



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Modelos de propagación para edificaciones coloniales en la ciudad de Loja

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTORES: Curipoma Hernández, Danny Fabian
Macas Malan, Carlos André

DIRECTORA: Ludeña González, Patricia Jeanneth, Mgtr.

LOJA – ECUADOR

2019



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2019

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Magister

Patricia Jeanneth Ludeña González.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: “**Modelos de propagación para edificaciones coloniales en la ciudad de Loja**”, realizado por **Curipoma Hernández Danny Fabian y Macas Malan Carlos André**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, enero de 2019

f.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, **Curipoma Hernández Danny Fabian** y **Macas Malan Carlos André** declaramos ser los autores del presente trabajo de titulación: “Modelos de propagación para edificaciones coloniales en la ciudad de Loja”, de la Titulación de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, siendo **Patricia Jeanneth Ludeña González** directora del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaramos conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f.

Autor: Danny Fabian Curipoma Hernández

Cédula: 1104718083

f.

Autor: Carlos André Macas Malan

Cédula: 0706375375

DEDICATORIA

A mis padres Marco y Blanca, quienes durante toda mi existencia me han brindado su amor, apoyo y sabiduría, inculcándome siempre a ser una mejor persona cada día. Para ellos, que gracias a su inmenso esfuerzo y ejemplo de vida me han motivado siempre a seguir adelante, a superar nuevos retos y no rendirme jamás.

A mis hermanos Magaly y Geovanny, por formar parte fundamental de mi vida, creer en mí, y por todos sus consejos y el apoyo brindado.

Danny Curipoma

Dedico el presente trabajo a mis padres Emma Malán y Clever Macas, por su inmenso amor y apoyo incondicional, que con su esfuerzo y sacrificio me han permitido llegar hasta aquí, por la confianza que me brindan, valores y las buenas enseñanzas que han inculcado en mí.

A mis hermanos Briam, Xavier, Michael, y Jonathan por su compañía, apoyo y creer siempre en mí. A mis familiares que han sido partícipes de mi vida.

Carlos Macas

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestra gratitud a Dios por todas sus bendiciones, a nuestros padres y familia por el apoyo incondicional en el transcurso de nuestras vidas y formación profesional.

De igual manera, agradecemos a todos nuestros docentes por el conocimiento brindado durante este proceso de formación profesional, en especial a la Magister Patricia Ludeña, al Magister Marco Morocho y al Magister Francisco Sandoval, por su ayuda y guía en la ejecución de este trabajo de titulación.

También agradecemos a todos nuestros amigos, por todos los buenos momentos compartidos a lo largo de este camino y que permanecerán por siempre en nuestra memoria.

Danny Fabian y Carlos André

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS.....	xv
ABREVIATURAS	xvi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS.....	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO I.	6
1. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS	6
1.1. Introducción.....	7
1.2. Fenómenos físicos de la propagación de ondas.....	7
1.2.1. Reflexión.....	7
1.2.2. Difracción.....	8
1.2.3. Dispersión.....	9
1.3. Modelos de propagación de ondas en interiores.....	10
1.3.1. Modelos empíricos.....	10
1.3.1.1. Modelo de propagación en espacio libre.....	10
1.3.1.2. Log-distance path loss.....	11
1.3.1.3. Modelo One-Slope.....	12
1.3.1.4. Modelo Motley-Keenan.....	13
1.3.1.5. Modelo UIT Indoor path loss.....	14
1.3.2. Modelos determinísticos.....	15
1.3.2.1. Modelo de lanzamiento de rayos.....	15
1.3.2.2. Modelo de trazado de rayos.....	16
CAPÍTULO II.	18
2. CARACTERIZACIÓN DE EDIFICACIONES TRADICIONALES	18
2.1. Introducción.....	19
2.2. Estructura.....	19
2.3. Materiales.....	20

2.3.1.	Tapia.....	20
2.3.2.	Adobe.....	20
2.3.3.	Madera.....	22
2.4.	Catastro de edificaciones patrimoniales de la ciudad de Loja.....	23
CAPÍTULO III.....		25
3.	METODOLOGÍA.....	25
3.1.	Selección de edificaciones.....	26
3.2.	Análisis de equipos empleados.....	29
3.2.1.	Generador de señales.....	29
3.2.2.	Analizador de espectros.....	30
3.2.3.	Antenas.....	31
3.2.4.	Cables.....	33
3.3.	Mecanismo de adaptación.....	35
3.4.	Selección del modelo teórico de propagación.....	36
3.5.	Metodología de medición.....	36
3.6.	Pruebas de validación.....	38
CAPÍTULO IV.....		40
4.	EJECUCIÓN.....	40
4.1.	Campaña de medición.....	41
4.2.	Descripción de los escenarios.....	43
4.2.1.	Escenario 1: Academia de Artes Santa Cecilia.....	43
4.2.1.1.	Planta baja.....	43
4.2.1.2.	Planta alta.....	47
4.2.2.	Escenario 2: Instituto Nacional de Patrimonio y Cultura (INPC).....	51
4.2.2.1.	Planta baja.....	51
4.2.2.2.	Planta alta.....	54
4.2.3.	Escenario 3: Monasterio de Santo Domingo.....	57
4.2.3.1.	Planta baja.....	57
4.2.3.2.	Planta alta.....	61
4.2.4.	Escenario 4: Centro Cultural Bernardo Valdiviezo.....	62
4.2.4.1.	Planta baja.....	63
4.2.4.2.	Planta alta.....	68
4.2.5.	Escenario 5: Museo de la Cultura Lojana.....	70
4.2.5.1.	Planta baja.....	70
4.2.5.2.	Planta alta.....	71
4.3.	Comparación con resultados teóricos.....	78
4.4.	Propuesta de modelo adaptado.....	88

4.4.1. Modelo teórico de propagación seleccionado.	88
4.4.2. Adaptación a través del método de mínimos cuadrados.	90
4.4.2.1. Factor de multipared (F_m).	93
4.4.3. Obtención de la constante de atenuación (α) para paredes de tapia.	95
4.4.4. Modelo adaptado.	99
CAPÍTULO V	101
5. RESULTADOS	101
5.1. Comparación de valores medidos con resultados del modelo adaptado.	102
5.2. Pruebas de validación del modelo adaptado.	111
5.2.1. Error absoluto calculado.	123
CONCLUSIONES	124
RECOMENDACIONES	126
BIBLIOGRAFÍA	127
ANEXOS	130
ANEXO 1: DATASHEET DE LAS ANTENAS HYPERLINK HG2415EG	131
ANEXO 2: DATASHEET DEL GENERADOR DE SEÑALES	133
ANEXO 3: DATASHEET DEL ANALIZADOR DE ESPECTROS	134
ANEXO 4: PLANTILLA DE MEDICIONES	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Fenómeno de la Reflexión	8
Figura 1.2. Fenómeno de la difracción de ondas	9
Figura 1.3. Lanzamiento de Rayos	16
Figura 1.4. Trazado de Rayos: Método de Imágenes.....	17
Figura 2.1. Plano arquitectónico de un inmueble colonial típico ecuatoriano.....	19
Figura 2.2. Muro de tapia en construcción	20
Figura 2.3. Bloques de adobe.....	21
Figura 2.4. Madera como material de construcción en inmuebles coloniales (puertas, entresijos, pilares).	22
Figura 2.5. Ciudad de Loja: Bienes de Interés Patrimonial (azul) e Inventario (rojo).	24
Figura 3.1. Academia de Artes “Santa Cecilia”.....	26
Figura 3.2. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural Regional Zona 7.....	27
Figura 3.3. Monasterio de Santo Domingo.....	28
Figura 3.4. Centro Cultural “Bernardo Valdivieso”.....	28
Figura 3.5. Museo de la Cultura Lojana.	29
Figura 3.6. Equipo generador de señales.	30
Figura 3.7. Analizador de espectros.....	30
Figura 3.8. Antena parabólica de rejilla HG2415G	31
Figura 3.9. Nivel de SWR de las antenas HG2415G.....	32
Figura 3.10. Nivel de SWR de las antenas HG2415G.....	33
Figura 3.11. Cables <i>pigtail</i> RG174	33
Figura 3.12. Medición de las pérdidas por reflexión y transmisión en los cables <i>pigtail</i>	34
Figura 3.13 Esquema del sistema de medición.....	38
Figura 4.1. Esquema del método de medición de atenuación para cada tipo de obstáculo..	42
Figura 4.2. Ubicación de los puntos de medición en el plano de la edificación sobre paredes de tapia.....	43
Figura 4.3. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de la planta baja de la edificación.	44
Figura 4.4. Ubicación del punto de medición para dos paredes de tapia.....	45
Figura 4.5. Medición realizada sobre dos paredes de tapia de 66 cm.....	45
Figura 4.6. Medición realizada sobre una puerta de madera.....	46
Figura 4.7. Medición realizada sobre una puerta de madera de la edificación.	46
Figura 4.8. Ubicación de los puntos de medición en el plano de la edificación sobre paredes de tapia.....	47

Figura 4.9. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de la planta alta de la edificación.	48
Figura 4.10. Ubicación de los puntos de medición para el entrepiso de madera.	49
Figura 4.11. Medición realizada sobre el entrepiso de madera de la edificación.	49
Figura 4.12. Ubicación de los puntos de medición para el obstáculo entrepiso-pared.	50
Figura 4.13. Mediciones realizadas sobre el obstáculo entrepiso-pared.	50
Figura 4.14. Medición para una pared de tapia de 63 cm recubierta con concreto.	51
Figura 4.15 Mediciones realizadas sobre una pared de tapia del INPC.	52
Figura 4.16. Ubicación del punto de medición para dos paredes de tapia.	52
Figura 4.17. Medición sobre dos paredes de tapia de 63 cm recubiertas de concreto.	53
Figura 4.18. Punto de medición realizado sobre una puerta de madera.	53
Figura 4.19. Medición realizada sobre una puerta de madera de la edificación.	54
Figura 4.20. Punto de medición para una pared de tapia recubierta con concreto.	54
Figura 4.21. Medición sobre una pared de tapia de 66 cm recubierta de concreto.	55
Figura 4.22. Ubicación del punto de medición para el entrepiso de madera-gypsum.	55
Figura 4.23. Medición realizada sobre el entrepiso de madera-gypsum de la edificación. ...	56
Figura 4.24. Ubicación de las mediciones realizadas sobre el obstáculo entrepiso-pared de la edificación.	56
Figura 4.25. Mediciones realizadas sobre el obstáculo entrepiso-pared de la edificación. ...	57
Figura 4.26. Ubicación de los puntos de medición en el plano de la edificación sobre paredes de tapia.	58
Figura 4.27. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de la edificación.	59
Figura 4.28. Punto de medición para dos paredes de tapia de 65 cm.	60
Figura 4.29. Mediciones realizadas sobre dos paredes de tapia de 65 cm.	60
Figura 4.30. Lugar de medición para una puerta de madera del monasterio.	61
Figura 4.31. Medición realizada sobre una puerta de madera.	61
Figura 4.32. Punto de medición para una pared de tapia de 30 cm.	62
Figura 4.33. Medición realizada sobre una pared de tapia de 30 cm.	62
Figura 4.34. Ubicación de los puntos de medición sobre paredes de tapia de distinto grosor.	63
Figura 4.35. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de 30 cm y 45 cm.	64
Figura 4.36. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de 90 cm y 1 m.	65
Figura 4.37. Punto de medición sobre dos paredes tapia de 45 cm.	66
Figura 4.38. Medición realizada sobre dos paredes tapia de 53 cm y 45 cm.	66
Figura 4.39. Ubicación del punto de medición para una puerta de madera.	67
Figura 4.40. Medición realizada sobre una puerta de madera.	67

Figura 4.41. Ubicación de los puntos de medición para el entrepiso de madera.....	68
Figura 4.42. Medición realizada sobre el entrepiso de madera de la edificación.....	68
Figura 4.43. Ubicación de los puntos de medición para el obstáculo pared-entrepiso.....	69
Figura 4.44. Medición realizada sobre una pared de tapia y entrepiso de madera.....	69
Figura 4.45. Ubicación del punto de medición para una puerta de madera.....	70
Figura 4.46. Medición realizada sobre una puerta de madera.....	71
Figura 4.47. Ubicación de los puntos de medición para paredes de tapia de diversa dimensión.	72
Figura 4.48. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de distinta dimensión.	73
Figura 4.49. Puntos de medición para el obstáculo de dos paredes de tapia.....	74
Figura 4.50. Mediciones realizadas sobre los obstáculos de dos paredes de tapia.....	75
Figura 4.51. Ubicación de los puntos de medición para el entrepiso de madera.....	76
Figura 4.52. Medición realizada sobre el entrepiso de madera.	76
Figura 4.53. Ubicación de los puntos de medición para el obstáculo pared-entrepiso.....	77
Figura 4.54. Medición realizada sobre el obstáculo pared-entrepiso.....	77
Figura 4.55. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 1 (pared de tapia de 30 cm).....	82
Figura 4.56. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 2 (paredes de tapia de 65-69 cm).....	82
Figura 4.57. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 3 (paredes de tapia de 89-92 cm).....	83
Figura 4.58. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 4 (pared de tapia de 63 cm recubierta con concreto).....	83
Figura 4.59. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 5 (pared de tapia de 66 cm recubierta con concreto).....	84
Figura 4.60. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 6 (dos paredes de tapia de 63 cm recubiertas de concreto).....	84
Figura 4.61. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 7 (dos paredes de tapia de 65 cm).....	85
Figura 4.62. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 8 (dos paredes de tapia de 66 cm).....	85
Figura 4.63. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 9 (puertas de madera).....	86
Figura 4.64. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 10 (entrepiso de madera).....	86

Figura 4.65. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 11 (entrepiso de madera y gypsum).....	87
Figura 4.66. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 12 (pared de tapia 89 cm - entrepiso de madera y plywood).....	87
Figura 4.67. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 13 (pared de tapia y concreto de 63 cm - entrepiso de madera-gypsum).....	88
Figura 4.68. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada con cada uno de los modelos de propagación sin adaptar para una pared de tapia de 92 cm	89
Figura 4.69. Comparación entre la curva generada por cada uno de los modelos de propagación adaptados y la curva de los datos medidos	89
Figura 4.70. Esquema de la relación entre la potencia de entrada y salida sobre de una pared de tapia.....	95
Figura 4.71. Esquema de la medición en espacio libre a 50 cm y 115 cm.	96
Figura 5.1. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 1 (pared de tapia de 30 cm).....	105
Figura 5.2. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 2 (paredes de tapia de 65 cm a 69 cm).....	105
Figura 5.3. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 3 (pared de tapia de 89 cm a 92 cm).	106
Figura 5.4. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 4 (pared de tapia y concreto de 63 cm).....	106
Figura 5.5. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 5 (pared de tapia y concreto de 66 cm).....	107
Figura 5.6. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 6 (dos paredes de tapia y concreto de 66 cm).	107
Figura 5.7. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 7 (dos paredes de tapia de 65 cm).	108

Figura 5.8. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 8 (dos paredes de tapia de 66 cm).	108
Figura 5.9. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 9 (puertas de madera)	109
Figura 5.10. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 10 (entrepiso de madera).....	109
Figura 5.11. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 11 (entrepiso de madera-gypsum).	110
Figura 5.12. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 12 (pared de tapia de 89 cm - entrepiso de madera).	110
Figura 5.13. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 13 (pared de tapia y concreto de 63 cm y entrepiso de madera-gypsum)	111
Figura 5.14. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 14 (pared de tapia de 15 cm)..	115
Figura 5.15. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 15 (pared de tapia de 45 cm)..	115
Figura 5.16. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 16 (pared de tapia de 47 cm)..	116
Figura 5.17. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 17 (pared de tapia de 76 cm)..	116
Figura 5.18. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 18 (pared de tapia de 90 cm)..	117
Figura 5.19. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 19 (pared de tapia de 90 cm)..	117
Figura 5.20. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 20 (pared de tapia de 1 m).....	118
Figura 5.21. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 21 (Dos paredes de tapia de 20 cm).	118

Figura 5.22. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 22 (Dos paredes de tapia de 45 cm y 53 cm).....	119
Figura 5.23. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 23 (Dos paredes de tapia de 47 cm y 90 cm).....	119
Figura 5.24. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 24 (puerta de madera de 3 cm).	120
Figura 5.25. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 25 (puerta de madera de 3,5 cm).	120
Figura 5.26. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 26 (entrepiso de madera).....	121
Figura 5.27. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 27 (entrepiso de madera).....	121
Figura 5.28. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 28 (pared de tapia de 80 cm - entrepiso de madera).....	122
Figura 5.29. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 29 (pared de tapia de 1m - entrepiso de madera).	122

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Parámetros típicos para el Modelo Log-Distance Path Loss.....	12
Tabla 1.2. Valores para los coeficientes del Modelo One-Slope.	13
Tabla 1.3. Factores de atenuación según categoría de N_{wi}	13
Tabla 1.4. Coeficientes de pérdida de potencia, L_{UIT} , para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores.....	14
Tabla 1.5. Factores de pérdida de penetración en el suelo, L_f (dB), siendo n_f el número de pisos penetrados, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores ($n_f \geq 1$). 15	15
Tabla 2.1. Número de edificaciones patrimoniales en la ciudad de Loja	23
Tabla 3.1. Especificaciones de la antena HG2415G	32
Tabla 3.2. Pérdidas introducidas por los dos cables pigtail RG174.....	34
Tabla 4.1. Potencia de recepción medida a través de una pared de tapia de 65 cm.....	91
Tabla 4.2. Parámetros de atenuación obtenidos para cada uno de los obstáculos considerados.	93
Tabla 4.3. Factor de corrección de multipared.	94
Tabla 4.4. Potencia de recepción medida en espacio libre y a través de la pared de tapia... ..	96
Tabla 4.5. Constante de atenuación calculada para varias paredes de tapia.....	98
Tabla 4.6. Factor de atenuación N calculado para paredes de tapia de distintas dimensiones.	99
Tabla 5.1. Promedio del error absoluto que presenta el modelo adaptado en las pruebas de validación.....	123

ABREVIATURAS

WLAN	Wireless Local Area Network (Red de área local inalámbrica)
RF	Radiofrecuencia
Tx	Transmisor
Rx	Receptor
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
GO	Geometrical Optic (Óptica Geométrica)
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura)
INPC	Instituto Nacional del Patrimonio Cultural
GSM	Global System for Mobile communication (Sistema Global para las Comunicaciones Móviles)
SDR	Software Defined Radio (Radio definida por software)
SWR	Standing Wave Ratio (Relación de onda estacionaria)
ISM	Industrial, Scientific and Medical (Industrial, Científico y Médico)
<i>N</i>	Coeficiente de atenuación
<i>F_m</i>	Factor de corrección de multipared

RESUMEN

Se propone un modelo de propagación de ondas electromagnéticas adaptado a las características de ambientes interiores de edificaciones de arquitectura colonial ecuatoriana, el cual es obtenido aplicando dos mecanismos de adaptación: el método de mínimos cuadrados y la determinación de una constante de atenuación.

Los datos necesarios para la adaptación del modelo son obtenidos por medio de una campaña de medición realizada en una serie de edificaciones coloniales, en donde, mediante equipos de transmisión y recepción, se pudo registrar las pérdidas de potencia de una señal electromagnética al propagarse a través de obstáculos específicos dentro de estos inmuebles, a la frecuencia de 2,437 GHz. También se realiza un análisis comparativo de los modelos teóricos Log-distance, UIT, Motley-Keenan y One Slope. Luego del respectivo análisis matemático, los datos obtenidos permiten la adaptación del modelo Motley-Keenan.

Por último, se lleva a cabo la validación del modelo de propagación propuesto y se concluye que el modelo formulado presenta un error promedio menor a 3 dB y por lo tanto es apto para ser aplicado en este tipo de edificaciones.

PALABRAS CLAVE: Onda electromagnética, modelo de propagación en interiores, modelo Motley-Keenan, Log-distance, UIT, One Slope, edificaciones coloniales, método de mínimos cuadrados, constante de atenuación, tapia, adobe.

ABSTRACT

This degree work proposes an electromagnetic wave propagation model adapted to the characteristics of indoor environments for buildings of Ecuadorian colonial architecture, which is obtained by applying two adaptation mechanisms: the method of least squares and the determination of an attenuation constant.

The data needed to adapt the model is obtained in a measurement campaign carried out in a series of colonial buildings, where, with the use of transmission and reception equipment, the power losses of an electromagnetic signal at the frequency of 2,437 GHz could be measured as it propagates through specific obstacles within these structures. Also, a comparative analysis of the Log-distance, ITU, Motley-Keenan and One Slope theoretical models is made. After the respective mathematical analysis, this data allows the adaptation of the Motley-Keenan model.

Finally, the validation of the proposed propagation model is carried out and it is concluded that the formulated model presents an average error of less than 3 dB and therefore is apt to be applied in this type of buildings.

KEYWORDS: Electromagnetic wave, indoor propagation model, Motley-Keenan, Log-distance, UIT, One Slope model, colonial buildings, least squares method, attenuation constant, rammed earth wall, adobe.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en interiores es clave para el diseño de distintos sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, por ejemplo, redes de área local inalámbricas (WLANs), redes de telefonía móvil, y cualquier otro sistema que se base en la comunicación por radiofrecuencia (RF). En general, el objetivo de modelar la propagación de ondas es determinar la probabilidad de un rendimiento satisfactorio de un sistema de comunicación inalámbrico (Seybold, 2005).

Un entorno interior es considerablemente distinto a un entorno exterior típico y la radio propagación en estos ambientes es fuertemente influenciada por características específicas, tales como el diseño del edificio, los materiales de construcción, y el tipo de edificio. En el Ecuador, en la actualidad, debido a las políticas de conservación y preservación del patrimonio por parte del estado ecuatoriano, se mantiene una gran cantidad de edificaciones de arquitectura colonial. En la ciudad de Loja la mayoría de ellas datan del siglo XIX e inicios del XX (Cueva, 2016). Muchos de estos inmuebles siguen siendo utilizados para ciertas actividades, tales como: centros de comercio, viviendas, edificios de oficinas, museos, o como sedes de instituciones gubernamentales. La mayoría son edificaciones que, debido a las actividades que se realizan en ellas, demandan servicios de telecomunicaciones y, dado que son inmuebles que no pueden ser alterados físicamente, las redes de comunicación inalámbricas son las más recomendables para estos entornos al ser menos invasivas. Estas edificaciones, construidas en su mayoría con materiales tradicionales fabricados a base de tierra, tales como el adobe o tapia, constituyen un caso especial en el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en interiores.

La importancia de este trabajo de titulación se basa en la gran demanda existente por servicios de redes de comunicación inalámbricas y la no existencia de modelos de propagación que se ajusten a edificaciones de arquitectura colonial ecuatoriana, dado que los modelos existentes han sido desarrollados para entornos interiores relativamente modernos y en otros contextos de disposición y materiales. Esta ausencia puede provocar que las redes inalámbricas dispuestas en ellas tengan un rendimiento deficiente y por lo tanto una mala experiencia por parte de los usuarios en la calidad de servicio. Establecer un modelo de propagación adaptado permitirá el correcto dimensionamiento de estas redes inalámbricas, garantizando el desempeño eficaz del sistema, una cobertura eficiente, evitando costos excesivos en equipos y la interferencia, tanto dentro de la misma red, como con otros sistemas.

El uso de la tierra como material de construcción está muy extendido alrededor del mundo. Se estima que aproximadamente un 20% de la población mundial vive o trabaja en edificaciones hechas a base de tierra (Rocha, 2017). Por tal motivo se espera que los

resultados de este trabajo de titulación puedan ser aplicados no únicamente al entorno ecuatoriano, sino que su aplicación pueda tener un alcance global, especialmente dentro de la región Sudamericana, en donde las edificaciones coloniales son similares en cuanto a materiales y técnicas de construcción.

Mediante los datos obtenidos en una campaña de medición realizada en tres edificaciones coloniales de la ciudad de Loja, se realiza la adaptación del modelo teórico Motley-Keenan aplicando el método de adaptación de mínimos cuadrados y a través de la obtención de una constante de atenuación para paredes de tapia. El modelo es ajustado a través de factores de corrección y coeficientes de atenuación, el mismo que es validado en dos edificaciones coloniales distintas.

El Capítulo I de este documento trata acerca de los fundamentos teóricos de la propagación de ondas electromagnéticas y describe algunos modelos de propagación en interiores.

En el Capítulo II se caracterizan las edificaciones de tipo colonial. Se describen los principales materiales de construcción usados en las mismas, asociando sus características e influencia en la radio propagación. Además, se indica el catastro de las edificaciones patrimoniales presentes en la ciudad de Loja.

El Capítulo III describe la metodología de la selección de las edificaciones en donde se realizará la campaña de mediciones y la respectiva validación del modelo de propagación propuesto. También se describen y caracterizan los distintos equipos empleados. Además, se especifican los dos mecanismos de adaptación elegidos para el ajuste del modelo de propagación, y se describe la metodología de medición propuesta para el desarrollo de este trabajo.

El Capítulo IV aborda la descripción de los obstáculos y escenarios en los cuales se lleva a cabo la campaña de medición y la validación del modelo. A través de una serie de gráficas, se realiza una comparación entre los valores predichos por los modelos teóricos y los valores obtenidos en la campaña de medición. Por otro lado, se detalla el proceso matemático necesario para la adaptación del modelo teórico Motley-Keenan, y para la obtención de la constante de atenuación para paredes de tapia. Finalmente, se presenta la ecuación del modelo adaptado y los coeficientes de atenuación para cada tipo de obstáculo considerado.

En el Capítulo V se muestra el resultado del proceso de adaptación. Los valores medidos para cada obstáculo se comparan con los valores predichos por el modelo de propagación adaptado a través de gráficas. De la misma manera, se muestran los resultados obtenidos en el proceso de validación del modelo. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones surgidas al finalizar este trabajo de titulación.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Proponer un esquema de cálculo de pérdidas de propagación de ondas electromagnéticas para edificaciones coloniales tradicionales.

Objetivos Específicos

- Desarrollar un estado del arte sobre modelos de propagación en edificaciones.
- Analizar las pérdidas típicas de propagación dentro de edificaciones coloniales.
- Adaptar un modelo de propagación a edificaciones coloniales.
- Validar esquema propuesto.

CAPÍTULO I.

1. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS

1.1. Introducción.

En general, la propagación de ondas es un mecanismo de transporte de energía a través del espacio y tiempo. Es decir, una onda es la propagación de una perturbación de algún fenómeno físico en un medio determinado. Desde este punto de vista una onda electromagnética es la propagación en el tiempo y el espacio de los campos eléctricos y magnéticos producidos por cargas eléctricas en movimiento (Huidrobo & Luque, 2013). Los mecanismos que gobiernan la propagación de ondas electromagnéticas, tanto en entornos exteriores como interiores, son complejos y diversos, y pueden ser atribuidos a tres mecanismos básicos de propagación: reflexión, difracción y dispersión (Andersen & Rappaport, 1995).

Cuando se considera un canal de propagación en interiores se tiene como supuesto que no existe línea de vista directa entre el transmisor y el receptor. En tales casos, la propagación depende de la reflexión, difracción y, en menor grado, de la dispersión. Estos efectos, ya sea de manera individual o colectiva, contribuyen a la degradación de una señal (Seybold, 2005).

1.2. Fenómenos físicos de la propagación de ondas.

1.2.1. Reflexión.

Es el fenómeno por el cual las vibraciones u ondas se reflejan en una superficie de acuerdo con la ley de Snell-Descartes. Este fenómeno ocurre cuando una onda que se propaga incide sobre una superficie cuyas dimensiones son más grandes en comparación con la longitud de onda que se propaga (Sizun, 2005).

En general, en el fenómeno de la reflexión una parte de la onda incidente es reflejada al medio inicial, otra es absorbida por el segundo medio, y una tercera es transmitida al nuevo medio (ver Figura 1.1).

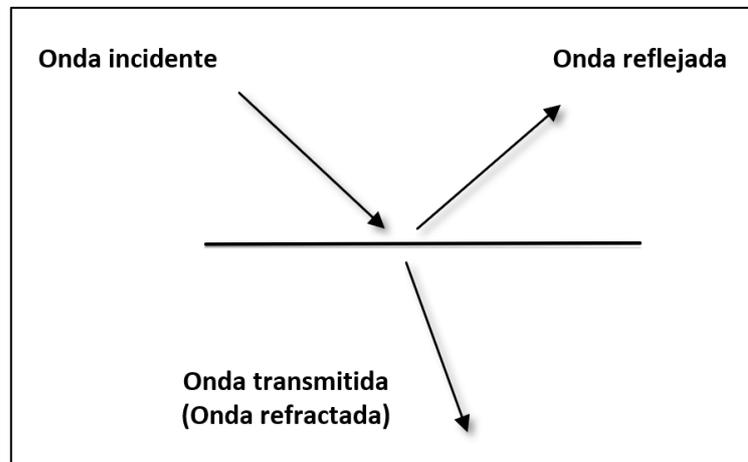


Figura 1.1. Fenómeno de la Reflexión
Fuente: (Huidrobo & Luque, 2013)
Elaboración: Autores

1.2.2. Difracción.

La difracción tiene lugar cuando una onda choca contra un obstáculo o una abertura con grandes dimensiones en comparación con la longitud de onda, lo cual ocasiona una desviación en la dirección de propagación. Este fenómeno permite a las señales de radio propagarse alrededor de la superficie curva de la tierra o propagarse detrás de obstáculos. La difracción es uno de los factores más importantes en la propagación de ondas de radio, y da como resultado perturbaciones que afectan la propagación de estas ondas, por ejemplo, la curvatura del trayecto alrededor de obstáculos o divergencias de haz (Sizun, 2005).

El fenómeno de la difracción es explicado por el principio de Huygens, en donde básicamente se establece que cada punto de un frente de onda puede ser considerado como una fuente para el origen de ondas secundarias, las mismas que se combinan para producir un nuevo frente de ondas en la dirección de propagación. En otras palabras, la difracción es causada por la propagación de ondas secundarias hacia una región ensombrecida (Rappaport, 2002). La Figura 1.2 ilustra este mecanismo de propagación.

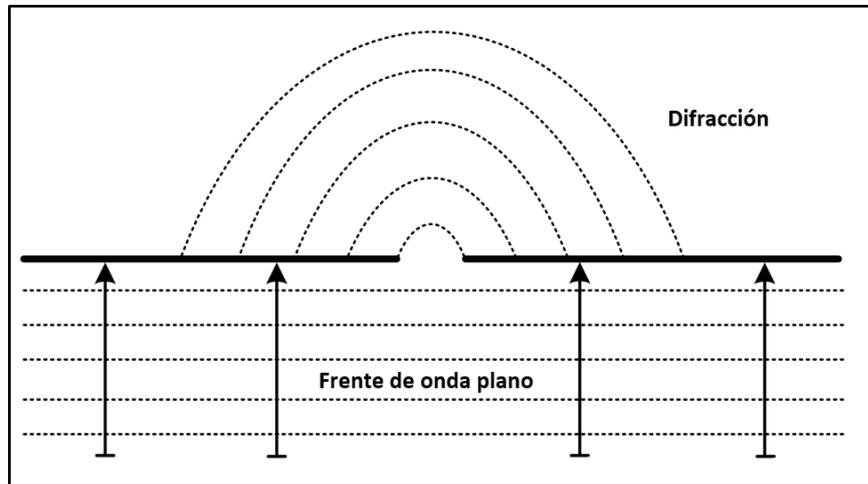


Figura 1.2. Fenómeno de la difracción de ondas
 Fuente: (Huidrobo & Luque, 2013)
 Elaboración: Autores.

En un entorno interior, la difracción puede darse debido a los bordes o curvaturas que se encuentran en esquinas de edificios, corredores, puertas o demás objetos presentes al interior de inmuebles (Erreyes & Poma, 2016).

1.2.3. Dispersión.

Cuando una onda de radio incide sobre una superficie rugosa, la energía reflejada se difunde en todas las direcciones debido a la dispersión. Este fenómeno se produce por la interacción de la onda incidente con moléculas gaseosas y partículas sólidas y líquidas que se encuentran en suspensión. Como resultado, la dirección de propagación de la onda cambia. Esto trae como consecuencia que la radiancia directa disminuya mientras que la radiancia difusa aumente. Se consideran dos tipos principales de dispersión: Selectiva, la cual se produce cuando las partículas con las cuales se interactúa son de tamaño menor o similar a la longitud de onda; y, no selectiva cuando los diámetros de las partículas son mucho mayores a la longitud de onda incidente (Huidrobo & Luque, 2013).

En entornos interiores, objetos como lámparas pueden causar dispersión (Rappaport, 2002).

1.3. Modelos de propagación de ondas en interiores.

Un modelo de propagación básicamente permite predecir la intensidad promedio de una señal recibida a una distancia dada desde el transmisor. Los modelos de propagación se pueden clasificar en empíricos y determinísticos (Garcia-Alvarez & Rogriguez, 2002).

1.3.1. Modelos empíricos.

Se fundamentan en el empleo estadístico de resultados obtenidos a partir de las pruebas que se realizan sobre el sitio de interés. Su ventaja es que consideran las influencias propias del entorno de manera implícita. Su precisión depende de la similitud entre el ambiente en donde fueron tomados los datos y el entorno a ser analizado. Computacionalmente, estos modelos son muy eficientes (García, 2006).

1.3.1.1. Modelo de propagación en espacio libre.

La propagación en espacio libre es uno de los escenarios más simples para la radio propagación. En este modelo se considera que no existe obstáculo alguno entre el transmisor y el receptor. Según la ecuación de espacio libre de Friis la potencia recibida por una antena receptora separada a una distancia d del transmisor está dada por la ecuación (1) (Xie, 2013; UIT-R, 2016).

$$P_r(d) = P_t * G_t * G_r * \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (1)$$

Donde:

$P_r(d)$: Potencia recibida a la distancia (d) de separación entre el transmisor y receptor (W).

d : distancia de separación entre el transmisor y receptor (m).

P_t : Potencia del transmisor (W).

G_t, G_r : Ganancia de la antena transmisora y receptora en comparación con un radiador isotrópico de ganancia unitaria.

λ : Longitud de onda (m).

Si reescribimos la ecuación (1) en escala logarítmica, entonces obtenemos:

$$P_r(d)[dBm] = P_t[dBm] * G_t[dBi] * G_r[dBi] + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (2)$$

Cuando excluimos las ganancias de las antenas, la ecuación (2) se convierte en

$$PL(d) = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 20 \log(d) \quad (3)$$

El término $20 \log(d)$ nos indica que la pérdida por trayecto de espacio libre incrementa en un factor de 20 dB por década. Una década significa un aumento de 10 veces en la distancia entre el transmisor y receptor (Xie, 2013).

La ecuación (3) puede expresarse en función de la frecuencia como

$$PL[dB] = 32.40 + 20 \log f + 20 \log d \quad (4)$$

Donde:

PL : pérdidas en espacio libre (dB).

f : frecuencia (MHz).

d : distancia de separación entre el transmisor y receptor (Km).

1.3.1.2. **Log-distance path loss.**

Los modelos empíricos y teóricos indican que la potencia media recibida de una señal disminuye logarítmicamente con la distancia. El modelo Log-distance obedece a la ley de distancia-potencia en la ecuación (5) (Rappaport, 2002).

$$L_{total}[dB] = PL(d_0) + 10 L_{LD} \log_{10}(d/d_0) + X_{\sigma} \quad (5)$$

Donde:

$PL(d_0)$: es la pérdida por trayecto a la distancia de referencia, usualmente tomada como pérdida en espacio libre a un 1 m.

d_0 : distancia de referencia (m).

L_{LD} : coeficiente de pérdida de trayecto.

d : distancia entre el transmisor y receptor (m).

X_{σ} : variable aleatoria gaussiana con media 0 y desviación estándar de σ dB.

Algunos valores típicos de L_{LD} y σ se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Parámetros típicos para el Modelo Log-Distance Path Loss.

Edificio	Frecuencia (MHz)	L_{LD}	σ (dB)
Tiendas minoristas	914	2,2	8,7
Tienda de comestibles	914	1,8	5,2
Oficina, partición dura	1500	3,0	7,0
Oficina, partición suave	900	2,4	9,6
Oficina, partición suave	1900	2,6	14,1
Textil/Química	1300	2,0	3,0
Textil/Química	4000	2,1	7,0/9,7
Papel/Cereales	1300	2,8	6,0
Metalurgia	1300	1,6/3,3	5,8/6,8

Fuente:(Seybold, 2005)

Elaboración: Autores.

1.3.1.3. Modelo One-Slope.

El modelo de pendiente única (One Slope Model) asume que la pérdida de trayecto en dB depende lineal y logarítmica de la distancia entre el emisor y receptor (Xie, 2013). Se fundamenta en establecer una línea de ajuste por regresión a las medidas, tomando en cuenta solo la distancia y la frecuencia. Es uno de los modelos de propagación más simples y sencillos de utilizar e implementar (Abrego & Sánchez, 2012), las pérdidas vienen dadas por la ecuación (6).

$$L[\text{dB}] = L_0 + 10n \log d \quad (6)$$

Donde:

L_0 : Atenuación del trayecto a una distancia de 1 m.

n : Coeficiente de pérdidas.

d : Distancia entre el transmisor y receptor (m).

La Tabla 1.2 muestra algunos valores de L_0 y n obtenidos en base a mediciones realizadas.

Tabla 1.2. Valores para los coeficientes del Modelo One-Slope.

Ambiente	$L_0(dB)$	n
Denso		
Un Piso	33,3	4,0
Dos Pisos	21,9	5,2
Multi Piso	44,9	5,4
Abierto	42,7	1,9
Grande	37,5	2,0
Corredor	39,2	1,4

Fuente: (COST, 1999)
Elaboración: Autores.

1.3.1.4. **Modelo Motley-Keenan.**

El modelo Motley-Keenan asume que la pérdida por trayecto en un entorno interior está dada por la atenuación por trayecto en espacio libre más una pérdida adicional introducida por el número de paredes intersecadas por la línea imaginaria que une al transmisor y receptor (Lima & Menezes, 2005). El modelo está definido por la ecuación (7).

$$PL[dB] = PL(d_0) + 20 \log(d) + k_{w_i} N_{w_i} \quad (7)$$

Donde:

$PL(d_0)$: es la pérdida por trayecto a 1 m de distancia entre el transmisor y receptor.

d : distancia entre el transmisor y receptor (m).

k_{w_i} : número de paredes del tipo i penetradas.

N_{w_i} : factor de pérdida para una pared de categoría i .

En la Tabla 1.3 se muestran valores de N_{w_i} para distintos tipos de muros.

Tabla 1.3. Factores de atenuación según categoría de N_{w_i} .

Tipo de Pérdida	Descripción	Factor de Atenuación (dB)
N_{w_1}	Muros ligeros (10 cm) - Yeso - Hormigón ligero	3,4
N_{w_2}	Muros pesados (10 cm) - Hormigón o ladrillo	6,9

Fuente: (COST, 1999)
Elaboración: Autores.

1.3.1.5. Modelo UIT Indoor path loss.

En este modelo se asume que la estación base y la unidad portátil están localizados dentro del mismo edificio. Los coeficientes de pérdida de potencia incluyen una tolerancia implícita para la transmisión a través de obstáculos, así mismo para otros mecanismos de pérdida que probablemente se encuentren dentro de un piso de un edificio (Barclay, 2003).

El modelo básico tiene la siguiente forma:

$$L_{total}[\text{dB}] = 20 \log_{10}f + L_{UIT} \log_{10}d + L_f(n_f) - 28 \quad (8)$$

Donde:

L_{UIT} : coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia.

f : frecuencia (MHz)

d : distancia de separación (m) entre la estación base y la unidad portátil.

L_f : factor de pérdidas por penetración en suelo [dB].

n_f : número de pisos entre la estación base y la unidad portátil.

Parámetros típicos, basados en resultados de varias mediciones, se muestran en la Tabla 1.4 y Tabla 1.5.

Tabla 1.4. Coeficientes de pérdida de potencia, L_{UIT} , para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores.

Frecuencia (GHz)	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial	Fábrica	Pasillo
0,8	-	22,5	-	-	-
0,9	-	33	20	-	-
1,25	-	32	22	-	-
1,9	28	30	22	-	-
2,1	-	25,5	20	21,1	17
2,2	-	20,7	-	-	-
2,4	28	30	-	-	-
2,625	-	44	-	33	-

Fuente: (UIT-R, 2017)

Elaboración: Autores

Tabla 1.5. Factores de pérdida de penetración en el suelo, L_f (dB), siendo n_f el número de pisos penetrados, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores ($n_f \geq 1$).

Frecuencia (GHz)	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
0,9	-	9 (piso) 19 (2 pisos) 24 (3 pisos)	-
1,8-2	$4 n_f$	$15 + 4(n_f - 1)$	$6 + 3(n_f - 1)$
2,4	10 (apartamento) 5 (casa)	14	-
3,5	-	18 (1 piso) 26 (2 pisos)	-
5,2	13 (apartamento) 7 (casa)	16 (1 piso)	-
5,8	-	22 (1 piso) 28 (2 pisos)	-

Fuente: (UIT-R, 2017)
Elaboración: Autores

1.3.2. Modelos determinísticos.

Los modelos determinísticos simulan la propagación de ondas electromagnéticas basándose en las ecuaciones de Maxwell y considerando los entornos de propagación. Simulan los principios físicos de la propagación de ondas de radio como reflexión, difracción o refracción. Tienen un gran nivel de exactitud y requieren de bases de datos precisas de los escenarios a simular.

Su desventaja es que son poco eficientes desde el punto de vista computacional. Por este motivo su uso se limita a pequeñas zonas. Aunque, si su implementación es la correcta, éstos proporcionan una gran exactitud en su predicción en comparación con los modelos empíricos (Naranjo, 2013).

Uno de los principales tipos de modelos determinísticos son los modelos de rayo-óptico, dentro del cual se encuentran el modelo de lanzamiento de rayos y el modelo de trazado de rayos.

1.3.2.1. Modelo de lanzamiento de rayos.

El modelo de lanzamiento de rayos, ilustrado en la Figura 1.3, es un modelo basado en la Óptica Geométrica (GO) (Lawton & McGeehan, 1994), la cual representa la radio propagación de acuerdo a ciertos fenómenos físicos, tales como la reflexión, difracción o refracción. Este modelo consiste en “lanzar” una serie de rayos desde el extremo del transmisor. Estos rayos tienen un ángulo de separación, de manera que cada uno de ellos tiene una dirección de propagación distinta. Una vez lanzados, estos rayos interactúan con los distintos obstáculos

que se encuentran en el entorno de propagación de acuerdo a los fenómenos físicos anteriormente mencionados. La propagación de un rayo se considera como finalizada cuando su potencia cae debajo de un umbral predefinido o cuando su número de interacciones con obstáculos alcanza un valor predeterminado, o también cuando éste alcanza al receptor (Parsons, 2000) (Xie, 2013). Para asegurar que todos los trayectos de propagación relevantes sean encontrados, un gran número de rayos deben ser lanzados (Láčik, Lukeš, & Raida, 2008).

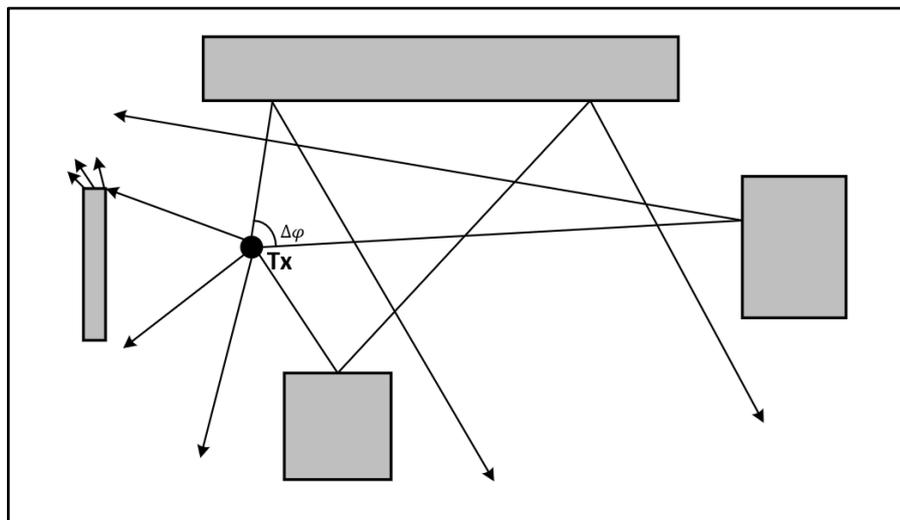


Figura 1.3. Lanzamiento de Rayos

Fuente: (Xie, 2013)

Elaboración: Autores.

1.3.2.2. *Modelo de trazado de rayos.*

Es una técnica basada en la Óptica Geométrica (GO) que puede ser aplicada como un método aproximado para estimar los niveles de campos electromagnéticos de alta frecuencia (Sarkar, Ji, Kim, Medouri, & Salazar-Palma, 2003). El modelo de trazado de rayos es un modelo basado en imágenes el cual considera a todos los obstáculos dentro del entorno de propagación como potenciales reflectores (Xie, 2013). El método de imágenes, el cual se muestra en la Figura 1.4, computa únicamente los trayectos reflejados hacia el receptor haciendo uso de imágenes del transmisor. En primer lugar, el transmisor crea un punto imagen usando la primera superficie reflectante. Este punto imagen es un espejo de la posición del transmisor en lado opuesto de la superficie. Si después de esta primera reflexión ocurre una segunda, un nuevo punto imagen es calculado de la misma manera, solo que ahora el punto imagen anterior es considerado como transmisor (Martinsson & Johnsson, 2002).

Una vez calculados todos los puntos imagen, se dibuja una línea desde el receptor hasta el último punto imagen. Luego se comprueba si la superficie correspondiente al punto imagen

de interés se interseca con esa línea. Si no es así, el trayecto es desechado. Caso contrario, una nueva línea es dibujada desde el punto de intersección hacia el siguiente punto imagen y se comprueba si existe intersección con la superficie actual. Este procedimiento continúa hasta que el transmisor sea alcanzado. Ambientes complejos pueden requerir de una exhaustiva búsqueda de trayecto de rayos lo que resulta en un alto tiempo computacional.

En la actualidad este modelo es considerado como uno de los más precisos de entre los modelos de estimación de potencia de campo. Su desventaja es que requiere de una representación muy detallada del entorno a analizar y su exactitud depende mucho de la precisión, cantidad y la complejidad de los datos (García, 2006)

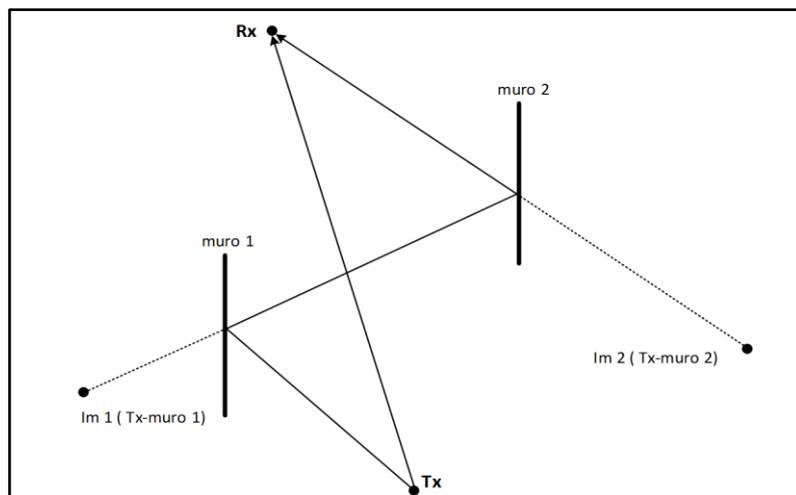


Figura 1.4. Trazado de Rayos: Método de Imágenes
Fuente: (Martinsson & Johnsson, 2002)
Elaboración: Autores.

CAPÍTULO II.

2. CARACTERIZACIÓN DE EDIFICACIONES TRADICIONALES

2.1. Introducción.

La arquitectura colonial y republicana del Ecuador ha sido estudiada y catalogada durante las últimas décadas. Varios centros históricos de ciudades ubicadas en la región interandina del país han sido declarados como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO. El Instituto Nacional del Patrimonio Cultural (INPC) ha catalogado a un total de 22 centros históricos como patrimonio cultural de la nación, entre ellos el centro histórico de la ciudad de Loja (Cueva, 2016).

Loja, ubicada al sur del Ecuador, fue fundada en el año de 1548 y es una de las ciudades más antiguas del país. Esto se puede evidenciar por la gran cantidad de edificaciones de arquitectura colonial presentes en sus calles. Según (INPC, 2014) , en el cantón Loja existen un total de 1609 edificaciones patrimoniales inventariadas por el INPC, de las cuales 592 se encuentran en las parroquias urbanas de la ciudad. La mayor parte de estos inmuebles datan del siglo XIX e inicios del XX.

2.2. Estructura.

Por lo general, estos inmuebles tradicionales aún conservan la tipología clásica de la época colonial: un patio central interior como elemento articulador y con habitaciones a su alrededor, simulando la disposición claustral de los conventos (ver Figura 2.1). Formalmente son de gran altura, con paredes anchas y ventanas necesarias para la iluminación y ventilación. Se pueden encontrar inmuebles con una y dos plantas, en este último caso suelen tener balcones hacia la calle (Beltrán, 2010) (Cueva, 2016).

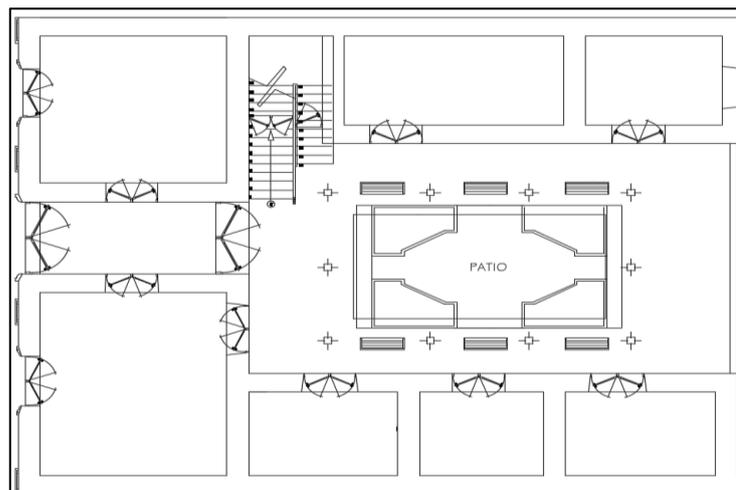


Figura 2.1. Plano arquitectónico de un inmueble colonial típico ecuatoriano.
Fuente: (Piedra, 2009)
Elaboración: (Piedra, 2009).

2.3. Materiales.

Los materiales de construcción utilizados son principalmente de origen natural. En el caso de las paredes, éstas están hechas de adobe o tapia; los pisos, puertas, pilares y ventanas son de madera. Sus cubiertas suelen ser de teja con estructura de madera.

2.3.1. Tapia.

La tapia o tapial es una antigua técnica de construcción que consiste en la fabricación de muros con tierra arcillosa compactada y arena. Una mezcla adecuada contiene entre un 10% a 20% de arcilla, de 15% a 25% limo y entre un 55% a 70% de arena (Tejada, Mendoza, & Torrealva, 2016). Además, suele contener algún aditivo como paja o piedras pequeñas para una mayor resistencia. La Figura 2.2 muestra un muro de tapia en proceso de construcción.



Figura 2.2. Muro de tapia en construcción
Fuente: (Tejada et al., 2016)
Elaboración: (Tejada et al., 2016)

2.3.2. Adobe.

El adobe es una pieza constructiva que está compuesta idealmente de un 20% de arcilla y un 80% de arena. Puede contener también limo y algunas fibras naturales como paja. Al ser mezclados con agua adquieren un estado líquido que puede ser introducido en moldes adecuados para su posterior secado (De la Peña, 1997). La Figura 2.3 muestra bloques de adobe terminados.



Figura 2.3. Bloques de adobe.

Fuente: (Reinoso, 2018)

Elaboración: (Reinoso, 2018)

Las edificaciones a base de tierra están presentes alrededor del mundo. Durante los últimos años ha resurgido el interés en este tipo de edificaciones, debido a consideraciones ambientales, de ahorro de energía y de salud. Se estima que, en la actualidad, aproximadamente 1,7 billones de personas viven en construcciones hechas de tierra (Rocha, 2017).

En cuanto a las características de propagación electromagnética del adobe y tapia, en Afrizal et al. (Afrizal et al., 2015) se realiza una serie de experimentos para determinar la constante de atenuación de algunos materiales dieléctricos: arcilla, silicio y madera. Los resultados de este estudio determinaron que la arcilla es el material que atenúa en mayor medida la radiación electromagnética en comparación a los otros dos dieléctricos, con una constante de atenuación de 0,138 Np/m para la arcilla, 0,064 Np/m para el silicio y 0,060 Np/m para la madera.

Por otra parte, Idim & Anyasi (2014) determinan y comparan los niveles de pérdidas por penetración de señales GSM en edificaciones de concreto, bloque y tierra. Llegando a la conclusión de que las edificaciones con paredes de tierra presentan un nivel de atenuación promedio cercano a aquellas estructuras con paredes de bloque.

Algunas investigaciones han demostrado que, en comparación con otros materiales, los materiales de construcción hechos de tierra presentan un gran nivel de atenuación ante la radiación electromagnética de alta frecuencia (Schreckenbach, 2004; Pauli & Moldan, 2000). En una investigación llevada a cabo en la Universidad de las Fuerzas Armadas Federales de Munich (Minke, 2006) se determinó, por ejemplo, que a la frecuencia de 2 GHz una pared hecha con ladrillos de tierra de 24 cm de grosor puede atenuar una señal hasta 24 dB;

mientras que una pared construida con piedra caliza y del mismo grosor la atenúa en tan solo 7 dB. Con lo cual se puede evidenciar el alto grado de atenuación de ondas electromagnéticas propio de este tipo de material.

2.3.3. Madera.

La madera como material de construcción en edificaciones ha sido empleada por el ser humano desde tiempos remotos. Su uso extendido se debe a una serie de características como su facilidad de moldeamiento, bajo peso específico, agradable apariencia exterior; y a algunas propiedades térmicas y mecánicas. Como se mencionó anteriormente, en las edificaciones coloniales la madera es utilizada para la construcción de pisos, puertas, pilares, ventanas y cubiertas, como se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Madera como material de construcción en inmuebles coloniales (puertas, entresijos, pilares).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Debido a su importancia, numerosos estudios han sido realizados con el fin de dilucidar propiedades específicas de este material, entre ellas sus propiedades dieléctricas. Se ha determinado que la influencia que ejerce un campo eléctrico en la madera es muy fuerte, ya que la interacción entre ellos resulta en la creación de corrientes eléctricas en el material. Las propiedades dieléctricas de la madera se pueden caracterizar por dos parámetros: su constante dieléctrica relativa (ϵ'), la cual indica cuántas veces la fuerza de interacción entre las cargas eléctricas en el medio dado es menor que en el vacío; la tangente de pérdida dieléctrica ($\tan \delta$) que define el nivel de potencia absorbida por la madera bajo la influencia del campo eléctrico, y el factor de pérdida dieléctrica ($\epsilon'' = \epsilon' \cdot \tan \delta$) (Torgovnikov, 1993).

La madera es catalogada como un material diamagnético y sus propiedades magnéticas están caracterizadas por la susceptibilidad magnética, que define la relación entre el vector de magnetización del material y el vector de la intensidad del campo magnético. La susceptibilidad magnética de la madera tiene un valor absoluto muy bajo (entre -0.2×10^6 y -0.4×10^6), razón por la cual, en la interacción entre un campo electromagnético y la madera, la influencia del componente magnético es despreciable (Torgovnikov, 1993).

Eléctricamente la madera es un material anisotrópico lo que significa que tiene diferentes propiedades dieléctricas a lo largo de sus fibras y perpendiculares a ellas, es decir en las direcciones tangencial y radial. Cuando una onda electromagnética interactúa con la madera, ésta es atenuada y polarizada. La atenuación depende principalmente del contenido de humedad y de la frecuencia de la onda incidente, y menor grado de la temperatura y la densidad. La polarización ocurre debido a la construcción molecular de la madera, la estructura de fibra y su dirección en el material. Mientras que la atenuación afecta principalmente a la onda transmitida en la madera, el efecto en el cambio de polarización está presente en la parte reflejada de la onda (Sjödén, 2008).

En Rajulu & Mohanty (2016) se demostró que la constante dieléctrica y el factor de pérdida dieléctrica de algunos materiales basados en madera aumentan al incrementar la temperatura y la frecuencia del campo eléctrico. A bajas temperaturas, la conductividad depende significativamente de la frecuencia; pero a medida que la temperatura aumenta esta dependencia se reduce.

2.4. Catastro de edificaciones patrimoniales de la ciudad de Loja.

La ciudad de Loja cuenta con 6 parroquias urbanas y 13 parroquias rurales. De acuerdo a (INPC, 2014) en la zona urbana de la ciudad existen un total de 592 edificaciones catalogadas como bienes de interés patrimonial e inventario. Éstas se encuentran distribuidas como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Número de edificaciones patrimoniales en la ciudad de Loja

Parroquia Urbana	Número de edificaciones
El Sagrario	345
San Sebastián	148
Sucre	41
Valle	58
Total	592

Fuente: (INPC, 2014)
Elaboración: Autores

La Figura 2.5 muestra el mapa de la zona urbana de la ciudad de Loja con la ubicación de cada uno de los inmuebles catalogados como patrimoniales.

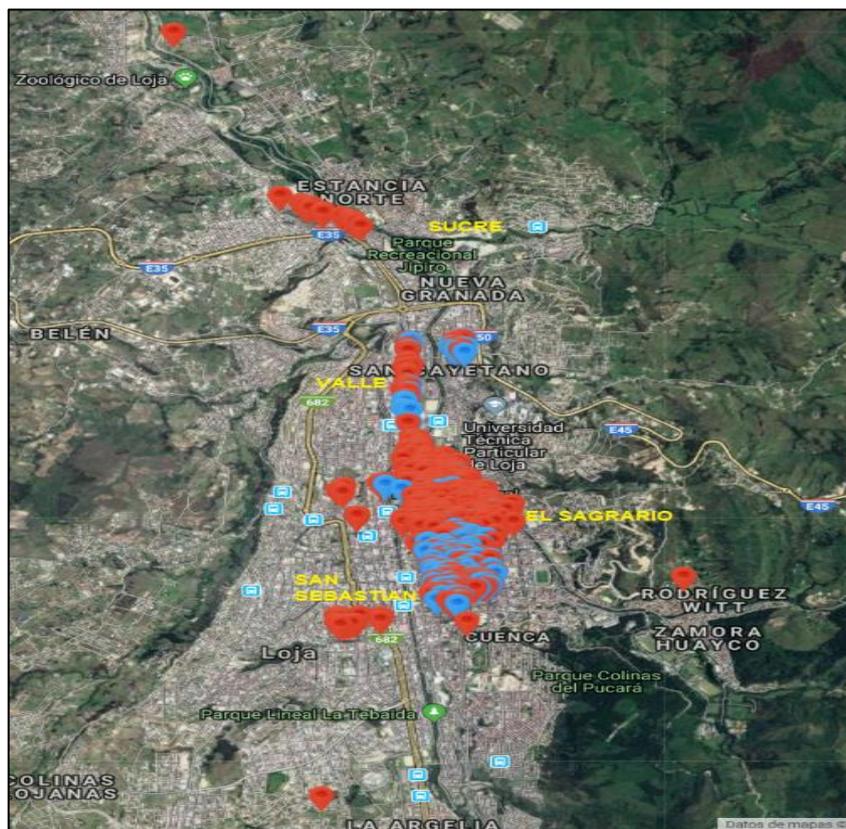


Figura 2.5. Ciudad de Loja: Bienes de Interés Patrimonial (azul) e Inventario (rojo).

Fuente: (INPC, 2014)

Elaboración: (INPC, 2014)

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA

3.1. Selección de edificaciones.

Las edificaciones en las cuales se realizó el estudio fueron seleccionadas en base a una clasificación previa de las mismas. En primer lugar, se consideró el área, el tipo de material predominante en su estructura: adobe o tapia; y aquellos inmuebles en los cuales el acceso es público, como, por ejemplo, museos, centros de comercio o sedes institucionales, con el fin de facilitar la obtención de los permisos correspondientes para la realización de la campaña de mediciones.

De esta clasificación se obtuvieron cinco edificaciones cuyo material de construcción predominante es la tapia. Tres de ellas fueron escogidas para llevar a cabo la campaña de mediciones en donde se obtuvieron los datos necesarios para desarrollar el modelo de propagación propuesto, éstas son: Instituto Nacional de Patrimonio Cultural Regional Zona 7, Monasterio de Santo Domingo, y Academia de Artes “Santa Cecilia” (ver Figura 3.1, Figura 3.2 y Figura 3.3 respectivamente). Y dos edificaciones en donde se realizó la validación del mismo: Centro Cultural “Bernardo Valdivieso” y Museo de la Cultura Lojana (ver Figura 3.4 y Figura 3.5).

- **Academia de Artes santa Cecilia.**

Edificación con características de arquitectura tradicional. Su construcción data del siglo XX. Está dividida en dos plantas con una altura aproximada de nueve metros. Su fachada es recta. Posee pilares y entrepisos de madera. Dispone de paredes hechas a base de tapia (INPC, 2014).



Figura 3.1. Academia de Artes “Santa Cecilia”.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

- **Instituto Nacional de Patrimonio Cultural Regional Zona 7.**

Edificación esquinera, como característica posee una arquitectura tradicional. Su construcción data del siglo XX. Está dividida en dos plantas de ocho metros de altura aproximadamente. Sus paredes están fabricadas de tapia. Dispone de entresijos, vigas y columnas de madera (INPC, 2014).



Figura 3.2. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural Regional Zona 7.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

- **Monasterio de Santo Domingo.**

Esta edificación posee una fachada exterior con características de arquitectura colonial. Su construcción data del siglo XVI. Está dividida en dos plantas y tiene una altura aproximada de ocho metros. Dispone de un patio central el cual presenta fachadas con estilo gótico y románico. Sus paredes son de tapia, los pilares y entresijos de madera (INPC, 2014).



Figura 3.3. Monasterio de Santo Domingo.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

- **Centro Cultural “Bernardo Valdivieso”.**

Edificación con características de arquitectura tradicional de la cual resaltan sus elementos arquitectónicos. Su construcción data del siglo XIX. Está dividida en dos plantas. Su fachada presenta elementos ojivales. Dispone de entrepisos, vigas y columnas de madera. Posee paredes de tapia y madera (INPC, 2014).



Figura 3.4. Centro Cultural “Bernardo Valdivieso”.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

- **Museo de la Cultura Lojana.**

Edificación con características de arquitectura tradicional. Su construcción data del siglo XIX. Está dividida en dos plantas de siete metros de altura aproximadamente. La fachada es lisa disponiendo de dos puertas-ventanas con balcones a nivel de planta alta. Sus paredes son de tapia. Dispone de entrepisos, vigas y columnas de madera (INPC, 2014).



Figura 3.5. Museo de la Cultura Lojana.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

3.2. Análisis de equipos empleados.

El sistema utilizado para la ejecución de la campaña de mediciones consta básicamente de cuatro elementos: un generador de señales, un analizador de espectros y dos antenas.

3.2.1. Generador de señales.

El generador de señales utilizado en este proyecto es el USB-TG124A Tracking Generator, que se muestra en la Figura 3.6, el cual puede generar pulsos en un rango de frecuencia de entre 100 KHz a 12,4 GHz a una potencia máxima de -12 dBm.

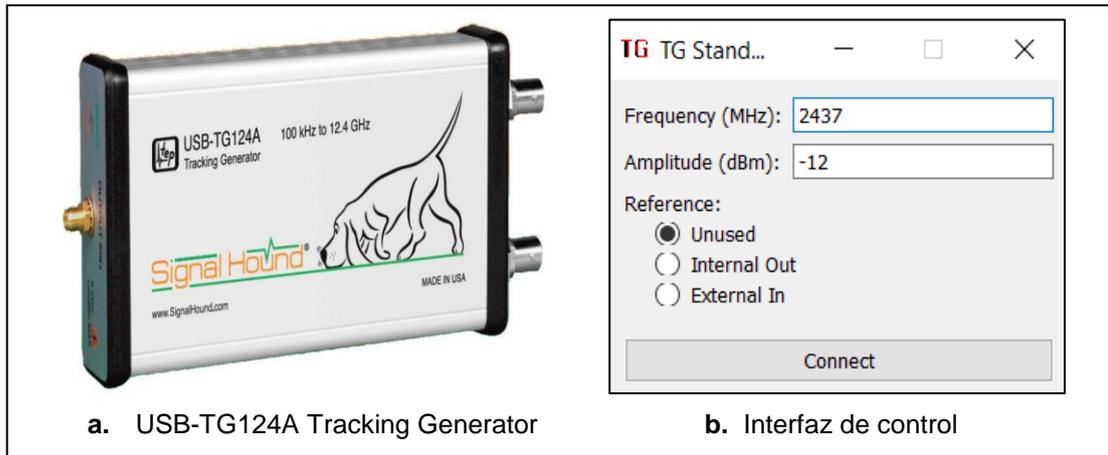


Figura 3.6. Equipo generador de señales.
Fuente: (Signal, 2018)
Elaboración: Autores

3.2.2. Analizador de espectros.

El Signal Hound USB-SA124B de la Figura 3.7 es un receptor definido por software (SDR) optimizado como un analizador de espectros de RF de banda estrecha en tiempo real. Trabaja en la frecuencia de 100 KHz a 12,4 GHz.

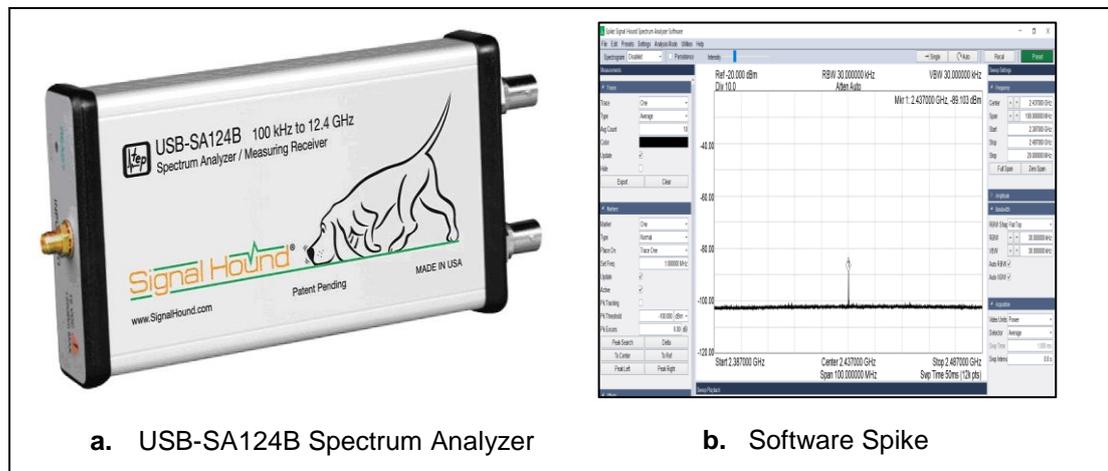


Figura 3.7. Analizador de espectros.
Fuente: (Signal, 2018)
Elaboración: Autores

3.2.3. Antenas.

Las antenas juegan un rol muy importante en un sistema de radio enlace y sus características de radiación determinan la viabilidad del mismo. Por tal motivo es necesario realizar la caracterización sus parámetros, como son la ganancia y la razón de onda estacionaria (SWR). El conocimiento de estos parámetros permitirá obtener datos precisos durante la realización de este proyecto. Las antenas utilizadas para el sistema de medición son del tipo rejilla y mini-reflector para la banda ISM 2,4 GHz y corresponden a la Figura 3.8.

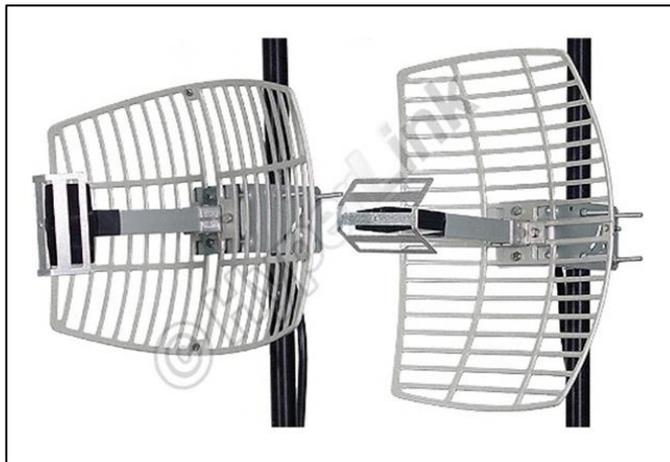


Figura 3.8. Antena parabólica de rejilla HG2415G
Fuente: (L-Com, n.d.)
Elaboración: (L-Com, n.d.).

Las especificaciones de la antena proporcionadas por el fabricante se muestran en la Tabla 3.1. La relación de onda estacionaria (SWR) y el diagrama de radiación de la antena se muestran en la Figura 3.9 y Figura 3.10 respectivamente.

El parámetro SWR se lo obtiene con ayuda de un analizador de redes, con las antenas en polarización horizontal y vertical. De acuerdo a la Figura 3.9, el nivel de SWR en polarización horizontal es de 1,35; mientras que en polarización vertical es de 1,25. Debido a estos resultados se decidió utilizar polarización vertical para el sistema de medición, ya que con esta configuración existe un menor nivel de pérdida de potencia.

Para determinar el diagrama de radiación, se hizo uso del generador de señales y el analizador de espectros descritos en las secciones anteriores. Con las antenas separadas a una cierta distancia, se transmite una señal y se mide el nivel de potencia de recepción, variando la orientación de la antena transmisora cada 10 grados hasta completar 360 grados.

Tabla 3.1. Especificaciones de la antena HG2415G

Parámetros de las antenas	
Modelo	HG2415G
Frecuencia	2400 – 2500 MHz
Polarización	Horizontal o Vertical
Ganancia	15 dBi
Cantidad	2

Fuente: (L-Com, n.d.)
 Elaboración: Autores

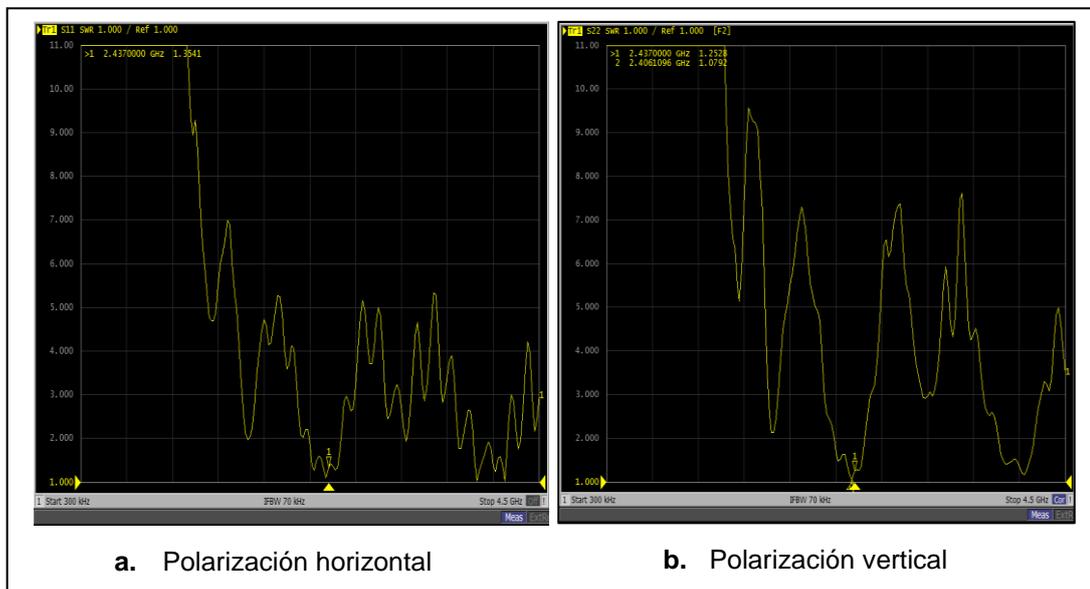


Figura 3.9. Nivel de SWR de las antenas HG2415G.
 Fuente: Keysight E5063A Network Analyzer
 Elaboración: Autores

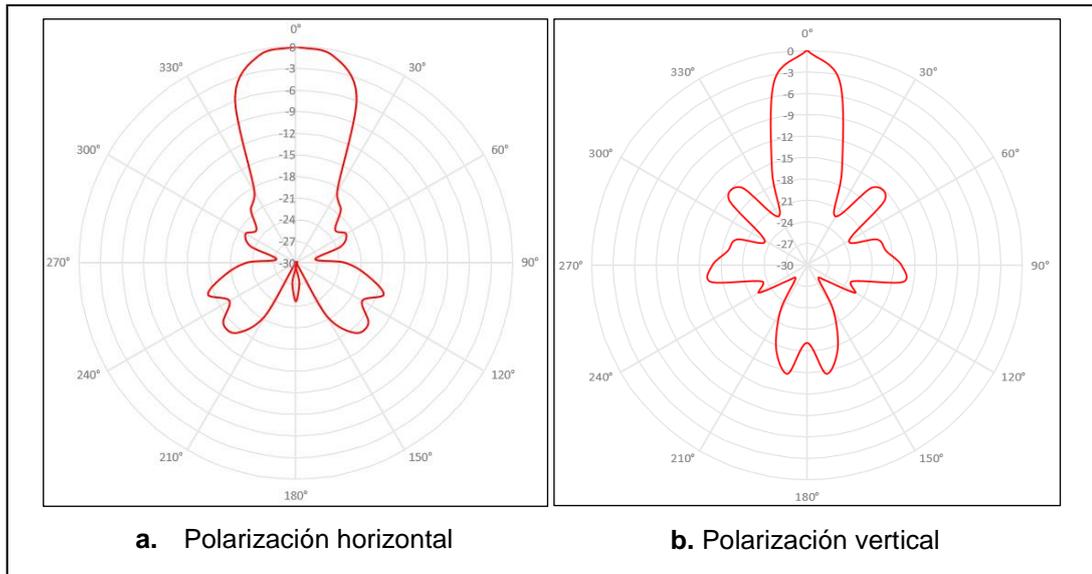


Figura 3.10. Nivel de SWR de las antenas HG2415G.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

3.2.4. Cables.

El cable utilizado para la conexión entre las antenas y los equipos de transmisión y recepción se muestra en la Figura 3.11. Es un cable *pigtail* RG174 de baja pérdida con una impedancia de 50 Ω . Sus conectores son del tipo N macho y SMA macho. El cable tiene una longitud de 30 cm y su nivel de atenuación por transmisión y reflexión a la frecuencia de 2,437 GHz se muestra en la Tabla 3.2 y Figura 3.12.



Figura 3.11. Cables *pigtail* RG174

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Tabla 3.2. Pérdidas introducidas por los dos cables *pigtail* RG174.

Pérdidas a 2,437 GHz		
Reflexión	- 0,55 dB	- 0,64 dB
Transmisión	- 1,89 dB	- 1,80 dB
Pérdidas totales	- 4,88 dB	

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

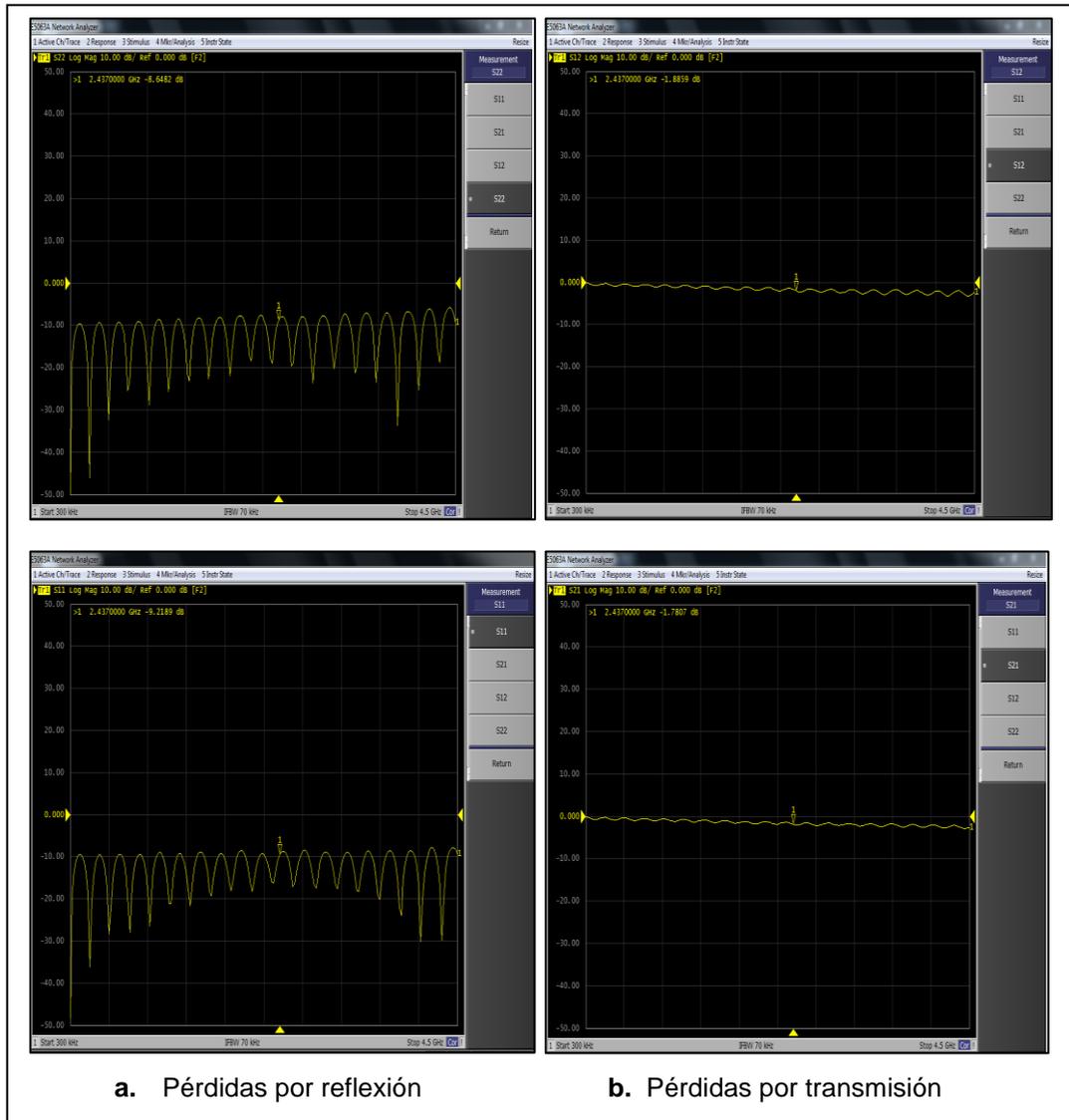


Figura 3.12. Medición de las pérdidas por reflexión y transmisión en los cables *pigtail*.

Fuente: Keysight E5063A Network Analyzer

Elaboración: Autores

3.3. Mecanismo de adaptación.

Los datos predichos por la teoría no siempre concuerdan con los valores obtenidos en la práctica, sino más bien presentan variaciones que en ciertos casos pueden ser muy bruscas, razón por la cual los modelos teóricos dejan de ser eficientes para casos específicos. Estas variaciones se deben a las características y factores propios del entorno, como el tipo de material o el grosor del que están constituidos los diferentes obstáculos.

En este trabajo de titulación, el objetivo de adaptar un modelo teórico es el de obtener los coeficientes de pérdida de propagación que caractericen por completo a un obstáculo y que permitan reducir el error entre los valores medidos y los predichos por el modelo.

Para el desarrollo de este trabajo se han seleccionado dos mecanismos de adaptación: el método de mínimos cuadrados, que es aplicado a cada uno de los obstáculos considerados; y el método de obtener una constante de atenuación para paredes de tapia.

El método de mínimos cuadrados se basa en la regresión lineal y consiste en encontrar la curva que mejor se ajusta a un conjunto de datos. La ecuación de mínimos cuadrados minimiza el error entre los valores obtenidos en las mediciones y los valores predichos por un modelo (Abdi, 2010) , y está definida para el presente trabajo por la ecuación (9).

$$E(N)[\text{dB}] = \sum_{i=1}^n [P_{\text{medida}}(d_i) - P_{\text{modelo}}(d_i)]^2 \quad (9)$$

Donde:

$E(N)$: error (en función del coeficiente de atenuación N) que debe ser minimizado [dB].

i : i -ésima muestra.

n : número total de muestras.

$P_{\text{medida}}(d_i)$: potencia medida a la distancia d_i (dBm).

$P_{\text{modelo}}(d_i)$: potencia predicha por el modelo a la distancia d_i (dBm).

La estimación del coeficiente de pérdida de propagación N es obtenida a través del cálculo diferencial y se usa la propiedad de que una expresión cuadrática alcanza su mínimo valor cuando sus derivadas son iguales a cero (Abdi, 2010):

$$\frac{\partial E(N)}{\partial N} = 0 \quad (10)$$

Una vez encontradas las derivadas parciales de la ecuación (10), basta con despejar N de la expresión resultante, donde N es el coeficiente de atenuación del obstáculo en consideración y el cual permitirá la adaptación de cada uno de los modelos de propagación con los datos obtenidos en las mediciones. El proceso de adaptación a través del método de mínimos cuadrados se detalla en la Sección 4.4.2 para el modelo teórico de propagación seleccionado.

Cuando una onda se propaga dentro de un medio, su amplitud se atenúa en un factor $e^{-\alpha z}$, donde α es denominada la constante de atenuación del medio y z es la distancia que recorre la onda (Sadiku, 2003). En este trabajo de titulación, esta constante de atenuación es determinada para un conjunto de paredes de tapia, de las cuales se obtiene una constante de atenuación promedio que permite determinar los coeficientes de atenuación N para paredes de tapia de distintas dimensiones. Estos coeficientes permitirán adaptar el modelo teórico seleccionado. Este proceso se describe en la Sección 4.4.3.

3.4. Selección del modelo teórico de propagación.

Mediante el método de adaptación de mínimos cuadrados, cada uno de los modelos teóricos considerados son ajustados a los valores obtenidos en la campaña de medición. Cada uno de estos modelos responderá de manera diferente al método de adaptación, y la curva generada por los mismos se compara con la curva de los valores medidos. De esta comparación, es seleccionado aquel modelo cuya curva se asemeja más a los datos obtenidos en las mediciones. En la sección 4.4.1, se describe el proceso de selección del modelo teórico de propagación.

3.5. Metodología de medición.

Existen algunos trabajos de titulación acerca de la radio propagación de ondas en donde se proponen metodologías para la toma de datos (Naranjo, 2013; Erreyes & Poma, 2016; (Hernández, 2016). En ellos se especifican algunos parámetros, entre los cuales constan: la altura de las antenas, la configuración correcta de equipos, la distancia de separación entre el transmisor y el receptor, la distancia de desplazamiento del receptor, entre otros.

En base a lo anteriormente mencionado, a continuación, se detalla la metodología de medición utilizada para este trabajo:

1. Se acopla la antena de transmisión y de recepción sobre pedestales de 1,50 m de longitud que sirven como soporte de las mismas durante la campaña. Las antenas se colocan a una altura de 1,30 m sobre el nivel del piso y en polarización vertical.

2. Haciendo uso de los cables *pigtail*, la antena de transmisión y de recepción se conectan al equipo generador de señales y al analizador de espectros respectivamente.
3. La configuración del equipo de transmisión y de recepción se detalla a continuación:
 - a. El generador de señales se configura para transmitir a la frecuencia de 2,437 GHz con una potencia de -12 dBm.
 - b. El analizador de espectros se configura en la banda de 2,4 GHz con la frecuencia central de 2,437 GHz.
4. En este trabajo se consideran cinco casos para la adquisición de los datos:
 - i. En el primer caso se consideran como obstáculos las paredes de tapia. La antena de transmisión y de recepción se ubican a una distancia inicial de 1,50 m. Luego, la antena de recepción se desplaza en línea recta cada 0,25 m y se toman los datos en cada nueva posición hasta finalizar con el escenario.
 - ii. El segundo caso corresponde a puertas de madera. La distancia inicial entre las antenas es de 0,50 m y sigue el mismo procedimiento presentado en el punto anterior.
 - iii. El tercer caso considera dos paredes de tapia. La antena de recepción de desplaza cada 0,25 m desde la distancia inicial y se sigue el mismo procedimiento presentado en el punto i. del numeral 4.
 - iv. En el cuarto caso se consideran los entrepisos. Aquí tanto la antena de transmisión como de recepción se ajustan paralelamente a los pedestales y se desplazan 0,25 m progresivamente hasta que la altura de los mismos lo permitan (1,50 m).
 - v. El quinto caso corresponde conjuntamente a paredes de tapia y entrepisos. En ambos escenarios las antenas de transmisión y recepción se encuentran en niveles distintos, en un primer y un segundo piso; y están dispuestas con un

grado de inclinación de 30°. En este obstáculo se toma una sola medición en la distancia de separación establecida.

Para los casos de paredes de tapia y puertas de madera la antena de transmisión y de recepción se sitúan a una distancia inicial establecida que se describe en los literales **i.** y **ii.** En los casos de dos paredes de tapia, entresijos y paredes de tapia-entresijos, las antenas se colocan a una distancia prudente que depende de las dimensiones del lugar en el que se realiza la medición. Se debe asegurar siempre que las antenas estén alineadas correctamente antes de tomar una medida.

5. Luego de obtener todos los datos de cada uno de los casos considerados, el siguiente paso consiste en determinar el coeficiente de atenuación (N) del modelo de propagación escogido para su ajuste, a través de los métodos de adaptación seleccionados.

La Figura 3.13 muestra el esquema del sistema de medición utilizado para el desarrollo de la campaña de medición.

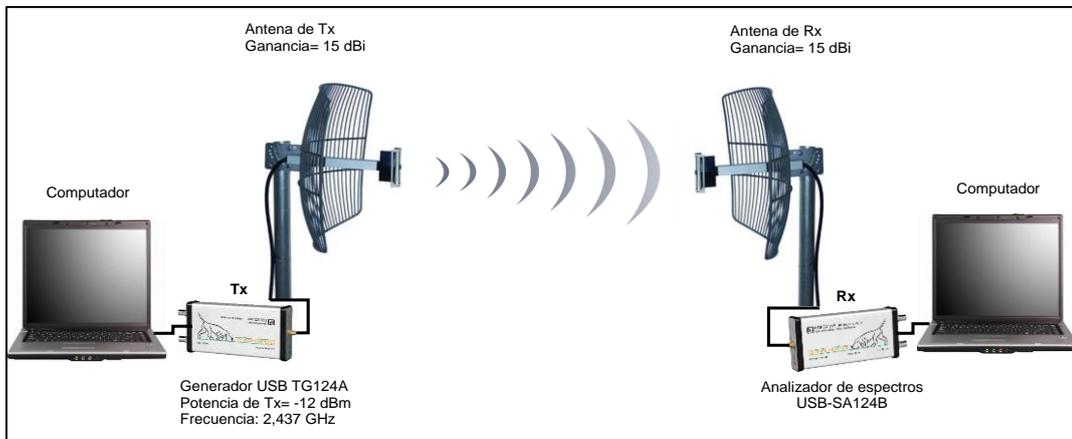


Figura 3.13 Esquema del sistema de medición.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

3.6. Pruebas de validación.

Las pruebas de validación se llevan a cabo en el escenario 4 y en el escenario 5. Éstas mediciones se realizan sobre el Obstáculo 14 al Obstáculo 29, los mismos que incluyen paredes de tapia, entresijos y puertas de madera.

El método de cálculo de error elegido es el error absoluto, el cual consiste en obtener la diferencia entre los datos obtenidos en estas mediciones y los datos predichos por el modelo

adaptado. Este error es calculado para los obstáculos considerados en las pruebas de validación y para los dos métodos de adaptación, dado el caso (ver sección 5.2.1). Para validar el modelo propuesto, en este trabajo de titulación se considera como un valor aceptable, un error absoluto promedio igual o menor a 3 dB.

CAPÍTULO IV.

4. EJECUCIÓN.

4.1. Campaña de medición.

La campaña de mediciones fue realizada en un periodo de dos meses, la misma que se llevó a cabo en cinco edificaciones de arquitectura colonial de la ciudad de Loja. En tres de ellas se obtuvieron los datos necesarios para desarrollar el modelo de propagación, éstas son: Academia de Artes “Santa Cecilia”, Instituto Nacional de Patrimonio y Cultura, Monasterio de Santo Domingo. Mientras que, en el Centro Cultural “Bernardo Baldivieso” y Museo de la Cultura Lojana, se ejecutó la validación del modelo de propagación propuesto.

Las mediciones se concentraron sobre los siguientes tipos de obstáculos:

- Paredes de tapia.
- Puertas de madera.
- Dos paredes de tapia.
- Entrepiso de madera.
- Entrepiso de madera-gypsum.
- Pared de tapia y entrepiso.

La Figura 4.1 muestra el esquema del método de medición utilizado para cada uno de los obstáculos antes mencionados.

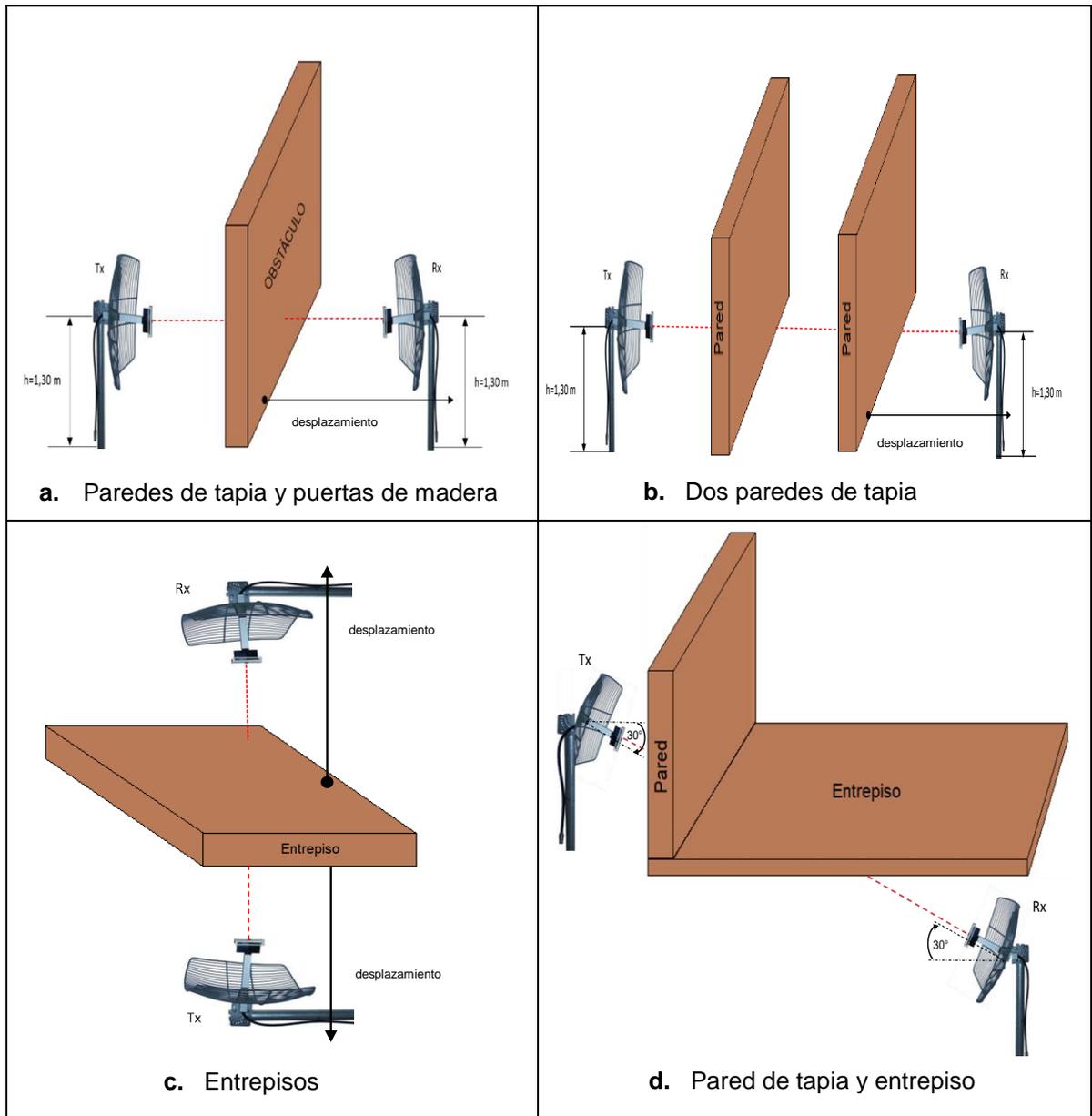


Figura 4.1. Esquema del método de medición de atenuación para cada tipo de obstáculo.
 Fuente: (Erreyes & Poma, 2016)
 Elaboración: Autores

4.2. Descripción de los escenarios.

4.2.1. Escenario 1: Academia de Artes Santa Cecilia.

Este edificio posee dos plantas, las cuales están distribuidas de la siguiente manera:

La planta baja consta de un patio central, oficinas, un pequeño museo, una biblioteca y una cafetería; mientras que la planta alta está constituida únicamente por una serie de aulas.

4.2.1.1. Planta baja.

4.2.1.1.1. Paredes de tapia.

Las paredes de tapia presentan una construcción irregular en cuanto a sus dimensiones. Las mediciones en esta planta se realizaron sobre una pared de tapia de 89 cm y una de 66 cm de grosor correspondientes al museo y a la biblioteca respectivamente. En la Figura 4.2 se puede observar la ubicación de los equipos durante la campaña de medición; mientras que en la Figura 4.3 se muestran las imágenes de las mediciones realizadas.

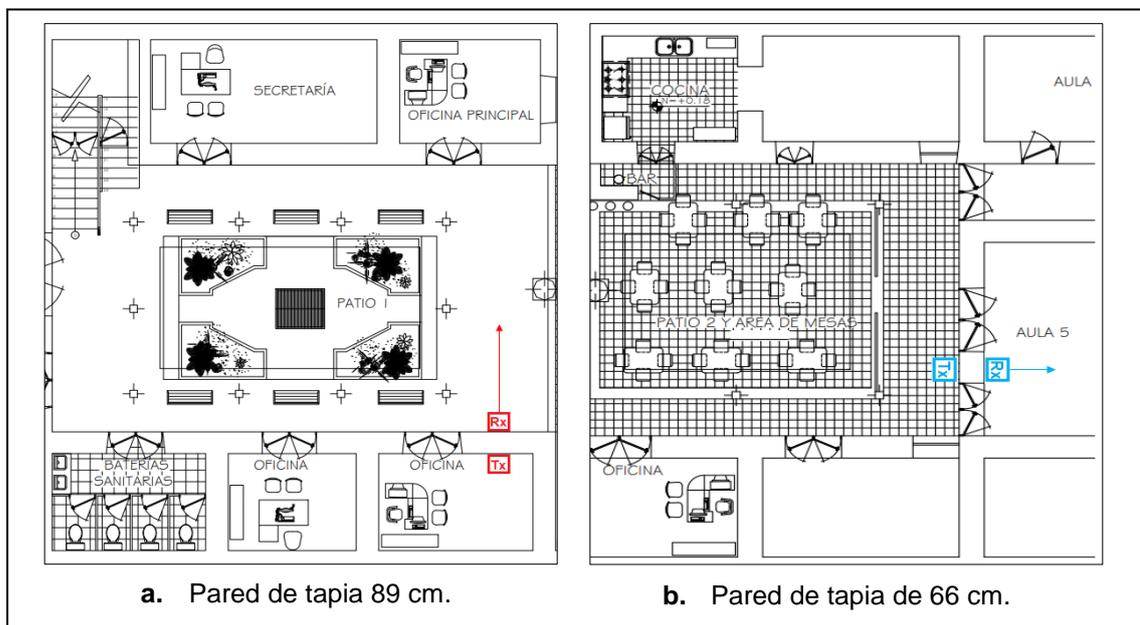


Figura 4.2. Ubicación de los puntos de medición en el plano de la edificación sobre paredes de tapia (escala 1:500).

Fuente: (Piedra, 2009)

Elaboración: Autores

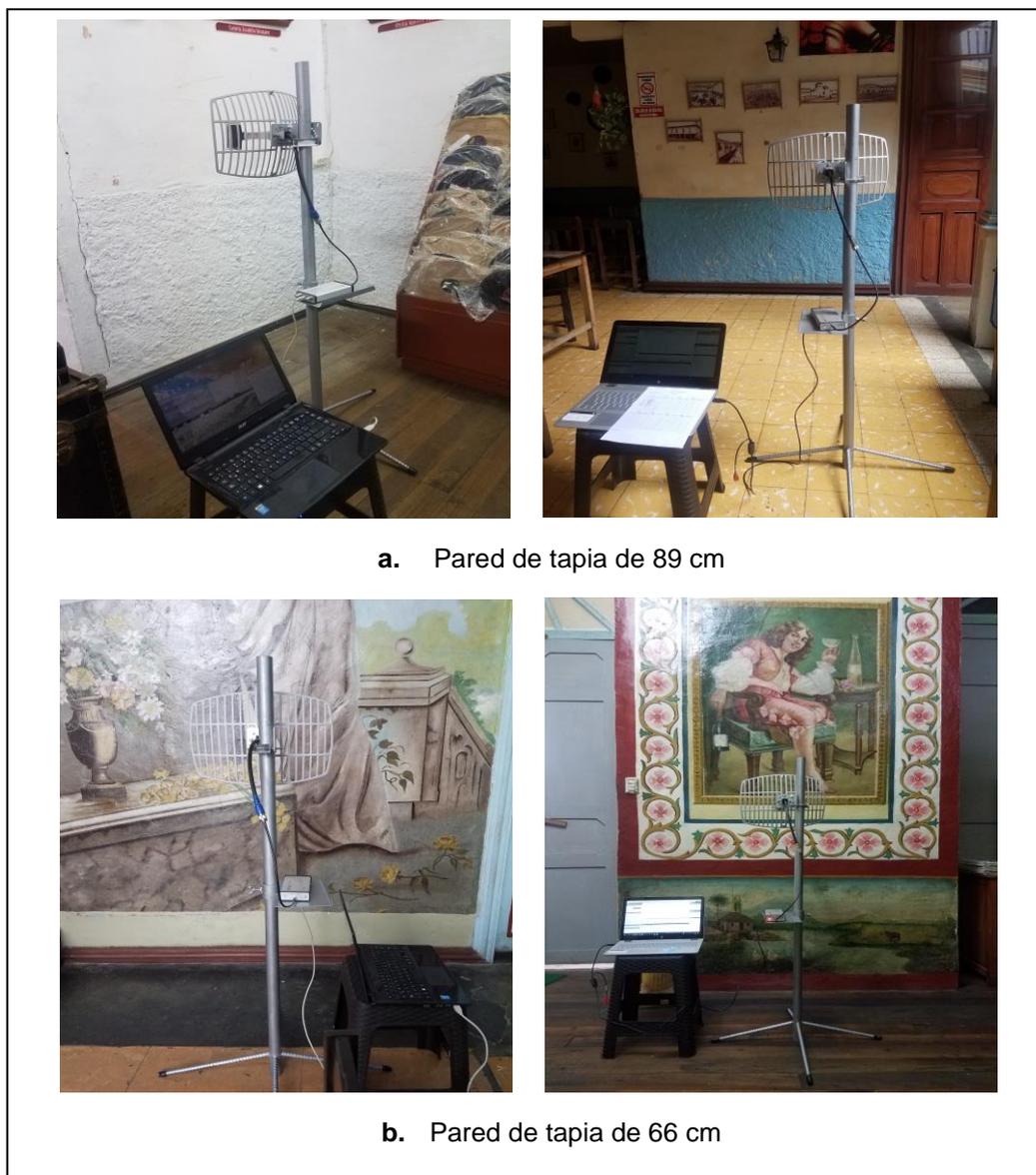


Figura 4.3. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de la planta baja de la edificación.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.1.1.2. *Dos paredes de tapia.*

Ambas paredes tienen un grosor de 66 cm y corresponden al área de la biblioteca. En la Figura 4.4 y Figura 4.5 se muestra la ubicación de los puntos de medición y las mediciones realizadas respectivamente.

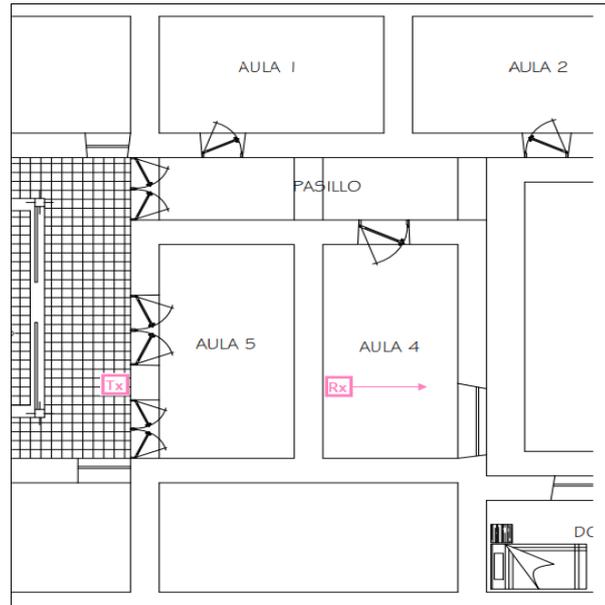


Figura 4.4. Ubicación del punto de medición para dos paredes de tapia (escala 1:500).

Fuente: (Piedra, 2009)

Elaboración: Autores



Figura 4.5. Medición realizada sobre dos paredes de tapia de 66 cm.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.1.1.3. Puertas de madera.

Son puertas con un espesor de aproximadamente 3 cm. Las mediciones sobre este obstáculo se ilustran en la Figura 4.6 y Figura 4.7.

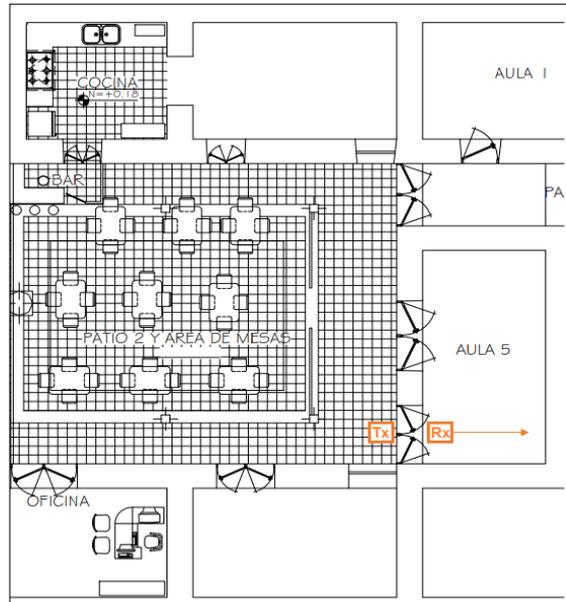


Figura 4.6. Medición realizada sobre una puerta de madera (escala 1:500).

Fuente: (Piedra, 2009)

Elaboración: Autores



Figura 4.7. Medición realizada sobre una puerta de madera de la edificación.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.1.2. *Planta alta.*

4.2.1.2.1. *Paredes de tapia.*

Se considera una pared de tapia de 67 cm y una de 70 cm que corresponden a dos aulas de la planta alta. En la Figura 4.8 se ilustra la ubicación de los puntos de medición y en la Figura 4.9 se muestran las imágenes de las mediciones sobre estos obstáculos.

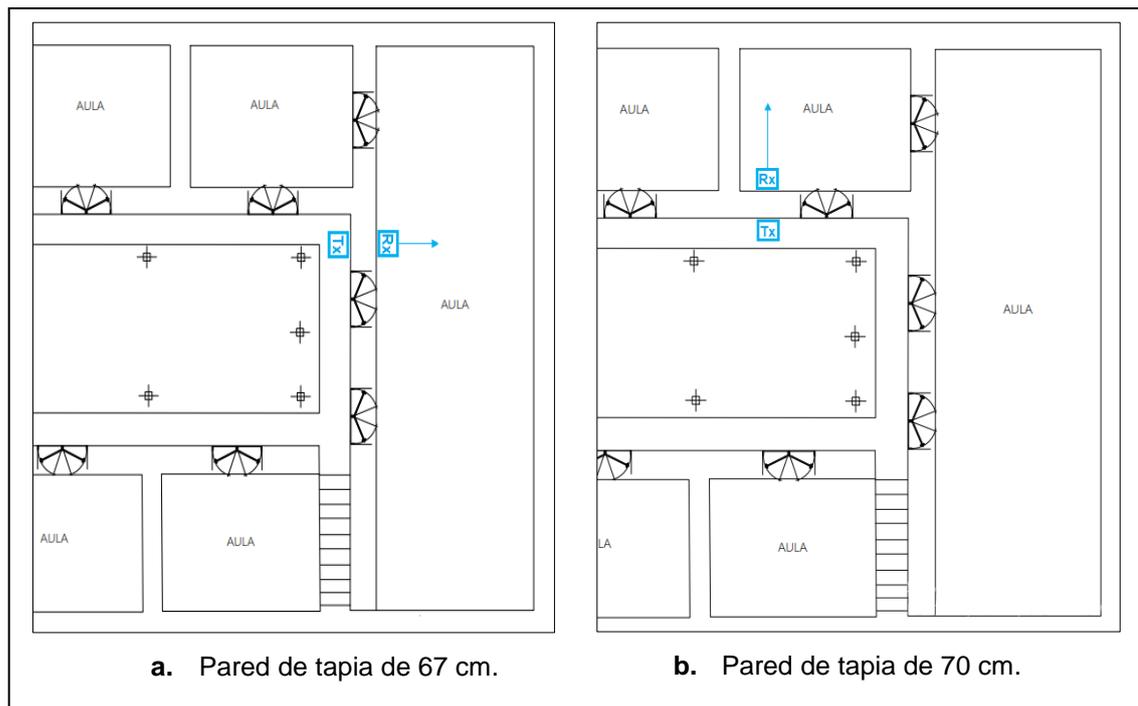


Figura 4.8. Ubicación de los puntos de medición en el plano de la edificación sobre paredes de tapia (escala 1:500).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



a. Pared de tapia de 67 cm.



b. Pared de tapia de 70 cm.

Figura 4.9. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de la planta alta de la edificación.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.1.2.2. Entrepiso.

El entrepiso que separa ambas plantas es de madera. En la Figura 4.10 se observa la ubicación de los equipos de medición en cada una de las plantas. La Figura 4.11 muestra las imágenes de la toma de datos sobre el obstáculo.

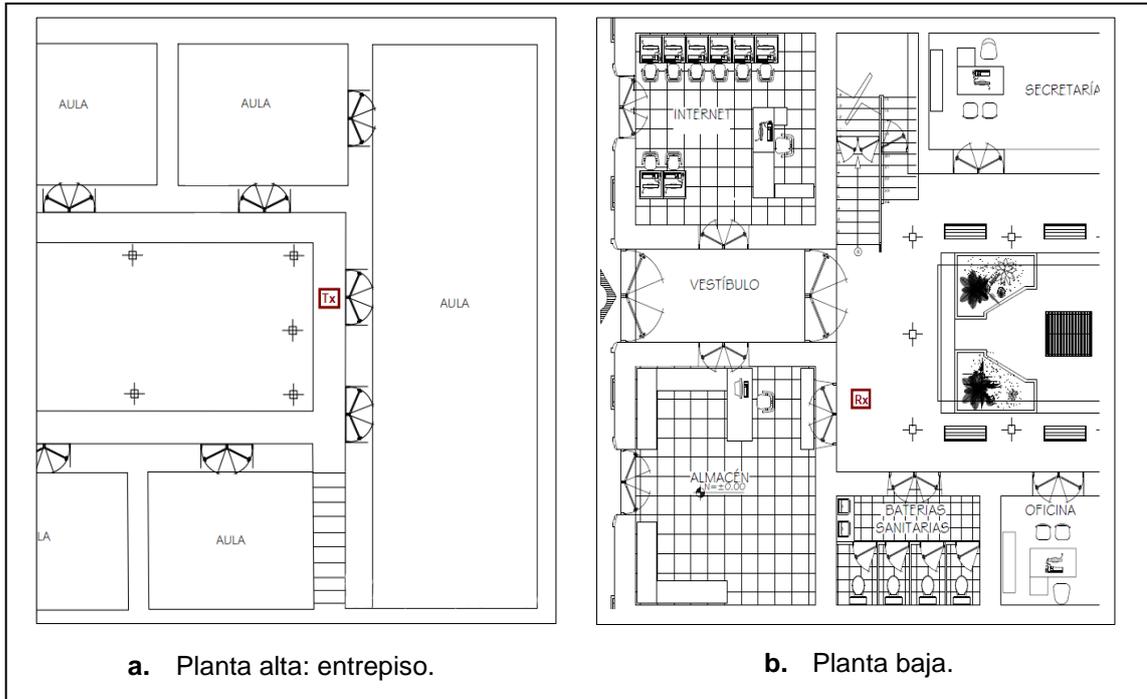


Figura 4.10. Ubicación de los puntos de medición para el entrepiso de madera (escala 1:500).
Fuente: (Piedra, 2009)
Elaboración: Autores



Figura 4.11. Medición realizada sobre el entrepiso de madera de la edificación.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.1.2.3. Entrepiso y pared de tapia.

La toma de medidas se realiza sobre una pared de tapia de 89 cm que se encuentra en la planta baja y el entrepiso de madera. La Figura 4.12 indica los puntos de medición para la planta baja y alta; mientras que la Figura 4.13 muestra las fotografías de estas mediciones.

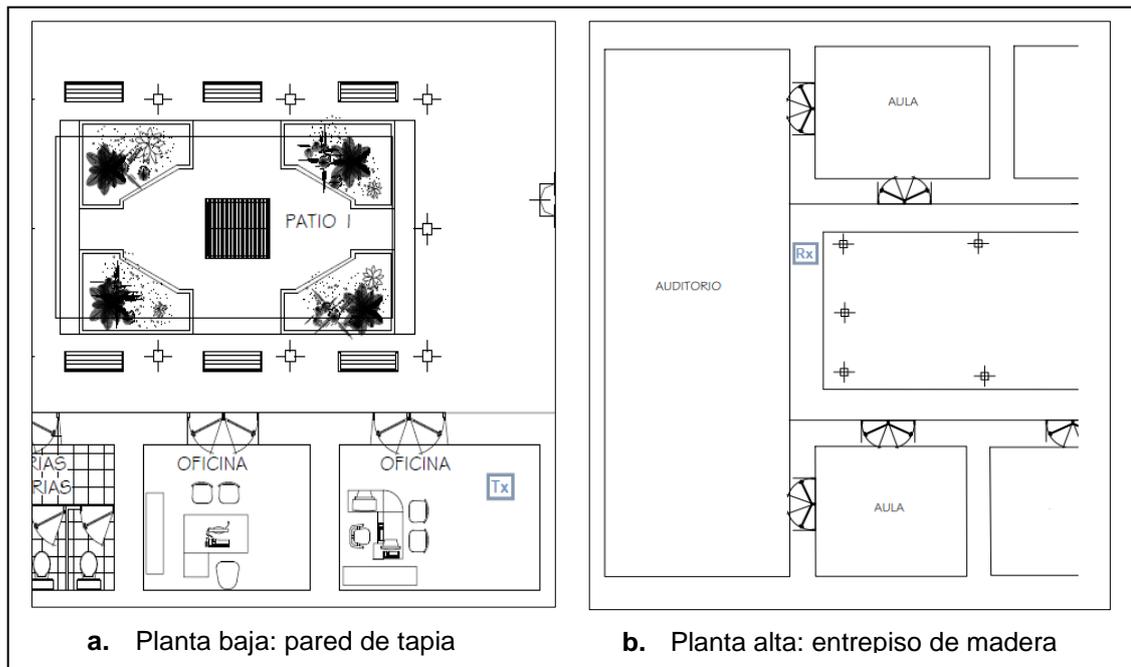


Figura 4.12. Ubicación de los puntos de medición para el obstáculo entrepiso-pared (escala 1:500).

Fuente: (Piedra, 2009)

Elaboración: Autores

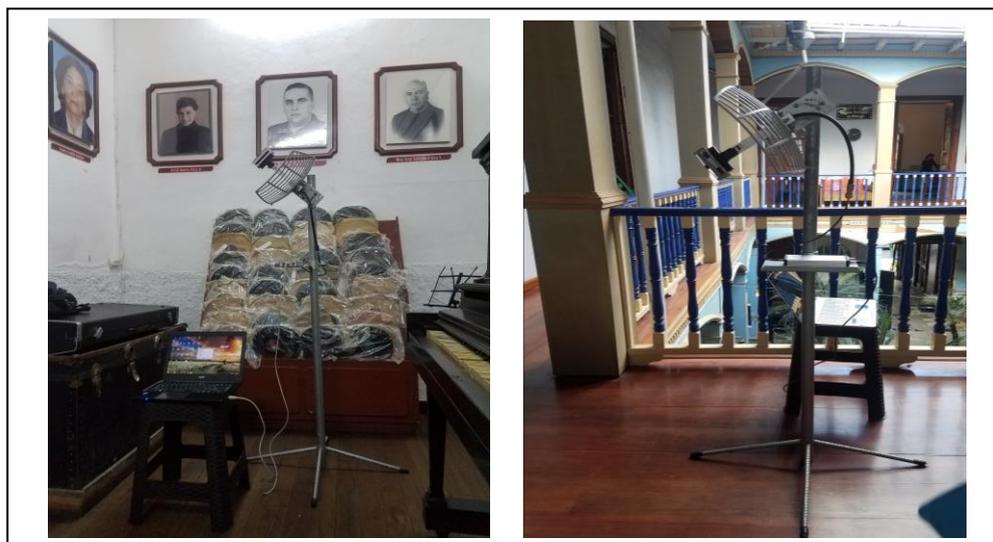


Figura 4.13. Mediciones realizadas sobre el obstáculo entrepiso-pared.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.2. Escenario 2: Instituto Nacional de Patrimonio y Cultura (INPC).

Este edificio consta de 2 plantas, en las cuales funcionan áreas de trabajo como oficinas y salas de reuniones. A continuación, se detallan cada una de plantas y obstáculos donde se llevaron a cabo las mediciones.

4.2.2.1. Planta baja.

La primera planta está conformada por una serie de oficinas, una sala de reuniones, un laboratorio y una cafetería, además consta de un patio central con dos pequeños pasillos.

4.2.2.1.1. Pared de tapia.

Esta edificación dispone de paredes de tapia recubiertas con una pequeña capa de concreto. Las mediciones en esta planta se realizaron sobre una pared de tapia de 63 cm correspondiente a la sala de reuniones. En la Figura 4.14 y Figura 4.15 se puede observar la ubicación del sistema de medición y las imágenes de la toma de datos respectivamente.

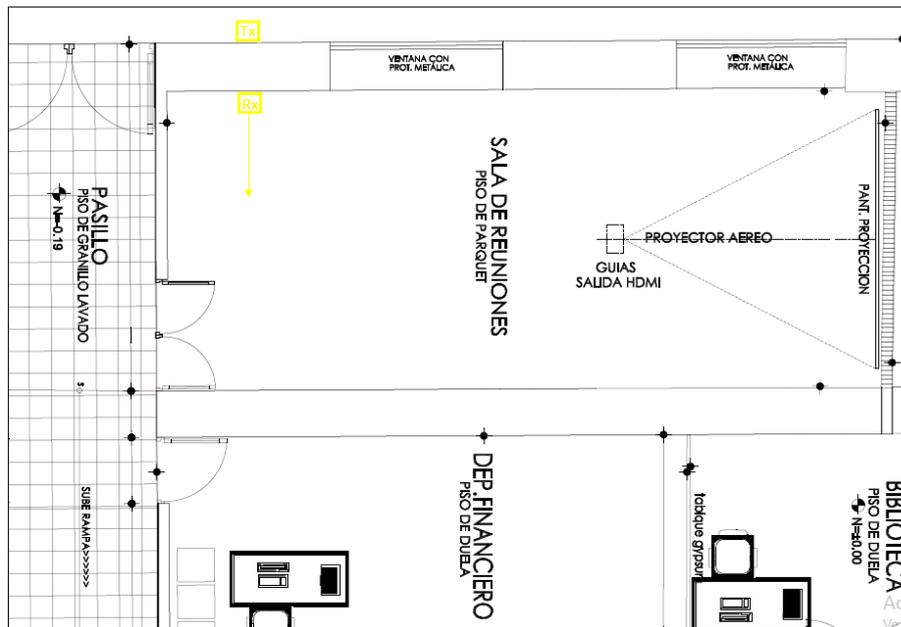


Figura 4.14. Medición para una pared de tapia de 63 cm recubierta con concreto (escala 1:100).

Fuente: (INPC, 2014)

Elaboración: Autores



Figura 4.15 Mediciones realizadas sobre una pared de tapia del INPC.
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

4.2.2.1.2. Dos paredes de tapia.

Esta evaluación se la realizó sobre dos paredes de tapia las cuales poseen un grosor de 63 cm, y corresponden a la sala de reuniones y a una oficina. La ubicación de los equipos de medición se muestra en la Figura 4.16 y Figura 4.17.

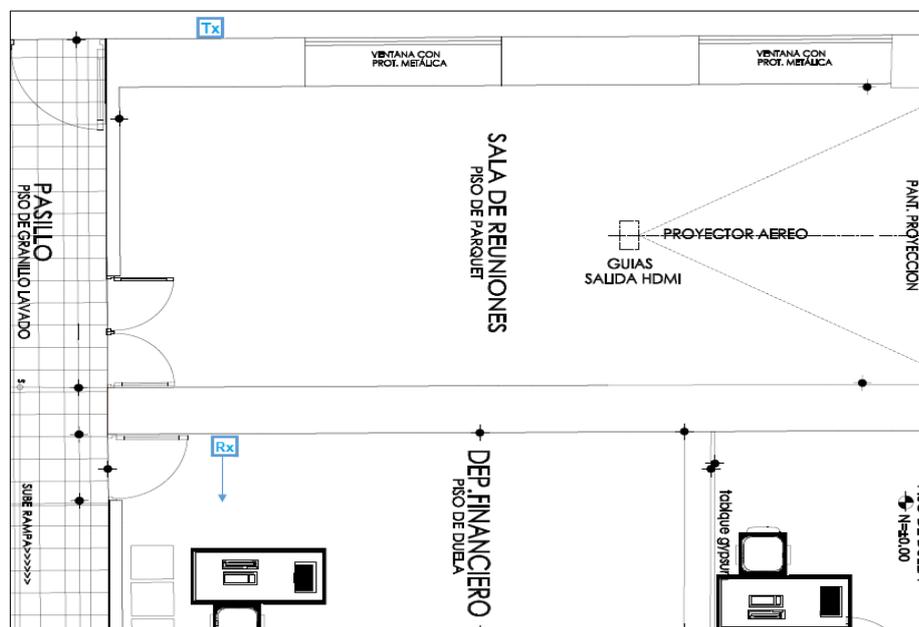


Figura 4.16. Ubicación del punto de medición para dos paredes de tapia (escala 1:100).
 Fuente: (INPC, 2014)
 Elaboración: Autores

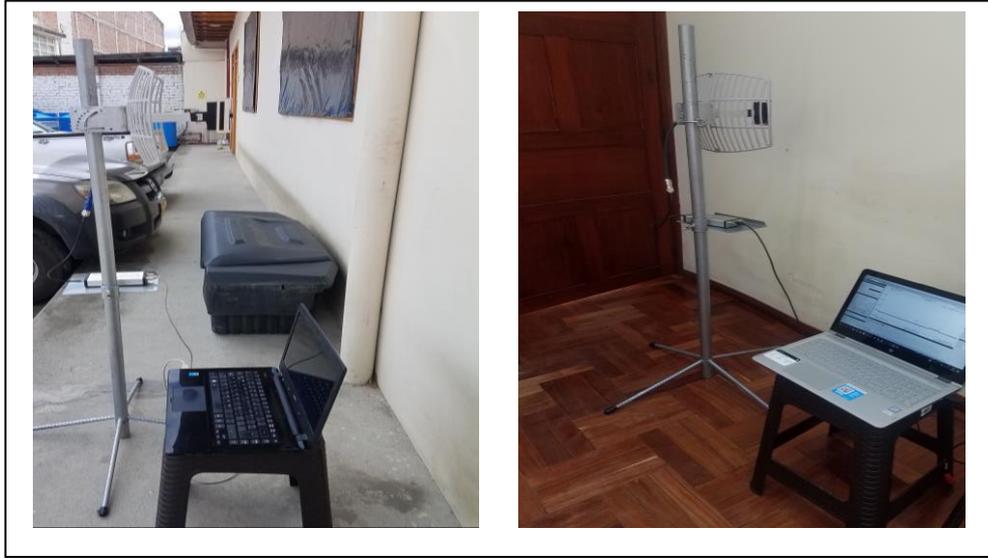


Figura 4.17. Medición sobre dos paredes de tapia de 63 cm recubiertas de concreto.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.2.1.3. Puertas de madera.

Son puertas con 3.5 cm de grosor. En la Figura 4.18 se muestra la ubicación de los equipos y en la Figura 4.19 se observan fotografías del lugar en donde se efectuaron las mediciones.

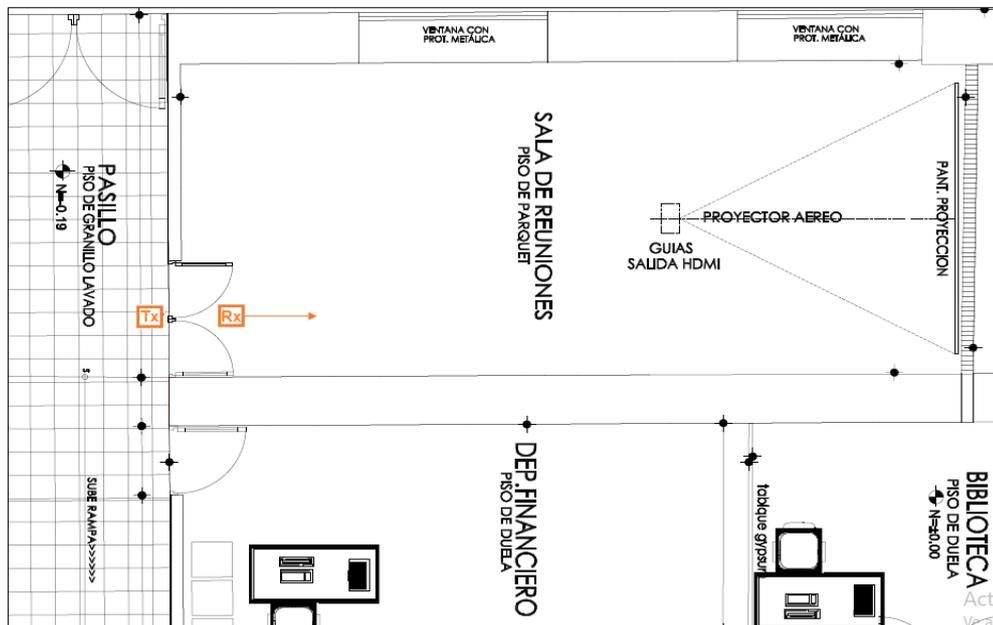


Figura 4.18. Punto de medición realizado sobre una puerta de madera (escala 1:100).
Fuente: (INPC, 2014)
Elaboración: Autores



Figura 4.19. Medición realizada sobre una puerta de madera de la edificación.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.2.2. Planta alta.

La planta alta está constituida principalmente por oficinas y un amplio pasillo.

4.2.2.2.1. Pared de tapia.

La toma de mediciones para este obstáculo se la realizó sobre una pared de tapia y concreto de 66 cm correspondiente a una oficina. En la Figura 4.20 se muestra la ubicación de los equipos de medición, y en la Figura 4.21 se observa la toma de datos sobre este obstáculo.

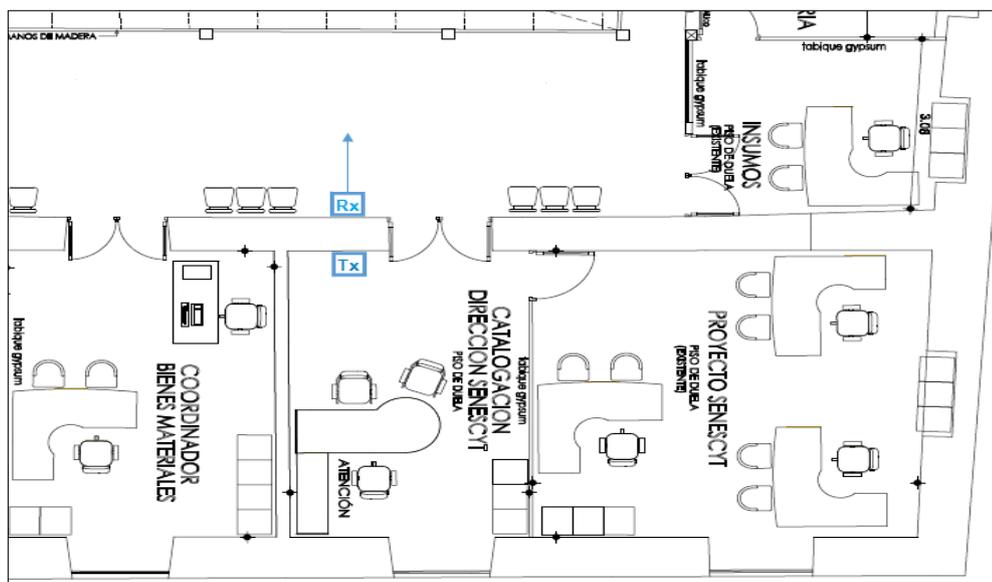


Figura 4.20. Punto de medición para una pared de tapia recubierta con concreto (escala 1:100).
Fuente: (INPC, 2014)
Elaboración: Autores

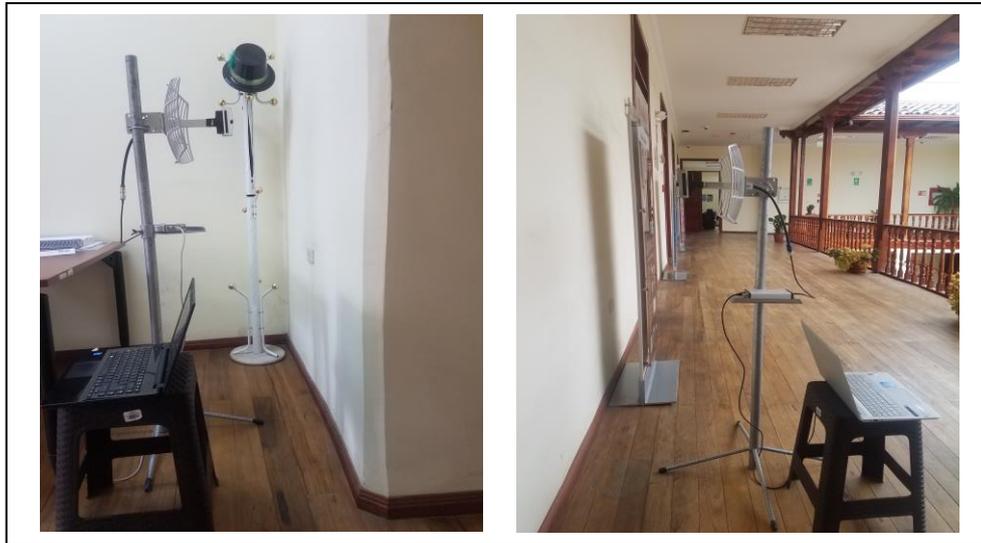


Figura 4.21. Medición sobre una pared de tapia de 66 cm recubierta de concreto.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.2.2.2. Entrepiso.

El entrepiso que separa la planta alta de la baja está constituido por una capa de madera y otra de gypsum. La Figura 4.22 muestra la ubicación de los equipos de medición en la planta baja y alta. En la Figura 4.23 se observa una fotografía de las mediciones realizadas para este obstáculo.

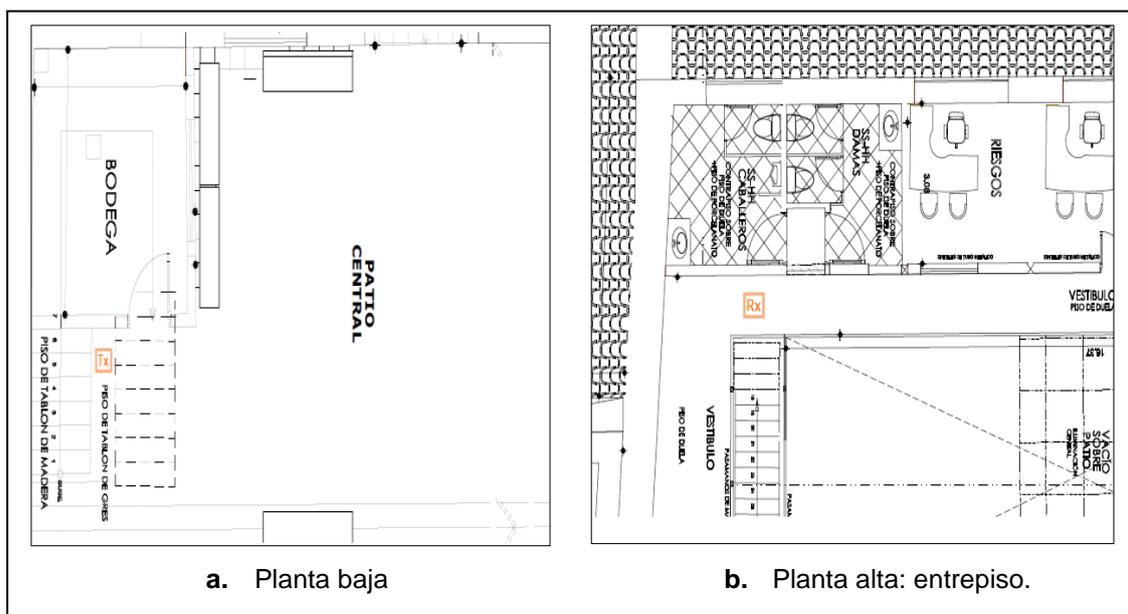


Figura 4.22. Ubicación del punto de medición para el entrepiso de madera-gypsum (escala 1:100).
Fuente: (INPC, 2014)
Elaboración: Autores



Figura 4.23. Medición realizada sobre el entrepiso de madera-gypsum de la edificación.
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

4.2.2.2.3. Entrepiso y pared de tapia.

En este obstáculo se consideró una pared de tapia de 63 cm y el entrepiso de madera-gypsum. En la Figura 4.24 se puede observar la ubicación de los equipos de transmisión y recepción; mientras que en la Figura 4.25 se puede apreciar una imagen de la obtención de datos para el obstáculo en cuestión.

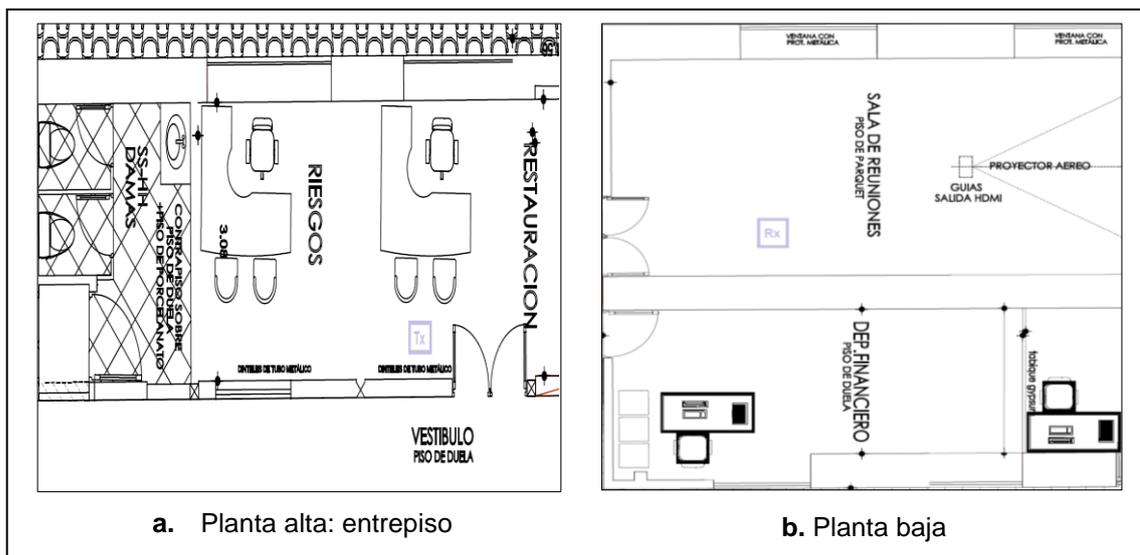


Figura 4.24. Ubicación de las mediciones realizadas sobre el obstáculo entrepiso-pared de la edificación (escala 1:100).
 Fuente: (INPC, 2014)
 Elaboración: Autores

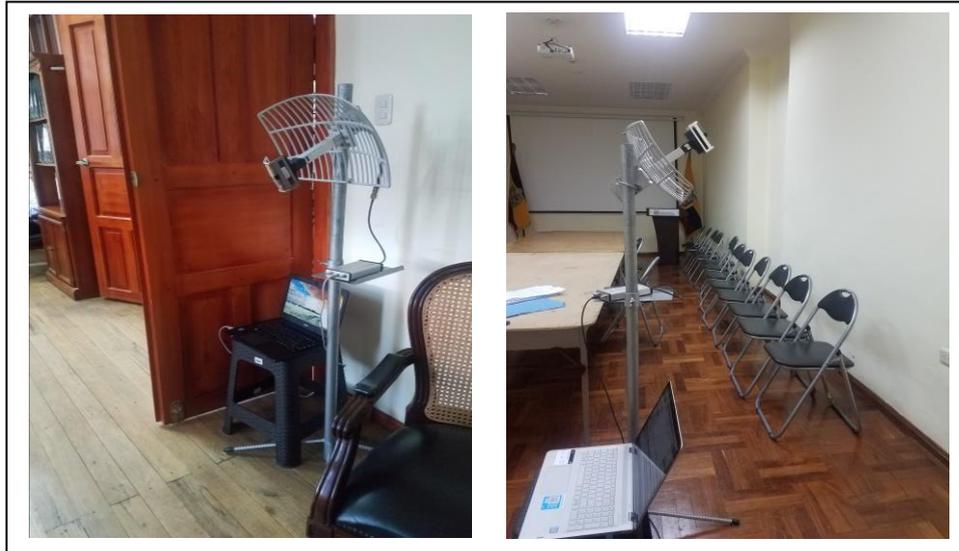


Figura 4.25. Mediciones realizadas sobre el obstáculo entre piso-pared de la edificación.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.3. Escenario 3: Monasterio de Santo Domingo.

Esta edificación está constituida por dos plantas. Dentro de la planta baja se encuentran aulas, bodegas, comedores, salas de reuniones, un patio central, entre otros. La planta alta consta de dormitorios, oratorios, biblioteca, bodegas y demás.

4.2.3.1. Planta baja.

4.2.3.1.1. Paredes de tapia.

Las mediciones se realizaron sobre paredes de tapia de 92 cm y de 65 cm que corresponden a un aula y bodega respectivamente. Éstas se pueden apreciar en la Figura 4.26. En la Figura 4.27 se muestran imágenes tomadas durante las mediciones sobre estos dos obstáculos.

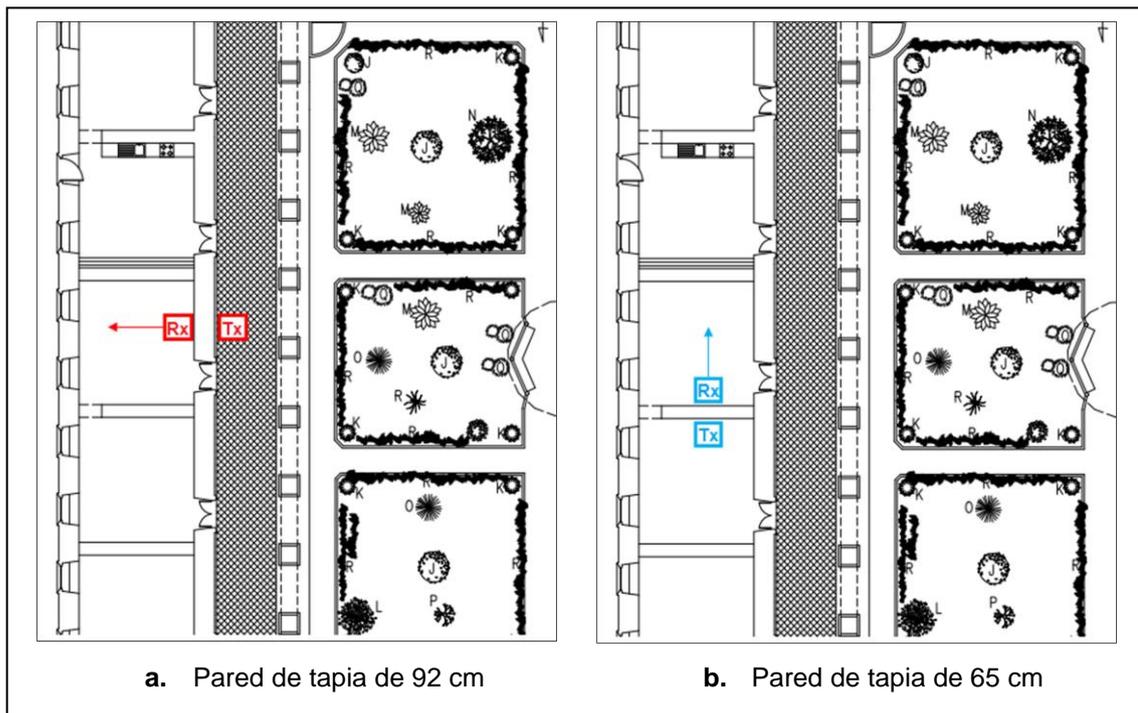


Figura 4.26. Ubicación de los puntos de medición en el plano de la edificación sobre paredes de tapia (escala 1:600).

Fuente: (Monteros, 2008)

Elaboración: Autores



Figura 4.27. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de la edificación.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.3.1.2. *Dos paredes de tapia.*

En este caso se consideraron dos paredes de tapia de 65 cm. La ubicación de los equipos se puede observar en la Figura 4.28; y a su vez en la Figura 4.29 se aprecian fotografías del obstáculo en consideración.

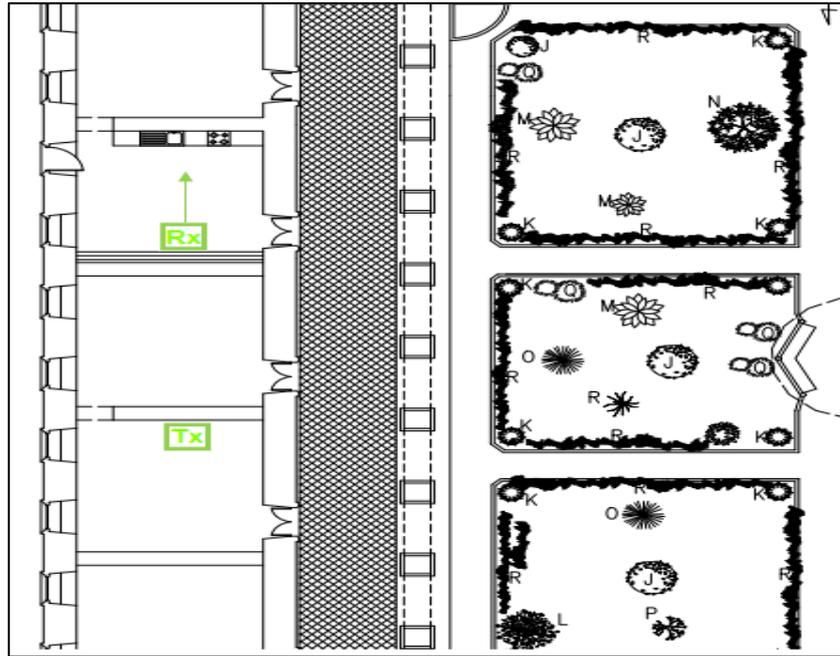


Figura 4.28. Punto de medición para dos paredes de tapia de 65 cm (escala 1:600).

Fuente: (Monteros, 2008)

Elaboración: Autores



Figura 4.29. Mediciones realizadas sobre dos paredes de tapia de 65 cm

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.3.1.3. Puertas de madera.

Presentan un grosor de 4 cm aproximadamente. La puerta seleccionada para la medición corresponde al área del comedor y su ubicación se puede apreciar en la Figura 4.30 y la Figura 4.31.

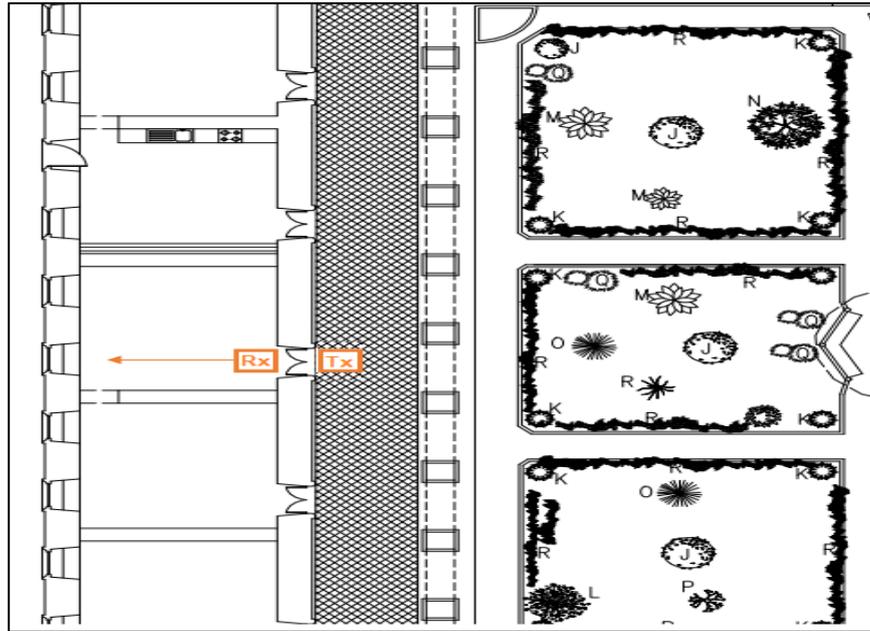


Figura 4.30. Lugar de medición para una puerta de madera del monasterio (escala 1:600).

Fuente: (Monteros, 2008)

Elaboración: Autores



Figura 4.31. Medición realizada sobre una puerta de madera.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.3.2. *Planta alta.*

4.2.3.2.1. *Pared de tapia.*

En la planta alta la adquisición de datos se realiza sobre una pared de tapia de 30 cm. En la Figura 4.32 y la Figura 4.33 se muestra la ubicación de la misma junto a los equipos de medición.

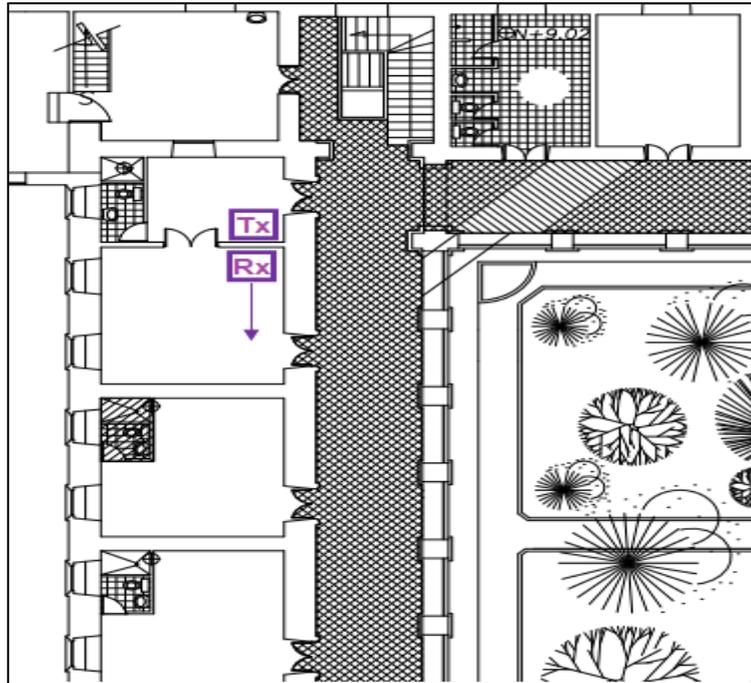


Figura 4.32. Punto de medición para una pared de tapia de 30 cm (escala 1:600).

Fuente: (Monteros, 2008)

Elaboración: Autores



Figura 4.33. Medición realizada sobre una pared de tapia de 30 cm.

Elaboración: Autores

Elaboración: Autores

4.2.4. Escenario 4: Centro Cultural Bernardo Valdiviezo.

Este inmueble posee dos plantas. En la planta baja se encuentran oficinas, salas de galerías, aulas y un patio central. El área de la planta alta está dividida por aulas y salas de galerías.

4.2.4.1. Planta baja.

4.2.4.1.1. Paredes de tapia.

Las paredes consideradas para realizar las mediciones sobre este tipo de obstáculo poseen un grosor de 15 cm, 45 cm, 90 cm, y 1 m. Su ubicación se muestra en la Figura 4.34, mientras que las mediciones se ilustran en la Figura 4.35 y Figura 4.36.

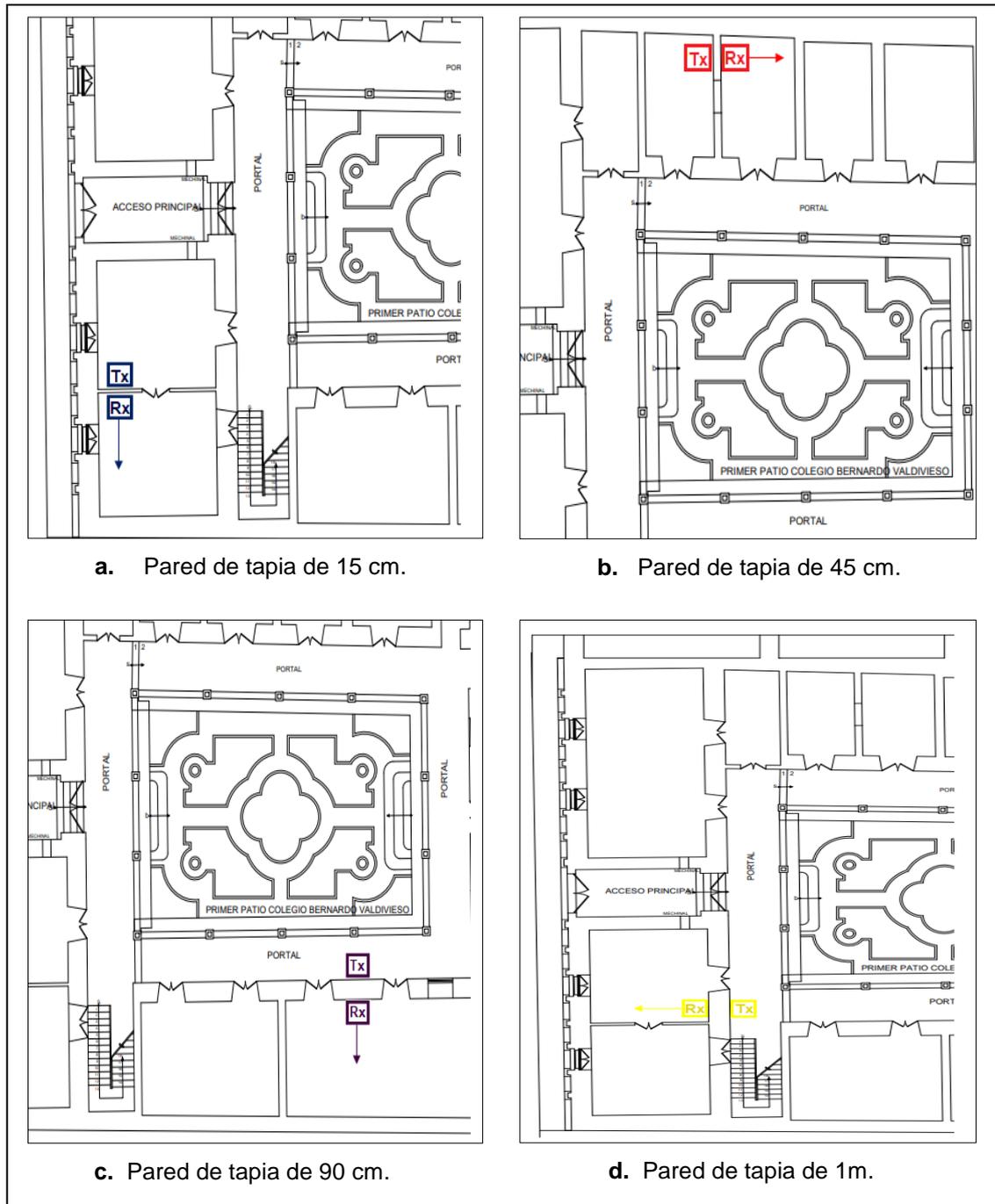


Figura 4.34. Ubicación de los puntos de medición sobre paredes de tapia de distinto grosor (escala 1:500).

Fuente: (Sinchire, 2008)

Elaboración: Autores



a. Pared de tapia de 15 cm.



b. Pared de tapia de 45 cm.

Figura 4.35. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de 30 cm y 45 cm.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores



c. Pared de tapia de 90 cm.

d. Pared de tapia de 1 m.

Figura 4.36. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de 90 cm y 1 m.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.4.1.2. *Dos paredes de tapia.*

En este caso las paredes poseen un grosor de 45 cm y 53 cm respectivamente. Las mismas que se ilustran en la Figura 4.37 y Figura 4.38.

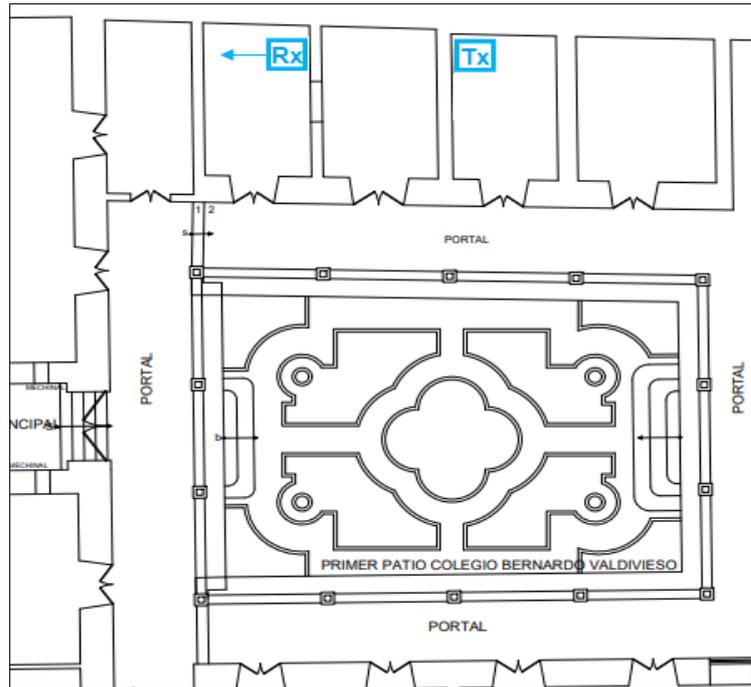


Figura 4.37. Punto de medición sobre dos paredes tapia de 45 cm y 53 cm (escala 1:500).
 Fuente: (Sinchire, 2008)
 Elaboración: Autores

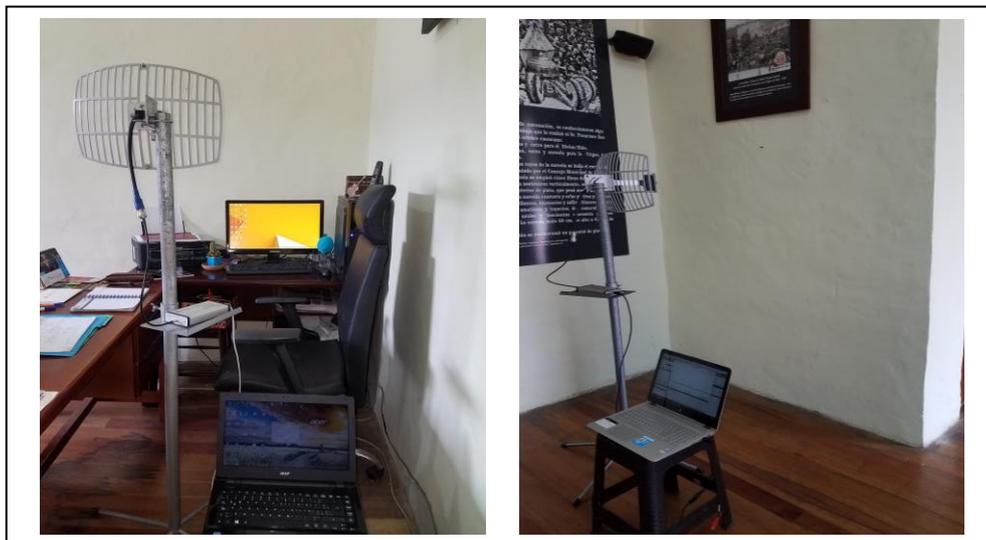


Figura 4.38. Medición realizada sobre dos paredes tapia de 53 cm y 45 cm.
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

4.2.4.1.3. Puertas de madera.

La medición fue realizada sobre una puerta de 3,5 cm de grosor que corresponde a una sala de galería. La Figura 4.39 y Figura 4.40 muestran la ubicación de los equipos de medición sobre este obstáculo.

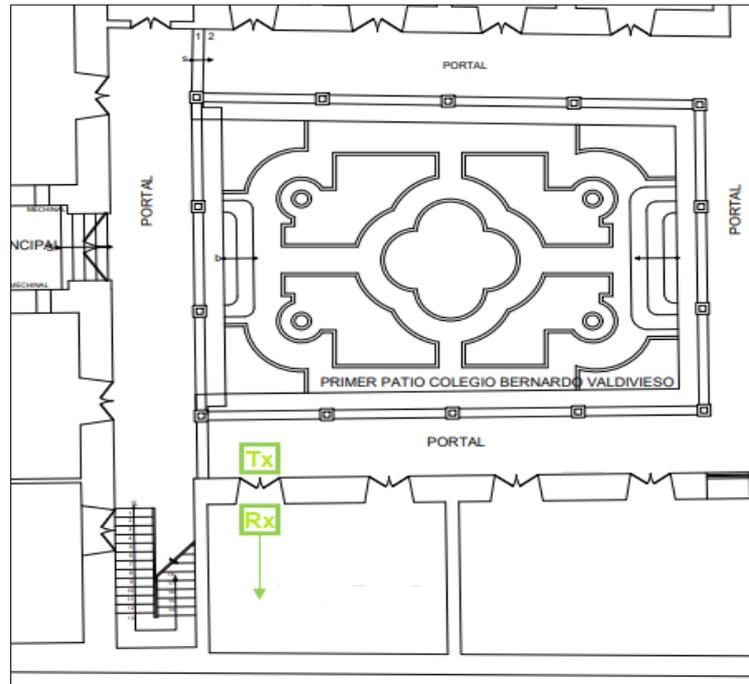


Figura 4.39. Ubicación del punto de medición para una puerta de madera (escala 1:500).

Fuente: (Sinchire, 2008)

Elaboración: Autores



Figura 4.40. Medición realizada sobre una puerta de madera

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.4.2. Planta alta.

4.2.4.2.1. Entrepiso.

El entrepiso de esta edificación es de madera. La ubicación de cada uno de los puntos de medición y las mediciones realizadas se pueden observar en la Figura 4.41 y Figura 4.42 respectivamente.

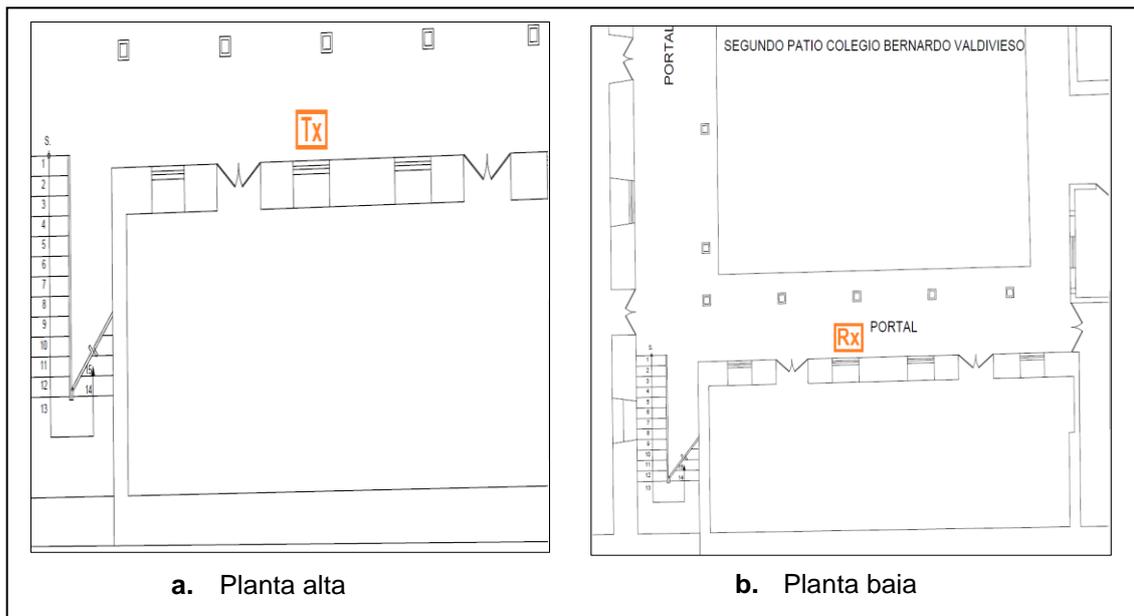


Figura 4.41. Ubicación de los puntos de medición para el entrepiso de madera (escala 1:500).
Fuente: (Sinchire, 2008)
Elaboración: Autores



Figura 4.42. Medición realizada sobre el entrepiso de madera de la edificación.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.4.2.2. Pared de tapia – entrepiso.

Para esta medición se consideró una pared de tapia de 1m de grosor y el entrepiso de madera. La medición sobre este obstáculo se muestra en la Figura 4.43 y Figura 4.44.

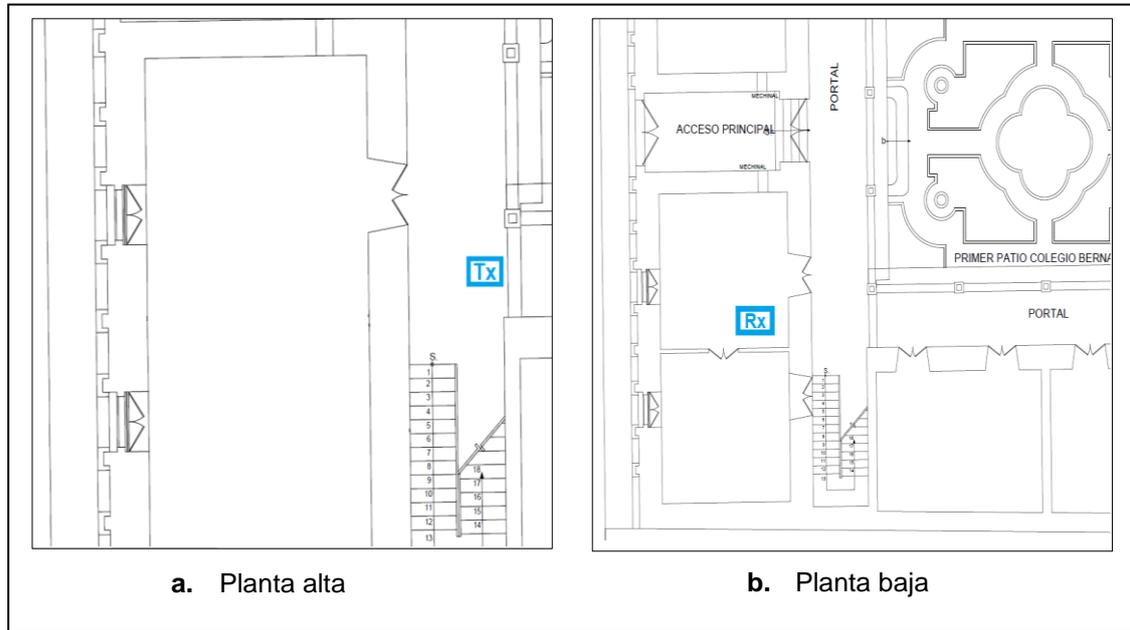


Figura 4.43. Ubicación de los puntos de medición para el obstáculo pared-entrepiso (escala 1:500).
Fuente: (Sinchire, 2008)
Elaboración: Autores



Figura 4.44. Medición realizada sobre una pared de tapia y entrepiso de madera.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.5. Escenario 5: Museo de la Cultura Lojana.

Esta edificación consta de dos plantas. En la planta baja se encuentran distribuidas oficinas, salas de galerías, un auditorio, un patio central y bodegas. La planta alta esta divide en salas de galería, bodegas, y oficinas.

4.2.5.1. Planta baja.

4.2.5.1.1. Puertas de madera.

Las puertas de madera poseen grosor de 3 cm. La ubicación de los equipos se aprecia en la Figura 4.45; mientras que en la Figura 4.46 se muestran fotografías de las mediciones realizadas.

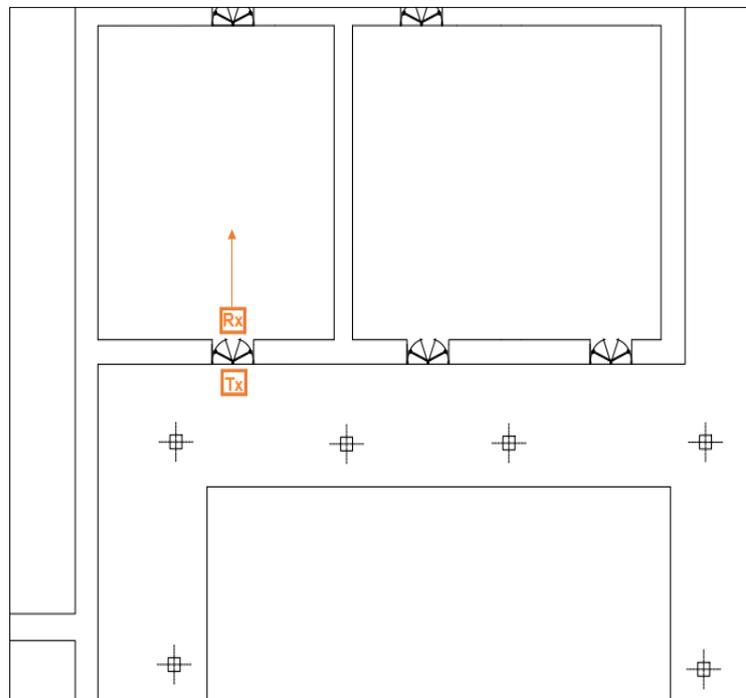


Figura 4.45. Ubicación del punto de medición para una puerta de madera (escala 1:500).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



Figura 4.46. Medición realizada sobre una puerta de madera

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.5.2. *Planta alta.*

4.2.5.2.1. *Paredes de tapia.*

Las paredes de tapia consideradas para la validación en este escenario poseen un grosor de 47 cm, 76 cm, y 90 cm. Cada uno de los puntos de medición se indican en la Figura 4.47. Las mediciones realizadas se muestran en la Figura 4.48.

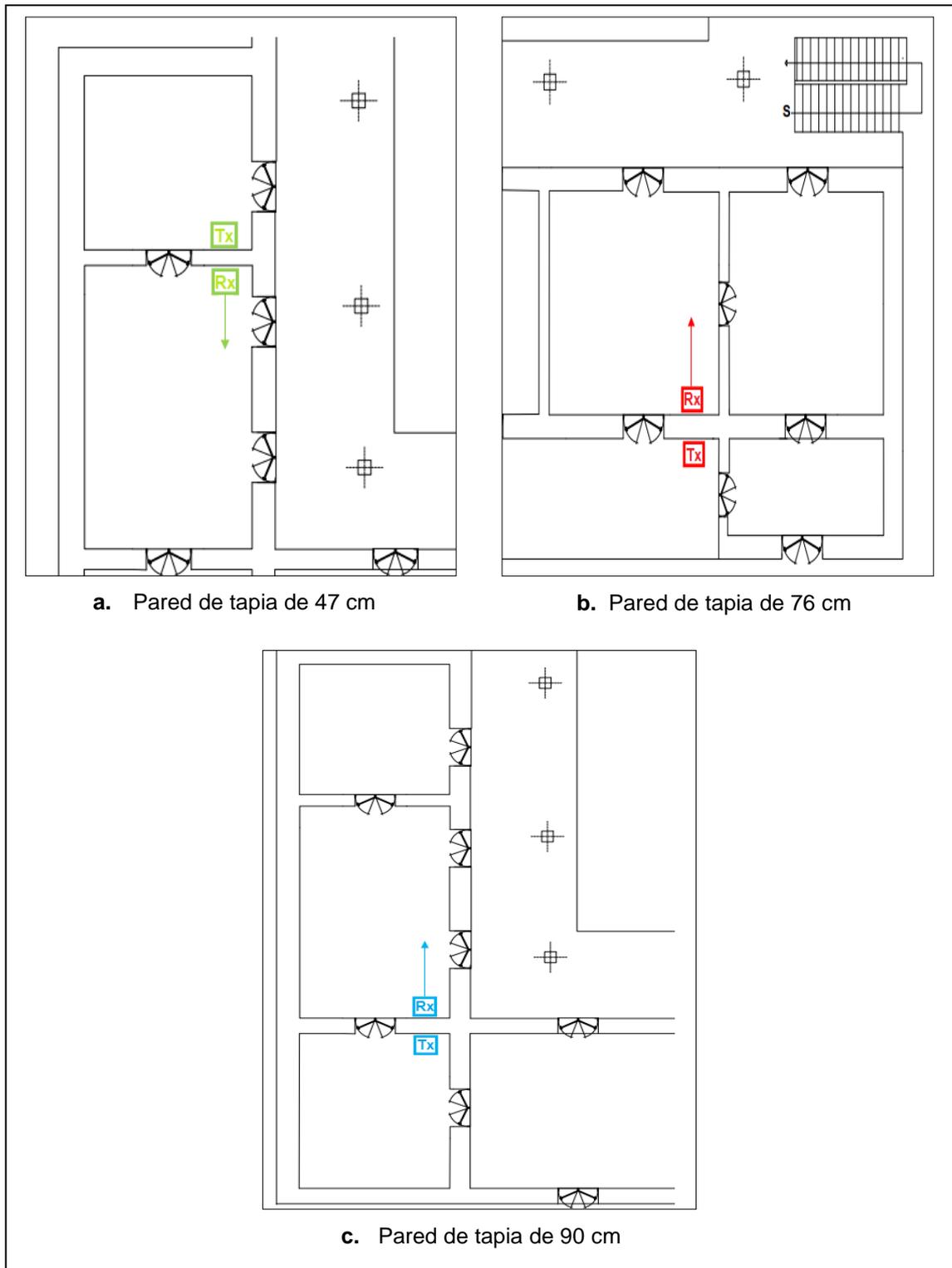


Figura 4.47. Ubicación de los puntos de medición para paredes de tapia de diversa dimensión (escala 1:500).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

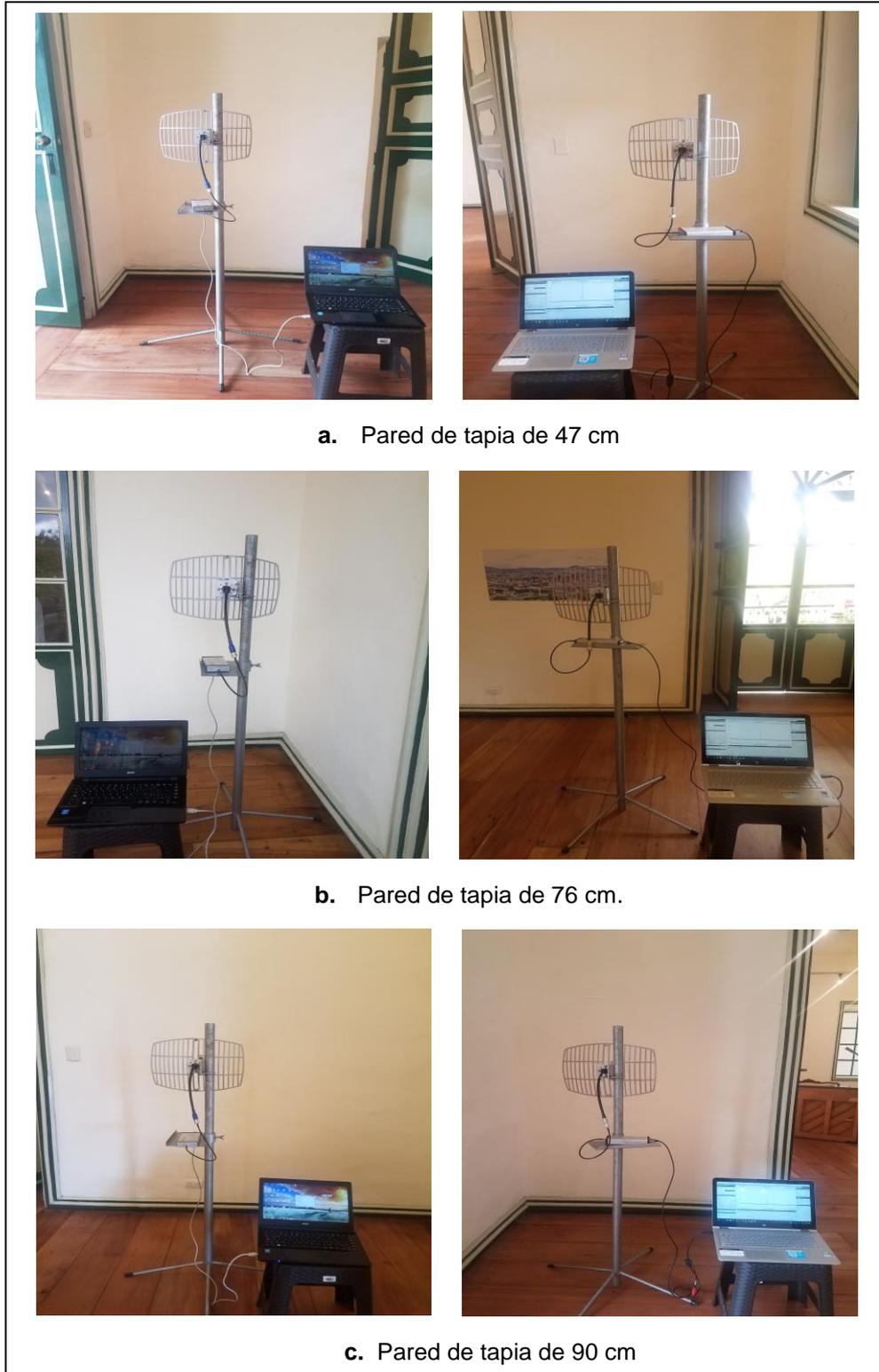


Figura 4.48. Mediciones realizadas sobre paredes de tapia de distinta dimensión.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.5.2.2. Dos paredes de tapia.

Para este tipo de obstáculo, la medición se la realizó sobre dos paredes de tapia de 47 cm y 90 cm, y sobre dos paredes de tapia, ambas de 20 cm de grosor. La Figura 4.49 y Figura 4.50 muestran la ubicación del sistema de medición y los obstáculos antes mencionados respectivamente.

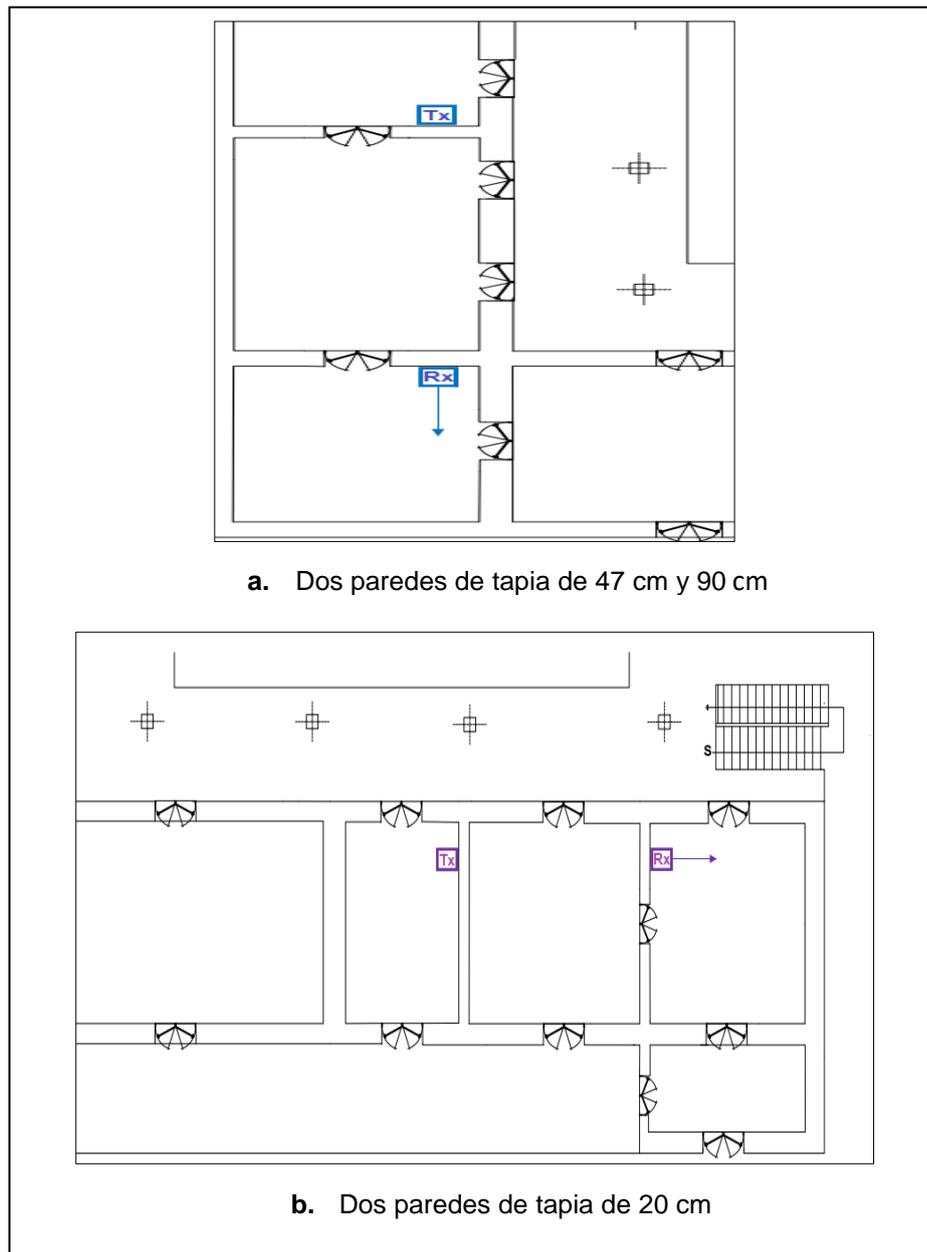


Figura 4.49. Puntos de medición para el obstáculo de dos paredes de tapia (escala 1:500).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



a. Dos paredes de tapia de 47 cm y 90 cm.

b. Dos paredes de tapia de 20 cm

Figura 4.50. Mediciones realizadas sobre los obstáculos de dos paredes de tapia
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.2.5.2.3. Entrepiso.

La estructura del entrepiso de esta edificación es de madera, en la Figura 4.51 se puede apreciar la ubicación de los puntos de medición; mientras que en la Figura 4.52 se muestran fotografías de las mediciones realizadas sobre el obstáculo.

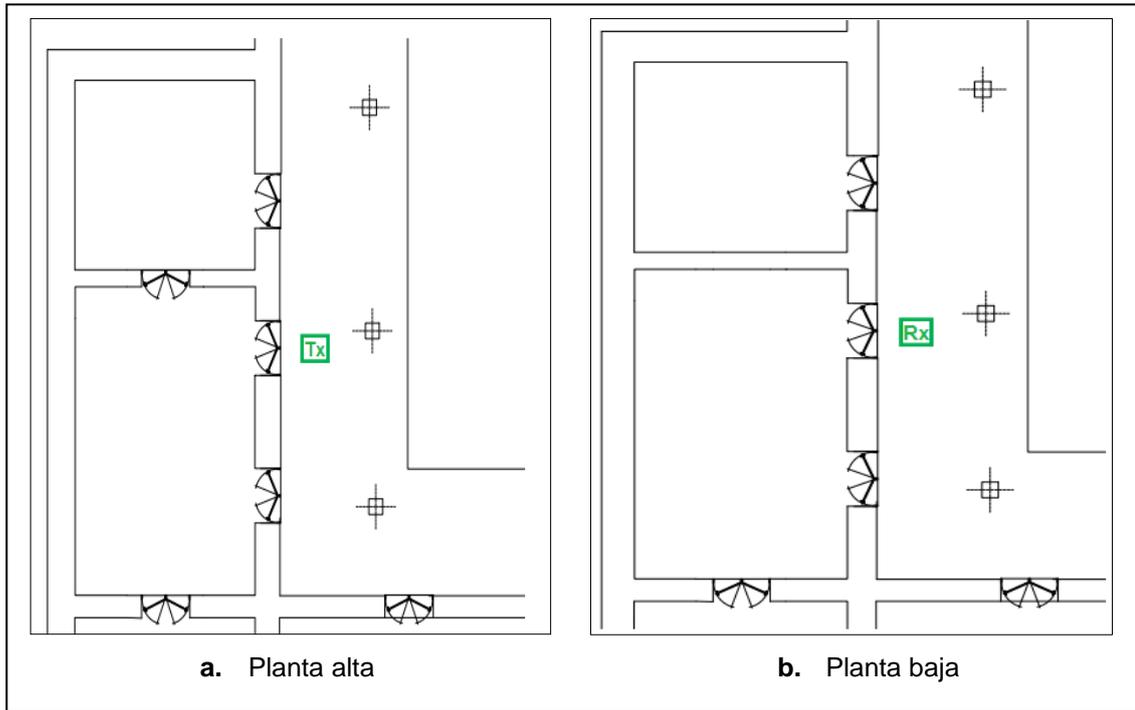


Figura 4.51. Ubicación de los puntos de medición para el entrepiso de madera (escala 1:500).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



Figura 4.52. Medición realizada sobre el entrepiso de madera.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.2.5.2.4. Pared de tapia – entrepiso.

Para este tipo de obstáculo se consideró una pared de tapia de 80 cm de grosor y un entrepiso de madera. Las mediciones realizadas se ilustran en la Figura 4.53 y Figura 4.54.

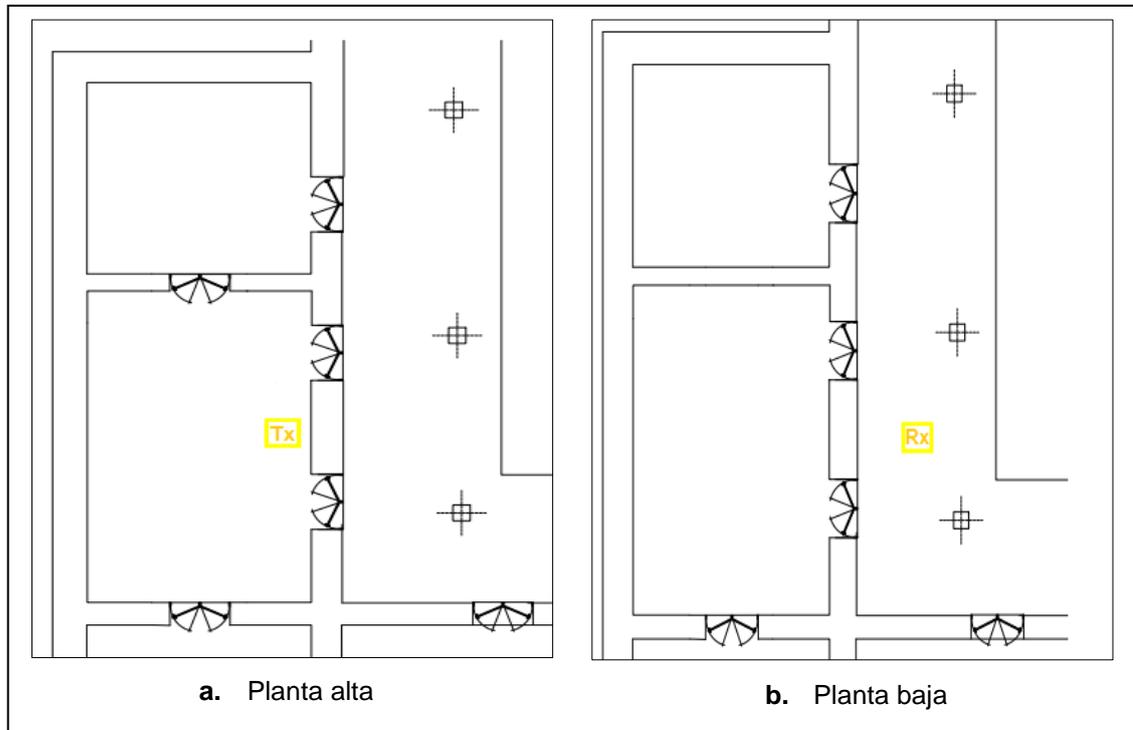


Figura 4.53. Ubicación de los puntos de medición para el obstáculo pared-entrepiso (escala 1:500).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



Figura 4.54. Medición realizada sobre el obstáculo pared-entrepiso

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

4.3. Comparación con resultados teóricos.

Dentro de la literatura analizada, para cada uno de los modelos teóricos considerados (Log-Distance, One Slope, Motley-Keenan, UIT) están definidos una serie de coeficientes de atenuación en base al ambiente u obstáculo en el que se estudia la propagación.

Para el análisis del modelo Log-distance (ver inciso 1.3.1.2), en la Tabla 1.1 se proporcionan valores de atenuación basados en el tipo de infraestructura interna del edificio en cuestión. En este caso el entorno de propagación seleccionado para paredes de tapia es: Oficina, partición dura; mientras que para puertas y entrepisos de madera: Oficina, partición suave.

En el caso del modelo One slope (ver inciso 1.3.1.3) los coeficientes de pérdida están de acuerdo a la robustez interna de la edificación y al número de pisos que posee. El entorno seleccionado para este modelo es: denso, de dos pisos, para paredes de tapia, y entorno grande para puertas y entrepisos.

El modelo Motley-Keenan (ver inciso 1.3.1.4) posee los coeficientes de atenuación mostrados en la Tabla 1.3, los cuales están en función del tipo de material de construcción del obstáculo. Para su análisis se ha optado por la categoría de "muros ligeros" para el caso de puertas y entrepisos de madera; y la categoría "muros pesados" para paredes de tapia.

Por último, para el modelo UIT (ver inciso 1.3.1.5) existe un coeficiente de pérdida de potencia de acuerdo a la frecuencia y al tipo de edificación; y un factor de atenuación por penetración en suelo. En este análisis se desprecia la atenuación por penetración en suelo debido a que la propagación de ondas se realiza en una misma planta. El coeficiente de pérdida seleccionado corresponde al entorno: edificio de oficinas a 2.4 GHz (ver Tabla 1.4).

Los distintos obstáculos de medición considerados en este trabajo de titulación han sido clasificados con el nombre de Obstáculo 1, Obstáculo 2 y así sucesivamente. A continuación, se describen los obstáculos considerados en la campaña de medición para la adquisición de datos.

- **Obstáculo 1: pared de tapia de 30 cm.**

La Figura 4.55 indica que las pérdidas de propagación crecen en un promedio de 0.56 dB cada 25 cm. Los modelos teóricos UIT, Log-distance, One Slope, y Motley-Keenan presentan un error máximo de: 10.60 dB, 4.43 dB, 11.80 dB y 5.02 dB respectivamente, con respecto al promedio de los valores medidos.

- **Obstáculo 2: paredes de tapia de 65 cm, 66 cm, 67 cm y 69 cm.**

De acuerdo a la Figura 4.56, la atenuación promedio medida aumenta 0,84 dB por cada 0,25 m de distancia. Los modelos teóricos UIT, Log-distance, One Slope, y Motley-Keenan presenta un error máximo de: 23,81 dB, 16,37 dB, 19,49 dB y 19,56 dB respectivamente, con respecto al promedio de los valores obtenidos en las mediciones.

- **Obstáculo 3: pared de tapia de 89 cm y 92 cm.**

En la Figura 4.57, se puede observar que la atenuación aumenta en un promedio de 0.88 dB cada 25 cm. Los errores máximos registrados son: 35.85 dB para el modelo UIT, 28.45 dB para Log-distance, 31.54 dB en One Slope, y 32.16 dB para el modelo Motley-Keenan.

- **Obstáculo 4: pared de tapia de 63 cm (cubierta de concreto).**

Según la Figura 4.58, la atenuación varía en un promedio de 0.78 dB por cada 25 cm. El error máximo que presentan los modelos teóricos UIT, Log-distance, One Slope y Motley-Keenan es de: 20.29 dB, 12.85 dB, 15.97 dB y 14.71 dB respectivamente.

- **Obstáculo 5: pared de tapia de 66 cm (cubierta de concreto).**

La Figura 4.59 muestra que la atenuación aumenta en promedio 0.81 dB por cada 25 cm. Los modelos teóricos considerados: UIT, Log-distance, One Slope, Motley-Keenan presentan un error de 28,45 dB, 21,01 dB, 24,13 dB y 22,87 dB respectivamente, con respecto a la atenuación medida.

- **Obstáculo 6: dos paredes de tapia de 63 cm (cubierta de concreto).**

En la Figura 4.60 se muestra que la atenuación aumenta en un promedio de 0,66 dB por cada 25 cm de distancia. El error máximo que presenta el modelo Motley-Keenan con respecto a los valores medidos es de 36,74 dB.

- **Obstáculo 7: dos paredes de tapia de 65 cm.**

Como lo muestra la Figura 4.61, la atenuación en este obstáculo varía con un promedio de 0,96 dB por cada 25 cm de incremento en la distancia. El modelo teórico Motley-Keenan presenta un error máximo de 35,62 dB.

- **Obstáculo 8: dos paredes de tapia de 66 cm.**

Como se muestra en la Figura 4.62, la atenuación introducida por este obstáculo aumenta 0,48 dB cada 25 cm. El error máximo presentado por el modelo Motley-Keenan es de 33,71 dB.

- **Obstáculo 9: puertas de madera.**

De acuerdo a la Figura 4.63, la atenuación varía en 0,84 dB por cada 25 cm. Los modelos teóricos UIT, Log-distance, One Slope, y Motley-Keenan presenta un error máximo de: 12,60 dB, 13,41 dB, 9,75 dB y 6,35 dB respectivamente, con relación al promedio de los valores medidos.

- **Obstáculo 10: entepiso de madera.**

En la Figura 4.64, se puede observar que la atenuación debida a este obstáculo varía en 0,56 dB por cada 25 cm. Los modelos teóricos UIT, Log-distance, One Slope, Motley-Keenan presentan un error máximo de: 2,88 dB, 11,96 dB, 6,17 dB y 4,17 dB respectivamente, en relación a la atenuación medida.

- **Obstáculo 11: entrepiso de madera-gypsum.**

Acorde con la Figura 4.65, las pérdidas de propagación se incrementan en promedio 0,68 dB cada 25 cm. Los errores máximos son: 2,69 dB para el modelo UIT, 13,70 dB para Log-distance, 4,88 dB en One Slope, y 2,88 dB para el modelo Motley-Keenan.

- **Obstáculo 12: pared de tapia de 89 cm - entrepiso de madera.**

En este obstáculo, el modelo Motley-Keenan presenta un error de 28,58 dB con respecto a la atenuación medida (ver Figura 4.66).

- **Obstáculo 13: pared de tapia y concreto de 63 cm - entrepiso de madera-gypsum.**

De acuerdo a la Figura 4.67, el modelo Motley-Keenan presenta un error de 13,44 dB en relación a la atenuación obtenida en la campaña de medición.

A continuación, los valores medidos para los obstáculos 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10 y 11 se contrastan con los valores obtenidos a través de los cuatro modelos teóricos considerados. Mientras que para los obstáculos 6, 7, 8, 12 y 13 los valores medidos se comparan únicamente con el modelo teórico Motley-Keenan, ya que es el único modelo que considera múltiples obstáculos. Para cada obstáculo se muestra una gráfica en donde se compara el promedio de la atenuación obtenida en la campaña de mediciones con la atenuación calculada a través de los respectivos modelos teóricos.

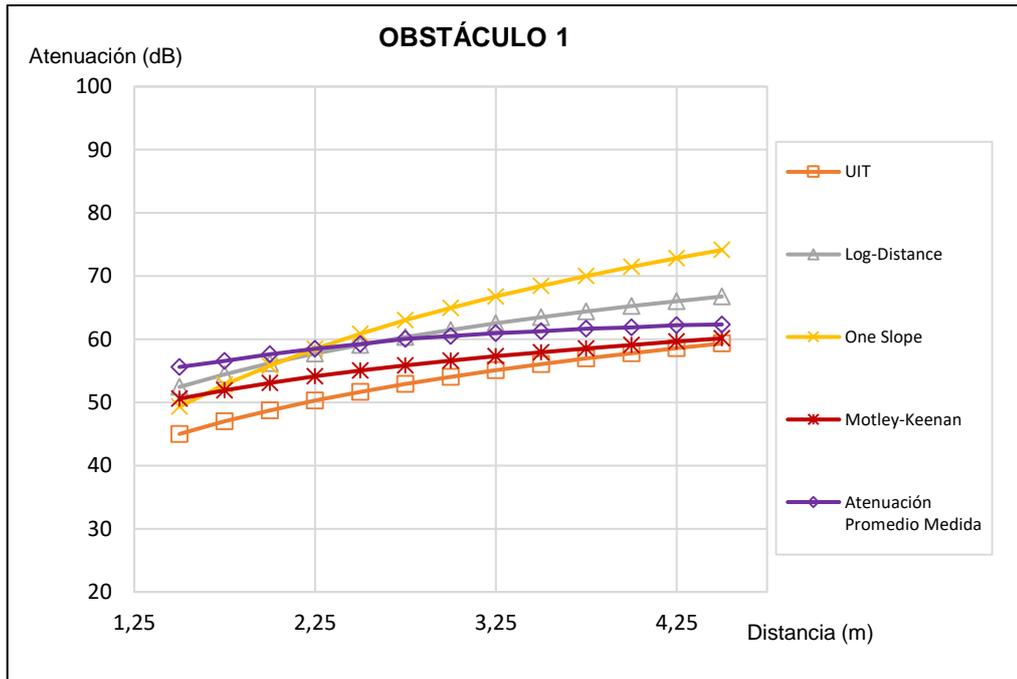


Figura 4.55. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 1 (pared de tapia de 30 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

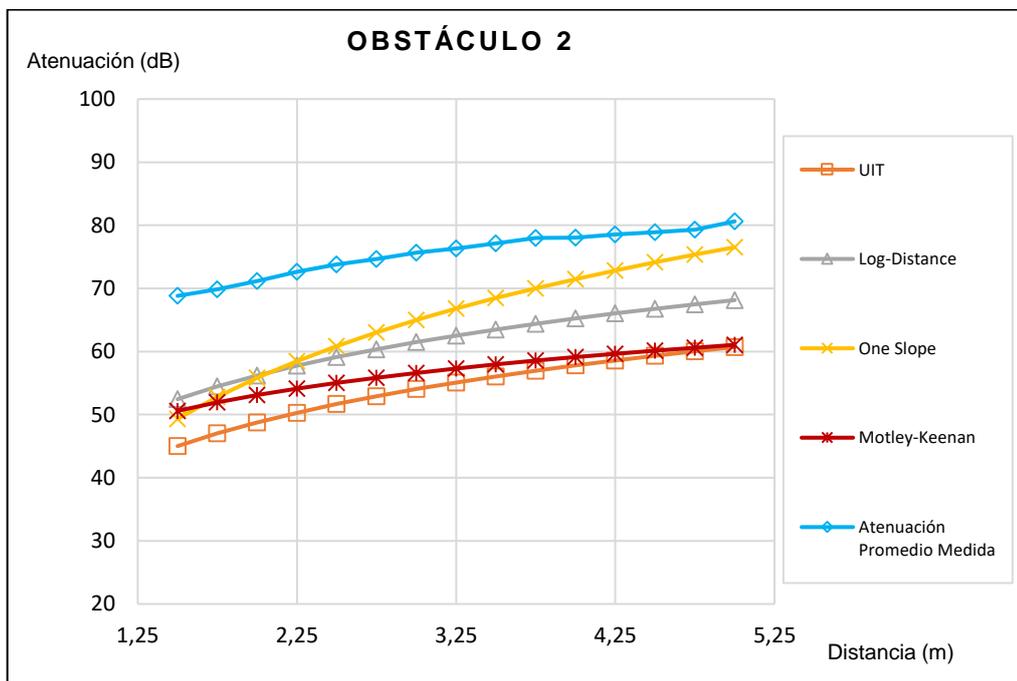


Figura 4.56. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 2 (paredes de tapia de 65-69 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

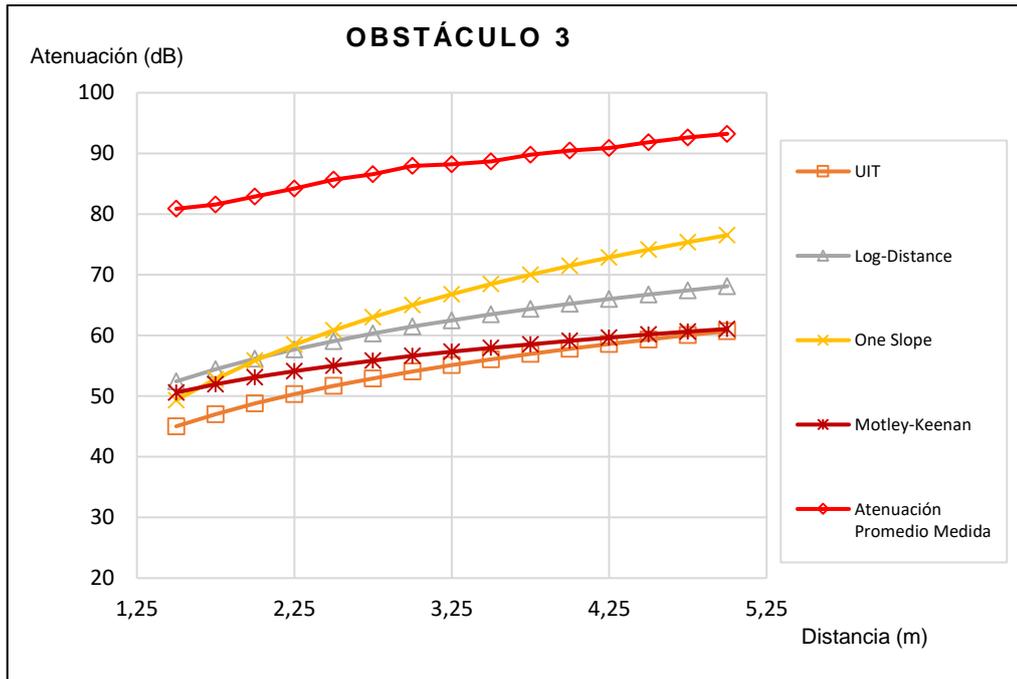


Figura 4.57. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 3 (paredes de tapia de 89-92 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

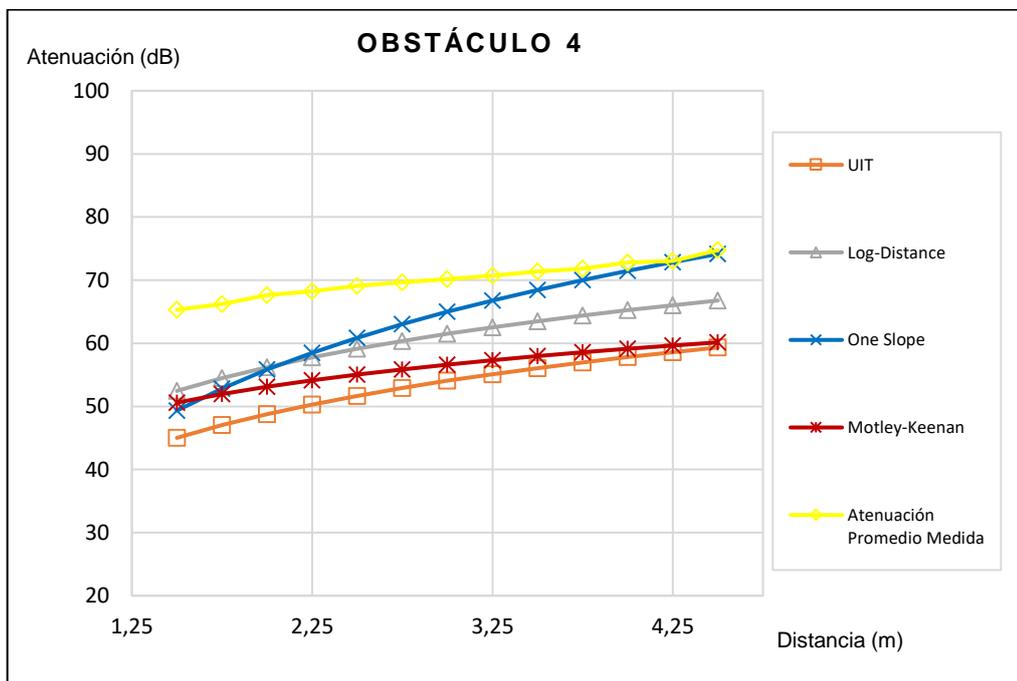


Figura 4.58. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 4 (pared de tapia de 63 cm recubierta con concreto).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

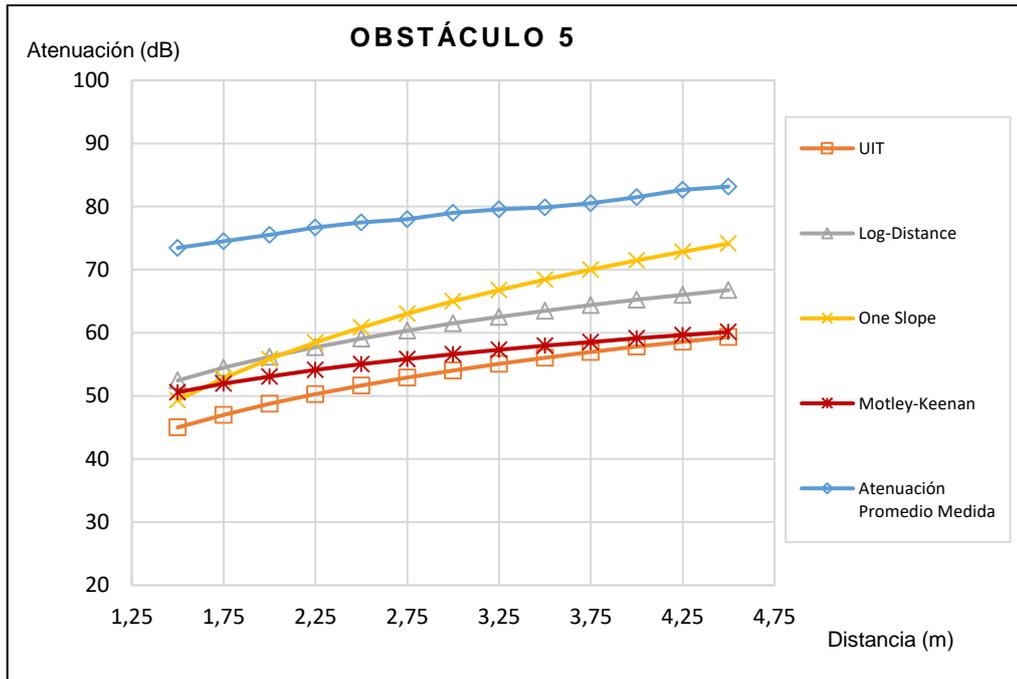


Figura 4.59. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 5 (pared de tapia de 66 cm recubierta con concreto).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

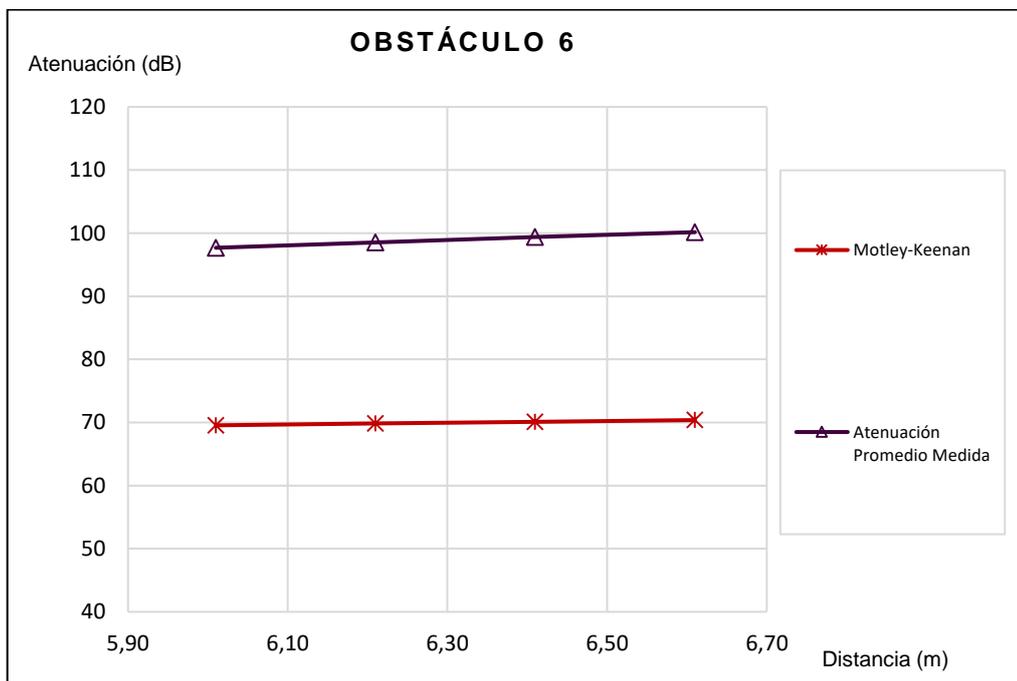


Figura 4.60. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 6 (dos paredes de tapia de 63 cm recubiertas de concreto).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

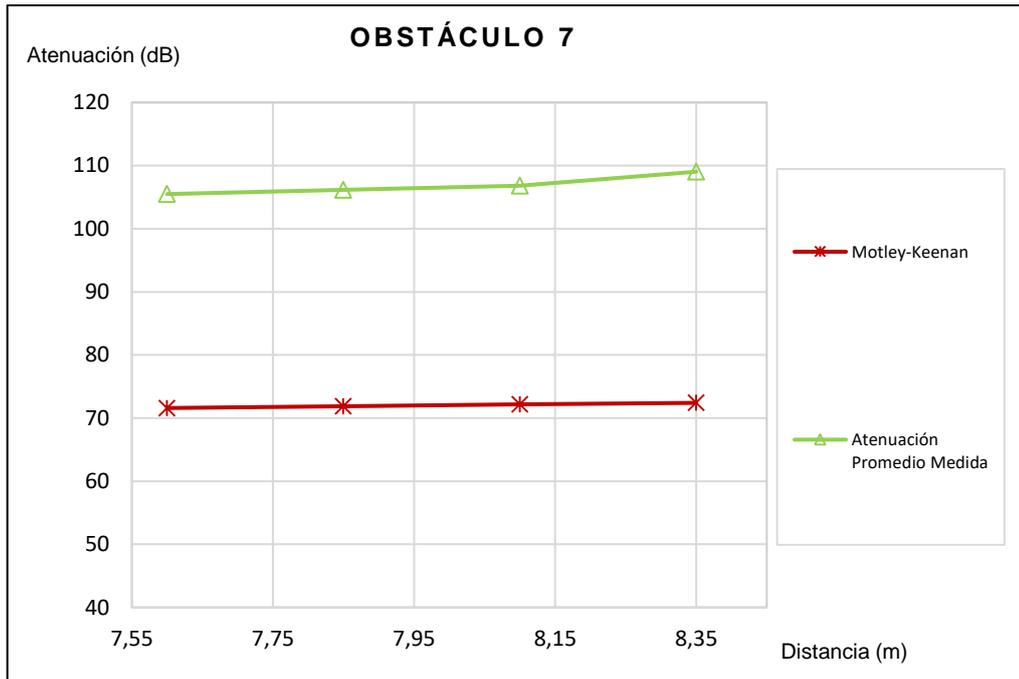


Figura 4.61. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 7 (dos paredes de tapia de 65 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

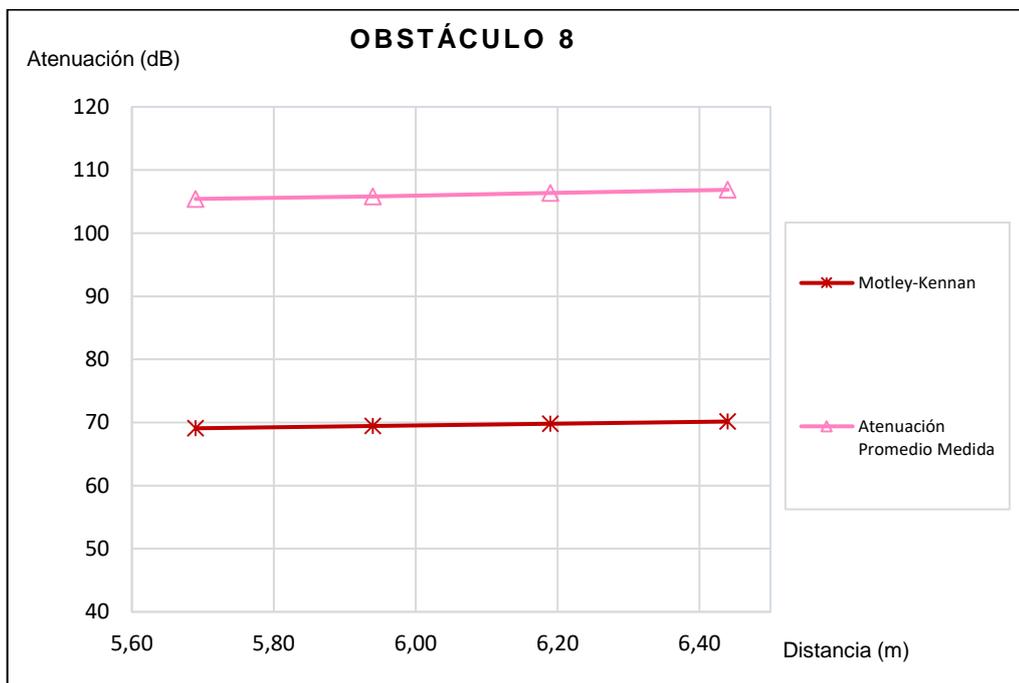


Figura 4.62. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 8 (dos paredes de tapia de 66 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

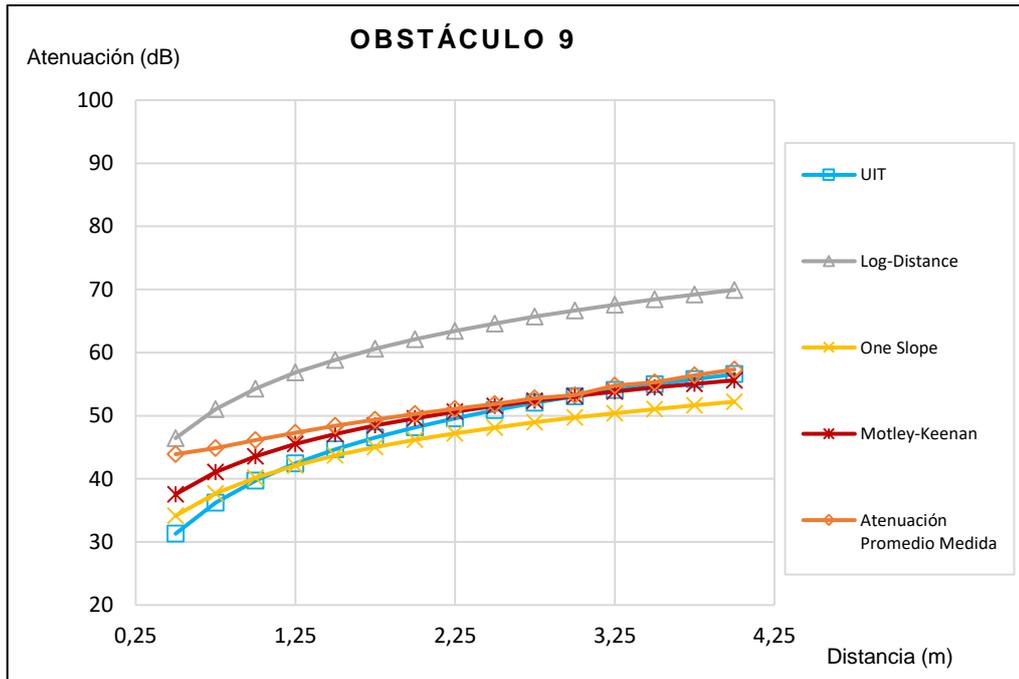


Figura 4.63. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 9 (puertas de madera).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

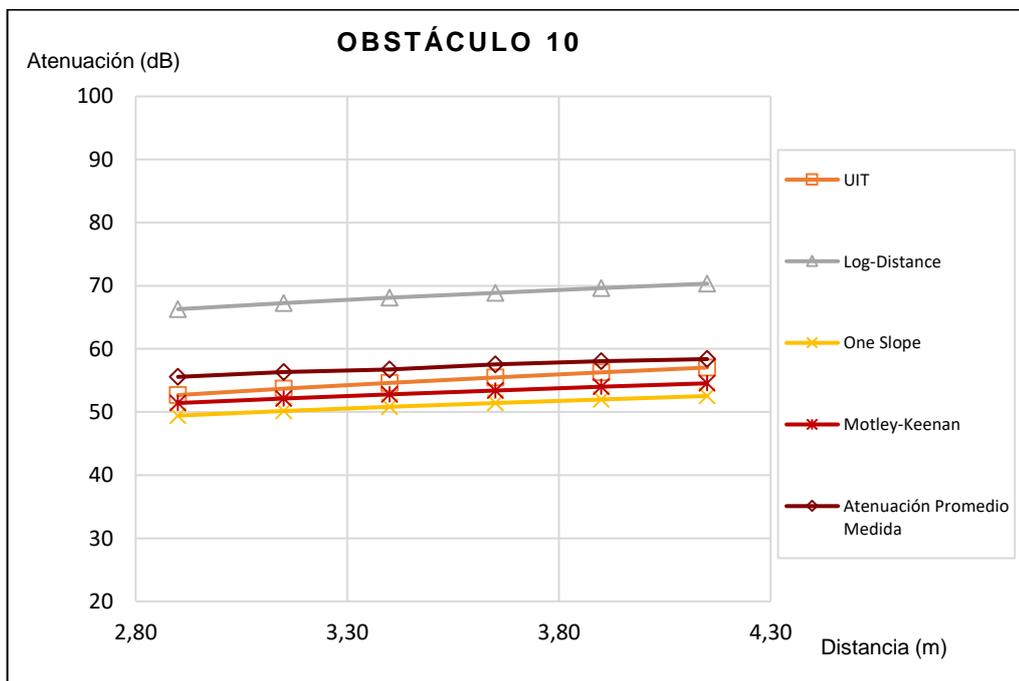


Figura 4.64. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 10 (entrepiso de madera).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

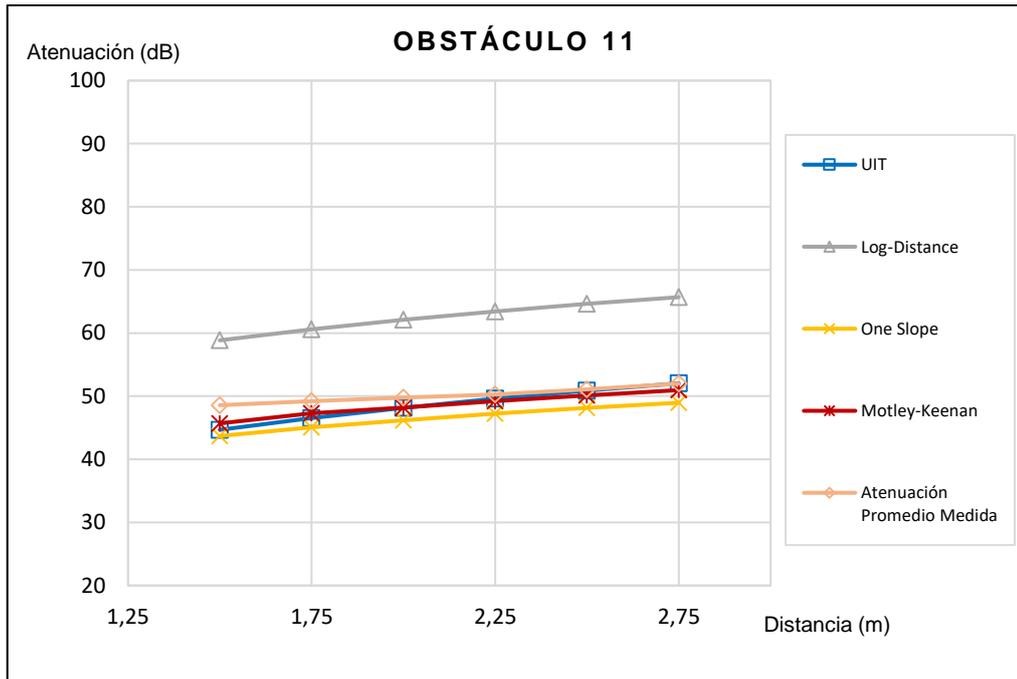


Figura 4.65. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 11 (entrepiso de madera y gypsum).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

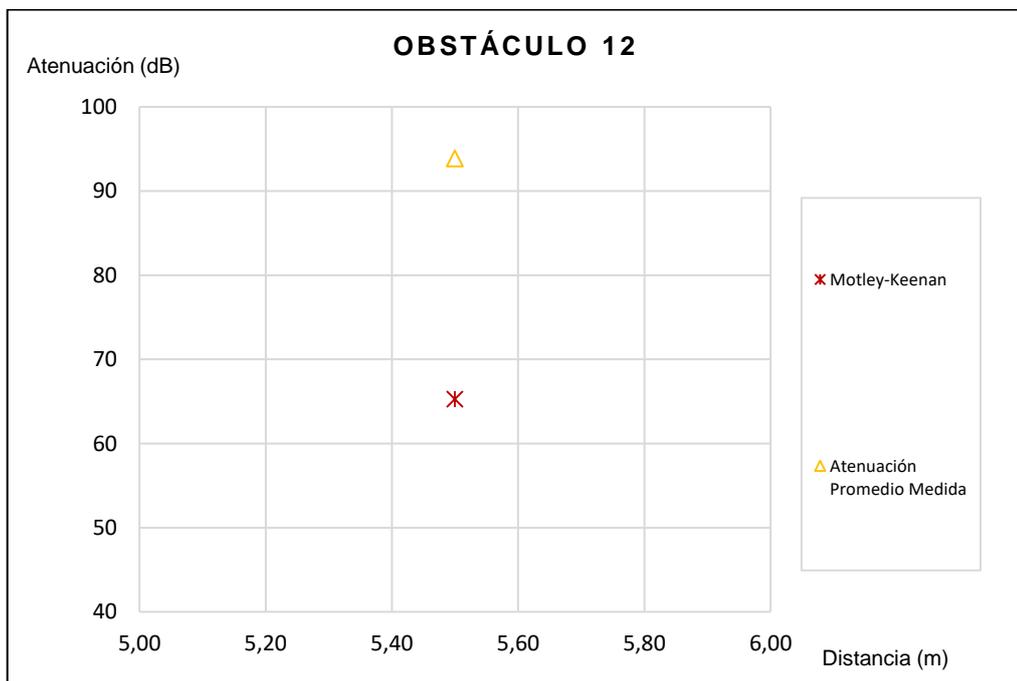


Figura 4.66. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 12 (pared de tapia 89 cm - entrepiso de madera y plywood).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

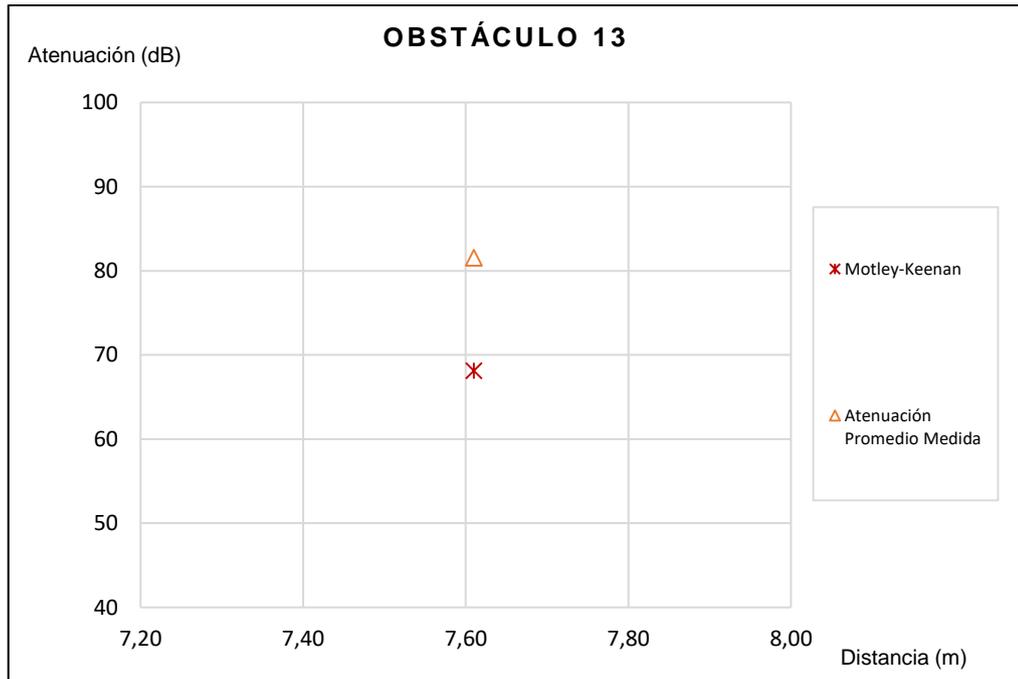


Figura 4.67. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada para el obstáculo 13 (pared de tapia y concreto de 63 cm - entrepiso de madera-gypsum).
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

4.4. Propuesta de modelo adaptado.

4.4.1. Modelo teórico de propagación seleccionado.

En la Figura 4.68 se compara la atenuación promedio medida para una pared de tapia de 92 cm con cada uno de los modelos teóricos de propagación sin aplicar el método de adaptación; mientras que en la Figura 4.69 se muestra el resultado de aplicar el método de mínimos cuadrados a los modelos teóricos considerados para el obstáculo antes mencionado. Se puede apreciar claramente en la Figura 4.69, que el modelo que tiene un mejor ajuste a los datos medidos es el modelo de propagación Motley-Keenan. Este mismo proceso se aplicó a distintos obstáculos en donde el resultado fue similar. Por tal razón, el modelo teórico de propagación Motley-Keenan es el modelo seleccionado en el desarrollo de este trabajo de titulación.

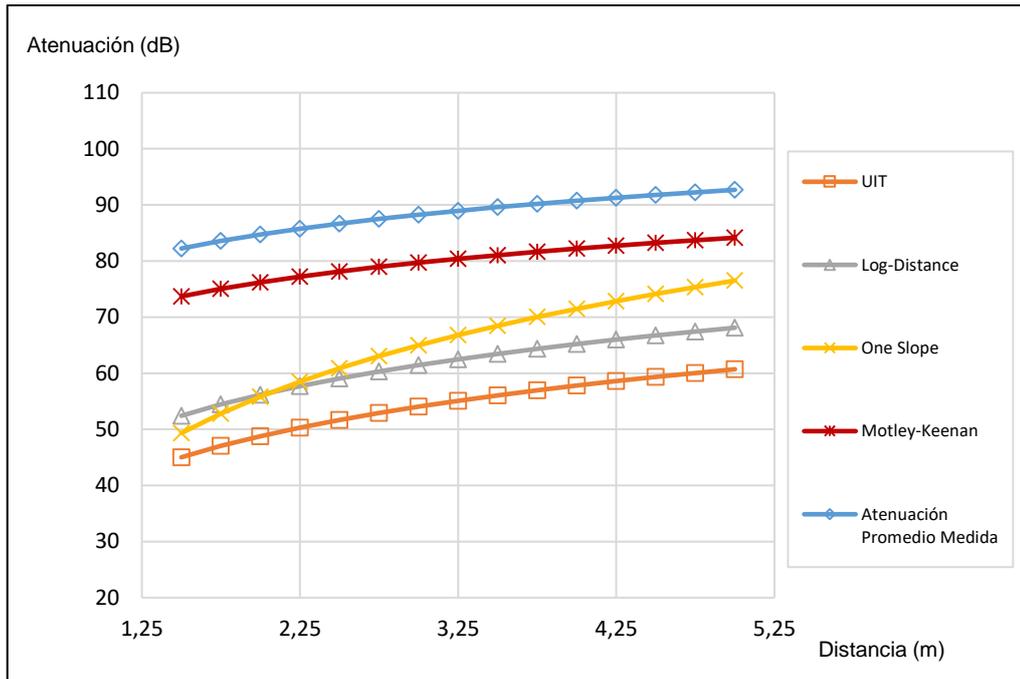


Figura 4.68. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la calculada con cada uno de los modelos de propagación sin adaptar para una pared de tapia de 92 cm.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

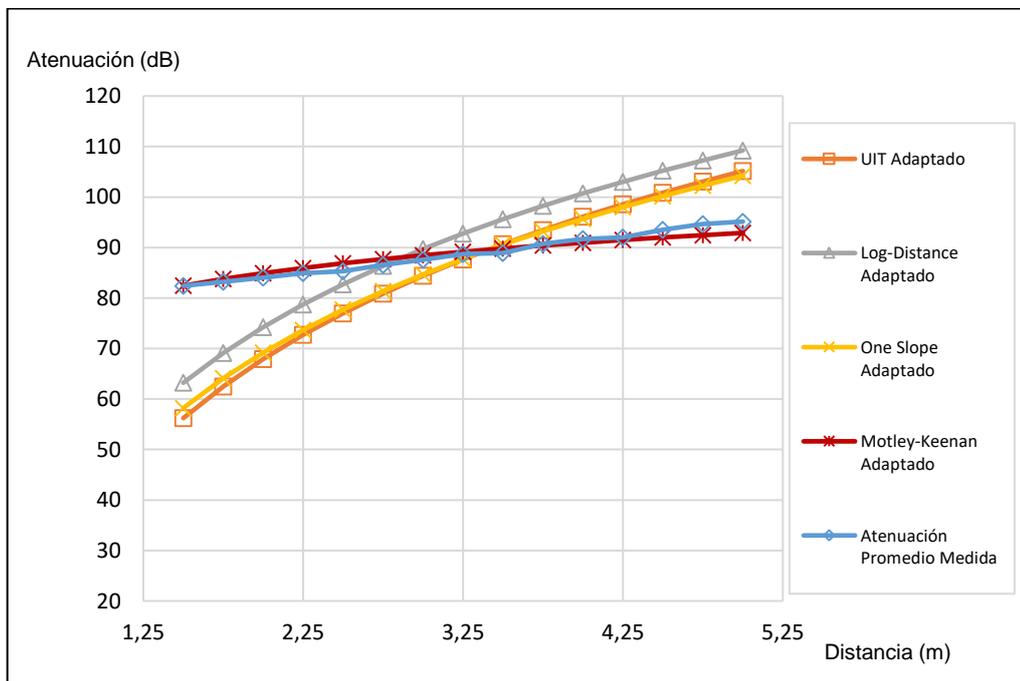


Figura 4.69. Comparación entre la curva generada por cada uno de los modelos de propagación adaptados y la curva de los datos medidos.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.4.2. Adaptación a través del método de mínimos cuadrados.

En este apartado se detalla el proceso matemático que permite determinar los parámetros requeridos para la adaptación del modelo de propagación mediante el método de mínimos cuadrados.

Como se mencionó en la sección anterior, el modelo seleccionado para su ajuste es el modelo Motley-Keenan, el cual está definido por la ecuación (7). Para facilitar el proceso de adaptación esta ecuación se reescribe despreciando momentáneamente el factor del número de paredes atravesadas (k_{w_i}) y reemplazando el factor de atenuación (N_{w_i}) por N , como se muestra en la ecuación (11).

$$PL[\text{dB}] = PL(d_0) + 20 \log(d) + N \quad (11)$$

Para ser capaces de aplicar la ecuación de mínimos cuadrados, es necesario determinar la potencia de recepción teórica predicha por el modelo, para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_{Rx}[\text{dBm}] = P_{Tx} + G_{Tx} - PL - L_{sistema} + G_{Rx} \quad (12)$$

Donde:

P_{Rx} : Potencia de recepción (dBm).

P_{Tx} : Potencia de transmisión (dBm).

G_{Tx} : Ganancia de la antena transmisora (dBi).

PL : Pérdidas de trayecto (modelo Motley-Keenan) (dB).

$L_{sistema}$: Pérdidas del sistema (cables *pigtail*) (dB).

G_{Rx} : Ganancia de la antena receptora (dBi).

Reemplazando la ecuación (11) en la ecuación (12)

$$P_{Rx}[\text{dBm}] = P_{Tx} + G_{Tx} - PL(d_0) - 20 \log(d_i) - N - L_{sistema} + G_{Rx} \quad (13)$$

A continuación, $P_{modelo}(d_i)$ se reemplaza por P_{Rx} en la ecuación (9).

$$E(N) = \sum_{i=1}^n [P_{medida}(d_i) - (P_{Tx} + G_{Tx} - L_{sistema} + G_{Rx} - PL(d_0) - 20 \log(d_i) - N)]^2 \quad (14)$$

Considerando que, para el sistema de medición implementado: P_{Tx} es igual a -12 dBm, G_{Tx} y G_{Rx} es igual a 15 dBi y $L_{sistema}$ es igual a $4,88$ dB (ver Tabla 3.2), la ecuación (14) se reduce a:

$$E(N)[dB] = \sum_{i=1}^n [P_{medida}(d_i) - (13,12 \text{ dBm} - PL(d_0) - 20 \log(d_i) - N)]^2 \quad (15)$$

Con el objetivo de ilustrar el proceso de adaptación, se toma como muestra los datos obtenidos en las mediciones realizadas sobre una pared de tapia de 65 cm, los mismos que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Potencia de recepción medida a través de una pared de tapia de 65 cm.

Distancia (m)	Potencia de Rx medida (dBm)
1,50	55,05
1,75	56,47
2,00	57,69
2,25	59,34
2,50	60,48
2,75	61,26
3,00	62,42
3,25	63,00
3,50	63,51
3,75	64,15
4,00	64,58
4,25	65,14
4,50	65,46
4,75	65,74

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Las pérdidas por espacio libre $PL(d_0)$ a la distancia de referencia de un metro de distancia, pueden ser calculadas a través de la ecuación (4), sin embargo, es recomendable usar valores reales que se obtienen durante la campaña de medición ya que pueden reducir en gran medida el error teórico medio (Erreyes & Poma, 2016). Para este caso, estas pérdidas fueron medidas y el valor obtenido fue $PL(d_0) = 42,91$ dB.

Reemplazando estos datos en la ecuación (15):

$$\begin{aligned}
E(N)[\text{dB}] = & [-55,05 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[1,50] - N)]^2 \\
& + [-56,47 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[1,75] - N)]^2 \\
& + [-57,69 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[2,00] - N)]^2 \\
& + [-59,34 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[2,25] - N)]^2 \\
& + [-60,48 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[2,50] - N)]^2 \\
& + [-61,26 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[2,75] - N)]^2 \\
& + [-62,42 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[3,00] - N)]^2 \\
& + [-63,00 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[3,25] - N)]^2 \\
& + [-63,51 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[3,50] - N)]^2 \\
& + [-64,15 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[3,75] - N)]^2 \\
& + [-64,58 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[4,00] - N)]^2 \\
& + [-65,14 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[4,25] - N)]^2 \\
& + [-65,46 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[4,50] - N)]^2 \\
& + [-65,74 - (13,12 - 42,91 - 20 * \text{Log}[4,75] - N)]^2
\end{aligned} \tag{16}$$

Al resolver la ecuación (16) tenemos

$$E(N)[\text{dB}] = 7119,09 - 631,293N + 14N^2 \tag{17}$$

Derivando parcialmente $E(N)$ de la ecuación (17) e igualándola a 0:

$$\frac{\partial E(N)}{\partial N} = 0 \tag{18}$$

$$28N - 631,293 = 0 \tag{19}$$

Finalmente, el factor de atenuación que permitirá adaptar el modelo de propagación para este obstáculo es:

$$N = \frac{631,293}{28} \text{ dB} \tag{20}$$

$$N = 22,55 \text{ dB} \tag{21}$$

El procedimiento anteriormente descrito es aplicado para cada uno de los obstáculos considerados para encontrar su respectivo valor de N . En la Tabla 4.2 se indica las pérdidas en espacio libre medidas y el factor de atenuación obtenido para cada uno de ellos.

Tabla 4.2. Parámetros de atenuación obtenidos para cada uno de los obstáculos considerados.

Obstáculo	$PL(d_0)$ [dB]	N [dB]
Obstáculo 1: Pared de Tapia (30 cm)	42,74	7,96
Obstáculo 2: Pared de Tapia (65 a 69 cm)	42,91	23,02
Obstáculo 3: Pared de Tapia (89 y 92 cm)	42,71	35,16
Obstáculo 4: Pared de Tapia y concreto (63 cm)	42,74	18,22
Obstáculo 5: Pared de Tapia y concreto (66 cm)	42,74	26,79
Obstáculo 9: Puertas de madera	43,08	2,32
Obstáculo 10: Entrepiso de madera	42,94	3,27
Obstáculo 11: Entrepiso de madera-gypsum	42,74	1,04
Promedio	42,83	

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

Como se mencionó con anterioridad, en este trabajo de titulación $PL(d_0)$ es determinado a través de las mediciones realizadas en cada uno de los obstáculos, obteniendo un valor promedio de $PL(d_0) = 42.83$ dB. Este valor es utilizado para la propuesta del modelo de propagación adaptado.

4.4.2.1. **Factor de multipared (F_m).**

Con el objetivo de compensar el efecto que tienen un obstáculo multipared sobre una onda incidente, se propone un factor de corrección denominado F_m , el cual permite reducir el error entre el modelo propuesto y los datos medidos para este tipo de obstáculo. Para la obtención de este factor se aplica el método de mínimos cuadrados, para ello hace uso de la ecuación (15). A continuación, como ejemplo, se describe proceso necesario para el caso de dos paredes de tapia de 63 cm.

Reemplazando los datos correspondientes en la ecuación (15), tenemos:

$$\begin{aligned}
 E(N)[\text{dB}] = & [-84,56 - (13,12 - 42,83 - 20 * \text{Log}[6,01] - N)]^2 \\
 & + [-85,40 - (13,12 - 42,83 - 20 * \text{Log}[6,26] - N)]^2 \\
 & + [-86,24 - (13,12 - 42,83 - 20 * \text{Log}[6,51] - N)]^2 \\
 & + [-87,03 - (13,12 - 42,83 - 20 * \text{Log}[6,76] - N)]^2 \\
 & + [-87,93 - (13,12 - 42,83 - 20 * \text{Log}[7,01] - N)]^2
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

$$E(N)[\text{dB}] = 8106,96 - 402,602 N + 5N^2 \quad (23)$$

Derivando parcialmente la ecuación (23) y despejando N

$$N = 40,26 \text{ dB} \quad (24)$$

De acuerdo a la Tabla 4.2, el factor de atenuación para una pared de tapia y concreto de 63 cm es $N = 18,22$ dB. Al multiplicar este coeficiente de atenuación por dos (dos paredes) tenemos:

$$2 * (18,22 \text{ dB}) = 36,44 \text{ dB} \quad (25)$$

La diferencia entre el coeficiente N obtenido en la ecuación (24) y el obtenido en la ecuación (25), es el factor de dos paredes que permitirá reducir el error para este obstáculo:

$$Fm(\text{dB}) = 40,26 \text{ dB} - 36,44 \text{ dB} \quad (26)$$

$$Fm = 3,82 \text{ dB} \quad (27)$$

Este procedimiento es aplicado al obstáculo 7 y 8. El factor de corrección de multipared calculado para cada obstáculo se muestra en la Tabla 4.3. El valor promedio de estos valores es el factor de corrección de multipared propuesto para el modelo adaptado.

Tabla 4.3. Factor de corrección de multipared.

Obstáculo	Factor de corrección de multipared (Fm) [dB]
Dos paredes de tapia de 63 cm	3,82
Dos paredes de tapia de 65 cm	0,67
Dos paredes de tapia de 66 cm	0,64
Promedio	1,71

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.4.3. Obtención de la constante de atenuación (α) para paredes de tapia.

Con el objetivo de determinar el factor de atenuación N para un rango más amplio de paredes de tapia en cuanto a sus dimensiones, se decidió obtener la constante de atenuación de las mismas a través de los datos obtenidos en la campaña de medición.

La constante de atenuación α puede encontrarse a través de la siguiente expresión:

$$\frac{E_0}{E_0 e^{-\alpha z}} = R \quad (28)$$

Donde:

E_0 : es la potencia que ingresa a una pared de tapia.

$E_0 e^{-\alpha z}$: es la potencia presente al final de una pared de tapia de grosor z (cm).

R : es la relación que existe entre la potencia que ingresa y la que sale de la pared.

La Figura 4.70 ilustra la ecuación (28)

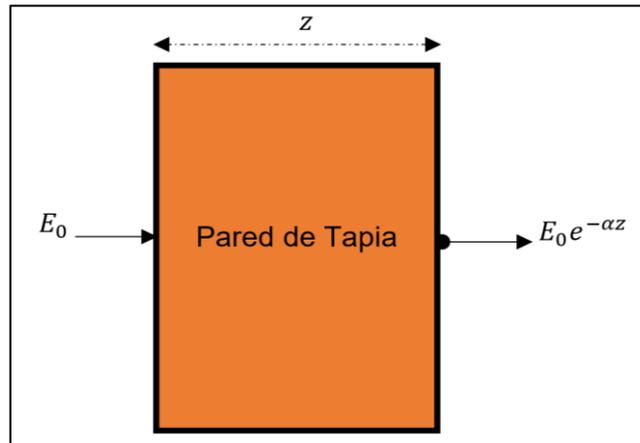


Figura 4.70. Esquema de la relación entre la potencia de entrada y salida sobre de una pared de tapia.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Para ejemplificar el proceso de obtener la constante α , se toma como muestra los datos obtenidos en la medición realizada sobre una pared de tapia de 65 cm. En este caso la antena de transmisión fue colocada a una distancia de 50 cm de la pared, por lo tanto, para encontrar E_0 , basta con medir la potencia de recepción en espacio libre cuando las antenas están separadas 50 cm entre sí, como se muestra en la Figura 4.71. Dando como resultado $E_0 = -26,94$ dBm.

A continuación, es necesario determinar la potencia de recepción en espacio libre a la distancia de 115 cm, que es la distancia entre la antena transmisora y el extremo opuesto de la pared de tapia (ver Figura 4.71), dando como resultado una potencia de $-29,76$ dBm.

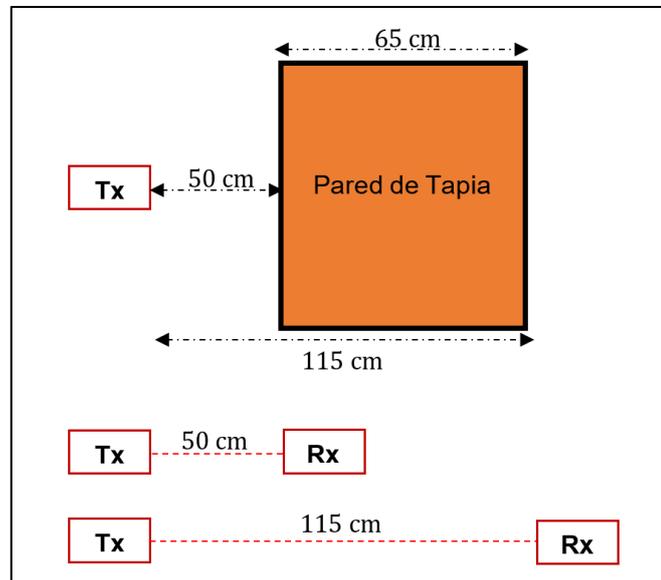


Figura 4.71. Esquema de la medición en espacio libre a 50 cm y 115 cm.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Seguidamente, se realiza la medición de la propagación en espacio libre a las mismas distancias o puntos de medición que en la pared de tapia de 65 cm. En la Tabla 4.4 se comparan los datos obtenidos en ambas mediciones y se obtiene la atenuación promedio introducida por el obstáculo.

Tabla 4.4. Potencia de recepción medida en espacio libre y a través de la pared de tapia. Determinación de la atenuación promedio introducida.

Distancia (m)	Potencia Rx espacio libre (dBm)	Potencia Rx pared de tapia 65 cm (dBm)	Atenuación (dB)
1,50	33,07	55,05	21,98
1,75	33,10	56,47	22,37
2,00	34,13	57,69	23,56
2,25	35,62	59,34	23,72
2,50	36,34	60,48	24,09
2,75	36,57	61,26	24,69
3,00	36,43	62,42	25,99
3,25	36,73	63,00	26,27
3,50	37,74	63,51	25,77
3,75	38,25	64,15	25,90
4,00	38,80	64,58	25,78
4,25	39,38	65,14	25,76
4,50	39,80	65,46	25,66
4,75	40,26	65,74	25,54
Promedio			24,86

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Finalmente, para determinar $E_0 e^{-\alpha z}$ se adiciona la potencia de recepción medida a 115 cm en espacio libre con la atenuación promedio debida al obstáculo obtenida en la Tabla 4.4.

$$E_0 e^{-\alpha z} = -29,76 \text{ dBm} - 24,86 \text{ dB} \quad (29)$$

$$E_0 e^{-\alpha z} = -54,62 \text{ dbm} \quad (30)$$

Una vez obtenidas ambas potencias, éstas deben ser transformadas a vatios para que puedan ser operables, y son reemplazadas en la ecuación (28)

$$\frac{E_0}{E_0 e^{-\alpha z}} = \frac{0,0000020230191787 \text{ W}}{3,4514373934 \times 10^{-9} \text{ W}} \quad (31)$$

$$\frac{E_0}{E_0 e^{-\alpha z}} = 586,14 \quad (32)$$

Simplificando:

$$\frac{1}{e^{-\alpha z}} = 586,14 \quad (33)$$

$$e^{\alpha z} = 586,14 \quad (34)$$

Aplicando el logaritmo natural a ambos miembros de la ecuación (34)

$$\alpha z = \ln(586,14) \quad (35)$$

En este caso $z = 65 \text{ cm}$, por lo tanto:

$$\alpha = \frac{\ln(586,14)}{65 \text{ cm}} \quad (36)$$

$$\alpha = 0,10 \text{ Np/cm} \quad (37)$$

Todo este proceso descrito es aplicado a varias paredes de tapia de distintas dimensiones, cuyas constantes de atenuación son mostradas en la Tabla 4.5. De todos estos valores obtenidos se determinó la media aritmética de los mismos, dando como resultado una constante de atenuación definitiva de $\alpha = 0,09 \text{ Np/cm}$.

Tabla 4.5. Constante de atenuación calculada para varias paredes de tapia.

Obstáculo	Constante de Atenuación (Np/cm)
Pared 92 cm	0,11
Pared 89 cm	0,11
Pared 69 cm	0,09
Pared 67 cm	0,10
Pared 65 cm	0,10
Pared 63 cm	0,09
Pared 45 cm	0,08
Pared 30 cm	0,08
Promedio	0,09

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

Con ésta constante de atenuación (α) es posible obtener el factor de atenuación (N) para una pared de tapia de cualquier dimensión. A continuación, se describe el proceso para obtener el valor de N para una pared de tapia de 60 cm de grosor.

Partimos de la suposición de que la potencia que ingresa a esta pared de tapia es $E_0 = -26,94$ dBm. Esta potencia es convertida a milivatios para que pueda ser operable:

$$-26,94 \text{ dBm} = 0,0020230191787 \text{ mW} \quad (38)$$

Utilizando la expresión de atenuación de la onda: $E_0 e^{-\alpha z}$, y reemplazando los valores correspondientes tenemos que:

$$0,0020230191787 \text{ mW} e^{-0,09 \text{ Np/cm} \cdot 60 \text{ cm}} = 9,13713 \times 10^{-6} \text{ mW} \quad (39)$$

Luego, esta potencia es convertida a dBm:

$$9,13713 \times 10^{-6} \text{ mW} = -50,39 \text{ dBm} \quad (40)$$

Si la potencia que ingresa a la pared de tapia es $-26,94$ dBm y la potencia al final de ella es $-50,39$ dBm, las pérdidas en las que se incurre están dadas por:

$$L = -26,94 \text{ dBm} + 50,39 \text{ dBm} = 23,45 \text{ dB} \quad (41)$$

Finalmente, si restamos a L las pérdidas introducidas por el sistema (cables, conectores), podemos determinar las pérdidas que introduce la pared de tapia de 60 cm:

$$N = 23,45 \text{ dB} - 4,88 \text{ dB} \quad (42)$$

$$N = 18,57 \text{ dB} \quad (43)$$

La Tabla 4.6 muestra el factor de atenuación N calculado para paredes de tapia de diversa dimensión. Estos factores son los elegidos para la propuesta del modelo de propagación adaptado, debido a que ofrecen una mayor exactitud al momento de ser aplicados a paredes de distinto grosor.

Tabla 4.6. Factor de atenuación N calculado para paredes de tapia de distintas dimensiones.

Pared de tapia (cm)	$N(\text{dB})$	Pared de tapia (cm)	$N(\text{dB})$
15	0,68	60	18,57
20	2,93	65	20,53
25	4,89	70	22,48
30	6,84	75	24,43
35	8,80	80	26,39
40	10,75	85	28,34
45	12,71	90	30,30
50	14,66	95	32,25
55	16,62	100	34,20

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

4.4.4. Modelo adaptado.

En base al modelo teórico Motley-Keenan, expresado en la ecuación (7), se obtuvo el valor del factor de atenuación N para cada tipo de obstáculo considerado en este trabajo de titulación. También el factor $PL(d_0)$ fue reemplazado por el promedio de los valores reales obtenidos en la campaña de medición. Además, se incorpora un factor de corrección denominado Fm , para el caso de obstáculos de multipared de tapia, el cual permite reducir el error en las mediciones sobre este tipo de obstáculo.

El modelo adaptado propuesto está definido por la siguiente ecuación:

$$PL[\text{dB}] = 42,83 + 20 \log(d) + n_{o_i} N_{o_i} + Fm \quad (44)$$

Donde:

d : distancia de separación entre el transmisor y receptor (m).

n_{o_i} : número de obstáculos del tipo i .

N_{o_i} : factor de atenuación del obstáculo de tipo i .

F_m : Factor de corrección para el caso de obstáculos de multipared [dB], cuyo valor es cero para el caso de pared única.

Los coeficientes de atenuación calculados para cada tipo de obstáculo a partir del método de mínimos cuadrados y mediante la constante de atenuación se muestran la Tabla 4.2 y Tabla 4.6 respectivamente.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

5.1. Comparación de valores medidos con resultados del modelo adaptado.

En esta sección se compara la atenuación promedio medida con los valores obtenidos mediante el modelo adaptado. Para el caso del Obstáculo 9, 10 y 11 la comparación se realiza únicamente con el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados. Para los demás obstáculos el análisis comparativo es realizado con el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados y el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α).

- **Obstáculo 1**

De acuerdo a la Figura 5.1 el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados y el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) presentan un error máximo de 1,52 dB y 2,42 dB respectivamente con respecto al promedio de las mediciones.

- **Obstáculo 2**

El modelo de propagación adaptado mediante el método de mínimos cuadrados presenta un error máximo de 0,87 dB en relación al promedio de la atenuación medida. En tanto que el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) presenta un error máximo de 2,28 dB (ver Figura 5.2).

- **Obstáculo 3**

El error máximo que presentan el modelo adaptado con el modelo de mínimos cuadrados y el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α) con respecto al promedio de los datos medidos es de 1,28 dB y 4,16 dB respectivamente (ver Figura 5.3).

- **Obstáculo 4**

Acorde a la Figura 5.4, el error máximo que presenta el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados con respecto del promedio de la atenuación medida es 0,82 dB. Mientras que con el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α) se obtiene un error máximo 0,94 dB.

- **Obstáculo 5**

El error máximo que presentan el modelo adaptado con el modelo de mínimos cuadrados y el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α) con respecto al promedio de los datos medidos es de 0,58 dB y 4,89 dB respectivamente (ver Figura 5.5).

- **Obstáculo 6**

De acuerdo a la Figura 5.6, el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados y el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) presentan un error máximo de 3,16 dB y 3,50 dB respectivamente con respecto al promedio de las mediciones.

- **Obstáculo 7**

Conforme a la Figura 5.7, el error máximo que presenta el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados con respecto del promedio de la atenuación medida es 1,75 dB. Mientras que con el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α) se obtiene un error máximo 5 dB.

- **Obstáculo 8**

El modelo de propagación adaptado mediante el método de mínimos cuadrados presenta un error máximo de 0,34 dB en relación al promedio de la atenuación medida. En tanto que el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) presenta un error máximo de 1,18 dB (ver Figura 5.8).

- **Obstáculo 9**

En la Figura 5.9 el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados presenta un error máximo de 4,78 dB con respecto al promedio de las mediciones, cuando las antenas se encuentran a 50 cm de separación. Como se puede observar, este error disminuye notablemente a medida que se aumenta la distancia de separación entre las antenas hasta alcanzar un error mínimo de 0,15 dB.

- **Obstáculo 10**

Acorde a la Figura 5.10, el error máximo que presenta el modelo adaptado mediante el método de mínimos cuadrados con respecto del promedio de la atenuación medida es 0,19 dB.

- **Obstáculo 11**

El error máximo que presenta el modelo adaptado mediante el método de mínimos cuadrados con respecto al promedio de los datos medidos es de 1,27 dB (ver Figura 5.11).

- **Obstáculo 12**

El modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados presenta un error máximo de 1,26 dB en relación al promedio de la medición. En tanto que, el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) presenta un error máximo de 2,74 dB (ver Figura 5.12)

- **Obstáculo 13**

De acuerdo a la Figura 5.13, el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados presenta un error máximo de 1,91 dB con respecto al promedio de las mediciones. Mientras que con el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) existe un error de 1,56 dB.

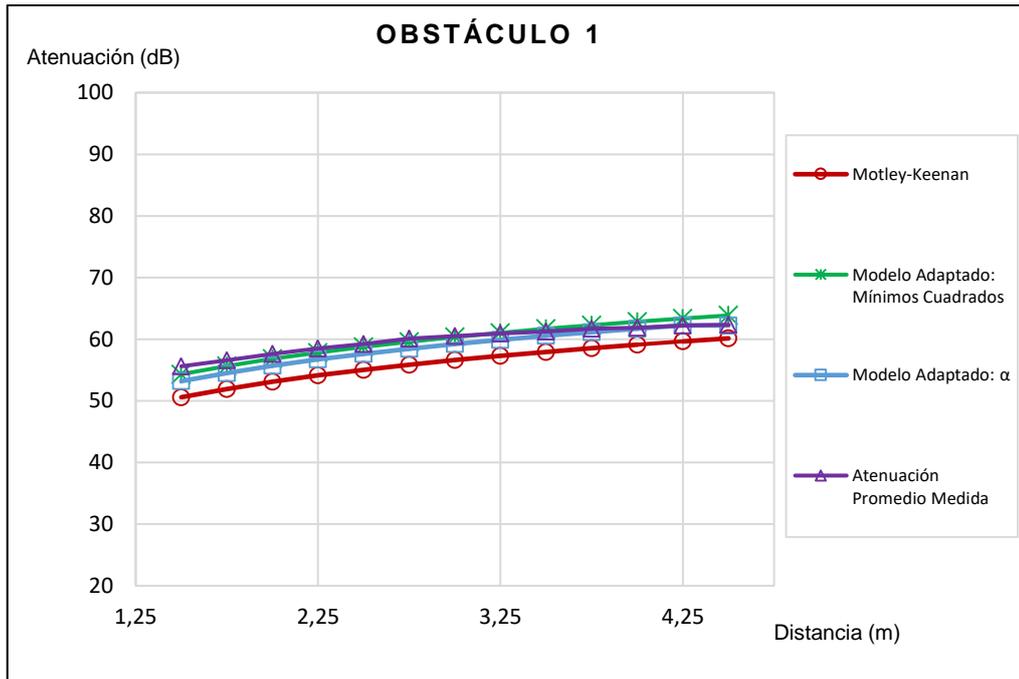


Figura 5.1. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 1 (pared de tapia de 30 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

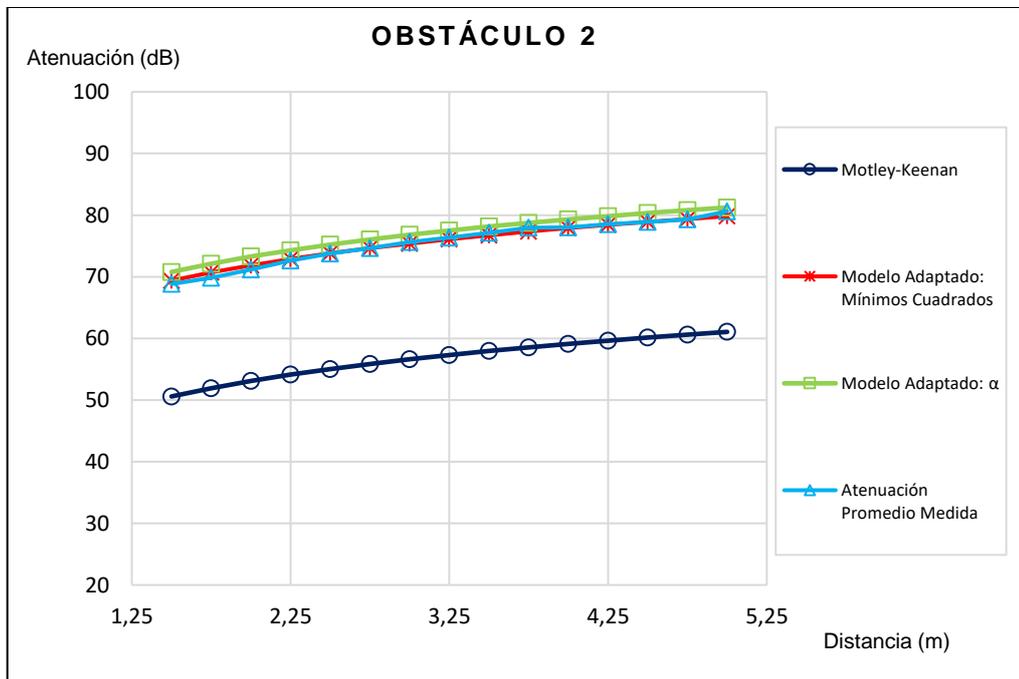


Figura 5.2. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 2 (paredes de tapia de 65 cm a 69 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

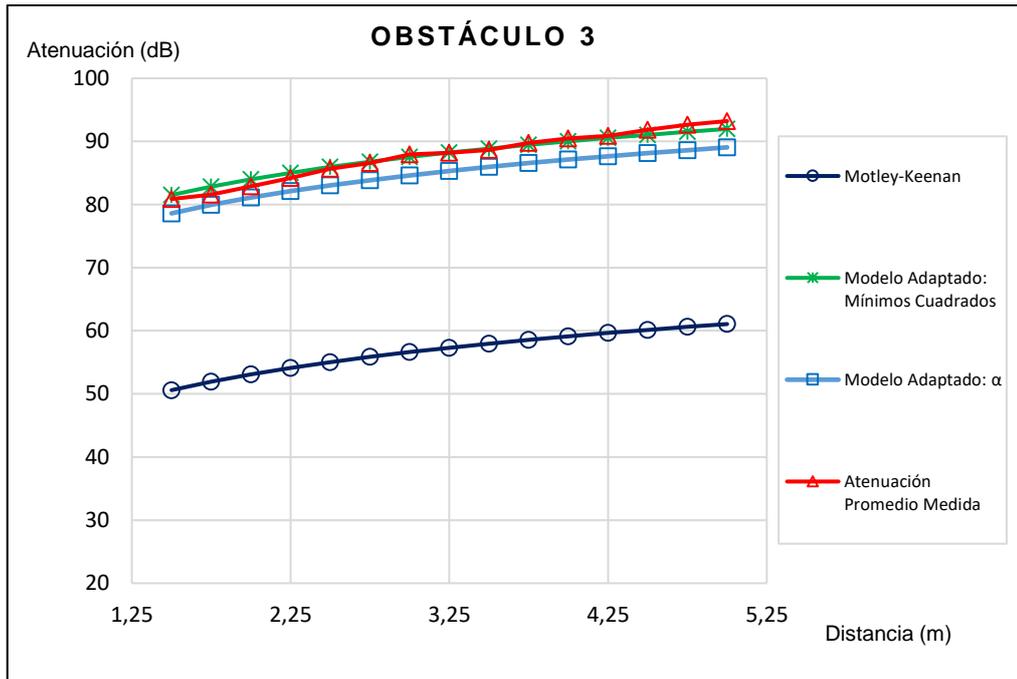


Figura 5.3. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 3 (pared de tapia de 89 cm a 92 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

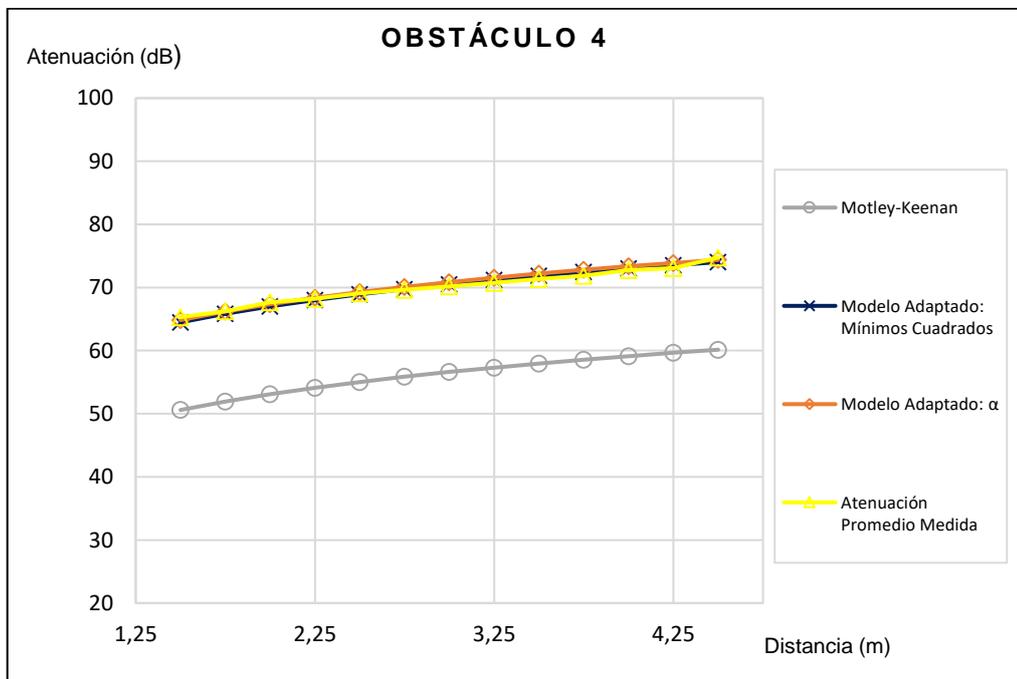


Figura 5.4. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 4 (pared de tapia y concreto de 63 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

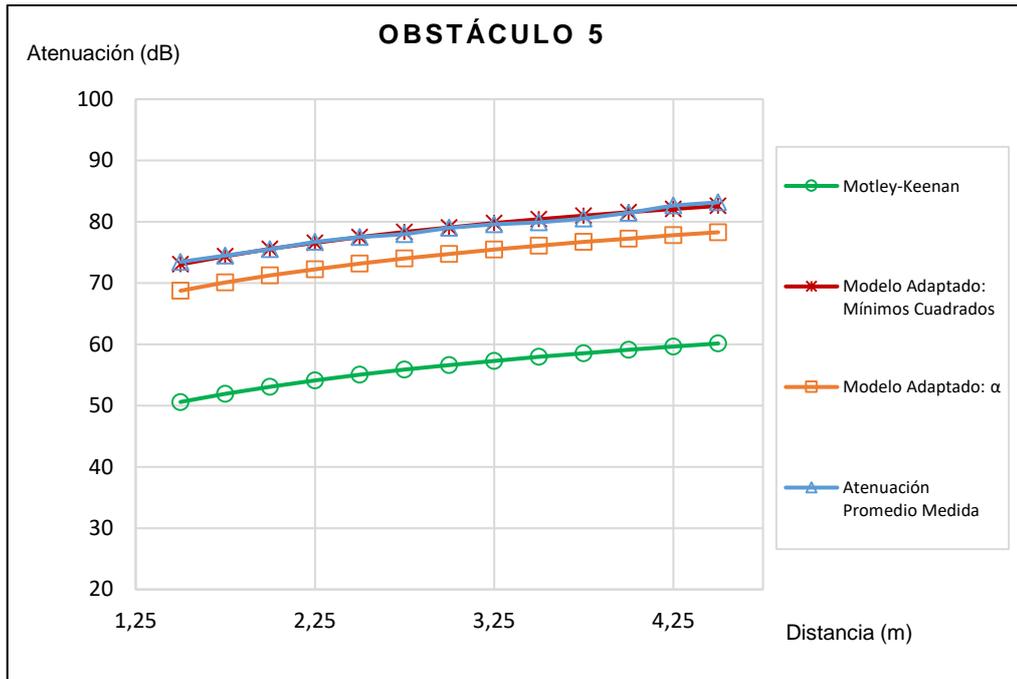


Figura 5.5. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 5 (pared de tapia y concreto de 66 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

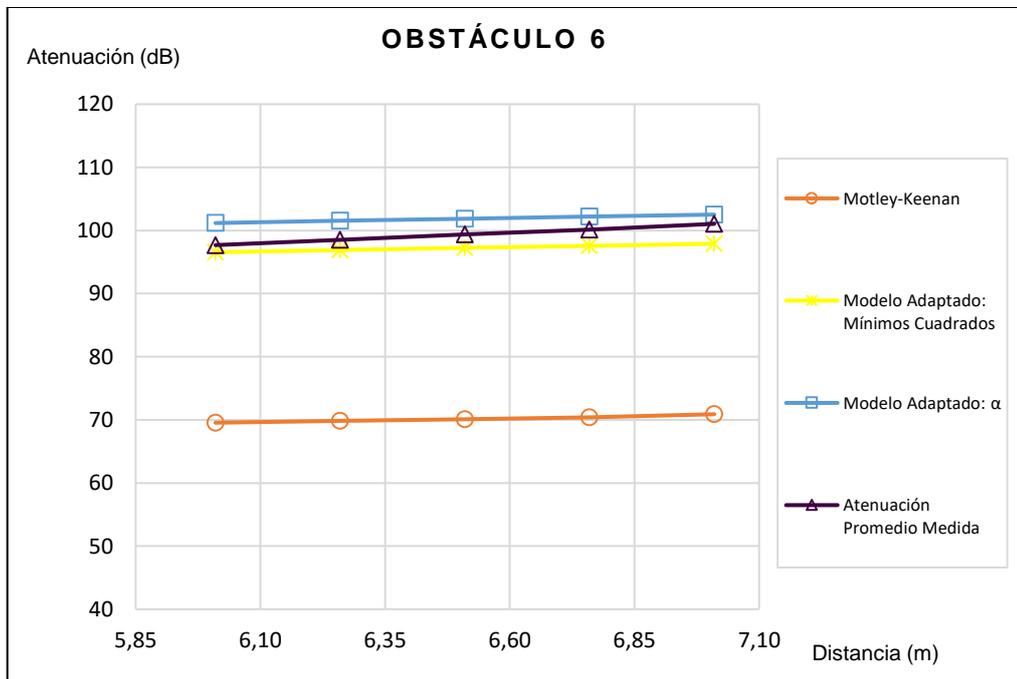


Figura 5.6. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 6 (dos paredes de tapia y concreto de 66 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

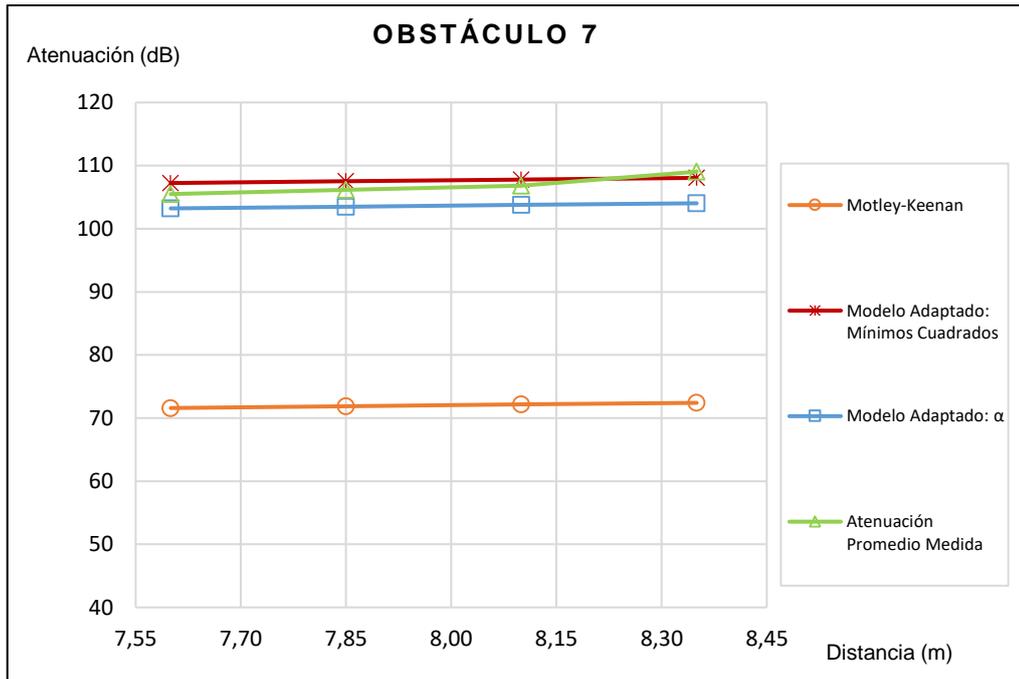


Figura 5.7. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 7 (dos paredes de tapia de 65 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

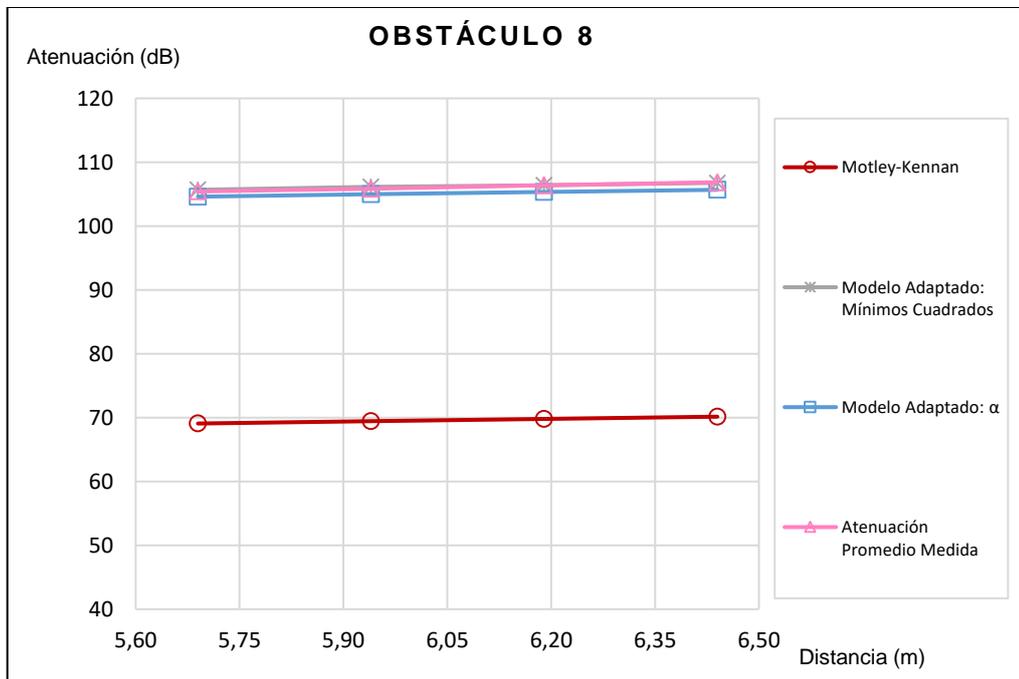


Figura 5.8. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 8 (dos paredes de tapia de 66 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

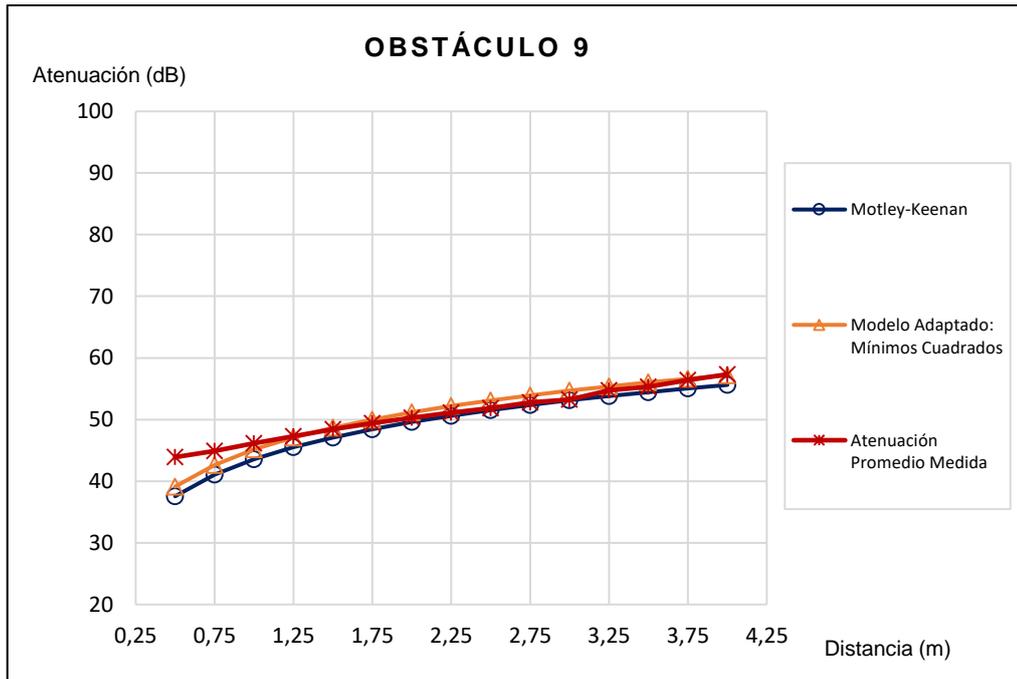


Figura 5.9. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 9 (puertas de madera).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

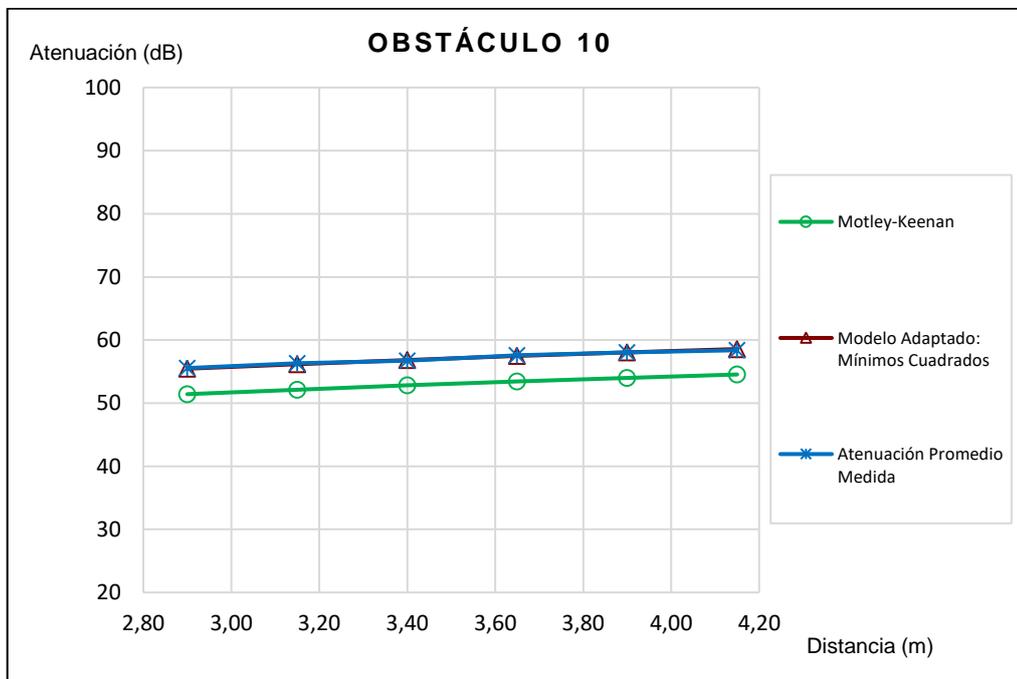


Figura 5.10. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 10 (entrepiso de madera).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

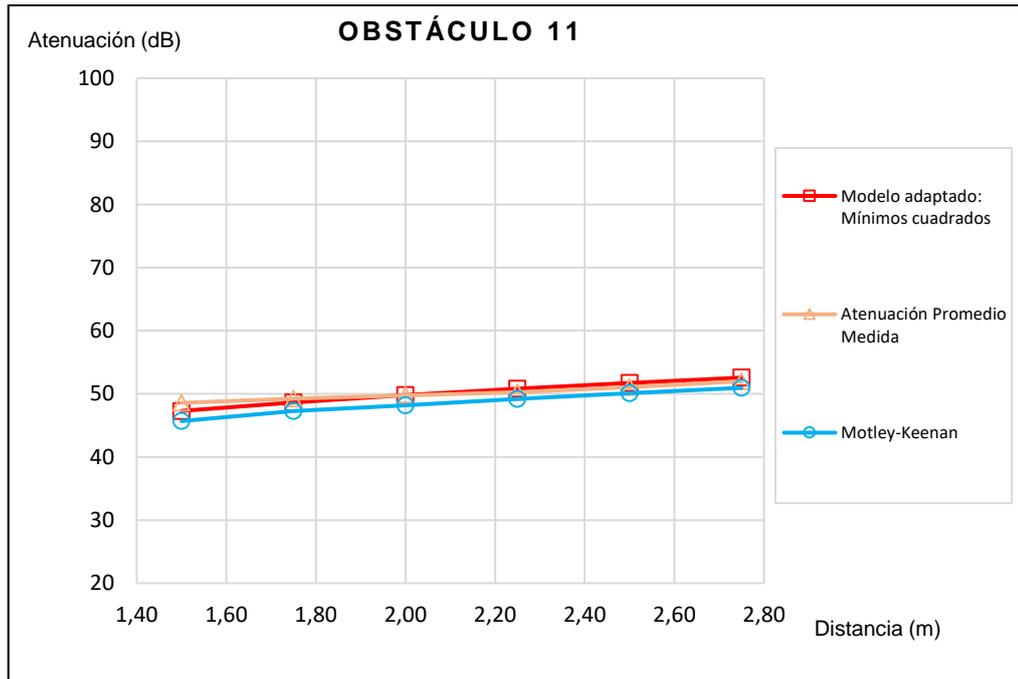


Figura 5.11. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 11 (entrepiso de madera-gypsum).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

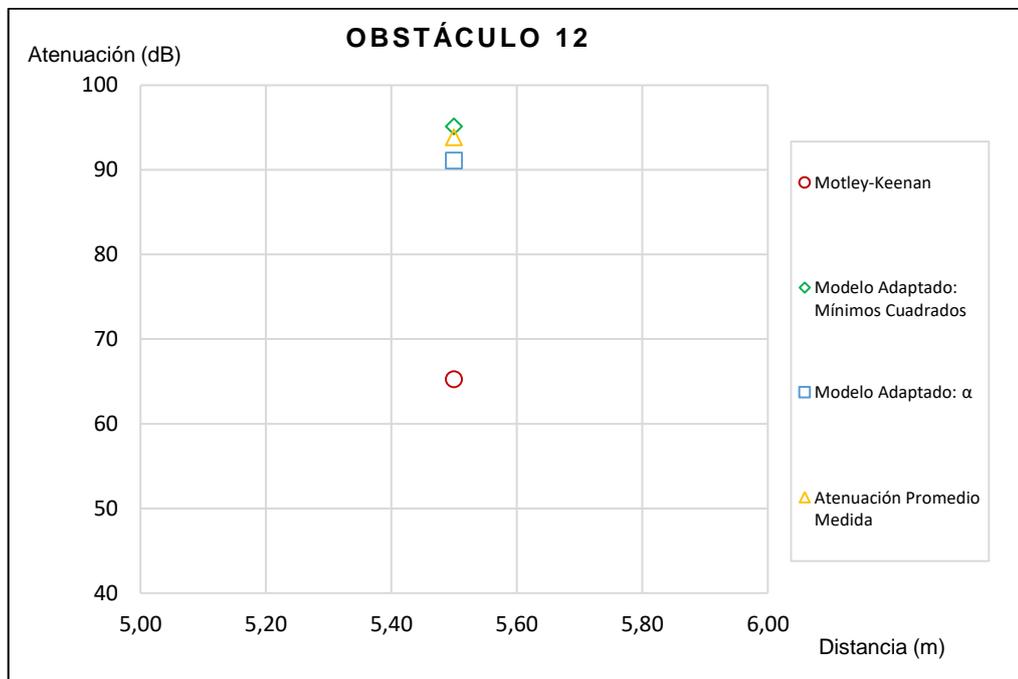


Figura 5.12. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 12 (pared de tapia de 89 cm - entrepiso de madera).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

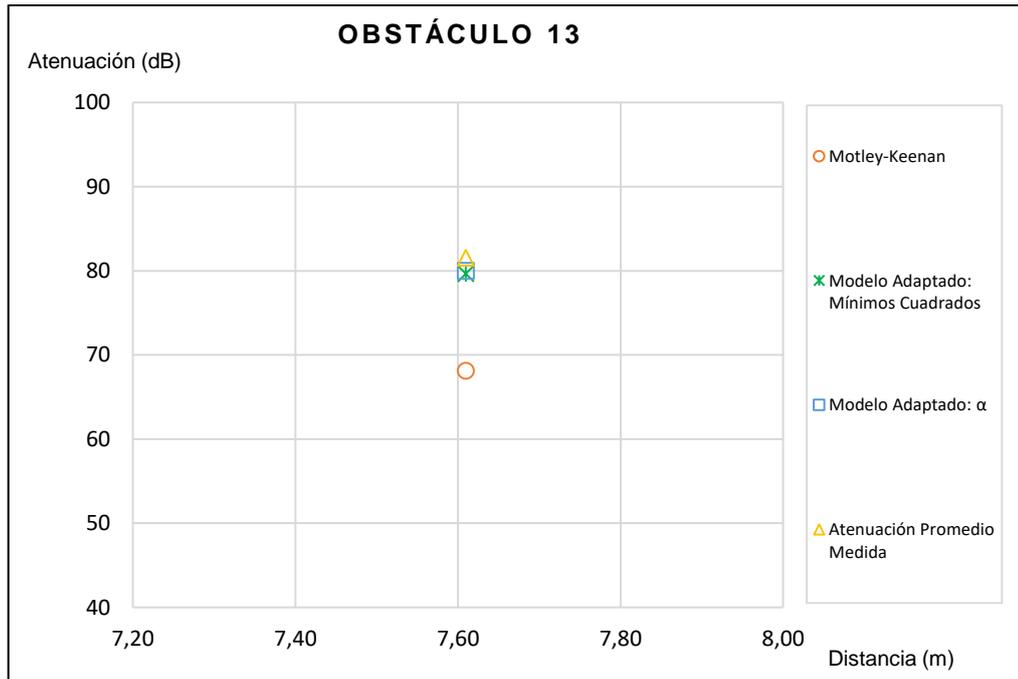


Figura 5.13. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado y el modelo Motley-Keenan sin adaptar para el obstáculo 13 (pared de tapia y concreto de 63 cm y entrepiso de madera-gypsum).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

5.2. Pruebas de validación del modelo adaptado.

Las mediciones correspondientes a las pruebas de validación del modelo adaptado fueron efectuadas sobre los obstáculos que se listan a continuación.

- **Obstáculo 14: pared de tapia de 15 cm.**

El modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α), presenta un error máximo de 2,17 dB con respecto al promedio de la atenuación medida, esto se aprecia en la Figura 5.14.

- **Obstáculo 15: pared de tapia de 45 cm**

Como se observa en la Figura 5.15, el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) introduce un error de 2,72 dB en relación a promedio de los valores medidos.

- **Obstáculo 16: pared de tapia de 47 cm.**

Acorde a la Figura 5.16, el error máximo que presenta el modelo adaptado mediante el constante de atenuación (α) con respecto del promedio de la atenuación medida es de 1,97 dB.

- **Obstáculo 17: pared de tapia de 76 cm.**

En la Figura 5.17 el modelo adaptado mediante el constante de atenuación (α) presenta un error máximo de 2,81 dB con respecto al promedio de las mediciones.

- **Obstáculo 18: pared de tapia de 90 cm.**

Conforme a la Figura 5.18, el error máximo que presenta el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados con respecto del promedio de la atenuación medida es 5,28 dB. Mientras que con el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α) se obtiene un error máximo 1,32 dB.

- **Obstáculo 19: pared de tapia de 90 cm.**

El modelo de propagación adaptado mediante el método de mínimos cuadrados presenta un error máximo de 7,63 dB en relación al promedio de la atenuación medida. En tanto que el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) presenta un error máximo de 2,77 dB (ver Figura 5.19).

- **Obstáculo 20: pared de tapia de 1 m.**

Acorde a la Figura 5.20, el error máximo que presenta el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados con respecto del promedio de la atenuación medida es 2,96 dB. Mientras que con el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α) se obtiene un error máximo 2,22 dB.

- **Obstáculo 21: dos paredes de tapia de 20 cm.**

Conforme a la Figura 5.21, el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α) se presenta un error máximo 1,79 dB en relación al promedio de la atenuación medida.

- **Obstáculo 22: dos paredes de tapia de 45 cm y 53 cm.**

El error máximo que presentan el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α) con respecto al promedio de los datos medidos es de 0,69 dB como se muestra en la Figura 5.22.

- **Obstáculo 23: dos paredes de tapia de 47 cm y 90 cm.**

El modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α), presenta un error máximo de 2,06 dB con respecto al promedio de la atenuación medida, esto se aprecia en la Figura 5.23.

- **Obstáculo 24: puerta de madera 3 cm.**

En la Figura 5.24 el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados presenta un error máximo de 4,15 dB con respecto al promedio de las mediciones, cuando las antenas se encuentran a 50 cm de separación. Como se puede observar, este error disminuye notablemente a medida que se aumenta la distancia de separación entre las antenas hasta alcanzar un error mínimo de 0,04 dB.

- **Obstáculo 25: puerta de madera 3,5 cm.**

De acuerdo a la Figura 5.25 el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados presenta un error máximo de 4,18 dB con respecto al promedio de las mediciones, cuando las antenas se encuentran a 50 cm de separación. Como se puede observar, este error disminuye notablemente a medida que se aumenta la distancia de separación entre las antenas hasta alcanzar un error mínimo de 0,21 dB.

- **Obstáculo 26: entrepiso de madera.**

Como se observa en la Figura 5.26, el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) introduce un error máximo de 3,06 dB en relación a promedio de los valores medidos.

- **Obstáculo 27: entrepiso de madera.**

En la Figura 5.27 el modelo adaptado mediante el constante de atenuación (α) presenta un error máximo de 3,16 dB con respecto al promedio de las mediciones.

- **Obstáculo 28: pared de tapia de 80 cm - entrepiso de madera.**

De acuerdo a la Figura 5.28, el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) presenta un error máximo de 2,09 dB.

- **Obstáculo 29: pared de tapia de 1 m - entrepiso de madera.**

En la Figura 5.29, el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) existe un error de 2,49 dB.

Seguidamente, se muestran una serie de gráficas en donde se comparan los valores obtenidos en las pruebas de validación con los valores predichos por el modelo de propagación adaptado. En el caso de los obstáculos 18, 19 y 20, la comparación se la realiza con ambos métodos de adaptación.

Para los obstáculos 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 28 y 29 el análisis se desarrolla entre el modelo adaptado mediante la constante de atenuación (α) y los valores medidos. Mientras que en el caso de los obstáculos 24, 25, 26 y 27 la comparación es realizada con el modelo adaptado a través del método de mínimos cuadrados y los datos obtenidos en las mediciones de validación.

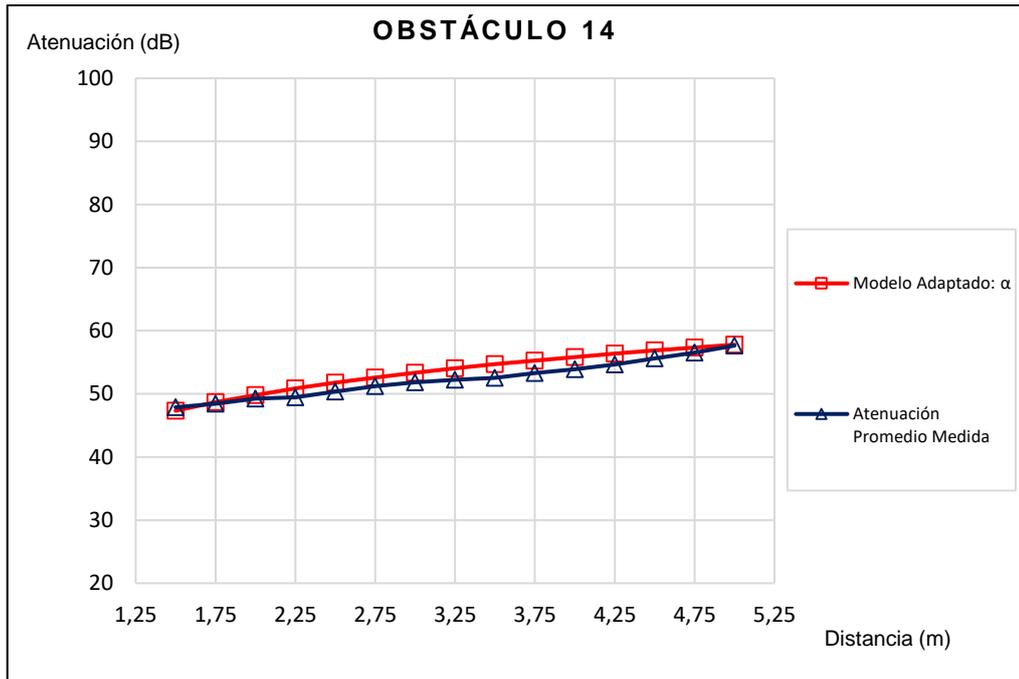


Figura 5.14. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 14 (pared de tapia de 15 cm).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

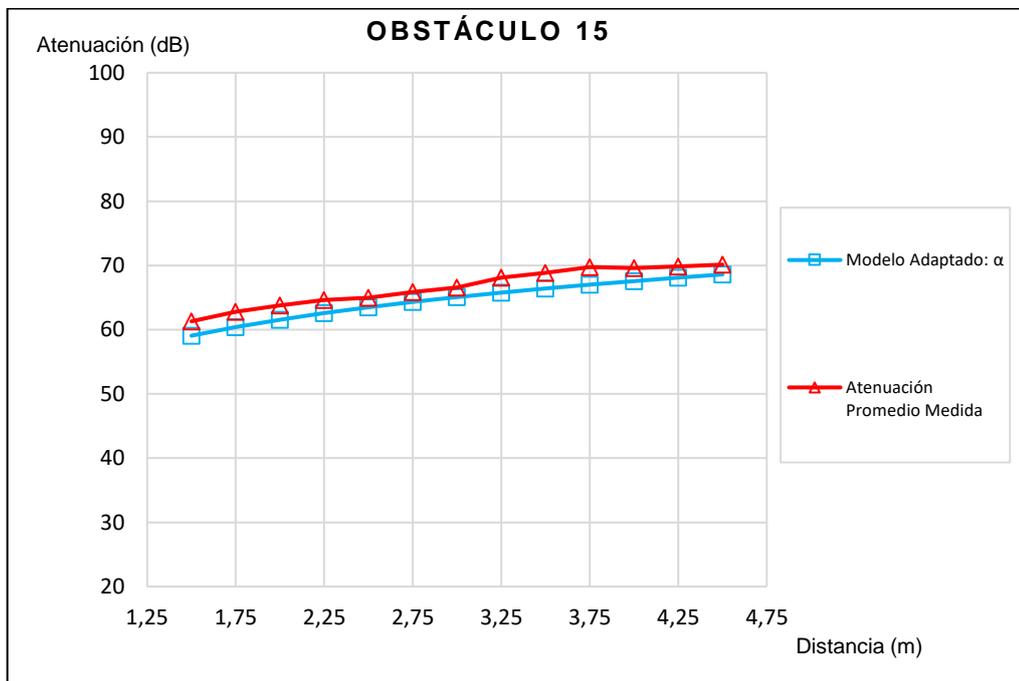


Figura 5.15. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 15 (pared de tapia de 45 cm).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

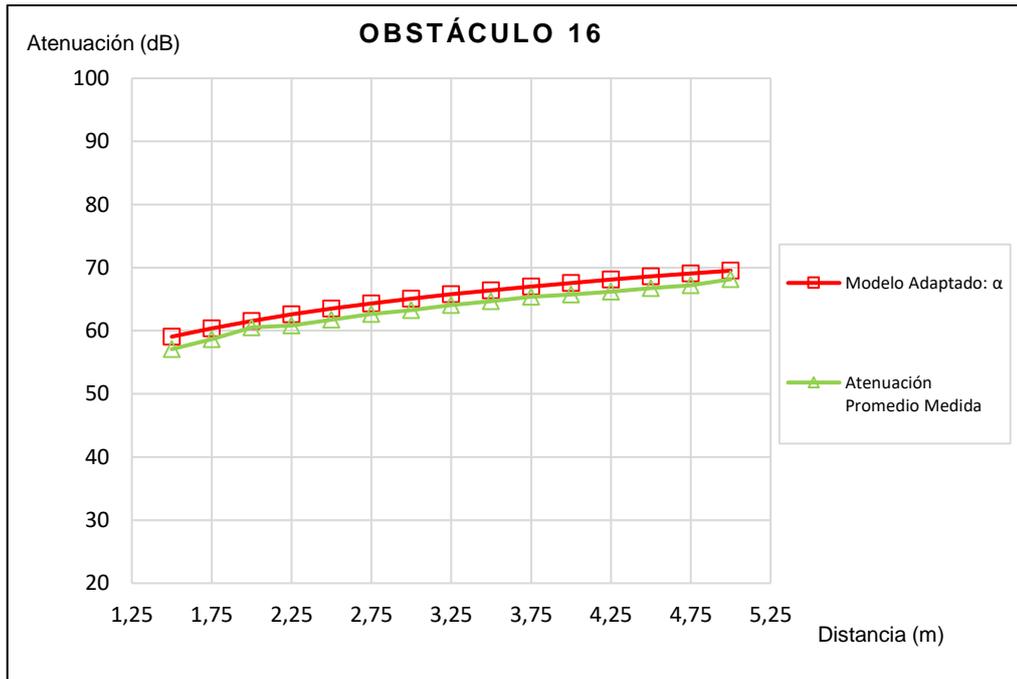


Figura 5.16. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 16 (pared de tapia de 47 cm).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

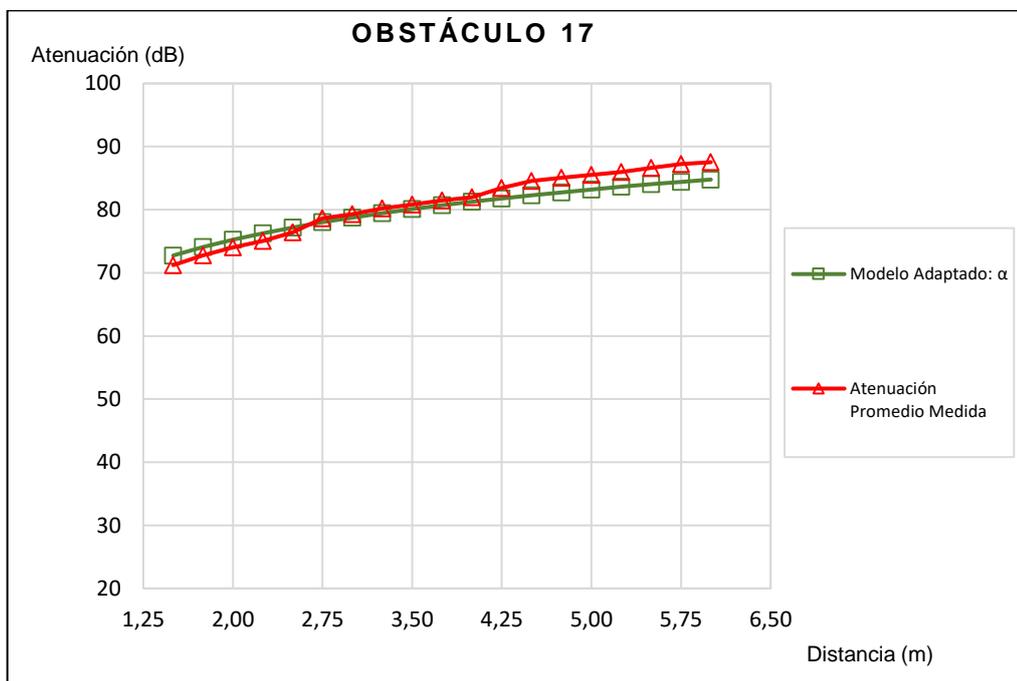


Figura 5.17. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 17 (pared de tapia de 76 cm).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

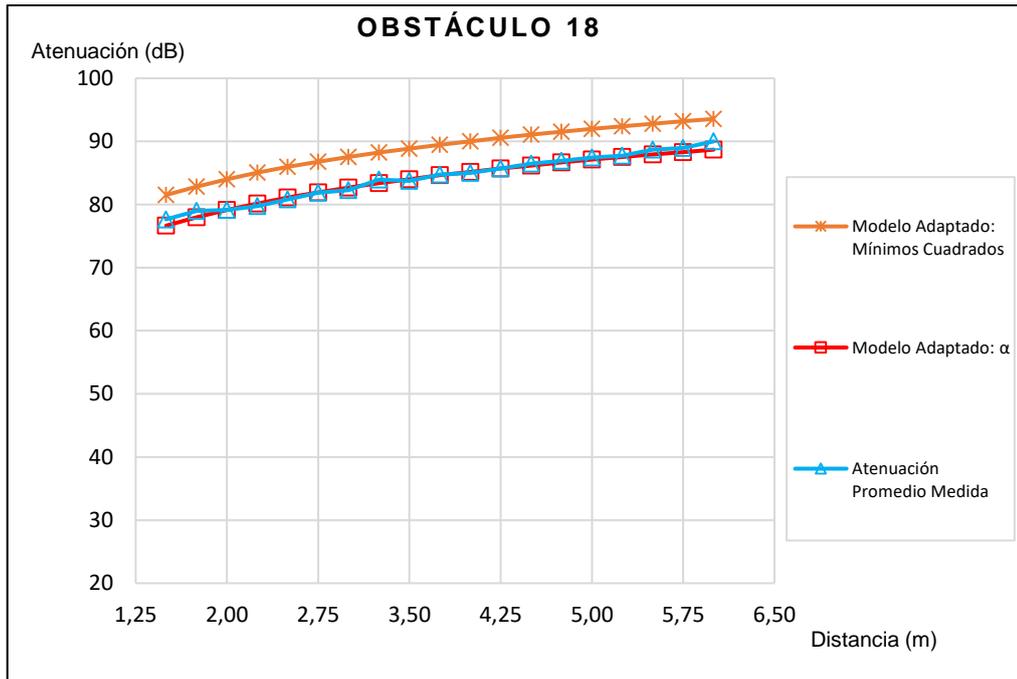


Figura 5.18. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 18 (pared de tapia de 90 cm).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

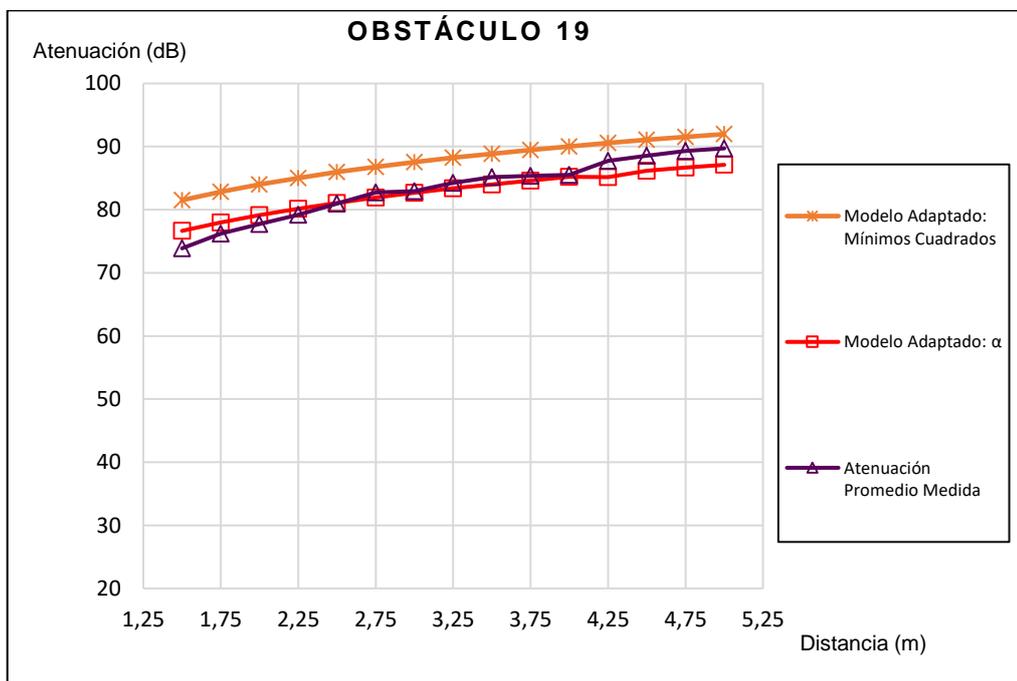


Figura 5.19. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 19 (pared de tapia de 90 cm).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

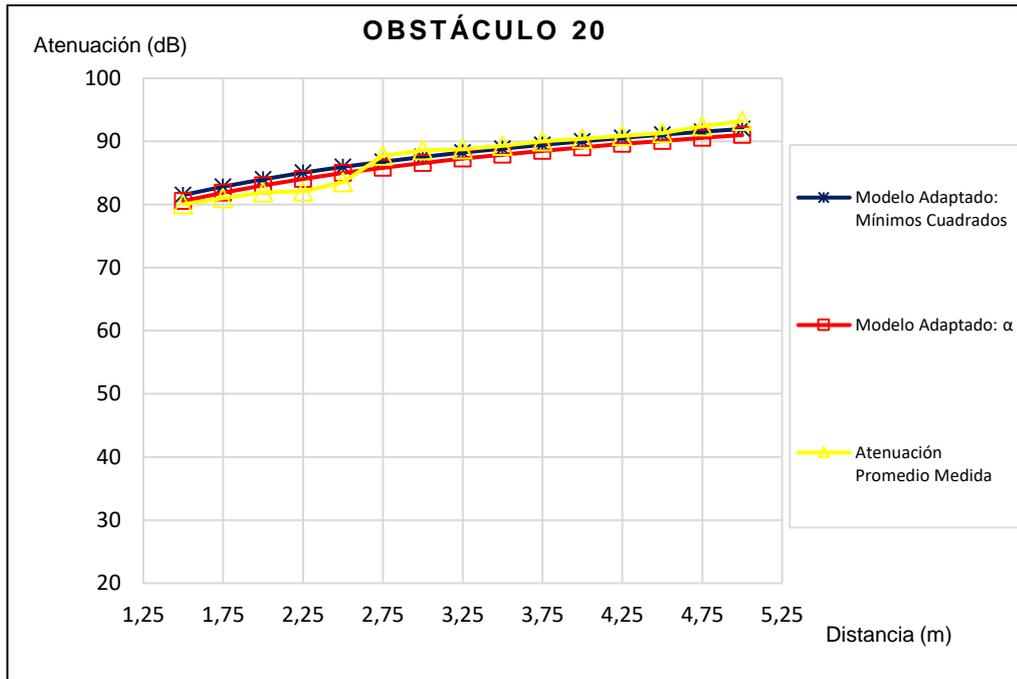


Figura 5.20. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 20 (pared de tapia de 1 m).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

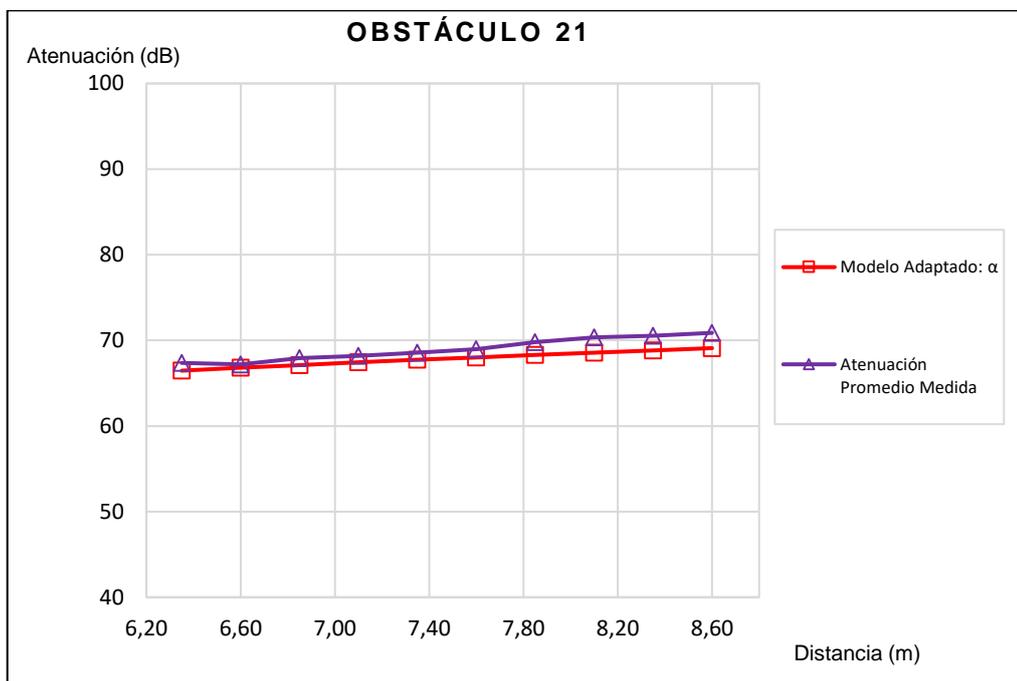


Figura 5.21. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 21 (Dos paredes de tapia de 20 cm).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

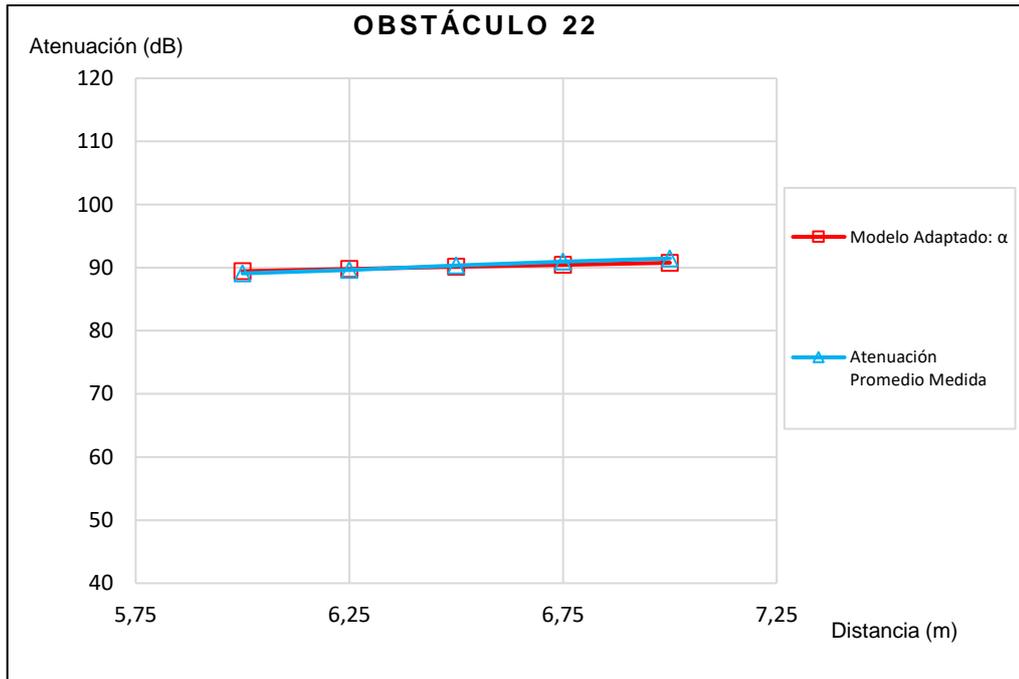


Figura 5.22. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 22 (Dos paredes de tapia de 45 cm y 53 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

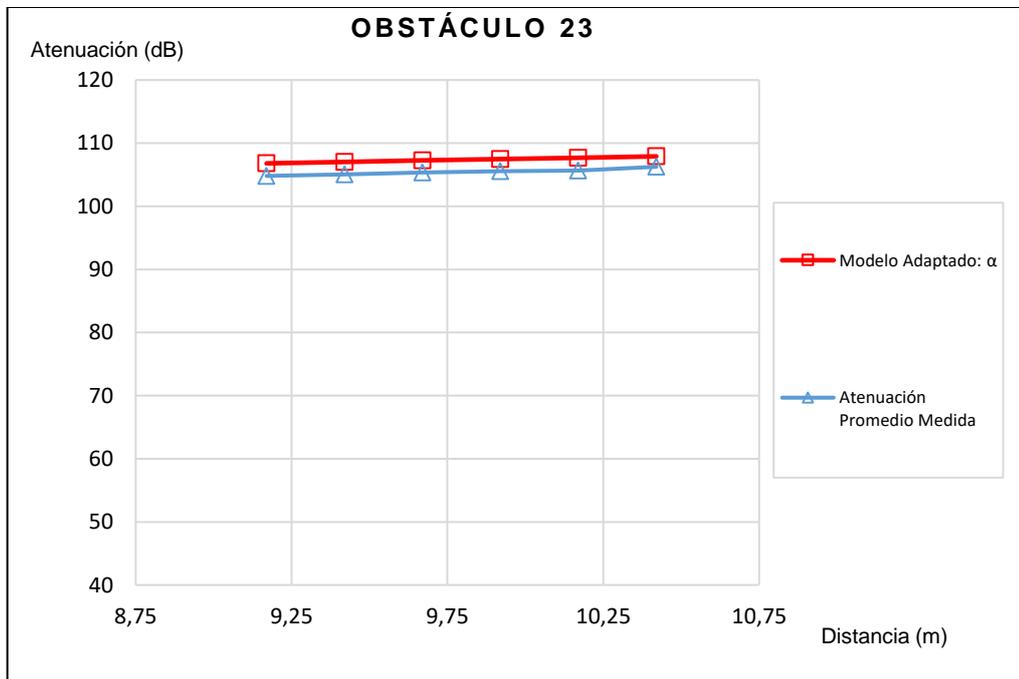


Figura 5.23. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 23 (Dos paredes de tapia de 47 cm y 90 cm).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

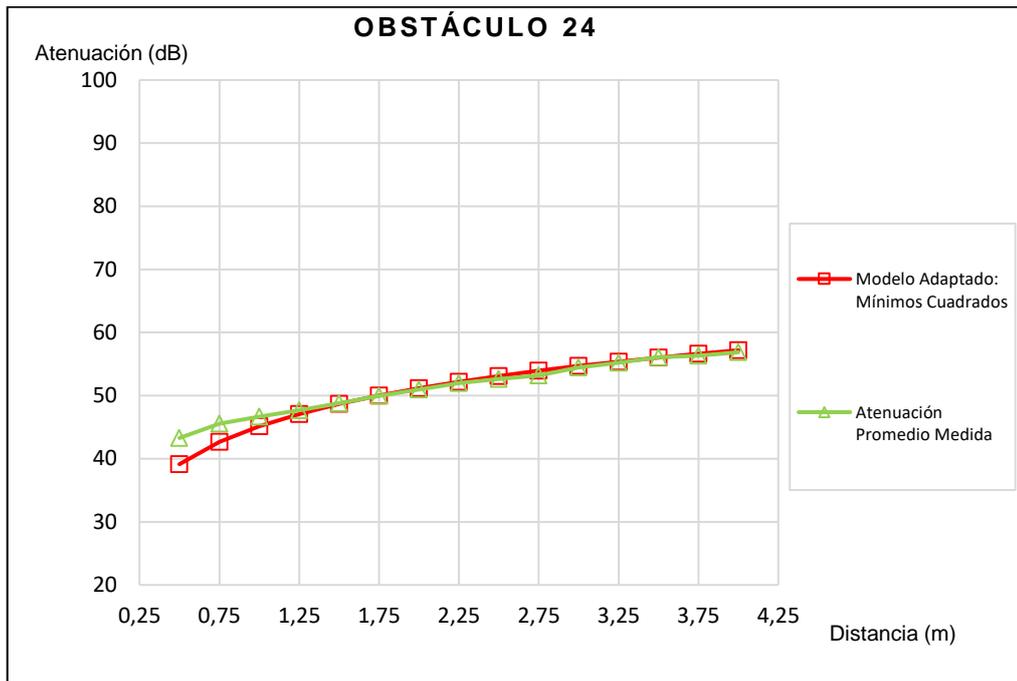


Figura 5.24. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 24 (puerta de madera de 3 cm).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

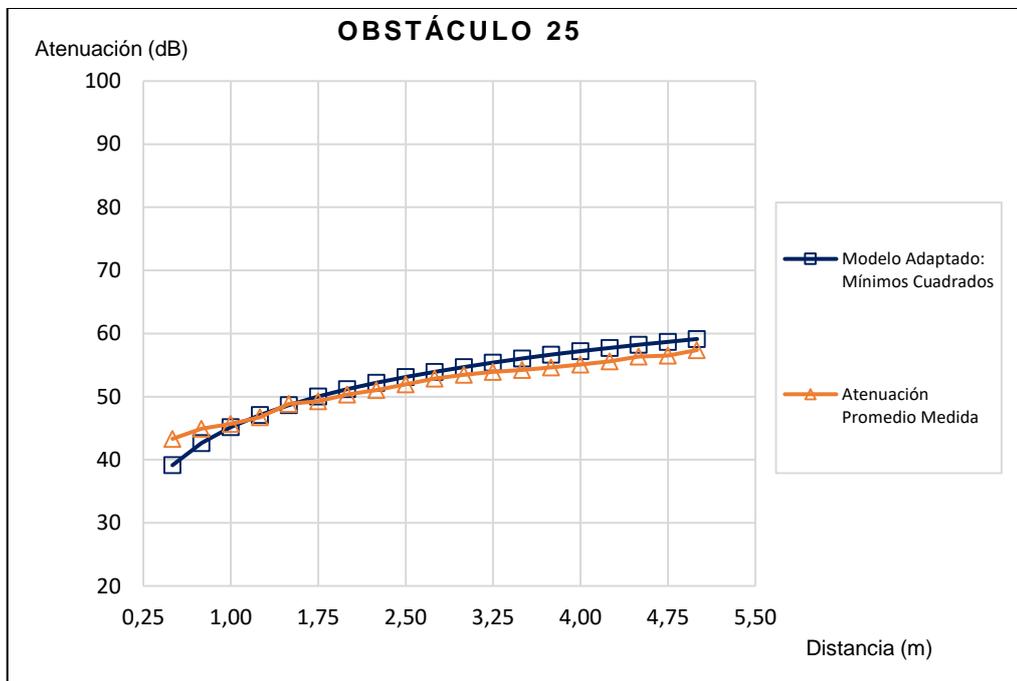


Figura 5.25. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 25 (puerta de madera de 3,5 cm).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

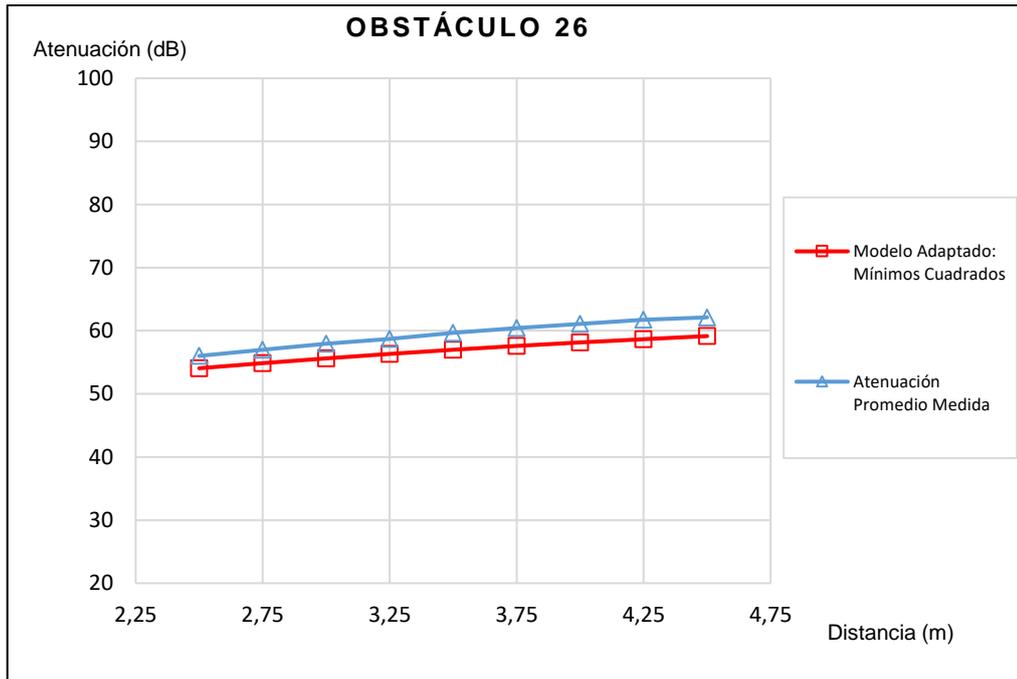


Figura 5.26. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 26 (entrepiso de madera).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

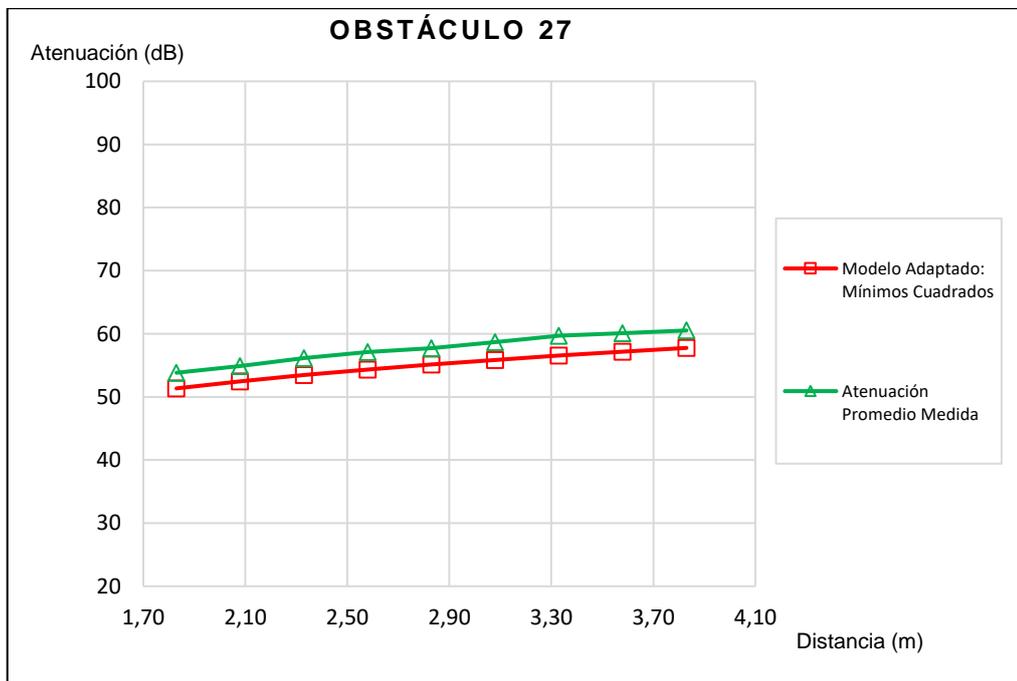


Figura 5.27. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 27 (entrepiso de madera).
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

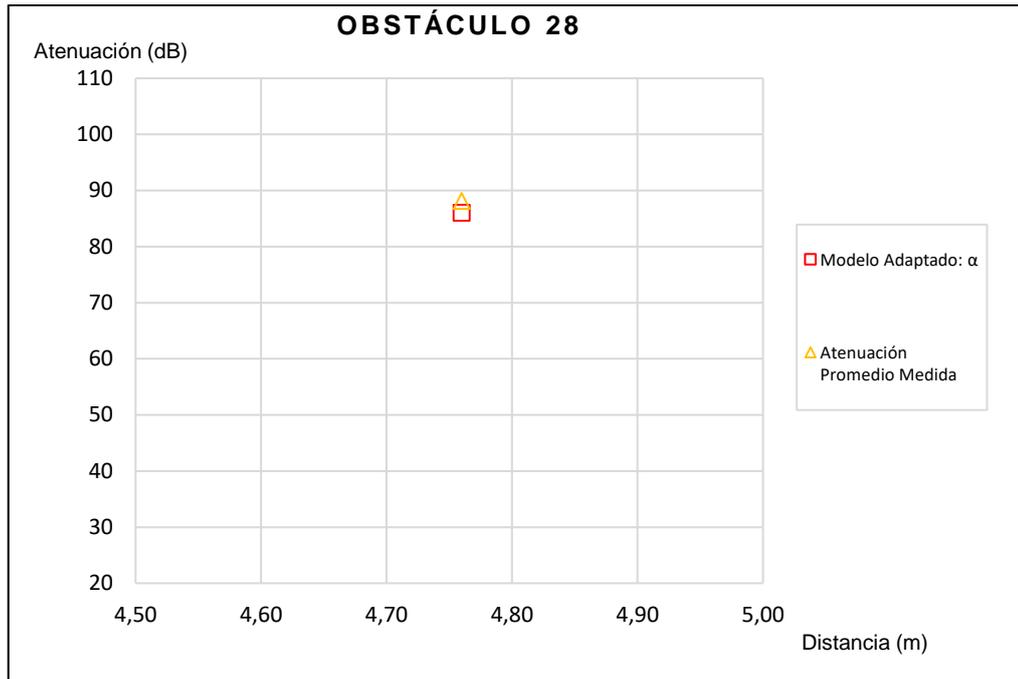


Figura 5.28. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 28 (pared de tapia de 80 cm - entrepiso de madera).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

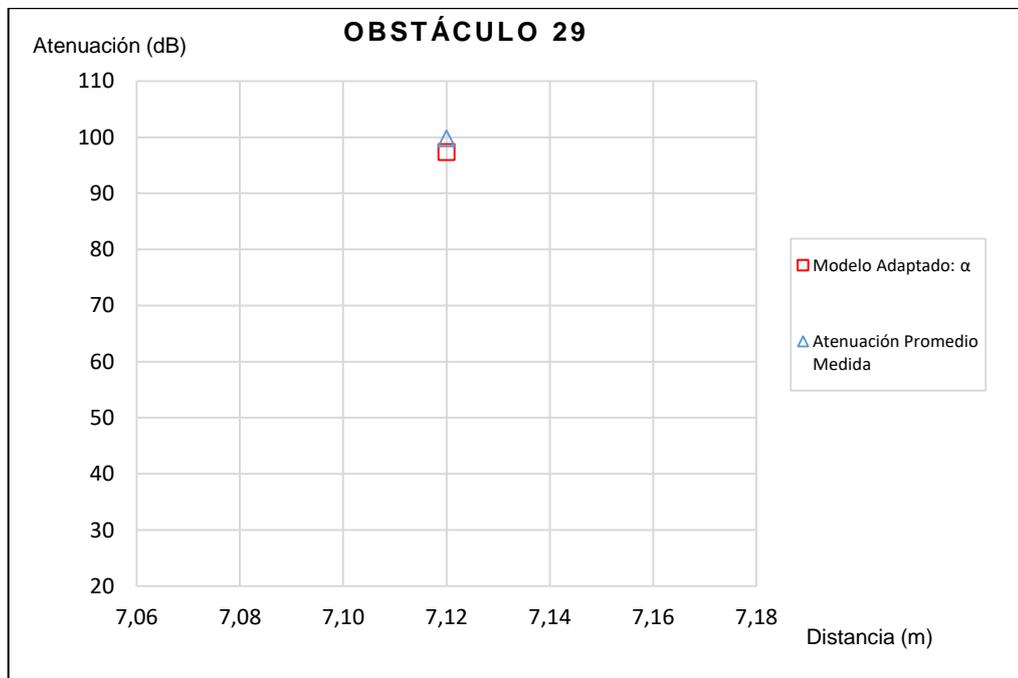


Figura 5.29. Comparación del promedio de la atenuación medida versus la atenuación calculada a través del modelo adaptado para el obstáculo 29 (pared de tapia de 1m - entrepiso de madera).

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

5.2.1. Error absoluto calculado.

A continuación, en la Tabla 5.1, se presenta el error absoluto promedio calculado entre la atenuación medida y los datos predichos por el modelo de propagación adaptado en cada obstáculo correspondiente a las pruebas de validación. En algunos casos el error es calculado para ambos métodos de adaptación dado que existen coeficientes de atenuación obtenidos mediante ambos métodos para dicho obstáculo.

Tabla 5.1. Promedio del error absoluto que presenta el modelo adaptado en las pruebas de validación.

Obstáculo	Error absoluto promedio: mínimos cuadrados (dB)	Error absoluto promedio: constante de atenuación α (dB)
Obstáculo 14: pared de tapia de 15 cm	-	1,26
Obstáculo 15: pared de tapia de 45 cm	-	2,00
Obstáculo 16: pared de tapia de 47 cm	-	1,45
Obstáculo 17: pared de tapia de 76 cm	-	1,54
Obstáculo 18: pared de tapia de 90 cm	4,60	0,42
Obstáculo 19: pared de tapia de 90 cm	4,40	1,43
Obstáculo 20: pared de tapia de 1 m	1,16	1,48
Obstáculo 21: dos paredes de tapia de 20 cm	-	1,14
Obstáculo 22: dos paredes de tapia de 45 cm - 53 cm	-	0,37
Obstáculo 23: dos paredes de tapia de 47 cm - 90 cm	-	1,92
Obstáculo 24: puerta de madera 3 cm	0,80	-
Obstáculo 25: puerta de madera 3,5 cm	1,51	-
Obstáculo 26: entrepiso de madera	2,58	-
Obstáculo 27: entrepiso de madera	2,74	-
Obstáculo 28: pared de tapia de 80 cm - entrepiso de madera	-	2,09
Obstáculo 29: pared de tapia de 1 m - entrepiso de madera	-	2,49

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

De acuerdo a la Tabla 5.1, en el caso de las paredes de tapia, el modelo adaptado a través de la constante de atenuación (α) es el que presenta un error absoluto menor a 3 dB. De igual manera, para el caso de puertas y entrepisos de madera el modelo adaptado mediante el método de mínimos cuadrados presenta un error por debajo de 3 dB. Por lo tanto, se comprueba que el modelo adaptado propuesto es funcional y apto para ser aplicado en ambientes interiores de edificaciones de arquitectura colonial.

CONCLUSIONES

- Se realizó una descripción de los diferentes tipos de modelos de propagación para ambientes interiores (modelos empíricos y determinísticos). Dentro de los modelos empíricos se detalló el modelo Log-distance path loss, One-slope, Motley-Keenan e UIT indoor path loss. En cuanto a los modelos determinísticos se describió el modelo de lanzamiento de rayos y el modelo de trazado de rayos.
- Se efectuó la adaptación de cada uno de los modelos teóricos propuestos en este trabajo de titulación, de los cuales el modelo teórico Motley-Keenan es el que mejor se ajustó a los mecanismos de adaptación utilizados (mínimos cuadrados y constante de atenuación).
- La adaptación del modelo para un obstáculo multipared requirió de la incorporación de un factor de corrección para reducir el error debido al efecto de dispersión que se produce en cada pared.
- Mediante las mediciones realizadas se pudo comprobar que las paredes de tapia, o paredes fabricadas a base de tierra, son uno de los obstáculos que mayor atenuación presentan ante la radiación electromagnética, lo que las convierte en un factor clave a considerar durante el diseño de redes inalámbricas. De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 4.6, una pared de tapia presenta una atenuación promedio de 3,91 dB por cada 10 cm de grosor en la banda de 2,4 GHz.
- Se determinó que, al aumentar la distancia de separación entre la antena de transmisión y de recepción, la atenuación aumenta a razón de 0,94 dB por cada 25 cm para el caso de paredes de tapia. En cuanto a las puertas de madera, la variación es de 0,80 dB por cada 25 cm de separación entre los equipos; mientras que, para el entrepiso de madera, la variación es de 0,88 dB por cada 25 cm de separación entre las antenas.
- Se evaluaron dos mecanismos de adaptación, el método de mínimos cuadrados y el método de la constante de atenuación. Se determinó que el modelo adaptado a través de la constante de atenuación es el más apto para ser aplicado en mediciones sobre paredes de tapia. Mientras que el modelo ajustado mediante mínimos cuadrados presenta mejores resultados sobre puertas y entrepisos de madera.

- El modelo de propagación adaptado contribuye un aporte al estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en interiores para edificaciones de arquitectura colonial, debido a que presenta un error promedio menor a 3 dB en relación a la atenuación medida. De acuerdo a los datos obtenidos en la Tabla 5.1, el modelo adaptado a través de la constante de atenuación presenta un error absoluto promedio de 1,36 dB en relación a las mediciones sobre paredes de tapia. En cuanto a dos paredes de tapia este error promedio es de 1,14 dB. Para el obstáculo pared-entrepiso de madera el error promedio es de 2,29 dB. Por otra parte, el modelo adaptado mediante mínimos cuadrados presenta un error promedio de 3,38 dB para paredes de tapia; de 1,16 dB para puertas de madera y 2,66 dB para entresijos de madera.
- Este trabajo de titulación obtiene como resultado un modelo de propagación en interiores para edificaciones de arquitectura colonial, el mismo que es de fácil aplicación y ofrece una gran confiabilidad para el diseño de redes inalámbricas en este tipo de entornos.

RECOMENDACIONES

- Procurar que las antenas del transmisor (Tx) y del receptor (Rx) estén siempre alineadas para así tomar datos precisos y evitar mediciones erróneas.
- Para la adquisición de datos implementar un sistema con equipos y cables de mejores características, es decir, cables que presenten bajas pérdidas a la frecuencia de interés y equipos con mejoras en cuanto a la potencia máxima de transmisión, ganancia y a la sensibilidad de recepción.
- Las mediciones para cada obstáculo se deben realizar en distintos días y horas, con el fin considerar todos los factores que puedan influir en la atenuación presentada por el mismo.
- Desarrollar programas computacionales que faciliten el procesamiento de los datos para el ajuste del modelo.
- Realizar la adquisición de datos en un mayor número de escenarios con el propósito de cubrir un conjunto más variado de obstáculos y con ello ser más exactos en la caracterización de escenarios y la adaptación del modelo.
- Realizar las mediciones en edificaciones coloniales que no hayan sufrido alteraciones en su infraestructura original con materiales modernos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdi, H. (2010). The Method of Least Squares, 1–7. Recuperado a partir de <https://www.utdallas.edu/~herve/abdi-LeastSquares2010-pretty.pdf>
- Abrego, R., & Sánchez, E. (2012). *Análisis de tráfico y cobertura de la red celular WCDMA en la unidad profesional Adolfo Lopez Mateos utilizando el concepto de antenas inteligentes*. Instituto Politécnico Nacional. Recuperado a partir de <http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/11430/1/6.pdf>
- Afrizal, A. A., Khadiko, N., Sulistya, F. G., Septyani, V. N., Lubis, I. H. A., & Sc, M. (2015). Electromagnetic Wave Attenuation in Lossy Dielectric, *815*, 198–202. <https://doi.org/www.scientific.net/AMM.815.198>
- Andersen, J. B., & Rappaport, T. S. (1995). Propagation measurements and models for wireless communications channels. *IEEE Communications Magazine*, *33*(1), 42. <https://doi.org/10.1109/35.339880>
- Barclay, L. (2003). *Propagation of radiowaves* (2a ed.). London: The Institution of Electrical Engineers.
- Beltrán, J. (2010). *Loja: su patrimonio arquitectónico*. (Unidad de Desarrollo e Investigación en Arquitectura, Ed.). Loja: Editorial de la Universidad Técnica Particular de Loja.
- COST, A. (1999). *COST Action 231: Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems : Final Report*. (D. Eraldo, Ed.). Luxembourg: European Commission, Directorate-General Telecommunications, Information Society, Information Market, and Exploitation of Research. Recuperado a partir de <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f2f42003-4028-4496-af95-beaa38fd475f/language-en>
- Cueva, K. M. (2016). Flexibilidad de uso y nuevo uso de las viviendas republicanas en Ecuador El caso de la ciudad de Loja. Recuperado a partir de <http://revistas.unam.mx/index.php/aca/article/download/57411/50945>
- De la Peña, D. (1997). *ADOBE, CARACTERÍSTICAS Y SUS PRINCIPALES USOS EN LA CONSTRUCCIÓN*. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN. Recuperado a partir de https://inforavit.janium.net/janium/TESIS/Licenciatura/De_la_Pena_Estrada_Diego_44659.pdf
- Erreyes, A., & Poma, B. (2016). *Optimización de un modelo de pérdidas de propagación en ambientes internos. Caso Campus UTPL*. Universidad Técnica Particular de Loja. Recuperado a partir de <http://dspace.utpl.edu.ec/browse?type=author&value=Erreyes+Dota%2C+Alexandra+Jannet>
- García-Alvarez, J.-C., & Rogriguez, O.-A. (2002). Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la zona de Caldas Parte 1: Modelos para áreas urbanas. *X Congreso Internacional de Telecomunicaciones*. Recuperado a partir de <http://www.docentes.unal.edu.co/jcgarciaa/docs/Papers/ID016.pdf>
- García, N. (2006). *Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo*. Universidad de Oviedo. Recuperado a partir de <http://di002.edv.uniovi.es/~cueva/investigacion/tesis/Nestor.pdf>
- Hernández, D. A. (2016). *MODELO PARA PREDICCIÓN DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN REDES WLAN, BANDAS NO LICENCIADAS (2.4 GHz Y 5.8 GHz, EN AMBIENTES INTERIORES*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Recuperado a partir de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/37306>

- Huidrobo, J., & Luque, J. (2013). *Comunicaciones por radio*. Madrid: Ra-Ma.
- Idim, A., & Anyasi, F. (2014). Determination of Pathloss Exponent Using Gsm Signal in Orhuwhorun Environ, Delta State. *Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 9(5), 12–20. Recuperado a partir de <http://www.iosrjournals.org/iosr-jece/papers/Vol. 9 Issue 5/Version-1/C09511220.pdf>
- INPC. (2014). Instituto Nacional de Patrimonio Cultural: Sistema de Información Cultural Ecuatoriano SIPCE. Recuperado a partir de <http://patrimoniocultural.gob.ec/sistema-de-informacion-del-patrimonio-cultural-ecuadoriano-sipce/>
- L-Com. (s/f). L-com Global Connectivity. Recuperado el 7 de agosto de 2018, a partir de <http://www.l-com.com/wireless-antenna-24-ghz-15-dbi-die-cast-mini-reflector-grid-antenna-n-female-connector>
- Láčik, J., Lukeš, Z., & Raida, Z. (2008). On using ray-launching method for modeling rotational spectrometer. *Radioengineering*, 17(2), 98–107. Recuperado a partir de https://www.radioeng.cz/fulltexts/2008/08_02_098_107.pdf
- Lawton, M. C., & McGeehan, J. P. (1994). The Application of a Deterministic Ray Launching Algorithm for the Prediction of Radio Channel Characteristics in Small-Cell Environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43(4), 955–969. <https://doi.org/10.1109/25.330158>
- Lima, A. G. M., & Menezes, L. F. (2005). Motley-keenan model adjusted to the thickness of the Wall. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings*, 180–182. <https://doi.org/10.1109/IMOC.2005.1580040>
- Martinsson, D., & Johnsson, T. (2002). *A Deterministic Channel Model for Simulation of Mobile Radio Communications*. Blekinge Institute of Technology. Recuperado a partir de <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:831604/FULLTEXT01.pdf>
- Minke, G. (2006). *Building with Earth*. Kassel, Germany: Birkhäuser. Recuperado a partir de http://www.rivendellvillage.org/Building_With_Earth.pdf
- Monteros, K. (2008). *Arquitectura Conventual Dominica de la Provincia de Santa Catalina Mártir de Quito*. Universidad Autónoma de México.
- Naranjo, C. (2013). *Caracterización práctica del canal estrecho en las bandas de 2.4 GHz, 3.3 GHz y 5.5 GHz para interiores*. Universidad Autónoma de Madrid. Universidad Autónoma de Madrid. Recuperado a partir de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/13834/64846_Cesar_Alfredo_Naranjo_Hidalgo.pdf?sequence=1
- Parsons, J. D. (2000). *The Mobile Radio Propagation Channel*. (John Wiley, Ed.) (2a ed.). Chichester. <https://doi.org/10.1049/ir:19920094>
- Pauli, P., & Moldan, D. (2000). *Reduzierung hochfrequenter Strahlung - Baustoffe und Abschirmmaterialien*.
- Piedra, P. (2009). *Arquitectura civil en Loja a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Rajulu, K. C. V., & Mohanty, B. N. (2016). Dielectric and Conductivity Properties of some Wood Composites. *International Journal of Engineering and Technologies*, 8, 51–60. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/IJET.8.51>
- Rappaport, T. (2002). *Wireless Communications Principles and Practice* (2a ed.). New Jersey: Prentice

Hall.

- Reinoso, M. (2018). *Prototipo de vivienda social en adobe para el cantón Saraguro, en la provincia de Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja. Recuperado a partir de <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/22398>
- Rocha, M. (2017). *CEB IMPLEMENTATION REPORT*. Badajoz. Recuperado a partir de <http://www.valedaslobas.com/wp-content/uploads/2017/03/CEB-DOSSIER-v1.1-en.pdf>
- Sadiku, M. (2003). *Elementos de Electromagnetismo* (3a ed.). Oxford University Press.
- Sarkar, T. K., Ji, Z., Kim, K., Medouri, A., & Salazar-Palma, M. (2003). A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45(3), 51–82. <https://doi.org/10.1109/MAP.2003.1232163>
- Schreckenbach, H. (2004). *Building the earth*. Weimar, Germany: Dachverband Lehm e.V. <https://doi.org/10.1007/3-7643-7873-5>
- Seybold, J. S. (2005). *Introduction to RF propagation*. Hoboken, N.J: Wiley.
- Signal, H. (2018). Signal Hound. Recuperado el 7 de agosto de 2018, a partir de <https://signalhound.com/>
- Sinchire, D. (2008). *Técnicas de Expresión II*.
- Sizun, H. (2005). *Radio Wave Propagation for Telecommunications Applications*. Berlin: Springer.
- Sjödén, T. (2008). *Electromagnetic Modelling for the Estimation of Wood Parameters*. Växjö University. Recuperado a partir de <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A206114/FULLTEXT01.pdf>
- Tejada, U., Mendoza, A., & Torrealva, D. (2016). *USO DEL TAPIAL EN LA CONSTRUCCIÓN*. Lima: SENCICO. Recuperado a partir de <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=3006>
- Torgovnikov, G. I. (1993). *Interaction between the Electromagnetic Field and Wood. Main Features of Dielectric Properties of Wood*. In: *Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-77453-9_1
- UIT-R. (2016). *Cálculo de la atenuación en el espacio libre*. Ginebra. Recuperado a partir de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/es>
- UIT-R. (2017). *Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones de interiores y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 900 MHz a 100 GHz*. Ginebra. Recuperado a partir de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-9-201706-I/es>
- Xie, M. (2013). *Indoor radio propagation modeling for system performance prediction*. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Recuperado a partir de <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00961244/document>

ANEXOS

ANEXO 1: DATASHEET DE LAS ANTENAS HYPERLINK HG2415EG

HyperLink Wireless 2.4 GHz 15 dBi Die Cast Grid Antenna Model: HG2415EG

Applications

- 2.4 GHz ISM band
- IEEE 802.11b/g/n Wireless LAN, WiFi systems
- Long range direction, Point to Point and Point to Multi-point systems
- Wireless bridges and backhaul applications
- Wireless video systems

Features

- Die cast aluminum construction with UV stable finish
- All weather operation
- 16° beam-width
- 12 inch coax lead
- Easy to assemble



Description

The HyperLink Directional Mini-Reflector Grid WiFi Antenna provides 15 dBi gain with a 16° horizontal beam-width for directional applications. Its compact design makes it nearly invisible in most installations, and it can be installed for either vertical or horizontal polarization. It is ideally suited for 2.4GHz ISM band applications such as IEEE 802.11b/g/n wireless LAN systems.

This antenna's construction features a die cast aluminum reflector grid for superior strength and light weight. This antenna's 2-piece reflector grid is simple to assemble and significantly reduces shipping costs. The grid surface is UV powder coated for durability and aesthetics. The open-frame grid design minimizes wind loading.

The HG2415EG antenna is supplied with a tilt and swivel mast mount kit. This allows installation at various degrees of incline for easy alignment. It can be adjusted up or down from 0° to 60°.



Vertical or Horizontal Polarization



Tilt & Swivel Mast Mount

Specifications

Electrical Specifications

Frequency	2400-2500 MHz
Gain	15 dBi
Horizontal Beam Width	16°
Vertical Beam Width	21°
Polarization	Horizontal or Vertical
Front to Back Ratio	20 dB
Impedance	50 Ohm
Max. Input Power	100 Watts
VSWR	< 1.5:1 avg.
Lightning Protection	DC Short

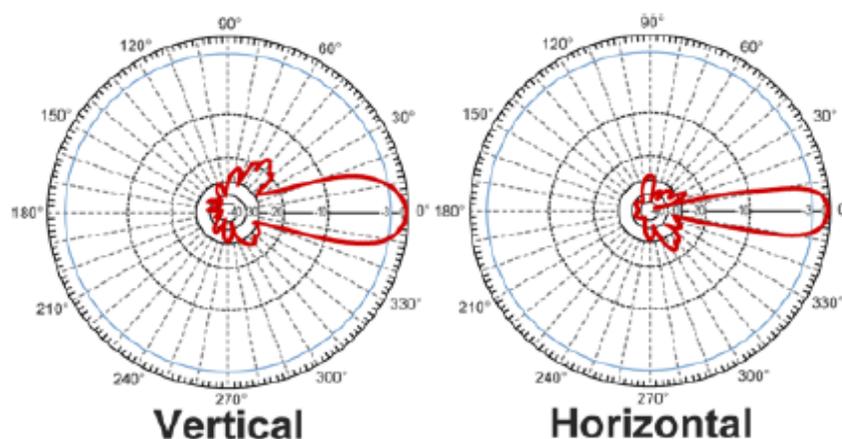
Mechanical Specifications

Weight	2.6 lbs. (1.2 kg)
Grid Dimensions	11.8" (300 mm) x 15.7" (400 mm)
Mounting	1.25 - 2 in. (31.8 - 50.8 mm) dia. mast max.
Operating Temperature	-40° C to 85° C (-40° F to 185° F)
RoHS Compliant	Yes

Wind Loading Data

Wind Speed (MPH)	Loading
100	10.0 lb.
130	15.6 lb.

RF Antenna Gain Patterns



ANEXO 2: DATASHEET DEL GENERADOR DE SEÑALES



USB-TG124A Tracking Generator

6 March 2015

FREQUENCY

- Frequency range: 100 kHz to 12.4 GHz
- Frequency Accuracy: ± 1 ppm
- Frequency steps: 19 selectable step sizes from 10 Hz to 10 MHz (100 kHz to 4 GHz range) and 16 selectable step sizes from 100 Hz to 10 MHz (4 GHz to 12.4 GHz range)

AMPLITUDE

- Amplitude range: -30 dBm to -12 dBm
- Absolute Amplitude accuracy ± 2.0 dB
- Amplitude steps: 1 dB

HARMONICS

- Typically < -10 dBc

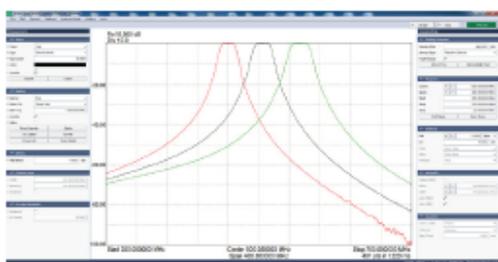
CALIBRATION INTERVAL 1-year

OPERATING TEMPERATURE

- 20° C to 25° C to achieve published specifications
- 0° C to 70° C operating range with derated amplitude specs

SYSTEM REQUIREMENTS

The USB-TG124A is packaged with application software that is used on a PC running Windows® 7, or Windows® 8 operating systems. You must have at least 1GB of free disc space, 1GB of RAM, one USB 2.0 port, and a 2 GHz dual-core processor.



SOFTWARE DETAILS

Use Signal Hound's Spike™ software, in combination with the TG124A Tracking Generator and SA124B spectrum analyzer, as a completely integrated system. Spike™ provides a virtual control panel on the user's PC for sending commands to the SA124B and TG124A over the USB. Spike™ also directs signal data processing over the USB and into the user's PC, for display and/or screen capture.



The Signal Hound TG124A is a USB-powered, 100 KHz to 12.4 GHz, economy tracking generator and CW signal generator. The TG124A turns your SA124B, SA44B, or BB60C spectrum analyzer into a versatile scalar network analyzer. The combination can measure gain, frequency response, compression, flatness, and insertion loss on components and subsystems.

Signal Hound's new Spike® software is now included, which integrates the SA-series and BB-series spectrum analyzers with the TG-series tracking generators, past and present, under the same Graphical User Interface (GUI) as the Signal Hound BB60C spectrum analyzer.

High dynamic range measurements are user friendly and efficient. Save up to a 1000-point data file and then load it in the path loss table for normalization of precision RF cable and/or antenna measurements.

As an economy CW signal generator, the TG124A is adequate for tasks that will tolerate harmonics that are typically ≤ -10 dBc.

The TG124A is powered from the USB cable, which also eliminates the need for a separate power supply. Measuring less than 8 inches long and weighing only 10 ounces, the TG124A can be used virtually anywhere!

ANEXO 3: DATASHEET DEL ANALIZADOR DE ESPECTROS



USB-SA124B Spectrum Analyzer and Measuring Receiver

6 March 2015

FREQUENCY

- Frequency Range: 100 kHz to 12.4 GHz
- Timebase: 10 MHz reference in and out
- Internal Frequency Reference Accuracy: ± 1 ppm (standard); 1×10^{-7} (option-02)
- Resolution Bandwidth: 1 Hz to 250 kHz and 6 MHz

AMPLITUDE (RBW ≤ 100 KHZ)

- Range: +10 dBm to Displayed Average Noise Level (DANL)
- Absolute Accuracy (0dB to DANL): ± 1.5 dB (100 kHz to 6 GHz) ± 2.5 dB (6 GHz to 12.4 GHz)

DISPLAYED AVERAGE NOISE LEVEL (DBM/HZ)

100 kHz to 10 MHz	-147 dBm
10 MHz to 100 MHz	-151 dBm
100 MHz to 3.0 GHz	-152 dBm
3.0 GHz to 5.5 GHz	-145 dBm
5.5 GHz to 7.0 GHz	-149 dBm
7.0 GHz to 8.0 GHz	-147 dBm
8.0 GHz to 11.0 GHz	-134 dBm
11.0 GHz to 12.4 GHz	-129 dBm

RESIDUAL RESPONSES (RBW = 6.5KHZ)

100 kHz to 10 MHz	-100 dBm
10 MHz to 8.0 GHz	-93 dBm
8.0 GHz to 11.0 GHz	-82 dBm
11.0 GHz to 12.4 GHz	-85 dBm

SSB PHASE NOISE AT 10 GHZ (TYPICAL)

Frequency Offset	dBc/Hz
100 Hz	-72
1 kHz	-80
10 kHz	-87
100 kHz	-87
1 MHz	-110

IF OUTPUT

- 63 MHz with 6 MHz bandwidth for down conversion of NTSC, PAL, SECAM, ATSC, and DTV formatted signals

CALIBRATION INTERVAL 1-year



MEASURING RECEIVER (TYPICAL AFTER 30 MIN WARM-UP AND $\pm 3^{\circ}\text{C}$ OF REF. START TEMP.)

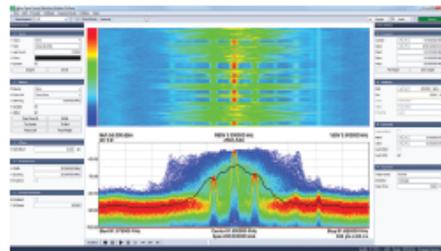
- Operating Frequency: 100 kHz to 12.4 GHz
- Modulation Measurement Accuracy: $\pm 1\%$ for AM & FM
- Synchronous Level Detector ± 0.25 dBc (0 dBm to -127 dBm, 100 kHz to 1.0 GHz) ± 0.25 dBc (0 dBm to -117 dBm, 1.0 GHz to 6.0 GHz) ± 0.25 dBc (0 dBm to -102 dBm, 6.0 GHz to 12.4 GHz)

SPIKE™ SOFTWARE

Signal Hound's Spike™ software allows the SA124B to function as a real-time spectrum analyzer (RTSA), using its real-time mode, for sweeps of 250 kHz and less—that means every RF event will be captured when using spans that are ≤ 250 kHz. Graphics include color persistence and a 2D waterfall display.

OPERATING TEMPERATURE

- 0°C to $+50^{\circ}\text{C}$ with full accuracy



SYSTEM REQUIREMENTS

Signal Hound's Spike™ software is compatible with Windows® 7, 8, and 10 operating systems. You must have at least 200MB of free disc space, 4GB of RAM, two adjacent USB 2.0 ports, and a minimum of an Intel® Atom™ N2600 or Intel® Core™ i3 processor.

