frecuencia de trabajo de 2.4 GHz

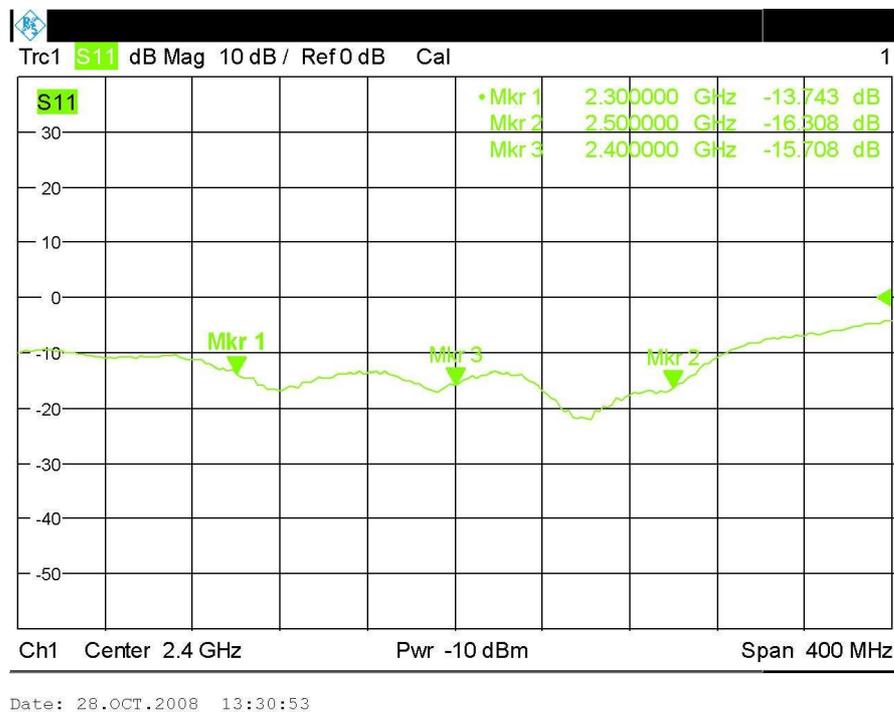


Figura 4-6: Resultado de la medida de la reflexión de la segunda antena de 18 dB con frecuencia de trabajo de 2.4 GHz

Antenas de 9 dB trabajando a 3.3 GHz

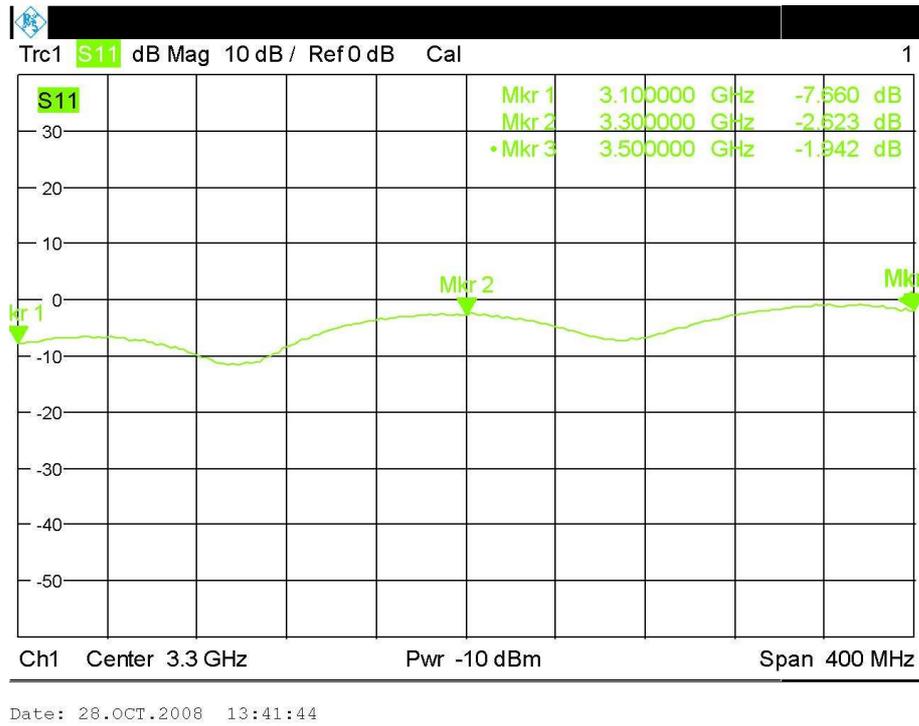


Figura 4-7: Resultado de la medida de la reflexión de la primera antena de 9 dB con frecuencia de trabajo de 3.3 GHz

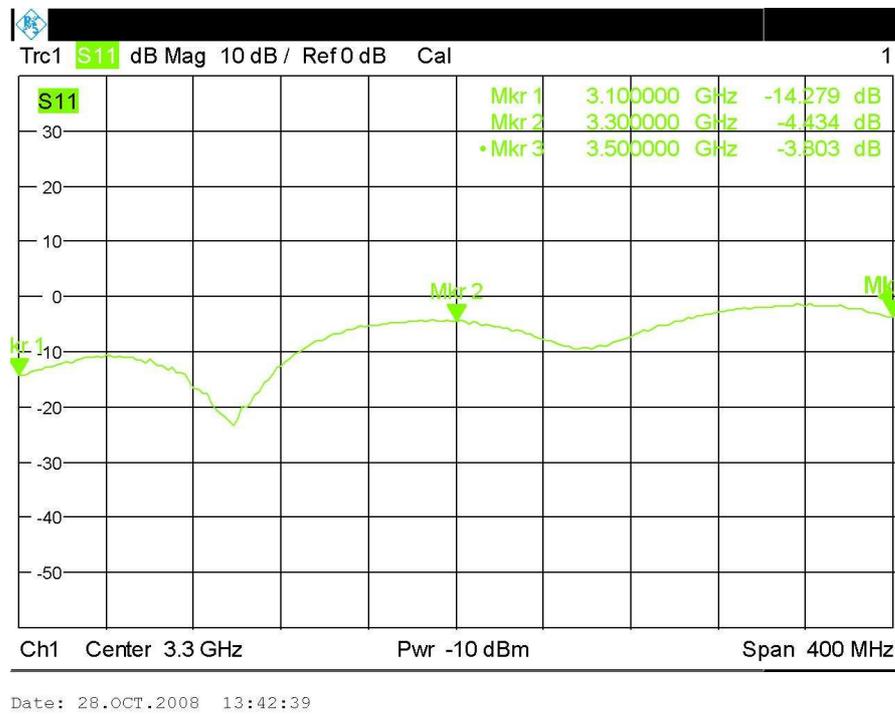


Figura 4-8: Resultado de la medida de la reflexión de la segunda antena de 9 dB con frecuencia de trabajo de 3.3 GHz

Antenas de 18 dB trabajando a 3.3 GHz

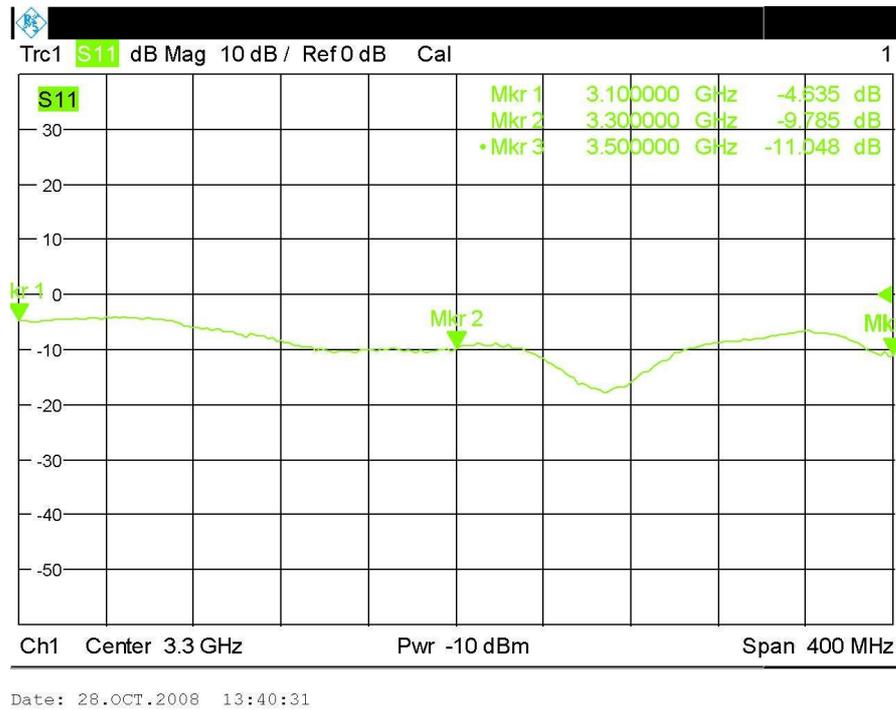


Figura 4-9: Resultado de la medida de la reflexión de la primera antena de 18 dB con frecuencia de trabajo de 3.3 GHz

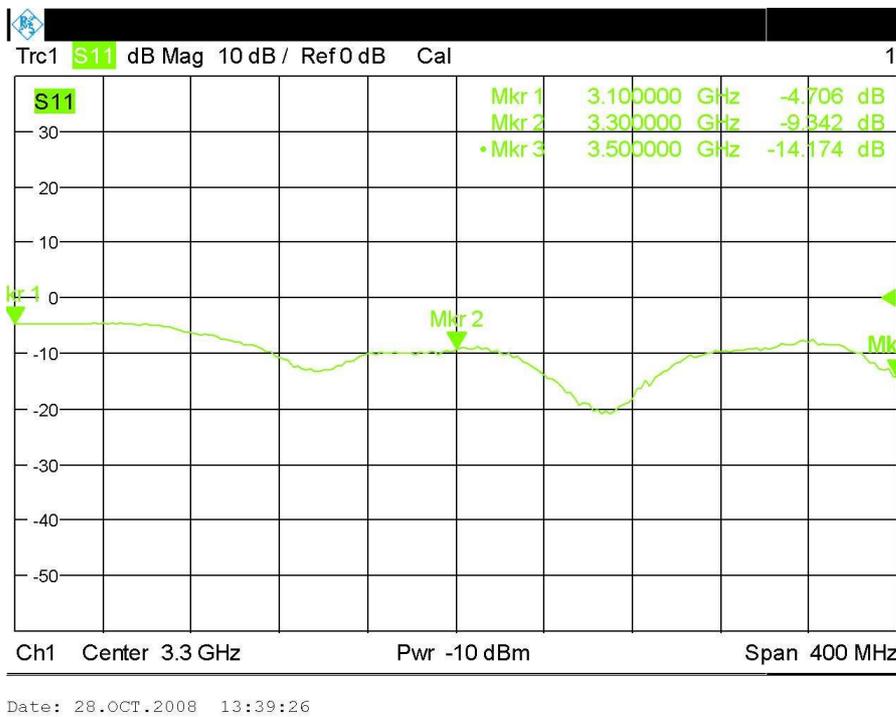


Figura 4-10: Resultado de la medida de la reflexión de la segunda antena de 18 dB con frecuencia de trabajo de 3.3 GHz

En este caso, las antenas de baja ganancia no se pueden considerar útiles en una banda de frecuencia extensa, sino más bien en frecuencias aisladas. Las antenas diseñadas para 2.4 GHz podrían trabajar a 2.35 GHz y a 2.37 GHz si deseamos trabajar con las dos a la vez, si no, se podrían ampliar las ventanas de trabajo. Las antenas de 3.3 GHz tienen peor reflexión y solo se podrían emplear si trabajamos a 3.2 GHz o a 3.35 GHz, en nuestro caso la segunda opción es la mejor ya que se ajusta más a la banda de frecuencia WiMAX bajo estudio. Por otro lado las antenas de alta ganancia a 2.4 GHz tienen una banda de trabajo de 2.3 GHz a 2.5 GHz, y las de 3.3 GHz de 3.25 GHz a 3.4 GHz⁵.

Cálculo de la ganancia de las antenas:

La ganancia de las antenas construidas en la universidad autónoma de Madrid ha sido ya calculada por medio de simulaciones en Matlab y tras su análisis en una cámara neocica, siendo los resultados:

- Ganancia de 9,7 dB para la antena de un elemento radiante.
- Ganancia de 13,3 dB para la antena de cuatro elementos radiantes.

La ganancia de las antenas adquiridas para la elaboración del proyecto, también ha sido revisada. Tras un estudio de las antenas se ha aproximado el dato de las ganancias a:

- Ganancia de 8.4 dB para la antena de menor tamaño.
- Ganancia de 12.3 dB para las antenas de un mayor tamaño.

4.1.2 Cableado

Para la ejecución de las medidas, ha sido necesario, además del cableado existente en los laboratorios de la UAM, fabricar dos cables de una longitud adecuada para la toma de medidas en enlaces de hasta 20 m. Para minimizar costes, la fabricación

⁵ Si deseamos ampliar la banda de trabajo desde 2.4 GHz hasta 2.5 GHz debemos asumir una reflexión de hasta -8 dB en algunos puntos.

de los mismos ha sido realizada en la UAM. Dicha fabricación ha consistido en el ensamblaje de los conectores SMA al propio cable.

La longitud de los cables es de 10 m. cada uno, al ser tan largos se ha medido la atenuación de los mismos para considerarla en el balance del enlace radioeléctrico.

Atenuación de los cables:

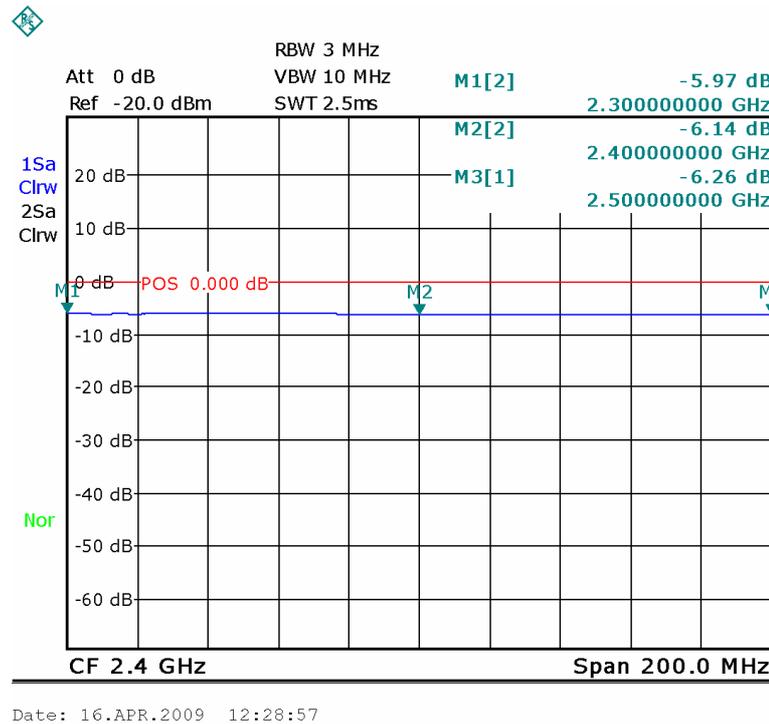


Figura 4-11: Resultado de la medida de la atenuación de los cables de 10 metros construidos en la UAM

Como se puede observar, la atenuación de los mismos es de 6 dB por cable, por lo que si queremos eliminar de las pérdidas de nuestro radio enlace las perdidas debidas a los cables utilizados, asumiríamos 12 dB.

4.1.3 Analizador de red (Rohde&Swartz)

Para el análisis del enlace de radio y el cálculo de las pérdidas, hemos utilizado los analizadores de red y de espectro proporcionados por la universidad autónoma de Madrid (Rohde&Swartz ZVL). Hemos utilizado los dispositivos para dos objetivos. Por

un lado hemos usado los analizadores para definir las propiedades de reflexión y atenuación del instrumental usado, por ejemplo la reflexión de las antenas o la atenuación de los cables. Por otro lado estos dispositivos son elementos clave en nuestro estudio, ya que nos proporcionan información sobre las pérdidas que hemos sufrido en nuestro enlace radio.

En el caso de la reflexión de los dispositivos, la calibración se ha de realizar con un kit especial diseñado con ese propósito (Agilent 85033E 3.5mm para conectores de tipo SMA) , sin embargo, para el cálculo de la atenuación de los cables y las pérdidas sufridas en un enlace radioeléctrico, basta con hacer una calibración de referencia. En nuestro caso para las pérdidas de los cables hemos calibrado el analizador con un cable muy corto cuya atenuación consideramos despreciable, y para realizar el cálculo de las pérdidas en un radio enlace hemos tomado una distancia de calibración que tuviéramos previamente controlada.

Hemos trabajado con 201 puntos y una potencia de 0 dB en los cálculos de propagación y 10 dB en los cálculos basados en pérdidas de inserción. Hemos utilizado el parámetro S_{11} para las medidas de reflexión y el S_{12} para las medidas relacionadas con las pérdidas de propagación del enlace y de inserción por diversos materiales. Las bandas que hemos estudiado son 2.3-2.5 GHz y 3.3-3.5 GHz.

4.1.4 Equipo Diverso

Como cabe suponer, para la toma de medidas durante el proyecto se ha necesitado de diverso material de laboratorio como computadores, programas para el procesamiento y análisis de los datos, un procesador de texto, soportes para las antenas y material para su sujeción, dispositivos de medida, estabilizadores, cableado diverso, etc. Sin embargo, dichos elementos y dispositivos no requieren un análisis específico, por lo que no se detallan en esta memoria.

4.2 PROCEDIMIENTOS DE MEDIDA

Las pérdidas de propagación analizadas a lo largo del proyecto se han realizado siguiendo el método que exponemos a continuación. En primer lugar hemos conectado

las antenas transmisora y receptora al analizador de red Rodhe&Swartz y hemos configurado el dispositivo a la banda correspondiente, a una potencia de salida de 0dB. A continuación hemos situado las antenas a una distancia de un metro para proceder a la calibración del sistema. Luego hemos ido separando la antena receptora de la emisora según el paso establecido en cada escenario, y recogido los resultados del analizador por medio de una hoja de datos, de extensión .txt, que ofrece 201 puntos frecuenciales y la atenuación en cada uno de ellos.

A un metro las antenas ya están situadas en la región de campo lejano por lo que la ganancia de las mismas será prácticamente constante en todas las medidas. Además, las pérdidas debidas a multitrayecto son prácticamente despreciables en ese punto, por lo tanto hemos decidido asumir a un metro las pérdidas teóricas de propagación.



Figura 4-12: Imagen de la conexión de la antena transmisora al analizador de red



Figura 4-13: Imagen del montaje de las antenas para la toma de una de las medidas

Una vez obtenidas todas las medidas de un escenario, las hemos procesado con un programa desarrollado en MATLAB. El programa, adjuntado en el ANEXO, consiste en la lectura de todos los archivos .txt recogidos a lo largo de la toma de medidas, a esas medidas le suma las pérdidas por el espacio libre correspondientes a la distancia de referencia, y posteriormente los análisis matemáticos pertinentes para ayudarnos a realizar una correcta interpretación de los resultados. Para las pérdidas de propagación hemos realizado unas aproximaciones lineales para observar la tendencia general y el comportamiento probabilístico de la señal estudiada. Por último, hemos hecho una representación gráfica de las medidas y de las aproximaciones matemáticas, proporcionando información relevante (máximos, mínimos, desviación).

El método para la medida de las pérdidas de inserción es muy similar al anterior. Para estos cálculos hemos calibrado las antenas a una distancia que nos asegurase estar en campo lejano, y después hemos trasladado las antenas o el material de tal forma que conservásemos la distancia de calibración. La potencia en este caso ha sido de 10 dB, eligiendo 201 puntos de la banda bajo estudio.



Figura 4-14: Imagen del montaje realizado para el cálculo de las pérdidas de inserción introducidas por un material

4.3 ESCENARIOS

La campaña de medidas se ha desarrollado en los edificios de la escuela politécnica superior de la UAM. La campaña se ha realizado en dos fases, en la primera nos hemos centrado en las pérdidas de propagación en las bandas de frecuencias bajo estudio, y en la segunda hemos realizado un análisis de las pérdidas de inserción que distintos materiales y obstáculos pueden introducir en un radio enlace.

4.3.1 Pérdidas de propagación (Escenarios)

Las pérdidas por propagación se han realizado en distintas ubicaciones. La primera zona fue el Laboratorio 7 de la escuela, dicho laboratorio se encuentra en el tercer piso del edificio B y tiene una distribución como la que se muestra a continuación:



Figura 4-15: Imagen general del Laboratorio 7. Situado en la tercera planta del edificio A de la EPS-UAM



Figura 4-16: Imagen del pasillo 2 del Laboratorio 7.



Figura 4-17: Imagen del pasillo 1 del Laboratorio 7

El laboratorio está equipado con numeroso equipo eléctrico y se encuentra dividido por mobiliario de oficina según se indica en las imágenes. Como se puede observar, entre los tres grupos de puestos de trabajo se forman dos pasillos. El pasillo 1 lo forma la pared con el primer grupo de mobiliario y una fila de puestos de trabajo de 1.5 m. de altura, por lo tanto estamos ante un pasillo que consideramos “semicerrado”. El pasillo 2, delimitado por dos obstáculos ambos de 1,5 m. de altura, lo consideramos un pasillo “semiabierto”.

Las primeras medidas se han realizado en el pasillo1, nos han servido como punto de partida para observar como afectan a los resultados los distintos cambios que hemos ido efectuando a lo largo del estudio. En este escenario hemos investigado en primer lugar las pérdidas de propagación en las bandas de 2.3GHz a 2.5 GHz y de 3.3 GHz a 3.5 GHz, después hemos realizado los siguientes experimentos y hemos observado como esas variaciones afectan a nuestro resultado inicial:

- Posición dentro de cada pasillo en función de su cercanía a los elementos delimitantes.
- Altura de las antenas con respecto del suelo.
- Comparación entre el pasillo semicerrado y el pasillo semiabierto.
- Breve estudio de cómo afecta una mayor o menor ganancia a la tendencia de las pérdidas de propagación.

- Breve estudio del efecto que puede suponer una polarización distinta del elemento radiante.

La segunda zona de escenarios que hemos estudiado es la tercera planta del edificio A, donde se encuentran los laboratorios de prácticas de la UPS-UAM. En este espacio hemos analizado un pasillo semicerrado y un pasillo abierto. Se han utilizado las antenas de menor ganancia para un mejor estudio del efecto de los pasillos.

Pasillo semicerrado:



Figura 4-18: Imagen del pasillo semicerrado situado en la planta 3 del edificio A de la EPS-UAM

Pasillo abierto:



Figura 4-19: Imagen de la pasarela que une los pasillos laterales de la planta 3 del edificio A de la EPS-UAM

Por último, hemos incluido la toma de datos en un pasillo cerrado. Nos hemos situado en la planta cuarta del edificio B de la EPS-UAM y hemos analizado dos pasillos cerrados de distintas características, uno de ellos tiene una anchura amplia y variable, el otro era un pasillo estrecho y uniforme.

Pasillo de anchura variable:



Figura 4-20: Imagen del pasillo de anchura variable situado en la planta 4 del edificio B de la EPS-UAM

Pasillo estrecho:

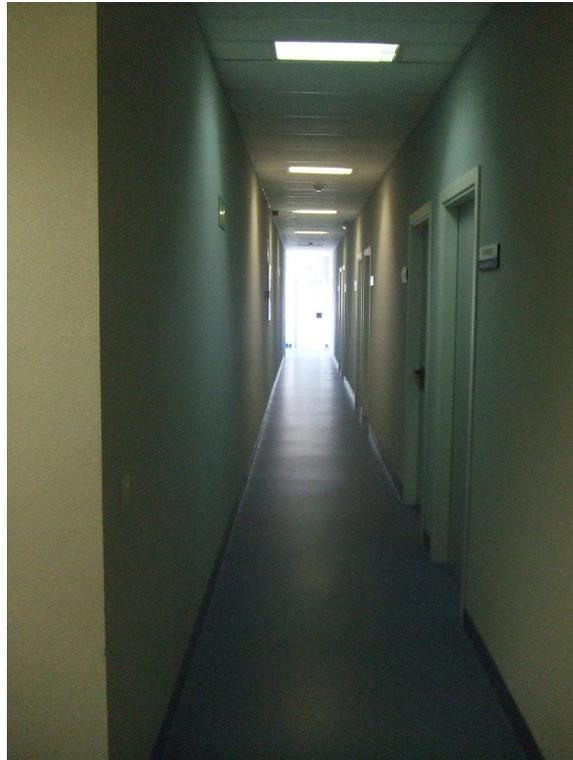


Figura 4-21: Imagen del pasillo situado en la planta 4 del edificio B de la EPS-UAM

4.3.2 Pérdidas de inserción (Escenarios)

Como hemos comentado en el inicio de la memoria, además de las pérdidas de propagación en interiores, hemos realizado toma de medidas relacionadas con las pérdidas de inserción producidas por diversos materiales con el objetivo de completar el análisis.

Se han estudiado diversos obstáculos repartidos por todo el edificio de la EPS-UAM, para ellos se han utilizado las antenas de mayor ganancia disponibles para evitar en la medida de lo posibles efectos no deseados como puede ser el multitrayecto. Hemos analizado los siguientes obstáculos para ambas bandas frecuenciales:

- Puerta simple de despacho.
- Puerta doble de entrada a los laboratorios.

- Pared fina para la separación de estancias.
- Cristal de superficie amplia.
- Pizarras grandes de aula.
- Personas de distinta complejión.

Además hemos analizado el efecto de la polarización horizontal para la banda de 2.3-2.5 GHz.

5. CAPÍTULO 5: CAMPAÑA DE MEDIDAS

5.1 Pérdidas de propagación

5.1.2 Primera zona: Laboratorio

La primera parte de nuestro trabajo se ha centrado en el análisis de las pérdidas de propagación en las bandas de frecuencia 2.3-2.5 GHz y 3.3-3.5 GHz. Los primeros escenarios se encuentran en el laboratorio 7 del edificio de la EPS-UAM. Un esquema del laboratorio se presenta a continuación:

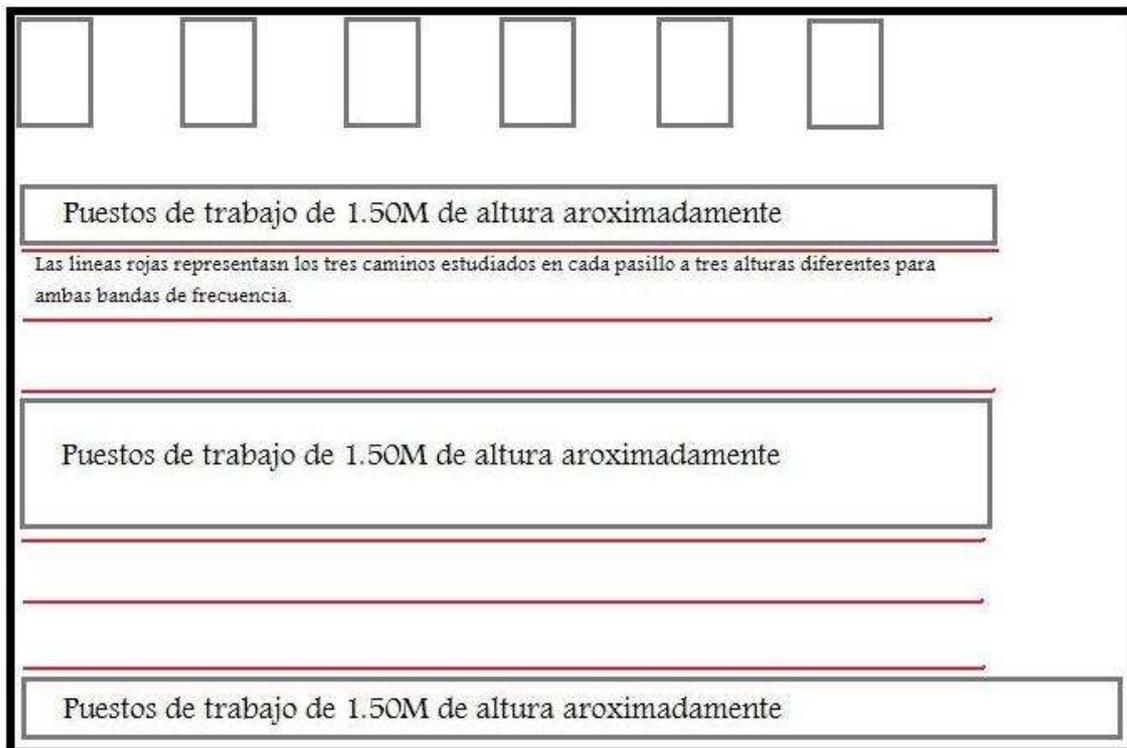


Figura 5-1: Esquema de la distribución del laboratorio 7 de la EPS-UAM y de las medidas realizadas en el.

El laboratorio está equipado con numeroso equipo eléctrico y se encuentra dividido por mobiliario de oficina según se indica en la figura 32. La toma de medidas se realiza en dos pasillos. El pasillo 1 es un corredor semicerrado, formado por la pared del laboratorio y una fila de puestos de trabajo que forman una barrera de no más de metro y medio de altura. El pasillo 2 está delimitado por dos barreras de puestos de

trabajo que cubren la mitad del espacio entre el suelo y el techo, por lo que lo consideramos un pasillo semiabierto.

Como se indica en el esquema del laboratorio hemos dividido los pasillos en tres trayectos o caminos, para poder realizar medidas relativas a la posición del enlace en cada uno. El soporte de nuestras antenas puede ser regulado, por lo que en cada camino de los pasillos recopilaremos medidas a tres alturas diferentes, siendo estas de 1.20, 1.35 y 1.50 metros. La longitud que nos permite estudiar el pasillo es de aproximadamente 7 metros, y la separación entre medidas según la literatura especializada ha de estar entre 5 y 10 λ s. Como nuestras frecuencias se enmarcan en las bandas de frecuencias de 2.3 a 2.5 GHz y de 3.3 a 3.5 GHz, la separación entre las medidas ha de estar entre $5 \cdot \lambda_{3.5}$, como limite por abajo, y $10 \cdot \lambda_{2.3}$, por arriba, es decir entre 0.43 y 1.3 m. En este caso hemos escogido 0.5 m de distancia entre las medidas.

Además de analizar las pérdidas de propagación para estos pasillos, hemos realizado una serie de medidas con unas antenas de menor ganancia. También hemos tomado algunas medidas cambiando la polarización de las antenas de mayor ganancia para la banda de 2.3-2.5 GHz.

5.1.2.1 Medidas para la banda de 2.3 GHz a 2.5 GHz

Toma de medidas del Pasillo 1

El primer análisis que hemos realizado ha sido la toma de medidas en el primer pasillo por el camino 1 a una altura de 1.35m. Este primer paso nos ha servido para realizar una primera aproximación a las pérdidas de propagación que deseamos estudiar. Los resultados que presentamos a continuación, se han calculado para tres de las frecuencias de la banda 2.3 a 2.5 GHz, que en este caso son las de los extremos y la central, 2.3 GHz, 2.4 GHz y 2.5 GHz.

1. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 12.4 dB

Altura de las antenas: 1.35 m

Frecuencias estudiadas: 2.3, 2.4 y 2.5 GHz

Posición en el pasillo: centrada

Para la elaboración de las gráficas, hemos asumido el dato teórico para la medida correspondiente a la distancia de 1 metro, ya que a esa distancia al no tener prácticamente multitrayecto las medidas han de ser iguales. El resto de las medidas están referenciadas a 1 metro por lo que se representan sin necesidad de hacer un balance de potencias. Además, se han añadido a las figuras los resultados teóricos, que hemos presentado en apartados anteriores, para ayudarnos en el estudio.

Las pérdidas obtenidas en el enlace radioeléctrico estudiado siguen la tendencia teórica prevista con aproximadamente unos 3 dB de diferencia, que son debidos a las pérdidas por multitrayecto originadas por los materiales del edificio. Como se puede observar en la figura, estas pérdidas se pueden aproximar mediante una función matemática compuesta. Teniendo dos tramos lineales con sus correspondientes pendientes y un punto crítico que sería el salto entre ambos tramos. Siendo dicha función de la forma:

$$Lp(dB) = \begin{cases} L_{1m} + n_1 \times d; \sigma_1 & d \leq d_1 \\ L_{d1} + n_2 \times (d - d_1); \sigma_2 & d > d_1 \end{cases}$$

Siendo, n_i las pendientes en cada tramo, σ_i las desviaciones asumidas en cada tramo y d_1 el punto crítico de la función.

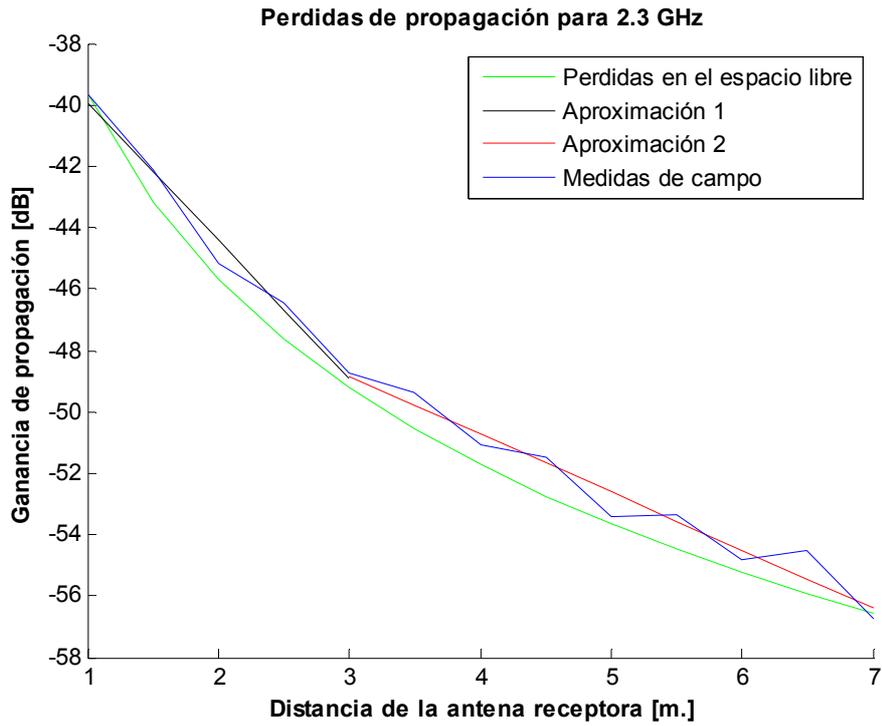


Figura 5-2: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 1 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 39.94 + (4.48) \times d; \sigma_1 = 0.75 & d \leq 3m \\ 48.82 + (1.89) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.94 & d > 3m \end{cases}$$

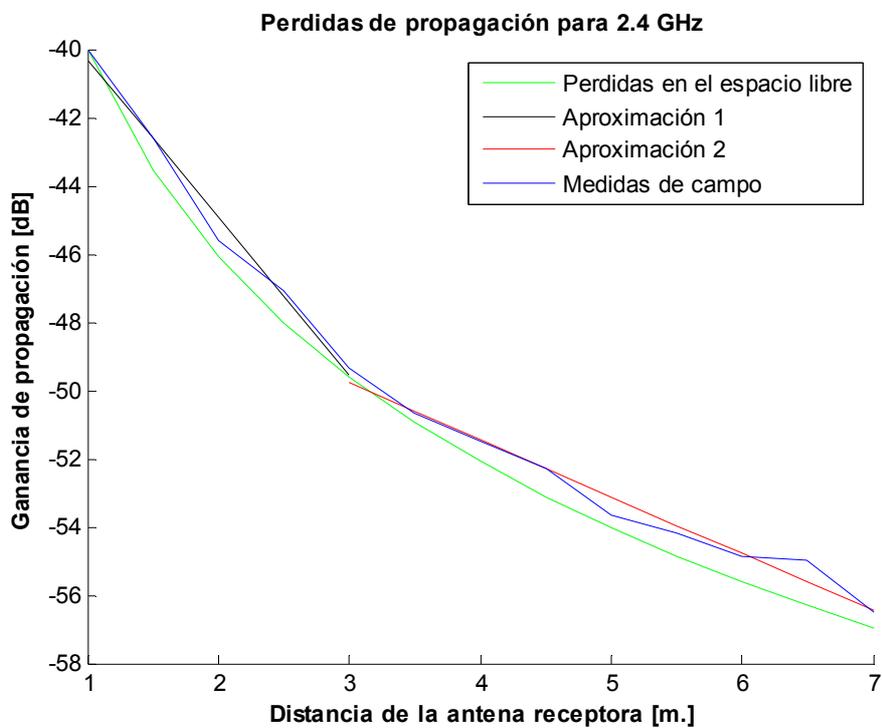


Figura 5-3: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 1 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.32 + (4.61) \times 3; \sigma_1 = 0.66 & d \leq 3m \\ 49.77 + (1.67) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.67 & d > 3m \end{cases}$$

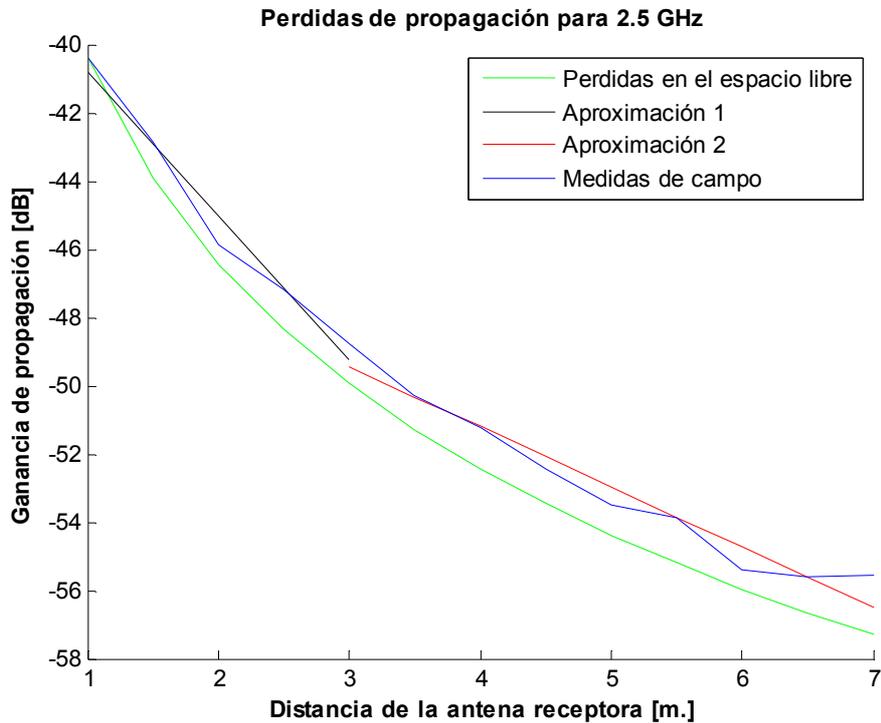


Figura 5-4: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 1 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.80 + (4.22) \times d; \sigma_1 = 0.86 & d \leq 3m \\ 49.45 + (1.76) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.92 & d > 3m \end{cases}$$

La función se ha calculado mediante simulaciones en Matlab. Hemos analizado cada punto de la función para ver cual de ellos era el punto crítico. Para ello, hemos escogido el que nos daba las menores desviaciones máximas (sigma) de la aproximación lineal obtenida con la función hallada experimentalmente. Se destaca además, que a medida que aumenta la distancia del radio enlace la variación de las pérdidas es mayor, por lo que la sigma del segundo tramo es mayor que la del primero.

2. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 12.4 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.3, 2.4 y 2.5 GHz

Posición en el pasillo: centrada

En este escenario se han variado las alturas de las antenas transmisora y receptora para comprobar cómo afectan las diferentes alturas a las pérdidas de propagación. Primero presentaremos las pérdidas obtenidas por las tres alturas en un mismo camino.

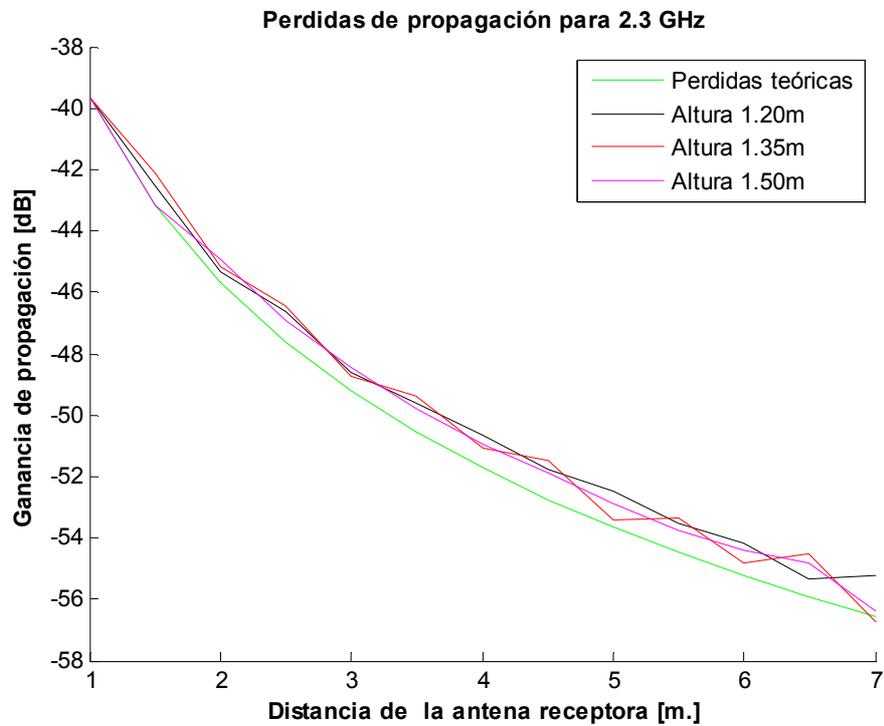


Figura 5-5: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.

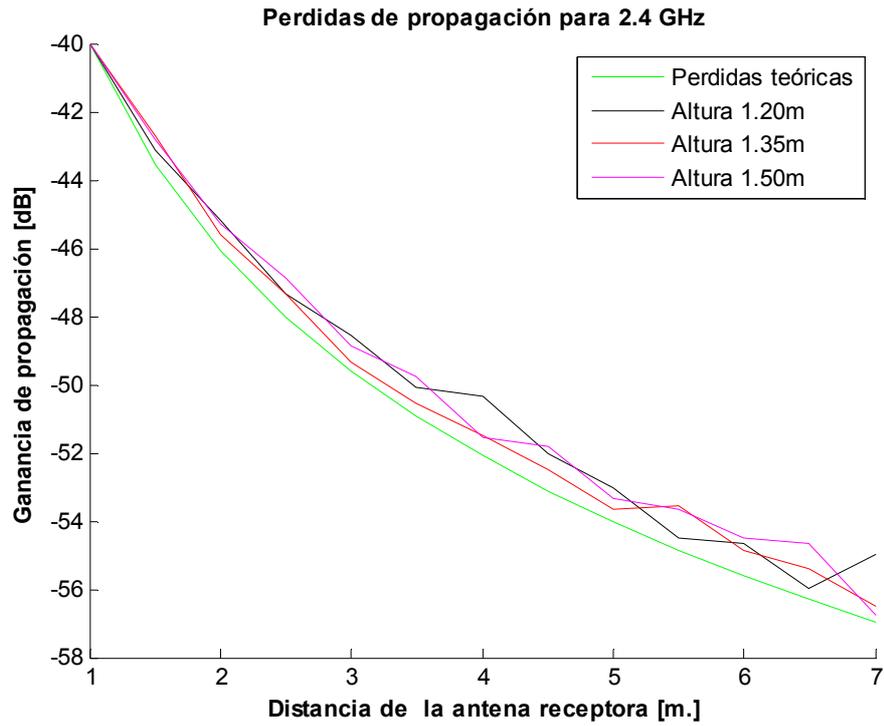


Figura 5-6: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.

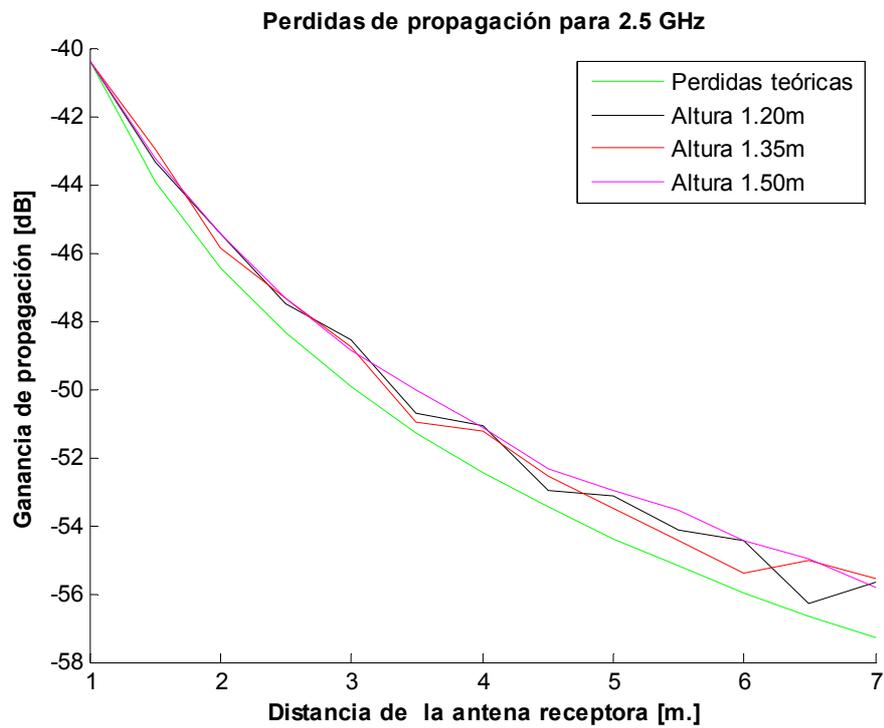


Figura 5-7: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.

Después hemos agrupado las medidas de cada una de las alturas para acercarnos a una aproximación más real (con más medidas) del pasillo 1 bajo estudio. Para ello, hemos calculado en cada punto la media de las tres medidas, y hemos realizado una aproximación matemática como hicimos para las pérdidas de la primera tanda de medidas.

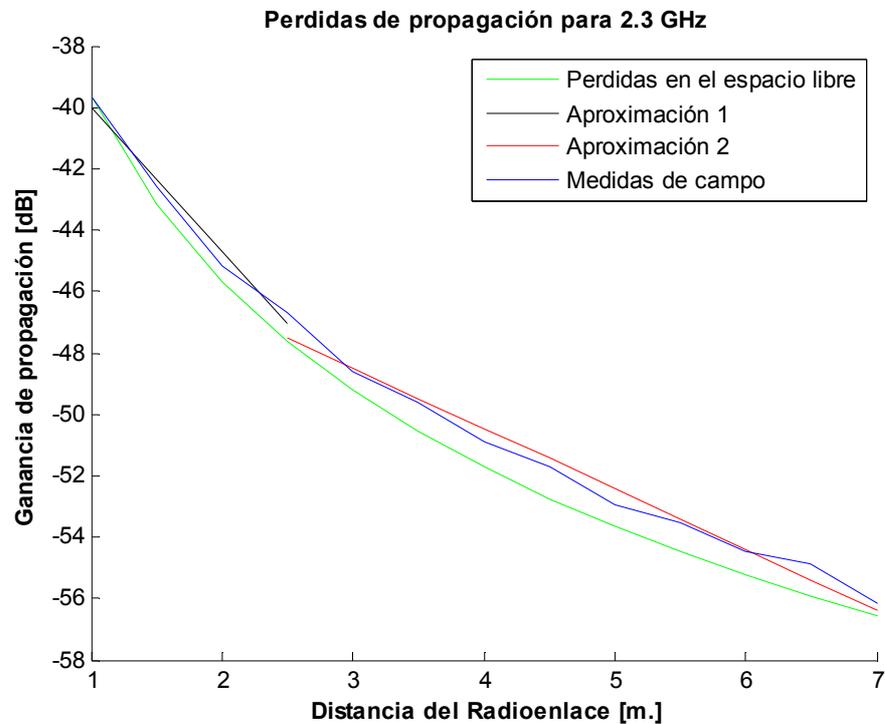


Figura 5-8: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 39.99 + (4.7) \times d; \sigma_1 = 45 & d \leq 2.5m \\ 47.49 + (1.97) \times (d - 2.5); \sigma_2 = 0.83 & d > 2.5m \end{cases}$$

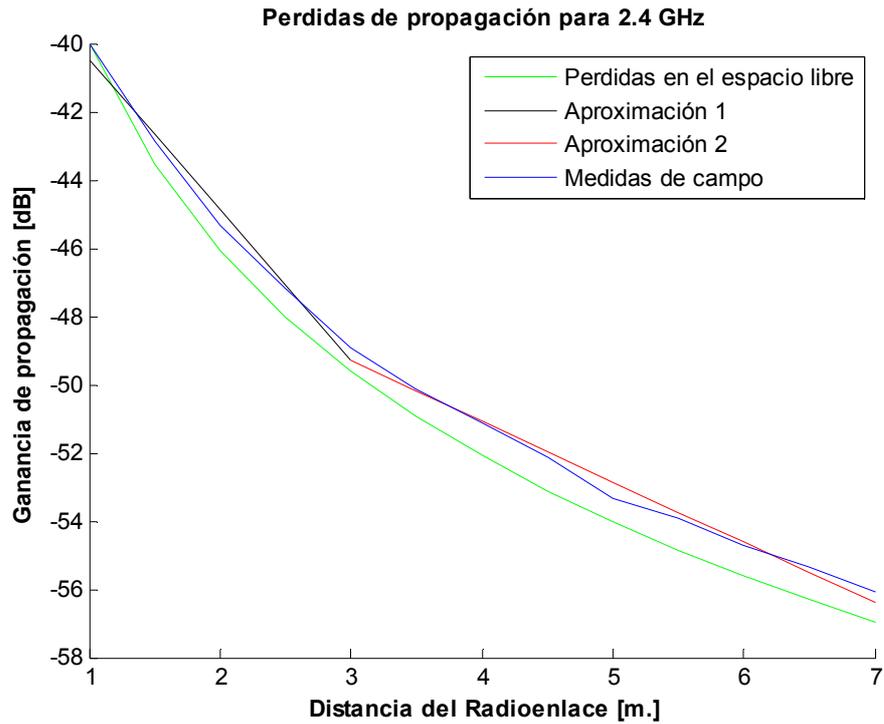


Figura 5-9: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.47 + (4.40) \times d; \sigma_1 = 0.48 & d \leq 3m \\ 49.32 + (1.77) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.48 & d > 3m \end{cases}$$

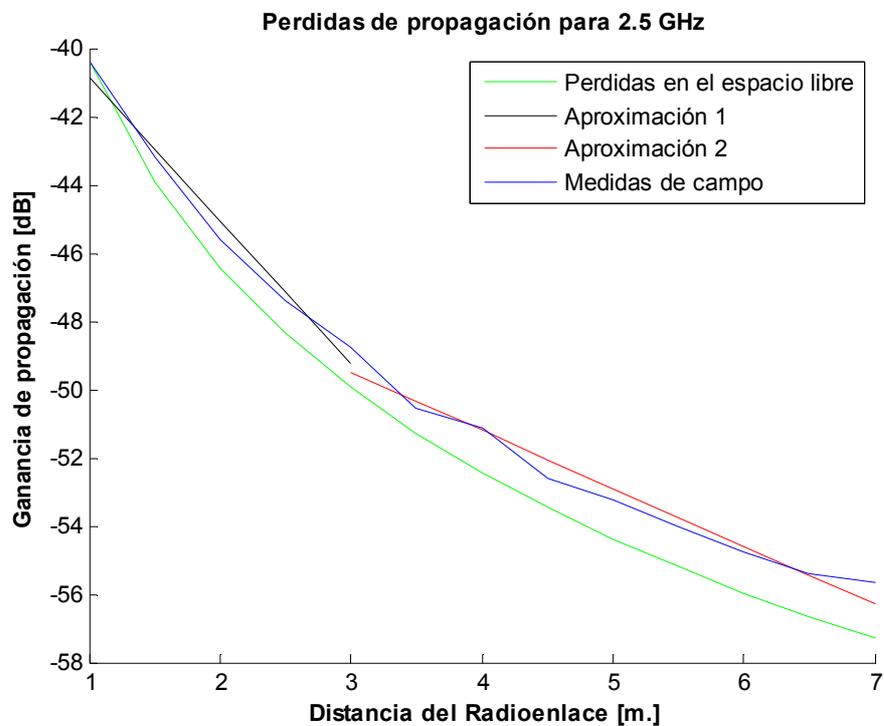


Figura 5-10: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 2 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.89 + (4.17) \times d; \sigma_1 = 0.54 & d \leq 3m \\ 49.51 + (1.70) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.77 & d > 3m \end{cases}$$

Los resultados obtenidos, indican que la variación de la altura de las antenas, no supone una variación en las pérdidas de propagación en este caso, ya que como observamos en estas medidas, las pérdidas son prácticamente iguales a las del escenario anterior y se destacan igualmente dos tramos de pendientes similares a las anteriores.

3. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 12.4 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.3, 2.4 y 2.5 GHz

Posiciones en el pasillo: a la izquierda, centrada, a la derecha.

Como hemos indicado en la figura 32, el escenario está dividido en dos pasillos y cada pasillo en tres caminos. Para cada camino hemos realizado medidas a tres alturas diferentes 1.20m, 1.35m y 1.50m. A continuación, presentamos la media de las pérdidas en función de la altura, para cada camino.

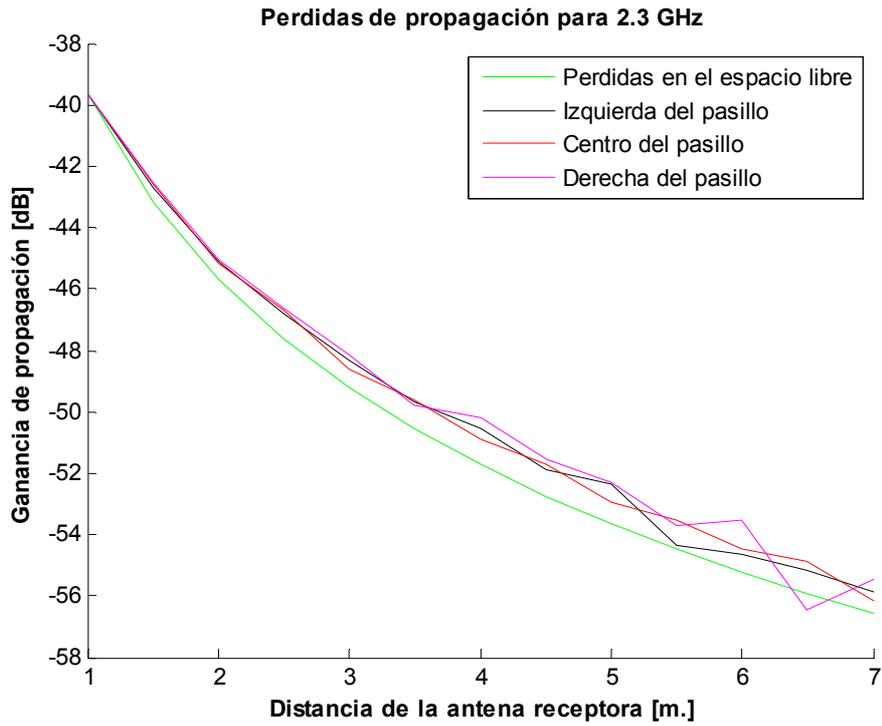


Figura 5-11: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.

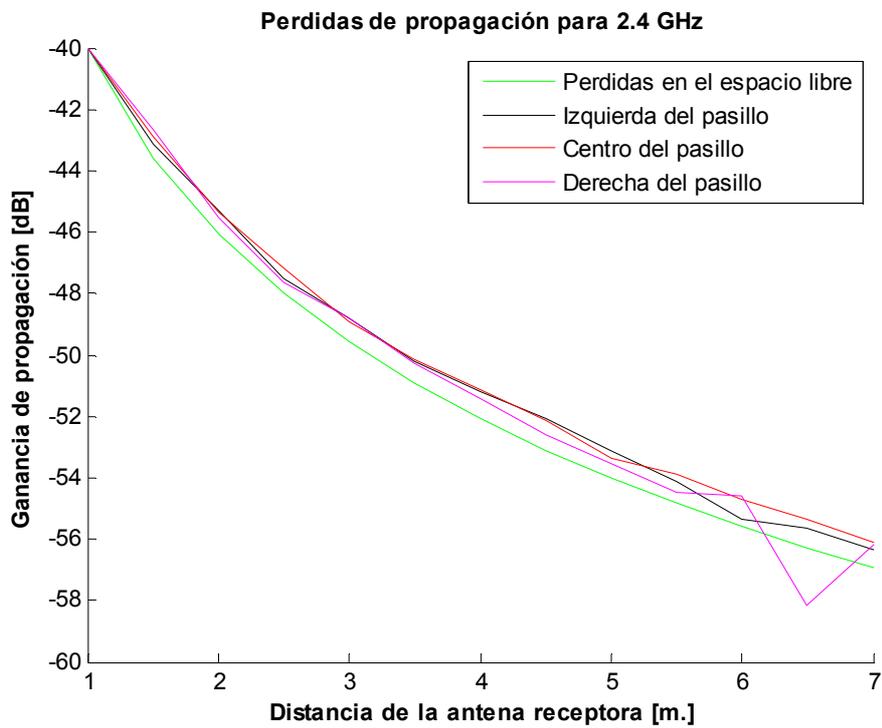


Figura 5-12: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.

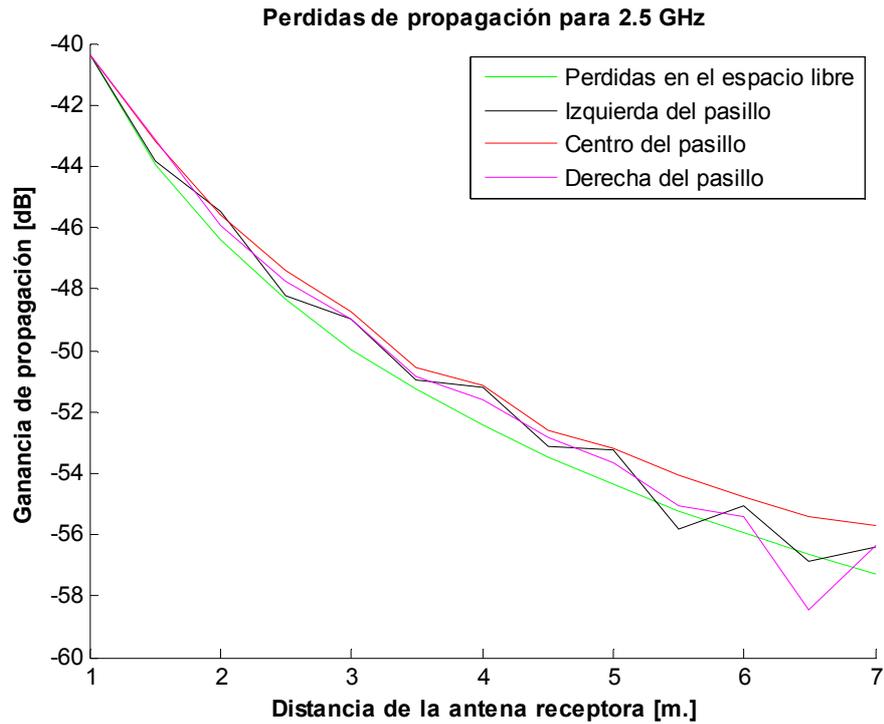


Figura 5-13: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.

Con estos resultados, hemos realizado las pérdidas de propagación que tenemos en el pasillo 1 para la primera banda de frecuencia estudiada. Hemos calculado la media de las pérdidas de las alturas en cada camino del pasillo, y luego la media de las pérdidas de los tres caminos estudiados para el pasillo semicerrado. Así pues, basándonos en un total de 9 trayectorias dentro del mismo corredor, tenemos que las pérdidas son:

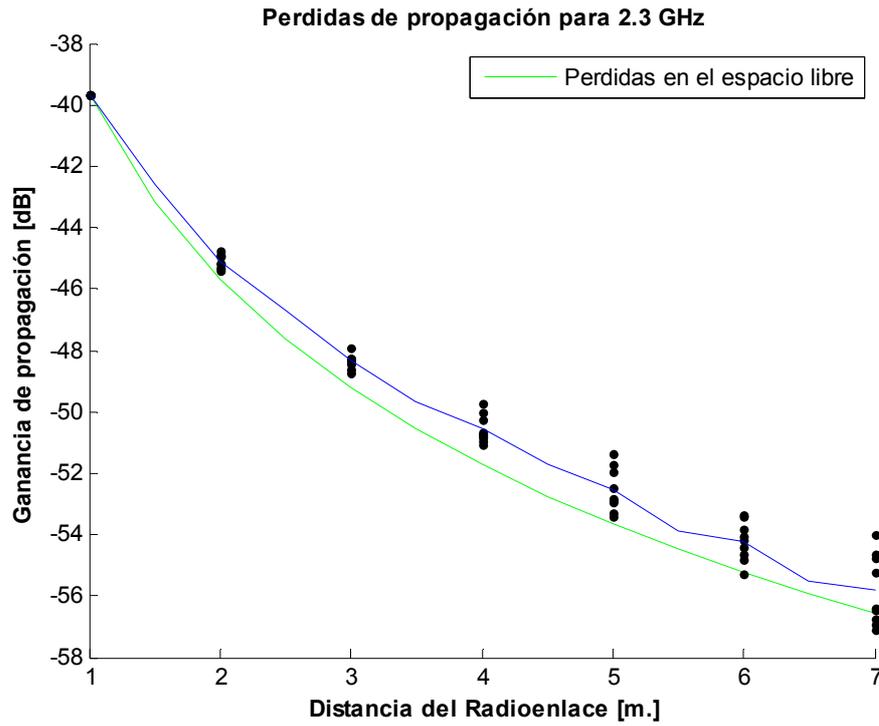


Figura 5-14: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.

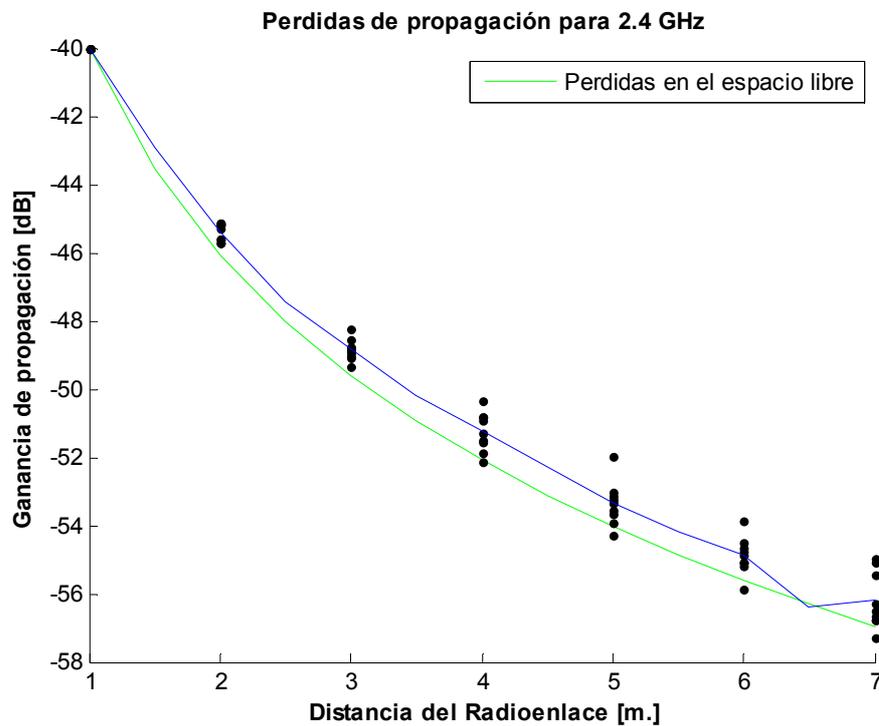


Figura 5-15: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.

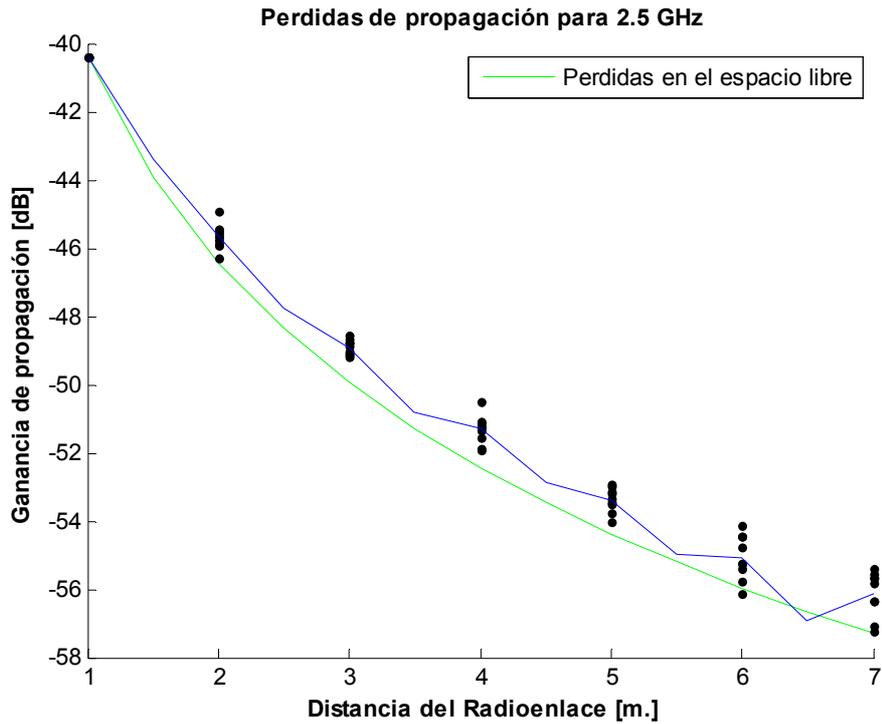


Figura 5-16: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.

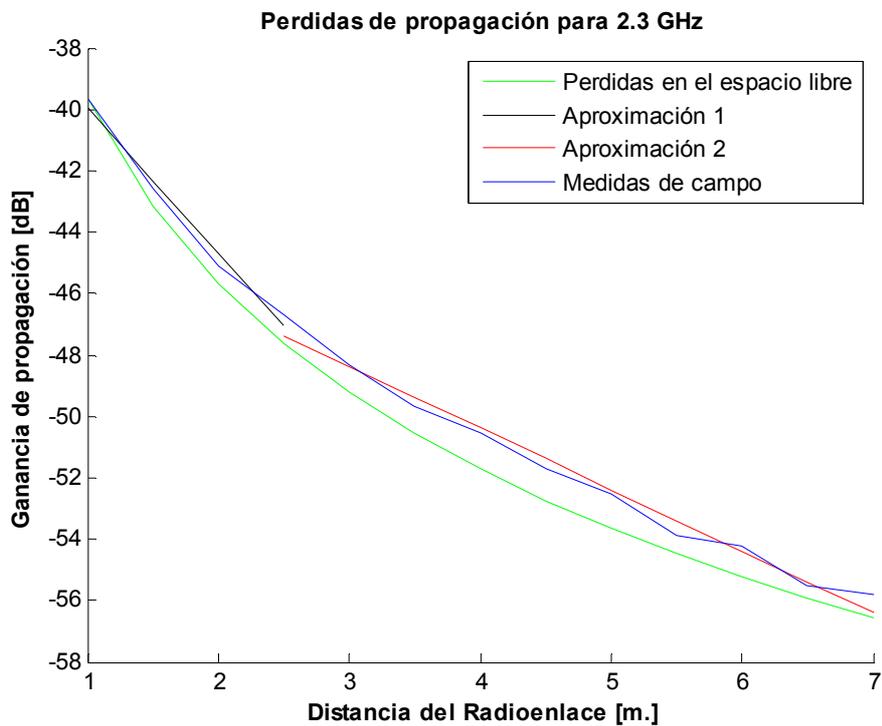


Figura 5-17: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 39.98 + (4.70) \times d; \sigma_1 = 0.41 & d \leq 2.5m \\ 47.37 + (2.01) \times (d - 2.5); \sigma_2 = 0.69 & d > 2.5m \end{cases}$$

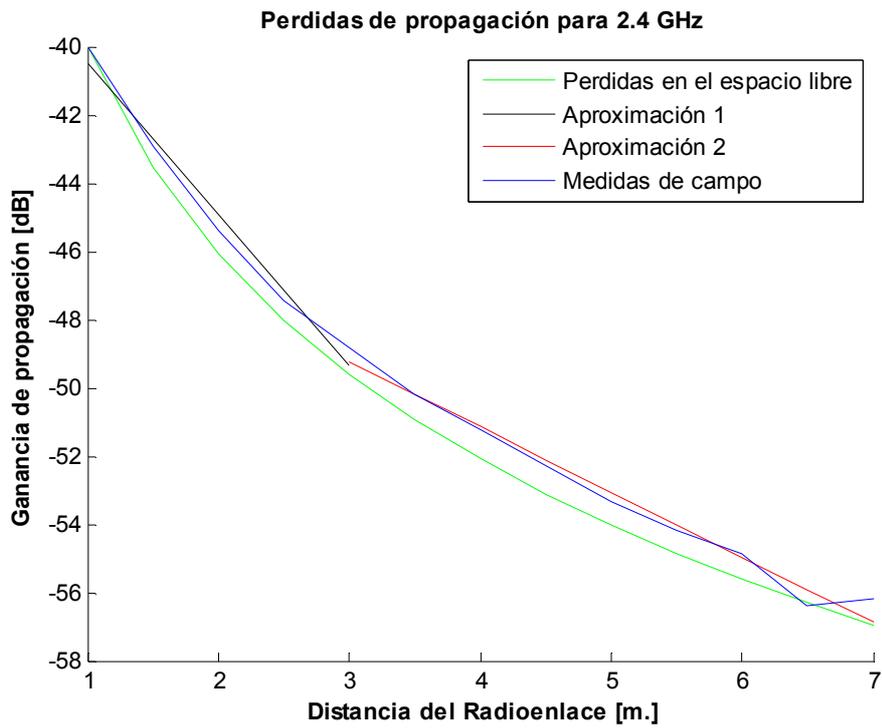


Figura 5-18: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.50 + (4.42) \times d; \sigma_1 = 0.51 & d \leq 3m \\ 49.25 + (1.90) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.67 & d > 3m \end{cases}$$

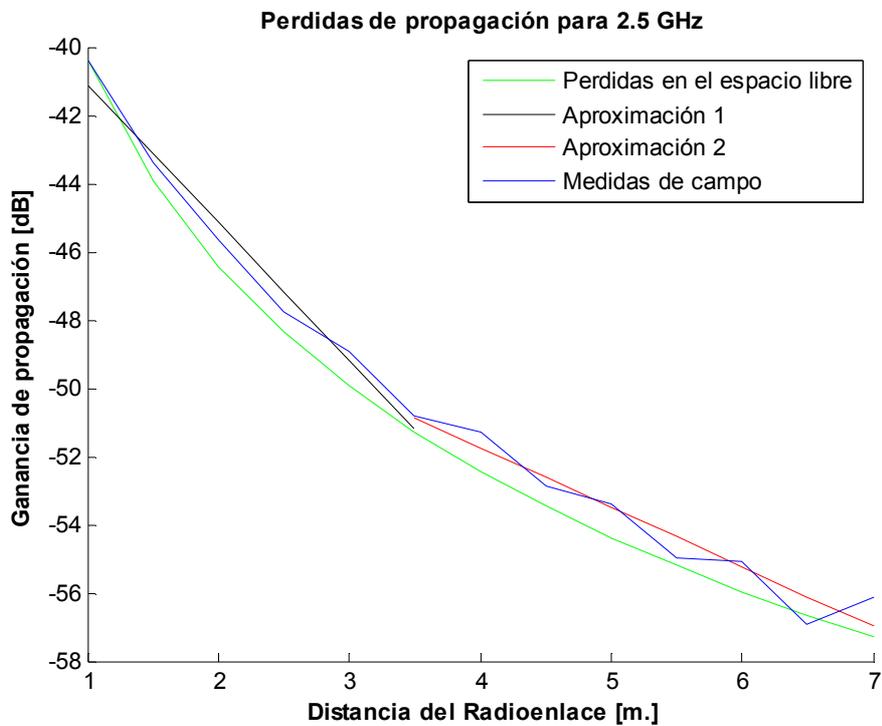


Figura 5-19: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 3 completo para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 41.11 + (4.04) \times d; \sigma_1 = 0.71 & d \leq 3.5m \\ 50.86 + (1.75) \times (d - 3.5); \sigma_2 = 0.87 & d > 3.5m \end{cases}$$

En este escenario hemos incorporado al estudio de este pasillo la posición relativa de las antenas en el mismo. Tras realizar medidas en función de la altura y la posición de las antenas, podemos observar que las aproximaciones realizadas en este escenario en comparación con el primer escenario son prácticamente iguales.

Por lo tanto, podemos concluir que para este primer pasillo se pueden asumir las pérdidas de propagación en función de la frecuencia de trabajo de las figuras anteriores, independientemente de la altura o la posición relativa dentro del pasillo.

Por último, también se puede observar que las pérdidas son en general menores que las pérdidas por el espacio libre.

Toma de medidas del Pasillo 2 para la banda de 2.3-2.5 GHz

Una vez analizado exhaustivamente el pasillo semicerrado, hemos procedido a realizar el mismo estudio en el pasillo semiabierto situado, como ya hemos dicho, en el mismo laboratorio. El método utilizado para la representación de las gráficas y el cálculo de las aproximaciones matemáticas es idéntico al descrito para el pasillo 1. Los resultados del pasillo 2 se presentan pues de forma análoga a los del pasillo 1:

4. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semiabierto

Ganancia de las antenas: 12.4 dB

Altura de las antenas: 1.35 m

Frecuencias estudiadas: 2.3, 2.4 y 2.5 GHz

Posición en el pasillo: centrada

En primer lugar, tenemos las pérdidas de propagación del pasillo 2 teniendo en cuenta únicamente el trayecto correspondiente al camino 1 y a la altura de 1.35m.

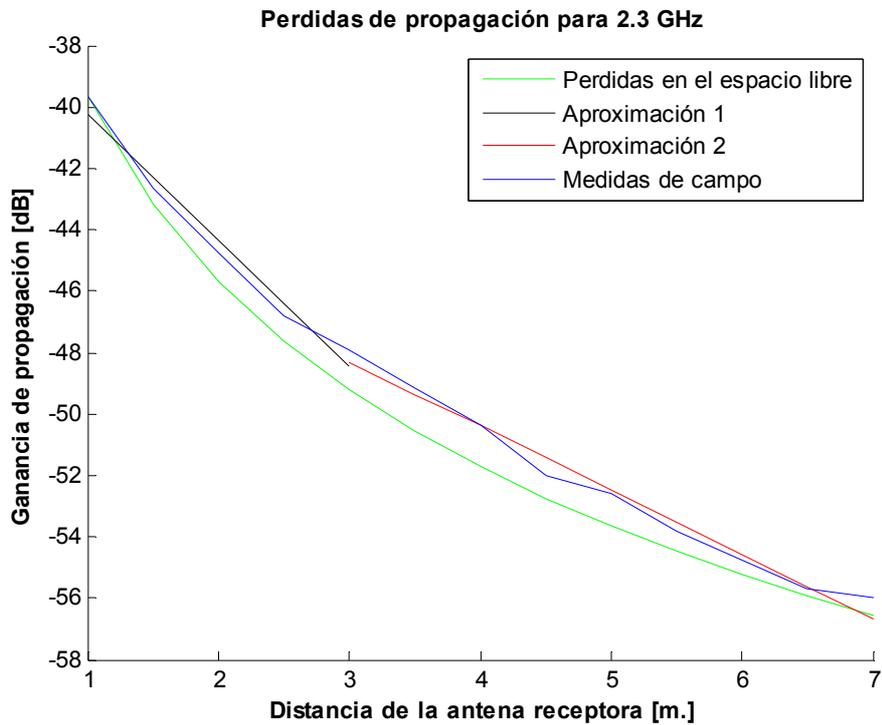


Figura 5-20: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 4 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.23 + (4.12) \times d; \sigma_1 = 0.56 & d \leq 3m \\ 48.31 + (2.09) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.67 & d > 3m \end{cases}$$

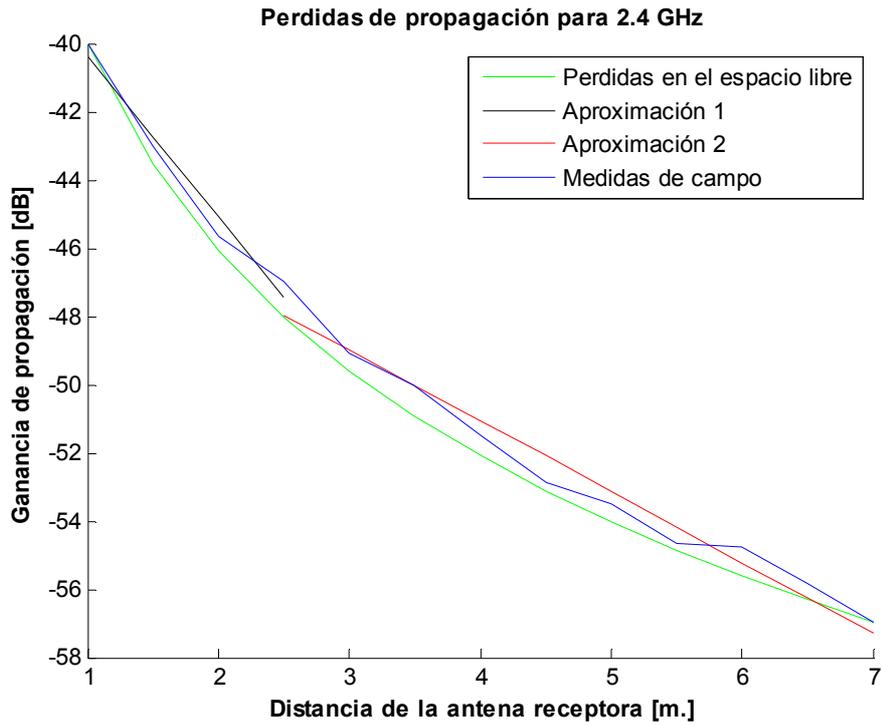


Figura 5-21: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 4 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.41 + (4.69) \times d; \sigma_1 = 0.56 & d \leq 2.5m \\ 47.95 + (2.07) \times (d - 2.5); \sigma_2 = 0.98 & d > 2.5m \end{cases}$$

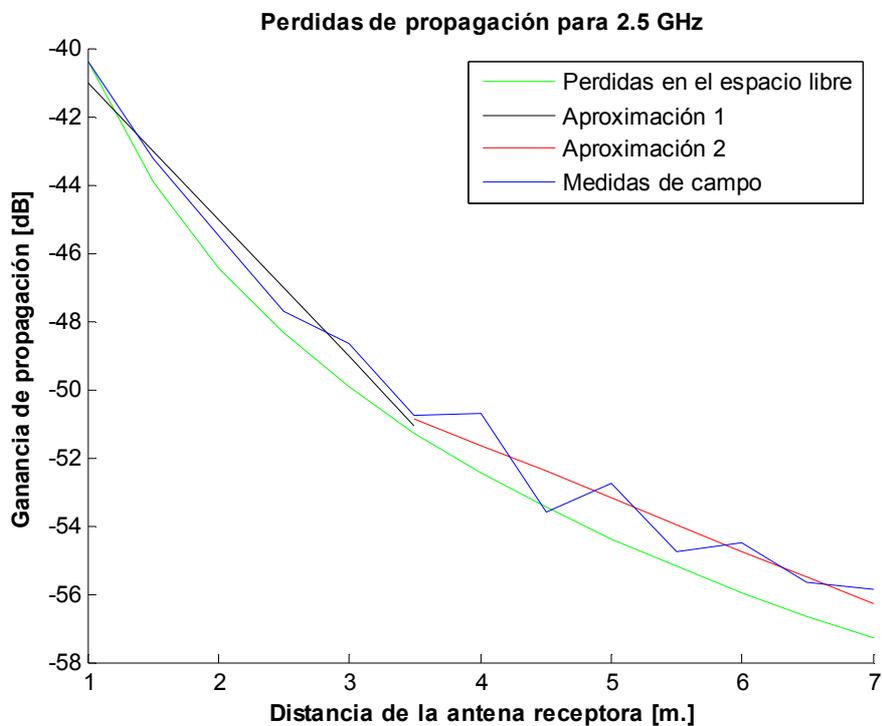


Figura 5-22: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 4 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 41.02 + (4.01) \times d; \sigma_1 = 0.64 & d \leq 3.5m \\ 50.87 + (1.54) \times (d - 3.5); \sigma_2 = 1.19 & d > 3.5m \end{cases}$$

Los resultados relativos al pasillo 2, indican que las pérdidas por el segundo pasillo son iguales a las del primero. Por lo tanto, las diferencias estructurales entre ambos no suponen un cambio en las pérdidas de propagación.

5. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semiabierto

Ganancia de las antenas: 12.4 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.3, 2.4 y 2.5 GHz

Posición en el pasillo: centrada

En segundo lugar, las pérdidas obtenidas en cada una de las alturas estudiadas para el pasillo 2 y el resultado del cálculo medio de las mismas.

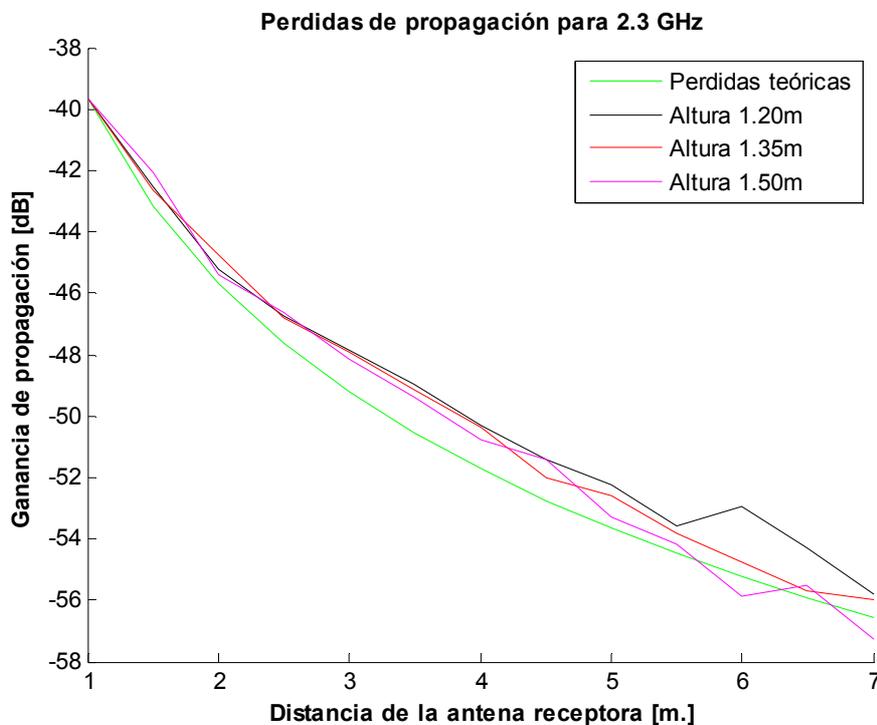


Figura 5-23: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.

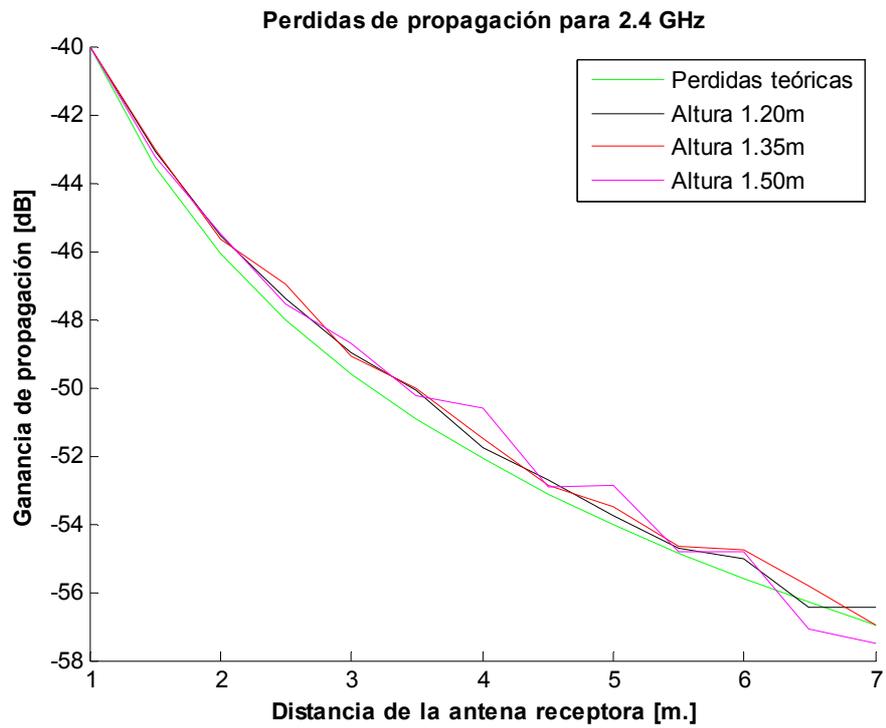


Figura 5-24: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.

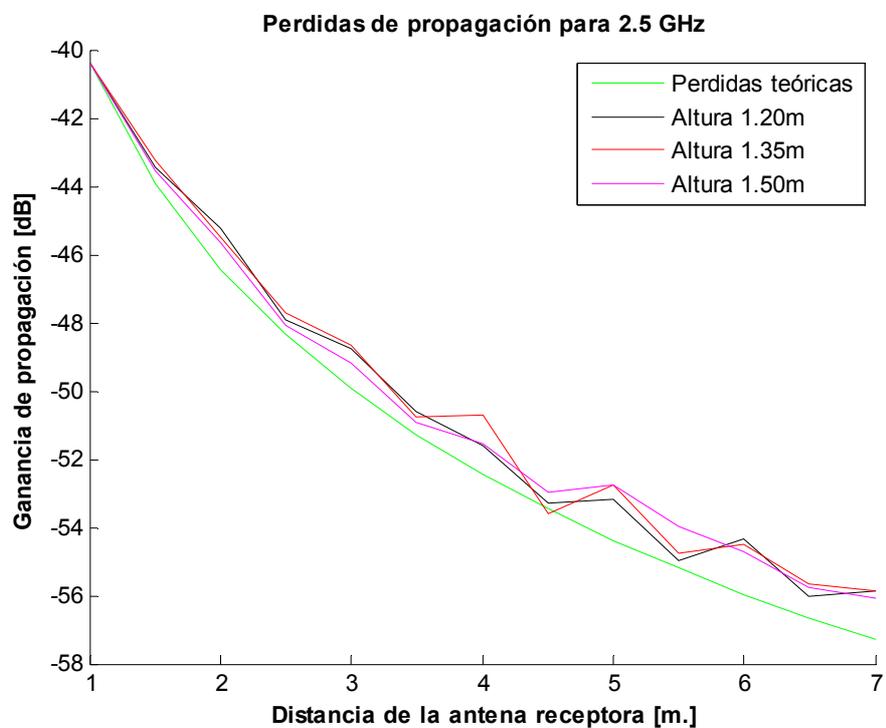


Figura 5-25: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.

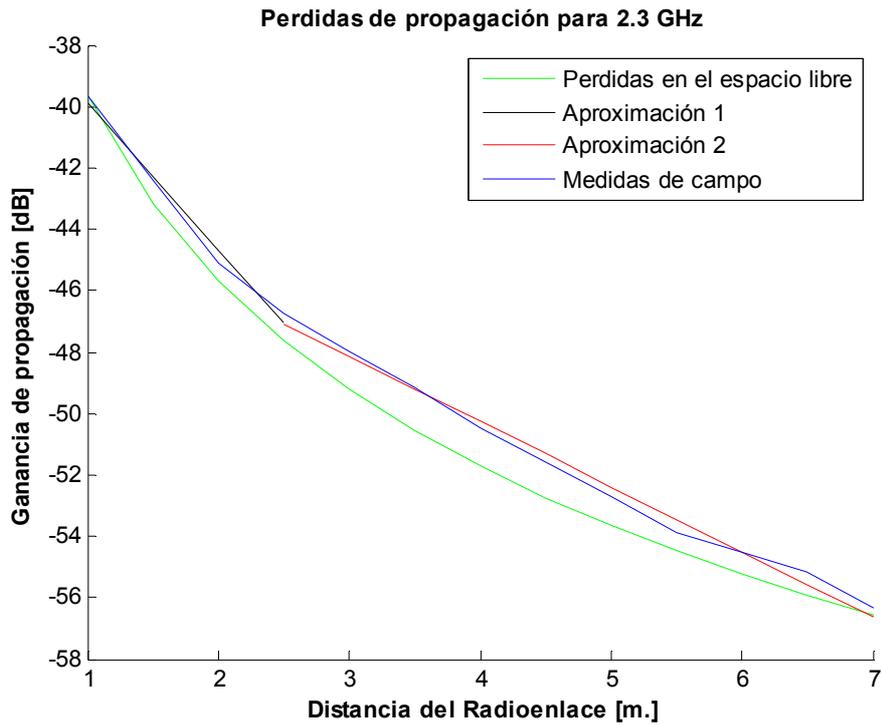


Figura 5-26: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 39.91 + (4.76) \times d; \sigma_1 = 0.45 & d \leq 2.5m \\ 47.08 + (2.12) \times (d - 2.5); \sigma_2 = 0.41 & d > 2.5m \end{cases}$$

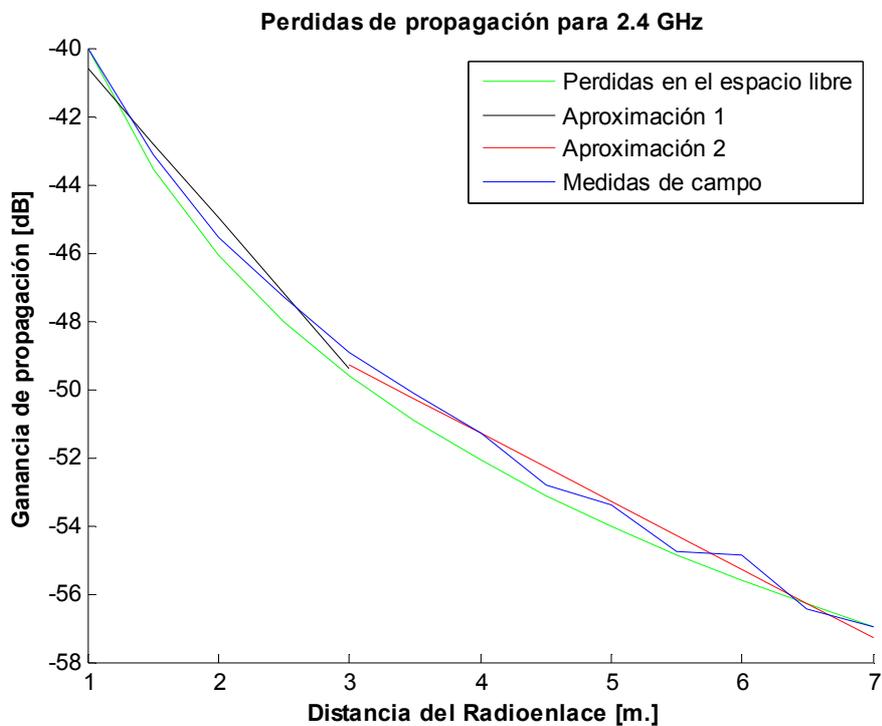


Figura 5-27: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.60 + (4.39) \times d; \sigma_1 = 0.57 & d \leq 3m \\ 49.27 + (2.01) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.56 & d > 3m \end{cases}$$

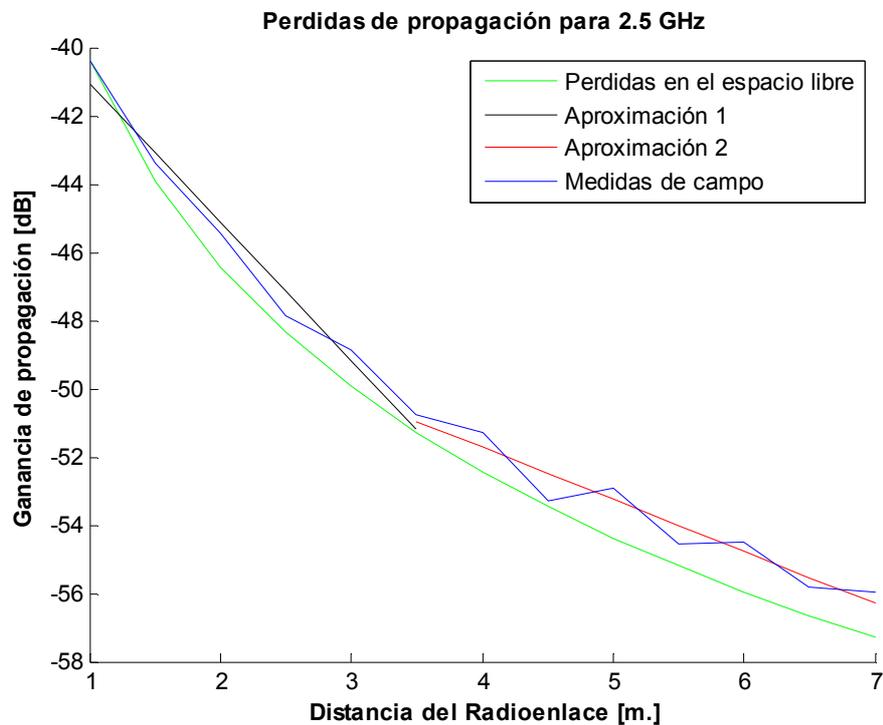


Figura 5-28: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 5 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 41.08 + (4.04) \times d; \sigma_1 = 0.75 & d \leq 3.5m \\ 50.96 + (1.53) \times (d - 3.5); \sigma_2 = 0.80 & d > 3.5m \end{cases}$$

Al igual que pasaba en el pasillo 1, la altura de las antenas tampoco influye en las pérdidas de propagación del pasillo 2.

6. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semiabierto

Ganancia de las antenas: 12.4 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.3, 2.4 y 2.5 GHz

Posición en el pasillo: a la izquierda, centrada y a la derecha

Por último, las pérdidas asociadas a cada uno de los caminos del pasillo 2, considerando tres alturas en cada camino, y las pérdidas de propagación en el pasillo 2 tras medir los 9 trayectos indicados, son las siguientes:

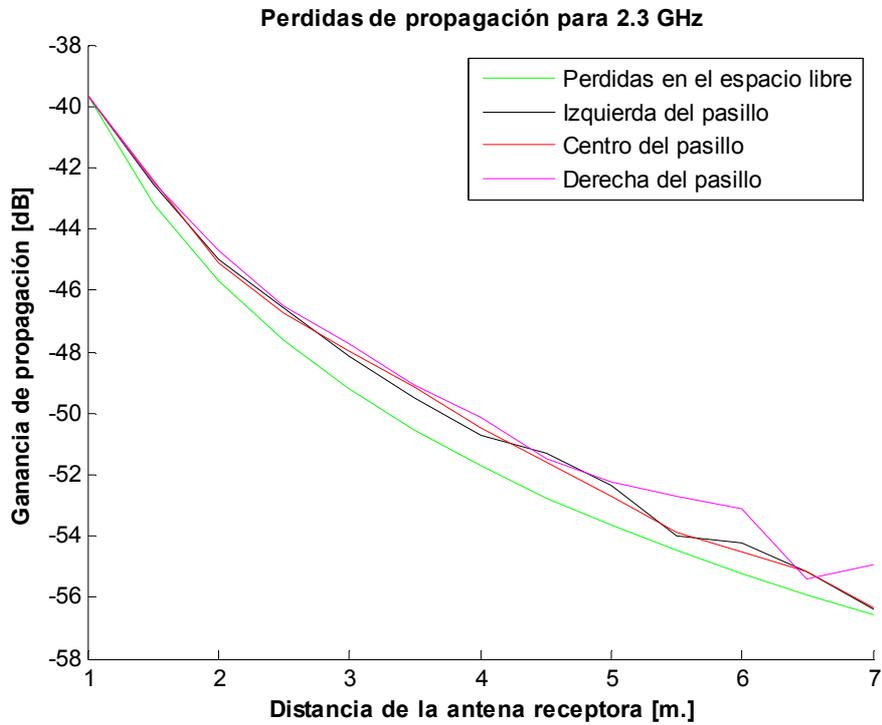


Figura 5-29: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.

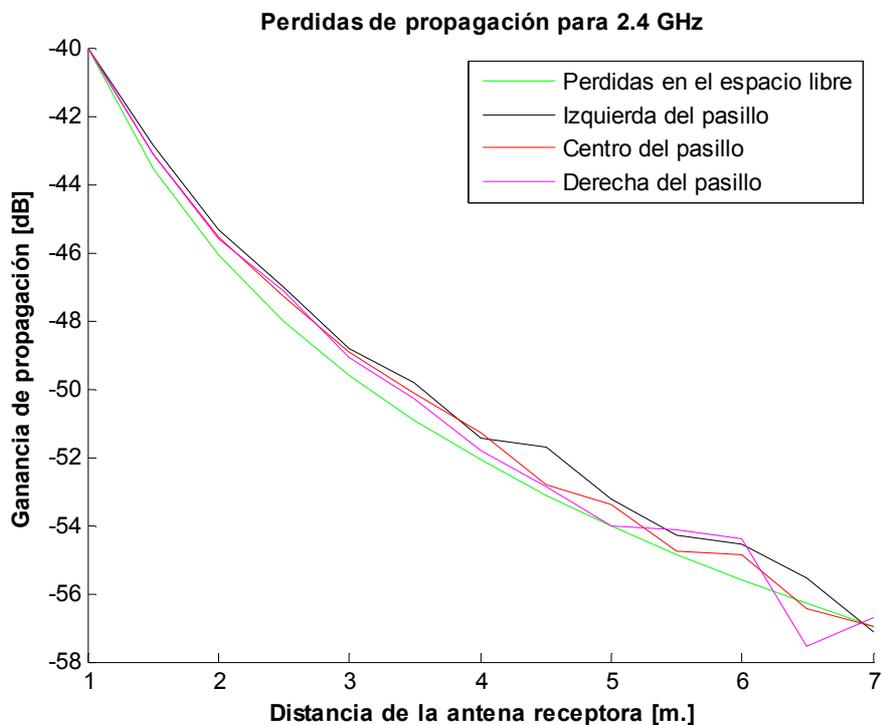


Figura 5-30: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.

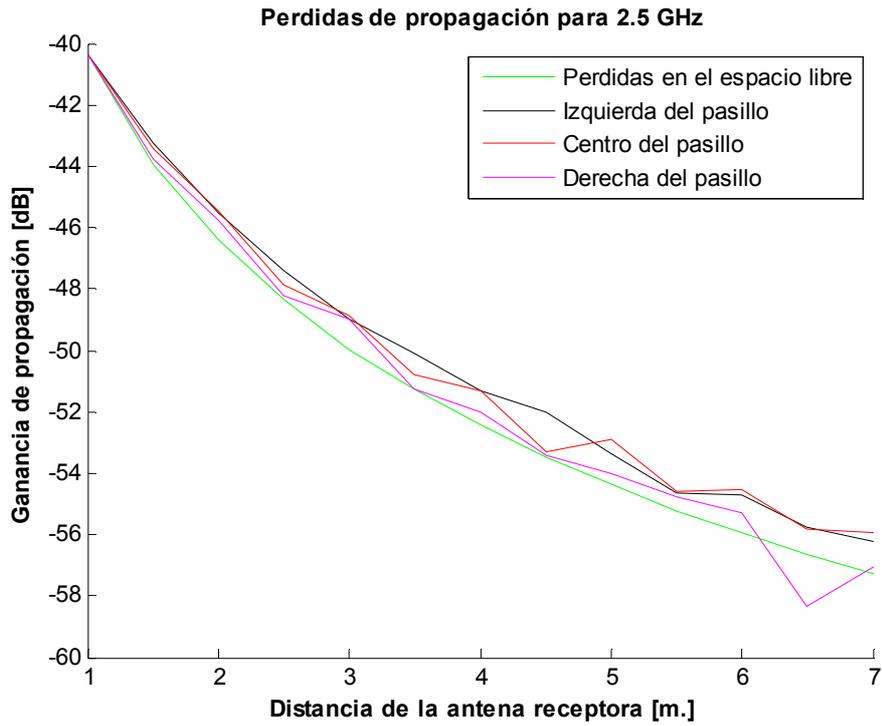


Figura 5-31: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.

Pérdidas del pasillo considerando todos los datos:

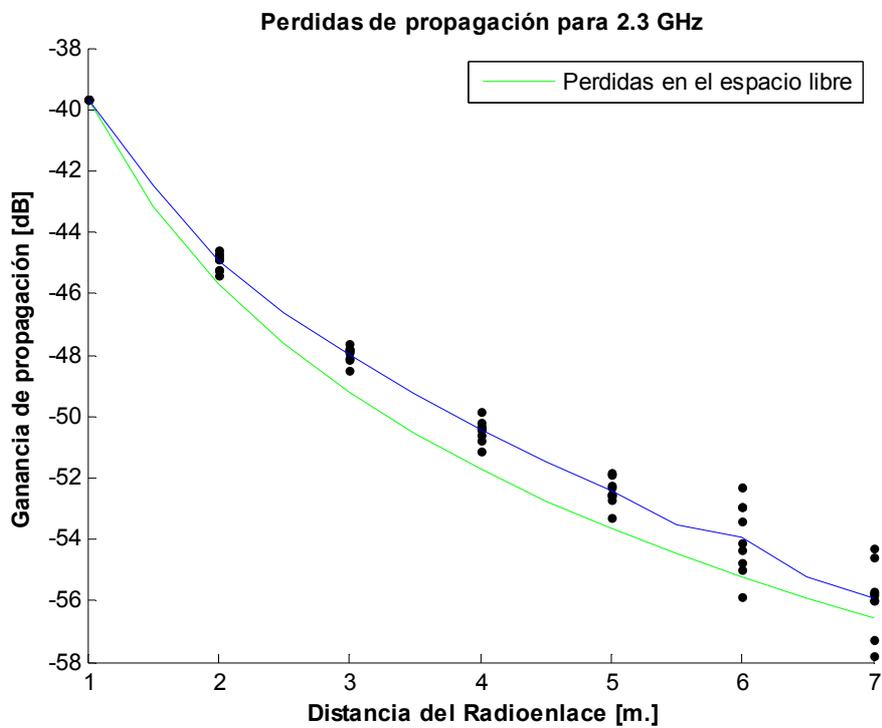


Figura 5-32: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.

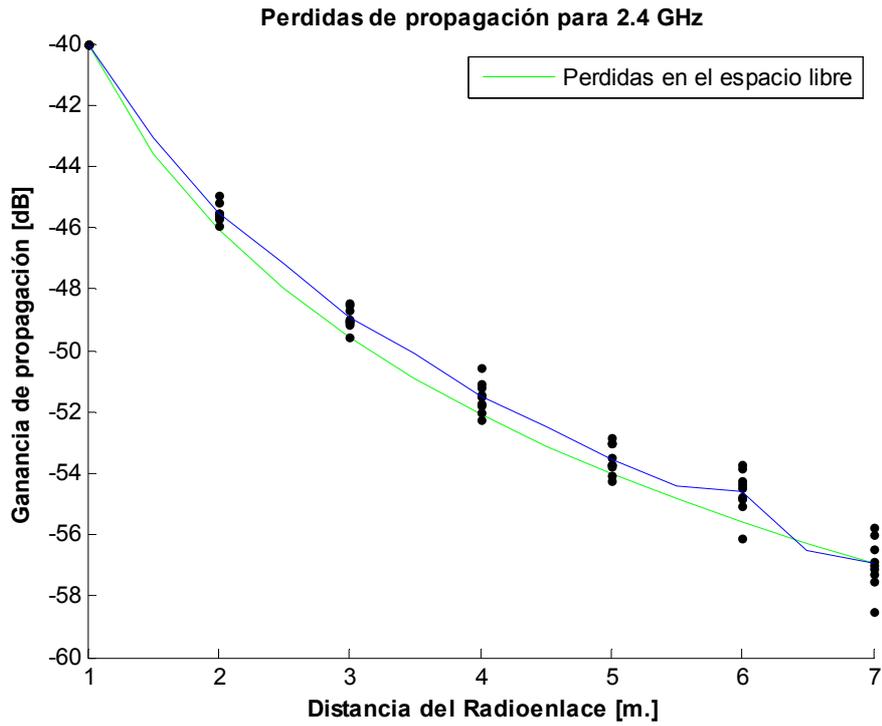


Figura 5-33: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.

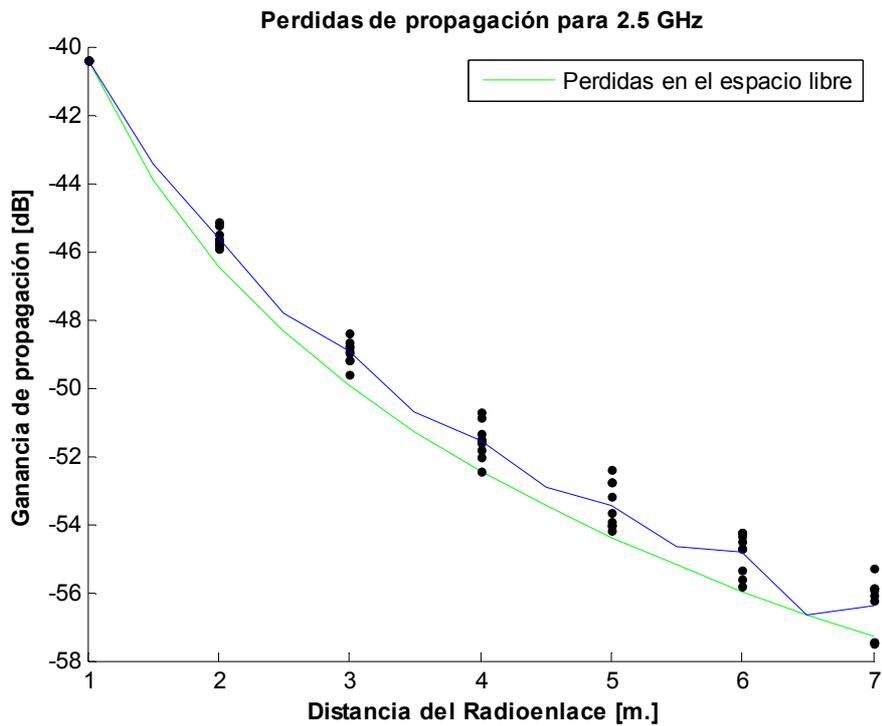


Figura 5-34: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.

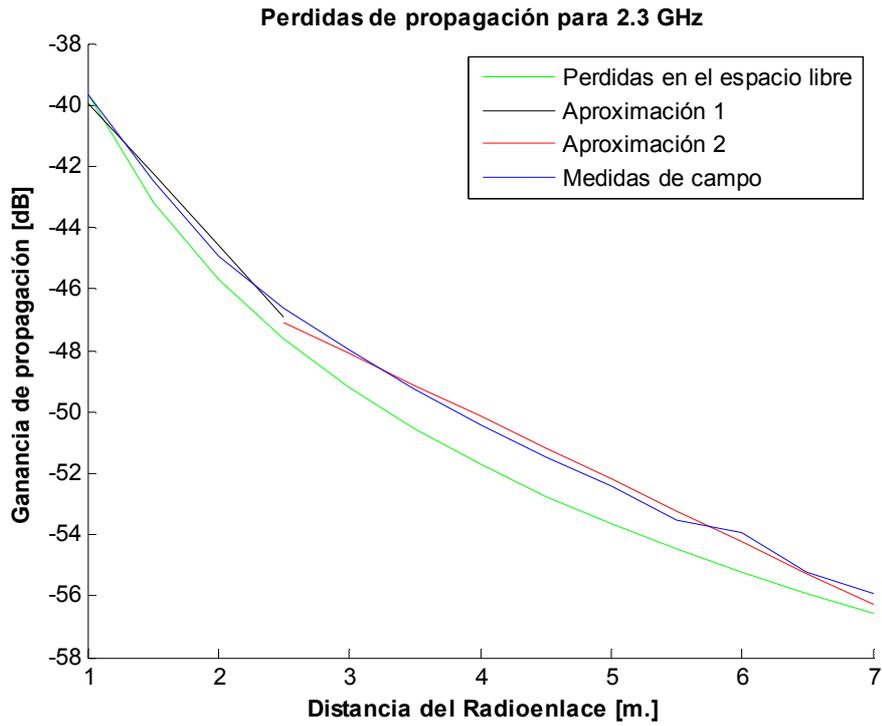


Figura 5-35: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 39.94 + (4.65) \times d; \sigma_1 = 0.36 & d \leq 2.5m \\ 47.08 + (2.04) \times (d - 2.5); \sigma_2 = 0.48 & d > 2.5m \end{cases}$$

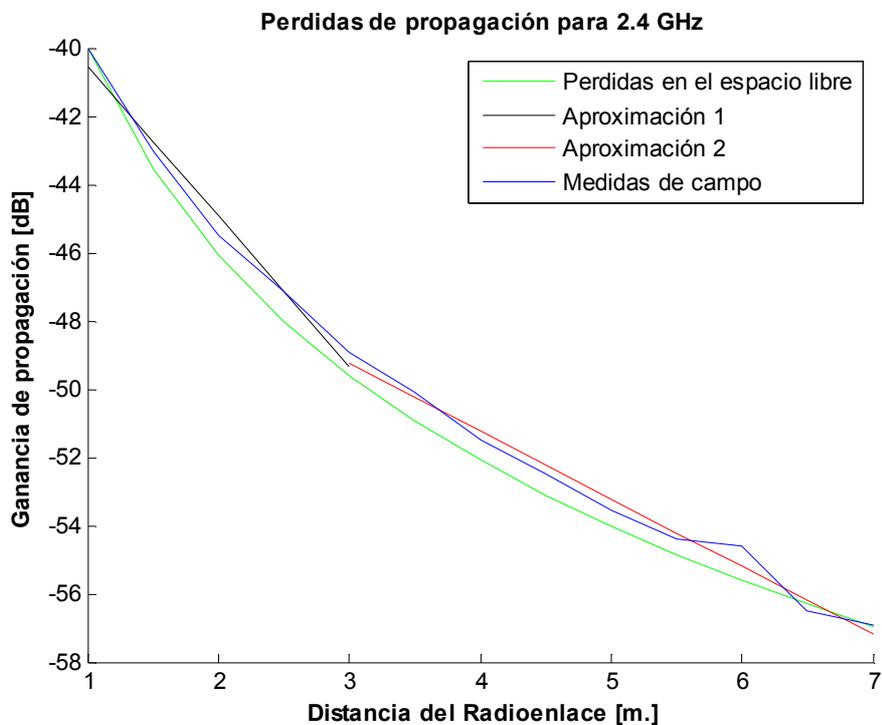


Figura 5-36: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.56 + (4.38) \times d; \sigma_1 = 0.57 & d \leq 3m \\ 49.26 + (1.98) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.60 & d > 3m \end{cases}$$

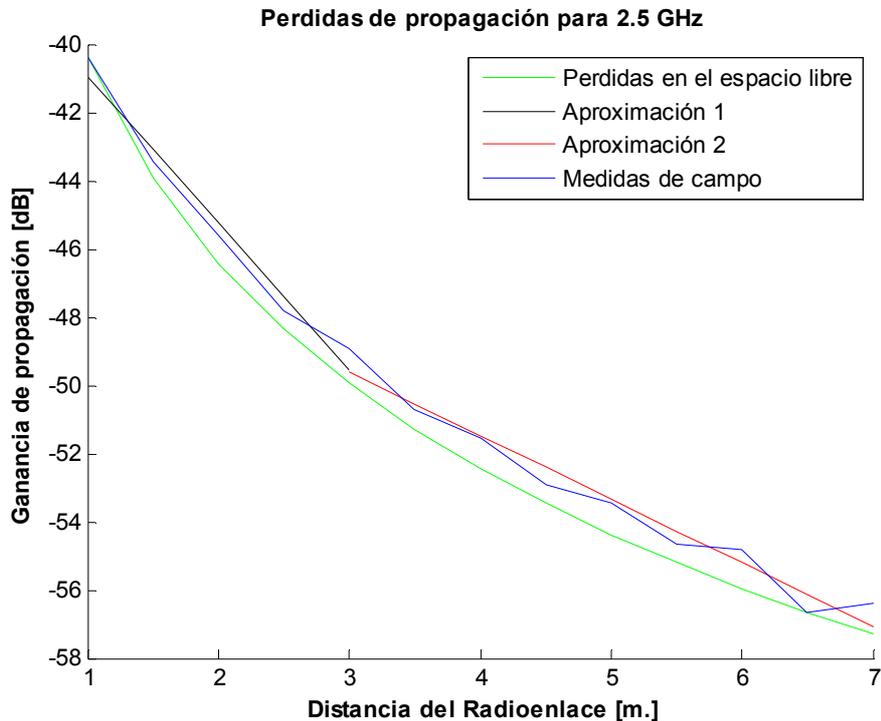


Figura 5-37: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 6 completo para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.95 + (4.29) \times d; \sigma_1 = 0.59 & d \leq 3m \\ 49.61 + (1.86) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.67 & d > 3m \end{cases}$$

Tras las medidas realizadas en el pasillo semiabierto del laboratorio 7, podemos concluir que a pesar de tener una estructuración diferente en los pasillos 1 y 2, las pérdidas de propagación en ambos son prácticamente iguales.

Toma de medidas para la banda de 2.3-2.5 GHz con antenas en polarización horizontal

Para completar el análisis sobre las pérdidas de propagación en interiores que hemos realizado para la banda de frecuencia de 2.3 – 2.5 GHz, hemos realizado una serie de medidas cambiando la orientación de los elementos radiantes 90°, es decir, con una polarización horizontal, en lugar de vertical, en las antenas del enlace. Estos datos los hemos tomado con las antenas de mayor ganancia de “TWIN antennas”, en el pasillo semicerrado del laboratorio 7. El enlace radioeléctrico lo hemos situado en el centro del

corredor, y hemos tomado medidas a 3 alturas distintas, 1.20 m, 1.35 m y 1.50 m. A continuación presentamos los resultados a 2.3 GHz, 2.4 GHz y 2.5 GHz para las tres alturas consideradas y realizando la media de las mismas, comparando los resultados con los obtenidos de la misma forma con polarización vertical.

7. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 12.4 dB

Polarización: Horizontal

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.3, 2.4 y 2.5 GHz

Posición en el pasillo: centrada

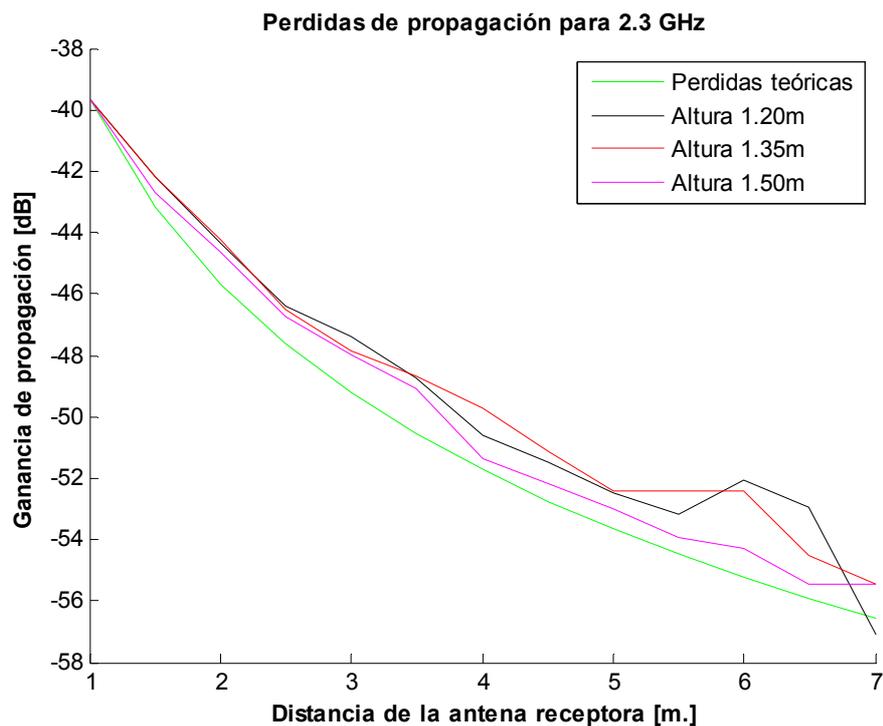


Figura 5-38: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz.

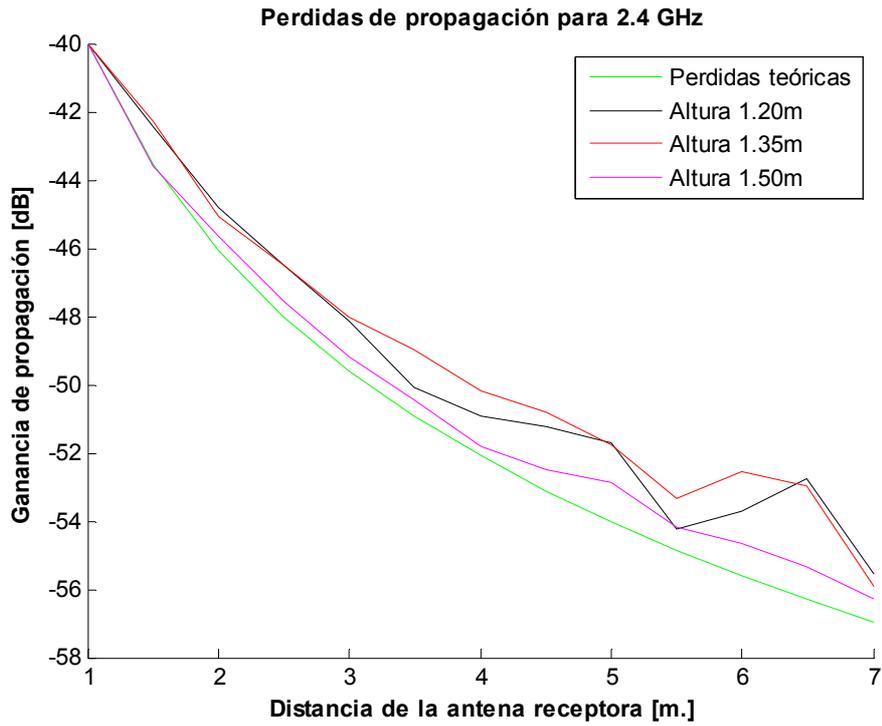


Figura 5-39: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz.

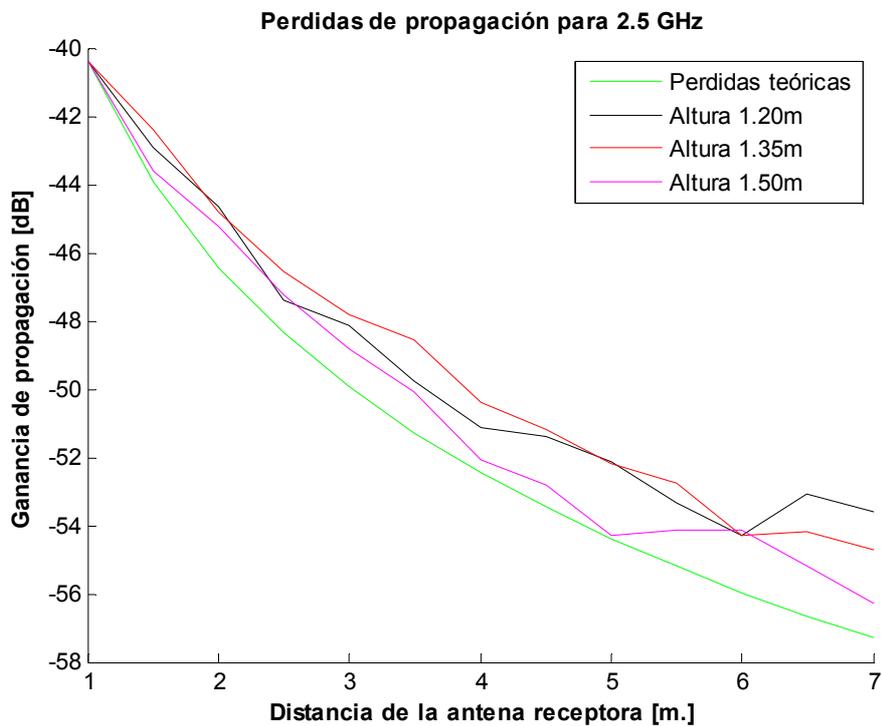


Figura 5-40: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz.

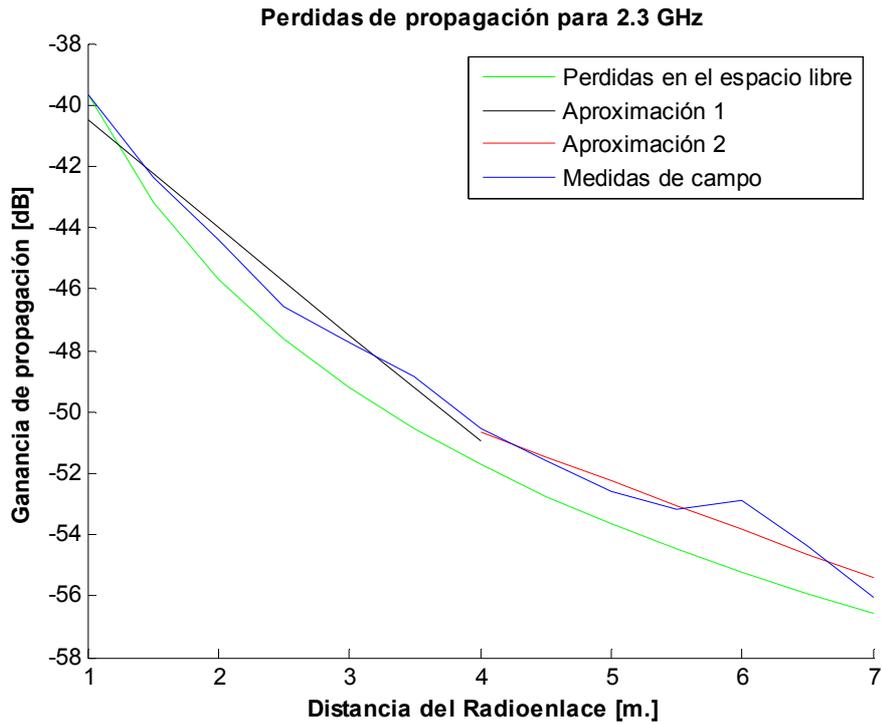


Figura 5-41: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.48 + (3.49) \times d; \sigma_1 = 0.82 & d \leq 4m \\ 50.66 + (1.58) \times (d - 4); \sigma_2 = 0.91 & d > 4m \end{cases}$$

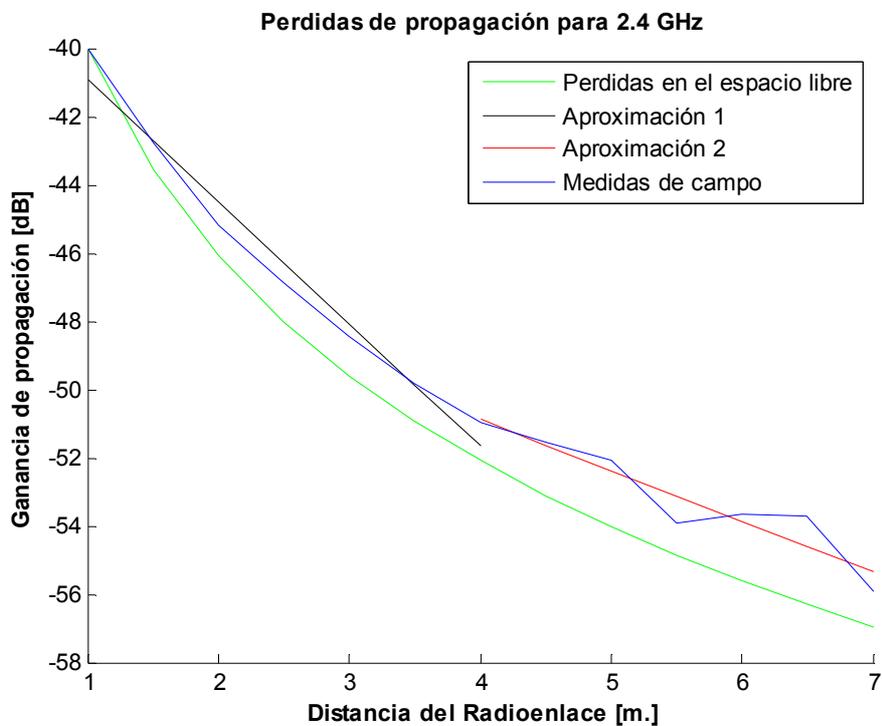


Figura 5-42: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.92 + (3.59) \times d; \sigma_1 = 0.87 & d \leq 4m \\ 50.89 + (1.47) \times (d - 4); \sigma_2 = 0.89 & d > 4m \end{cases}$$

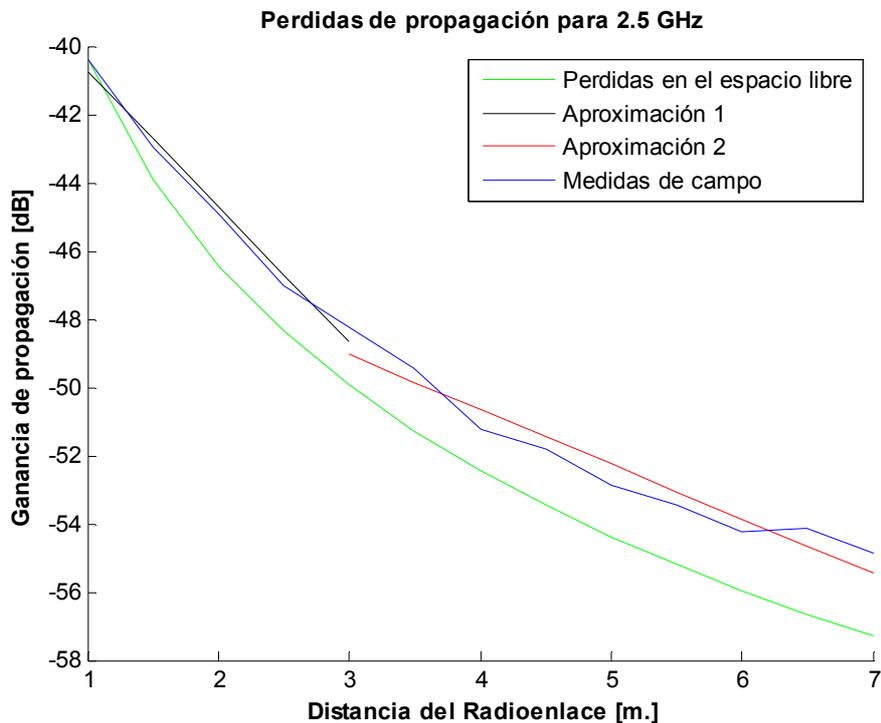


Figura 5-43: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 7 para la frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 40.76 + (3.95) \times d; \sigma_1 = 0.42 & d \leq 3m \\ 49.04 + (1.60) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.79 & d > 3m \end{cases}$$

Las aproximaciones lineales calculadas para este escenario son muy similares a las calculadas para la polarización vertical. Las medidas obtenidas para la polarización horizontal, tienen un leve incremento del *fading* en los últimos metros.

Toma de medidas del Pasillo 1 para la banda de 2.3-2.5 GHz y una ganancia de 9 dB

El objetivo de la siguiente serie de medidas es observar el efecto que tendría la ganancia en las pérdidas de propagación estudiadas en el proyecto. Para ello, hemos realizado una toma de datos con las antenas de media ganancia que presentamos en puntos anteriores. El estudio lo hemos realizado en el pasillo 1. Se han tomado medidas en los tres caminos del mismo a tres alturas: 1.25 m, 1.35 m y 1.50 m. Como la

reflexión de estas antenas no es óptima, hemos escogido una ventana apropiada para hacer el análisis, en este caso 2.37 y 2.47 GHz.

8. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Altura de las antenas: 1.35 m

Frecuencias estudiadas: 2.37 y 2.47 GHz

Posición en el pasillo: centrada

Primero presentamos las pérdidas obtenidas para el camino del medio a 1,35 m:

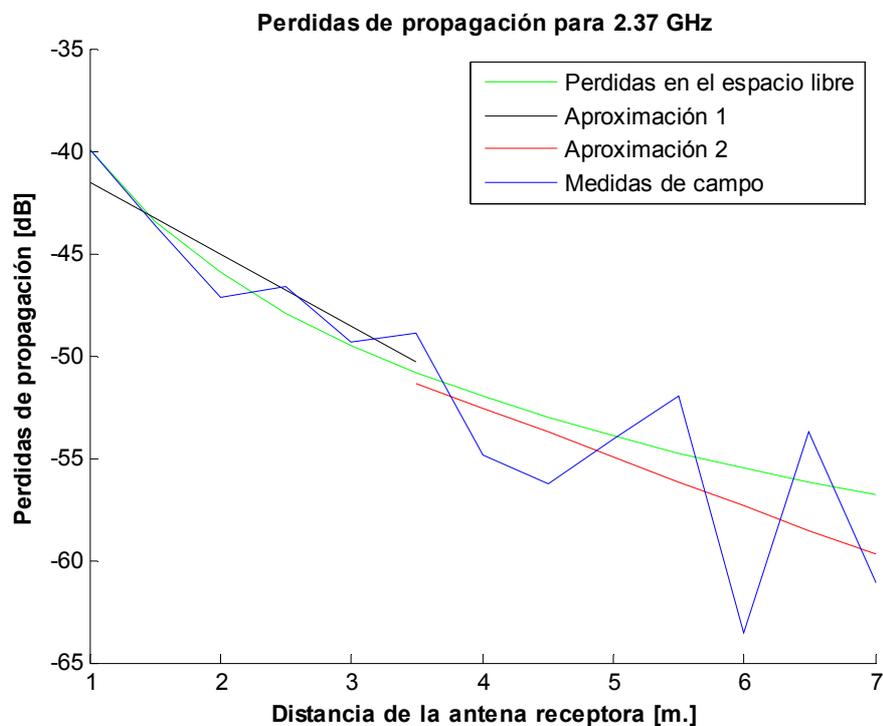


Figura 5-44: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 8 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.97 + (4.35) \times d; \sigma_1 = 1.79 & d \leq 3m \\ 49.86 + (1.79) \times (d - 3); \sigma_2 = 6.2 & d > 3m \end{cases}$$

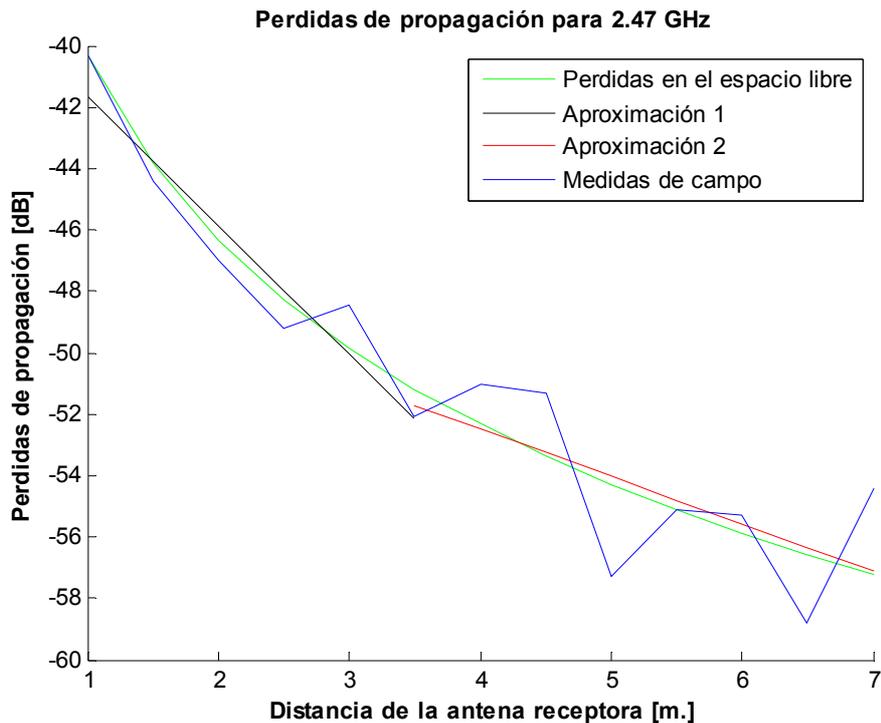


Figura 5-45: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 8 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 41.68 + (4.18) \times d; \sigma_1 = 1.59 & d \leq 3.5m \\ 51.70 + (1.55) \times (d - 3.5); \sigma_2 = 3.23 & d > 3.5m \end{cases}$$

Se observa que según estas primeras medidas, la disminución de la ganancia de las antenas supone que la señal sea más sensible a la *interferencia multicamino*, lo que nos supone un mayor incremento del *fading* en todo el enlace.

9. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.37 y 2.47 GHz

Posición en el pasillo: centrada

Pérdidas obtenidas para tres alturas en el camino central:

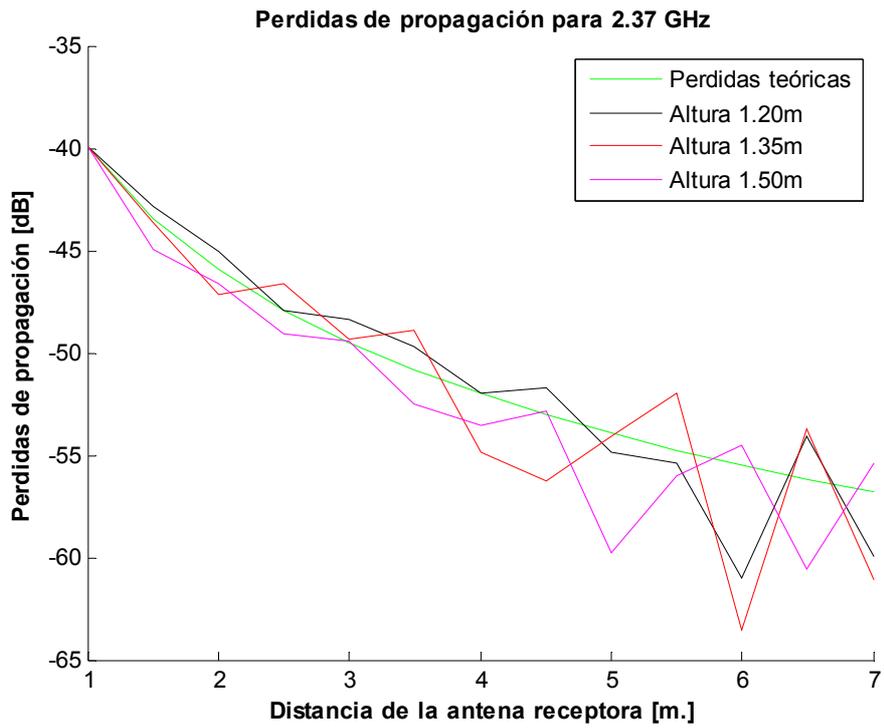


Figura 5-46: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 9 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz.

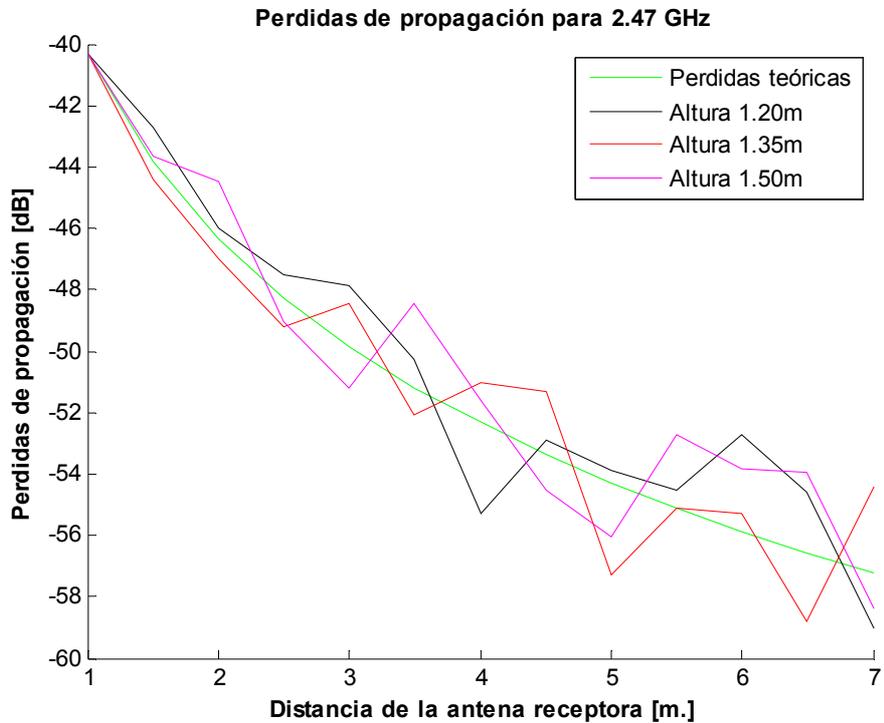


Figura 5-47: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 9 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz.

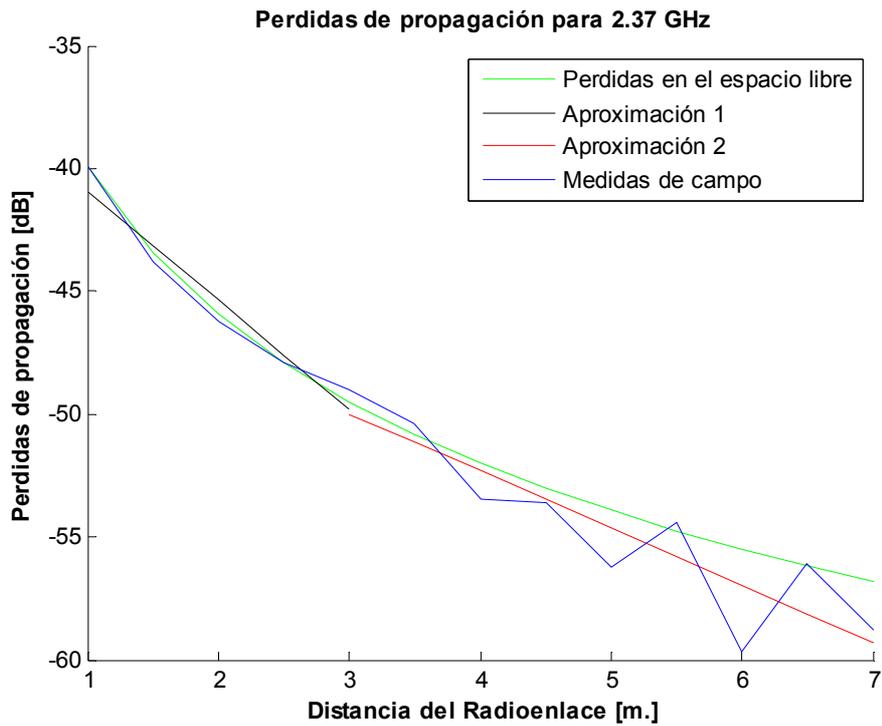


Figura 5-48: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 9 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.92 + (4.45) \times d; \sigma_1 = 0.98 & d \leq 3m \\ 49.98 + (2.32) \times (d - 3); \sigma_2 = 2.74 & d > 3m \end{cases}$$

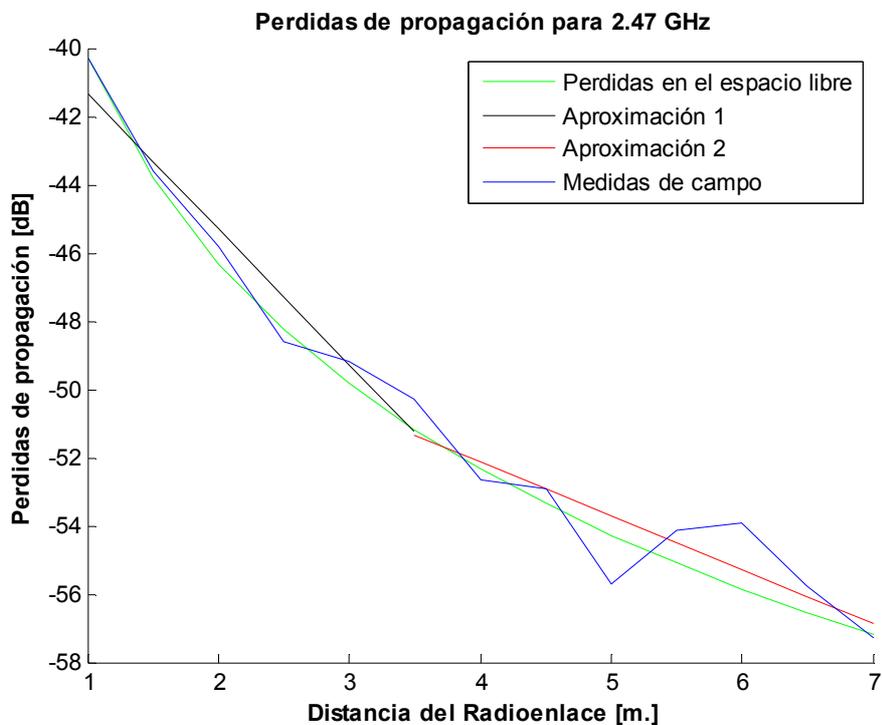


Figura 5-49: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 9 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(\text{dB}) = \begin{cases} 41.34 + (3.96) \times d; \sigma_1 = 1.30 & d \leq 3.5\text{m} \\ 51.32 + (1.58) \times (d - 3.5); \sigma_2 = 1.33 & d > 3.5\text{m} \end{cases}$$

En este escenario, se observa con más claridad que al usar unas antenas de menor ganancia tendremos un mayor *fading*. En este caso, las pérdidas obtenidas se mueven alrededor de las pérdidas en el espacio libre. La aproximación lineal difiere de las aproximaciones lineales en escenarios con una mayor ganancia, en las desviaciones máximas, y en un incremento de la pendiente en el segundo tramo, es decir, que en el segundo tramo las pérdidas por metro se incrementan.

10. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m.

Entorno: Pasillo semicerrado.

Ganancia de las antenas: 8.4 dB.

Altura de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m.

Frecuencias estudiadas: 2.37 y 2.47 GHz.

Posición en el pasillo: a la izquierda, centrada y a la derecha.

Pérdidas de cada camino, a las tres alturas y resultado medio del pasillo:

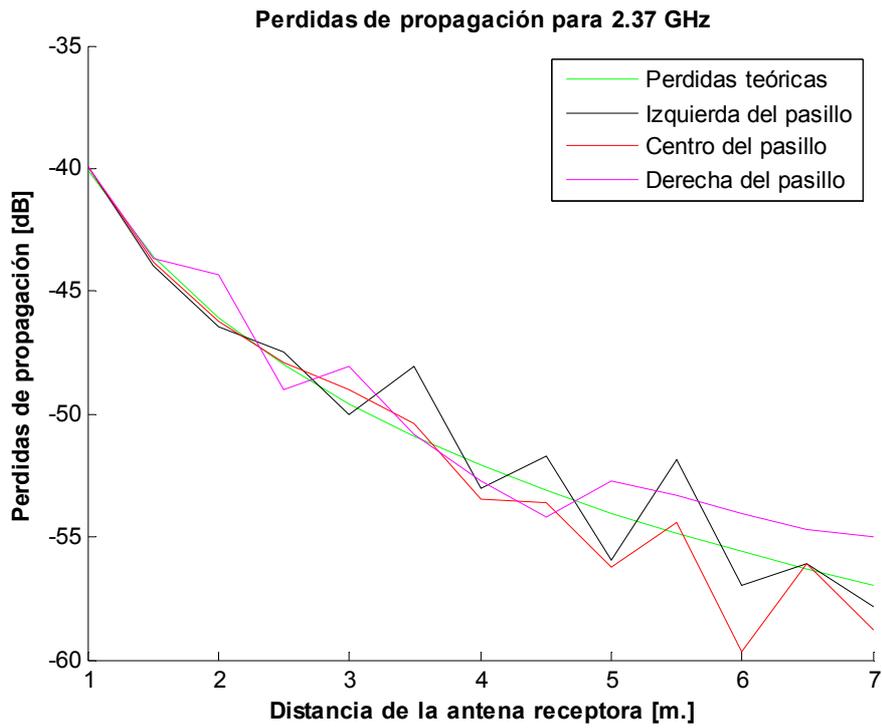


Figura 5-50: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz.

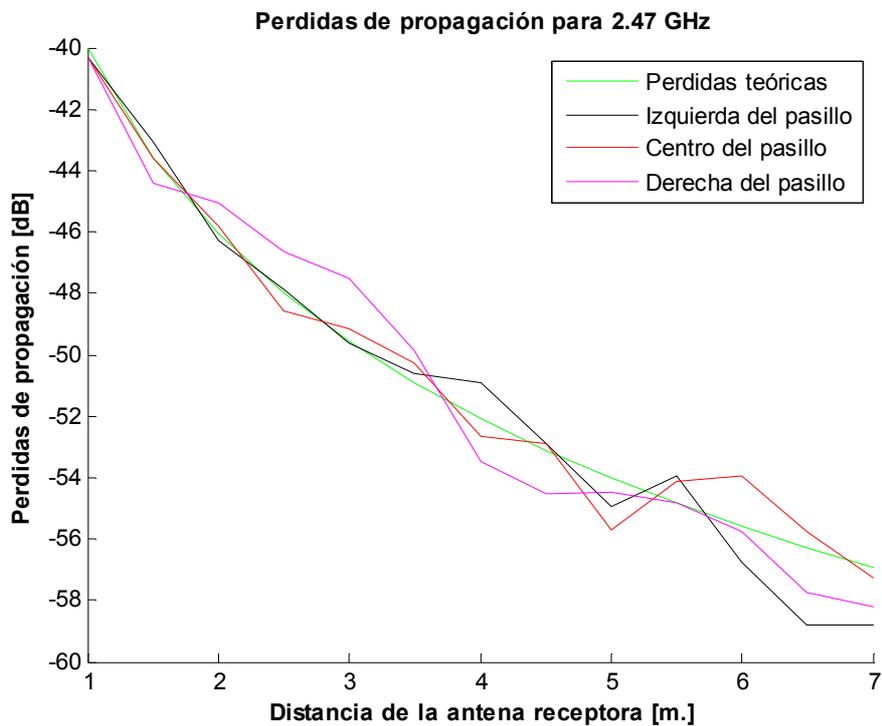


Figura 5-51: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz.

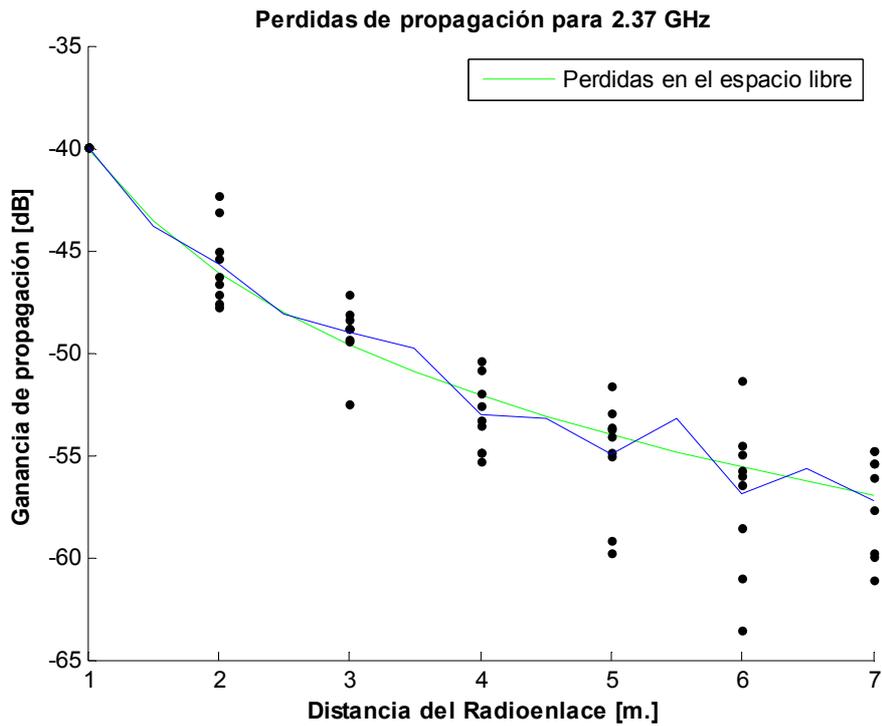


Figura 5-52: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 completo para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz.

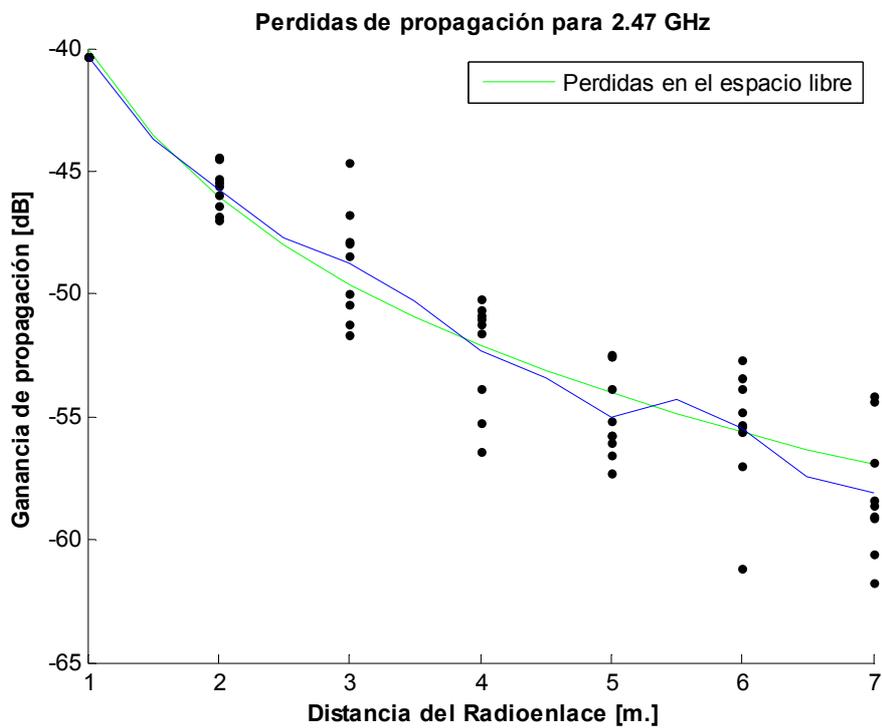


Figura 5-53: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 completo para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz.

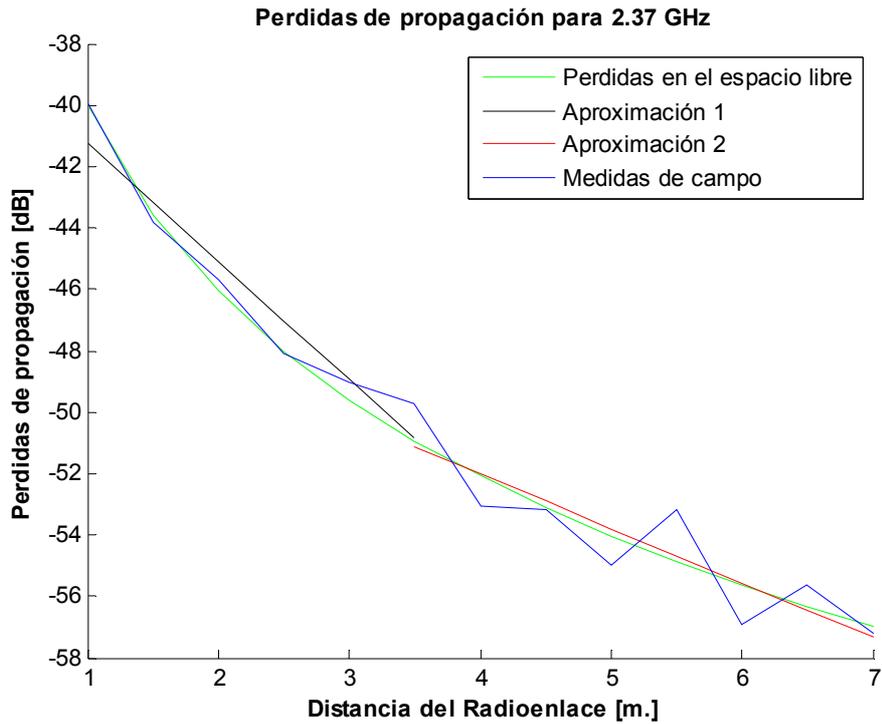


Figura 5-54: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 completo para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 41.26 + (3.83) \times d; \sigma_1 = 1.32 & d \leq 3.5m \\ 51.13 + (1.78) \times (d - 3.5); \sigma_2 = 1.34 & d > 3.5m \end{cases}$$

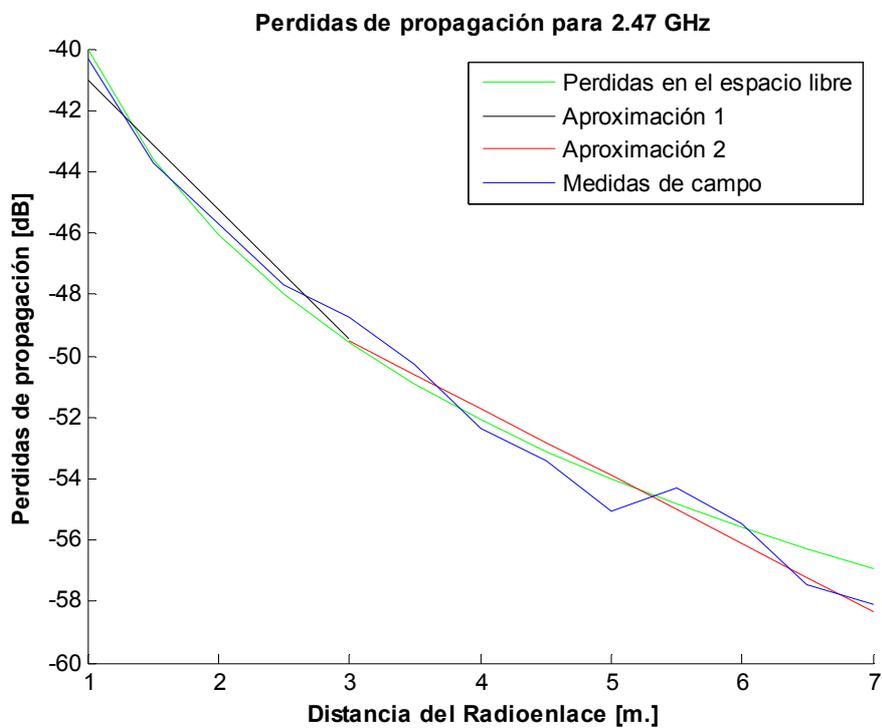


Figura 5-55: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 10 completo para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 41.04 + (4.19) \times d; \sigma_1 = 0.75 & d \leq 3m \\ 49.51 + (2.20) \times (d - 3); \sigma_2 = 1.13 & d > 3m \end{cases}$$

En este último escenario se corrobora en gran medida lo que hemos observado hasta ahora. Al emplear unas antenas de menor ganancia, el enlace es más sensible al multitrayecto, por lo que tendremos una mayor desviación a la hora de realizar aproximaciones lineales, sobre todo en el segundo tramo. Además, en general las pérdidas tenderán a ser mayores que en antenas con mayor ganancia, a medida que incrementemos la distancia entre las antenas.

5.1.2.2 Medidas para la banda de 3.3 GHz a 3.5 GHz

Toma de medidas del Pasillo 1 para la banda de WiMAX

A continuación, vamos a realizar una toma de medidas con antenas que trabajan en la banda de 3.3-3.5 GHz. El análisis del pasillo 1 es análogo al realizado para la banda de 2.3-2.5 GHz. Hemos realizado un análisis de las pérdidas de propagación en función de una altura y un camino, tres alturas, tres caminos y el conjunto del pasillo.

11. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 12.3 dB

Altura de las antenas: 1.35 m

Frecuencias estudiadas: 3.3, 3.4 y 3.5 GHz

Posición en el pasillo: centrada

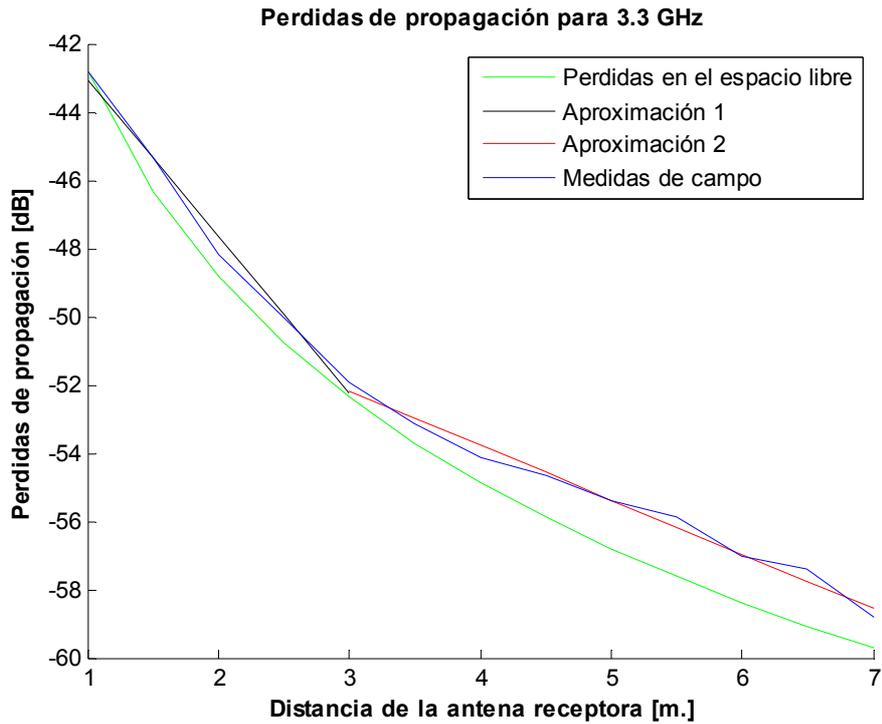


Figura 5-56: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 11 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.08 + (4.57) \times d; \sigma_1 = 0.56 & d \leq 3m \\ 52.20 + (1.59) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.37 & d > 3m \end{cases}$$

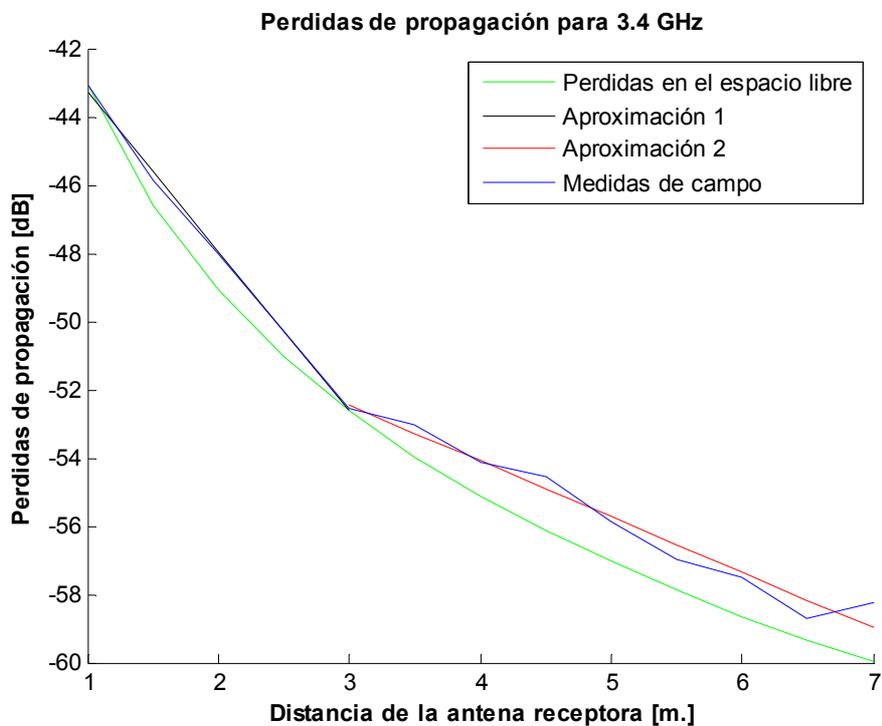


Figura 5-57: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 11 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.29 + (4.66) \times d; \sigma_1 = 0.25 & d \leq 3m \\ 52.46 + (1.63) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.74 & d > 3m \end{cases}$$

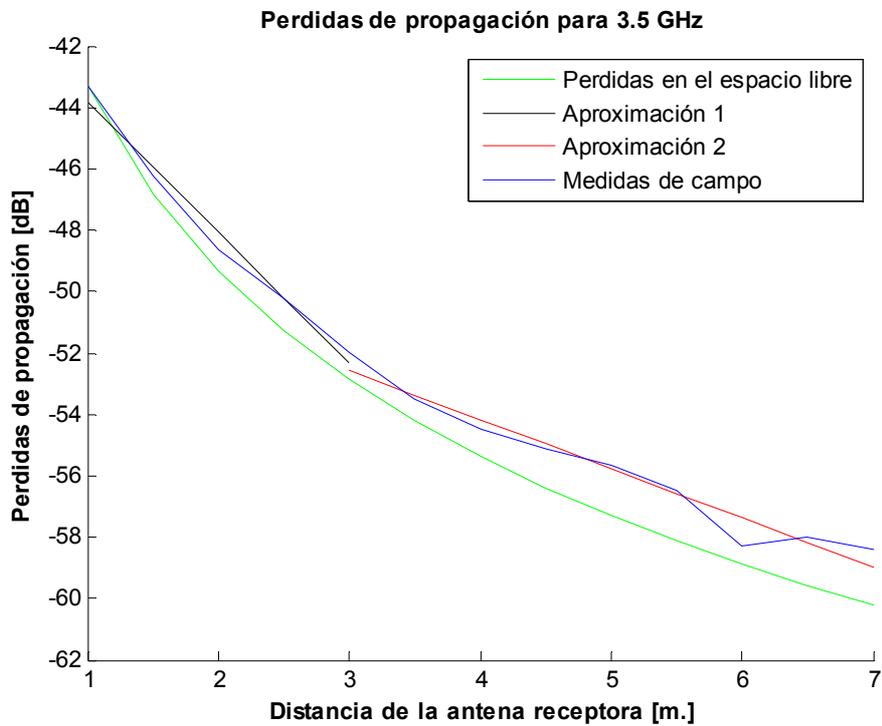


Figura 5-58: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 11 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.82 + (4.24) \times d; \sigma_1 = 0.56 & d \leq 3m \\ 52.56 + (1.60) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.93 & d > 3m \end{cases}$$

Al cambiar a una banda de frecuencia mas alta, las pérdidas de propagación se incrementan. Según podemos observar en este primer escenario, el aumento es de unos 3 dB por metro. Como en los casos anteriores, se pueden aproximar dos tramos lineales los cuales ademas tienen pendientes y desviaciones máximas similares a las de la banda de frecuencia 2.3-2.5 GHz.

Por otra parte, al volver a utilizar antenas de mayor ganancia se reduce de nuevo el *fading* que sufríamos en los escenarios anteriores.

12. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 12.3 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 3.3, 3.4 y 3.5 GHz

Posición en el pasillo: centrada

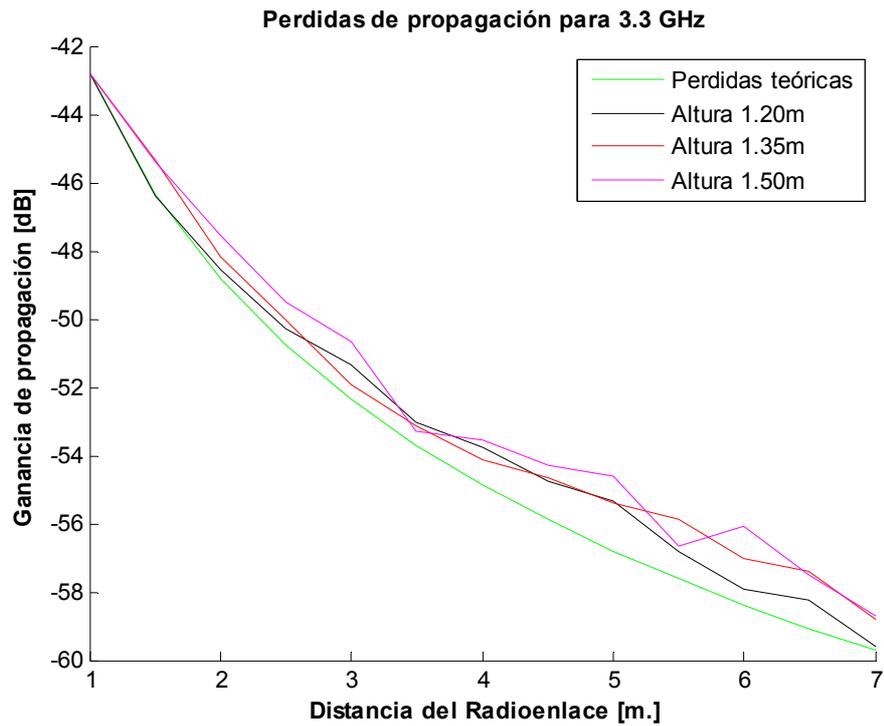


Figura 5-59: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.

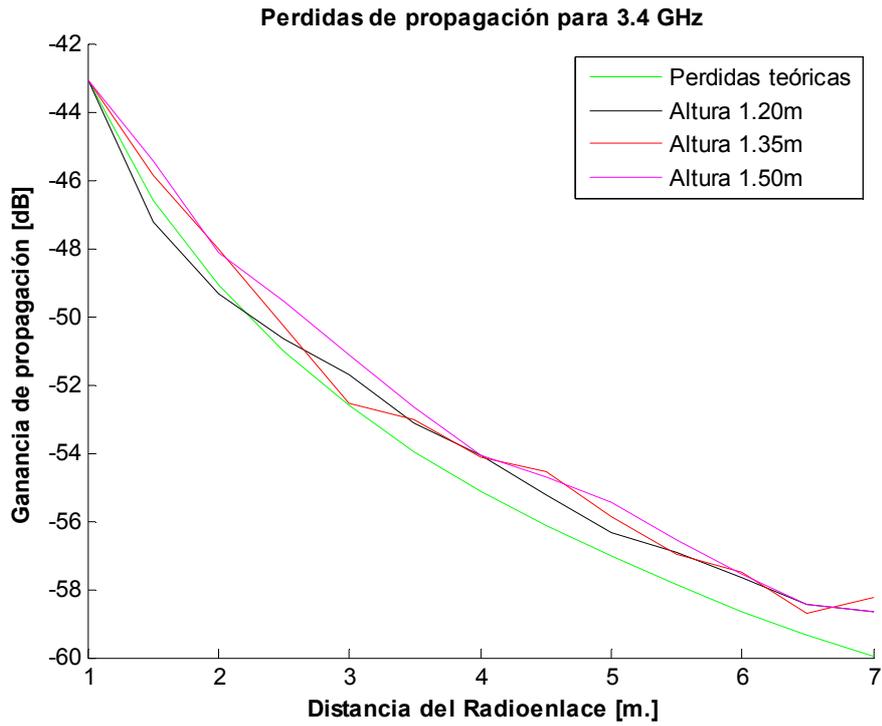


Figura 5-60: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.

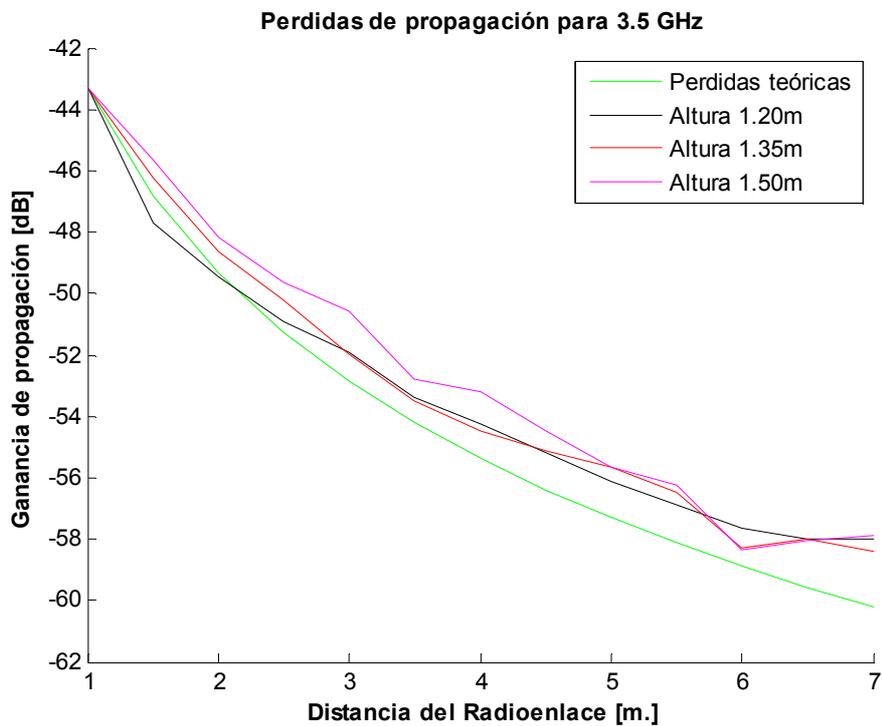


Figura 5-61: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.

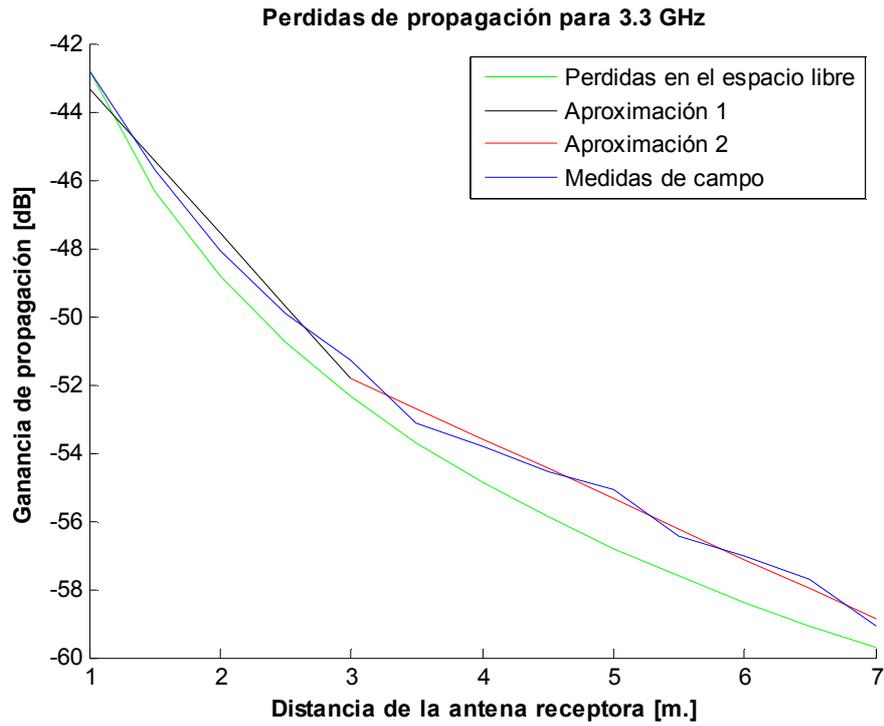


Figura 5-62: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.33 + (4.24) \times d; \sigma_1 = 0.52 & d \leq 3m \\ 52.82 + (1.76) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.52 & d > 3m \end{cases}$$

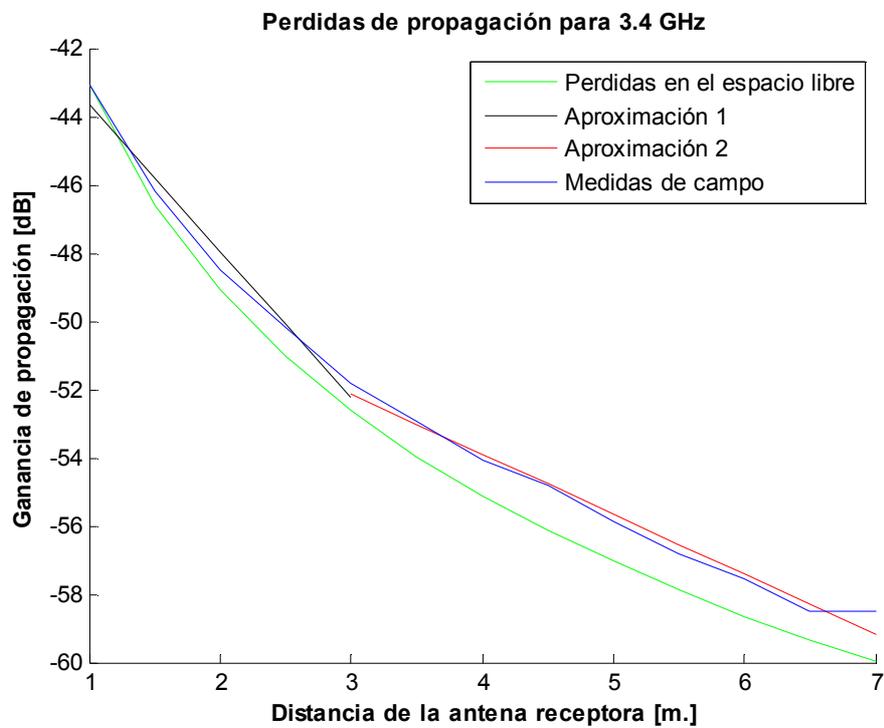


Figura 5-63: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.66 + (4.28) \times d; \sigma_1 = 0.59 & d \leq 3m \\ 52.16 + (1.75) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.65 & d > 3m \end{cases}$$

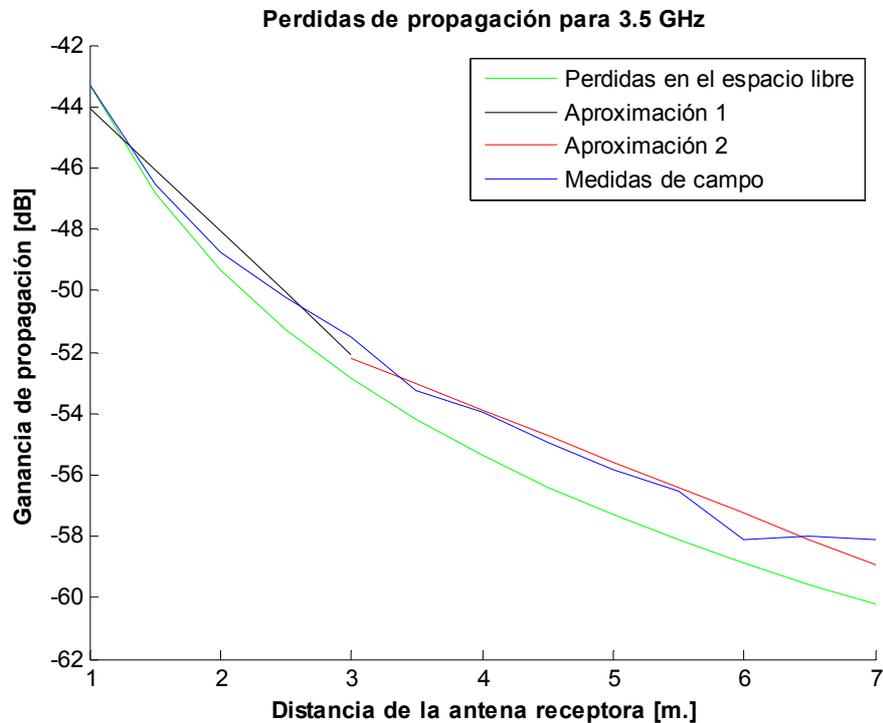


Figura 5-64: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 12 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 44.05 + (4.01) \times d; \sigma_1 = 0.73 & d \leq 3m \\ 52.20 + (1.68) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.86 & d > 3m \end{cases}$$

Igual que sucedía en la otra banda de frecuencia, los resultados obtenidos no son sensibles a las alturas estudiadas de las antenas.

13. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 12.3 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 3.3, 3.4 y 3.5 GHz

Posición en el pasillo: a la izquierda, centrada y a la derecha

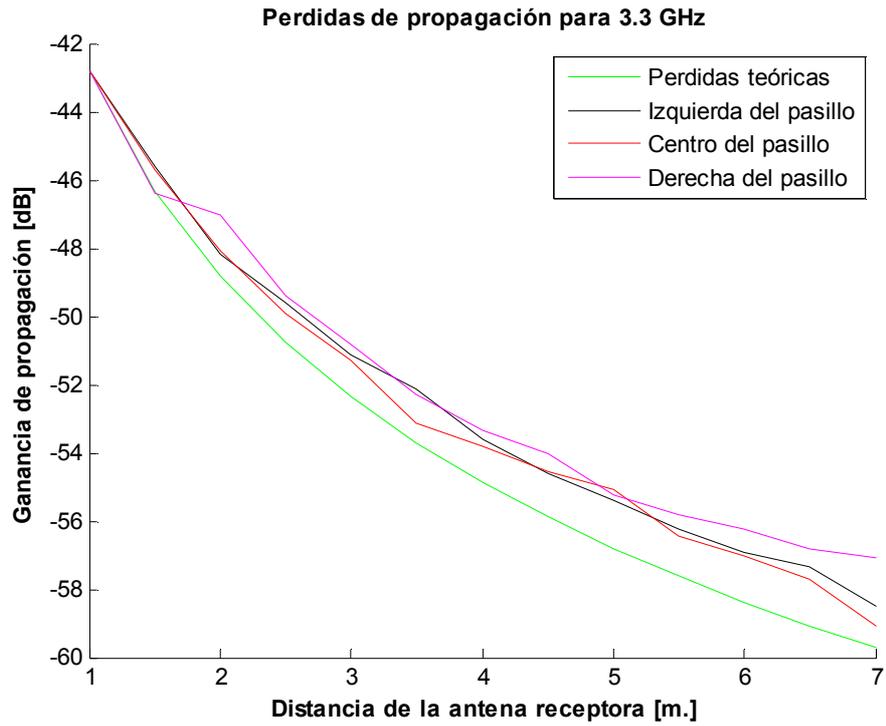


Figura 5-65: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.

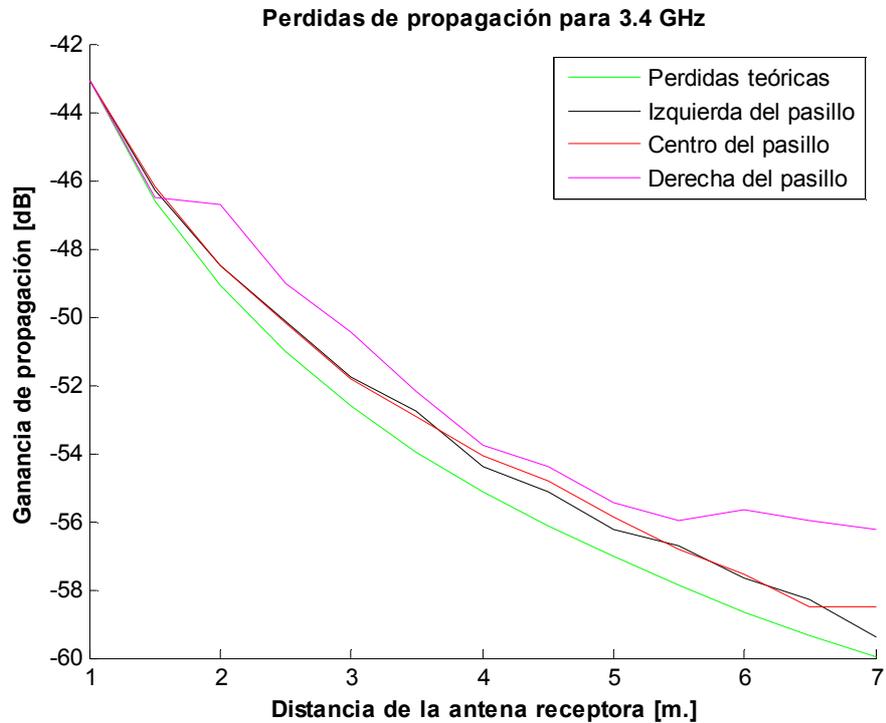


Figura 5-66: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.

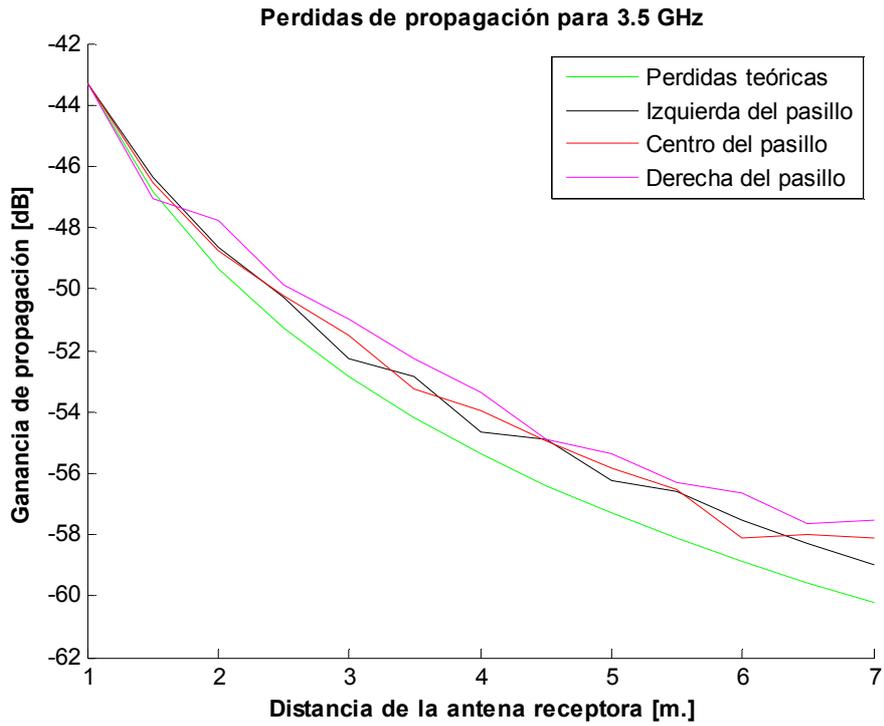


Figura 5-67: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.

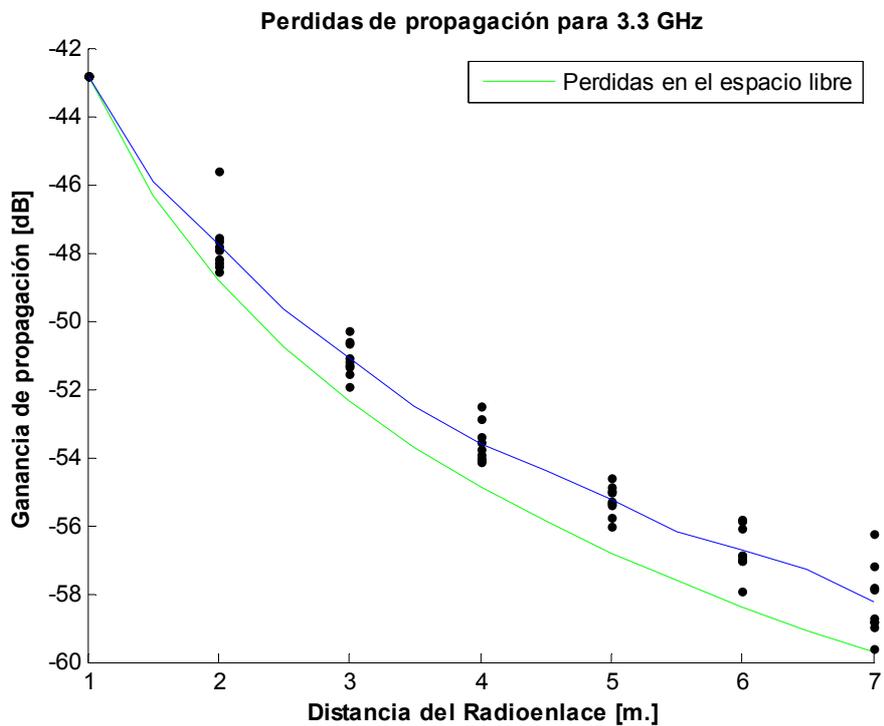


Figura 5-68: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.

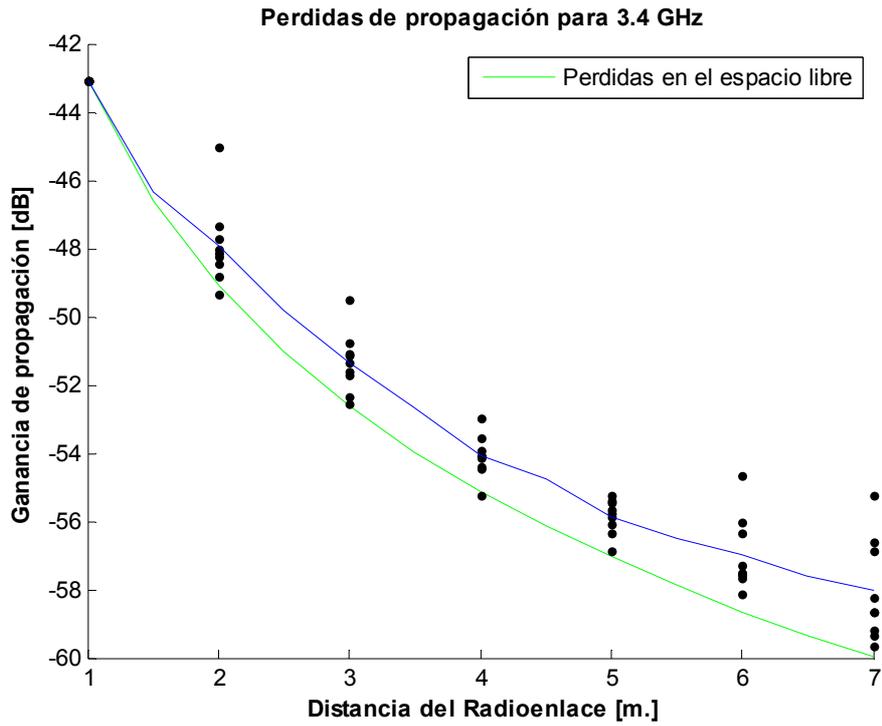


Figura 5-69: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.

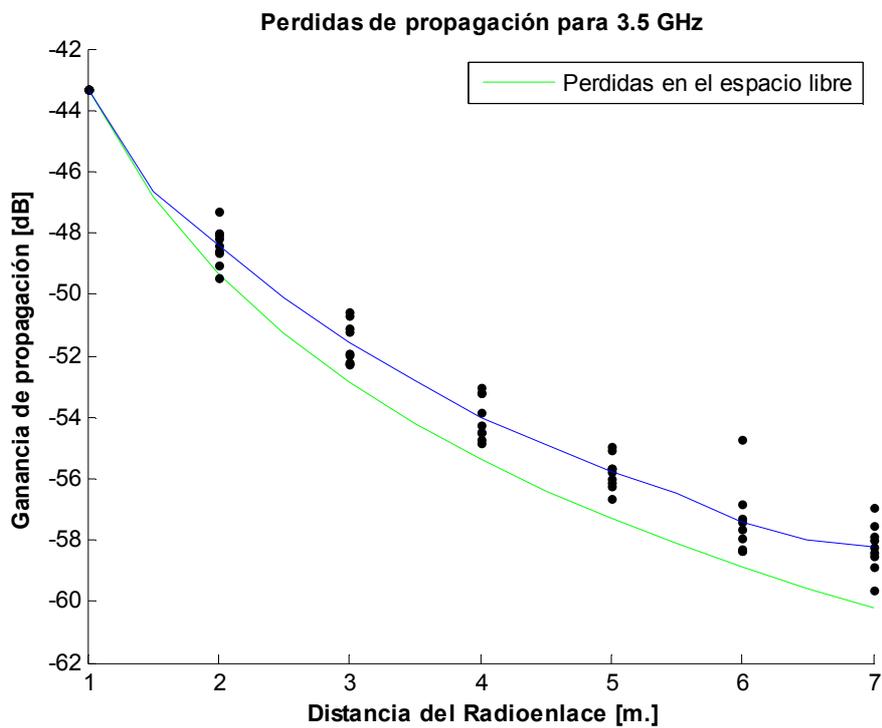


Figura 5-70: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.

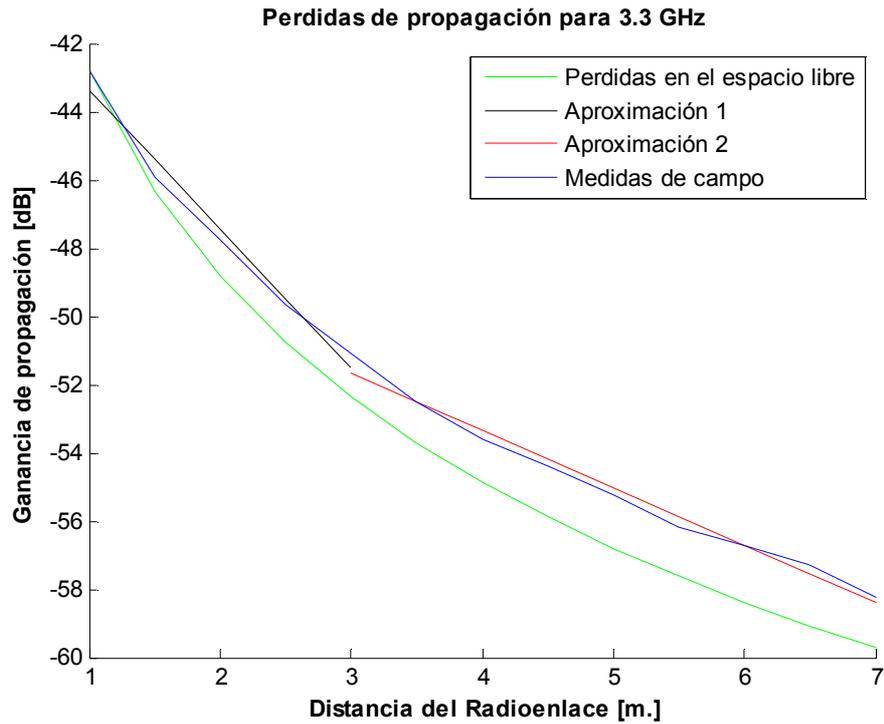


Figura 5-71: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.38 + (4.06) \times d; \sigma_1 = 0.57 & d \leq 3m \\ 51.63 + (1.69) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.54 & d > 3m \end{cases}$$

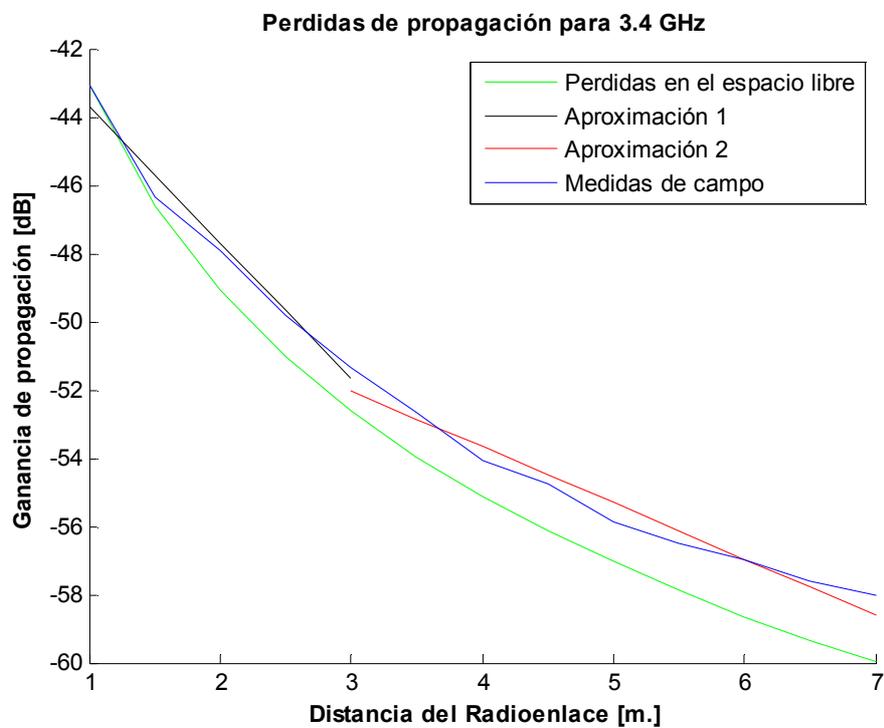


Figura 5-72: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.69 + (3.99) \times d; \sigma_1 = 0.64 & d \leq 3m \\ 52.03 + (1.64) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.70 & d > 3m \end{cases}$$

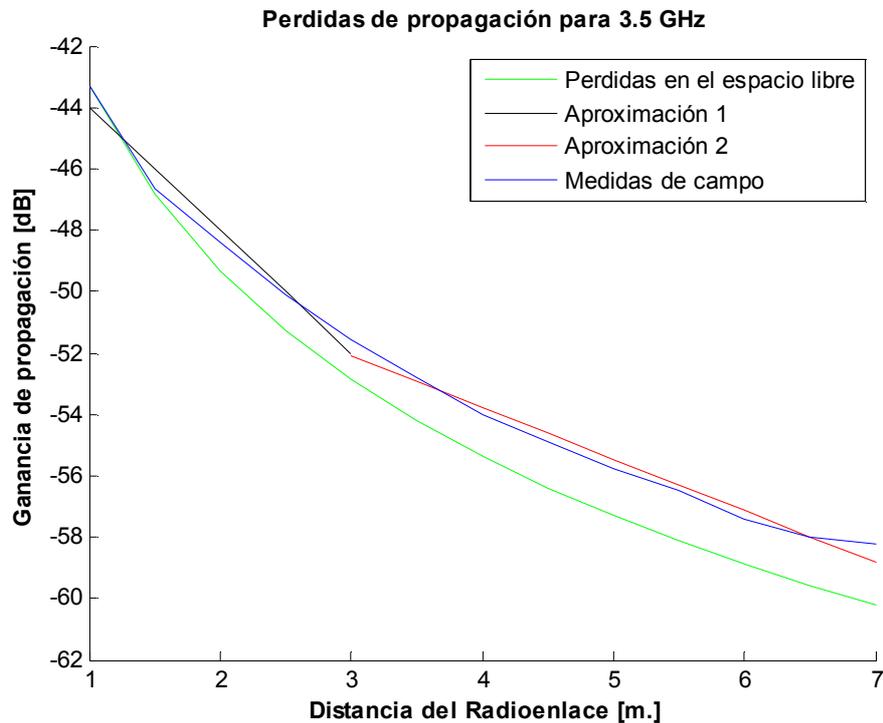


Figura 5-73: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 13 completo para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 44.01 + (3.99) \times d; \sigma_1 = 0.64 & d \leq 3m \\ 52.09 + (1.68) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.62 & d > 3m \end{cases}$$

La banda de frecuencia 3.3-3.5 GHz tiene el mismo comportamiento que la banda 2.3-2.5 GHz en el pasillo 1, con la excepción de que tenemos 3 dB más de pérdidas en la primera. Esto es debido a que las ondas de mayor frecuencia son atenuadas más rápidamente que las de frecuencias menores.

Toma de medidas del Pasillo 2 para la banda de 3.3-3.5 GHz

El análisis del pasillo 2 para la banda 3.3-3.5 GHz es análogo al anterior por lo que a continuación se presentan las pérdidas en función de una altura y un camino, tres alturas, tres caminos y el conjunto del pasillo.

14. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semiabierto

Ganancia de las antenas: 12.4 dB

Altura de las antenas: 1.35 m

Frecuencias estudiadas: 3.3, 3.4 y 3.5 GHz

Posición en el pasillo: centrada

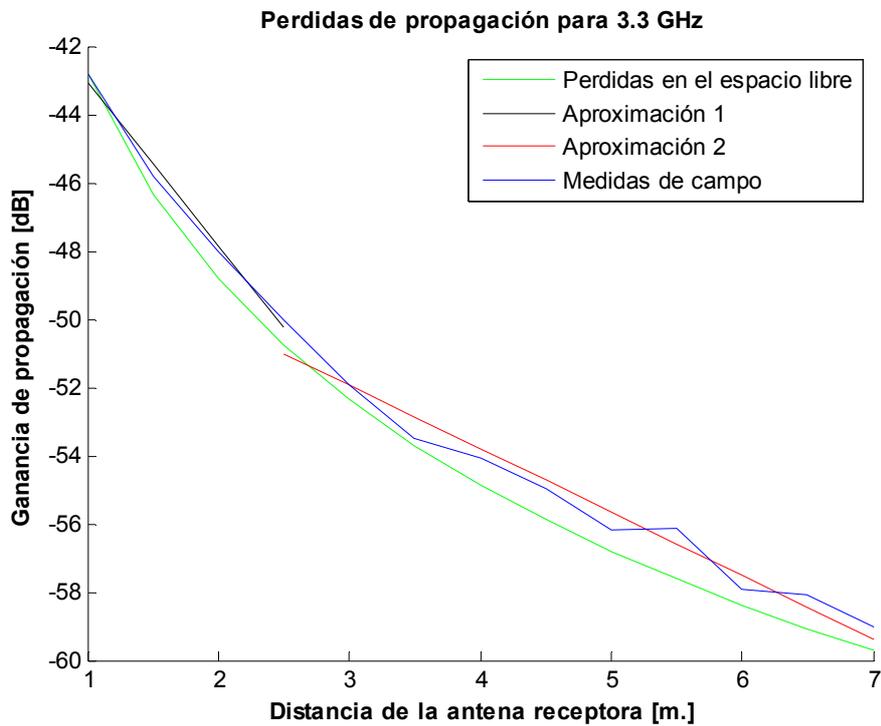


Figura 5-74: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 14 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.22 + (4.49) \times d; \sigma_1 = 0.41 & d \leq 3m \\ 52.37 + (1.70) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.47 & d > 3m \end{cases}$$

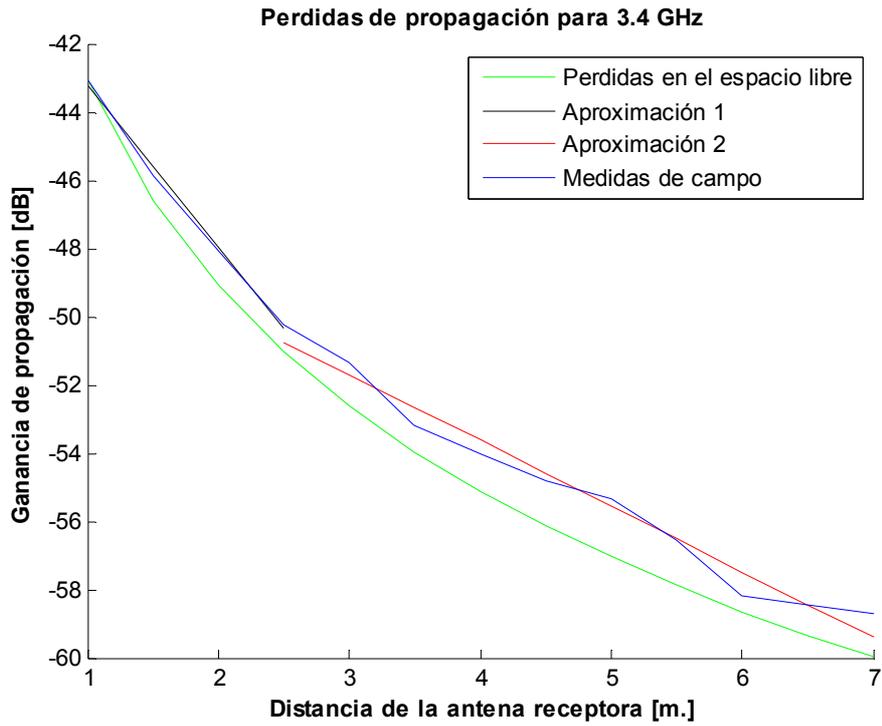


Figura 5-75: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 14 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.53 + (4.19) \times d; \sigma_1 = 0.54 & d \leq 3m \\ 51.94 + (1.83) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.72 & d > 3m \end{cases}$$

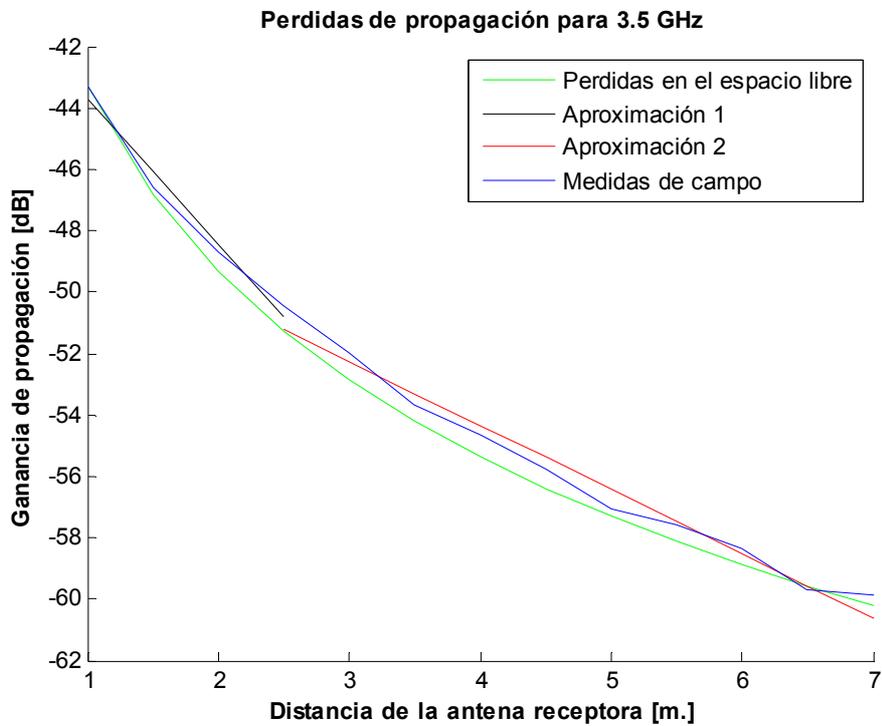


Figura 5-76: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 14 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(\text{dB}) = \begin{cases} 43.74 + (4.70) \times d; \sigma_1 = 0.51 & d \leq 2.5\text{m} \\ 51.20 + (2.09) \times (d - 2.5); \sigma_2 = 0.75 & d > 2.5\text{m} \end{cases}$$

En las primeras medidas vemos como igual que en la banda de 2.3-2.5 GHz, las pérdidas de propagación en este segundo pasillo son similares a las del primero.

15. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semiabierto

Ganancia de las antenas: 12.4 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 3.3, 3.4 y 3.5 GHz

Posición en el pasillo: centrada

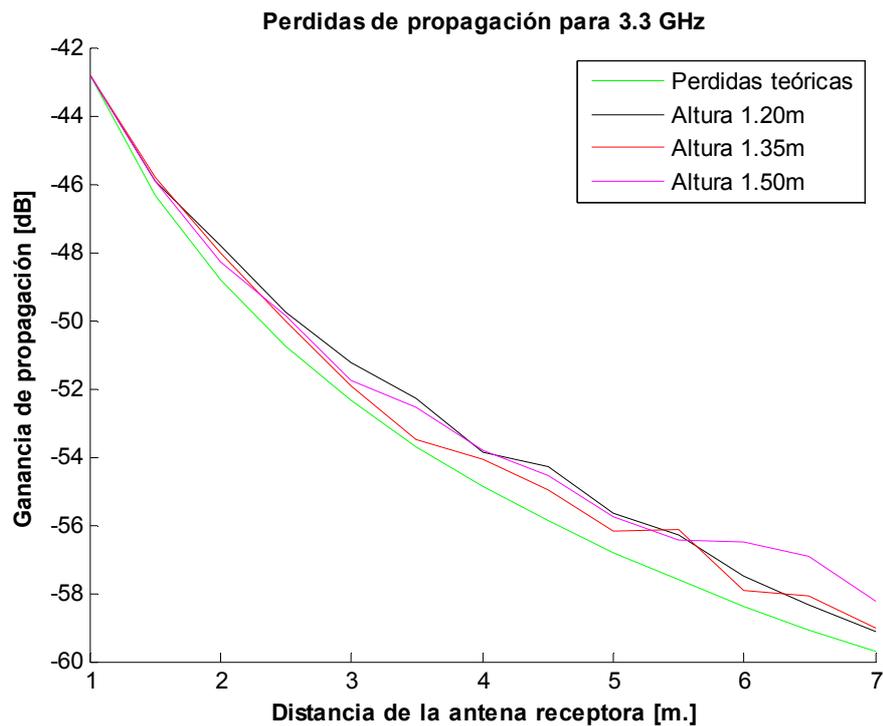


Figura 5-77: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.

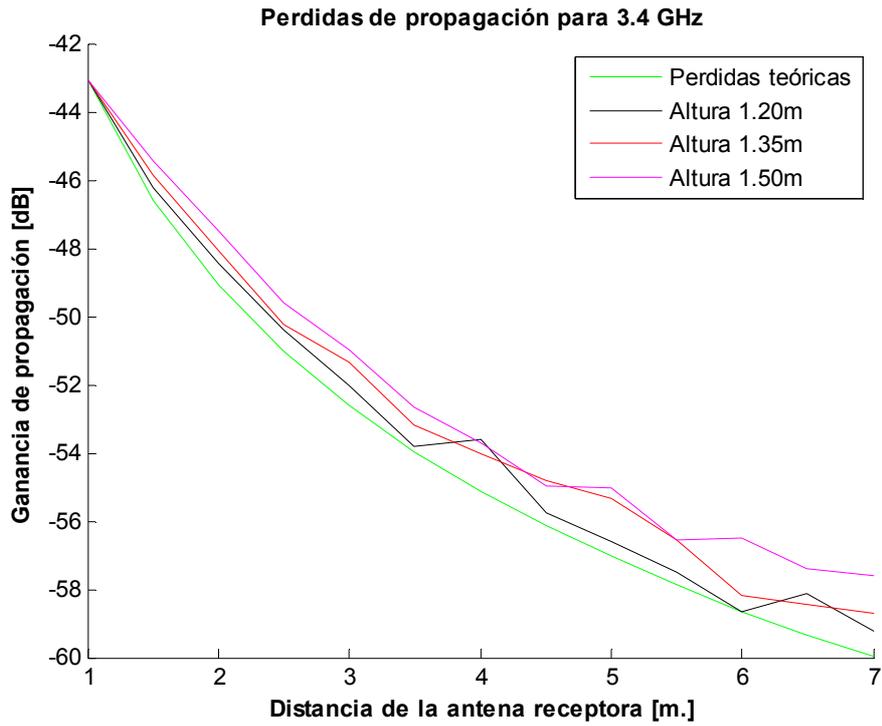


Figura 5-78: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.

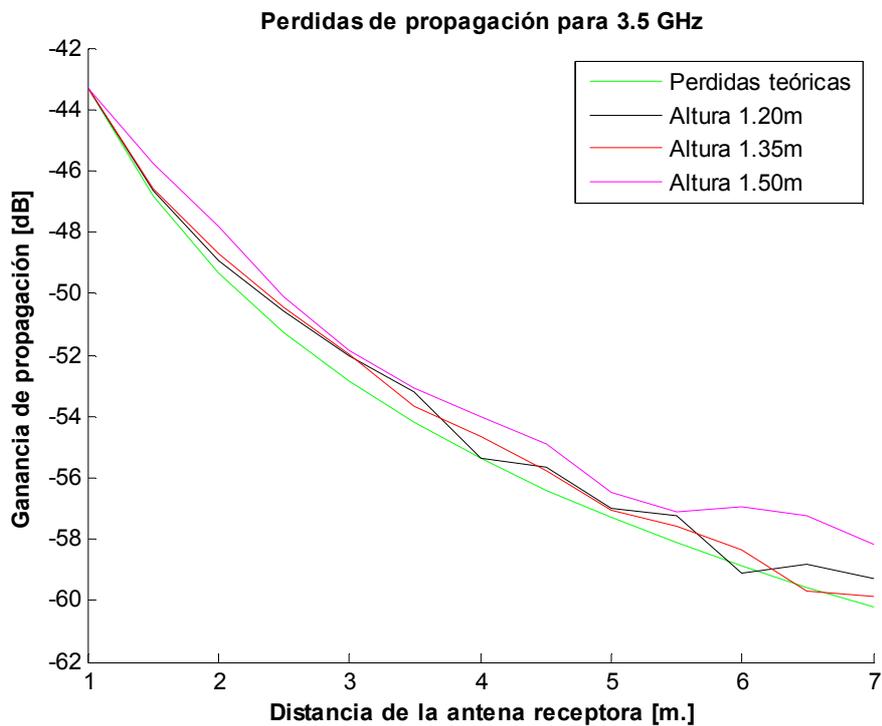


Figura 5-79: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.

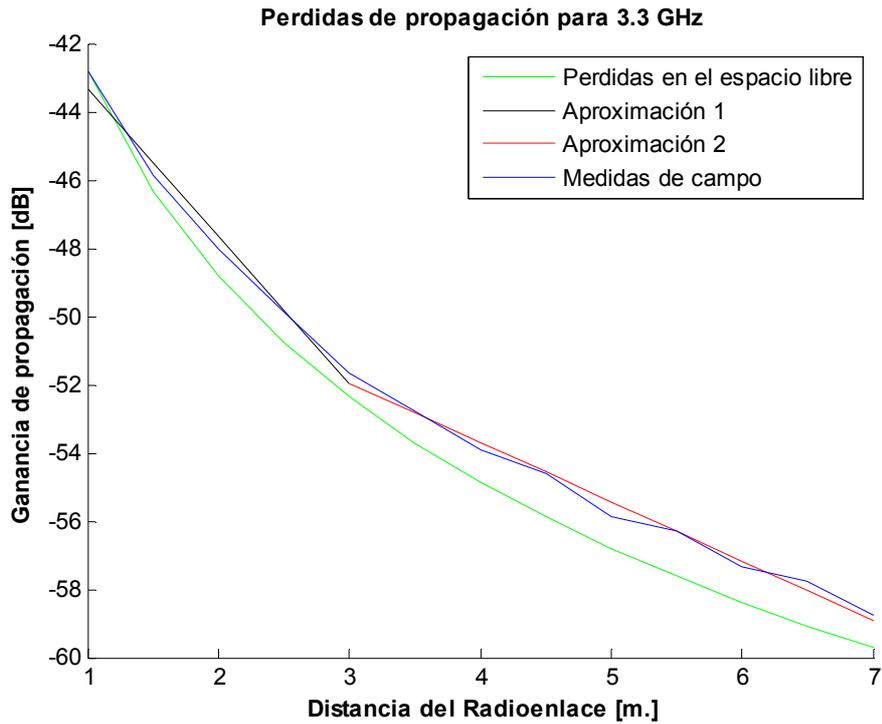


Figura 5-80: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.31 + (4.33) \times d; \sigma_1 = 0.50 & d \leq 3m \\ 51.97 + (1.74) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.44 & d > 3m \end{cases}$$

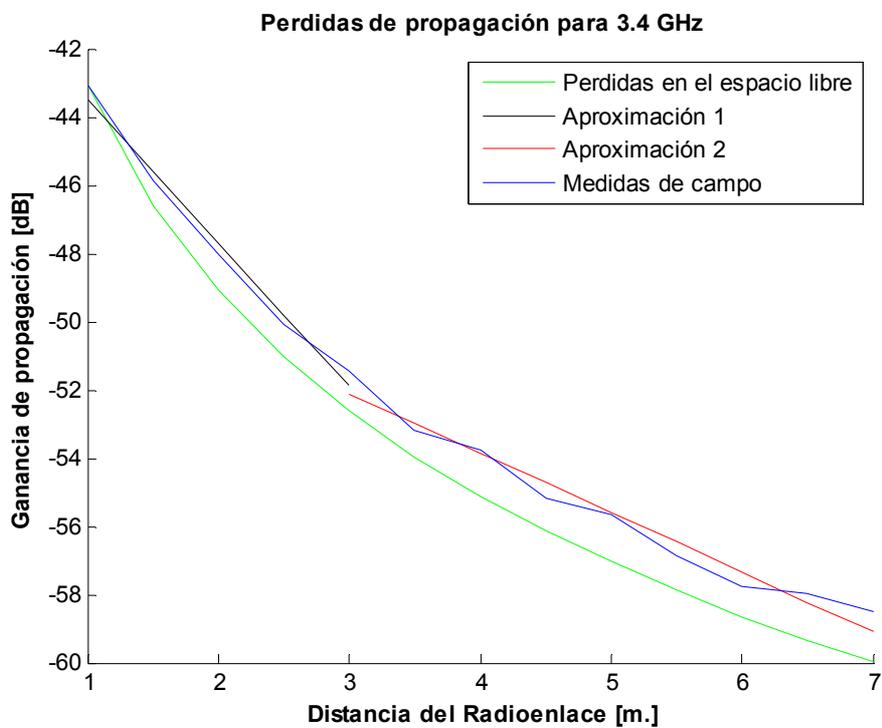


Figura 5-81: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.49 + (4.20) \times d; \sigma_1 = 0.43 & d \leq 3m \\ 52.12 + (1.74) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.66 & d > 3m \end{cases}$$

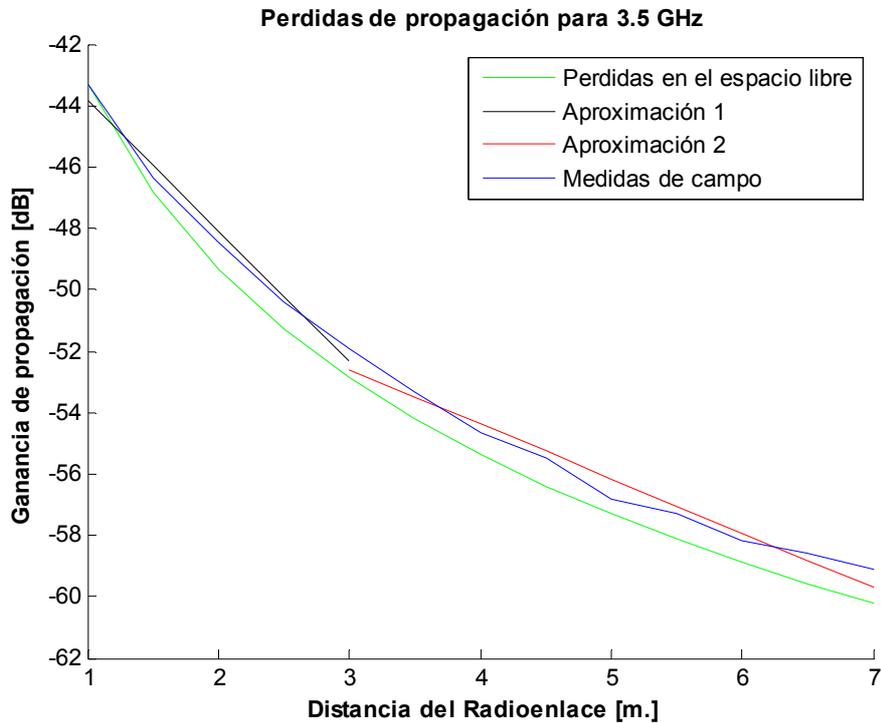


Figura 5-82: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 15 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.83 + (4.25) \times d; \sigma_1 = 0.51 & d \leq 3m \\ 52.60 + (1.78) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.69 & d > 3m \end{cases}$$

El cambio de las alturas tampoco es determinante en este caso.

16. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semiabierto

Ganancia de las antenas: 12.3 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 3.3, 3.4 y 3.5 GHz

Posición en el pasillo: a la izquierda, centrada y a la derecha

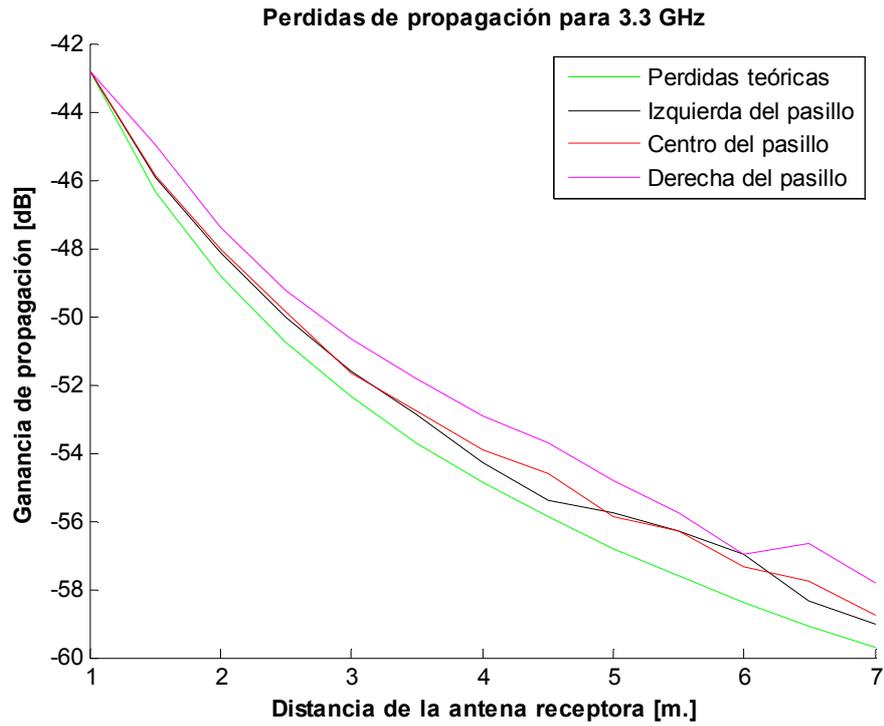


Figura 5-83: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.

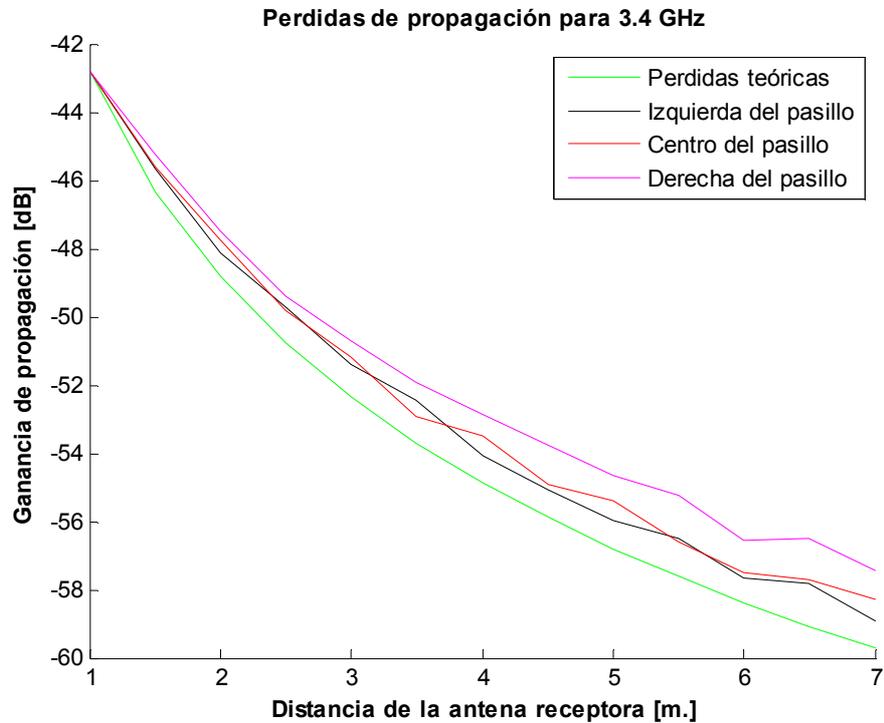


Figura 5-84: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.

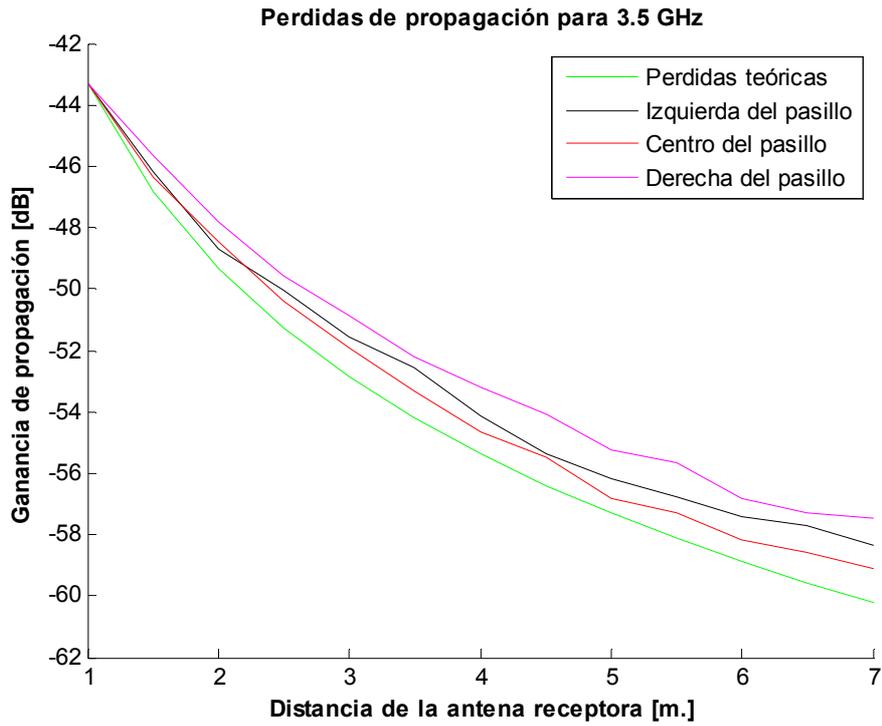


Figura 5-85: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.

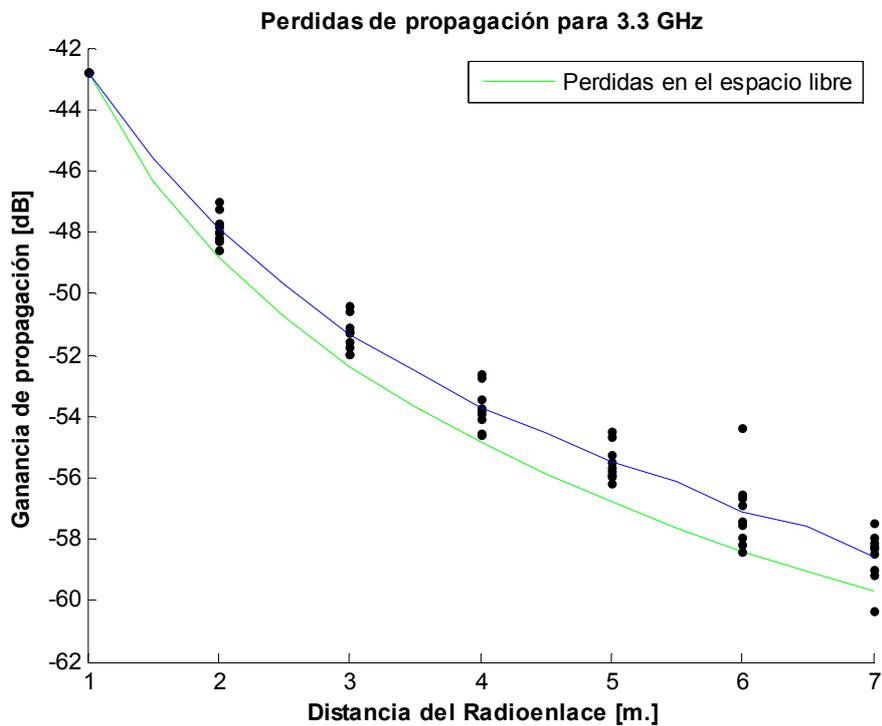


Figura 5-86: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz.

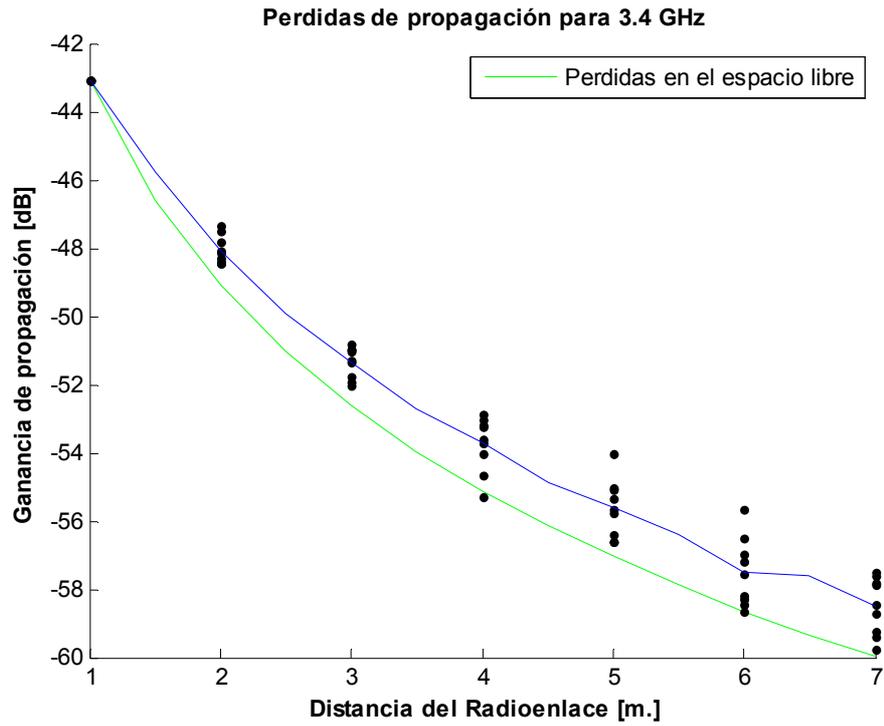


Figura 5-87: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz.

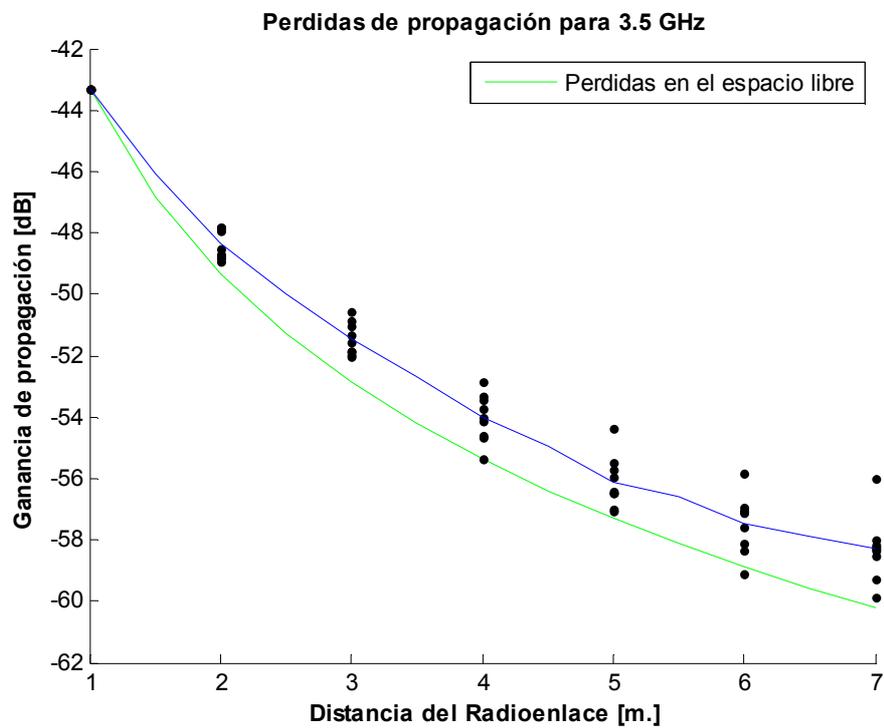


Figura 5-88: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz.

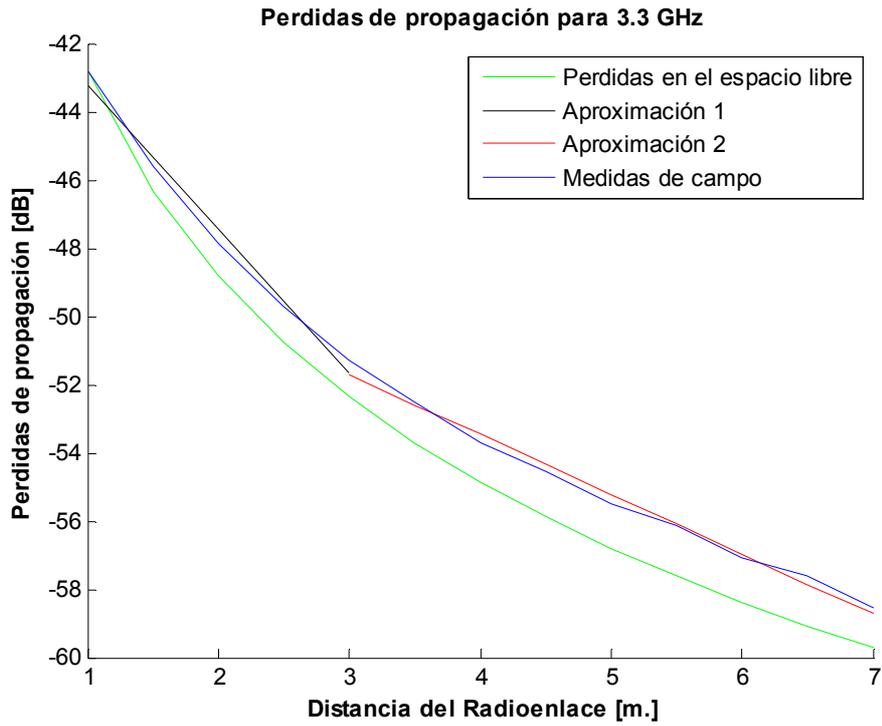


Figura 5-89: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.3GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.24 + (4.22) \times d; \sigma_1 = 0.42 & d \leq 3m \\ 51.70 + (1.75) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.40 & d > 3m \end{cases}$$

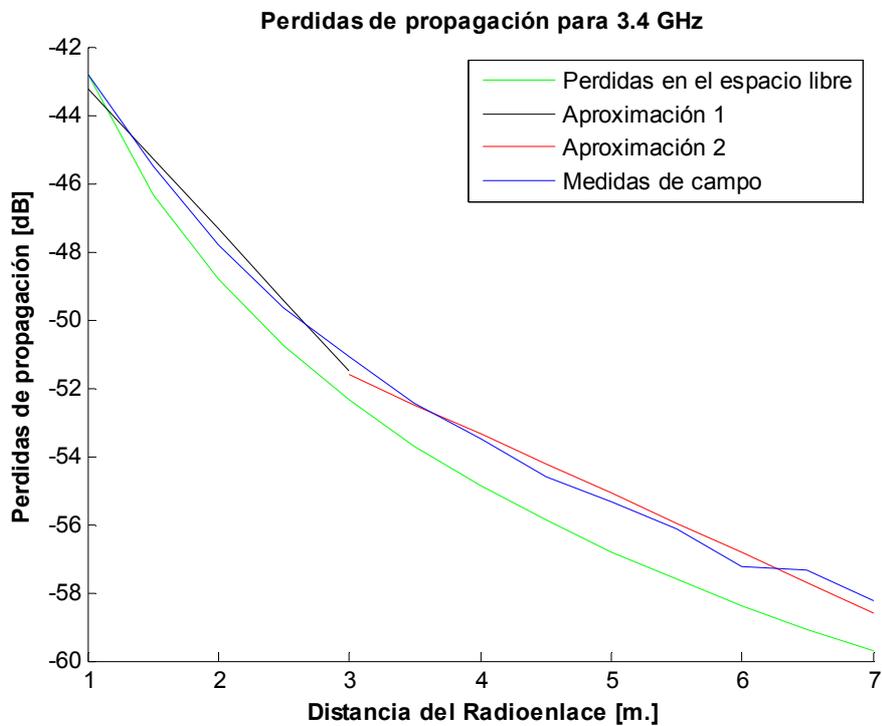


Figura 5-90: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.4GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.22 + (4.14) \times d; \sigma_1 = 0.43 & d \leq 3m \\ 51.61 + (1.74) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.51 & d > 3m \end{cases}$$

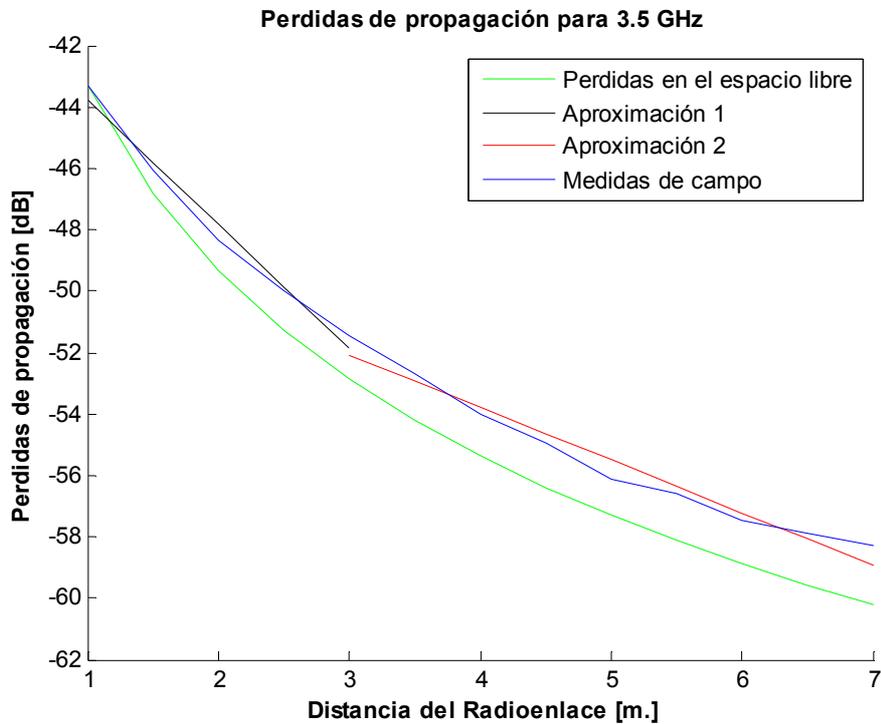


Figura 5-91: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 16 completo para la frecuencia de trabajo de 3.5GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 43.79 + (4.04) \times d; \sigma_1 = 0.50 & d \leq 3m \\ 52.06 + (1.71) \times (d - 3); \sigma_2 = 0.62 & d > 3m \end{cases}$$

En los últimos escenarios vemos que el cambio de frecuencia solo supone un incremento en las pérdidas de propagación independientemente de los dos pasillos estudiados.

Toma de medidas del Pasillo 1 para la banda de WiMAX y una ganancia de 9 dB

Hemos realizado el estudio anterior también para la banda de WiMAX, los pasos son análogos y al igual que en el caso anterior, como la reflexión de estas antenas no es óptima, hemos escogido una ventana apropiada para hacer el análisis, en este caso 3.37 GHz.

17. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Altura de las antenas: 1.35 m

Frecuencia estudiada: 3.35 GHz

Posición en el pasillo: centrada

Primero presentamos las pérdidas obtenidas para el camino del medio a 1,35 m:

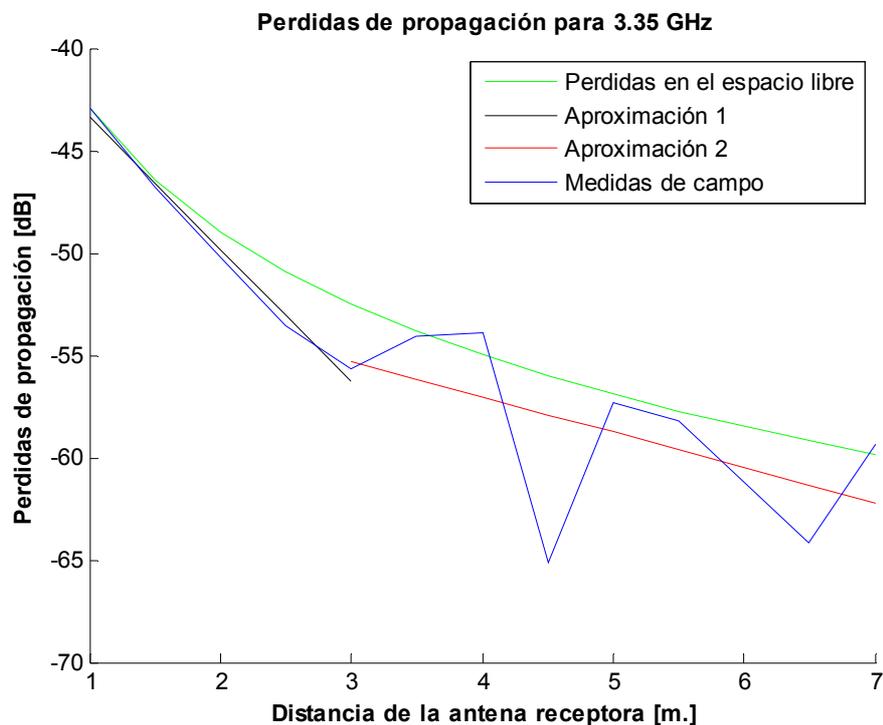


Figura 5-92: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 17 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 43.40 + (6.42) \times d; \sigma_1 = 0.60 & d \leq 3m \\ 55.27 + (1.75) \times (d - 3); \sigma_2 = 7.24 & d > 3m \end{cases}$$

En estas primeras medidas, observamos que al bajar la ganancia de las antenas, la pendiente en el primer tramo es mucho mayor, lo que provoca mayores pérdidas por metro, alejándonos varios dB de las pérdidas en el espacio libre. También, como ya sucedía en la banda 2.3-2.5 GHz, en el segundo tramo de la aproximación lineal, la desviación de las medidas es mayor que en el caso de mayor ganancia.

18. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencia estudiada: 3.35 GHz

Posición en el pasillo: centrada

Pérdidas obtenidas para tres alturas en el camino central:

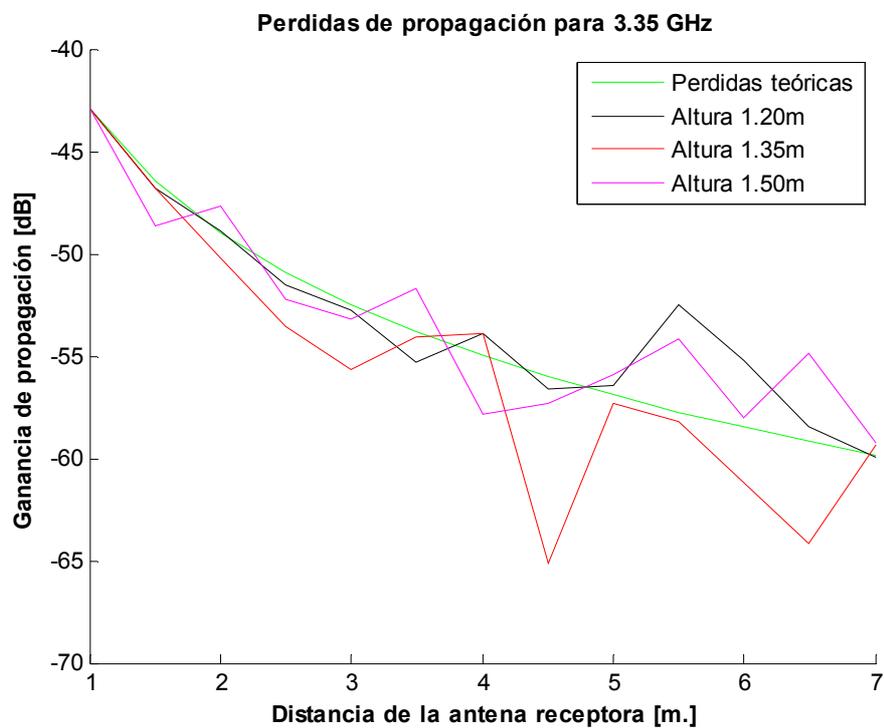


Figura 5-93: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 18 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz.

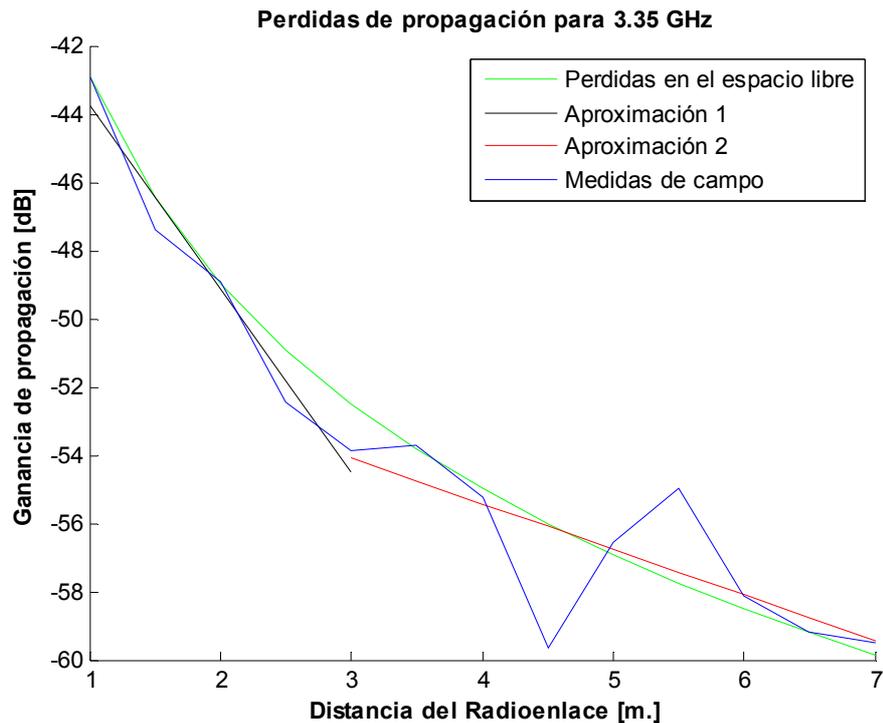


Figura 5-94: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 18 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 43.74 + (5.38) \times d; \sigma_1 = 0.98 & d \leq 3m \\ 54.09 + (1.34) \times (d - 3); \sigma_2 = 5.38 & d > 3m \end{cases}$$

La altura de las antenas no influye a priori en las medidas tomadas. Sin embargo, seguimos observando que la pendiente del primer tramo es mas pronunciada que en los casos anteriores y que la desviación en el segundo tramo también es mayor.

19. Escenario:

Distancia del enlace: 7 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.2, 1.35 y 1.5 m

Frecuencia estudiada: 3.35 GHz

Posiciones en el pasillo: a la izquierda, centrada y a la derecha

Pérdidas de cada camino, a las tres alturas y resultado medio del pasillo:

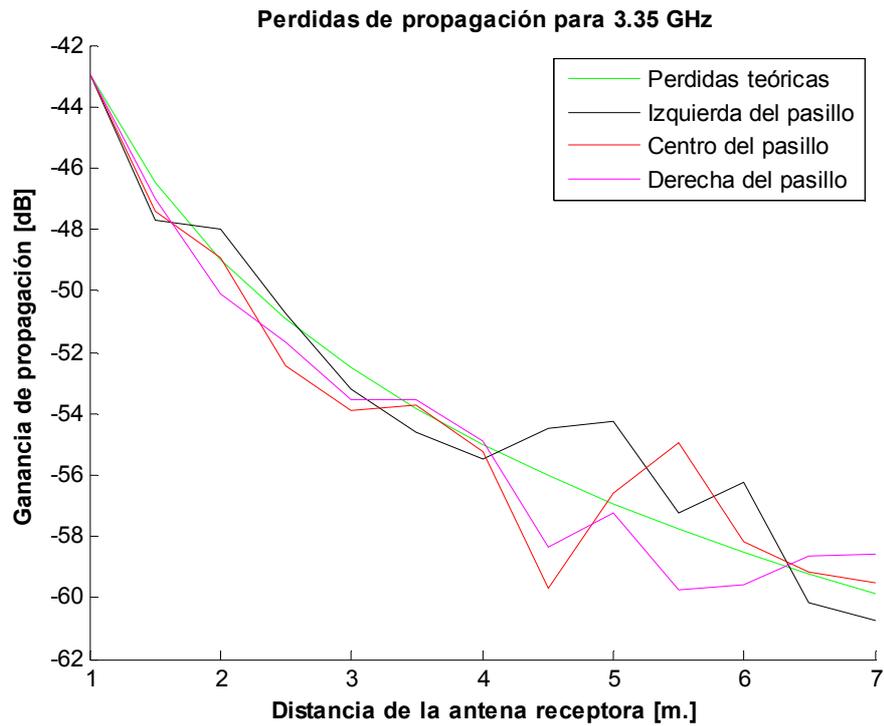


Figura 5-95: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 19 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz.

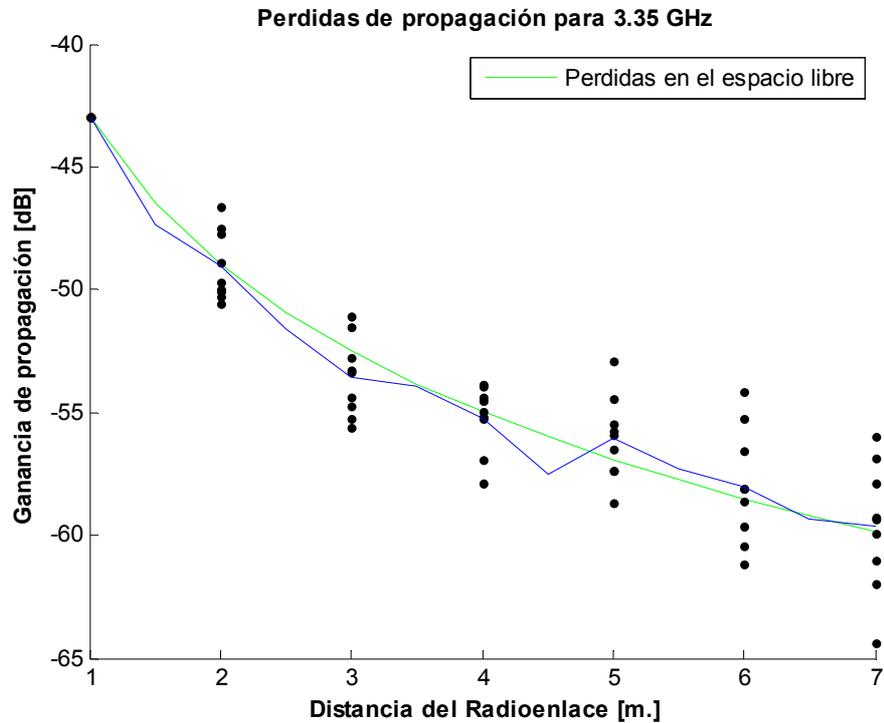


Figura 5-96: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 19 completo para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz.

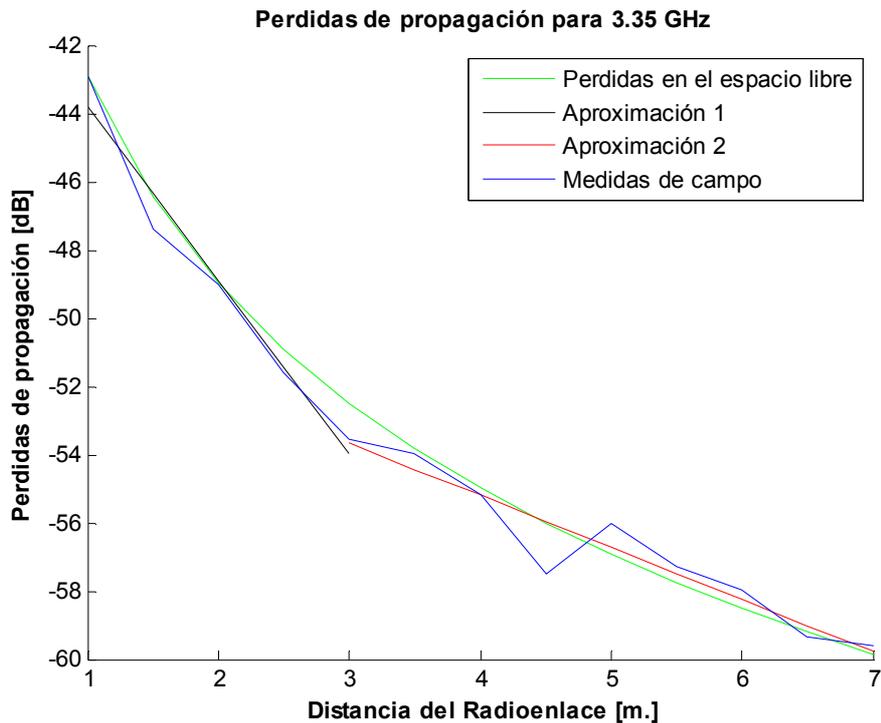


Figura 5-97: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 19 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 43.81 + (5.09) \times d; \sigma_1 = 1.02 & d \leq 3m \\ 53.67 + (1.52) \times (d - 3); \sigma_2 = 1.54 & d > 3m \end{cases}$$

Después de tomar mas medidas, seguimos observando como al cambiar a una banda de frecuencia mayor y al bajar la ganancia de la antena, el enlace sufre mayores pérdidas en el primer tramo y una mayor sensibilidad al mutitrayecto en el segundo. Como vemos esto se traduce en un incremento de dB de pérdida por metro en el primer tramo, una mayor atenuación inicial en el segundo tramo y mayor desviación de la señal con respecto a la aproximación lineal en el segundo tramo.

4.1.3 Segunda zona: Corredores no cerrados

Tras el estudio realizado en el interior del laboratorio 7, ahora salimos al pasillo que da acceso a los laboratorios del edificio EPS-UAM. En esta segunda zona de estudio, vamos a analizar dos pasillos. En primer lugar estudiaremos un pasillo de unos 20 metros de longitud delimitado por una pared con cajoneras metálicas a un lado y una

barandilla que se asoma al piso inferior por el otro. También tomaremos unas medidas en la pasarela que une los dos pasillos de este tercer piso.



Figura 5-98: Esquema de las medidas tomadas en la segunda zona

Realizaremos las medidas con las antenas de menor ganancia para poder estudiar mejor la sensibilidad de la señal al efecto de multitrayecto sufrido en los distintos escenarios.

5.1.3.1 Medidas para la banda de 2.3 GHz a 2.5 GHz

20. Escenario:

Distancia del enlace: 19 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.37 y 2.47 GHz

Posiciones en el pasillo: centrada.

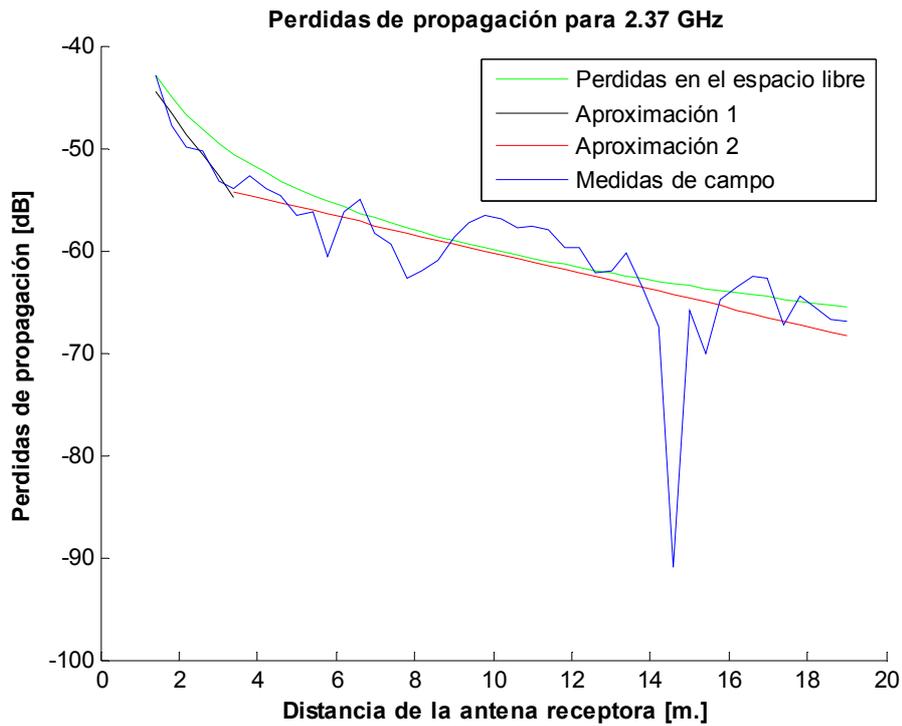


Figura 5-99: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 20 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 44.55 + (5.10) \times d; \sigma_1 = 1.69 & d \leq 3.5m \\ 54.32 + (0.89) \times (d - 3.5); \sigma_2 = 26.53 & d > 3.5m \end{cases}$$

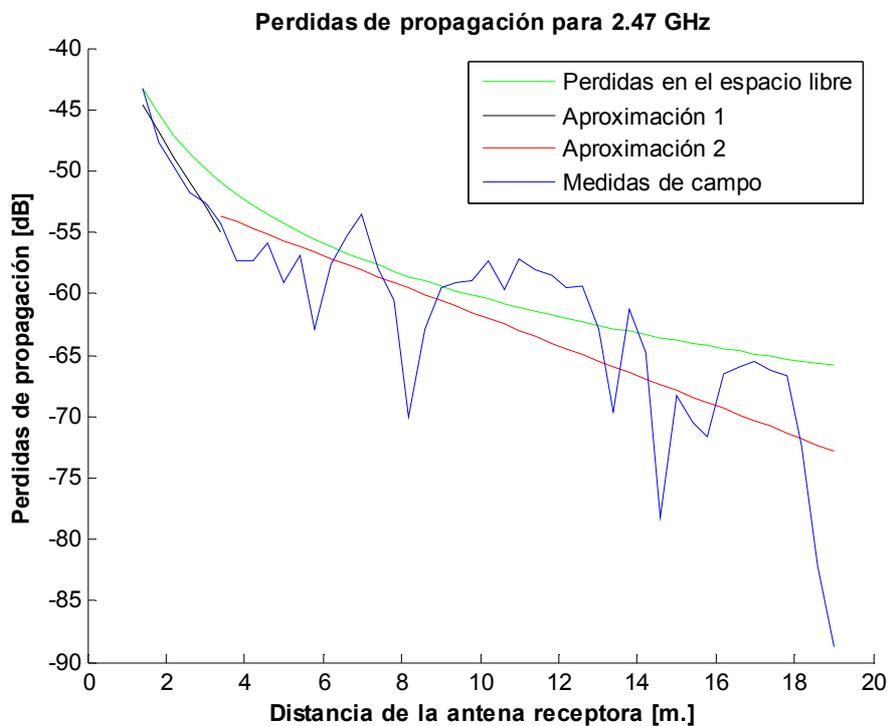


Figura 5-100: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 20 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 44.67 + (5.18) \times d; \sigma_1 = 1.45 & d \leq 3.5m \\ 53.68 + (1.22) \times (d - 3.5); \sigma_2 = 15.96 & d > 3.5m \end{cases}$$

Como sucedía en la anterior zona, las medidas las podemos aproximar en dos tramos, el primero tiene una longitud de unos 3 metros, al igual que en el interior del laboratorio 7, sin embargo, la pendiente es mas pronunciada. El segundo tramo también tiene una pendiente parecida a la de la zona uno. En el segundo tramo, como ya se intuía en la zona anterior. Tiene menores pérdidas que el primer tramo, pero un mayor *fading*.

Además, en comparación con las pérdidas obtenidas en el interior del laboratorio las pérdidas iniciales son mayores.

21. Escenario:

Distancia del enlace: 9 m

Entorno: Pasillo abierto

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.37 y 2.47 GHz

Posiciones en el pasillo: centrada

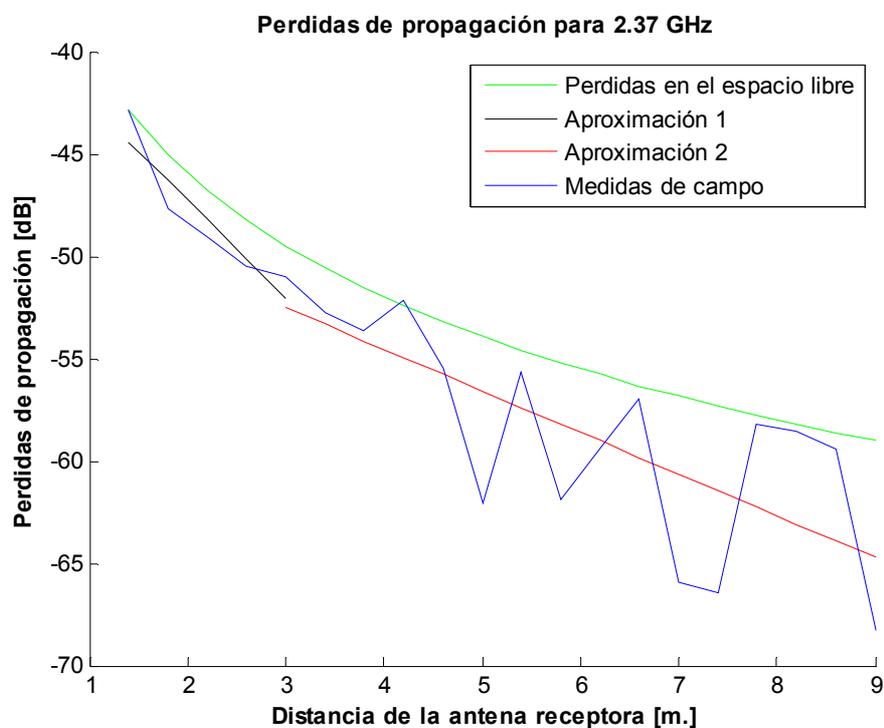


Figura 5-101: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 21 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 44.40 + (5.48) \times d; \sigma_1 = 1.54 & d \leq 3m \\ 52.51 + (2.03) \times (d - 3); \sigma_2 = 5.48 & d > 3m \end{cases}$$

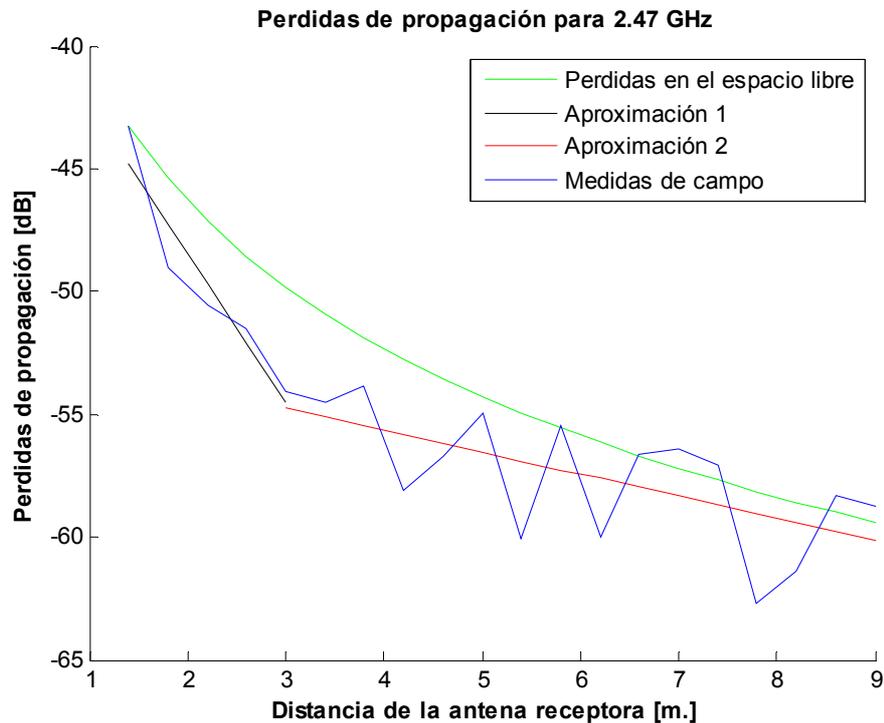


Figura 5-102: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 21 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 44.82 + (6.05) \times d; \sigma_1 = 1.76 & d \leq 3m \\ 54.70 + (0.91) \times (d - 3); \sigma_2 = 3.65 & d > 3.5m \end{cases}$$

En este corredor sin paredes, se destaca sobre todo como disminuye la desviación de la señal en comparación con el pasillo anterior, mas delimitado. Lo demás sigue siendo análogo a lo que hemos visto anteriormente.

5.1.3.2 Medidas para la banda de 3.3 GHz a 3.5 GHz

22. Escenario:

Distancia del enlace: 19 m

Entorno: Pasillo semicerrado

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 3.35 GHz

Posiciones en el pasillo: centrada

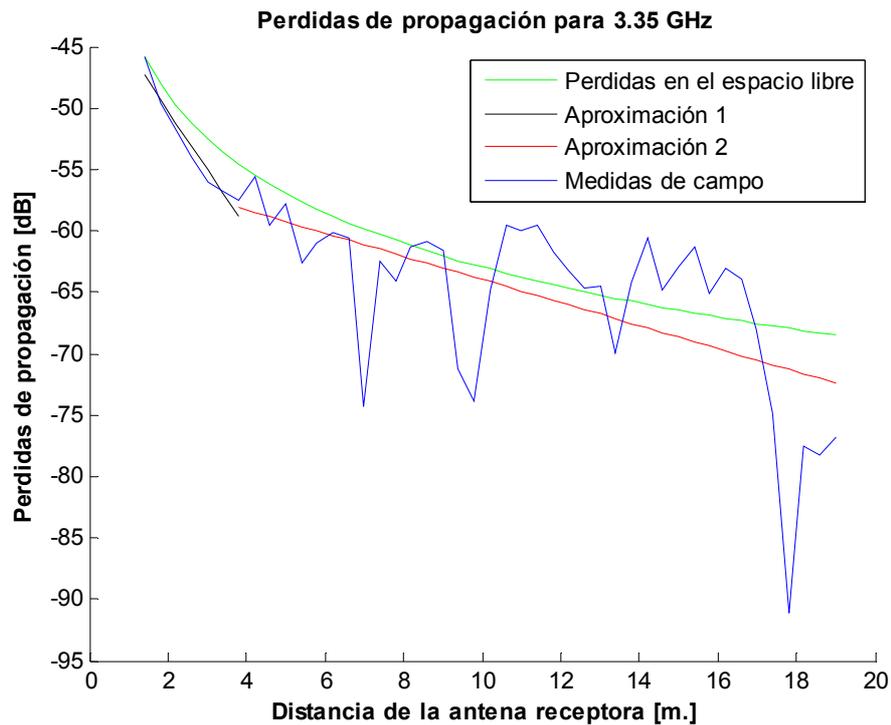


Figura 5-103: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 22 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 47.32 + (4.79) \times d; \sigma_1 = 1.46 & d \leq 4m \\ 58.91 + (0.94) \times (d - 4); \sigma_2 = 19.84 & d > 4m \end{cases}$$

En el caso, de la banda de uso exclusivo de WiMAX, tenemos una situación parecida a la que teníamos en la otra banda. En el segundo tramo el *fading* es cada vez mayor, y las pérdidas iniciales son mayores, unos 3 dB mas que en el interior del laboratorio.

23. Escenario:

Distancia del enlace: 9 m

Entorno: Pasillo abierto

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 3.35 GHz

Posiciones en el pasillo: centrada

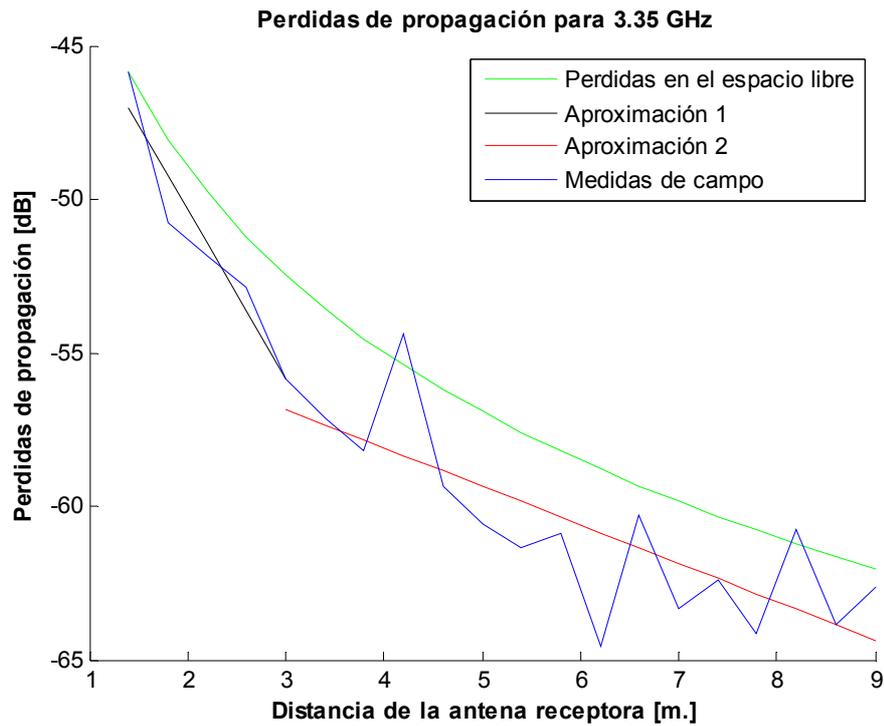


Figura 5-104: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 23 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 47.03 + (5.52) \times d; \sigma_1 = 1.54 & d \leq 3m \\ 56.84 + (1.25) \times (d - 3); \sigma_2 = 3.97 & d > 3m \end{cases}$$

En este segundo pasillo, la desviación en el segundo tramo disminuye. Las pérdidas iniciales son similares a las del caso anterior y al igual que sucedía en la banda de 2.3-2.5 GHz, la pendiente inicial es mas pronunciada que en el caso del primer pasillo, mas estrecho.

5.1.4 Tercera zona: Corredores cerrados

La tercera zona se encuentra en el edificio B de la EPS-UAM. Aquí vamos a estudiar pasillos cerrados de distinta anchura con las antenas de menor ganancia.

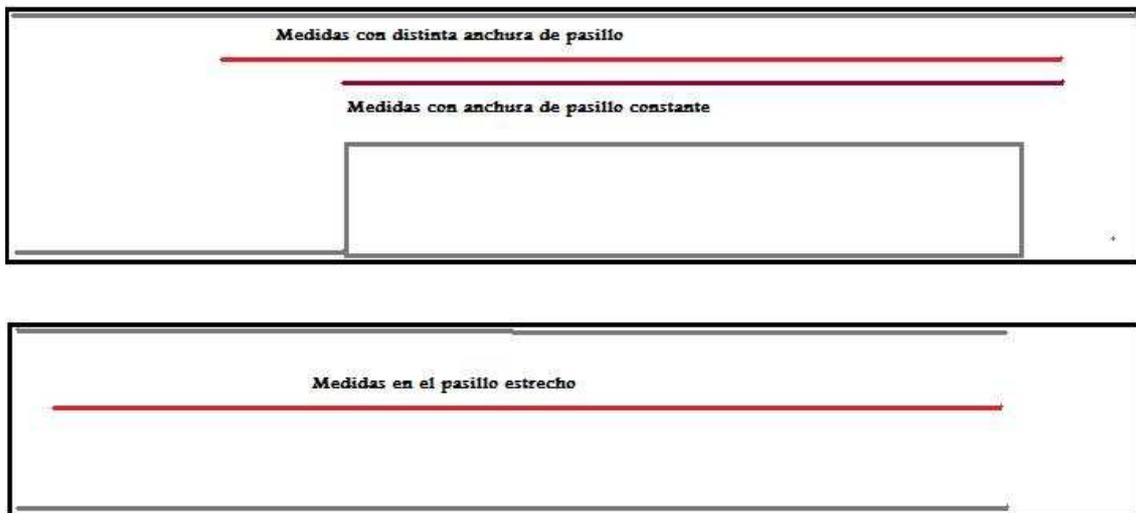


Figura 5-105: Esquema de las medidas tomadas en la tercera zona.

5.1.4.1 Medidas para la banda de 2.3 GHz a 2.5 GHz

24. Escenario:

Distancia del enlace: 14 m

Entorno: Pasillo cerrado (los primeros metros mas ancho 2 m de ancho)

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.37 y 2.47 GHz

Posición en el pasillo: centrada.

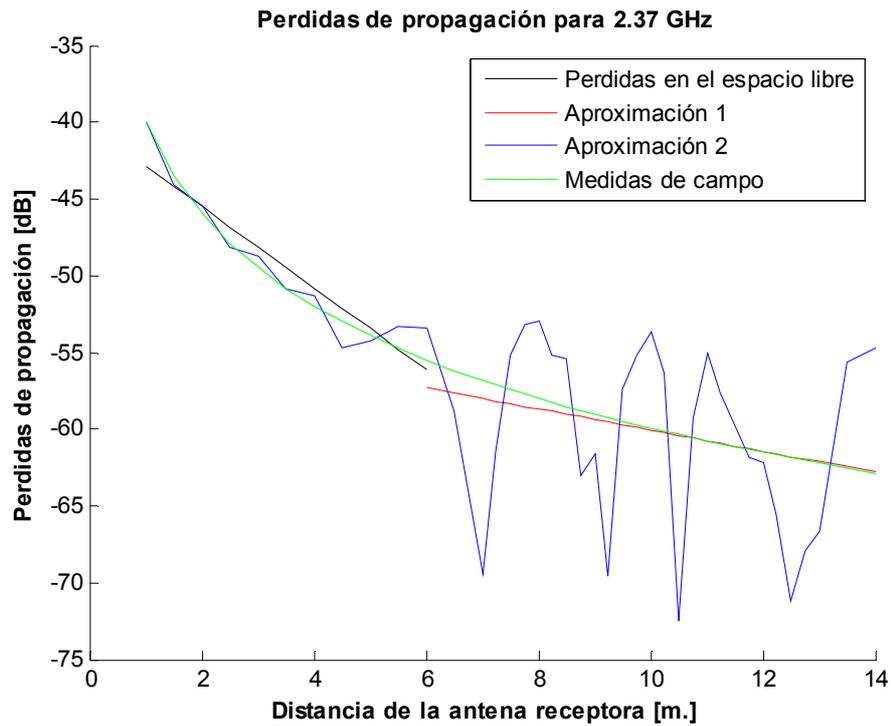


Figura 5-106: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 24 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 42.84 + (2.66) \times d; \sigma_1 = 2.91 & d \leq 6m \\ 57.30 + (0.69) \times (d - 6); \sigma_2 = 12.07 & d > 6m \end{cases}$$

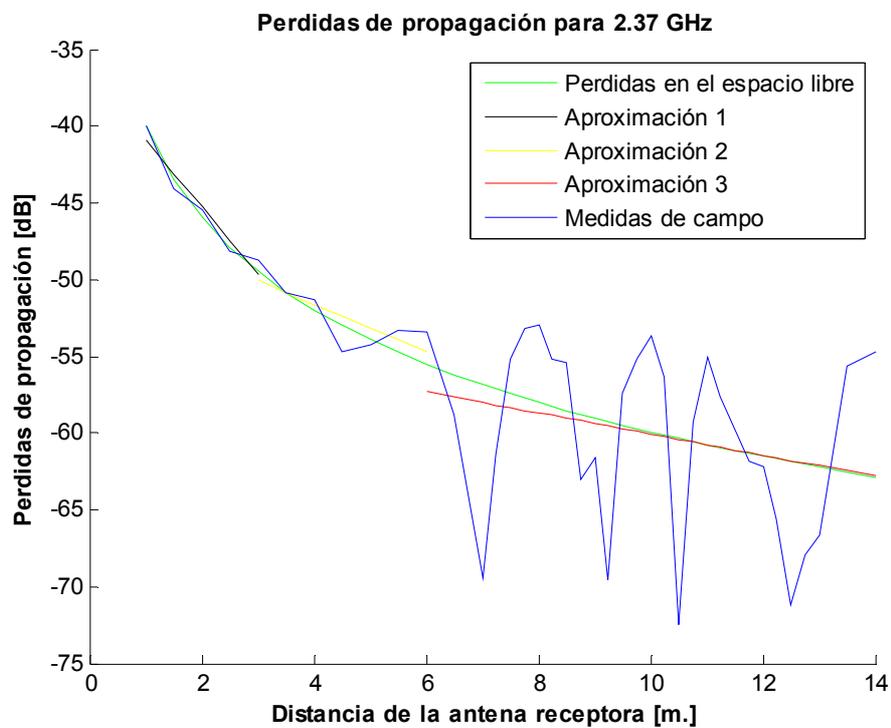


Figura 5-107: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 24 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal modificada.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.93 + (4.05) \times d; \sigma_1 = 0.99 & d \leq 3m \\ 50.07 + (1.54) \times (d - 3); \sigma_2 = 2.35 & 3m < d \leq 6m \\ 57.30 + (0.69) \times (d - 6); \sigma_3 = 12.07 & d > 6m \end{cases}$$

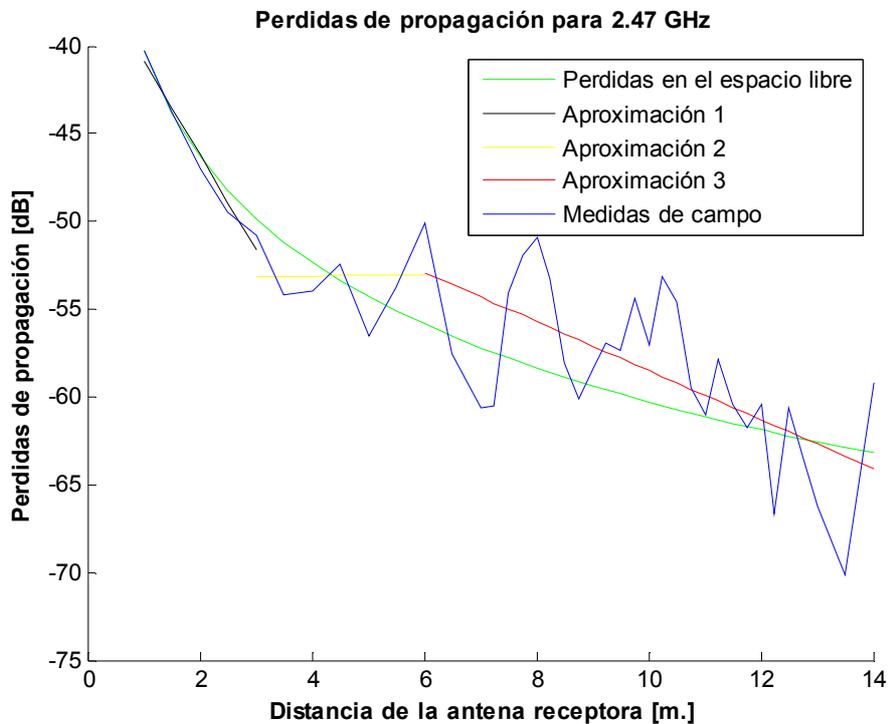


Figura 5-108: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 24 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal modificada.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 40.89 + (5.35) \times d; \sigma_1 = 0.79 & d \leq 3m \\ 53.15 + (-0.04) \times (d - 3); \sigma_2 = 3.43 & 3m < d \leq 6m \\ 52.90 + (1.39) \times (d - 6); \sigma_3 = 6.72 & d > 6m \end{cases}$$

En este caso, no estamos frente a un pasillo de anchura constante, a los 6 metros se estrecha, pasando de 4 a 2 metros. Como se puede observar tras el estudio de las figuras 139 y 140, la aproximación mas correcta es separar la función en 3 tramos. El primero es el que abarca los primeros 3 metros, y que como en otros casos tiene una mayor pendiente. El segundo, correspondería al efecto del primer pasillo y el último tramo al efecto del segundo pasillo.

25. Escenario:

Distancia del enlace: 12 m

Entorno: Pasillo cerrado (2 m de ancho desde el inicio)

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.37 y 2.47 GHz

Posiciones en el pasillo: centrada.

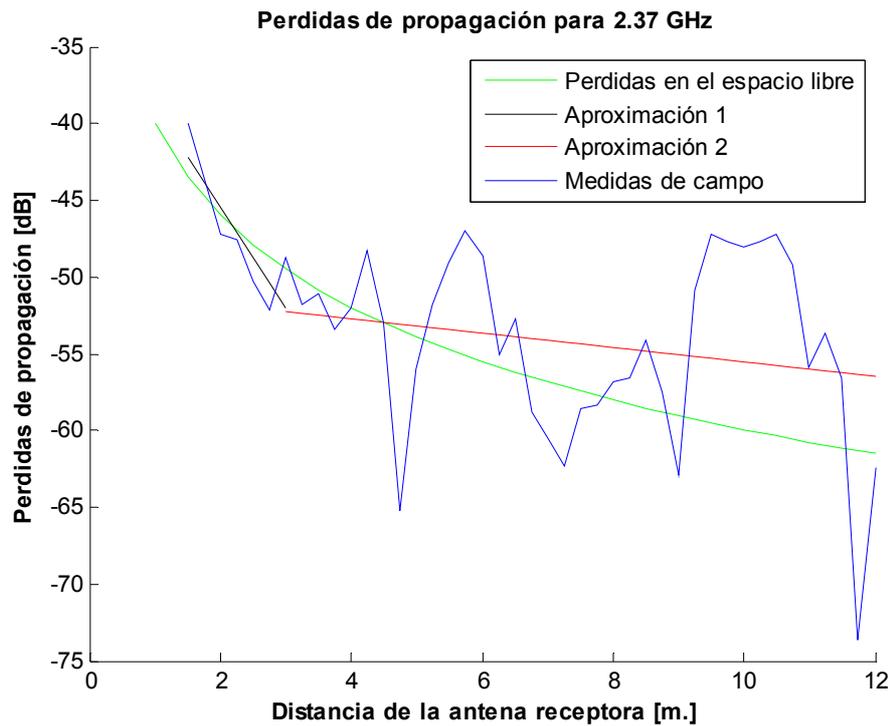


Figura 5-109: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 25 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(\text{dB}) = \begin{cases} 42.18 + (6.57) \times d; \sigma_1 = 3.30 & d \leq 3\text{m} \\ 52.21 + (0.47) \times (d - 3); \sigma_2 = 17.27 & d > 3\text{m} \end{cases}$$

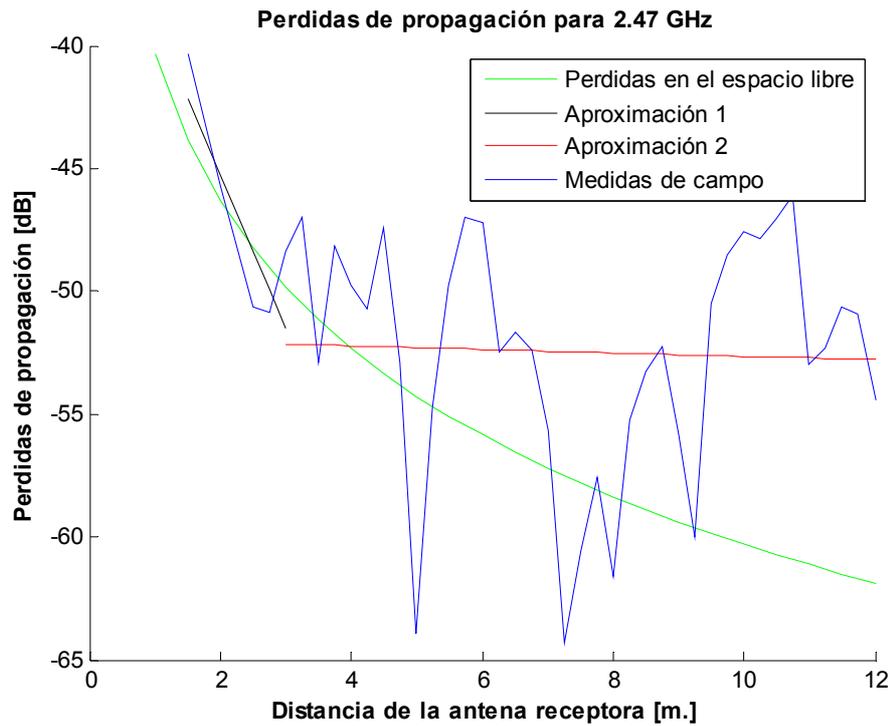


Figura 5-110: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 25 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 42.17 + (6.21) \times d; \sigma_1 = 3.09 & d \leq 3m \\ 52.15 + (0.07) \times (d - 3); \sigma_2 = 11.86 & d > 3m \end{cases}$$

En este escenario podemos observar muy claramente el efecto de guía de onda. En los escenarios estudiados en las zonas anteriores, se podían observar dos tramos, el primero de entre 2.5 a 4 metros, tenía una pendiente mas pronunciada que el segundo, en el que esta se suavizaba enormemente. En este caso, al estar en un pasillo largo y cerrado vemos como el pasillo realiza un efecto de guía de onda, teniendo una pendiente cercana a 0 y un *fading* considerable.

5.1.4.2 Medidas para la banda de 3.3 GHz a 3.5 GHz

26. Escenario:

Distancia del enlace: 18 m

Entorno: Pasillo cerrado (2 m de ancho al principio mas ancho)

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 3.35 GHz

Posiciones en el pasillo: centrada.

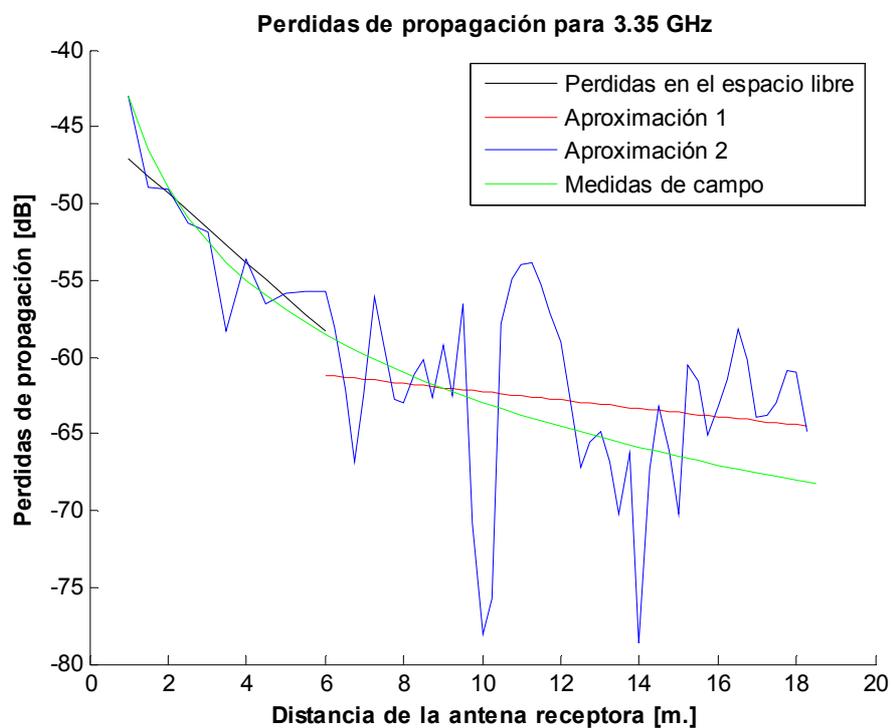


Figura 5-111: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 26 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(\text{dB}) = \begin{cases} 47.11 + (2.24) \times d; \sigma_1 = 5.56 & d \leq 6\text{m} \\ 61.18 + (0.27) \times (d - 6); \sigma_2 = 15.80 & d > 6\text{m} \end{cases}$$

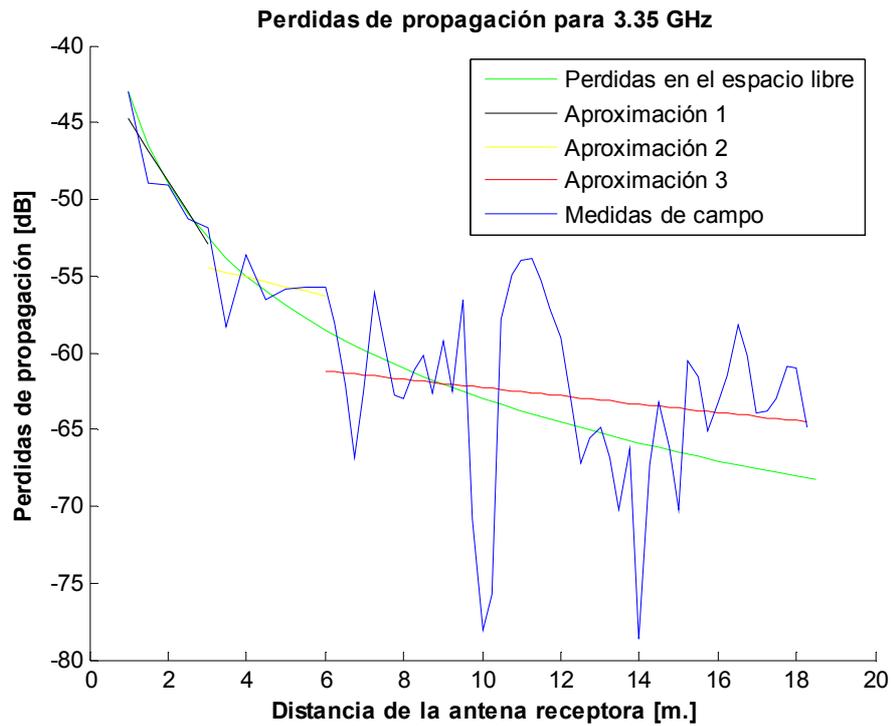


Figura 5-112: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 26 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal modificada.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 44.79 + (4.05) \times d; \sigma_1 = 2.13 & d \leq 3m \\ 54.44 + (0.61) \times (d - 3); \sigma_2 = 3.53 & 3m < d \leq 6m \\ 61.18 + (0.27) \times (d - 6); \sigma_3 = 15.80 & d > 6m \end{cases}$$

27. Escenario:

Distancia del enlace: 12 m

Entorno: Pasillo cerrado (2 m de ancho)

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 3.35 GHz

Posiciones en el pasillo: centrada.

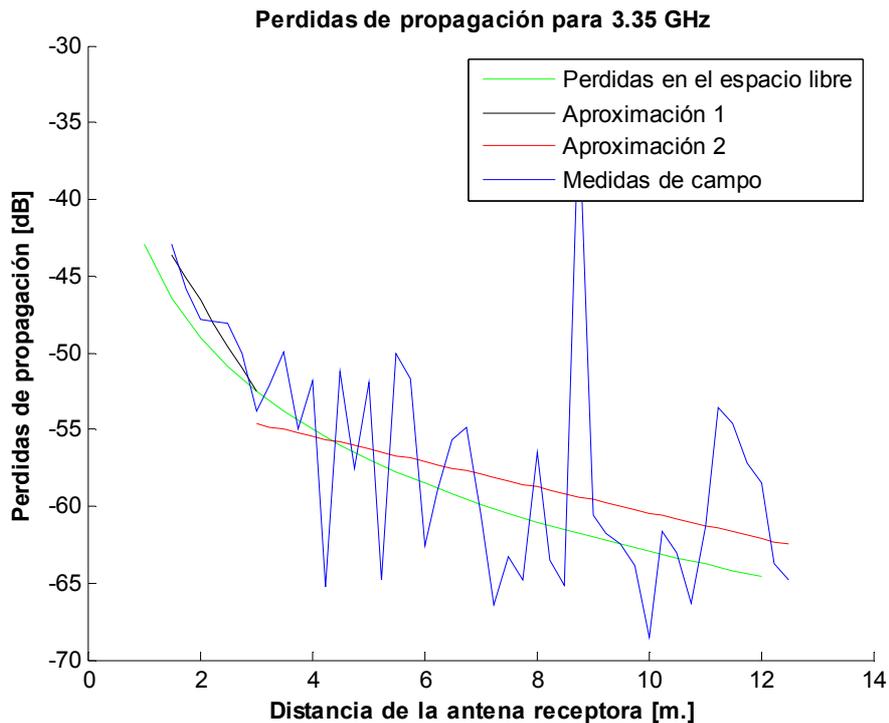


Figura 5-113: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 27 para la frecuencia de trabajo de 3.35GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 43.63 + (5.90) \times d; \sigma_1 = 1.44 & d \leq 3m \\ 54.60 + (0.83) \times (d - 3); \sigma_2 = 25.19 & d > 3m \end{cases}$$

Aunque en este escenario no es tan claro como en el de la banda de 2.3-2.5 GHz, también se puede observar como esta presente el efecto de guía de onda en el segundo tramo, es decir, poca pendiente y mucho *fading*.

28. Escenario:

Distancia del enlace: 18 m

Entorno: Pasillo cerrado(1.5m de ancho)

Ganancia de las antenas: 8.4 dB

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 2.37 y 2.47 GHz

Posiciones en el pasillo: centrada

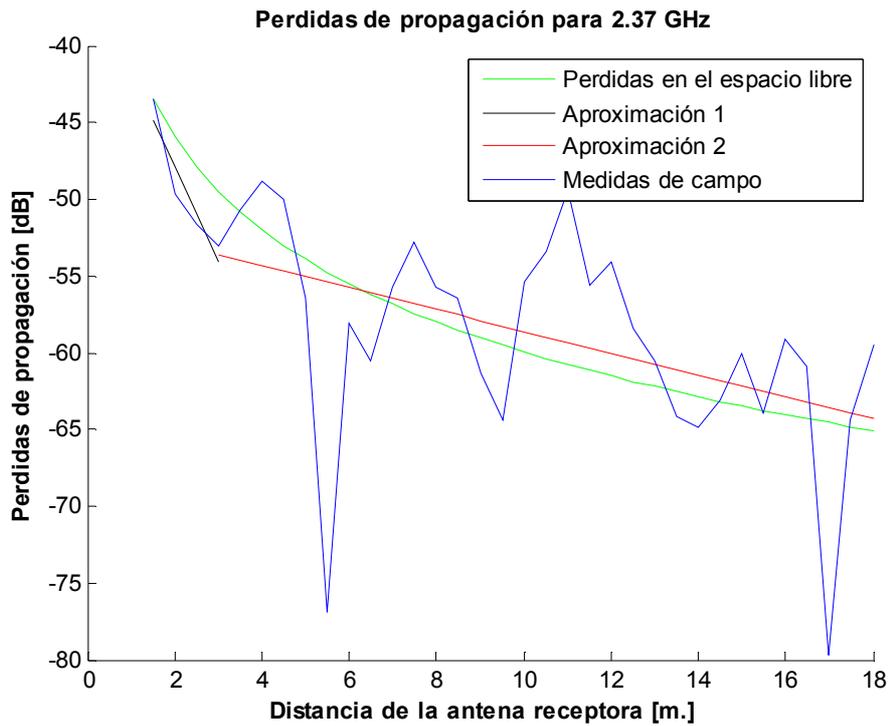


Figura 5-114: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 28 para la frecuencia de trabajo de 2.37GHz, con aproximación lineal.

$$Lp(dB) = \begin{cases} 44.83 + (6.16) \times d; \sigma_1 = 1.72 & d \leq 3m \\ 53.66 + (0.71) \times (d - 3); \sigma_2 = 21.51 & d > 3m \end{cases}$$

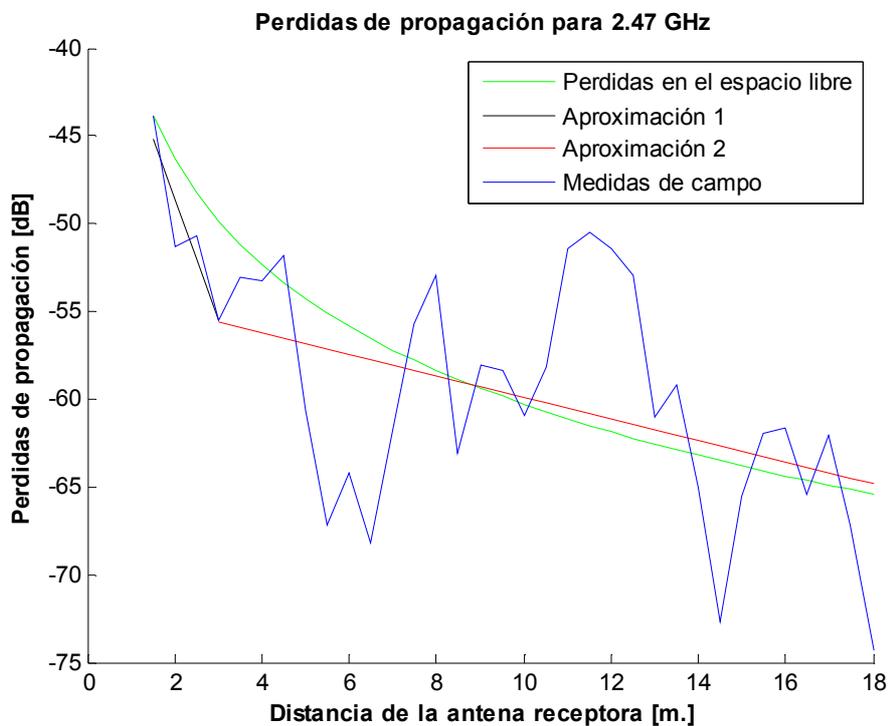


Figura 5-115: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 28 para la frecuencia de trabajo de 2.47GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 46.32 + (4.54) \times d; \sigma_1 = 2.68 & d \leq 3.5 \\ 55.88 + (0.61) \times (d - 3.5); \sigma_2 = 10.52 & d > 3.5 \end{cases}$$

En este pasillo, mas estrecho que el anterior, se puede observar como el efecto de guía de onda provoca que en el segundo tramo tengamos una pendiente poco pronunciada, que tiende a mejorar las pérdidas en el espacio libre.

29. Escenario:

Distancia del enlace: 18 m

Entorno: Pasillo cerrado(1.5m de ancho)

Ganancia de las antenas: Baja ganancia

Alturas de las antenas: 1.5 m

Frecuencias estudiadas: 3.37 y 3.47 GHz

Posiciones en el pasillo: centrada

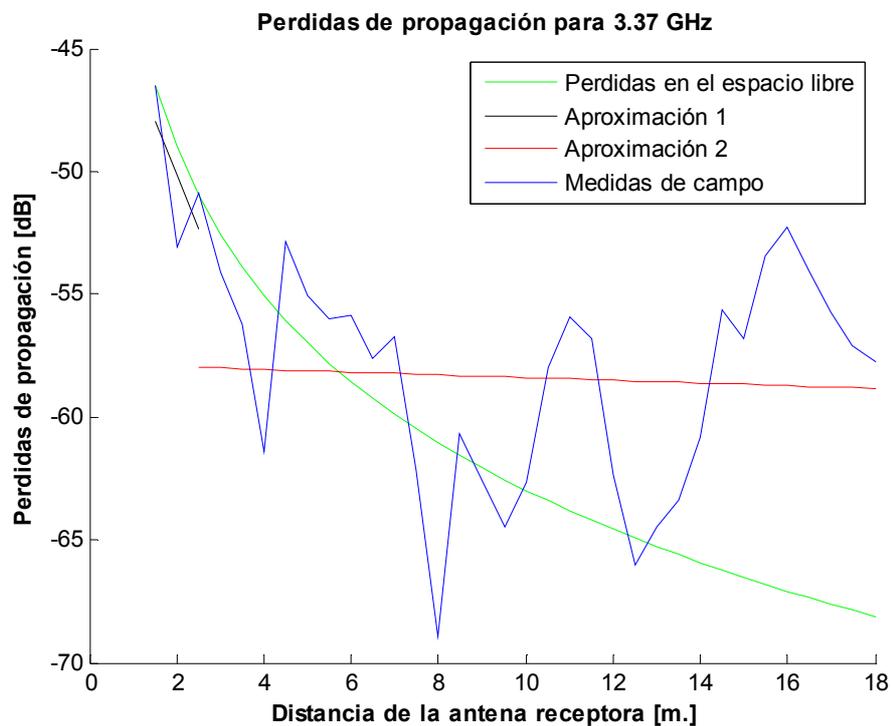


Figura 5-116: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 29 para la frecuencia de trabajo de 3.37GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 47.97 + (4.36) \times d; \sigma_1 = 2.90 & d \leq 2.5m \\ 57.97 + (0.05) \times (d - 2.5); \sigma_2 = 10.69 & d > 2.5m \end{cases}$$

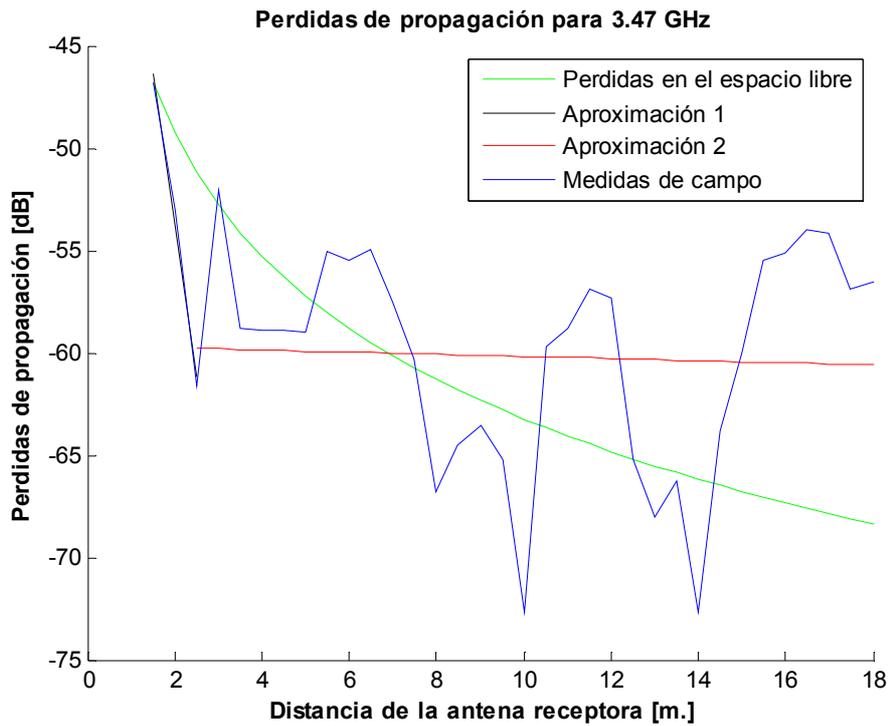


Figura 5-117: Medida de las pérdidas propagación para el escenario 29 para la frecuencia de trabajo de 3.47GHz, con aproximación lineal.

$$L_p(dB) = \begin{cases} 46.39 + (14.81) \times d; \sigma_1 = 0.76 & d \leq 2.5m \\ 59.78 + (0.05) \times (d - 2.5); \sigma_2 = 12.46 & d > 2.5m \end{cases}$$

En este escenario se observa de nuevo un efecto de guía de onda. En el segundo tramo podemos asumir una recta casi perfecta, unida a un efecto de *fading*. Esto esta provocado por el multitrayecto sufrido por la señal en ese pasillo.

5.2 Pérdidas de inserción

Como ya hemos comentado anteriormente, para completar el análisis de las pérdidas de propagación en entornos cerrados, hemos realizado algunas medidas de pérdidas de inserción para distintos materiales en las bandas con las que hemos trabajado. Se han estudiado distintos materiales:

- ✓ Material tipo 1: puerta
 - Puerta simple de despacho.
 - Puerta doble de entrada a los laboratorios.
 - Pared fina para la separación de estancias.

- ✓ Material tipo 2: pared
 - Pared fina para la separación de estancias.

- ✓ Material tipo 3: cristal
 - Cristal de superficie amplia.

- ✓ Material tipo 4: pizarras
 - Pizarras grandes de aula.

- ✓ Material tipo 5: Cuerpo humano
 - Personas de distinta complexión.

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 1: Banda 2.3-2.5 GHz

30. Escenario:

Entorno: Puerta doble

Ganancia de las antenas: 12.3 dB

Puntos estudiados: 8

Banda estudiada: 2.4-2.5 GHz

Polarizaciones: Vertical y horizontal

La primera puerta estudiada en el trabajo esta situada en la entrada del laboratorio B402 del edificio B de la escuela politécnica superior de la Universidad Autónoma de Madrid. Consta de una doble puerta, una Demi-fija, y otra móvil con picaporte. Se han realizado medidas en la puerta Demi-fija para dos posiciones distintas con respecto a la puerta móvil.

Posición 1, puerta cerrada:



Figura 5-118: Imagen de la puerta doble del laboratorio B 402 de la EPS-UAM. Primera posición de medida.

Posición 2, puerta abierta:

Figura 5-119: Imagen de la puerta doble del laboratorio B 402 de la EPS-UAM. Segunda posición de medida.

En cada uno de las dos posiciones se han adquirido ocho medidas en distintas posiciones del material objetivo. A continuación se presenta un esquema de la posición aproximada de los puntos estudiados.

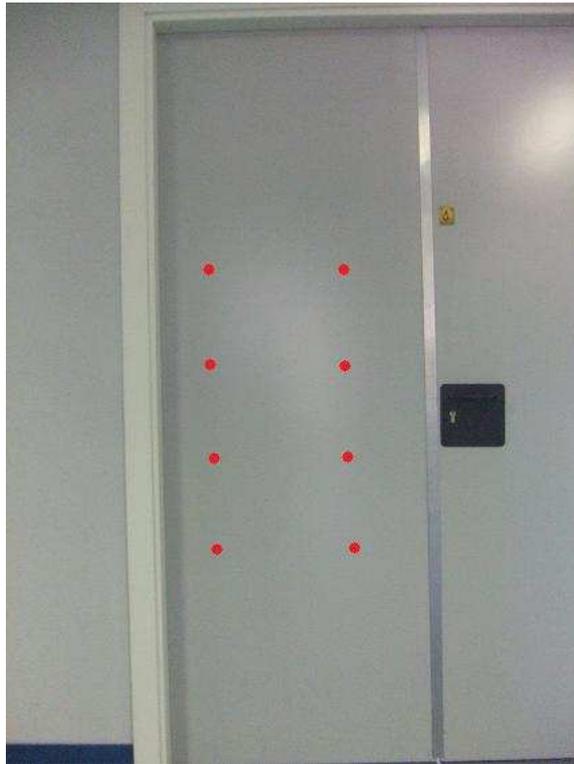


Figura 5-120: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para la puerta doble del laboratorio B 402.

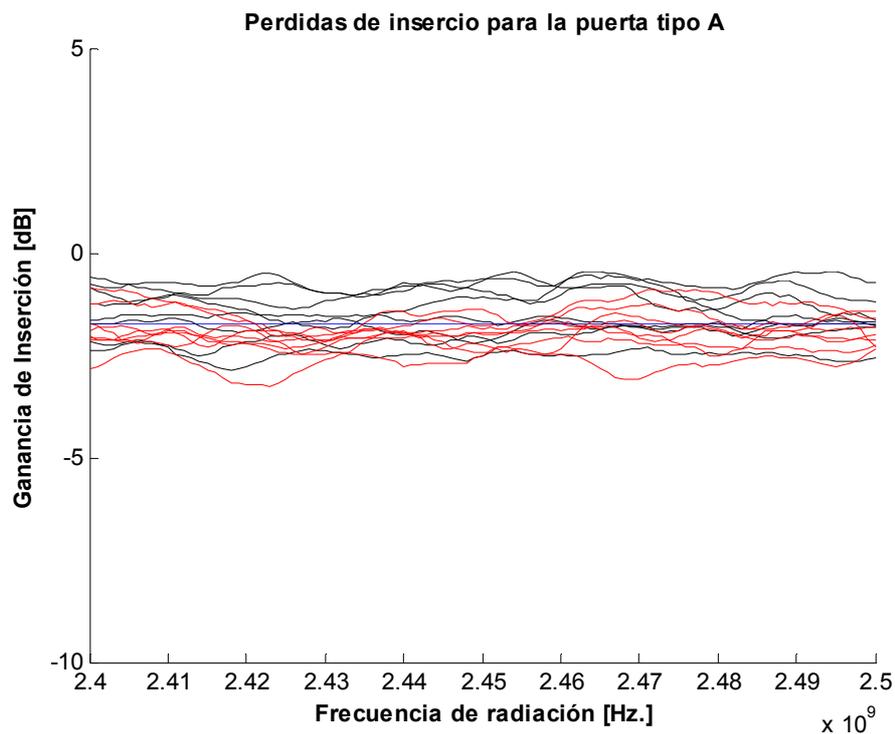


Figura 5-121: Perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz

En rojo se presentan las medidas obtenidas con la puerta móvil abierta y en azul con dicha puerta cerrada. También se han calculado los puntos máximo y mínimo de las pérdidas de inserción, las pérdidas de inserción medias y la desviación máxima.

Tabla 5-1: Sumario de pérdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz

Punto mínimo	-3.2593 dB
Punto máximo	-0.4478 dB
Media	-1.7414 dB
Desviación máxima	1.2937 dB

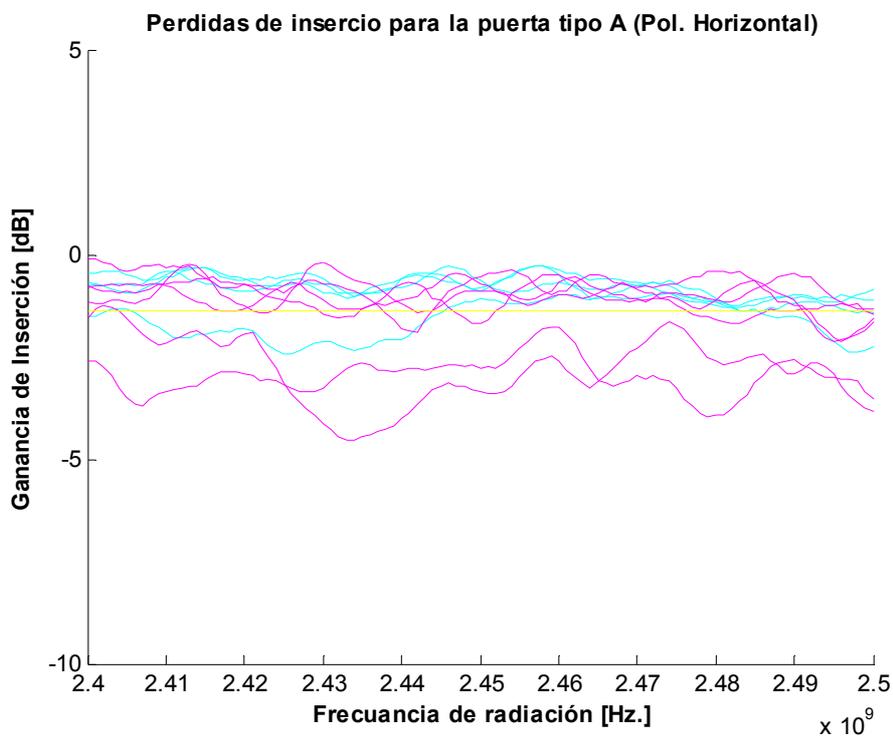


Figura 5-122: Perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz y polarización horizontal.

Tabla 5-2: : Sumario de pérdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz y polarización horizontal.

Punto mínimo	-4.5385 dB
Punto máximo	-0.1234 dB
Media	-1.3699 dB
Desviación máxima	1.2465 dB

31. Escenario:

Entorno: Puerta doble

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 20 puntos, 5 posiciones horizontales y 4 verticales

Banda estudiada: 2.4-2.5 GHz

Polarizaciones: Vertical y horizontal

En este escenario, hemos realizado medidas en toda la puerta doble, haciendo especial hincapié en zonas cercanas al marco de la puerta y discontinuidades metálicas en la superficie de la puerta.

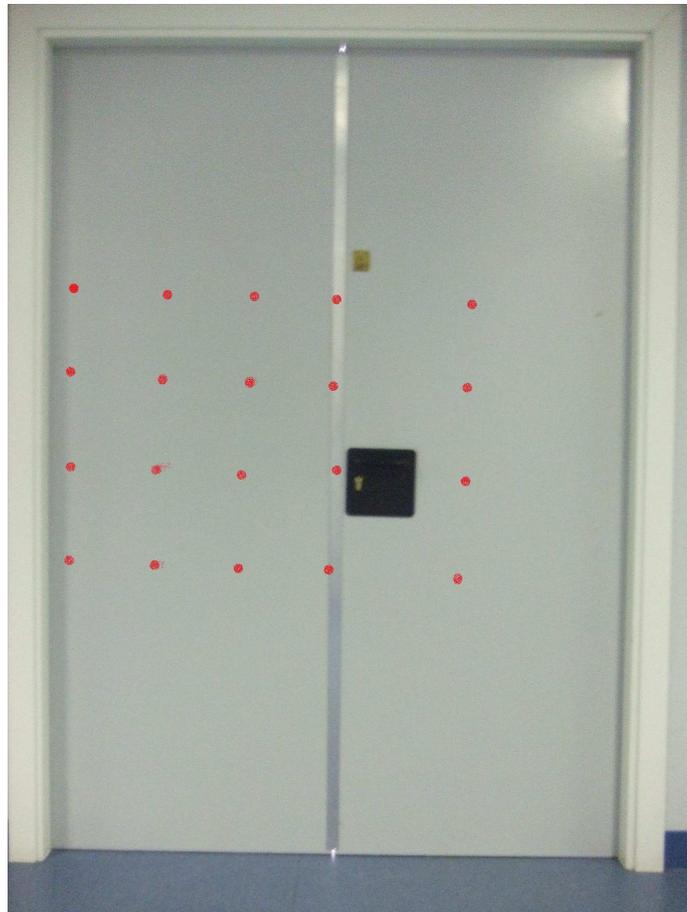


Figura 5-123: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para la puerta doble del laboratorio B 402.

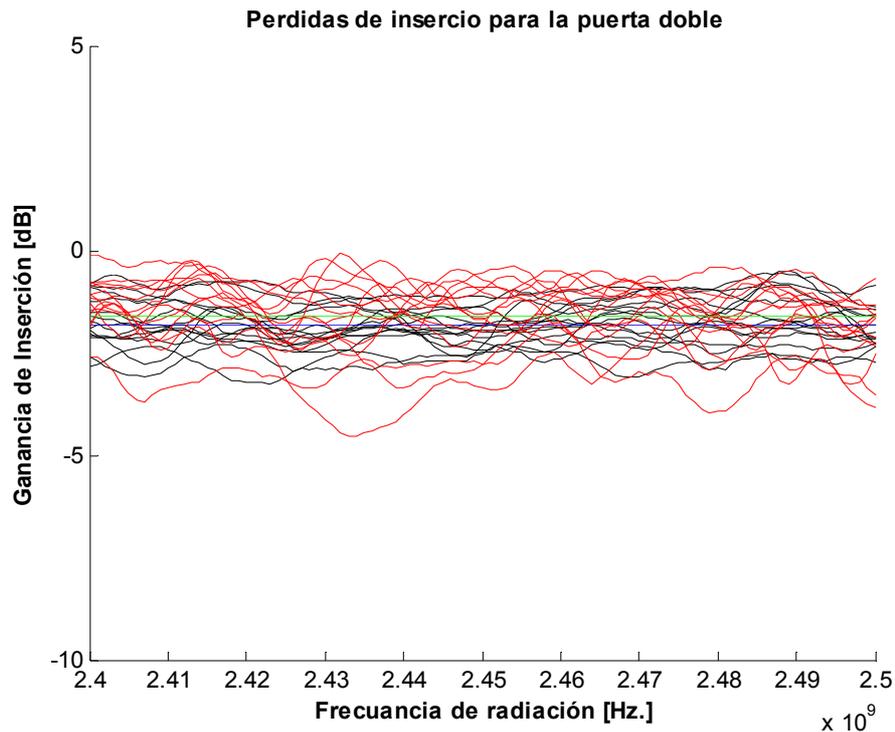


Figura 5-124: Perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización vertical y horizontal.

En rojo se muestran las medidas realizadas para la polarización horizontal y en negro las correspondientes a la vertical. En verde y en azul las respectivas medias.

Polarización vertical:

Tabla 5-3: Sumario de perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización vertical.

Punto mínimo	-3.2593 dB
Punto máximo	-0.5117 dB
Media	-1.8314 dB
Desviación máxima	1.4279 dB

Polarización horizontal:**Tabla 5-4:** Sumario de pérdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización horizontal.

Punto mínimo	-4.5385 dB
Punto máximo	-0.0787 dB
Media	-1.6112 dB
Desviación máxima	2.9273 dB

32. Escenario:

Entorno: Puerta sencilla

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 3 puntos, 1 posiciones horizontales y 3 verticales

Banda estudiada: 2.4-2.5 GHz

Por último, para terminar las medidas de materiales tipo A, hemos medido una puerta sencilla evitando bordes y otras imperfecciones para obtener un resultado mas aproximado a la realidad.

**Figura 5-125:** Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM.

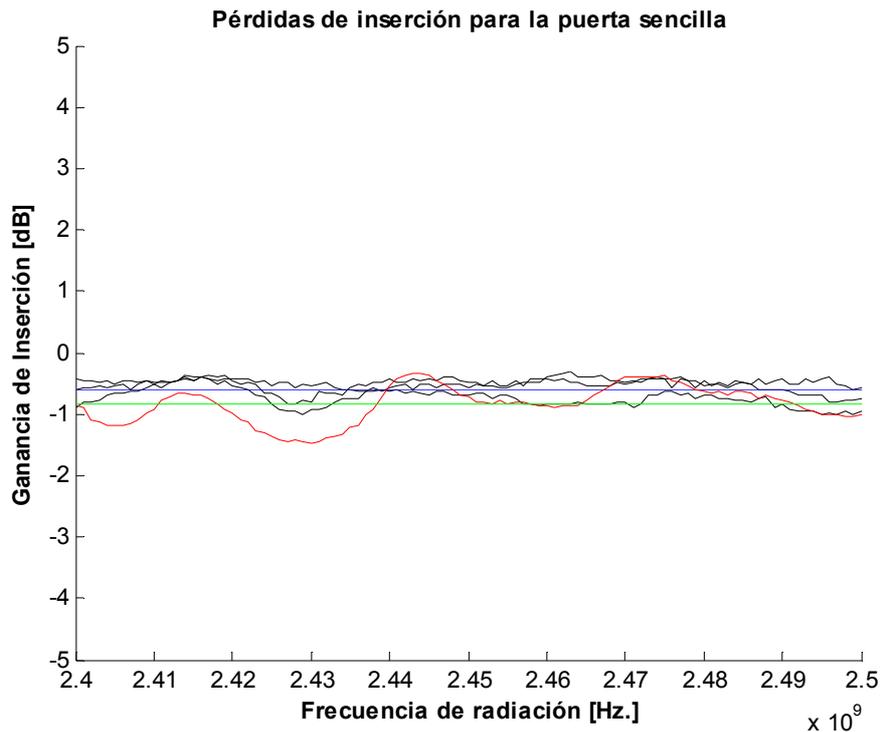


Figura 5-126: Perdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización vertical y horizontal.

En rojo se muestran las medidas realizadas para la polarización horizontal y en negro las correspondientes a la vertical. En verde y en azul las respectivas medias.

Polarización vertical:

Tabla 5-5: Sumario de perdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización vertical.

Punto mínimo	-1.0092 dB
Punto máximo	-0.2980 dB
Media	-0.5862 dB
Desviación máxima	0.4230 dB

Polarización horizontal:**Tabla 5-6: Sumario de pérdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz, con polarización horizontal.**

Punto mínimo	-1.4849 dB
Punto máximo	-0.3270 dB
Media	-0.8421 dB
Desviación máxima	0.6428 dB

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 1: Banda de 3.3-3.5 GHz

Para la banda de 3.4-3.5 GHz, hemos realizado las mismas medidas que para la anterior, y estos han sido los resultados:

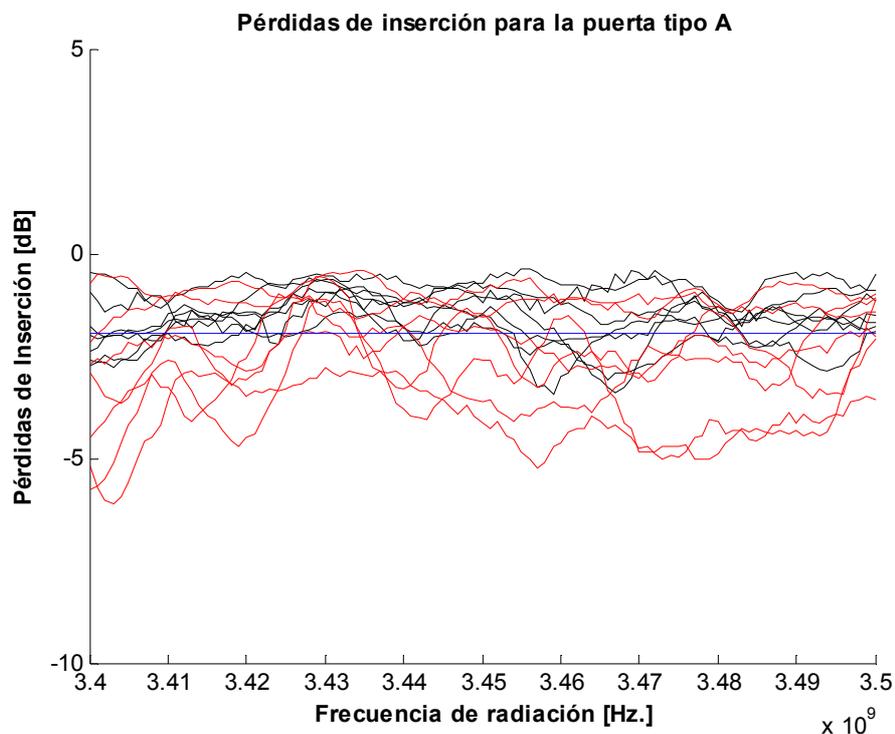
33. Escenario:

Entorno: Puerta doble

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 8 puntos, 2 posiciones horizontales y 4 verticales

Banda estudiada: 3.4-3.5 GHz.

**Figura 5-127: Perdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz. Solo una puerta**

En rojo se presentan las medidas obtenidas con la puerta móvil abierta y en azul con dicha puerta cerrada. También se han calculado los puntos máximo y mínimo de las pérdidas de inserción, las pérdidas de inserción medias y la desviación máxima.

Tabla 5-7: Sumario de pérdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz. Solo una puerta

Punto mínimo	-6.1122 dB
Punto máximo	-0.3868 dB
Media	-1.9720 dB
Desviación máxima	4.1401 dB

34. Escenario:

Entorno: Puerta doble

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 20 puntos, 5 posiciones horizontales y 4 verticales

Banda estudiada: 3.4-3.5 GHz.

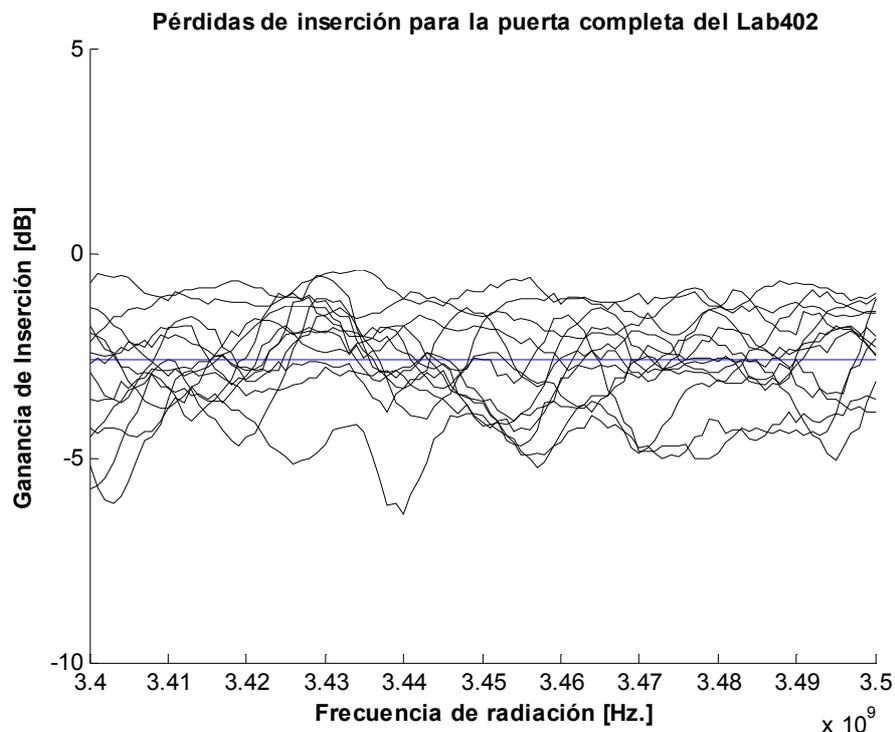


Figura 5-128: Pérdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz. Ambas puertas

Tabla 5-8: Sumario de pérdidas de inserción para la puerta del laboratorio B 402, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz. Ambas puertas

Punto mínimo	-6.3833 dB
Punto máximo	-0.4236 dB
Media	-2.6189 dB
Desviación máxima	3.7644 dB

35. Escenario:

Entorno: Puerta sencilla

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 3 puntos, 1 posiciones horizontales y 3 verticales

Banda estudiada: 3.4-3.5 GHz.

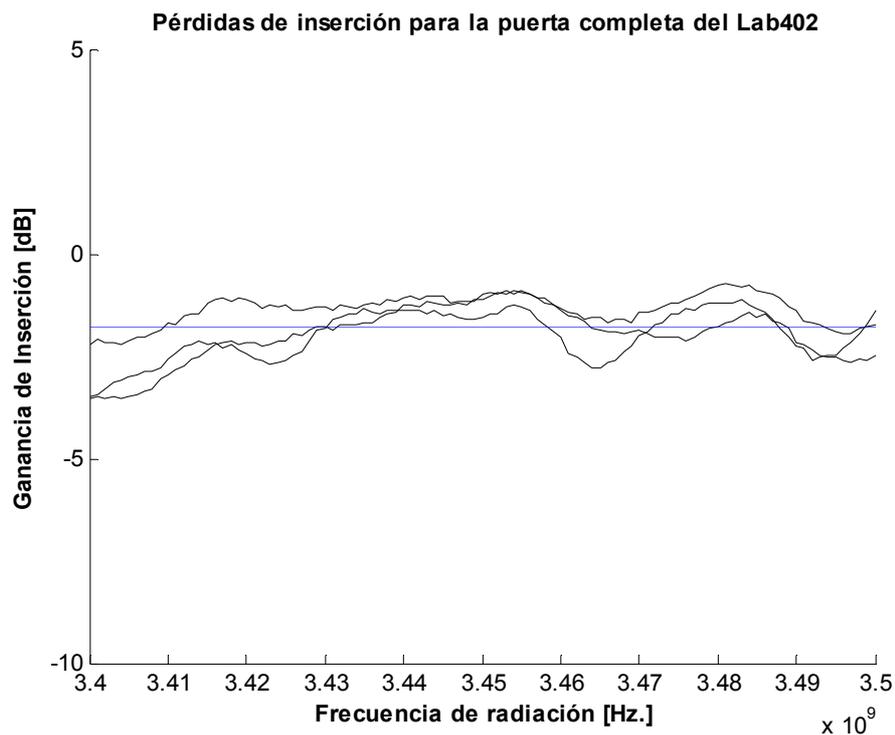


Figura 5-129: Pérdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Tabla 5-9: Sumario de pérdidas de inserción para una puerta de despacho del edificio B de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz

Punto mínimo	-3.5473 dB
Punto máximo	-0.7418 dB
Media	-1.7765 dB
Desviación máxima	1.7709 dB

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 2: Banda 2.3-2.5 GHz

36. Escenario:

Entorno: Pared fina

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 10 puntos, 2 posiciones horizontales y 5 verticales

Banda estudiada: 2.4-2.5 GHz

Polarizaciones: Vertical y horizontal

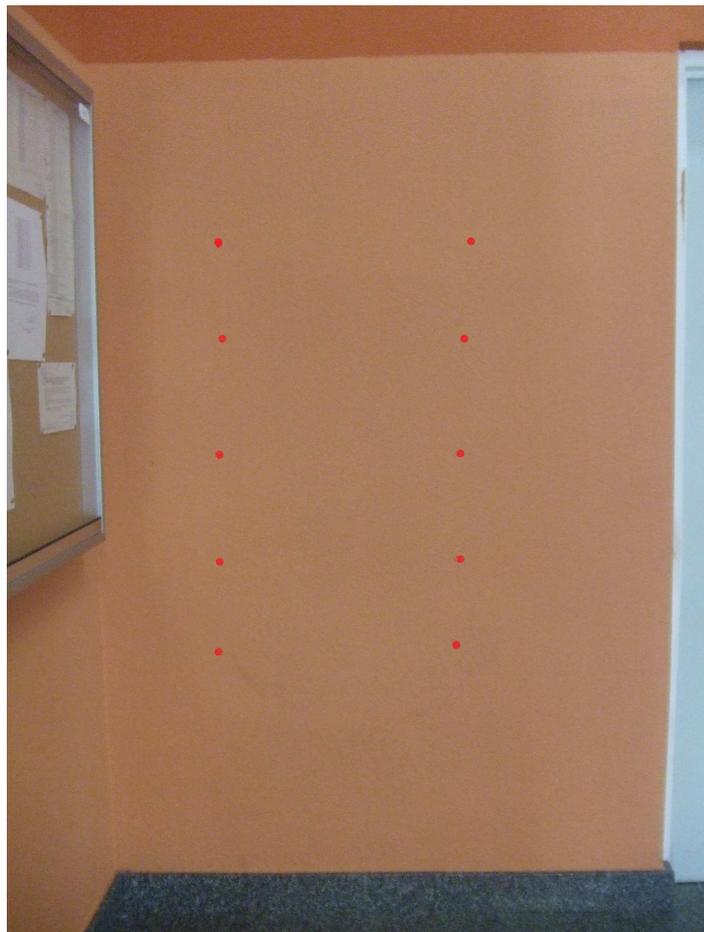


Figura 5-130: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para una pared interior de la EPS-UAM.

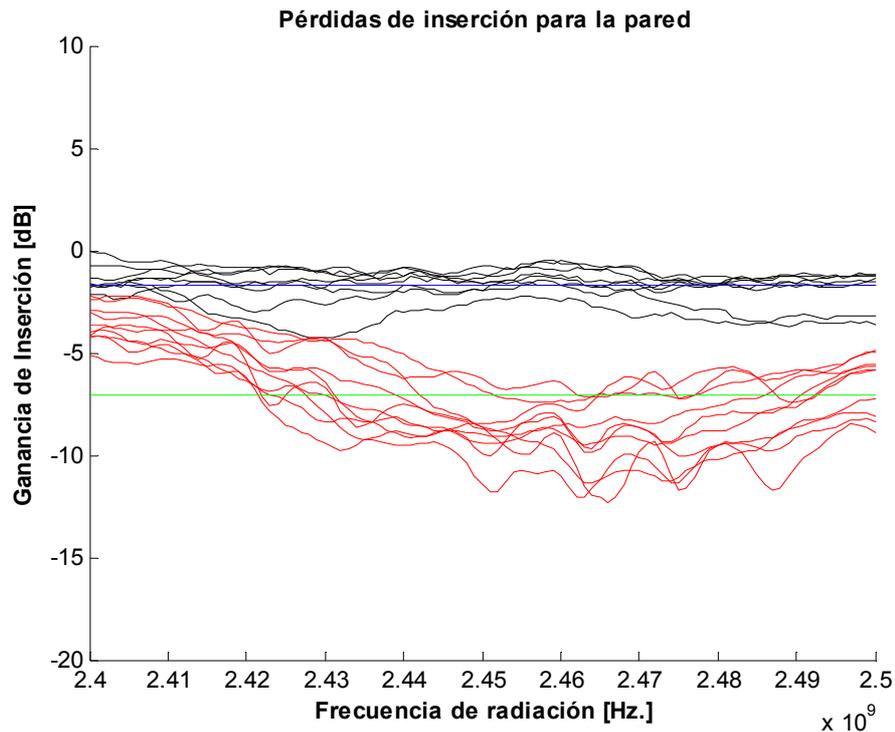


Figura 5-131: Pérdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones vertical y horizontal.

Polarización vertical:

Tabla 5-10: Sumario de pérdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones vertical.

Punto mínimo	-4.2783 dB
Punto máximo	-0.0331 dB
Media	-1.6943 dB
Desviación máxima	2.5840 dB

Polarización horizontal:

Tabla 5-11: Sumario de pérdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones horizontal.

Punto mínimo	-12.3597 dB
Punto máximo	-2.2127 dB
Media	-7.0923 dB
Desviación máxima	5.2674 dB

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 2: Banda 3.3-3.5 GHz

37. *Escenario:*

Entorno: Pared fina

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 10 puntos, 2 posiciones horizontales y 5 verticales

Banda estudiada: 3.4-3.5 GHz.

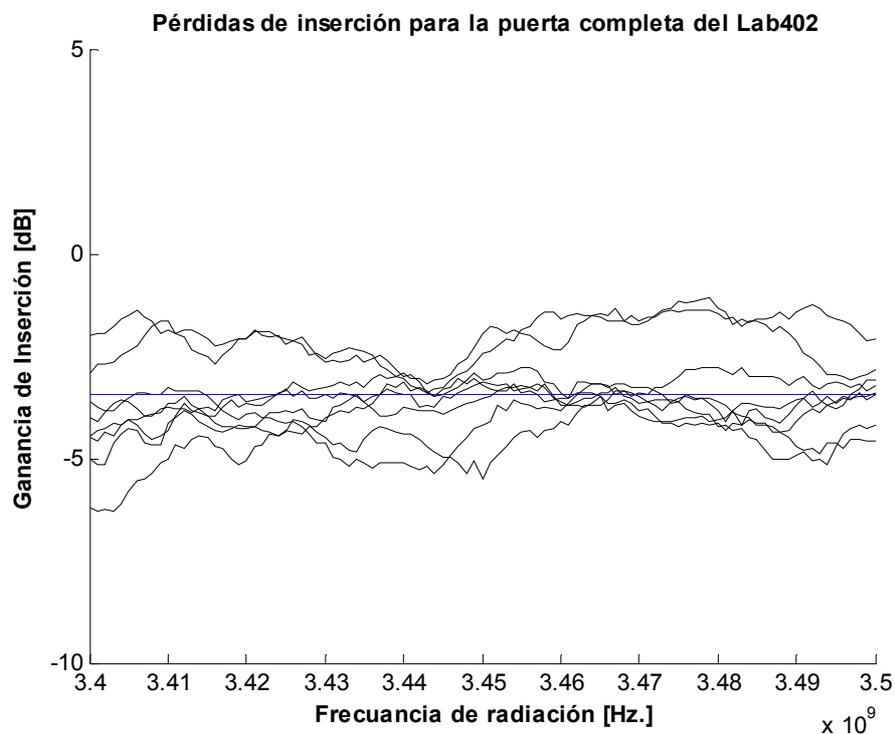


Figura 5-132: Perdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Tabla 5-12: Sumario de perdidas de inserción para una pared interior de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Punto mínimo	-6.3105 dB
Punto máximo	-1.0644 dB
Media	-3.4289 dB
Desviación máxima	2.8815 dB

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 3: Banda 2.3-2.5 GHz38. *Escenario:*

Entorno: Cristal

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 8 puntos, 2 posiciones horizontales y 4 verticales

Banda estudiada: 2.4-2.5 GHz

Polarizaciones: Vertical y horizontal.

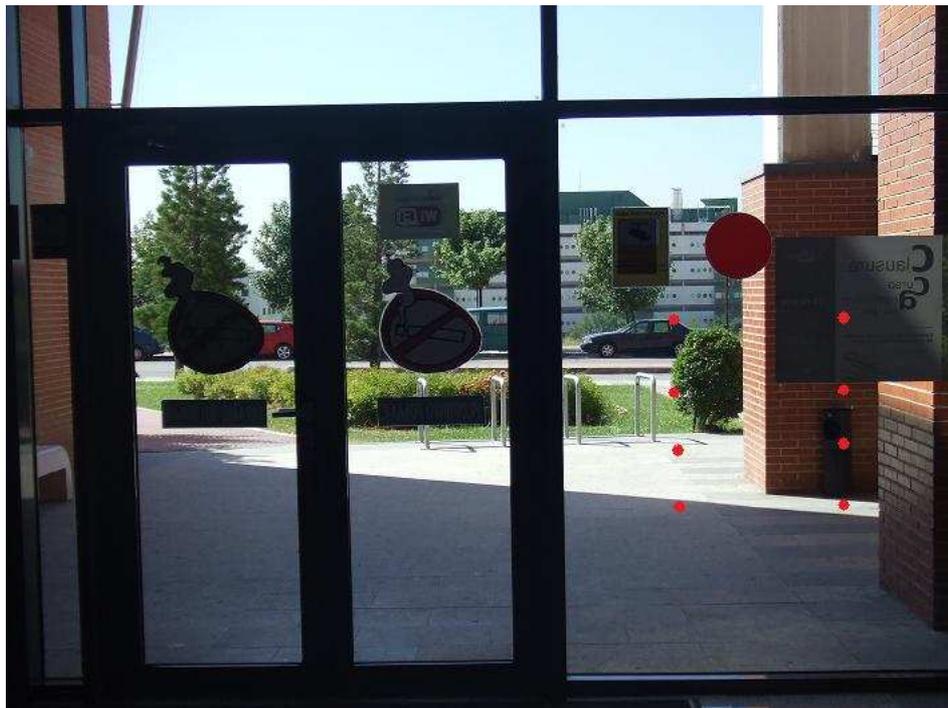


Figura 5-133: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para un cristal amplio en la entrada de la EPS-UAM.

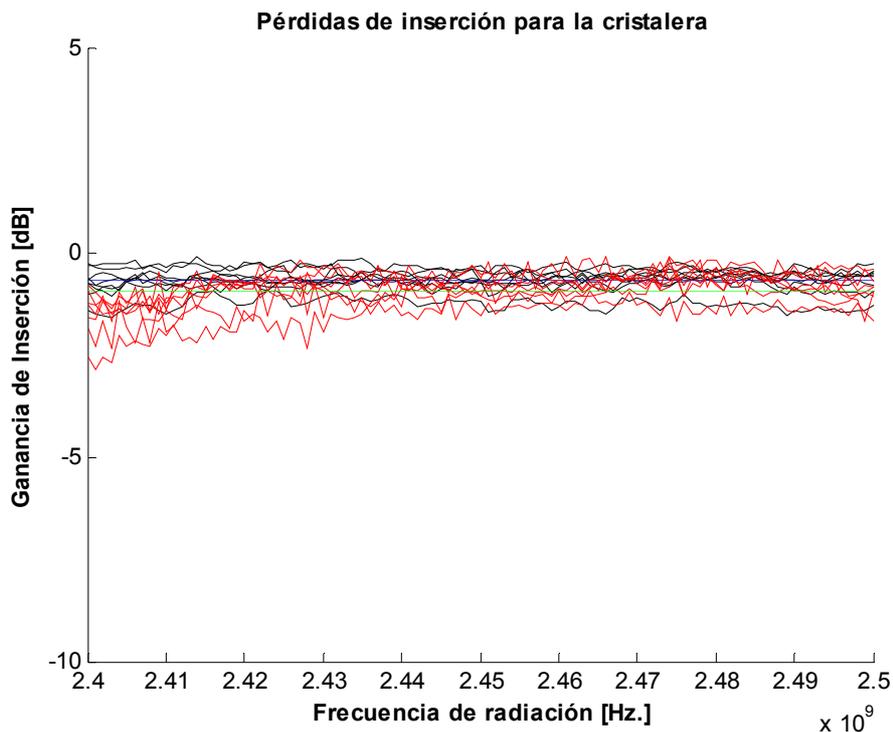


Figura 5-134: Pérdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones vertical y horizontal.

Polarización vertical:

Tabla 5-13: Sumario de pérdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones vertical.

Punto mínimo	-1.6047 dB
Punto máximo	-0.1219 dB
Media	-0.6912 dB
Desviación máxima	0.9135 dB

Polarización horizontal:

Tabla 5-14: Sumario de pérdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarizaciones horizontal.

Punto mínimo	-2.8925 dB
Punto máximo	-0.0909 dB
Media	-0.9497 dB
Desviación máxima	1.9428 dB

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 3: Banda 3.3-3.5 GHz*39. Escenario:*

Entorno: Cristal

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 10 puntos, 2 posiciones horizontales y 5 verticales

Banda estudiada: 3.4-3.5 GHz

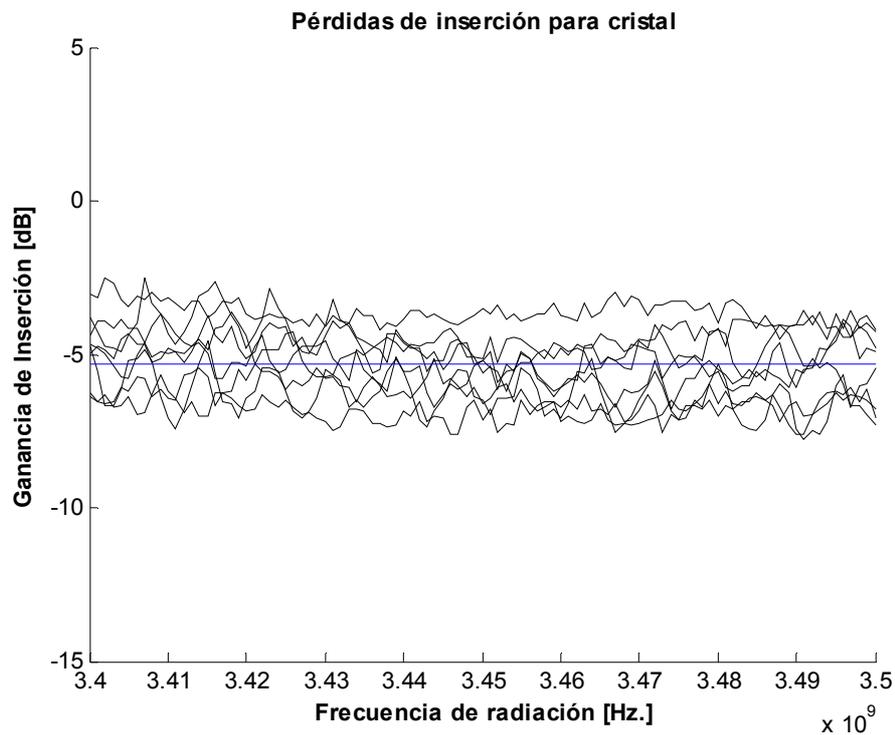


Figura 5-135: Perdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Tabla 5-15: Sumario de perdidas de inserción el cristal de la puerta principal de la EPS-UAM, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Punto mínimo	-7.7855 dB
Punto máximo	-2.5107 dB
Media	-5.3456 dB
Desviación máxima	2.8349 dB

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 4: Banda 2.3-2.5 GHz*40. Escenario:*

Entorno: Pizarras

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 9 puntos, 3 posiciones horizontales y 3 verticales

Banda estudiada: 2.4-2.5 GHz

Polarización: Vertical y Horizontal.

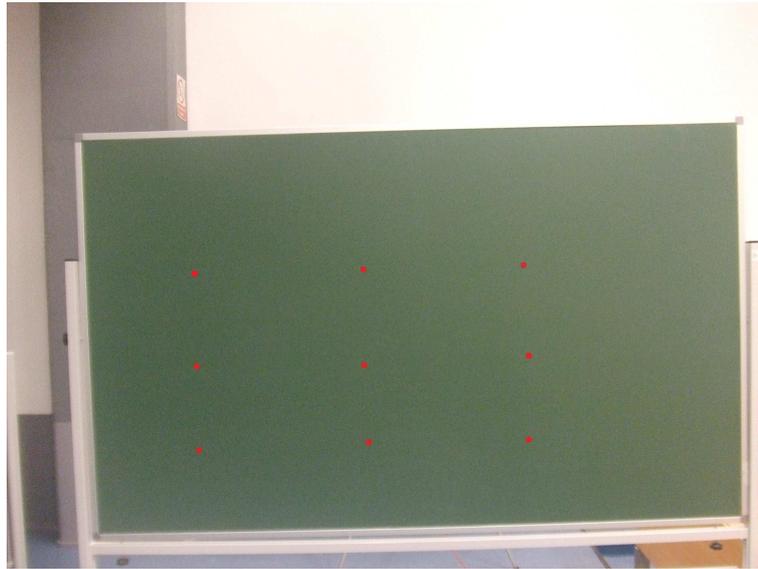


Figura 5-136: Imagen de los puntos aproximados donde se han realizado las medidas para las distintas pizarras estudiadas.

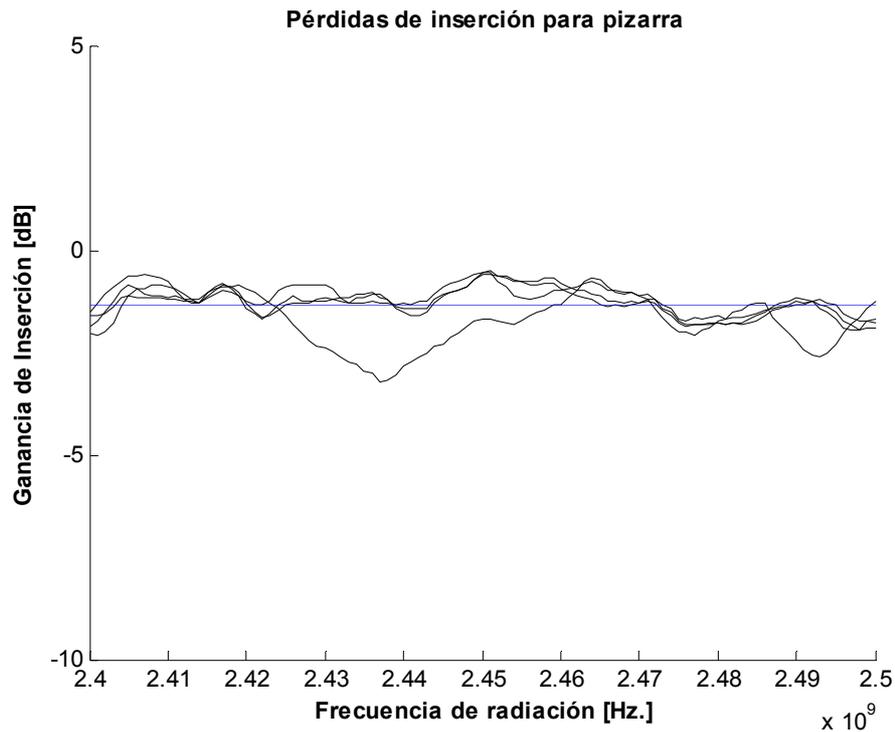


Figura 5-137: Perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.

Tabla 5-16: Sumario de perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz

Punto mínimo	-3.2295 dB
Punto máximo	-0.5119 dB
Media	-1.3584 dB
Desviación máxima	1.8711 dB

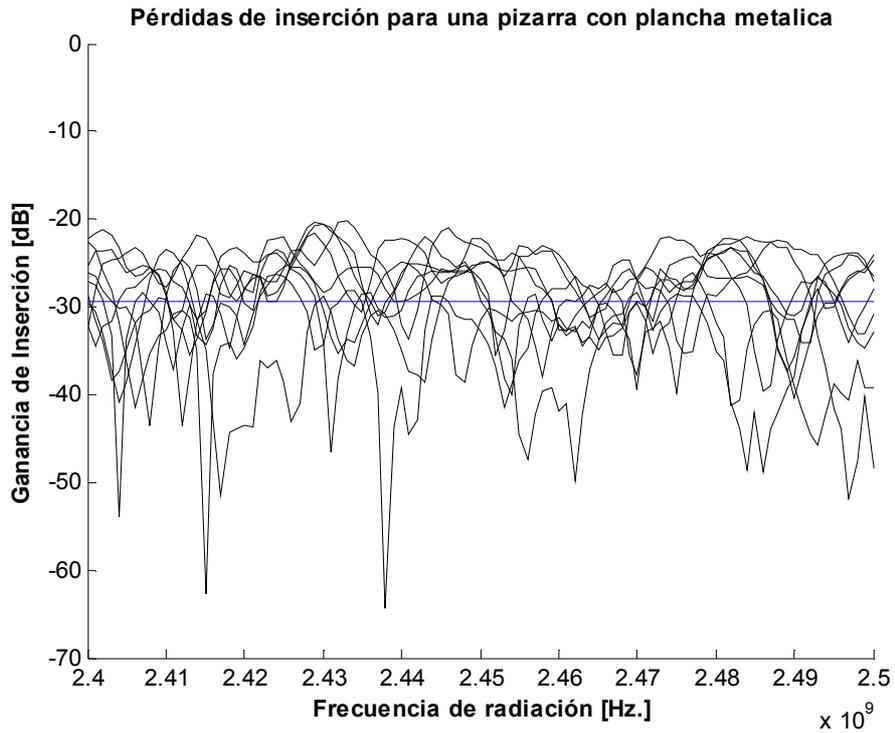


Figura 5-138: Perdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.

Tabla 5-17: Sumario de perdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.

Punto mínimo	-64.3592 dB
Punto máximo	-20.2163 dB
Media	-29.3747 dB
Desviación máxima	-1.2465 dB

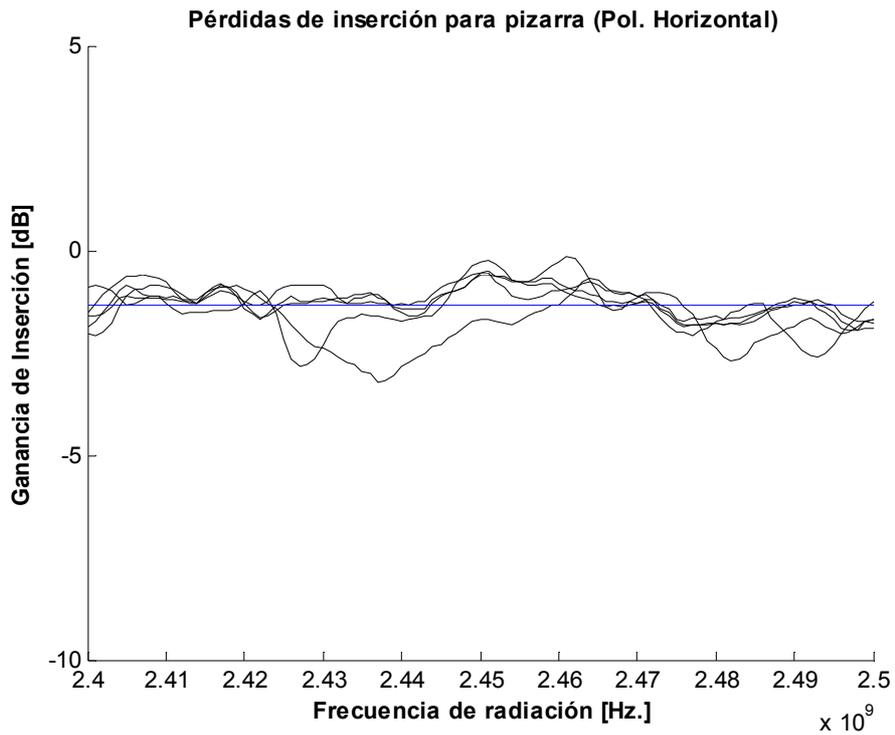


Figura 5-139: Perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarización horizontal

Tabla 5-18: Sumario de perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarización horizontal.

Punto mínimo	-3.2295 dB
Punto máximo	-0.1353 dB
Media	-1.3743 dB
Desviación máxima	1.8552 dB

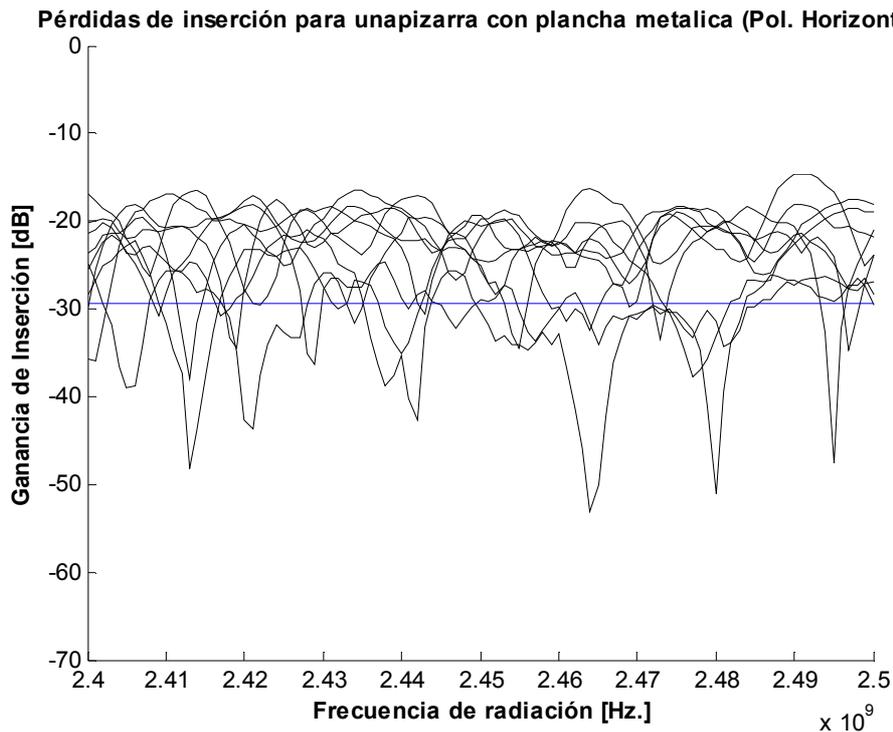


Figura 5-140: Perdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarización horizontal.

Tabla 5-19: Sumario de perdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz. Polarización horizontal.

Punto mínimo	-53.0397 dB
Punto máximo	-14.6096 dB
Media	-24.3397 dB
Desviación máxima	28.7000 dB

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 4: Banda 3.3-3.5 GHz

41. Escenario:

Entorno: Pizarras

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 9 puntos, 3 posiciones horizontales y 3 verticales

Banda estudiada: 3.4-3.5 GHz

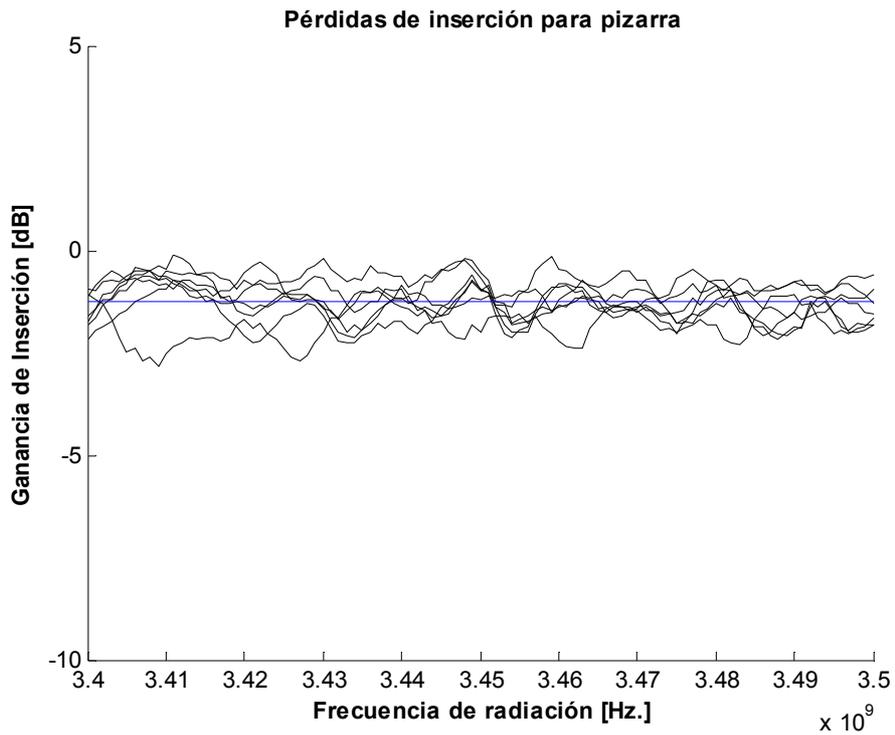


Figura 5-141: Perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Tabla 5-20: Sumario de perdidas de inserción para una pizarra grande, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz

Punto mínimo	-2.8206 dB
Punto máximo	-0.1079 dB
Media	-1.2680 dB
Desviación máxima	1.5525 dB

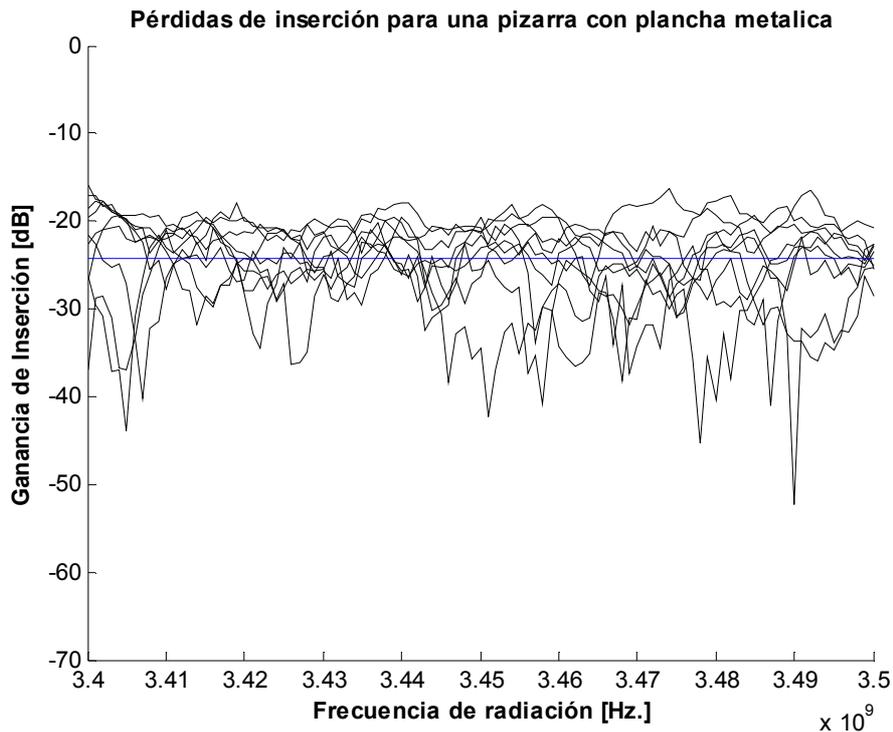


Figura 5-142: Pérdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Tabla 5-21 Sumario de pérdidas de inserción para una pizarra grande con plancha metálica, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz

Punto mínimo	-52.3001 dB
Punto máximo	-15.7651 dB
Media	-24.3437 dB
Desviación máxima	27.9563 dB

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 5: Banda 2.3-2.5 GHz

42. Escenario:

Entorno: Personas

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 2 puntos, posiciones frontal y lateral

Banda estudiada: 2.4-2.5 GHz

Para caracterizar las pérdidas que puede causar el cuerpo humano, hemos tomado diversas medidas con distintas personas que difieren en complejión y sexo.

Sujeto 1:



Figura 5-143: Imagen del sujeto 1 analizado

Sujeto 2:

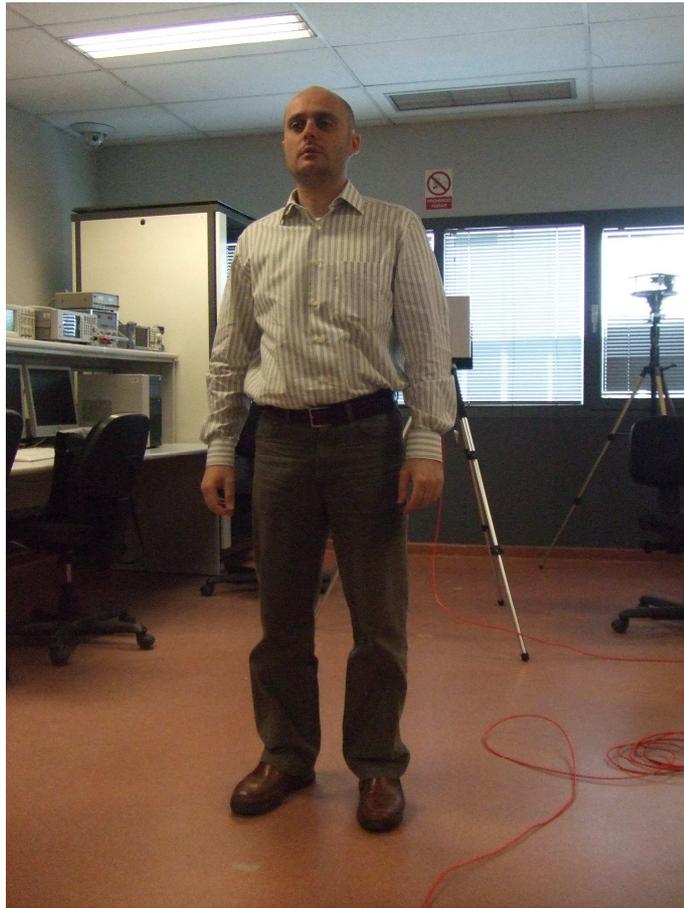


Figura 5-144: Imagen del sujeto 2 analizado.

Sujeto 3:



Figura 5-145: Imagen del sujeto 3 analizado.

Sujeto 4:



Figura 5-146: Imagen del sujeto 4 analizado.

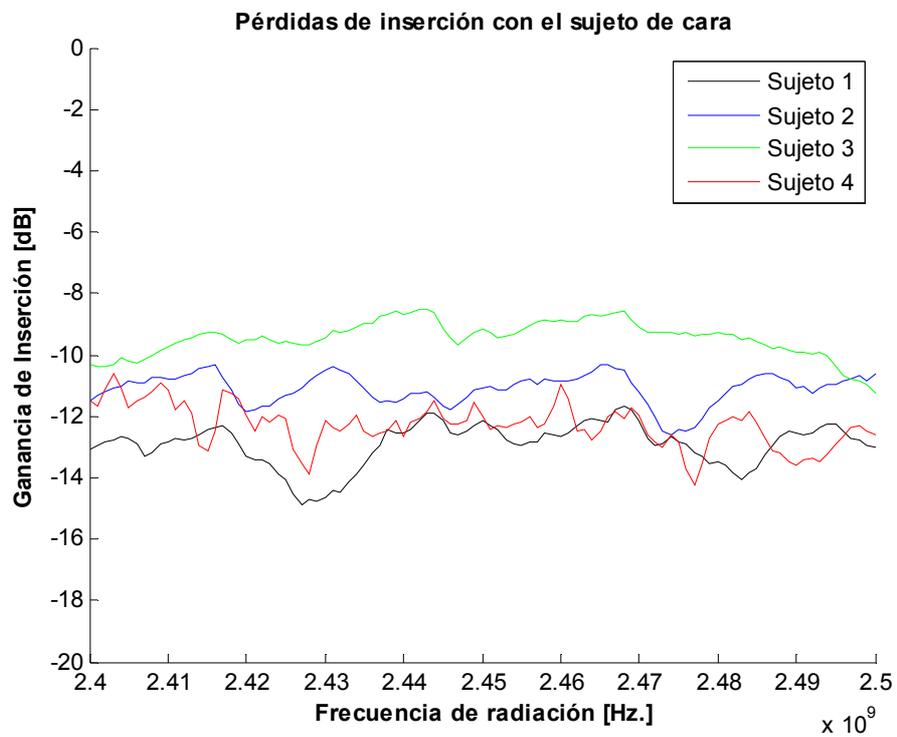


Figura 5-147: Pérdidas de inserción producidas por personas, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.

Tabla 5-22: Sumario de pérdidas de inserción producidas por personas, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz,

Punto mínimo	-14.8829 dB
Punto máximo	-8.5622 dB
Media	-11.4392 dB
Desviación máxima	3.4438 dB

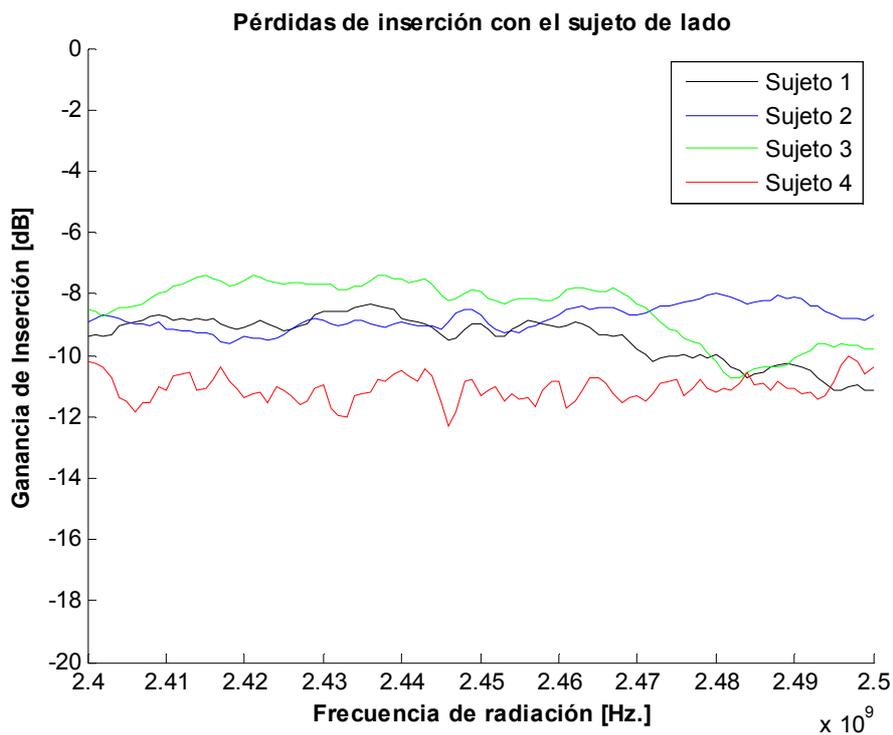


Figura 5-148: Perdidas de inserción producidas por personas de lado, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.

Tabla 5-23: Sumario de pérdidas de inserción producidas por personas de lado, con banda de trabajo 2.4-2.5 GHz.

Punto mínimo	-12.3130 dB
Punto máximo	-7.3980 dB
Media	-9.4399 dB
Desviación máxima	2.8731 dB

Perdidas de inserción introducidas por materiales de tipo 5: Banda 3.3-3.5 GHz

43. Escenario:

Entorno: Personas

Ganancia de las antenas: Alta ganancia

Puntos estudiados: 2 puntos, posiciones frontal y lateral

Banda estudiada: 3.4-3.5 GHz

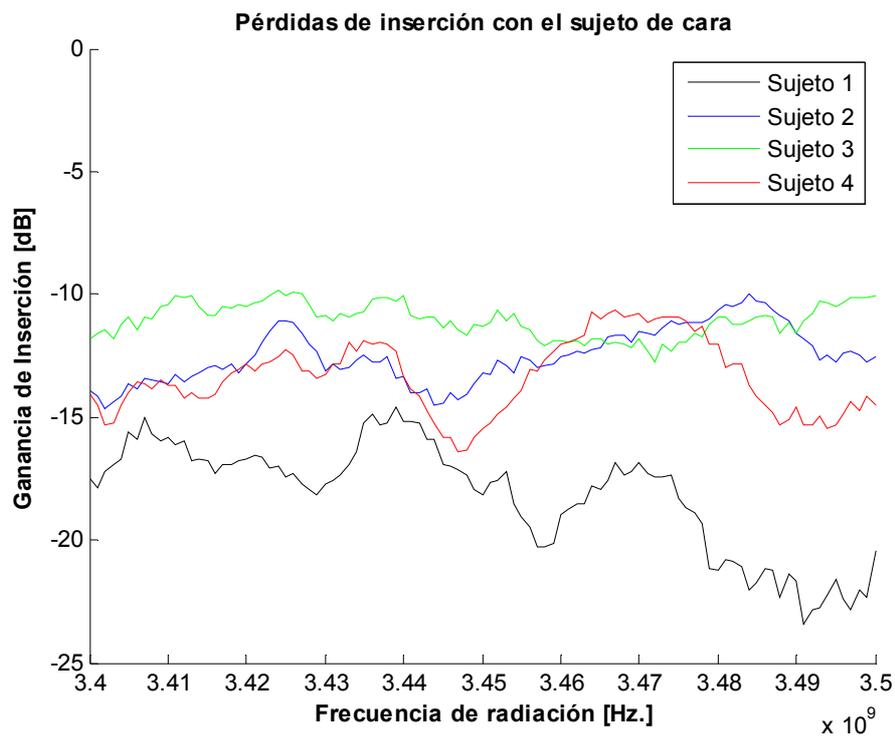


Figura 5-149: Perdidas de inserción producidas por personas, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Tabla 5-24: Sumario de pérdidas de inserción producidas por personas, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz,

Punto mínimo	-23.4325 dB
Punto máximo	-9.7980 dB
Media	-13.7685 dB
Desviación máxima	9.6639 dB

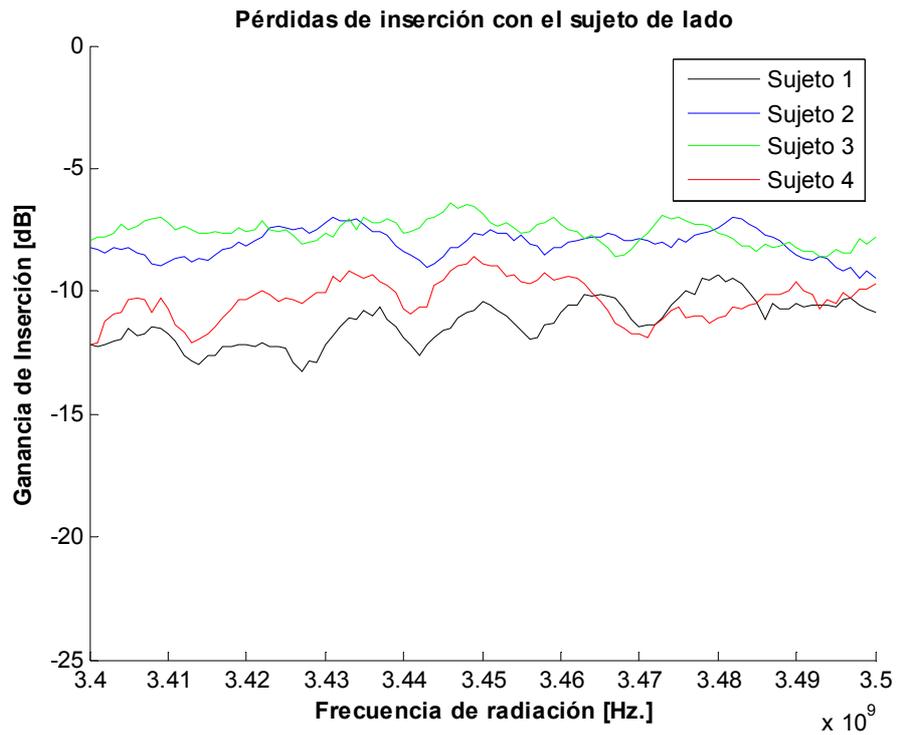


Figura 5-150: Pérdidas de inserción producidas por personas de lado, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Tabla 5-25: Sumario de pérdidas de inserción producidas por personas de lado, con banda de trabajo 3.4-3.5 GHz.

Punto mínimo	-13..2625 dB
Punto máximo	-6.4128 dB
Media	-9.3057 dB
Desviación máxima	3.9568 dB

6. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 CONCLUSIONES

En tecnologías basadas en las telecomunicaciones, es necesario realizar diversos estudios sobre las mismas con el objetivo de proporcionar herramientas necesarias para su correcta implantación. En general, el estudio del canal de propagación es importante, y en particular para las tecnologías inalámbricas que hemos presentado en este proyecto es fundamental recopilar datos sobre pérdidas de propagación en escenarios Indoor. Además, los datos obtenidos para distancias cortas, son útiles en estudios sobre interferencia de señales con otras tecnologías.

Las conclusiones sobre pérdidas de propagación, que cabe deducir de los datos obtenidos en los distintos escenarios estudiados en este Proyecto de Fin de Carrera, son las siguientes:

- Cuanta más ganancia tengan nuestras antenas, menos sensible será la señal propagada al multitrayecto.
- En una polarización horizontal frente a una vertical, las pérdidas por propagación pueden verse ligeramente incrementadas en el primer caso.
- Cuanto más alta sea la banda frecuencial de trabajo, las pérdidas serán mayores. Las pérdidas de propagación aumentan con la frecuencia.
- Si efectuamos leves variaciones sobre la altura de la antena (unos 20-30 cm), no tendrá un efecto relevante en las pérdidas de propagación.
- Las pérdidas de propagación calculadas en estos escenarios, se pueden aproximar linealmente por el siguiente modelo:

$$Lp = \begin{cases} L_{1m} + n_1 \times d \pm \sigma_1 & d \leq d_1 \\ L_{d1} + n_2 \times (d \div d_1) \pm \sigma_2 & d > d_1 \end{cases}$$

Es decir, dos tramos lineales, con distinta pendiente y distinta desviación.

Con valores de pendiente y desviación:

Tabla 6-1: Valores de pendiente y desviación para el modelo de propagación estudiado.

Escenario	N1	N2	Sigma1	Sigma2
Laboratorio o corredor abierto	4-5 dB/m	1.5-2 dB/m	< 1 dB	< 1 dB
Laboratorio o corredor abierto*	4-5 dB/m	1.5-2 dB/m	1-2 dB	> 2 dB
Pasillo*	5-6 dB/m	0-1 dB/m	1-2 dB	> 5 dB

* Medidas con antenas de 8.4 dB de ganancia

Además de las pérdidas de propagación, en este tipo de estudios, se tienen en cuenta los obstáculos existentes en los escenarios bajo estudio, por lo que es necesario calcular las pérdidas de inserción de dichos obstáculos en función de nuestra frecuencia de trabajo.

A continuación presentamos una tabla resumen sobre las pérdidas de inserción, que hemos calculado en este Proyecto de Fin de Carrera, producidas por obstáculos comunes en escenarios Indoor.

Banda de frecuencia de 2.4-2.5 GHz

Tabla 6-2: Sumario general de pérdidas de inserción para la banda de trabajo 2.4-2.5GHz

OBSTACULO	Punto mínimo	Punto máximo	Media	Desviación máxima
Puerta doble	-3.2593 dB	-0.5117 dB	-1.8314 dB	1.4279 dB
Puerta doble*	-4.5385 dB	-0.0787 dB	-1.6112 dB	2.9273 dB
Puerta sencilla	-1.0092 dB	-0.2980 dB	-0.5862 dB	0.4230 dB
Puerta sencilla*	-1.4849 dB	-1.4849 dB	-1.4849 dB	-1.4849 dB
Pared	-4.2783 dB	-0.0331 dB	-1.6943 dB	2.5840 dB
Pared*	-12.3597 dB	-2.2127 dB	-7.0923 dB	5.2674 dB
Cristal	-1.6047 dB	-0.1219 dB	-0.6912 dB	0.9135 dB
Cristal*	-2.8925 dB	-0.0909 dB	-0.9497 dB	1.9428 dB
Pizarra	-3.2295 dB	-0.5119 dB	-1.3584 dB	1.8711 dB
Pizarra*	-3.2295 dB	-0.1353 dB	-1.3743 dB	1.8552 dB
Pizarra Metálica	-64.3592 dB	-20.2163 dB	-29.3747 dB	-1.2465 dB
Pizarra Metálica*	-53.0397 dB	-14.6096 dB	-24.3397 dB	28.7000 dB
Personas	-14.8829 dB	-8.5622 dB	-11.4392 dB	3.4438 dB
Personas de lado	-12..3130 dB	-7.3980 dB	-9.4399 dB	2.8731 dB

* Medidas realizadas con polarización horizontal

Banda de frecuencia de 3.3-3.5 GHz

Tabla 6-3: Sumario general de pérdidas de inserción para la banda de trabajo 3.4-3.5GHz

OBSTACULO	Punto mínimo	Punto máximo	Media	Desviación máxima
Puerta doble	-6.3833 dB	-0.4236 dB	-2.6189 dB	3.7644 dB
Puerta sencilla	-3.5473 dB	-0.7418 dB	-1.7765 dB	1.7709 dB
Pared	-6.3105 dB	-1.0644 dB	-3.4289 dB	2.8815 dB
Cristal	-7.7855 dB	-2.5107 dB	-5.3456 dB	2.8349 dB
Pizarra	-2.8206 dB	-0.1079 dB	-1.2680 dB	1.5525 dB
Pizarra Metálica	-52.3001 dB	-15.7651 dB	-24.3437 dB	27.9563 dB
Personas	-23.4325 dB	-9.7980 dB	-13.7685 dB	9.6639 dB
Personas de lado	-13..2625 dB	-6.4128 dB	-9.3057 dB	3.9568 dB

6.2 TRABAJO FUTURO

A pesar del trabajo que se ha desarrollado en este Proyecto de Fin de Carrera, todavía quedan varias líneas de trabajo abiertas ya que el estudio de las pérdidas de propagación es inagotable. Otras actuaciones en este campo podrían ser:

- ✓ Elaborar una campaña de medidas con antenas de ganancias distintas a las estudiadas, por ejemplo, antenas omnidireccionales o de muy alta ganancia.
- ✓ Realizar un estudio análogo al que hemos desarrollado pero con otras bandas frecuenciales.
- ✓ Estudiar escenarios exteriores para las bandas de trabajo 2.3-2.5 GHz y 3.3-3.8 GHz.
- ✓ Elaborar una campaña de medidas como la que hemos desarrollado pero con la señal modulada.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Matthew S. Gast, “Redes Wireless 802.11”. O`Reilly, 2006.
- Constantine A. Balannis, “Antenna Theory: Analysis and Design”. Third Edition. Wiley. 2005
- Simon R. Saunders, Alejandro Aragón, “Antennas and propagation for Wireless Communication Systems”. Wiley, 2008.
- Stanislav Zvanovec, Pavel Pechac, Martin Klepal, “Wireless LAN Networks Design: Site Survey or Propagation Modeling?”, Radioengineering. vol. 12, no. 4, s. 42-49. ISSN 1210-2512, 2003.
- Petros T. Stathopoulos, Konstantinos N. Voudouris. “Use of least square approximation of the attenuation factor -n in the COST 231 One-Slope Model”. International Conference Proceedings on communications (CSCC-2006), Athens, pp448-452, Jul. 2006.
- Johan Karedal, Anders J. Johansson, Fredrik Tufvesson, Andreas F. Molisch. “ A Measurment-Based Fading Model for Wireless Personal Area Networks”. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 7, No. 11, pp. 4575-4585, 2008.
- Joao Pedro Eira, Antonio J. Rodrigues. “Analysis of WiMAX data rate performance”. Technical University of Lisbon, February 2009.
- Jaroslav Holis, Pavel Pechac. “Penetration Loss Measurement and Modeling for HAP Mobile Systems in Urban Environment”. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2008, Article ID 543290, Vol 7, 2008.

- Merrill I. Skolnik. “Introduction to Radar Systems”. Third Edition. McGraw-Hill. 2001
- <http://www.wimaxforum.org>
- <http://www.aldeaeducativa.com>
- José María Hernando Rábano, “Comunicaciones móviles”. Universitaria Ramón Areces, 2004.
- <http://sss-mag.com/indoor.html>
- Robert Akl, Dinesh Tummala Xinrong Li. “Indoor Propagation Modeling at 2.4 GHz for IEEE 802.11 Networks”. International Conference on Wireless Networks and Emerging Technologies (WNET), Banff, Canada, July 2006.
- Rec. UIT-R P.1238-5. “Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 900 MHz a 100 GHz”. 2007
- Wout Joseph, Leen Verloock, David Plets, Emmeric Tanghe, Luc Martens. “Characterization of Covarege and Indoor Penetration Loss of DVB-H Signal of Indoor Gap Filler in UHF Band”. IEEE Transactions on broadcasting, Vol. 35, No. 3, sep 2009.
- Y. E. Mohammed, A. S. Abdallah, Y. A. Liu “Characterization of Indoor Penetration Loss at ISM Band”. Environmental Electromagnetics, 2003. CEEM 2003. Proceedings. 4-7 Nov. 2003.

8. ANEXOS

Anexo 1: Código MATLAB

Las medidas obtenidas con el analizador de red se han guardado en un archivo .txt. Para analizar debidamente los resultados, se han realizado varios códigos en MATLAB.

Código para las pérdidas de inserción:

Solo presentamos el código correspondiente al escenario 13 por ser el más completo. El código para el resto de los escenarios es el mismo, solo hay que modificar la parte de la lectura de los archivos para cada escenario. Para ejecutar el archivo es necesario introducir en la misma carpeta los .txt que se deseen estudiar.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%
%%%
%%% Este código ha sido desarrollado para analizar los datos
%%% recogidos con el analizador de red Rohde&Swartz. Los
resultados
%%% han sido guardados en un archivo .txt.
%%%
%%% Funcionamiento: EL código lee los diferentes archivos
recogidos,
%%% almacénalas pérdidas en una variable e introduce las
pérdidas de
%%% referencia(en este caso teóricas). Después calcula la
%%% aproximación lineal correspondiente, y realiza una
presentación
%%% gráfica con las pérdidas halladas, las pérdidas teóricas y
la
%%% aproximación lineal resultante.
%%%
%%% Autor: Núñez López, Pablo
%%% Proyecto Fin de carrera, "ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE
SEÑALES
%%% ELECTROMAGNETICAS EN EDIFICIOS EN BANDAS DE Wi-Fi Y WiMAX",
2009
%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%

clear all;
close all;
clc;

frec = 3.3*1.0e+9; %% frecuencia a analizar

```

```
ptocritico =3; %% Punto de separación de las dos aproximaciones
lineales,
                %% en general 3 metros

%% Cálculo de las Perdidas teoricas

d = [1:0.5:7];
c = 3*10^8;  %%% velocidad de la luz en m/s
f = frec;  %%% frecuencia de propagación en Ghz
lambda = c/f;

FSL = 10*log10(((4*pi*d)/lambda).^2);

%% para el pasillo 1 en el lado derecho desde 1M hasta 7M, a una
altura de
%% 1.2 M

indice = 0;
for ii=1:0.5:7
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WMAX_P1_DRCH_ALT1_', num2str(ii), 'M.dat']);
    %%%Abrimos el archivo a estudiar
    %%%leemos
    C1D{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', ';', ',',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%%Cerramos el archivo
end

%% para el pasillo 1 en el lado derecho desde 1M hasta 7M, a una
altura de
%% 1.35 M

indice = 0;
for ii=1:0.5:7
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WMAX_P1_DRCH_ALT2_', num2str(ii), 'M.dat']);
    %%%Abrimos el archivo a estudiar
    %%%leemos
    C2D{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', ';', ',',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%%Cerramos el archivo
end

%% para el pasillo 1 en el lado derecho desde 1M hasta 7M, a una
altura de
%% 1.5 M

indice = 0;
for ii=1:0.5:7
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WMAX_P1_DRCH_ALT3_', num2str(ii), 'M.dat']);
    %%%Abrimos el archivo a estudiar
    %%%leemos
    C3D{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', ';', ',',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%%Cerramos el archivo
end
```

```
%% para el pasillo 1 en el lado izquierda desde 1M hasta 7M, a una
altura de
%% 1.2 M
```

```
indice = 0;
for ii=1:0.5:7
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WMAX_P1_IZQ_ALT1_', num2str(ii), 'M.dat']);
    %%Abrimos el archivo a estudiar
    %%leemos
    C1I{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', '; ,',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%Cerramos el archivo
end
```

```
%% para el pasillo 1 en el lado izquierdo desde 1M hasta 7M, a una
altura de
%% 1.35 M
```

```
indice = 0;
for ii=1:0.5:7
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WMAX_P1_IZQ_ALT2_', num2str(ii), 'M.dat']);
    %%Abrimos el archivo a estudiar
    %%leemos
    C2I{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', '; ,',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%Cerramos el archivo
end
```

```
%% para el pasillo 1 en el lado izquierdo desde 1M hasta 7M, a una
altura de
%% 1.5 M
```

```
indice = 0;
for ii=1:0.5:7
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WMAX_P1_IZQ_ALT3_', num2str(ii), 'M.dat']);
    %%Abrimos el archivo a estudiar
    %%leemos
    C3I{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', '; ,',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%Cerramos el archivo
end
```

```
%% para el pasillo 1 en el centro desde 1M hasta 7M, a una altura de
%% 1.2 M
```

```
indice = 0;
for ii=1:0.5:7
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WMAX_P1_CENT_ALT1_', num2str(ii), 'M.dat']);
    %%Abrimos el archivo a estudiar
    %%leemos
    C1C{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', '; ,',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%Cerramos el archivo
end
```

```

%% para el pasillo 1 en el centro desde 1M hasta 7M, a una altura de
%% 1.35 M

indice = 0;
for ii=1:0.5:7
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WMAX_P1_CENT_ALT2_', num2str(ii), 'M.dat']);
    %%Abrimos el archivo a estudiar
    %%leemos
    C2C{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', '; ,',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%Cerramos el archivo
end

%% para el pasillo 1 en el centro desde 1M hasta 7M, a una altura de
%% 1.5 M

indice = 0;
for ii=1:0.5:7
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WMAX_P1_CENT_ALT3_', num2str(ii), 'M.dat']);
    %%Abrimos el archivo a estudiar
    %%leemos
    C3C{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', '; ,',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%Cerramos el archivo
end

%% Seleccionamos los puntos para la frecuencia deseada

%% Trabajaremos con la frec 2.4 GHz
Ind_de_frec = find(C1C{1,2}{1,1}== frec);%% Aqui se introduce la
frecuencia a analizar datos

frec_analizada = (C1C{1,2}{1,1}(Ind_de_frec))/(1.0e+9); %%Expresada
en GHz

%% Atenuacion
aten1C = [];
aten2C = [];
aten3C = [];
aten1I = [];
aten2I = [];
aten3I = [];
aten1D = [];
aten2D = [];
aten3D = [];
ind = Ind_de_frec;
for ii=1:indice
    aten1C = [aten1C C1C{1,ii}{1,2}(ind)];
    aten2C = [aten2C C2C{1,ii}{1,2}(ind)];
    aten3C = [aten3C C3C{1,ii}{1,2}(ind)];
    aten1D = [aten1D C1D{1,ii}{1,2}(ind)];
    aten2D = [aten2D C2D{1,ii}{1,2}(ind)];
    aten3D = [aten3D C3D{1,ii}{1,2}(ind)];
    aten1I = [aten1I C1I{1,ii}{1,2}(ind)];
    aten2I = [aten2I C2I{1,ii}{1,2}(ind)];
    aten3I = [aten3I C3I{1,ii}{1,2}(ind)];
end

```

```
end
```

```
dist = [1:0.5:7];%%%Aquí se introduce la distancia de la antena
receptora

dist1 = [1:0.5:3]; %%% Aquí se separan las dos distancias con distinta
pendiente
dist2 = [3:0.5:7];

%% Corregimos las atenuaciones, es decir a las perdidas a un metro se
le
%% restan las perdidas por los cables utilizados y a las demas se le
suman
%% las perdidas a un metro

aten1I(1)= -1*FSL(1); %% En las perdidas a un metro se asumen las
teóricas
aten1C(1)= -1*FSL(1);
aten1D(1)= -1*FSL(1);
aten2I(1)= -1*FSL(1);
aten2C(1)= -1*FSL(1);
aten2D(1)= -1*FSL(1);
aten3I(1)= -1*FSL(1);
aten3C(1)= -1*FSL(1);
aten3D(1)= -1*FSL(1);

for ii=2:indice
    aten1I(ii) = aten1I(ii) + aten1I(1);
    aten1C(ii) = aten1C(ii) + aten1C(1);
    aten1D(ii) = aten1D(ii) + aten1D(1);
    aten2I(ii) = aten2I(ii) + aten2I(1);
    aten2C(ii) = aten2C(ii) + aten2C(1);
    aten2D(ii) = aten2D(ii) + aten2D(1);
    aten3I(ii) = aten3I(ii) + aten3I(1);
    aten3C(ii) = aten3C(ii) + aten3C(1);
    aten3D(ii) = aten3D(ii) + aten3D(1);
end

%% Agrupamos las distintas alturas

aux=[];
auxI=[];
auxC=[];
auxD=[];
for jj=1:length(aten1I)
    auxI = [aten1I(jj) aten2I(jj) aten3I(jj)];
    auxC = [aten1C(jj) aten2C(jj) aten3C(jj)];
    auxD = [aten1D(jj) aten2D(jj) aten3D(jj)];
    atenI(jj) = mean(auxI);
    atenC(jj) = mean(auxC);
    atenD(jj) = mean(auxD);
end

for jj=1:length(atenI)
    aux = [atenI(jj) atenC(jj) atenD(jj)];
    aten(jj) = mean(aux);
end
```

```

end

%% aproximacion lineal

dist1=[d(1):0.5:d(ptocritico)];
dist2=[d(ptocritico):0.5:d(length(d))];
aux1 = aten(1:(length(dist1)));
aux2 = aten((length(dist1):end));

%% Aproximamos a una recta las perdidas
coef1 = polyfit(dist1, aux1, 1);
aproximacion1 = polyval(coef1, dist1);

coef2 = polyfit(dist2, aux2, 1);
aproximacion2 = polyval(coef2, dist2);

%% Calculamos el desvio maximo y la pendiente de cada tramo
sigma1 = 0;
sigma2 = 0;
for ii = 1:length(dist1)
    sigma1 = max(sigma1, abs(aux1(ii)-aproximacion1(ii)));
end
for jj = 1:length(dist2)
    sigma2 = max(sigma2, abs(aux2(jj)-aproximacion2(jj)));
end

%% Se Ofrece la información relativa a la aproximación lineal

aproximacion1(1)
aproximacion2(1)
d(ptocritico)
sigma1
sigma2
n1=(aproximacion1(2)-aproximacion1(1))/(dist1(2)-dist1(1))
n2=(aproximacion2(2)-aproximacion2(1))/(dist2(2)-dist2(1))

%% Representación

figure
hold on
plot(d, -1*FSL, 'g');
title(['\bf Perdidas de propagación para ', num2str(frec_analizada), '
GHz']);
xlabel('\bf Distancia de la antena receptora [m.]);
ylabel('\bf Ganancia de propagación [dB]);
plot(dist, atenI, 'k');
plot(dist, atenC, 'r');
plot(dist, atenD, 'm');
legend(['Perdidas teóricas'], ['Izquierda del pasillo'], ['Centro del
pasillo'], ['Derecha del pasillo']);
hold off

figure
hold on
plot(d, -1*FSL, 'g');

```

```

title(['\bf Pérdidas de propagación para ', num2str(frec_analizada), '
GHz']);
xlabel('\bf Distancia del radio enlace [m.]');
ylabel('\bf Ganancia de propagación [dB]');
plot(dist1, aproximacion1, 'k');
plot(dist2, aproximacion2, 'r');
plot(dist, aten);
legend(['Pérdidas en el espacio libre'], ['Aproximación
1'], ['Aproximación 2'], ['Medidas de campo']);
hold off

figure
hold on
plot(d, -1*FSL, 'g');
title(['\bf Pérdidas de propagación para ', num2str(frec_analizada), '
GHz']);
xlabel('\bf Distancia del radio enlace [m.]');
ylabel('\bf Ganancia de propagación [dB]');
plot(dist(1:4:end), aten1I(1:4:end), 'k. ');
plot(dist(1:4:end), aten1C(1:4:end), 'k. ');
plot(dist(1:4:end), aten1D(1:4:end), 'k. ');
plot(dist(1:4:end), aten2I(1:4:end), 'k. ');
plot(dist(1:4:end), aten2C(1:4:end), 'k. ');
plot(dist(1:4:end), aten2D(1:4:end), 'k. ');
plot(dist(1:4:end), aten3I(1:4:end), 'k. ');
plot(dist(1:4:end), aten3C(1:4:end), 'k. ');
plot(dist(1:4:end), aten3D(1:4:end), 'k. ');
plot(dist, aten);
legend(['Pérdidas en el espacio libre']);
hold off

```

Código para las pérdidas de inserción:

Igual que en el caso anterior, se ha de modificar el código en función de los archivos .txt que deseemos analizar.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%
%%%
%%% Este código ha sido desarrollado para analizar los datos
%%% recogidos con el analizador de red Rohde&Swartz. Los
resultados
%%% han sido guardados en un archivo .txt.
%%%
%%% Funcionamiento: EL código lee los diferentes archivos
recogidos,
%%% y almacena los en una variable. referencia(en este caso
teóricas). Después calcula la
%%% aproximación lineal correspondiente, y realiza una
presentación
%%% gráfica con las pérdidas halladas, las pérdidas teóricas y
la
%%% aproximación lineal resultante.
%%%
%%% Autor: Nuñez López, Pablo
%%% Proyecto Fin de carrera, "ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE
SEÑALES

```

```

%%%      ELECTROMAGNETICAS EN EDIFICIOS EN BANDAS DE Wi-Fi Y WiMAX",
2009
%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;
close all;
clc;

frec_inicial = 2.4*1.0e+9; %% frecuencia a analizar
pinicial = 1; %%siempre es uno
pfinal= 10;%% es el numero maximo de puntos tomados en el material a
analizar

%% Perdidas de la puerta de la izquierda del

indice = 0;
for ii=pinicial:pfinal
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WIFI_INS_PARENOTASTELECO_', num2str(ii), '.dat']);
    %%Abrimos el archivo a estudiar
    %%leemos
    C{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', ';', ',',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%Cerramos el archivo
end

indice = 0;
for ii=pinicial:pfinal
    indice =indice+1;
    fid = fopen(['WIFI_POLH_PINS_NTASTELECO_', num2str(ii), '.dat']);
    %%Abrimos el archivo a estudiar
    %%leemos
    CPOLH{indice} = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'delimiter', ';', ',',
'CommentStyle', '%', 'emptyValue', -Inf);
    fclose(fid); %%Cerramos el archivo
end

%% Seleccionamos los puntos para la frecuencia deseada

%% Trabajaremos con toda la banda de frecuencia comprendida entre 2.4
y 2.5 GHz
indice_frec_inicial = find(C{1,2}{1,1}== frec_inicial);%% Aqui se
introduce la frecuencia a analizar datos

%% Almacenamos en una variable los datos recogidos
pinsercion=[];
banda = C{1,1}{1,1}(indice_frec_inicial:end);
for ii=pinicial:pfinal
    if(length(find(C{1,ii}{1,2}(indice_frec_inicial:end)')>0))==0)
        pinsercion = [pinsercion; C{1,ii}{1,2}(indice_frec_inicial:end)'];
    end
end
end

```

```

%% Se procede al cálculo del mínimo, el máximo, la media y la
desviación
%% correspondiente para el conjunto de la banda de frecuencia

minimo = min(min(pinsercion))
maximo = max(max(pinsercion))
media = mean(mean(pinsercion))
desviacion = max(abs(minimo)- abs(media),abs(media)-abs(maximo))

%% Cálculo para las pérdidas en polarización horizontal
pinsercionPOLH=[];
bandaPOLH = C{1,1}{1,1}(indice_frec_inicial:end);
for ii=pinicial:pfinal
    if(length(find(CPOLH{1,ii}{1,2}(indice_frec_inicial:end)')>0))==0)
        pinsercionPOLH = [pinsercionPOLH;
CPOLH{1,ii}{1,2}(indice_frec_inicial:end)'];
    end
end

minimoPOLH = min(min(pinsercionPOLH))
maximoPOLH = max(max(pinsercionPOLH))
mediaPOLH = mean(mean(pinsercionPOLH))
desviacionPOLH = max(abs(minimoPOLH)- abs(mediaPOLH),abs(mediaPOLH)-
abs(maximoPOLH))

%% Representación

figure
hold on
title(['\bf Perdidas de insercio para la pared']);
xlabel('\bf Frecuencia de radiación [GHz.]');
ylabel('\bf Perdidas de Inserción [dB]');
plot(banda, pinsercion , 'k');
plot(banda,media*ones(1,length(banda)));
plot(banda, pinsercionPOLH , 'r');
plot(banda,mediaPOLH*ones(1,length(bandaPOLH)), 'g');
axis([banda(1) banda(end) -20 10]);
hold off

```

Anexo 2: Compendio de medidas

Todas las medidas realizadas a lo largo del proyecto, se han adjuntado a este documento en un CD. El CD se encuentra dividido en dos carpetas, la primera correspondiente a las pérdidas de inserción y la segunda a las de propagación. Cada escenario presentado en este proyecto tiene su correspondiente carpeta. En ella se encuentran los archivos .txt (un archivo equivale a un punto analizado) obtenidos con el analizador de red, y un archivo con el código MATLAB listo para ejecutar. Dentro de cada código se puede seleccionar cada frecuencia (200 frecuencias distintas, dentro de la banda analizada).

PRESUPUESTO

1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 2.000 €
- Alquiler de impresora láser durante 6 meses 50 €
- Material de oficina 150 €
- Total de ejecución material 2.200 €
- Antenas..... 300 €
- Soporte 120 €

2) Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material 352 €

3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material 132 €

4) Honorarios Proyecto

- 640 horas a 15 € / hora..... 9600 €

5) Material fungible

- Gastos de impresión..... 60 €
- Encuadernación..... 200 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto..... 12480 €

7) I.V.A. aplicable

- 16% Subtotal Presupuesto 1996,8 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto..... 14476,8 €

Madrid, Septiembre de 2009

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Pablo Andrés Núñez López
Ingeniero Superior de Telecomunicación

PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un estudio de la propagación de señales electromagnéticas en edificios en bandas de Wi-Fi y WiMAX. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la

misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.