

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA



“MODELAMIENTO DE CANAL DE PROPAGACIÓN INALÁMBRICO EN LA BANDA ISM EN ÁREAS DE CONSERVACIÓN ARQUEOLÓGICA DE LA REGIÓN DEL CUSCO”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR: YHON DEYVIS LEZAMA VILCA

ASESOR: JORGE LUIS ARIZACA CUSICUNA

Financiado por:
CONCYTEC/PRO CIENCIA, BANCO MUNDIAL

Cusco, 2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, asesor del trabajo de investigación titulado "MODELAMIENTO DE CANAL DE PROPAGACION INALAMBRICO EN LA BANDA ISM EN AREAS DE CONSERVACION ARQUEOLOGICA DE LA REGION DEL CUSCO", presentado por el bachiller LEZAMA VILCA YHON DEYVIS, con DNI número 75252253 para optar al Título Profesional de Ingeniero Electrónico. Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por tres veces, mediante el software antiplagio, conforme al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7%

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación, tesis, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de enseñanza y otros (Art. 7, inc 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones.	Marque con X
Del 1 al 10 %	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 08 de febrero del 2023


Jorge Luis Arizaca Cusicuna
DNI: 42348906
<https://orcid.org/0000-0003-2658-5492>

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.

2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:

<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:152544110?locale=es>

NOMBRE DEL TRABAJO

LEZAMA Tesis Final.pdf

AUTOR

Deyvis Lezama

RECUENTO DE PALABRAS

20459 Words

RECUENTO DE CARACTERES

102386 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

127 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

6.8MB

FECHA DE ENTREGA

Jun 2, 2022 9:10 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jun 2, 2022 9:16 PM GMT-5**● 7% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 6% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 9 palabras)

DEDICATORIA

En memoria de mi Tío Gregorio Lezama Huaman.

Mi madre, Maria Magdalena Vilca Huallpa, por su apoyo incondicional para que yo pudiera llegar a donde estoy. Nunca midió los esfuerzos para mi bienestar.

Mi padre, Raul Lezama Huaman, por el amplio apoyo emocional y financiero.

Mi tío Pbro. Luciano Vilca Huallpa, por su genialidad en la formación de mi carácter y personalidad.

AGRADECIMIENTO

Agradezco:

A Dios, por permitirme lograr uno de mis sueños, y poner en mi camino gente verdaderamente especial.

Al profesor Msc. Jorge Luis Arizaca Cusicuna, por creer en mi persona y mi potencial para desarrollar una tesis, incrementando así mi nivel de conocimiento científico.

Al Doctor PhD. Jinmi Gregory Lezama Calvo, por el apoyo indispensable en la preparación de artículos de investigación, el apoyo de campo y por las enseñanzas transmitidas sobre fundamentos teóricos y prácticos.

Al Doctor Cesar Briso, por el amplio y estricto apoyo en el conocimiento acerca de modelamiento de canal.

A mis compañeros de laboratorio por su apoyo a lo largo de la elaboración de esta tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	8
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	12
I. ASPECTOS GENERALES	14
1.1. TÍTULO	14
1.2. RESPONSABLE	14
1.3. ASESOR	14
1.4. ÁMBITO GEOGRÁFICO	14
1.5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.5.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.6. JUSTIFICACIÓN	17
1.7. OBJETIVOS	18
1.7.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.8. ALCANCES	19
1.9. LIMITACIONES	19
II. MARCO TEÓRICO	20
2.1. ANTECEDENTES	20
2.2. CANALES DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	22
2.2.1. Mecanismos básicos de propagación	23
2.2.2. Procesos de desvanecimiento	24
2.2.3. Modelos de propagación inalámbrica	25
2.2.4. Modelos de desvanecimiento	35
2.2.5. Tasa de Paso de Nivel y Duración Media de Desvanecimiento	41
III. CAMPAÑA DE MEDIDAS	45
3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS	46
3.1.1. Módulo LoRa LILYGO TTGO T-Beam	46
3.1.2. Antenas	46
3.1.3. Soportes	47
3.1.4. Ordenador Portátil	48
3.2. SOFTWARE UTILIZADO	48
3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS	49
3.4. ADQUISICIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	54

IV. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CANAL DE PROPAGACIÓN	61
4.1. TÉCNICA DEL FILTRO DE MEDIA MÓVIL	62
4.2. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	64
4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA PERDIDA DE PROPAGACIÓN	64
4.3.1. Chinchero	64
4.3.2. Pisac	77
4.4. CARACTERIZACIÓN DEL DESVANECIMIENTO MEDIANTE ESTADÍSTICAS DE PRIMER ORDEN	84
4.4.1. Sombreamiento o <i>Shadowing</i>	84
4.4.2. Desvanecimiento a Pequeña Escala	84
4.5. CARACTERIZACIÓN DEL DESVANECIMIENTO MEDIANTE ESTADÍSTICAS DE 2DO ORDEN	86
4.6. VALIDACIÓN DEL MODELO OBTENIDO	88
4.7. RESULTADOS ADICIONALES DEL MODELO OBTENIDO	90
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
VI. TRABAJOS FUTUROS	96
Anexos	101
A. DETALLES Y CARACTERÍSTICAS DE LA ANTENA	102
B. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	105
2.0.1. Programas en MatLab:	105
C. DIMENSIONES DE LA BASE DE DATOS OBTENIDA EN BASE A SIMULACIONES DE MODELOS DE CANAL TEÓRICOS	114
D. FOTOGRAFÍAS DE MEDICIONES REALIZADAS EN LOS PARQUES ARQUEOLÓGICOS	116

Índice de tablas

2.1. Exponentes de propagación en diferentes entornos (Rappaport y cols., 1996)	32
2.2. Distribuciones derivadas de Nakagami (Yacoub, 1993)	39
3.1. Parámetros del TTGO T-Beam	46
3.2. Características de la Antena Pulse Part Number W1063	47
4.1. Parámetros de regresión de la explanada de Capellanpampa	65
4.2. Parámetros de regresión de la explanada de Capellanpampa a 20cm para cada ruta	65
4.3. Parámetros de Regresión de Promedio de rutas a 20cm en la explanada de Capellanpampa	67
4.4. Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de explanada de Capellanpampa	69
4.5. Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de explanada de Capellanpampa	69
4.6. Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de explanada de Capellanpampa	70
4.7. Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de explanada de Capellanpampa	70
4.8. Parámetros de regresión de muros incas	72
4.9. Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas	73
4.10. Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas	73
4.11. Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas	74
4.12. Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas	74
4.13. Parámetros de regresión de los andenes de Wataycarcel	75
4.14. Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de andenes	76
4.15. Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de andenes	76
4.16. Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de andenes	76
4.17. Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de andenes	76

4.18. Parámetros de regresión para el escenario LOS de Pisac-Pisqa	77
4.19. Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de línea de vista	78
4.20. Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de línea de vista	79
4.21. Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de línea de vista	79
4.22. Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de línea de vista	79
4.23. Parámetros de regresión para el escenario de muros de Pisac	80
4.24. Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas Pisac	81
4.25. Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas Pisac	81
4.26. Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas Pisac	82
4.27. Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas Pisac	82
4.28. Parámetros de los modelos de altura de antena Rx variable para el escenario de andenes incas Pisac	83
4.29. Modelo de doble pendiente para zonas de conservación arqueológica	88
4.30. Estimación de la distancia utilizando el modelo desarrollado VS distancia medida en escenario de Explanada	91
4.31. Estimación de la distancia utilizando el modelo desarrollado VS distancia medida en escenario de muros incas	91

Índice de figuras

1.1. Localización Geográfica[Fuente:Google Earth]	15
1.2. Localización Geográfica[Fuente:Google Earth]	15
2.1. Propagación Multitrayecto de la Señal de Propagación	23
2.2. Desvanecimientos de la señal de propagación	25
2.3. Modelo de propagación de espacio libre	27
2.4. Situación física del modelo de tierra plana(Saunders y Aragón-Zavala, 2007) 28	
2.5. Modelo de tierra plana simplificada	31
2.6. Modelo log-normal y modelo log-distancia	33
2.7. Modelo de doble pendiente	34
2.8. Modelo de reflectividad variable del suelo	35
2.9. Desvanecimientos (Du y Swamy, 2010)	36
2.10. Distribución de Probabilidad Normal	37
2.11. Distribución de Probabilidad Rician	38
2.12. Distribución de Probabilidad Rayleigh	39
2.13. Distribución de Probabilidad Nakagami	40
2.14. Tasa de Paso de Nivel -Rice	42
2.15. Tasa de Paso de Nivel -Rice	43
2.16. Duración Media de Desvanecimiento- Nakagami	43
2.17. Duración Media de Desvanecimiento- Nakagami	44
3.1. Modulo TTGO T-Beam	46
3.2. Soporte para antenas	47
3.3. Ordenador Portátil	48
3.4. Explanada de Capellanpampa	50
3.5. Muros Incas	50
3.6. Andenes de Wataycarcel	51
3.7. Llanura de pisac, sector qosqa	52
3.8. Muro inca de andeneria	53
3.9. Andenes del sector q'alla q'asa y q'antus raq'ay	54
3.10. Rutas de medición- Chinchero-Explanada	55
3.11. Señalización dentro de los parques arqueológicos	56
3.12. Ruta de medición llano de Pisac, sector Qosqa	57
3.13. Mediciones en los muros incas de Chinchero	58
3.14. Mediciones en los muros incas de Pisac	59
3.15. Mediciones en los andenes del Sector de Wataycarcel	60
3.16. Mediciones en los andenes incas de Pisac	60

4.1. Diagrama de bloques	61
4.2. Uso del filtro de media móvil para separar el desvanecimiento a pequeña escala	62
4.3. Desvanecimiento a pequeña escala	63
4.4. Medidas obtenidas con 20cm de altura de antena Rx	65
4.5. Regresión para cada ruta establecida dentro del escenario de Capellanpampa	66
4.6. Regresión para el promedio total de rutas a 20cm establecida dentro del escenario de Capellanpampa	67
4.7. Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de re- cepción	68
4.8. Modelos para el escenario de explanada del parque arqueológico de Chin- chero	69
4.9. Variación del exponente de pérdida de propagación vs altura de antena Rx	71
4.10. Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de re- cepción en el escenario de muros incas	72
4.11. Modelos para el escenario de muros incas del parque arqueológico de Chincho	73
4.12. Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de re- cepción en los andenes de Watayacarcel	74
4.13. Modelos para el escenario de andenes del parque arqueológico de Chincho	75
4.14. Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de re- cepción en la llanura de Pisaqa	77
4.15. Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escena- rio de linea de vista	78
4.16. Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de re- cepción en muros incas de Pisac	80
4.17. Modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas .	81
4.18. Variación de la potencia recibida dentro del escenario de Andenes en el parque arqueológico de Pisac con altura de antena Rx de 50cm	83
4.19. Desvanecimiento shadowing para los escenarios de LOS en los parques de Chincho y Pisac	84
4.20. Desvanecimiento a pequeña escala para los escenarios de muros en los parques de Chincho y Pisac	85
4.21. CDF de matlab y cdf experimental para los escenarios de muros en los parques de Chincho y Pisac	86
4.22. Estadísticas de segundo orden para los escenarios de Pisac	87
4.23. Explanada del parque arqueológico de Chincho	89
4.24. Validación del modelo Vs medidas en la explanada del parque arqueoló- gico de Chincho	89
4.25. Validación del modelo Vs medidas en la explanada del parque arqueoló- gico de Chincho	90
2.1. Sombreamiento Experimental Vs Sombreamiento Simulado	106
2.2. Pequeña Escala Experimental Vs Pequeña Escala Simulado	107
2.3. Pequeña Escala Experimental Vs Pequeña Escala Simulado	109
2.4. Datos Experimentales Vs Algoritmo de Regresión Lineal Simulado . . .	110

2.5.	Datos Experimentales Vs Simulación de LCR	113
2.6.	Datos Experimentales Vs Simulación de AFD	113
3.1.	Dimensión de la base de datos para entorno de muros incas a 120cm	115
3.2.	Dimensión de la base de datos para entorno de línea de vista a 80cm	115
4.1.	Implementación de los transeptores dentro del parque arqueológico de Chinchero	116
4.2.	Explanada Capellanpampa del parque arqueológico de Chinchero	117
4.3.	Muros Incas del parque arqueológico de Chinchero	117
4.4.	Andenes de Wataycarcel del parque arqueológico de Chinchero	118
4.5.	Sector Qosqa zona con amplia línea de vista en el parque arqueológico de Pisac	118
4.6.	Muros Incas en el parque arqueológico de Pisac	119
4.7.	Andenes en el parque arqueológico de Pisac	119

RESUMEN

En este trabajo de fin de grado se realizó el modelamiento de canal de propagación inalámbrico en zonas de conservación arqueológica en la ciudad el Cusco, con énfasis en los parques arqueológicos de Chinchero y Pisac, ambos parques con características de infraestructura similares, con el objetivo principal de desarrollar un modelo matemático capaz de permitir el diseño e implementación de un sistema de comunicación basada en una red de sensores inalámbricos con tecnología LoRa, con la finalidad de obtener en un futuro la posición promedio de los visitantes nacionales y extranjeros dentro de los parques arqueológicos. En términos de adaptabilidad y cobertura, la banda de espectro electromagnético UHF es la adecuada para realizar esta modelización, es por ello que la campaña de medidas se realiza a la frecuencia de 920 MHz, la cual se encuentra dentro de la banda de frecuencia ICM (Industrial, Científica y Médica).

El estudio de la propagación de canal inalámbrico móvil se basa en el desarrollo de modelos matemáticos deterministas, empíricos y estadísticos, esta investigación enfatiza la caracterización de los fenómenos denominados desvanecimientos, sobre el cual se hace uso el filtro de media móvil para separar el desvanecimiento rápido respecto del desvanecimiento lento.

Los modelos se obtienen a base de datos experimentales desarrollados dentro de cada parque arqueológico, optando por los escenarios más llamativos como: explanadas, muros y Andenes. Estos datos experimentales permitirán generar un modelo de propagación inalámbrico adecuado para el funcionamiento de una red de sensores con tecnología LoRa, validando así el enfoque teórico de la investigación.

Los datos experimentales obtenidos se basan en la potencia de señal recibida obtenida mientras el transmisor se desplaza a una velocidad aproximada de 0.4 m/s, en alturas variables de receptor, siendo 0.20, 0.50, 0.8, y 1.2 metros, mientras el transmisor se mantiene a 1.40 metros, para caracterizar los desvanecimientos dentro de estos escenarios de parques arqueológicos.

Sobre el desvanecimiento a gran escala se empleó el algoritmo de regresión lineal, para obtener el modelo que caracteriza el exponente de pérdida de propagación y el factor de sombreado de los tres escenarios estudiados, estos modelos se validan mediante el valor del coeficiente de determinación.

El desvanecimiento a pequeña escala se caracteriza según su distribución de probabilidad, los parámetros estadísticos de las distribuciones se obtienen a partir de las mediciones experimentales en cada parque arqueológico, del mismo modo se deriva las estadísticas de segundo orden, comprobando las distribuciones de LCR y AFD teóricos con los experimentales, obteniendo que la distribución de Rician en primer y segundo orden caracteriza de forma adecuada los desvanecimientos a pequeña escala dentro de los parques arqueológicos.

Algunas de las contribuciones de la investigación pueden enumerarse en las siguientes: modelización analítica de los parámetros de propagación en los parques arqueológicos, adaptación de un transceptor comercial con tecnología LoRa para que funcione enviando señales estables y ajustables, procedimientos para campaña de mediciones en entornos con infraestructura inca, contraste de resultados frente a otros modelos desarrollados en teoría, observar la influencia de altura de antena a los parámetros de los modelos desarrollados en esta investigación, estimación aproximada de la distancia dentro de los parques arqueológicos.

Palabras Clave: *Inca, Campaña de medición, Pérdida de propagación, LoRa, Desvanecimiento.*

ABSTRACT

In this final degree work, a wireless propagation channel modeling was performed in archaeological conservation areas in the city of Cusco, with emphasis on the archaeological parks of Chinchero and Pisac, both parks with similar infrastructure characteristics, with the main objective of developing a mathematical model capable of allowing the design and implementation of a communication system based on a wireless sensor network with LoRa technology, in order to obtain in the future the average position within the archaeological parks. In terms of adaptability and coverage, the UHF electromagnetic spectrum band is suitable for this modeling, which is why the measurement campaign is carried out at the frequency of 920 MHz, which is within the ICM (Industrial, Scientific and Medical) frequency band.

The study of mobile wireless channel propagation is based on the development of deterministic, empirical and statistical mathematical models, this research emphasizes the characterization of the phenomena called fading, on which the moving average filter is used to separate the fast fading from the slow fading.

The models are obtained based on experimental data developed within each archaeological park, opting for the most striking scenarios such as: Esplanades, walls and Platforms. These experimental data will allow the generation of a wireless propagation model suitable for the operation of a sensor network with LoRa technology, thus validating the theoretical approach of the research.

The experimental data obtained are based on the received signal power obtained while the transmitter moves at an approximate speed of 0.4 m/s, at variable receiver heights,

being 0.20, 0.50, 0.8, and 1.2 meters, while the transmitter is maintained at 1.40 meters, to characterize the fading within these archaeological park scenarios

The linear regression algorithm was used to obtain the model that characterizes the propagation loss exponent and the shadowing factor of the three scenarios studied, these models are validated by the value of the coefficient of determination.

The small-scale fading is characterized according to its probability distribution, the statistical parameters of the distributions are obtained from the experimental measurements in each archaeological park, in the same way the second-order statistics are derived, checking the theoretical LCR and AFD distributions with the experimental ones, obtaining that the Rician distribution in first and second-order adequately characterizes the small-scale fading within the archaeological parks.

Some of the contributions of the research can be listed as follows: analytical modeling of propagation parameters in archaeological parks, the adaptation of a commercial transceiver with LoRa technology to work sending stable and adjustable signals, procedures for measurement campaigns in environments with Inca infrastructure, the contrast of results against other models developed in theory, observing the influence of antenna height to the parameters of the models developed in this research, an approximate estimation of the distance inside the archaeological parks.

keywords: *Inca, Measurements campaigns, Propagation Loss, LoRa, Fading.*

INTRODUCCIÓN

Cusco centro urbano más importante del imperio del Tahuantinsuyo, fundada por el inca Manco Capac, rodeado por diversas construcciones incas, Cusco hoy en día ofrece un testimonio único de los logros arquitectónicos desarrollados en la época precolombina de la región, además de representar y mantener viva la unión de dos culturas distintas, Inca y Española, de tal forma que ha sido reconocida patrimonio cultural por su excepcional valor universal al representar una obra maestra del genio creador humano. Con el paso de los años y la gran afluencia de turistas a estos escenarios arquitectónicos, se han ido degradando y dañando. Por lo que se necesita ideas de prevención y mantenimiento de estos parques arqueológicos. Los recientes avances en las comunicaciones inalámbricas y la electrónica han hecho posible el uso de dispositivos electrónicos multifuncionales, con aplicaciones en áreas como las telecomunicaciones, seguridad, agricultura, redes inteligentes, y sobre todo la geolocalización (Swami y cols., 2007). Gracias a su tamaño reducido, bajo consumo y bajo costo, estos nodos sensores se han hecho populares y aplicables a cualquiera de las áreas anteriormente mencionadas. Un ejemplo de los sistemas de localización de personas u objetos en diferentes ambientes, son los sistemas de GPS y las redes de sensores inalámbricos. Algunas de las actividades de geolocalización se pueden implementar utilizando las redes de sensores inalámbricos para evitar la degradación y destrucción de los parques arqueológicos dentro de la ciudad del Cusco, ya que estos sensores multifuncionales utilizan técnicas de localización basadas en el algoritmo de la trilateración del valor de RSS y de la señal de tiempo de llegada ToA (Zekavat y Buehrer, 2011). Así también la precisión de estas técnicas depende de la sensibilidad de la señal y también del modelo de propagación del canal. Debido a que las redes de sensores se

comunican de forma inalámbrica, los enlaces no son fiables, ya que su comportamiento varía con el tiempo y el espacio. Es por ello que se hace uso de modelos de propagación de canal entre el nodo transmisor y el nodo receptor para poder asegurar el adecuado funcionamiento y despliegue de este sistema de comunicación, a su vez, el modelo dependerá principalmente del tipo de terreno, tipo de dispersores y el follaje del entorno (Stallings, 2009). Esta señal que viaja del receptor al transmisor suele ser difícil de describir, ya que en su viaje al receptor experimenta diversos fenómenos como la difracción, reflexión y dispersión, por lo que la señal llega al receptor por múltiples caminos, cada uno con diferente fase y amplitud. Por esta razón, se utilizan los modelos matemáticos teóricos de propagación inalámbrica, que son un conjunto de expresiones matemáticas y algoritmos capaces de representar los fenómenos de propagación de la señal dentro de un entorno específico (Otero y cols., 2014).

Capítulo I

ASPECTOS GENERALES

1.1. TÍTULO

"MODELAMIENTO DE CANAL DE PROPAGACIÓN INALÁMBRICO EN LA BANDA ISM EN ÁREAS DE CONSERVACIÓN ARQUEOLÓGICA DE LA REGIÓN DEL CUSCO"

1.2. RESPONSABLE

Br. Yhon Deyvis Lezama Vilca

1.3. ASESOR

Msc. Ing. Jorge Luis Arizaca Cusicuna

1.4. ÁMBITO GEOGRÁFICO

Geográficamente el primer parque arqueológico de estudio se encuentra situada en la región del Cusco, provincia de Urubamba, distrito de Chinchero. Se encuentra a 3767 m.s.n.m., situada 30Km de la ciudad del Cusco, véase Fig.1.1

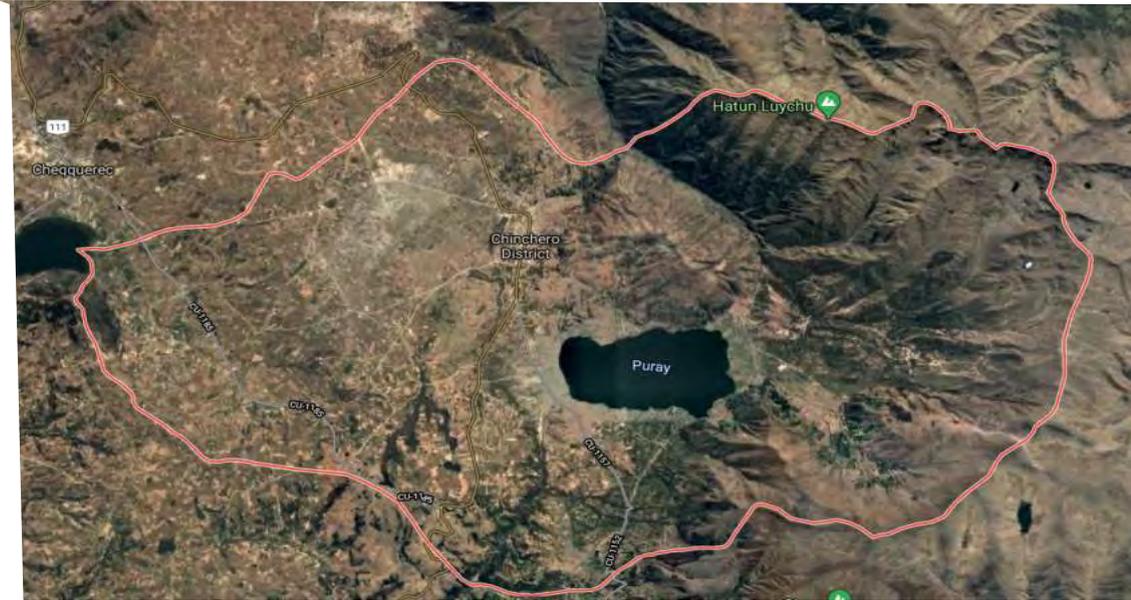


Figura 1.1: Localización Geográfica[Fuente:Google Earth]

Por otro lado, nuestro segundo parque arqueológico de estudio se encuentra situada en la región del Cusco, provincia de Calca, distrito de Pisac, se encuentra a 2979 m.s.n.m., situada a 30km de la ciudad del Cusco, véase Fig. 1.2



Figura 1.2: Localización Geográfica[Fuente:Google Earth]

1.5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde décadas anteriores se han ido desarrollando múltiples modelos de canal para escenarios interiores y exteriores, escenarios con múltiples obstáculos, desde edificios hasta árboles, césped, arena, etc, desarrollando modelos válidos para cada uno de los escenarios en particular, es por ello que se realizan múltiples estudios en diferentes escenarios para tener una amplia variedad de mediciones y parámetros de cada escenario, para luego reutilizar el modelo para un escenario con características similares y poder predecir aproximadamente el comportamiento del canal. Como indica el PhD. Abdulaziz Alsayyari en su trabajo, donde se efectúa un estudio sobre una superficie de concreto, las antenas se colocan a 20 centímetros del suelo para obtener el valor de potencia recibida o RSS en 128 puntos de medición, obteniendo así el exponente de pérdida de propagación para este escenario, así también se compara la variación de este exponente respecto a otros escenarios. Teniendo como conclusión que los modelos teóricos no son adecuados para la predicción de la potencia recibida de la señal, ya que tienen un error porcentual absoluto del 36 % para el modelo de espacio libre y el 22 % para el modelo de dos rayos.(Alsayyari y cols., 2015)

Puesto que es de vital importancia el adecuado modelado de canal para el despliegue, planificación y elaboración de un sistema de comunicación inalámbrico(Goldsmith, 2005), se pretende realizar la investigación en dos parques arqueológicos en la ciudad del Cusco, logrando comprender los fenómenos que experimenta la señal, como la atenuación, y los desvanecimientos a pequeña y gran escala, mediante una campana de mediciones y realizando múltiples simulaciones de modelos estadísticos y empíricos.

1.5.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿En qué medida influencia un ambiente de parque arqueológico con rocas, césped, muros, sobre los fenómenos principales de dispersión, difracción y refracción de la señal de propagación inalámbrica?

1.6. JUSTIFICACIÓN

La región del Cusco es uno de los principales destinos turísticos del Perú, por su gran cantidad de sitios arqueológicos, la gran cantidad de turistas en los centros y parques arqueológicos, hace que se pueda poner en riesgo la conservación de ellos, por lo que las autoridades desarrollan normas y mecanismos para gestionar el número de visitantes, tiempo de recorrido y estadía, para ello intentar hacer uso de la tecnología para realizar una gestión preventiva, la cual permita saber la ubicación y recorrido de cada visitante.

Por ello, las nuevas tecnologías emergentes, LoRa, Zigbee, Sigfox, etc. Se ven en la necesidad de estudiar de manera profunda el canal y sus características. El modelado de canal es la caracterización del canal de propagación inalámbrico, es decir, en él se describe la forma en que pueden verse afectadas las características de la señal de acuerdo a varios factores como la frecuencia, distancia, el entorno, obstáculos, etc.

Modelar el canal de propagación inalámbrico nos ayudará a conocer y comprender su comportamiento en determinadas situaciones de propagación, los resultados de estos modelos sirven para asegurar la operatividad de los sistemas inalámbricos, estudios anteriores no han presentado modelos para parques arqueológicos por lo que se pretende obtener un modelo de canal cercano a la realidad.

Es importante obtener un modelo de canal para estos parques arqueológicos, debido a que como siguiente paso se tiene proyectado la implementación de un sistema de geolocalización de los visitantes a los diferentes centros arqueológicos de la región del Cusco, mediante tecnología IoT, que usa como medio de transmisión el canal inalámbrico. Esto con la finalidad de tener mapeado la ubicación y número de visitantes por centro arqueológico.

lógico y de esta manera contribuir a la conservación de nuestro patrimonio inca.

1.7. OBJETIVOS

1.7.1. OBJETIVO GENERAL

Modelar el canal de propagación inalámbrico para un ambiente de zona de conservación arqueológica en la región del Cusco.

1.7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular modelos de propagación inalámbrica adecuados para una zona de conservación arqueológica.
- Obtener una base de datos a partir de las simulaciones.
- Analizar los valores simulados aplicando estadísticas de primer y segundo orden sobre el canal de desvanecimiento.
- Evaluar teóricamente el modelo estadístico y empírico de propagación inalámbrica escogidos para dos zonas de conservación arqueológica.
- Sugerir correcciones al modelo de propagación inalámbrico para entornos de zona de conservación arqueológica.
- Validar experimentalmente el modelo de canal de propagación inalámbrica para zonas de conservación arqueológica.

1.8. ALCANCES

- Se escogerán estadísticamente tres modelos óptimos para una zona de conservación arqueológica.
- Las simulaciones se desarrollarán en el software de Matlab.
- Se obtendrá una base de datos a partir de mediciones y simulaciones de frecuencia de 920 MHz para un ambiente de zona de conservación arqueológica.
- Se comprobarán experimentalmente los modelos empíricos y estadísticos para dos zonas de conservación arqueológica en la región del Cusco.
- Se analizarán los datos simulados con estadísticas de primer y segundo orden sobre el canal de desvanecimiento.

1.9. LIMITACIONES

- No se enfocará en la banda de 915 MHz ya que se encuentra licenciada por la empresa Viettel Perú S.A.C.
- Para realizar medidas experimentales se tendrá en cuenta solo dos zonas de conservación arqueológica en la región del Cusco puesto que se requiere de permiso y varios trámites administrativos.
- No se tendrá en cuenta la frecuencia Doppler, puesto que la velocidad del receptor es muy lenta y se podría considerar que el canal se comportará de forma cuasi-estática.

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

En el proyecto de investigación denominado: **MODELIZACIÓN DE LA PROPAGACIÓN RADIO-MÓVIL EN EL ENTORNO DEL CERRADO EN LAS BANDAS DENOMINADAS VHF/UHF** (Alves, 2015), tuvo como objetivo principal, identificar los modelos de propagación electromagnética que mejor se ajusten a los distintos perfiles del bioma del Cerrado, que no es mas que una amplia ecorregión de sabana tropical de Brasil, además de contemplar la variabilidad estadística del canal en función de la distancia recorrida por el dispositivo móvil. Así también se trata de explicar los fenómenos electromagnéticos que impactan en la perdida de propagación y el desvanecimiento (gran escala y pequeña escala). Hace uso del filtro de media móvil para poder separar los desvanecimientos, estos resultados obtenidos son explicados mediante histogramas o polígono de frecuencias de los datos obtenidos, comparándolos con histogramas teóricos buscando alcanzar un grado de similitud lo más cercano posible. Los resultados obtenidos de esta investigación son una fuente de información para los desarrolladores de una red móvil en estos entornos con parámetros similares a bioma del Cerrado. Además de que, gracias a este estudio, se garantiza que se mantendrá intactos los bosques de Brasil, ya que en conclusión se puede desarrollar un sistema de comunicación dentro del bioma sin nin-

guna complicación de enlace. Dentro de otros estudios realizados se puede mencionar el de **Evaluación experimental de modelos de radio propagación mediante una red de sensores inalámbricos** (Aguilar Almazo, 2019), donde se tiene por objetivo determinar empíricamente el modelo de radio propagación para una red de sensores en entornos urbanos. En este estudio se hace una breve descripción de la topología, mantenimiento, límite de recursos y seguridad de una red de sensores, además de la tecnología que usan y sus diferentes aplicaciones en la vida real. Utilizando así un módulo sensor con un microcontrolador STM32, con modulación LoRa. Al obtener los valores de RSSI (Received Signal Strength Indicator), tratan de obtener una adaptabilidad con los valores de los coeficientes del modelo de sombra de log-normal, obteniendo así un mejor ajuste entre los datos experimentales y la curva de regresión.

El gran apogeo de las redes de sensores ha llevado a realizar estudios en entornos diferentes como en la siguiente investigación **Measurement and Analysis of Near-Ground Propagation Models under Different Terrains for Wireless Sensor Networks** (Tang y cols., 2019), donde se realiza un estudio exhaustivo sobre la influencia de la altura de la antena con respecto al suelo y los factores del terreno, simulando así un despliegue más realista. Se efectuó en la frecuencia de 470 MHz en cuatro terrenos diferentes, carretera de hormigón plana, hierba plana y dos escenarios derivados como son hierba ondulada y hierba plana con obstáculos. La obtención de los datos se dio inicialmente a la distancia de 1 metro, y se recogió cada metro hasta los 10 metros, luego cada 2 metros hasta los 20 metros y finalmente cada 5 metros hasta los 50 metros, esto para caracterizar de forma adecuada el desvanecimiento a gran escala. Como resultados se obtuvo que el modelo de una sola pendiente es adecuado para alturas de la antena inferiores a 50cm, a medida que la altura de la antena incrementa la precisión del modelo de dos pendientes mejora.

Las redes de sensores son multidisciplinarios por lo que hace que su uso sea masivo. Una de las áreas con mayor interés es la geolocalización mediante algoritmos de trilateración, en la investigación **Modelo de estimación de la distancia en interiores basado en medida RSSI en una WSN** (López García, 2016), tiene como objetivo principal la pues-

ta en marcha de una red básica mediante una plataforma de sensores comerciales de bajo coste y manejo sencillo. En esta investigación se hace uso del mote kit2400 que cuenta con el procesador radio MICAz, teslob, t-mote, entre otros, que están ligados a redes automovilísticas y la monitorización, se verifica que la frecuencia de trabajo sea de 2.4 GHz -2.483 GHz. Utilizando modelos de propagación inalámbrica como de sombra log-normal y modelo de espacio libre y el modelo de auto adaptabilidad de valores gaussianos, tratan de caracterizar la variación de la potencia recibida con la distancia, haciendo uso del último modelo obtiene variables y parámetros capaces de determinar la distancia de forma adecuada, gracias a una regresión de múltiples variables.

2.2. CANALES DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

En las comunicaciones inalámbricas al medio por el cual viaja la señal de información se le denomina CANAL, la señal viaja del transmisor al receptor realizando diversas trayectorias o caminos de propagación, en algunos escenarios existirá conexión de Línea de Vista (LOS por sus siglas en inglés Line Of Sight) o conexión sin línea de vista (NLOS) entre el transmisor y el receptor. Estos caminos múltiples que sufre la señal se debe a la reflexión o difracción que son ocasionados por diferentes objetos dentro del entorno (edificios, casas, señales, autos, etc.), dependiendo como es el escenario, estos múltiples caminos pueden llegar a ser numerosos, como se puede ver en la figura 2.1, la señal toma diferentes caminos para llegar al receptor, esta señal puede llegar a tener por cada trayecto diferente amplitud y fase.

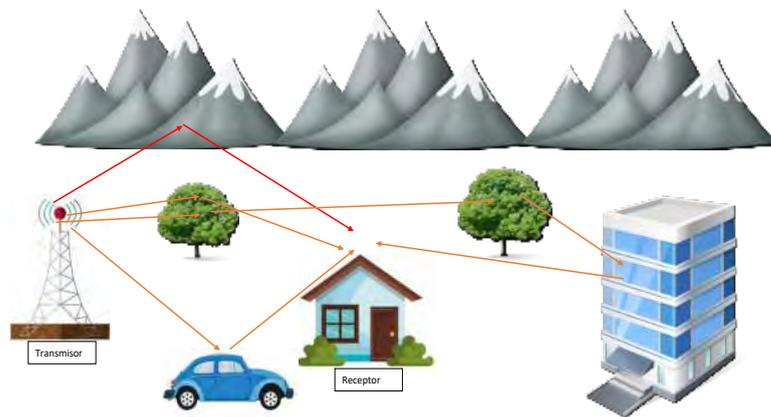


Figura 2.1: Propagación Multitrayecto de la Señal de Propagación

Entonces comprendemos como canal de comunicación es el medio por el cual viaja nuestra señal, es por ello que la comprensión y entendimiento de este es crucial para el diseño, operación y análisis de cualquier sistema de comunicación inalámbrico.

2.2.1. Mecanismos básicos de propagación

Según (Rappaport y cols., 1996) existen tres mecanismos básicos de propagación, la reflexión, la difracción y la dispersión. La reflexión ocurre cuando una onda electromagnética que viaja incide sobre un objeto que tiene dimensiones mucho más grandes en comparación con la longitud de onda de la señal que se propaga. La difracción se produce cuando el camino entre el transmisor y el receptor está obstruido por alguna superficie con algunas irregularidades, al impactar con esta superficie las ondas resultantes se propagan en todo el espacio e incluso por detrás de esta superficie, dando lugar a una curvatura de la onda alrededor de la superficie, incluso cuando no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor. La dispersión se ocasiona cuando el ambiente por donde viaja la onda existen objetos dimensionalmente pequeños con respecto a la longitud de onda, las señales resultantes se producen por superficies rugosas, u otras irregularidades del canal. Estos

fenómenos que sufre la señal al viajar por el canal de propagación se basan principalmente en lo ocurrido respecto a la longitud de onda, por ejemplo, para el caso de esta investigación la longitud de onda es igual a 0.3261 metros o 32.61 centímetros, lo que significa que objetos de mayor tamaño a éste, darán lugar al fenómeno de reflexión, mientras que objetos de menor tamaño, resultará en una señal dispersada.

2.2.2. Procesos de desvanecimiento

Debido a los fenómenos que ocurren con la señal al viajar por un canal de comunicación inalámbrica, esta se subdivide en tres tipos denominados: pérdida de propagación, sombreado o shadowing en inglés, conocido también por desvanecimiento lento y desvanecimiento rápido. Estos procesos varían a medida que se cambia la posición del transmisor o del receptor, así también se debe al movimiento o influencia de los objetos o superficies existentes entre ambas antenas. Un ejemplo aplicativo para esta investigación se muestra en la figura 2.2 donde se observa la señal obtenida, dentro del parque arqueológico de Chinchero, recibida por el transceptor TTGO T-Beam. La pérdida de propagación aporta en general la disminución de la intensidad de la señal a medida que varía la distancia entre el transmisor y el receptor. Incorporada a la pérdida de propagación se encuentra el sombreado, que varía un poco más rápido, y esto se da a grandes distancias de separación entre el transmisor y receptor. El desvanecimiento rápido se debe a la interferencia constructiva y destructiva de la señal que llega al receptor en múltiples caminos.

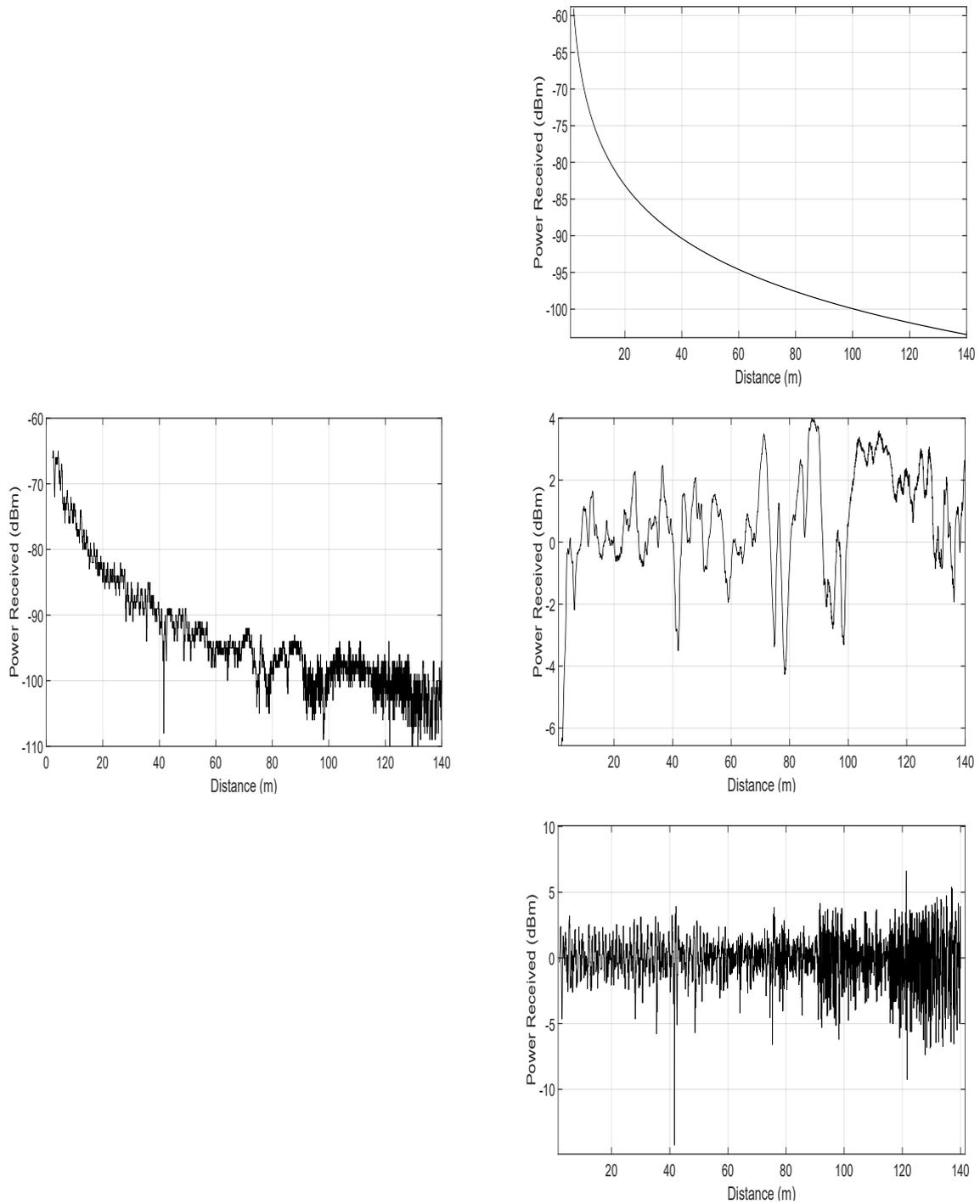


Figura 2.2: Desvanecimientos de la señal de propagación

2.2.3. Modelos de propagación inalámbrica

Como se indicó anteriormente, la señal al viajar por el canal de propagación experimenta diversos fenómenos, la reflexión, difracción y la dispersión. La gran mayoría de

sistemas de comunicación experimentan pérdidas por difracción, puesto que la presencia de edificios la provoca. Además de generar múltiples reflexiones con varios objetos, la señal viaja por trayectorias de diferentes longitudes, lo que provoca el conocido desvanecimiento visto anteriormente en la figura 2.2, así también la intensidad de la señal disminuye a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta. La gran mayoría de modelos de propagación se centran en la predicción de la intensidad de la señal recibida, así como su variabilidad de ésta. Estos modelos son útiles para predecir el área de cobertura y se les denomina modelos a gran escala, ya que explican la variación de la intensidad de la señal a grandes distancias de separación entre el transmisor y el receptor, por otro lado, los modelos que explican las variaciones en longitudes muy cortas (del orden de longitudes de onda), se les denomina modelos de pequeña escala.(Rappaport y cols., 1996)

Modelo de espacio libre

Este modelo se utiliza para predecir la intensidad de la señal recibida cuando existe línea de vista clara sin obstáculos entre el transmisor y el receptor. Como la gran mayoría de modelos de propagación inalámbrica a gran escala, el modelo de espacio libre predice la potencia recibida en función de la distancia de separación entre el transmisor y el receptor. La potencia recibida en espacio libre, viene dado por la ecuación del espacio libre de Friss:(Rappaport y cols., 1996)

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.1)$$

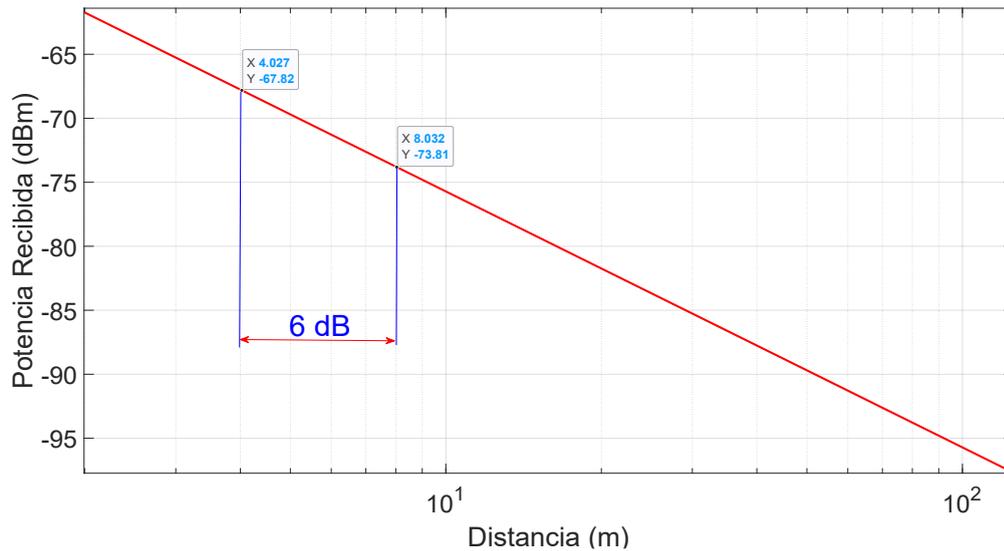


Figura 2.3: Modelo de propagación de espacio libre

Donde P_t es la potencia transmitida, $P_r(d)$ es la potencia recibida en función de la distancia de separación entre el transmisor y el receptor, $G_t G_r$ son las ganancias de las antenas de transmisión y recepción respectivamente, d es la separación entre el transmisor y el receptor en metros, L es el factor de pérdida del sistema no relacionado con la propagación ($L \geq 1$), y λ es la longitud de onda en metros. Ambos valores de P_t y P_r deben estar expresados en las mismas unidades, y G_t y G_r son cantidades adimensionales. La potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE) se define como:

$$PIRE = P_t G_t \quad (2.2)$$

El modelo de espacio libre de Friss es un modelo válido solo para valores de d que se encuentren en el campo lejano de la antena transmisora. Este campo lejano, o región de Fraunhofer, esta distancia se calcula con la siguiente ecuación:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.3)$$

Modelo de tierra plana

Este modelo, considera el terreno de propagación plano, esto indica que la señal transmitida llegara a la antena receptora mediante:

- Un camino directo.
- Un camino indirecto, onda reflejada en el suelo.

En la figura 2.4 se muestra la situación de la propagación. La antena transmisora y receptora esta sobre el suelo, con altura h_b y h_m respectivamente.

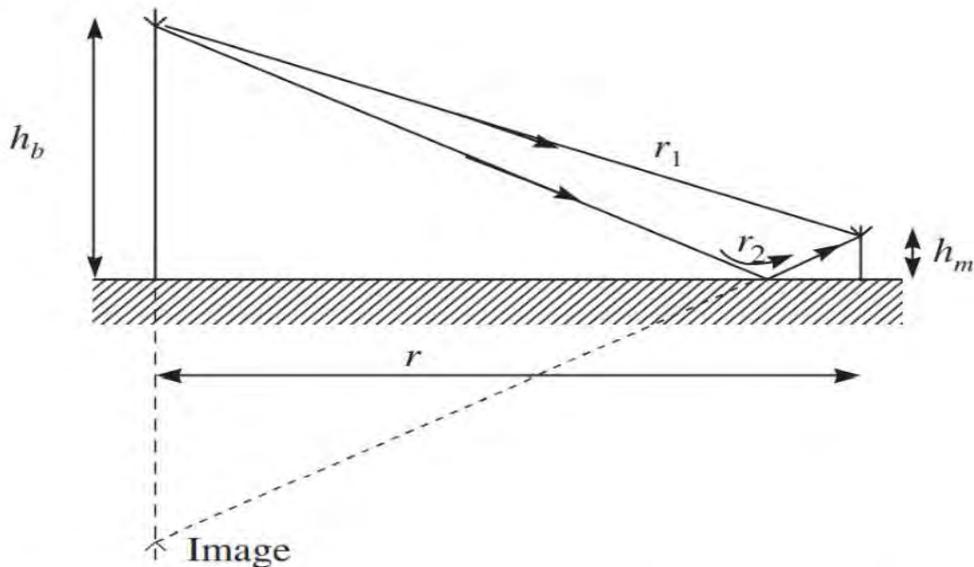


Figura 2.4: Situación física del modelo de tierra plana(Saunders y Aragón-Zavala, 2007)

La señal resultante es una combinación de ambas señales, con una potencia igual a la suma de las potencias individuales, la suma del trayecto directo y el trayecto reflejado. Así, los trayectos del rayo directo y reflejado (r_1 y r_2 , respectivamente) vienen dados por:

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(h_b - h_m)^2 + r^2} \\ r_2 &= \sqrt{(h_b + h_m)^2 + r^2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

La diferencia de trayectos es:

$$(r_2 - r_1) = r \left[\sqrt{\left(\frac{h_b + h_m}{r}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{h_b - h_m}{r}\right)^2 + 1} \right] \quad (2.5)$$

Asumiendo que la altura de las antenas son pequeñas en comparación con la longitud del trayecto ($h_b, h_m \ll r$), se puede aproximar a:

$$(r_2 - r_1) \approx \frac{2h_m h_b}{r} \quad (2.6)$$

Debemos asumir también la pérdida de reflexión, R . Entonces la amplitud global del resultado será:

$$A_{TOTAL} = A_{DIRECTO} + A_{REFLEJADO} = A_{DIRECTO} \left(1 + R \exp\left(jk \frac{2h_m h_b}{r}\right)\right) \quad (2.7)$$

Se puede expresar la pérdida de potencia de la siguiente forma:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \left(1 + R \exp\left(jk \frac{2h_m h_b}{r}\right)\right)^2 \quad (2.8)$$

Esta ecuación tiene una aproximación interesante para valores de $R \approx -1$

$$P_r = 2P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \left[1 - \cos\left(k \frac{2h_m h_b}{r}\right)\right] \quad (2.9)$$

Del mismo modo, se considera ángulos pequeños de $\cos(\theta)$, podemos obtener una ecuación general o la ecuación reducida muy conocida:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 k^2 \frac{2h_m h_b}{r} \approx \frac{h_m^2 h_b^2}{r^4} \quad (2.10)$$

Pero para mayor veracidad se puede optar por tomar en cuenta, las características dieléctricas del suelo, que viene dado por el coeficiente de reflexión, se caracteriza por la

constante dieléctrica relativa ϵ_r y la conductividad σ (*mos/m*) (Rábanos y cols., 2013). En (RU, 2017) se facilitan las gráficas necesarias para obtener estos valores según la frecuencia y el tipo de suelo. Se define permitividad compleja del suelo como (Rábanos y cols., 2013):

$$\epsilon_0 = \epsilon_r - j60\sigma\lambda \quad (2.11)$$

A partir de este parámetro, se define la impedancia del suelo:

$$z = \frac{\sqrt{[\epsilon_0 - \cos(\phi)^2]}}{\epsilon_0} \quad (2.12)$$

El valor del coeficiente de reflexión en función de la impedancia del suelo y el ángulo de incidencia será:

$$R = \frac{\sin(\phi) - z}{\sin(\phi) + z} \quad (2.13)$$

En conclusión,obtenemos:

Polarización vertical

$$R_v = \frac{\epsilon_0 \sin(\phi) - \sqrt{\epsilon - \cos(\phi)^2}}{\epsilon_0 \sin(\phi) + \sqrt{\epsilon - \cos(\phi)^2}} \quad (2.14)$$

Polarización horizontal

$$R_H = \frac{\sin(\phi) - \sqrt{\epsilon - \cos(\phi)^2}}{\sin(\phi) + \sqrt{\epsilon - \cos(\phi)^2}} \quad (2.15)$$

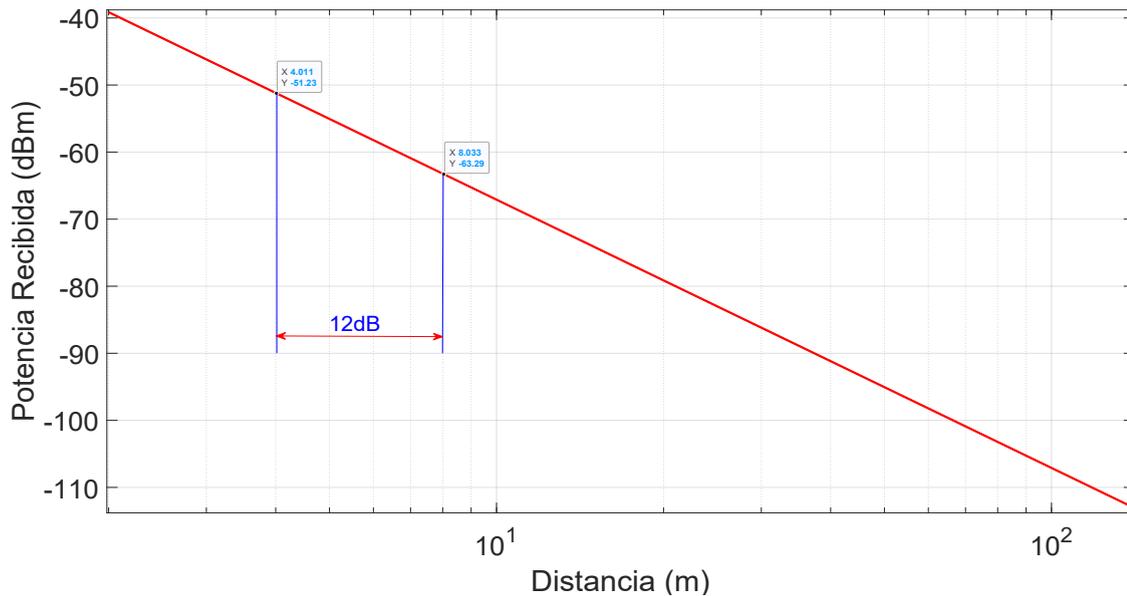


Figura 2.5: Modelo de tierra plana simplificada

Modelo de log-distancia

Muchos de los modelos basados en mediciones y los teóricos indican que la potencia recibida de la señal disminuye logarítmicamente con la distancia. Es por ello que comúnmente la pérdida de propagación a gran escala para una separación entre la antena transmisora y la antena receptora se expresa en función de esta distancia utilizando un exponente de pérdida de propagación, n :

$$P_r(dBm) = P_{r0} + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.16)$$

Como se mencionó anteriormente, n es el exponente de pérdida de propagación, el cual indica la velocidad a la que la potencia recibida aumenta con la distancia, d_0 es la distancia de referencia la cual se determina experimentalmente, d es la distancia de separación entre el Tx y el Rx. Este valor de n depende exclusivamente del entorno, por ejemplo, en el espacio libre, n es igual a 2, y cuando existe obstrucciones, este tendrá un valor mayor.

La distancia de referencia se calcula dependiendo del entorno, es decir, para siste-

mas celulares de gran cobertura, se suele utilizar distancia de referencia de $1km$, y para sistemas microcelulares se tiene como distancia de referencia $100m$ o $1m$.

La tabla 2.1 menciona los exponentes típicos de perdida de propagación en diversos entornos de radiocomunicaciones móviles (Rappaport y cols., 1996)

Entorno	Exponente de Propagación, n
Espacio Libre	2
Área celular Urbana	2.7 a 3.5
Radio celular urbana sombreada	3 a 5
línea de vista en edificios	1.6 a 1.8
Obstrucción en edificios	4 a 6
Obstrucción en fábricas	2 a 3

Tabla 2.1: Exponentes de propagación en diferentes entornos (Rappaport y cols., 1996)

Modelo log-normal sombreado

Este modelo se basa en la ecuación 2.16, la cual no toma en cuenta el ruido ambiental circundante puede ser diferente en dos posiciones diferentes. Muchas mediciones han demostrado que para cualquier valor de d , la perdida de propagación es aleatoria y tiene una distribución log-normal (en dB) alrededor del valor de potencia media. Es decir:

$$P_r(d)[dBm] = P_{r0}[dBm] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2.17)$$

Donde X_σ es una variable aleatoria gaussiana de media cero (en dB) con desviación típica σ (también en dB). La distancia de referencia d_0 , el exponente de perdida de propagación n , y la desviación típica describen estadísticamente el modelo. En la práctica, los valores de n y X_σ se determinan a partir de datos medidos, utilizando la regresión lineal, de tal forma que la diferencia entre la perdida de propagación medida y la estimada se minimiza en un sentido de error cuadrático medio. Esta línea recta con coeficiente lineal "a" y coeficiente angular "b" regidos por las ecuaciones 2.18 y 2.19:

$$a = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.18)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.19)$$

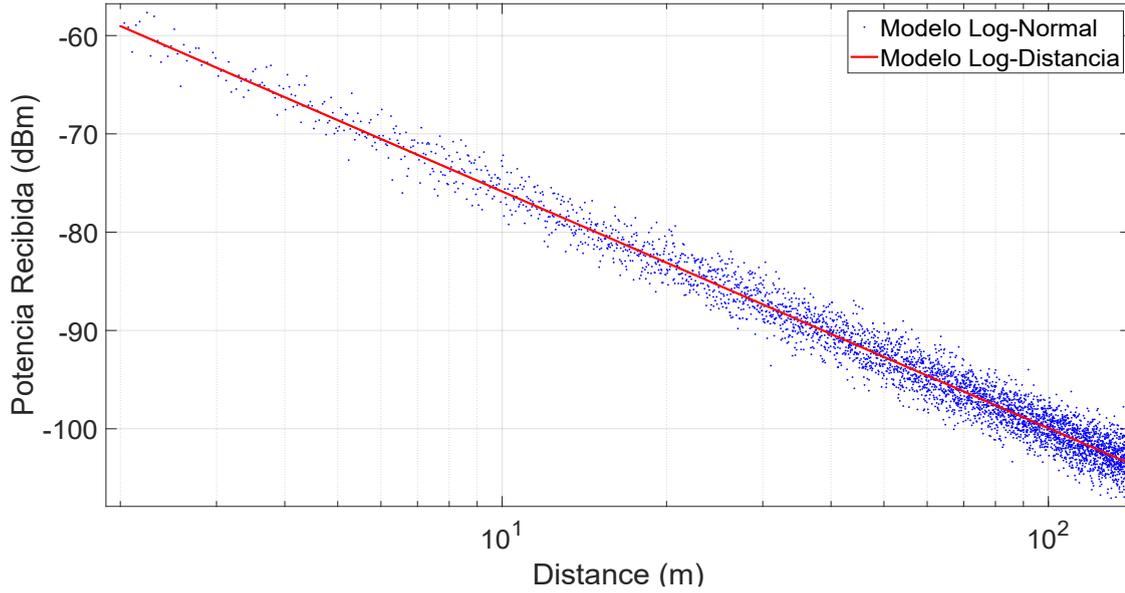


Figura 2.6: Modelo log-normal y modelo log-distancia

Modelo de doble pendiente

Este modelo toma en cuenta la zona de fresnel, es por ello que toma en cuenta la distancia a la que la primera zona de fresnel llega a ser obstruida por el suelo, y viene dada por:

$$d_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{16h_b^2 h_m^2 - \lambda^2 (h_b^2 + h_m^2) + \frac{\lambda^4}{16}} \quad (2.20)$$

En el caso de línea de vista, este modelo de doble pendiente utiliza este punto y la denomina punto de ruptura. El modelo de doble pendiente tiene la siguiente ecuación:

$$P_r(d) = \begin{cases} P_{o1} + 10n_1 \log_{10}(d) + X_\sigma, & \text{para } 1 < d \leq d_f \\ P_{o2} + 10n_2 \log_{10}(d) + X_\sigma, & \text{if } d > d_f \end{cases} \quad (2.21)$$

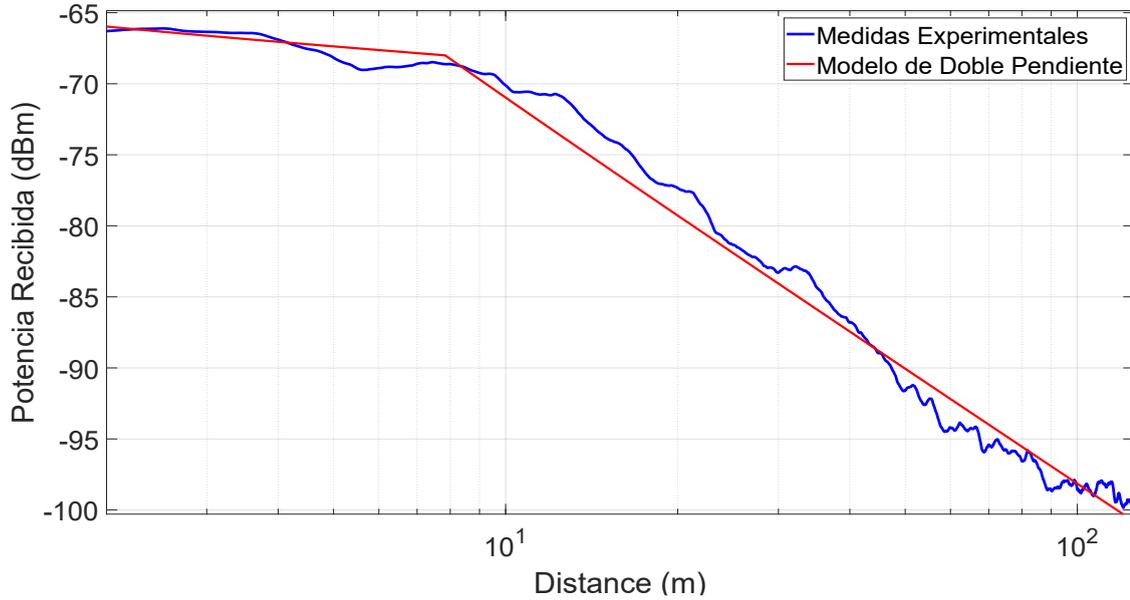


Figura 2.7: Modelo de doble pendiente

Modelo de reflectividad variable del suelo

En (Giacomin y cols., 2010) se propone el modelo de reflectividad variable del suelo, donde éste se basa en el de dos rayos, tomando en cuenta el índice de reflexión del suelo y también la directividad de las antenas transmisora y receptora. Este modelo es aplicable para zonas exteriores donde los nodos sensores se colocan a alturas determinadas sobre una superficie lisa. El cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Pr = \frac{P_0}{d^2} \left(1 + \frac{R^2 D^2}{\left(\frac{r}{d}\right)} + \frac{2RD}{\left(\frac{r}{d}\right)} \cos(\delta) \right) \quad (2.22)$$

Donde P_0 es la potencia a la distancia de referencia, R es la reflectividad de la superficie, D es la directividad de las antenas, d y r son las longitudes del trayecto directo y el reflejado, respectivamente, y δ es la diferencia de fase entre ambos trayectos.

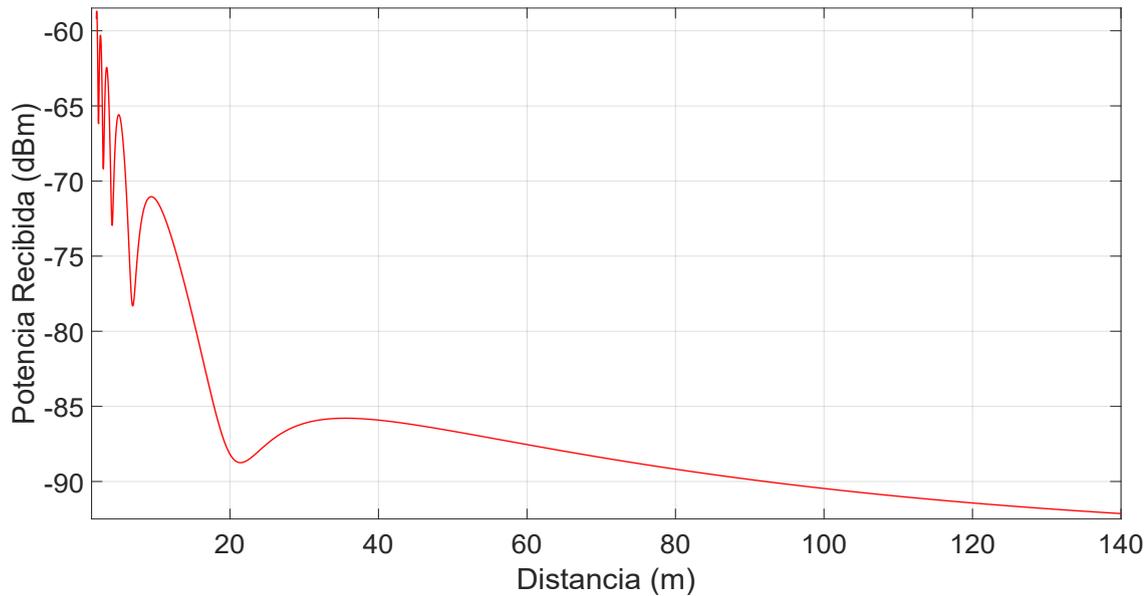


Figura 2.8: Modelo de reflectividad variable del suelo

2.2.4. Modelos de desvanecimiento

La señal de propagación es afectada por múltiples factores, por lo que se ve por conveniente tratar la señal no solo de forma determinista, sino también de forma estadística, de esta forma interpretar los resultados como eventos aleatorios que siguen una probabilidad y una distribución determinada.

Existen tres distribuciones relacionadas con las estadísticas de la propagación: Log-normal, Rayleigh y Rician, pero existen otras que son tema de investigación hoy en día (Suzuki, Gamma, Weibull, Nakagami). En la figura 2.9 se muestra como varía los desvanecimientos con la distancia. El desvanecimiento a gran escala varía lentamente y se puede observar en trayectos de centenares de longitudes de onda, el desvanecimiento a pequeña escala varía rápidamente y ocurre en valores de fracciones de longitud de onda.

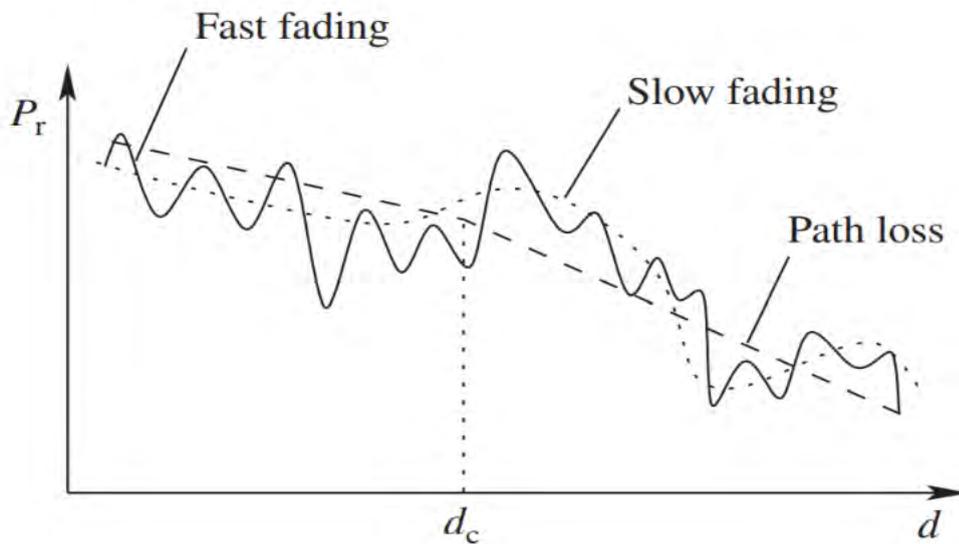


Figura 2.9: Desvanecimientos (Du y Swamy, 2010)

Desvanecimiento a Larga Escala

En esta sección nos enfocaremos en el desvanecimiento a gran escala, el cual corresponde al sombreado o shadowing en inglés, se forma gracias a las superficies reflectantes y objetos dispersivos. Este sombreado se modela con la función de densidad de probabilidad de forma gaussiana. El sombreado se relaciona con los obstáculos con dimensiones superiores a la longitud de onda. El sombreado se superpone a la pérdida de propagación media de manera aguda, además que tiene una silueta gaussiana en su histograma. La función de distribución de probabilidad (PDF) logarítmica-normal viene dada por (Du y Swamy, 2010):

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - m_x}{\sigma_x}\right)^2\right) \quad (2.23)$$

Donde m_x es el valor medio de la potencia recibida y σ_x es la varianza.

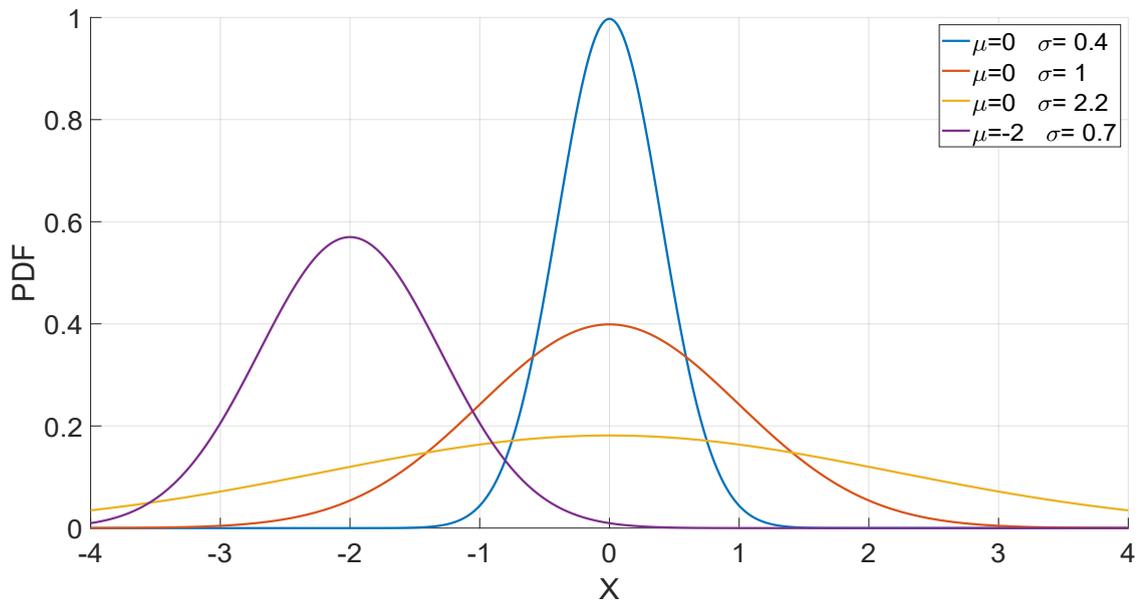


Figura 2.10: Distribución de Probabilidad Normal

Desvanecimiento a Pequeña Escala

El desvanecimiento a pequeña escala, está fuertemente relacionado con los multitrayectos que la señal experimenta al viajar al receptor. Es decir, múltiples señales con diferentes valores de amplitud y fase llegan al receptor en múltiples trayectorias. Las estadísticas de Weibull, Rayleigh, Rice, Nakagami, son las principales distribuciones estadísticas que se pueden asemejar a estas variaciones de la señal. Al tratarse de distribuciones lineales, es necesario transformar los datos experimentales de valores de potencia (dBm) a voltios. Por lo cual se hace uso de la siguiente ecuación:

$$P_r(\text{voltios}) = 0,22361 * 10^{\frac{P_r(\text{dBm})}{20}} \quad (2.24)$$

Desvanecimiento de Rice

El desvanecimiento de Rice se da cuando existe una trayectoria con línea de vista directa fuerte. Este desvanecimiento también es adecuado para caracterizar comunicaciones por satélite o algunos entornos urbanos. En este caso los desvanecimientos no son profun-

dos con valores de 1 a 20 dB. El PDF de Rice viene dado por la siguiente ecuación:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-r^2 + a^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma^2}\right) \quad r > 0 \quad (2.25)$$

r es la envolvente de la señal, I_0 es la función de Bessel modificada de primer tipo y orden cero. Un parámetro muy conocido y utilizado es el factor K de Rice, que se define como:

$$K = \frac{a^2}{2\sigma^2} \quad \text{endB, } K(\text{dB}) = 10\log_{10}(k) \quad (2.26)$$

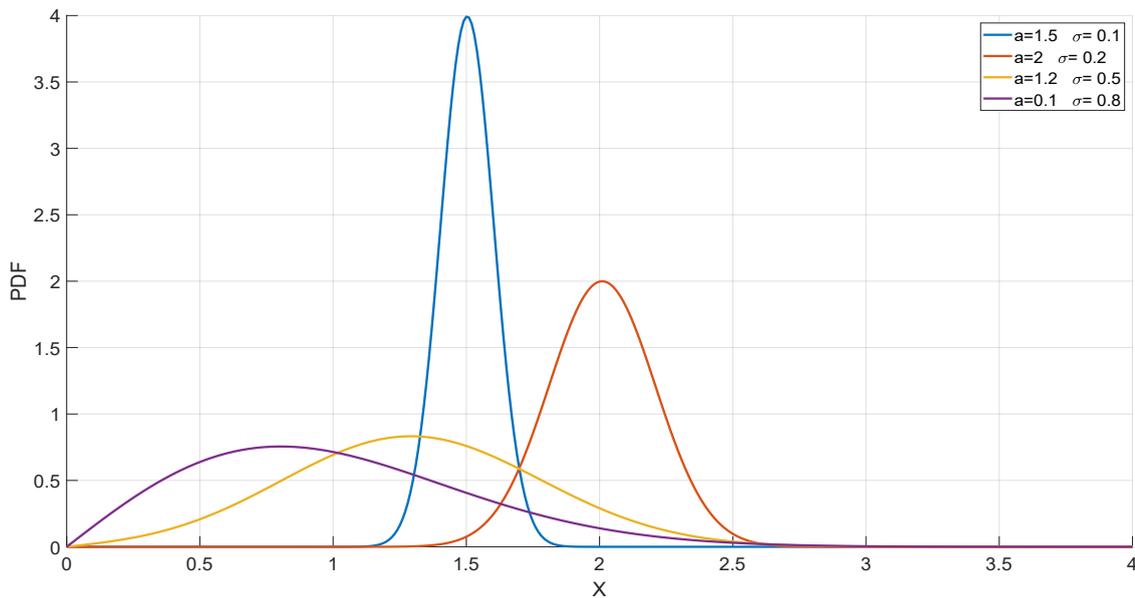


Figura 2.11: Distribución de Probabilidad Rician

Desvanecimiento de Rayleigh

El desvanecimiento de Rayleigh se da cuando no existe trayectoria de línea de vista. En este caso los desvanecimientos son profundos con valores de 20 a 40 dB. El PDF de Rayleigh viene dado por la siguiente ecuación (Stüber y Stüber, 1996):

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (2.27)$$

Donde r es la potencia recibida.

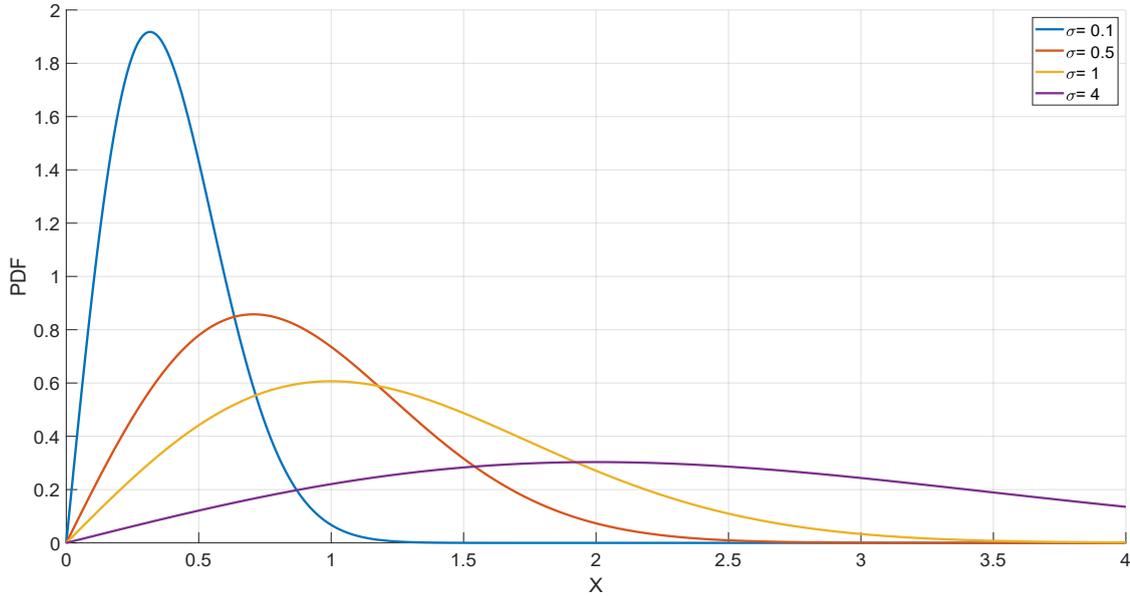


Figura 2.12: Distribución de Probabilidad Rayleigh

Desvanecimiento de Nakagami

La ventaja de esta distribución es que, puede generalizar las distribuciones antes mencionadas. En la tabla 2.2 se puede observar los valores de las distribuciones con respecto a los parámetros de nakagami m y Ω . La función de distribución de densidad de probabilidad está dada por (Simon y Alouini, 2005):

$$p(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} \exp\left(-\frac{m * r^2}{\Omega}\right) \quad (2.28)$$

Donde, m es denominado el factor de desvanecimiento, σ es la desviación estándar de la distribución, $\Gamma(m)$ es el valor de la función gamma.

	Condición para σ	Condiciones param m	Distribución resultante
Nakagami	$\sigma = 0$	cualquier m	Nakagami
	$\sigma = 0$	$m = 1$	Rayleigh
	$\sigma = 0$	$k = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}$	Rice
	cualquier σ	$m = 1$	Suzuki
	cualquier σ	$m \rightarrow \infty$	Log-Normal

Tabla 2.2: Distribuciones derivadas de Nakagami (Yacoub, 1993)

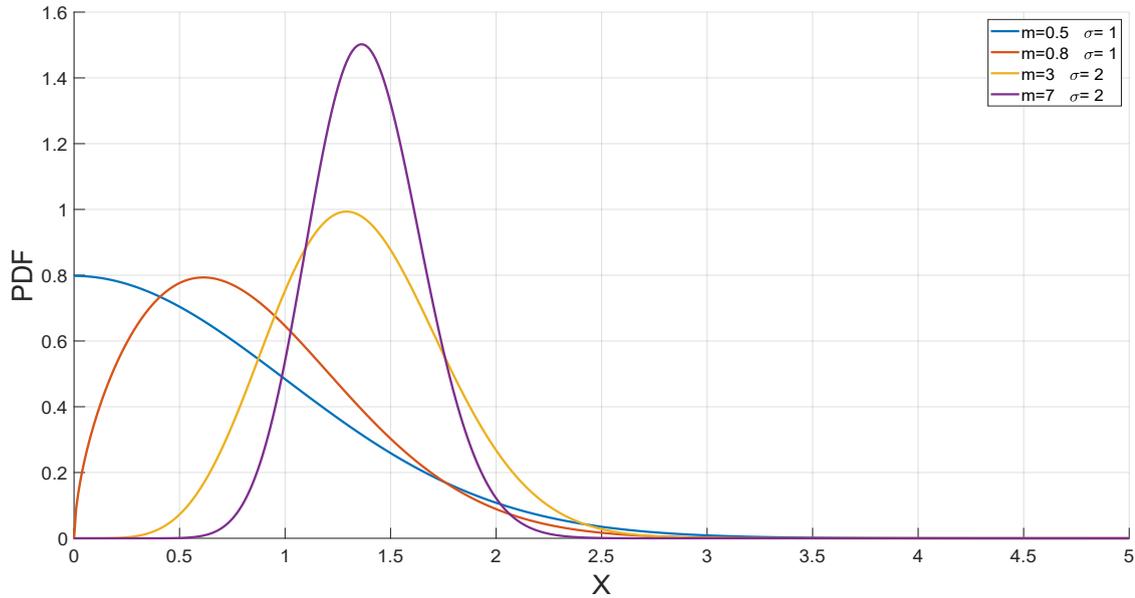


Figura 2.13: Distribución de Probabilidad Nakagami

Como se describió anteriormente, cuando no hay una gran obstrucción entre la línea de vista, la distribución de Rice es la que mejor se ajusta a los datos experimentales. En entornos, con características morfológicas similares, la distribución de Weibull es la más adecuada. La distribución de Rayleigh generalmente se da cuando no existe línea de vista, existe multitrayectoria y obstrucción (Yacoub, 1993). El factor k de Rice define el grado de libertad sin obstáculos del entorno, es decir, cuanto más reducido es el tamaño del factor k más se asemeja a la distribución de Rayleigh. Las distribuciones de probabilidad en este trabajo se obtienen gracias al software de Matlab. Este programa cuenta con una caja de herramientas, estadísticas y herramientas de ajuste de distribuciones llamada *dftool*.

Si no se puede definir cuál de los PDF es el que mejor se ajusta a nuestros datos experimentales, una comparación visual de la función de distribución acumulativa (FDA), nos dará una mejor aproximación para poder determinar el PDF adecuado. Pero, existe un tercer recurso para determinar el mejor modelo de desvanecimiento a pequeña escala, esta es el probability plot, que de acuerdo a matlab, consiste en confrontar las parcelas de los gráficos de FDA teóricas y experimentales en términos de probabilidad de adhesión a los experimentos (Alves, 2015). Por último, al usar el toolbox de matlab se deberá recurrir

al parámetro de similitud logarítmica en cada distribución, este valor del parámetro *loglikelihood*, mientras sea mayor, mejor será la similitud de la distribución teórica con la de los resultados experimentales.

2.2.5. Tasa de Paso de Nivel y Duración Media de Desvanecimiento

La tasa de paso de nivel o en inglés level crossing rate (LCR) y la duración media de desvanecimiento o en inglés average fade duration (AFD) son dos importantes estadísticas de segundo orden del canal, estos llevan información importante sobre el comportamiento temporal de los canales de desvanecimiento. Tanto el LCR y AFD son derivaciones de las expresiones de los modelos de desvanecimiento de Rayleigh, Rice y Nakagami. El LCR da a conocer la frecuencia con la que la envolvente cruza un determinado umbral, y el AFD, nos indica el tiempo que la envolvente permanece debajo de un umbral determinado (Abdi y cols., 2000).

La gran mayoría de investigación se han limitado a las estadísticas de primer orden y se han realizado pocos esfuerzos para comparar las estadísticas de segundo orden con estadísticas empíricas.

La tasa de paso de nivel o LCR viene dada por la siguiente ecuación (Stüber y Stüber, 1996):

$$N_{Rayleigh}(\rho) = \sqrt{2\pi} f_d \rho \exp(-\rho^2) \quad (2.29)$$

$$N_{Rice}(\rho) = \sqrt{2\pi(K+1)} f_d \rho \exp(-K - (K+1)\rho^2) x I_0(2\sqrt{K(K+1)}\rho) \quad (2.30)$$

$$N_{Nakagami}(\rho) = \sqrt{2\pi} f_d \frac{m^{m-\frac{1}{2}}}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2) \quad (2.31)$$

La duración media de desvanecimiento o AFD viene dado por la siguiente ecuación (Stüber y Stüber, 1996), (Dhiraj, 2006):

$$T_{Rayleigh}(\rho) = \frac{\exp(\rho^2) - 1}{\sqrt{2\pi} f_d \rho} \quad (2.32)$$

$$T_{Rice}(\rho) = \frac{[1 - Q(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)\rho^2})] \exp(K + (K+1)\rho^2)}{\sqrt{2\pi(K+1)} f_d \rho I_0(2\sqrt{K(K+1)}\rho)} \quad (2.33)$$

$$T_{Nakagami}(\rho) = \frac{2\sqrt{m}[\Psi(m, \rho)]}{\sqrt{2\pi} f_d \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2)} \quad (2.34)$$

Donde:

$$\Psi(a, b) = \int_0^b z^{2a-1} \exp(-az^2) dz \quad (2.35)$$

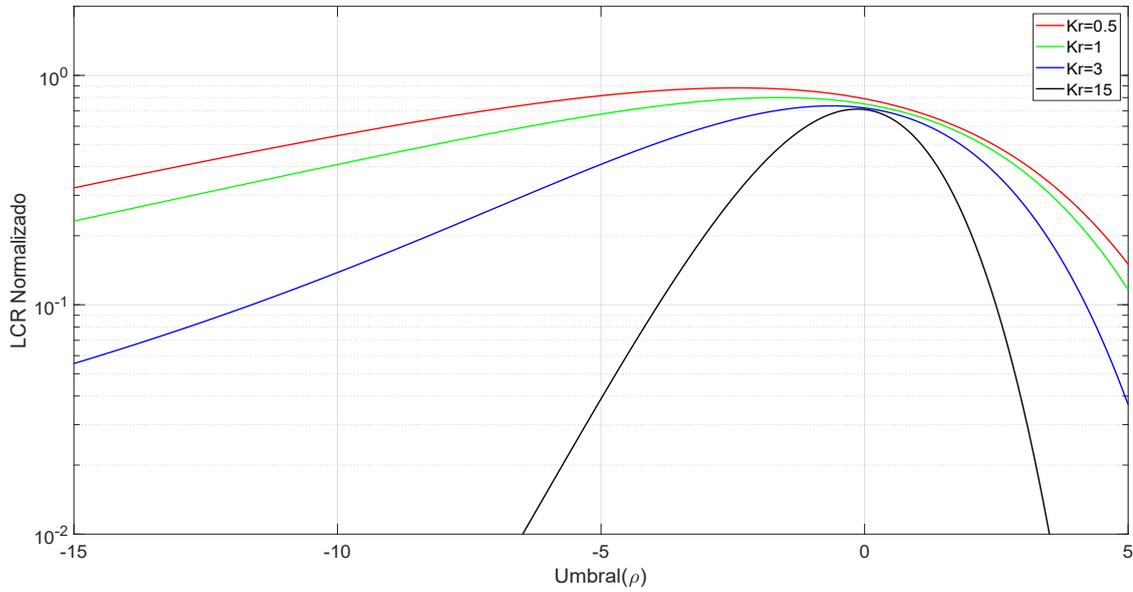


Figura 2.14: Tasa de Paso de Nivel -Rice

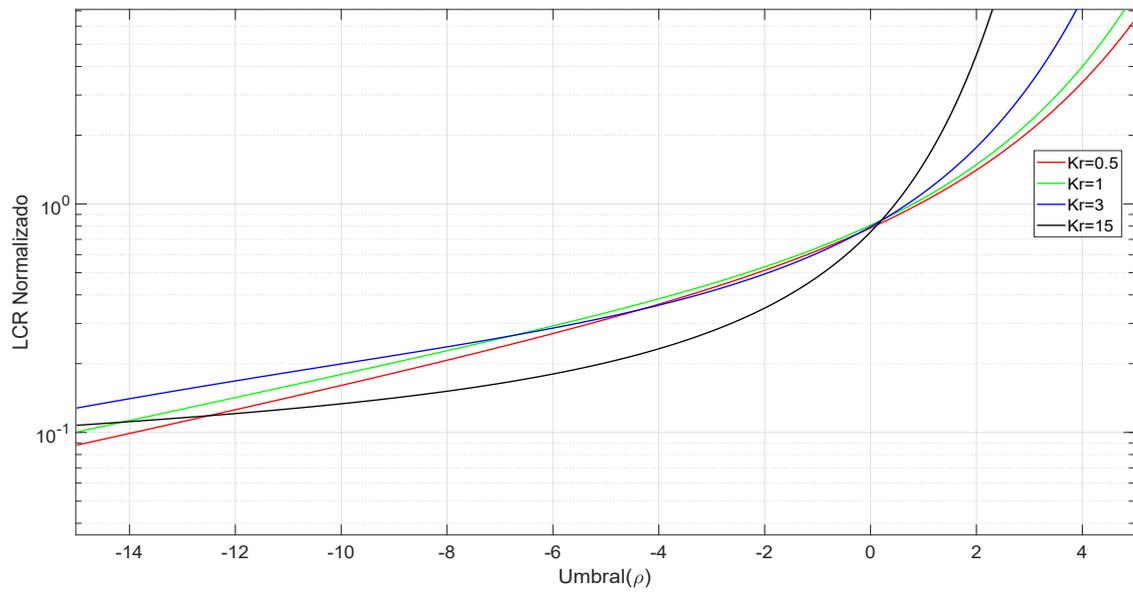


Figura 2.15: Tasa de Paso de Nivel -Rice

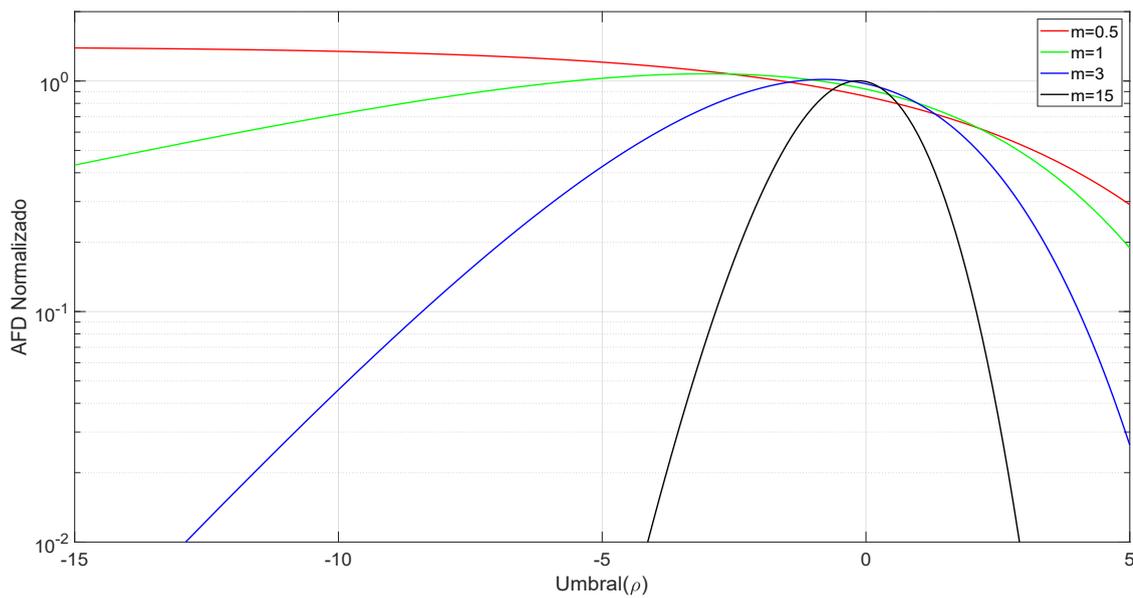


Figura 2.16: Duración Media de Desvanecimiento- Nakagami

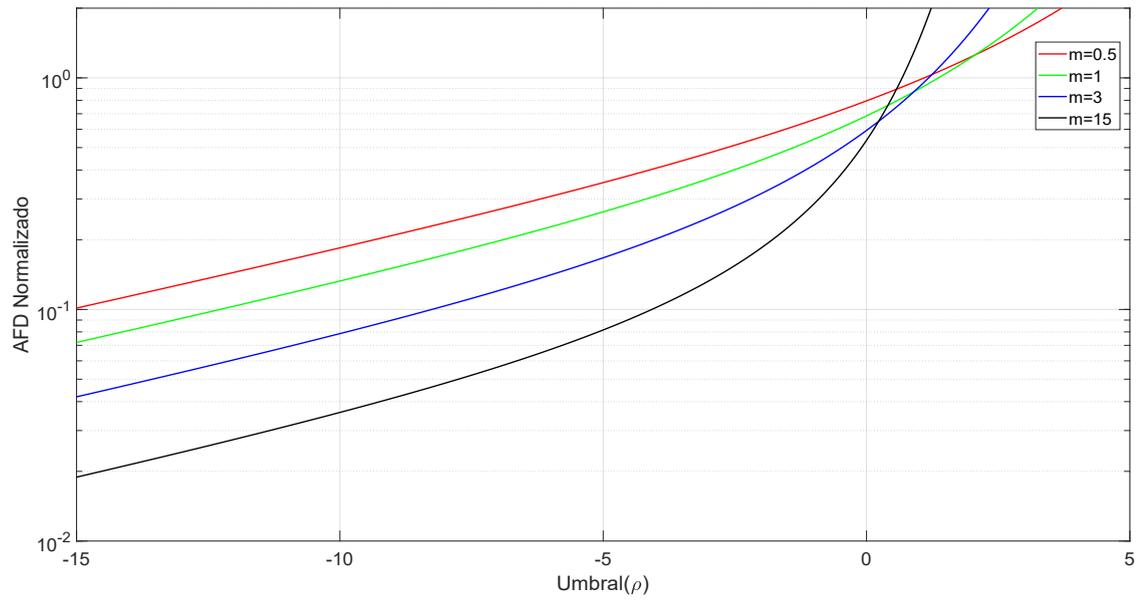


Figura 2.17: Duración Media de Desvanecimiento- Nakagami

Capítulo III

CAMPAÑA DE MEDIDAS

Para el presente trabajo de investigación se realizó la recopilación de datos experimentales a lo largo de una semana en cada parque arqueológico, con la finalidad de obtener la información adecuada para el correcto modelamiento y su respectiva validación del modelo de propagación. En este capítulo se describe la metodología de obtención de los datos experimentales.

Los datos obtenidos experimentalmente de valores de potencia recibida en un entorno de parque arqueológico se compararán con la base de datos obtenidos a partir de las simulaciones ejecutadas en el software de Matlab. Hoy en día Matlab cuenta con diferentes herramientas desarrollados para facilitar el estudio y simulación de diversas áreas de investigación, es por ello que las simulaciones realizadas se comparan gráficamente con las ecuaciones dadas por la teoría y las gráficas generadas por las herramientas de Matlab. Es por ello que se hace uso de los toolbox para generar la base de datos de los modelos antes mencionados en el capítulo II, generando así valores en vectores variables entre de 2200 filas por columna y 4000 filas por columna aproximadamente, ver anexo B y C, esto dependerá de la variación de la distancia dentro de cada escenario.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

3.1.1. Módulo LoRa LILYGO TTGO T-Beam

Para la realización de la campaña de medidas se utilizó el módulo comercial LoRa LILYGO TTGO T-Beam 3.1, cuyo procesador es un ESP-32, algunas de las características principales se detallan en la tabla 3.1:

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN
Chip del transceptor	SEmtech LoRa SX1276
Ancho de banda	500 Khz
Frecuencia Central	920 MHz
Velocidad de Transmisión	5470 bps
Potencia de Transmisión	+20 dBm
Corriente de Transmisión	120mA a + 20dBm

Tabla 3.1: Parámetros del TTGO T-Beam



Figura 3.1: Modulo TTGO T-Beam

3.1.2. Antenas

El módulo LoRa TTGO T-Beam cuenta con un puerto SMA, donde va conectada la antena, esta es ideal para aplicaciones bajo la frecuencia de trabajo en la banda ICM 915

MHz, se muestra sus características en la tabla 3.2:

Numero de Pieza	Frecuencia [MHz]	Ganancia [dBi]	Impedancia	VSWR	Patrón de Radiación	Polarización
W1063	868-928	3.0	50 Ω	< 2,5	Omnidireccional	Vertical

Tabla 3.2: Características de la Antena Pulse Part Number W1063

3.1.3. Soportes

Ambos módulos TTGO T-Beam se montan sobre unos soportes metálicos o trípodes para poder variar la altura de las antenas.



Figura 3.2: Soporte para antenas

3.1.4. Ordenador Portátil

Para la recolección de datos se utilizó un ordenador portátil, el módulo LoRa receptor se conecta a este ordenador para la transferencia de los datos experimentales, esto para su posterior procesamiento en Matlab y Excel.



Figura 3.3: Ordenador Portátil

3.2. SOFTWARE UTILIZADO

Los módulos LoRa TTGO T-Beam requieren de ciertos programas adicionales para su correcto funcionamiento, a continuación se detalla los pasos a seguir para instalar los programas:

- Descargar e instalar el IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) de Arduino.
- Descargar e instalar GIT desde ((Çonservancy"), 2005).
- Ejecutar Git GUI y seleccionar CLone Existing Repository.
- Seleccionamos el origen y destino donde se clonara las librerías, para luego clonar.

- Abrir y ejecutar Git Bash.
- Ejecutar el comando `get.exe`, que se encuentra en la carpeta nueva creada.
- Al culminar, aparece una carpeta `xtensa-esp32-elf`.
- Ahora conectamos la placa y esperamos a que los controladores se instalen.
- Por último ingresamos a Arduino y seleccionamos el tipo de placa, y el puerto COM, para después empezar a compilar.

Así mismo, el software Teraterm fue de gran utilidad, puesto que este programa nos permite almacenar nuestros datos en un archivo `.text` para luego ser llevado al programa de excel donde se produce el pre-procesamiento.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS

El parque arqueológico de Chinchero está ubicado al noreste de la ciudad del Cusco, aproximadamente a una distancia de 30 km, cuenta con una altura promedio de 3767 m.s.n.m. Dentro de este parque se seleccionó 3 escenarios predominantes descritos de la siguiente manera, explanada, muros incas y andenes. La explanada de nombre CAPELLAMPAPA, ubicada al norte de la plaza principal, tiene forma rectangular, de suelo plano y extenso, este se construyó con funciones palaciegas y ceremoniales. Cuenta con un área aproximada de 9656.30 m^2 y un perímetro de 430.87 m . Esta cubierta por césped natural como se muestra en la Fig.3.4



Figura 3.4: Explanada de Capellanpampa

Por otro lado, tenemos los muros incas, que cuenta con un tipo de aparejos sedimentarios, las piedras utilizadas son de tipo caliza y andesita, la gran mayoría cuenta con una forma rectangular, aunque existen algunas con forma trapezoidal, cuenta con planos generalmente planos y convexos, los muros llegan a tener una altura promedio de 2.1 metros y una longitud de hasta 80 metros, como se observa en la fig.3.5

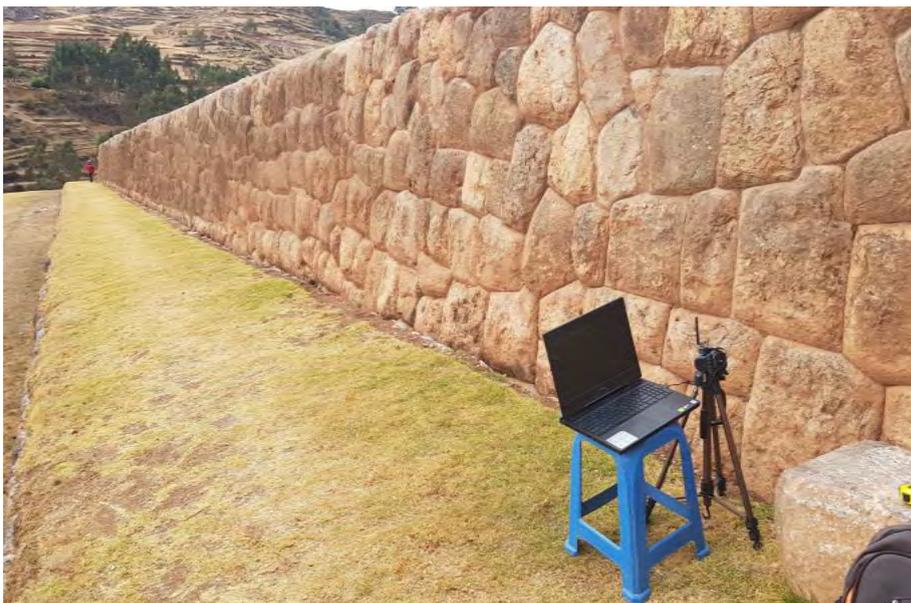


Figura 3.5: Muros Incas

Por último, los andenes denominados WATAYCARCEL, que están situadas al noreste de la explanada, los andenes son estructuras escalonadas longitudinalmente con muros colaterales, cuenta con 14 estructuras, las cuales estuvieron hechas con fines agrícolas y algunos de soportes, construidos con piedra caliza y unidas con mortero de barro. Aproximadamente llegan a tener una altura promedio de 2.1 metros y longitudes de hasta 85 metros de largo, con ancho de suelo de 3 metros, al igual que la explanada cuenta con un suelo cubierto con césped natural, véase la figura 3.6.



Figura 3.6: Andenes de Wataycarcel

El parque arqueológico de Pisac se ubica en el distrito del mismo nombre, en la provincia de Calca, en el departamento de Cusco, a una distancia de 32km al lado noroeste de la ciudad del Cusco, cuenta con un área de 9 063 Has y un perímetro de 43 340m. Se trató de encontrar ambientes similares al parque arqueológico de Chinchero, se encontró una llanura que podría aproximarse a la explanada de Campellanpampa, esta contaba con alrededor de 153.17 de largo y 15 metros de ancho, véase la Fig.3.7



Figura 3.7: Llanura de pisac, sector qosqa

Por otro lado, encontramos muros asociados a los andenes agrícolas, presentan una arquitectura de tipo de aparejo rústico, simple, y fino, en algunos casos compuestos y hecho de piedras toscas, canteadas o labradas y unidas con argamasa de barro. Llegando a tener una altura variable promedio de entre 3 metros a 7 metros, con una longitud de hasta 117 metros. Véase Fig.3.8



Figura 3.8: Muro inca de andeneria

Para el escenario de andenes, se escogió la andenería que se encuentra entre los sectores de Q'alla q'asa y Q'antus raq'ay, como la gran mayoría de los andenes, este tiene una forma circular, como se observa en la figura 3.9, estos andenes además de la altura, son similares en construcción con los andenes del sector de Qosqa, cuentan con tamaños de 3 a 8 metros, longitudes de aproximadamente 190 metros.



Figura 3.9: Andenes del sector q'alla q'asa y q'antus raq'ay

3.4. ADQUISICIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Para esta investigación, la parte práctica consistió en llevar a una velocidad constante el transmisor por cada escenario descrito anteriormente, contemplando así toda la diversidad de arquitecturas que forman los parques arqueológicos. Para cada escenario se realizó rutas de ida y vuelta para captar con mayor fidelidad el comportamiento de la propagación y el desvanecimiento relacionado con la geomorfología del parque arqueológico, a una velocidad de 0.4 m/s. Los múltiples caminos que experimenta la señal de transmisión, dieron lugar a respuestas diferentes en cuanto al desvanecimiento y la pérdida de propagación.

Para el parque arqueológico de Chinchero, en el escenario de Explanada se tomó las siguientes rutas:

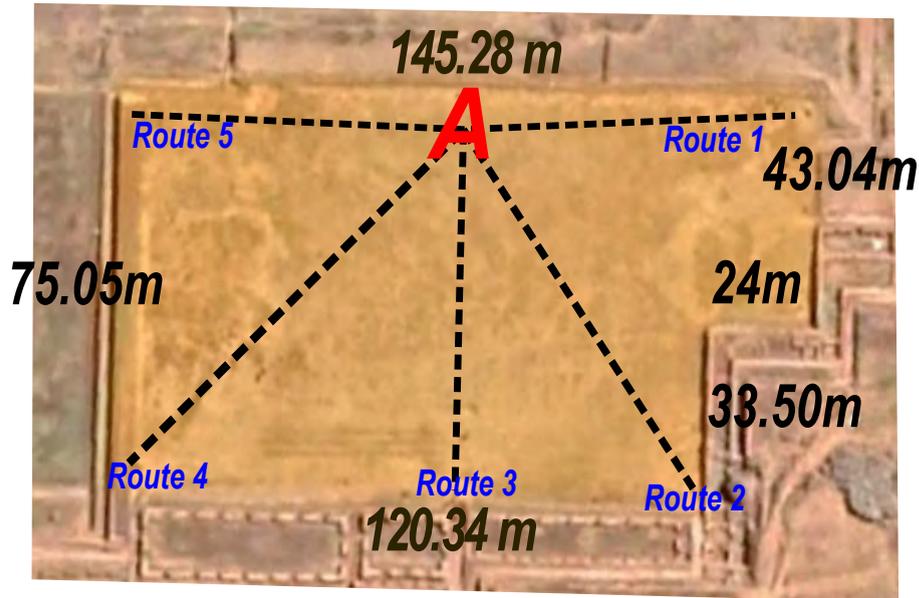


Figura 3.10: Rutas de medición- Chinchero-Explanada

El receptor se colocó en el punto A, centro de la explanada, para luego realizar las rutas correspondientes a ángulos de 25 grados, para cada ruta se obtiene 2050 datos, con una tasa de muestreo de 50 datos en 40λ según (Rappaport y cols., 1996) para la banda UHF, esto para modelar el desvanecimiento a pequeña escala. La altura de la antena transmisora se establece en 1.5 metros y la altura de la antena receptora en alturas variables de 0.2, 0.5, 0.8, 1.2 metros, esto porque se pretende mantener el orden y la armonía dentro de los parques arqueológicos, además de contar con señalizaciones de la misma altura, véase fig.3.11.



Figura 3.11: Señalización dentro de los parques arqueológicos

Los datos se obtuvieron en un día soleado, con ligeras corrientes de viento. Las variaciones de la señal de propagación se deben únicamente al movimiento del transmisor y la geomorfología del parque arqueológico de Chinchero, puesto que dentro del parque arqueológico no se encontraron personas.

De igual forma se obtuvo los datos experimentales en el sector de Qosqa donde existe una zona llana que se puede aproximar a la explanada de Chinchero, se obtuvieron 4050 datos experimentales, con las mismas características que el primer escenario de explanada. Los datos obtenidos se realizaron en un día soleado, con fuertes corrientes de viento. De igual forma, dentro del parque arqueológico no se encontraron personas.

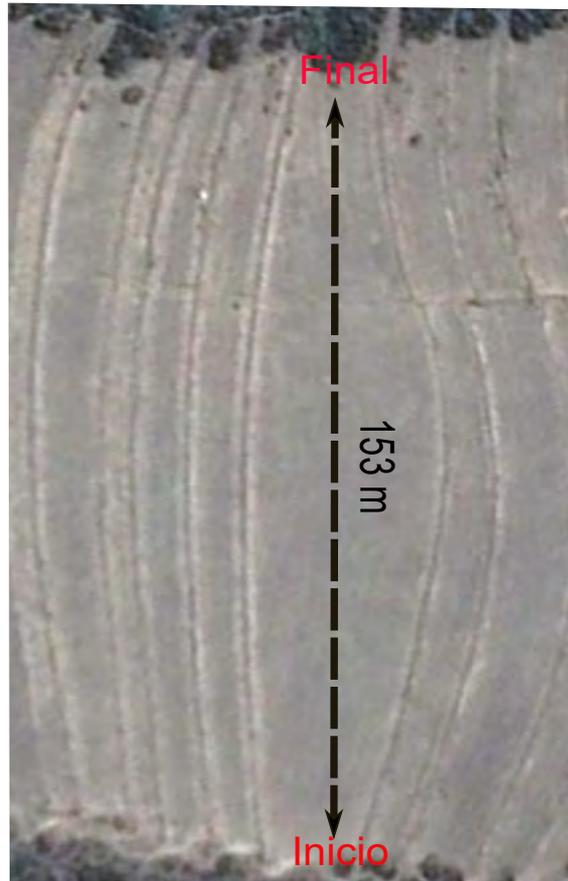


Figura 3.12: Ruta de medición llano de Pisac, sector Qosqa

Para el escenario de muros incas en los parques arqueológicos se tuvo la misma metodología para obtener los datos experimentales, se colocó la antena receptora a una distancia de 1m del muro para luego realizar tramos rectos con el transmisor de ida y vuelta a la misma velocidad constante de 0.4m/s, la misma frecuencia de muestreo y las variaciones de altura del receptor, hasta llegar al final del muro. Para el escenario de Chinchero, que se muestra en la figura 3.13, se obtuvieron 2050 muestras.



Figura 3.13: Mediciones en los muros incas de Chinchero

Para el parque arqueológico de Pisac, del mismo modo, se realizaron las pruebas experimentales, como se muestra en la siguiente figura 3.14



Figura 3.14: Mediciones en los muros incas de Pisac

Por último, contamos con el escenario de andenes incas, donde se tuvo que cambiar la metodología de medición, puesto que por su infraestructura que es de difícil acceso, no se pudo realizar las mediciones móviles, cambiando así a mediciones estáticas. Para cada andén se obtuvo datos experimentales, colocando así el receptor en la zona más alta de la andenería, para luego ir variando andén a andén la posición del transmisor, obteniendo así una variación en la altura más la variación de altura de andén.

Para nuestro escenario de Chinchero, se obtuvo 500 datos experimentales por cada andén, véase figura 3.15



Figura 3.15: Mediciones en los andenes del Sector de Wataycarcel

Para el parque arqueológico de Pisac, del mismo, se realizó las medidas estáticas, variando cada piso de andén, como se observa en la siguiente figura3.16



Figura 3.16: Mediciones en los andenes incas de Pisac

Capítulo IV

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CANAL DE PROPAGACIÓN

Para esta investigación, se tiene en cuenta el siguiente diagrama de bloques para el correcto cálculo de los parámetros del canal de propagación inalámbrico. Véase Fig.4.1

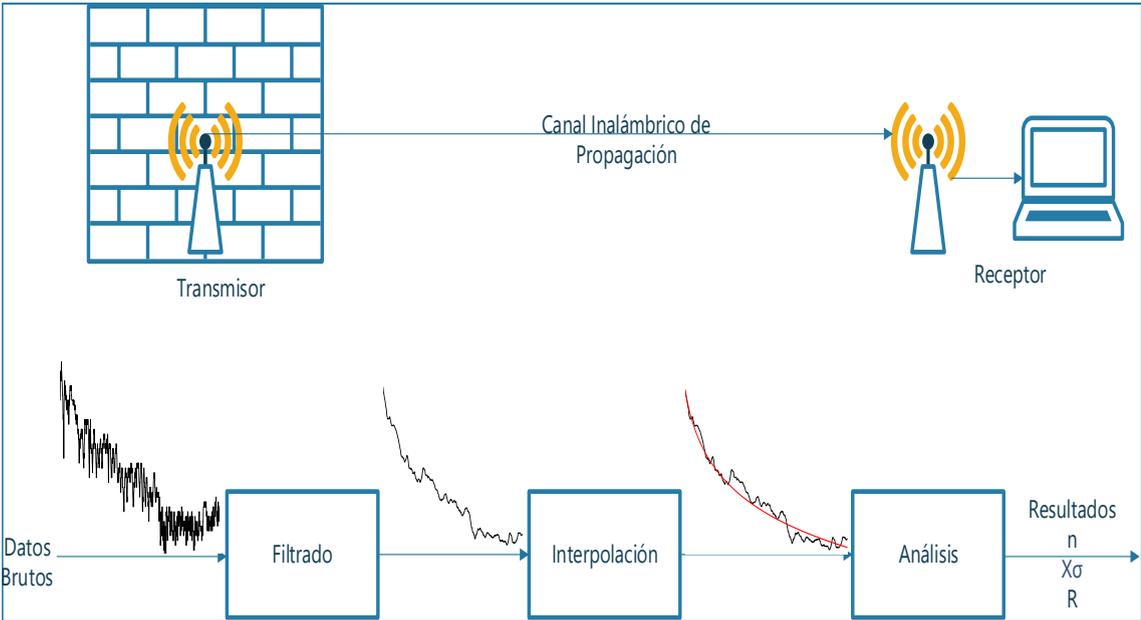


Figura 4.1: Diagrama de bloques

4.1. TÉCNICA DEL FILTRO DE MEDIA MÓVIL

Esta técnica de medias móviles se usa para extraer los fenómenos de desvanecimiento que distorsionan la señal al viajar por el canal inalámbrico, es por ello que para separar el desvanecimiento a pequeña escala de nuestra señal se usa este filtro de forma adecuada aplicándolo sobre los datos experimentales obtenidos en los parques arqueológicos. La siguiente figura 4.2 muestra los tipos de desvanecimientos ocurridos al momento de realizar las medidas dentro de los parques arqueológicos, observando las atenuaciones ocurridas al momento de mover el transmisor en las múltiples rutas. El paso del filtro suaviza las variaciones ocurridas en torno a la media de la señal recibida.

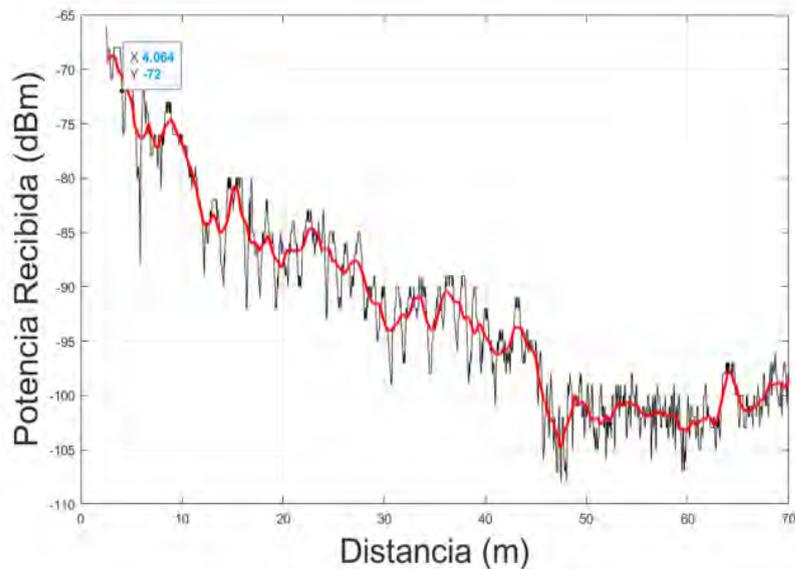


Figura 4.2: Uso del filtro de media móvil para separar el desvanecimiento a pequeña escala

En la figura 4.3 se puede observar el desvanecimiento a pequeña escala, extraído de nuestra señal.

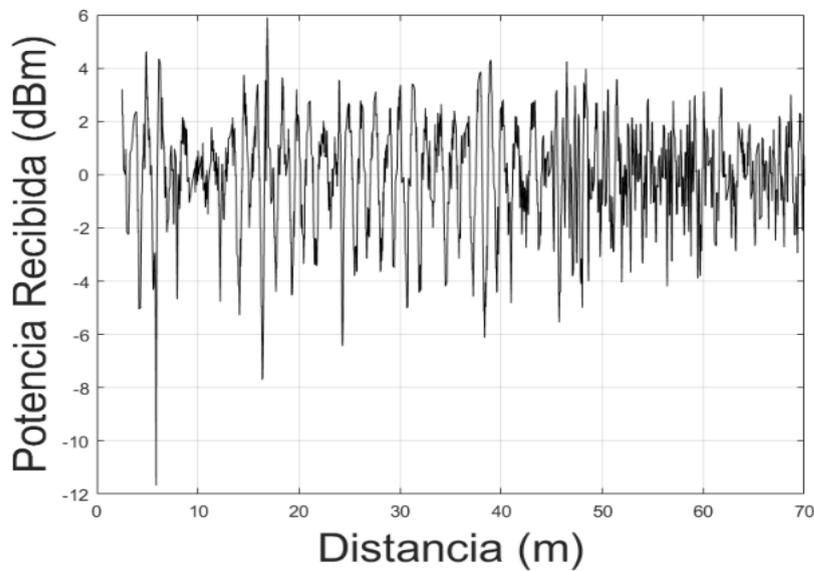


Figura 4.3: Desvanecimiento a pequeña escala

La extracción del desvanecimiento tiene el siguiente orden, se aplica primero el filtrado a los datos experimentales contenidos en el archivo `xlsx`., obteniendo así el desvanecimiento a pequeña escala, después se vuelve a aplicar el filtro a las muestras correlacionadas, $0.5\lambda - 0.8\lambda$, según la teoría de trabajos desarrollados en estadísticas de modelización de canal inalámbrico aplicados en comunicaciones móviles (Rappaport y cols., 1996)(Jakes y Cox, 1994). Del resultado del segundo filtrado se obtiene el desvanecimiento a gran escala. Aplicando la regresión lineal sobre los datos descorrelacionados se obtiene la pérdida de señal, exponente de pérdida de potencia. Posteriormente, restando esta pérdida de propagación del desvanecimiento a gran escala, obtenemos el sombreado o shadowing en inglés.

Para la eficacia de este filtro se debe de tener en cuenta el grado de suavización. Se conoce que los desvanecimientos a pequeña escala pueden alcanzar picos de hasta 20 dB y los desvanecimientos a gran escala alcanzan valores de hasta 15 dB. El tamaño de ventana escogido para esta investigación se basó en el criterio de Lee (Lee, 1998), que nos indica que la longitud de ventana será de 20λ para UHF y 40λ para VHF.

4.2. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Los datos experimentales se almacenan en el ordenador para su procesamiento, gracias al software de Teraterm los datos son almacenados en un libro de excel, donde se filtran de acuerdo a su orientación y longitud.

Una vez procesado los datos experimentales de cada escenario y parque arqueológico, se utiliza la herramienta computacional o software de Matlab para la visualización y análisis de estos. Como se observó en la figura 4.2.

Para un primer análisis, se demostró el comportamiento del canal inalámbrico de propagación dentro de los parques arqueológicos mediante tablas, gráficos, resultados y simulaciones de modelos. Para la confrontación de los modelos simulados con los datos experimentales realizados en los parques arqueológicos, se seleccionaron los que mayor semejanza tenían, graficando así solo los modelos adecuados para estas zonas. Para todos nuestros datos experimentales se hace uso del toolbox de Matlab llamado Curve Fiting Tool, el cual nos proporciona la pérdida de propagación a la distancia de referencia, el exponente de pérdida de propagación, la desviación estándar y el coeficiente de correlación, gracias al ajuste que hace entre los datos experimentales y el modelo propuesto por nuestra investigación.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA PERDIDA DE PROPAGACIÓN

4.3.1. Chinchero

La figura 4.4, nos permite ver las pérdidas de propagación y la pendiente dentro de la explanada de capellanpampa. Estos son todos los datos obtenidos en las 5 rutas tomadas de ida y vuelta dentro de la explanada a la altura de antena de 20cm, lo que se quiere

demostrar es que, tomando los datos brutos en general y los datos por trayecto, se obtiene valores similares.

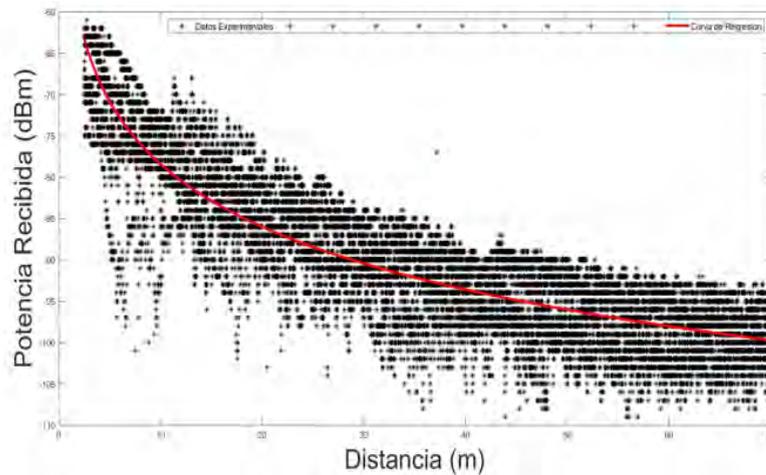


Figura 4.4: Medidas obtenidas con 20cm de altura de antena Rx

La Tabla 4.1 muestra los valores obtenidos gracias al ajuste hecho con Matlab.

Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Correlación (%)	SSE
-53.2	2.521	4.305	0.7881	3.76×10^5

Tabla 4.1: Parámetros de regresión de la explanada de Capellanpampa

Por otro lado, tenemos las regresiones hechas para cada ruta por separada, obteniendo así diferentes valores de los parámetros de propagación, véase la tabla4.2.

	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)	SSE
Ruta1	-51.68	2.601	1.148	0.9733	4080
Ruta2	-49.86	2.684	1.721	0.9635	6004
Ruta3	-59.76	2.123	1.666	0.9463	5627
Ruta4	-53.99	2.734	1.039	0.9869	2187
Ruta5	-51.71	2.462	1.112	0.9816	2507

Tabla 4.2: Parámetros de regresión de la explanada de Capellanpampa a 20cm para cada ruta

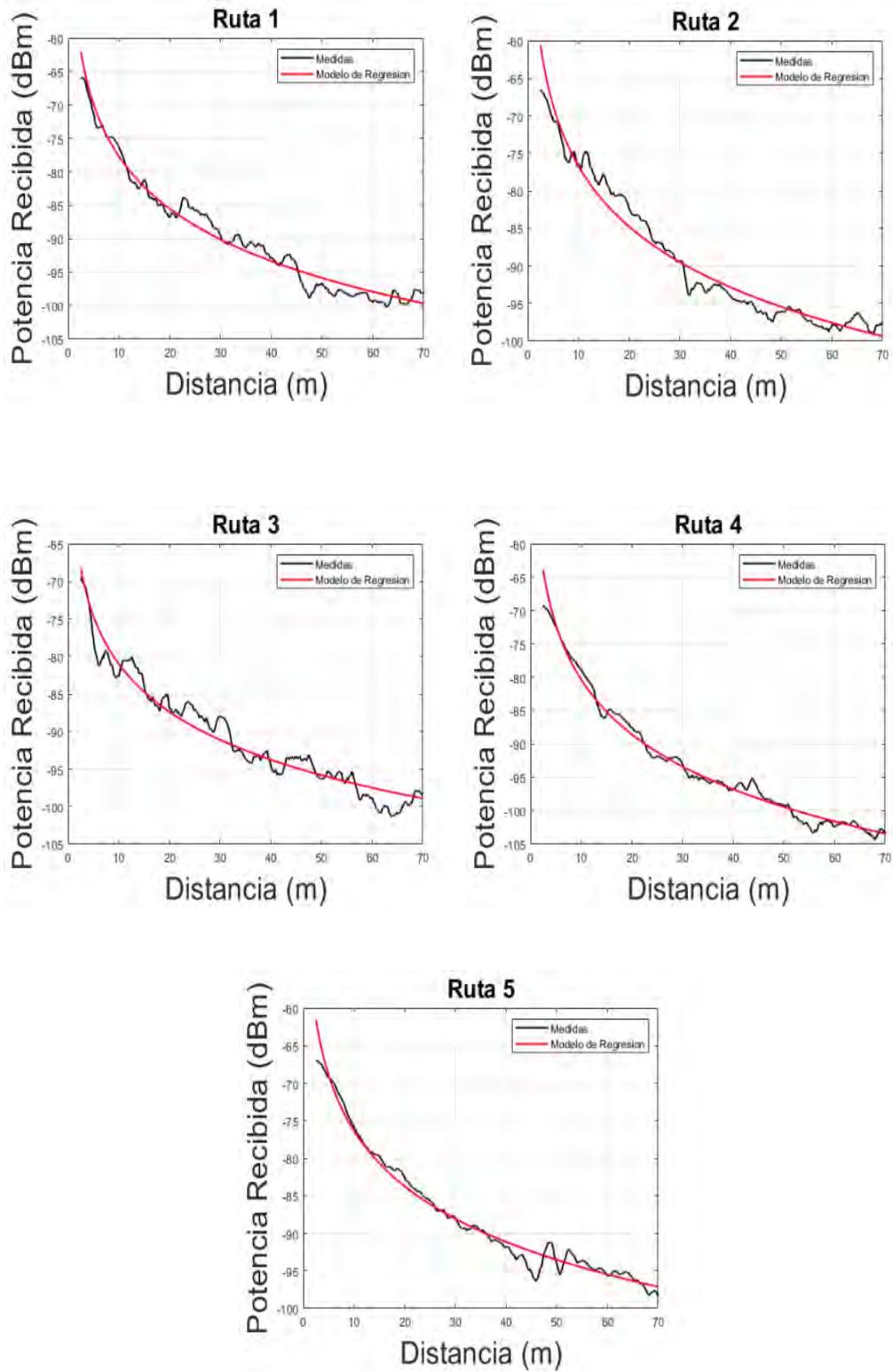


Figura 4.5: Regresión para cada ruta establecida dentro del escenario de Capellanpampa

Obteniendo el promedio de cada ruta dentro del escenario de Explanada, se obtiene una nueva gráfica 4.6, sus parámetros se detalla en la tabla 4.3, donde se observa los parámetros obtenidos para este escenario.

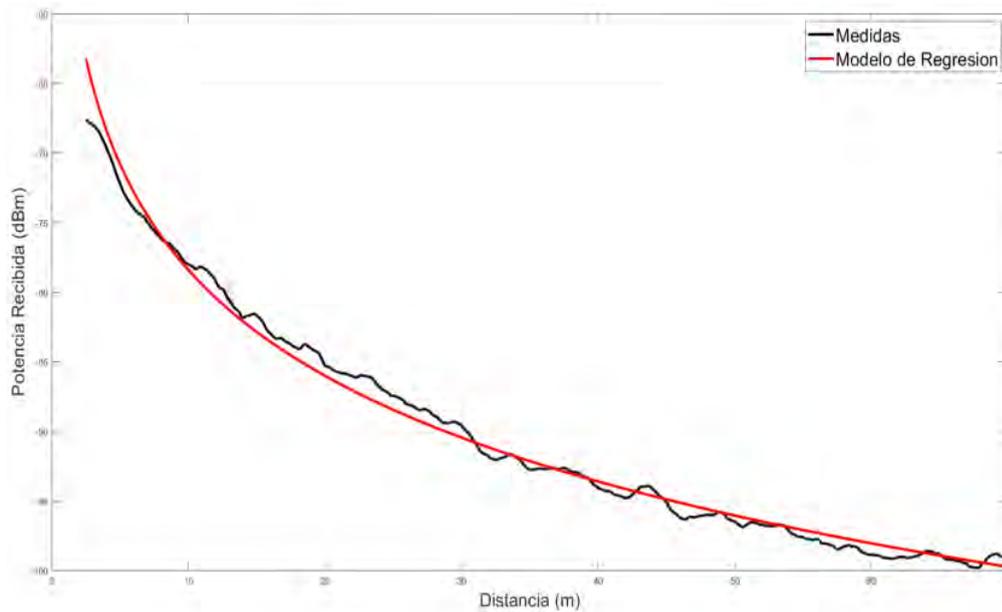


Figura 4.6: Regresión para el promedio total de rutas a 20cm establecida dentro del escenario de Capellanpampa

Tabla 4.3: Parámetros de Regresión de Promedio de rutas a 20cm en la explanada de Capellanpampa

Parámetros de Regresión para el promedio de las rutas en la explanada de Capellanpampa				
Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coficiente de Determinación	SSE
-53.2	2.521	0.808	0.9906	1324

Como se puede apreciar, los valores de potencia de referencia y el exponente de pérdida de propagación son similares, pero en cuanto al valor de RMSE y el coeficiente de determinación, existe una mejor aproximación en los valores promediados, por lo que de ahora en adelante se utilizara estos valores para cada escenario.

Se muestra también la variación de potencia recibida respecto la altura de antena receptora, véase la figura 4.7:

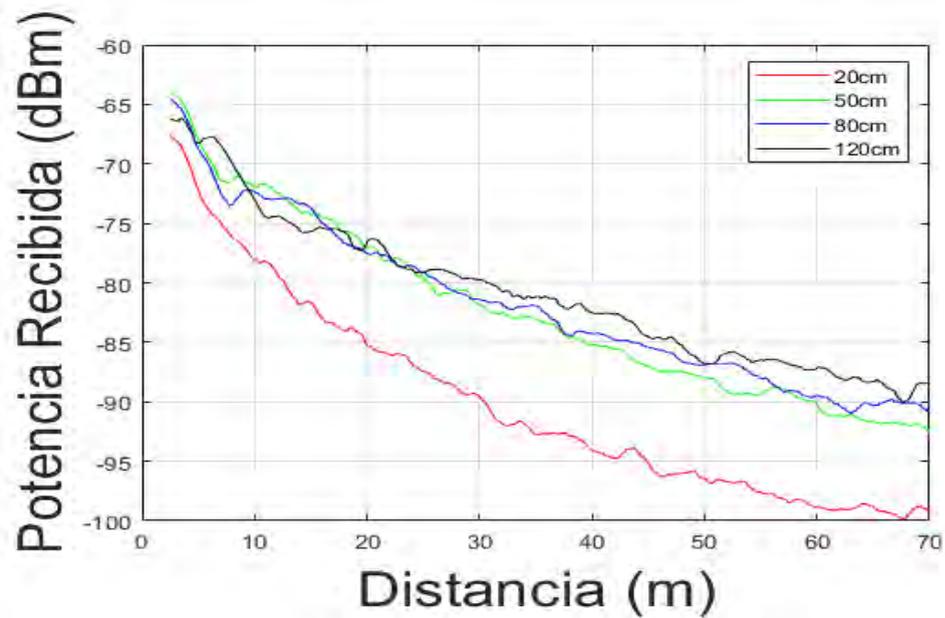


Figura 4.7: Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de recepción

De acuerdo con otras investigaciones se toma en cuenta otros modelos teóricos previamente estudiados, los cuales pueden ser capaces de predecir la potencia recibida de forma óptima dentro de ambientes similares a las de un parque arqueológico, estos modelos se desarrollaron en la parte teórica de esta investigación, obteniéndose una base de datos, los cuales se comparan con los datos experimentales obtenidos y para comprobarse su eficacia según el valor de coeficiente de determinación y RMSE.

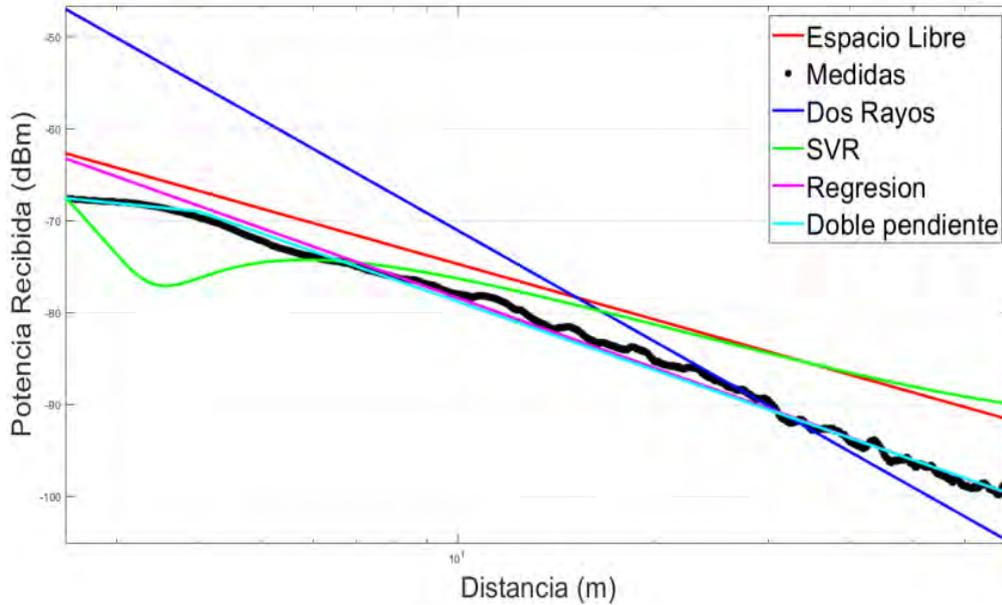


Figura 4.8: Modelos para el escenario de explanada del parque arqueológico de Chinchero

La Tabla 4.4 describe los parámetros encontrados para cada modelo teórico y el propuesto para el escenario Explanada de Capellanpampa.

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	6.3913	0.4127
Dos Rayos	-46.97	4	4.9613	0.6461
SVR	-67.5	2	6.8246	0.3305
Pendiente Única	-53.2	2.521	0.8077	0.9906
Doble Pendiente	-65.96	0.7 - 2.465	0.7889	0.9911

Tabla 4.4: Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de explanada de Capellanpampa

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	2.0961	0.9208
Dos Rayos	-39.24	4	6.0606	0.3381
SVR	-63.59	2	3.9809	0.7144
Pendiente Unica	-49.84	2.222	1.3959	0.9649
Doble Pendiente	-64.08	1.2-2.3	1.0474	0.9802

Tabla 4.5: Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de explanada de Capellanpampa

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	2.4848	0.8627
Dos Rayos	-34.93	4	7.9741	0.4145
SVR	-64.71	2	4.9409	0.4570
Pendiente Única	-52.63	1.998	1.2947	0.9627
Doble Pendiente	-64.53	1.3- 2.1	1.0066	0.9775

Tabla 4.6: Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de explanada de Capellanpampa

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	3.3636	0.7014
Dos Rayos	-31.41	4	9.9094	-
SVR	-59.3	2	5.0188	0.3341
Pendiente Única	-53.96	1.838	1.0926	0.9684
Doble Pendiente	-66.43	0.35- 1.91	0.8994	0.9786

Tabla 4.7: Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de explanada de Capellanpampa

Se encuentra algo muy interesante en cuanto al exponente de pérdida de propagación, este disminuye con respecto la altura, es decir a mayor altura de antena receptora el exponente de pérdida de propagación es más aproximado al valor teórico de 2 o inferior. En la figura 4.9, se observa esta variación con respecto a la altura de antena Rx.

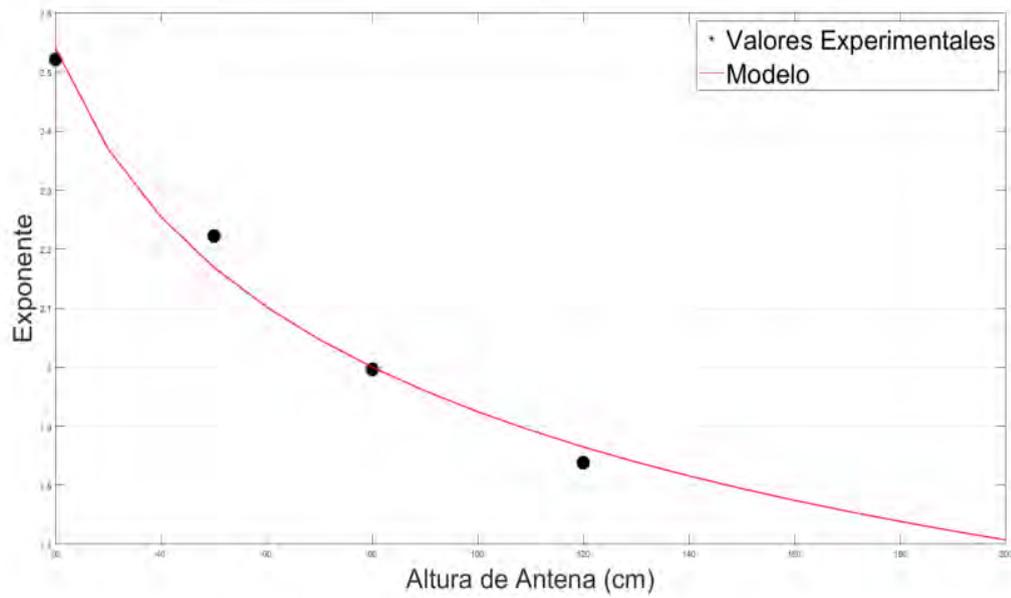


Figura 4.9: Variación del exponente de pérdida de propagación vs altura de antena Rx

Obteniendo así una ecuación Potencial $a * X^b$, siendo $a = 4,265$ y $b = -0,1728$, el modelo llega a tener un valor de coeficiente de determinación R^2 de 0.9851 el cual es un valor altamente aceptable.

La figura 4.10 muestra la variación de la señal en este escenario de muros de incas, también respecto a la altura de la antena Rx.

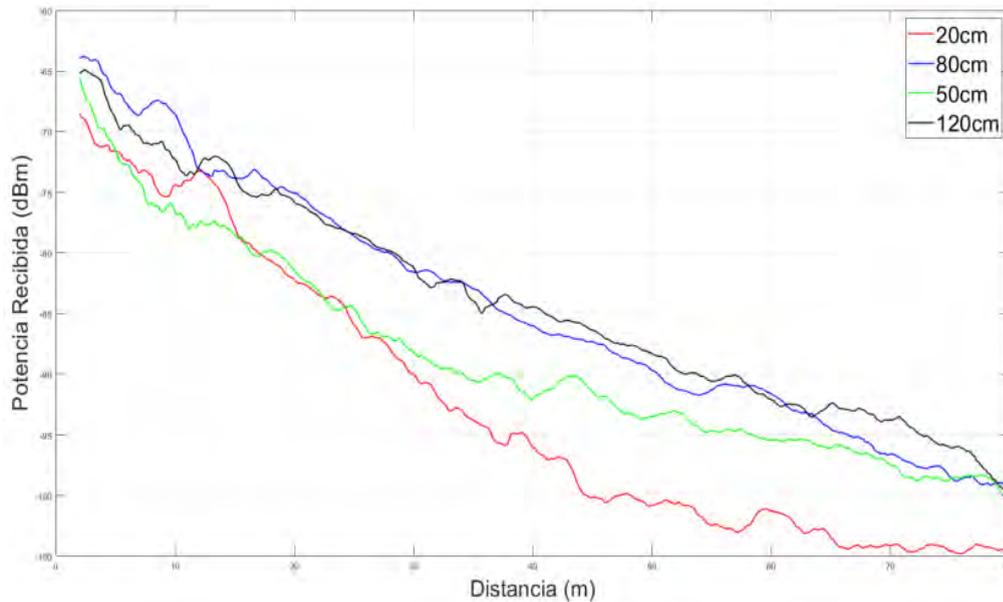


Figura 4.10: Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de recepción en el escenario de muros incas

se procede con el mismo análisis de regresión lineal para obtener nuestro modelo.

La tabla 4.8 muestra los parámetros encontrados para este escenario de muros incas.

	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coficiente de Determinación (%)	SSE
20cm	-45.21	3.143	3.008	0.9299	18530
50cm	-43.15	2.742	2.683	0.9270	14740
80cm	-53.46	2.341	1.324	0.9747	3535
120cm	-47.66	2.419	2.458	0.9217	12380

Tabla 4.8: Parámetros de regresión de muros incas

De igual forma, este se compara con los modelos teóricos previamente desarrollados para determinar su grado de predicción frente a nuestros datos obtenidos, como se muestra en la figura 4.11

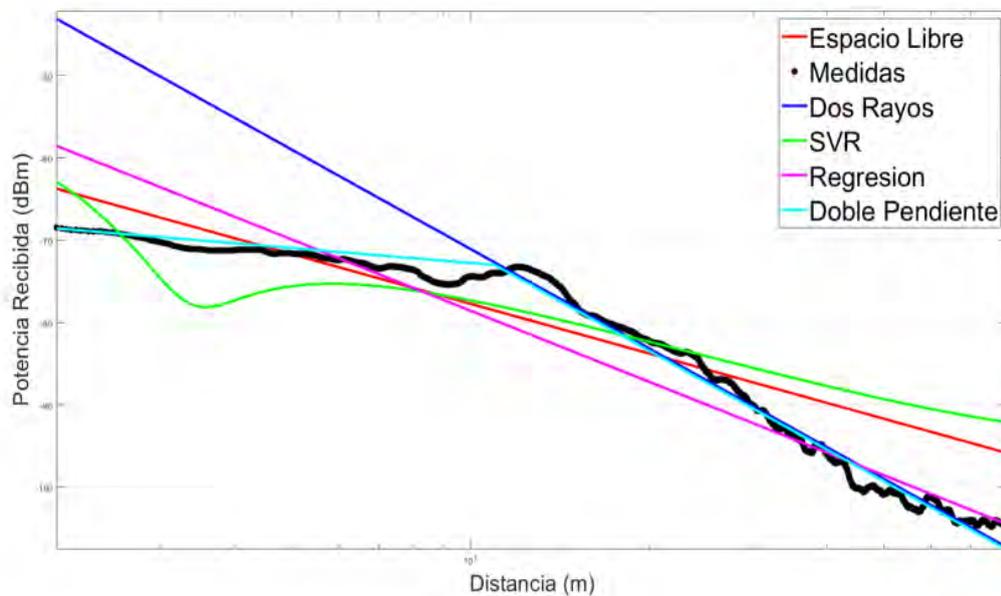


Figura 4.11: Modelos para el escenario de muros incas del parque arqueológico de Chinchero

La Tabla 4.9 describe los parámetros encontrados para cada modelo teórico y el propuesto para el escenario Explanada de Capellanpampa.

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	9.2161	0.3416
Dos Rayos	-43.1	4	4.4088	0.8493
SVR	-62.94	2	10.5381	0.1391
Pendiente Única	-45.21	3.143	3.008	0.9299
Doble Pendiente	-68.56	0.7 - 4.15	1.3285	0.9863

Tabla 4.9: Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	3.7431	0.8578
Dos Rayos	-35.14	4	5.2478	0.7204
SVR	-58	2	6.0718	0.6257
Pendiente Única	-43.15	2.742	2.6818	0.9270
Doble Pendiente	-63.91	0.6 - 3.02	1.7295	0.9696

Tabla 4.10: Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	4.2775	0.7321
Dos Rayos	-31.06	4	11.1150	-
SVR	-69.05	2	5.6769	0.5281
Pendiente Única	-53.46	2.341	1.3132	0.9747
Doble Pendiente	-65.73	1.3 - 2.4	1.0625	0.9835

Tabla 4.11: Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	2.9507	0.8871
Dos Rayos	-27.54	4	9.4464	-
SVR	-57.75	2	3.9052	0.8022
Pendiente Única	-47.66	2.419	2.4571	0.9217
Doble Pendiente	-47.66	1 - 2.4	2.1147	0.9420

Tabla 4.12: Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas

Para nuestro escenario de andenes, los andenes de Wataycarcel, se obtiene los siguientes resultados, véase figura 4.12:

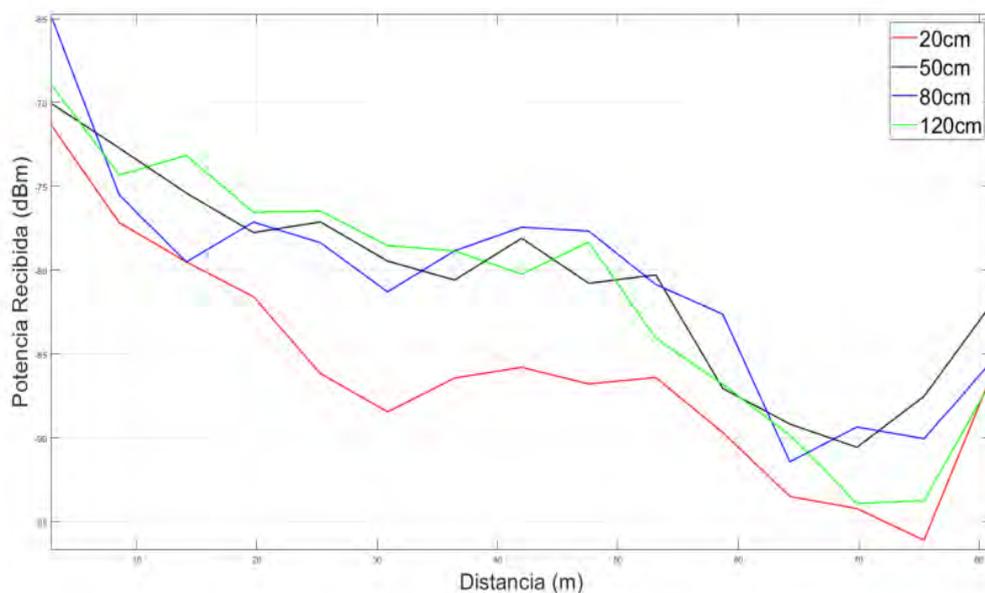


Figura 4.12: Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de recepción en los andenes de Wataycarcel

La tabla 4.13 muestra los parámetros encontrados para este escenario.

	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)	SSE
20cm	-63.41	1.752	2.793	0.8305	101.4
50cm	-57.51	1.771	3.108	0.7448	125.6
80cm	-66.18	1.701	3.652	0.721	173.4
120cm	-57.27	1.893	4.018	0.734	209.9

Tabla 4.13: Parámetros de regresión de los andenes de Wataycarcel

Del mismo modo, este se compara otra vez con los modelos teóricos previamente desarrollados para determinar su grado de predicción frente a nuestros datos obtenidos, como se muestra en la figura 4.13

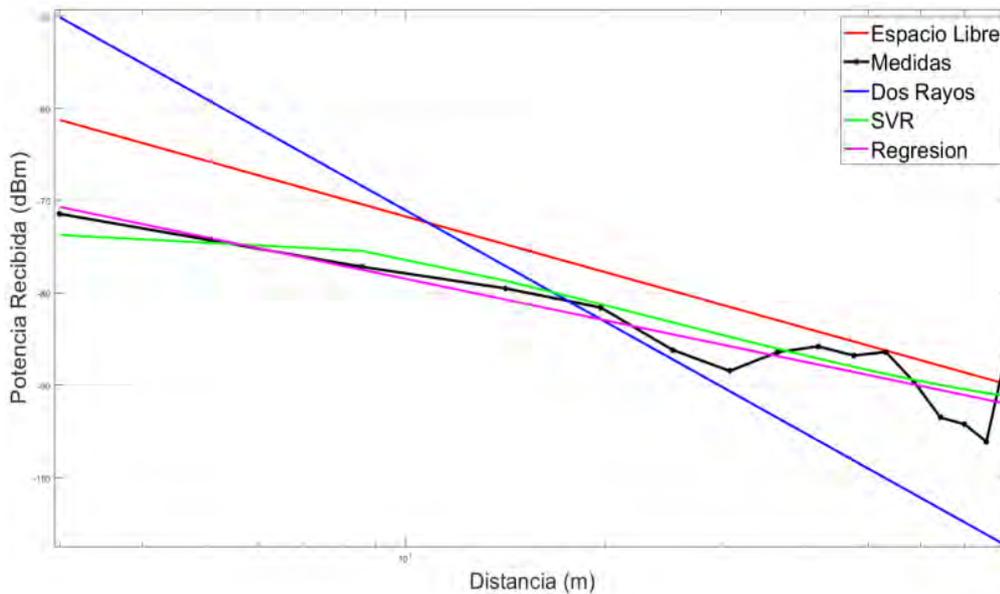


Figura 4.13: Modelos para el escenario de andenes del parque arqueológico de Chinchero

La Tabla 4.14 describe los parámetros encontrados para cada modelo teórico y el propuesto para el escenario de Andenes de Wataycarcel.

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	3.6462	0.8275
Dos Rayos	-50.14	4	10.2574	-
SVR	-59.05	2	6.3475	0.4773
Pendiente Única	-63.41	1.752	2.6002	0.8305

Tabla 4.14: Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de andenes

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	4.1902	0.4647
Dos Rayos	-42.18	4	11.2131	-
SVR	-68.87	2	3.3675	0.6543
Pendiente Única	-67.45	1.771	2.8931	0.7448

Tabla 4.15: Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de andenes

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	4.2246	0.5685
Dos Rayos	-38.1	4	10.6686	-
SVR	-63.37	2	4.9578	0.4058
Pendiente Única	-66.21	1.701	3.3998	0.7206

Tabla 4.16: Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de andenes

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	4.0559	0.6873
Dos Rayos	-34.58	4	11.5055	-
SVR	-69.02	2	5.8011	0.3603
Pendiente Única	-64.86	1.893	3.7410	0.7340

Tabla 4.17: Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de andenes

4.3.2. Pisac

Por otro lado, nos encontramos con otro escenario de parque arqueológico, Pisac, del mismo se realizará el análisis para escenarios con características similares a la del parque arqueológico de Chinchero. Nos encontramos con un entorno de línea de vista, del cual se obtiene la variación de la señal de recepción respecto a la altura de la antena, véase figura4.14.

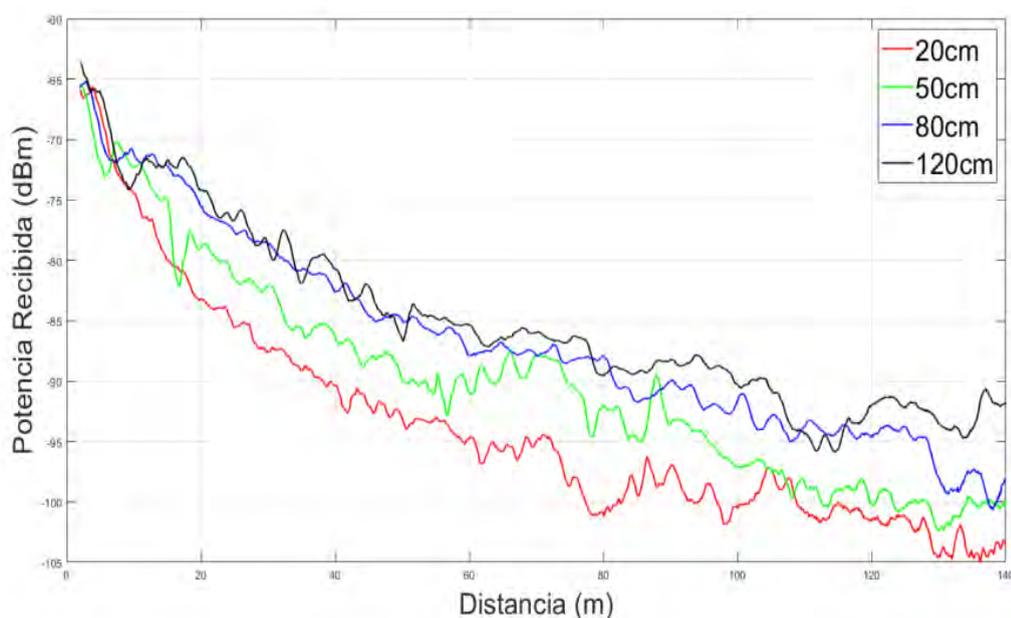


Figura 4.14: Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de recepción en la llanura de Pisaqa

Obteniendo así los parámetros más importantes del modelo de regresión, para cada altura de antena, esto se describe en la tabla4.18

	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)	SSE
20cm	-57.78	2.408	1.196	0.9825	5795
50cm	-50.86	2.249	2.082	0.9419	17550
80cm	-49.29	2.142	1.958	0.9433	15520
120cm	-51.15	1.949	1.754	0.9449	12450

Tabla 4.18: Parámetros de regresión para el escenario LOS de Pisac-Pisaqa

De igual forma los modelos previamente desarrollados en la teoría, en la figura4.15 se

observa la diferencia de los modelos respecto a los datos obtenidos:

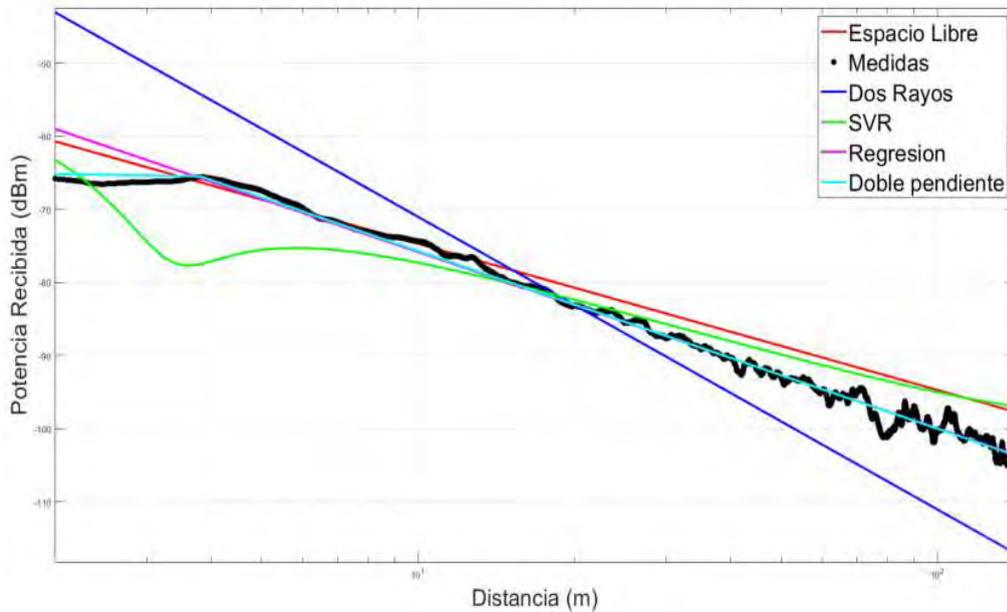


Figura 4.15: Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de línea de vista

La Tabla 4.19 describe los parámetros encontrados para cada modelo teórico y el propuesto para el escenario de Línea de Vista en el sector Pisaqa-Pisac.

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	4.5886	0.7430
Dos Rayos	-43.1	4	9.2122	-
SVR	-62.28	2	5.2228	0.5533
Pendiente Única	-51.78	2.408	1.1962	0.9825
Doble Pendiente	-65.22	0.1 - 2.43	1.0928	0.9854

Tabla 4.19: Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de línea de vista

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	2.3288	0.9273
Dos Rayos	-35.14	4	7.3493	0.2755
SVR	-63.68	2	4.0339	0.7817
Pendiente Única	-50.86	2.249	2.0814	0.9419
Doble Pendiente	-65.4	0.9 - 2.25	1.9146	0.9508

Tabla 4.20: Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de línea de vista

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	3.5870	0.8094
Dos Rayos	-31.06	4	7.4729	0.1730
SVR	-66.6	2	4.6284	0.6827
Pendiente Única	-49.29	2.142	1.9575	0.9433
Doble Pendiente	-65.48	0.7-2.14	1.6231	0.9610

Tabla 4.21: Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de línea de vista

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	4.7824	0.5902
Dos Rayos	-27.54	4	7.8389	-
SVR	-59.21	2	4.6061	0.6199
Pendiente Única	-51.15	2.142	1.7533	0.9449
Doble Pendiente	-63.62	1-2	1.5371	0.9577

Tabla 4.22: Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de línea de vista

Para nuestro entorno de muros incas dentro del parque arqueológico de Pisac se obtiene los siguientes resultados mostrados en la figura 4.16

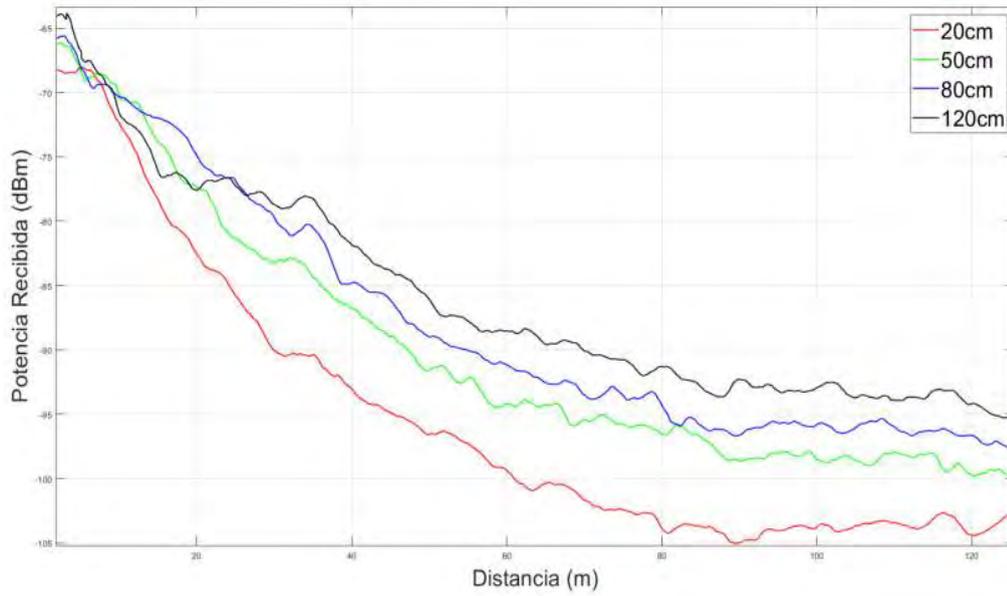


Figura 4.16: Variación de la potencia recibida respecto a la altura de la antena de recepción en muros incas de Pisac

Obteniendo así los parámetros más importantes del modelo de regresión, para cada altura de antena, esto se describe en la tabla 4.23

	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)	SSE
20cm	-47.48	2.83	2.056	0.9626	10770
50cm	-46.35	2.584	1.843	0.9639	8657
80cm	-45.91	2.481	2.179	0.9462	12100
120cm	-49.2	2.172	1.599	0.9616	6516

Tabla 4.23: Parámetros de regresión para el escenario de muros de Pisac

Graficamos los modelos desarrollados en la teoría, y la comparamos con nuestro modelo de regresión, como se observa en la figura 4.17

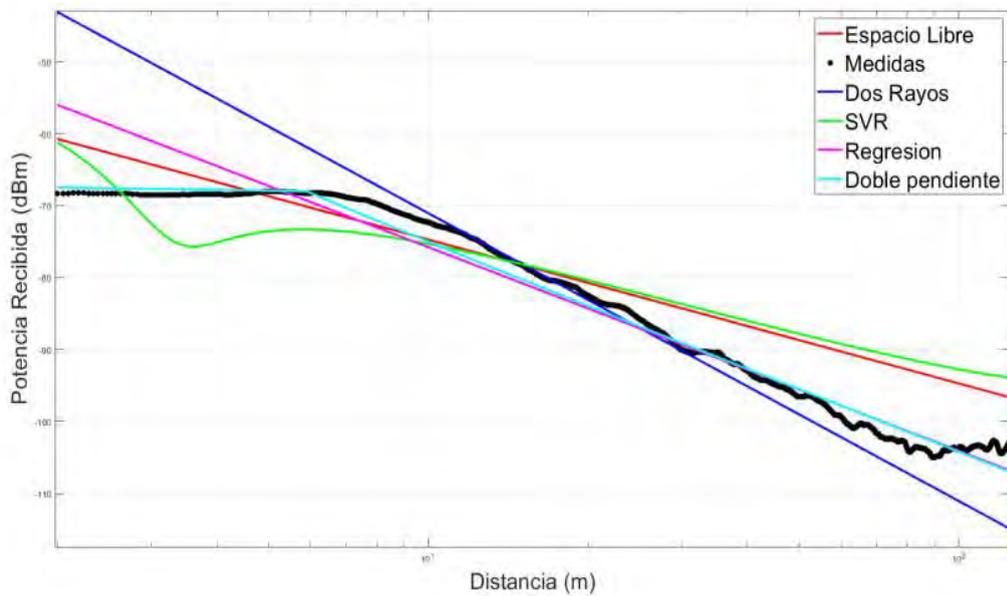


Figura 4.17: Modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas

La Tabla 4.24 describe los parámetros encontrados para cada modelo teórico y el propuesto para el escenario de muros inca en el sector Pisac.

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	7.7331	0.4702
Dos Rayos	-43.1	4	5.8459	0.6973
SVR	-61.28	2	9.1201	0.2632
Pendiente Única	-47.48	2.83	2.0556	0.9626
Doble Pendiente	-67.46	0.1 - 2.87	1.6639	0.9755

Tabla 4.24: Parámetros de los modelos a 20cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas Pisac

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	3.2114	0.8903
Dos Rayos	-35.14	4	5.5749	0.6694
SVR	-61.68	2	5.2640	0.7052
Pendiente Única	-46.35	2.584	1.8426	0.9636
Doble Pendiente	-66.13	0.3 - 2.53	1.4434	0.9778

Tabla 4.25: Parámetros de los modelos a 50cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas Pisac

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	2.8864	0.9056
Dos Rayos	-31.06	4	6.1237	0.5750
SVR	-66.6	2	5.3381	0.6771
Pendiente Única	-43.91	2.481	2.1785	0.9462
Doble Pendiente	-65.56	0.6-2.38	1.8848	0.9597

Tabla 4.26: Parámetros de los modelos a 80cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas Pisac

Modelo	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coefficiente de Determinación (%)
Espacio Libre	-61.26	2	3.1157	0.8542
Dos Rayos	-27.54	4	7.4615	0.1639
SVR	-60.21	2	4.7666	0.6588
Pendiente Única	-49.2	2.172	1.5985	0.9616
Doble Pendiente	-61.86	0.8-2.13	1.4596	0.9680

Tabla 4.27: Parámetros de los modelos a 120cm de altura de antena Rx para el escenario de muros incas Pisac

Se muestra los gráficos obtenidos para el escenario de andenería dentro del parque arqueológico de Pisac, como se mencionó anteriormente, la metodología para la obtención del valor de potencia recibida o RSS, vario.

En la figura 4.18 se muestra la variación del valor de potencia recibida, tanto para valores de obstrucción total por los andenes, media obstrucción y una clara línea de visión entre el transmisor y el receptor a alturas variables, como en los anteriores escenarios.

	Condición entre Tx y Rx	Potencia de Referencia (dBm)	Exponente	RMSE	Coficiente de (Determinación %)
20cm	Obstrucción	-89.67	1.024	2.97	0.7798
	Obstrucción Media	-70.47	1.722	3.942	0.7805
	Línea de Vista	-50.85	2.277	2.999	0.8883
50cm	Obstrucción	-79.13	1.297	2.186	0.913
	Obstrucción Media	-57.09	2.053	2.952	0.9001
	Línea de Vista	-53.36	1.81	2.637	0.8666
80cm	Obstrucción	-83.88	1.08	2.667	0.8300
	Obstrucción Media	-55.63	2.111	2.388	0.9357
	Línea de Vista	-53.09	1.835	3.191	0.8203
120cm	Obstrucción	-81.24	1.292	3.492	0.8031
	Obstrucción Media	-64.01	1.768	3.194	0.8509
	Línea de Vista	51.69	1.989	2.304	0.9114

Tabla 4.28: Parámetros de los modelos de altura de antena Rx variable para el escenario de andenes incas Pisac

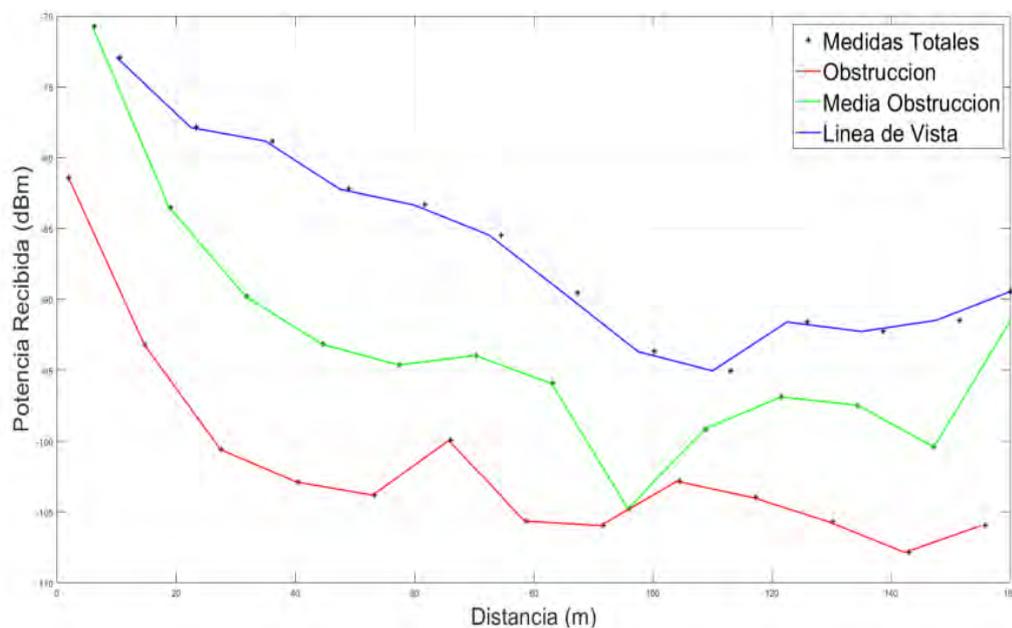


Figura 4.18: Variación de la potencia recibida dentro del escenario de Andenes en el parque arqueológico de Pisac con altura de antena Rx de 50cm

4.4. CARACTERIZACIÓN DEL DESVANECIMIENTO MEDIANTE ESTADÍSTICAS DE PRIMER ORDEN

4.4.1. Sombreamiento o *Shadowing*

Se procede a evaluar los valores de la señal, pero esta vez, se pone a prueba los valores encontrados del desvanecimiento por sombra. Para cada escenario, véase Fig.4.19 la estadística de sombreado tiene un comportamiento cercano a la distribución gaussiana, se observa la comparación entre los histogramas del sombreado y los valores del parque de Chinchero y Pisac.

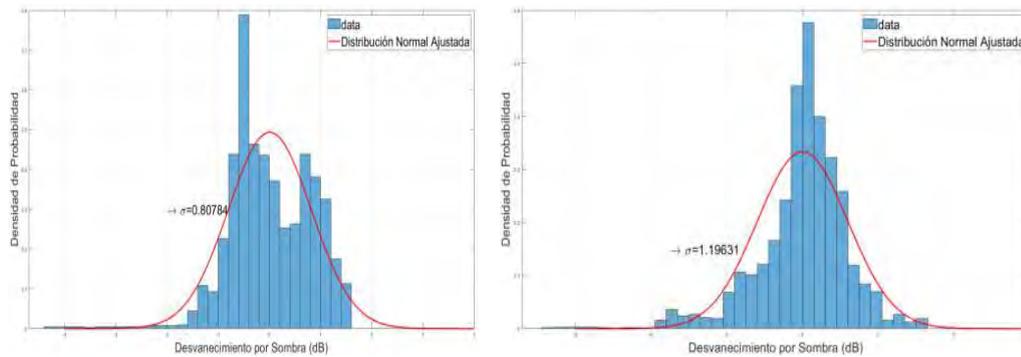


Figura 4.19: Desvanecimiento shadowing para los escenarios de LOS en los parques de Chinchero y Pisac

4.4.2. Desvanecimiento a Pequeña Escala

Para el cálculo del desvanecimiento a pequeña escala se convierte la potencia recibida de dBm a $Watts$, por lo que hace uso de la ecuación 2.24. Una vez obtenido los valores en $Watts$ procede al cálculo de las estadísticas de estos valores, donde el desvanecimiento a pequeña escala se ajustó bien con la función de densidad de probabilidad de Rice para casi todos los escenarios de los parques arqueológicos de Chinchero y Pisac. El resultado concuerda con lo expuesto en ??, donde nos indica que la señal sufre un desvanecimiento de Rice cuando viaja a través de entornos multitrayectoria de mediana complejidad con respecto a los obstáculos, donde predomine un rayo de línea de vista, por otro lado, en

algunas situaciones se obtuvo que el desvanecimiento se ajustó bien a la densidad de probabilidad de Nakagami, esta distribución trata de generalizar, si existe un entorno con alto desorden en términos de obstáculos, o también en situación donde existe obstrucción total entre el Tx y el Rx y a su vez entornos donde predomine los rayos con línea de vista. La figura 4.20 presenta el PDF de los datos experimentales y el PDF obtenido por MatLab para el escenario de muros incas en ambos parques arqueológicos, visualmente no se puede apreciar cuál de las dos distribuciones de probabilidad es la adecuada, por lo que se recurre al uso de la CDF, posteriormente al uso del valor de loglikelihood, obteniendo valores mayores para la distribución de Rice.

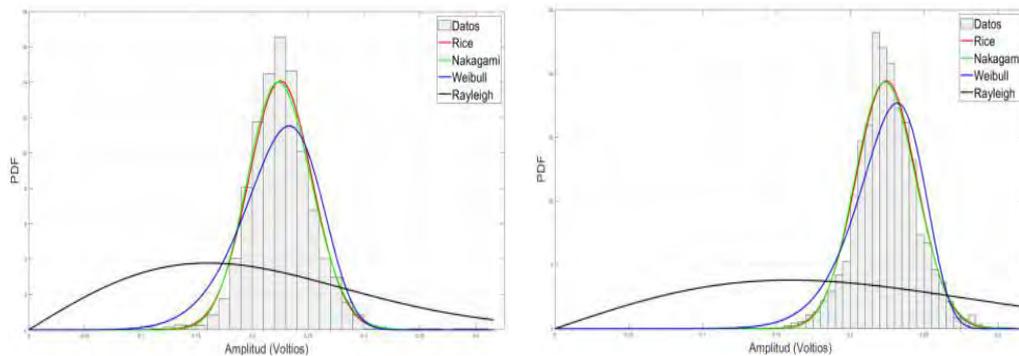


Figura 4.20: Desvanecimiento a pequeña escala para los escenarios de muros en los parques de Chinchero y Pisac

La figura 4.21 presenta el resultado de la aplicación de uno de los recursos de Matlab para determinar la curva de probabilidad que mas se ajusta a los datos. Como se dijo anteriormente, aun no es posible determinar visualmente cual es la curva de probabilidad que mejor se ajusta por lo que recurrimos al calculo del valor de loglikelihood, donde determinamos que la distribución que mejor se ajusta es Rice.

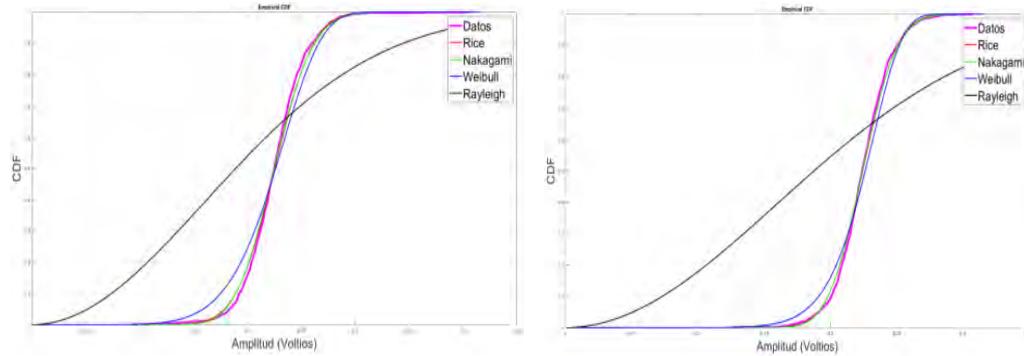
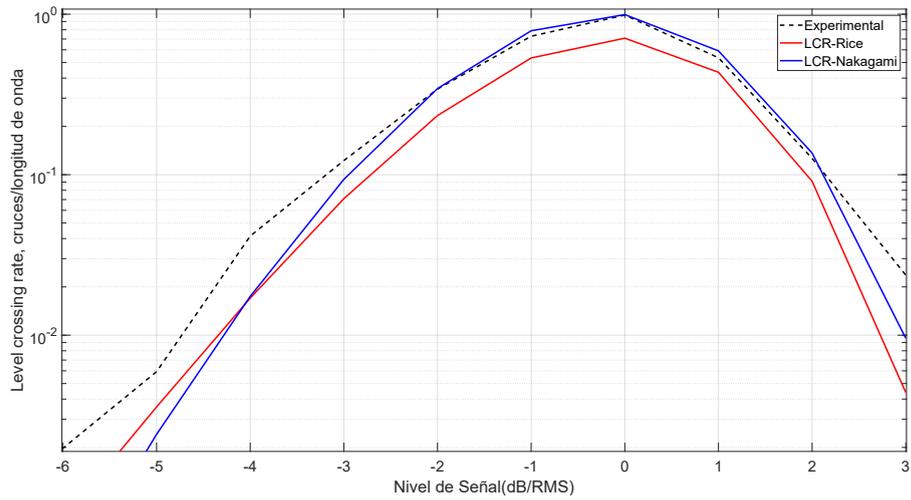


Figura 4.21: CDF de matlab y cdf experimental para los escenarios de muros en los parques de Chinchero y Pisac

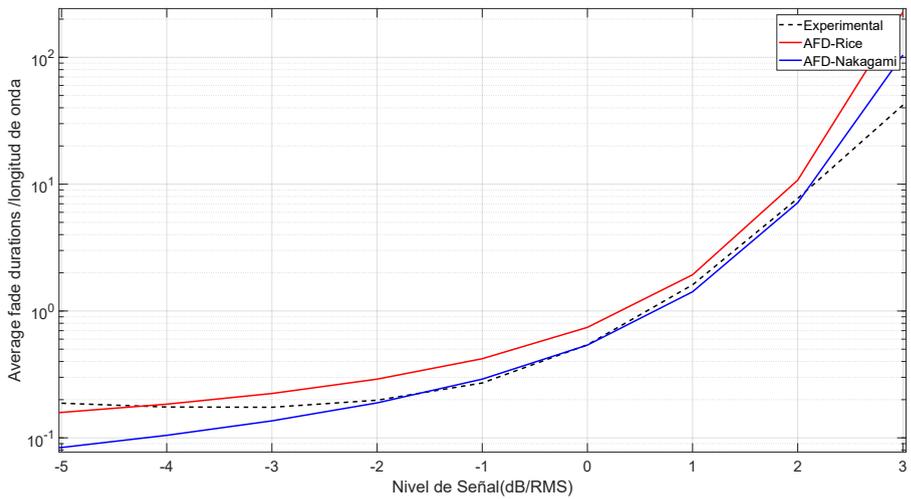
4.5. CARACTERIZACIÓN DEL DESVANECIMIENTO MEDIANTE ESTADÍSTICAS DE 2DO ORDEN

El LCR(Level Crossing Rate) es un proceso estocástico el cual nos permite saber la frecuencia con la que la envolvente de la señal recibida cruza un determinado valor, por otro lado la AFD(Average Fade Duration) es el tiempo en que la envolvente permanece por debajo de este valor determinado.(Parsons, 2000)

La figura4.22 presenta los resultados de la simulación y los datos experimentales, tanto del AFD y LCR.



(a) LCR para Pisac 20cm



(b) AFD para Pisac 20cm

Figura 4.22: Estadísticas de segundo orden para los escenarios de Pisac

Habiendo realizado el análisis de la propagación de canal dentro de los escenarios de parques arqueológicos podemos realizar la siguiente tabla:

	Parque Arqueológico	Altura de Antena Rx	Modelo de Propagación	Exponente de Propagación	Coefficiente de Determinación
E X P L A N A D	Chincheró	20	Doble Pendiente	0.7 - 2.465	0.9911
		50	Doble Pendiente	1.2 - 2.3	0.9802
		80	Doble Pendiente	1.3 - 2.1	0.9775
		120	Doble Pendiente	0.35 - 1.91	0.9786
	Pisac	20	Doble Pendiente	0.1 - 2.43	0.9854
		50	Doble Pendiente	0.9 - 2.25	0.9508
		80	Doble Pendiente	0.7 - 2.14	0.9610
		120	Doble Pendiente	1 - 2	0.9577
A M U R O S	Chincheró	20	Doble Pendiente	0.7 - 4.15	0.9863
		50	Doble Pendiente	0.6 - 3.02	0.9696
		80	Doble Pendiente	1.3 - 2.4	0.9835
		120	Doble Pendiente	1 - 2.4	0.9420
	Pisac	20	Doble Pendiente	0.1 - 2.87	0.9755
		50	Doble Pendiente	0.3 - 2.53	0.9778
		80	Doble Pendiente	0.6 - 2.38	0.9597
		120	Doble Pendiente	0.8 - 2.13	0.968
A N D E N E S	Chincheró	20	Pendiente Única	1.752	0.8305
		50	Pendiente Única	1.771	0.7448
		80	Pendiente Única	1.701	0.7206
		120	Pendiente Única	1.893	0.734
	Pisac	20	Pendiente Única	2.277	0.883
		50	Pendiente Única	1.81	0.8666
		80	Pendiente Única	1.835	0.8203
		120	Pendiente Única	1.989	0.9114

Tabla 4.29: Modelo de doble pendiente para zonas de conservación arqueológica

4.6. VALIDACIÓN DEL MODELO OBTENIDO

El modelo encontrado es validado en el escenario de Explanada Capellanpampa de Chincheró y en el escenario de muros incas del mismo parque arqueológico..



Figura 4.23: Explanada del parque arqueológico de Chinchero

Inicialmente, se desarrolla medidas a lo largo de una línea recta, las muestras se tomaron cada 0.5 metros hasta una distancia de 5 metros. Luego cada metro hasta una distancia de 20 metros, posteriormente cada 2 metros hasta una distancia de 40, finalmente cada 5 metros hasta una distancia de 60 metros. Este tipo de medición se realiza para poder obtener un valor promedio de la potencia recibida en cada posición, además de caracterizar el decaimiento logarítmico de la potencia (Martinez-Sala y cols., 2005).

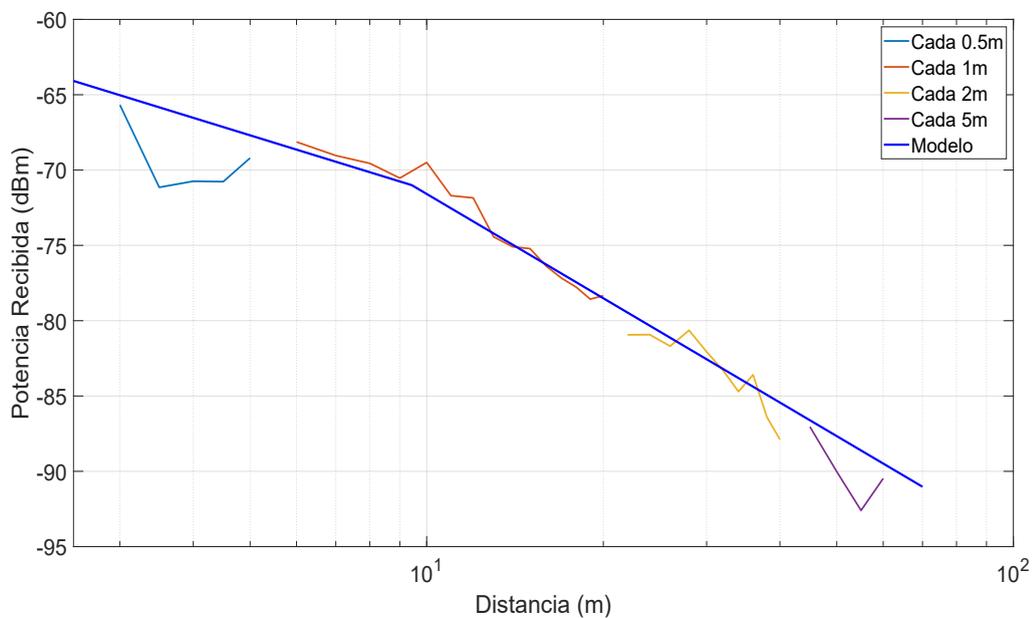


Figura 4.24: Validación del modelo Vs medidas en la explanada del parque arqueológico de Chinchero

Del mismo modo se realizan las mediciones con la misma metodología antes mencionada para caracterizar el decaimiento logarítmico de la potencia según (Martinez-Sala y

cols., 2005).

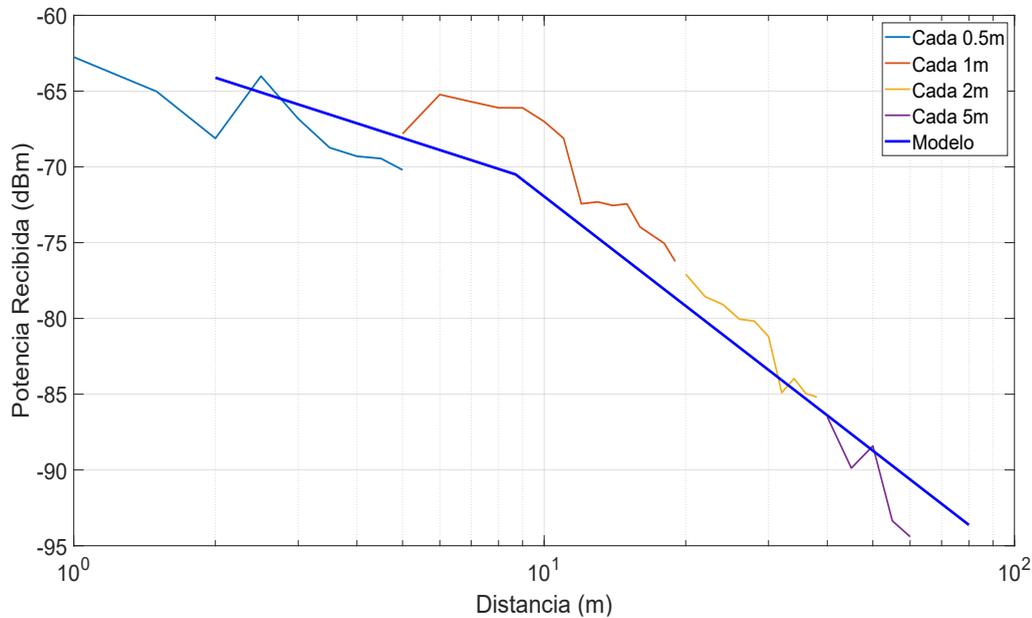


Figura 4.25: Validación del modelo Vs medidas en la explanada del parque arqueológico de Chinchero

4.7. RESULTADOS ADICIONALES DEL MODELO OBTENIDO

El modelo de doble pendiente se pone a prueba para la estimación de la distancia dentro de una zona de conservación arqueológica bajo los escenarios de explanada y muros incas. La distancia aproximada por el modelo de doble pendiente se obtiene realizando un despeje de variable de la siguiente manera:

$$d_{estimada} = \begin{cases} Rb \cdot 10^{\frac{P_{01}-L_0}{10 \cdot n_1}}, & \text{para } 1 < d \leq R_b \\ Rb \cdot 10^{\frac{P_{02}-L_0}{10 \cdot n_2}}, & \text{si } d > R_b \end{cases} \quad (4.1)$$

Donde R_b es nuestro punto de quiebre o ruptura, L_0 es la potencia a la cual ocurre el punto de ruptura, P_{01} será la potencia recibida antes del punto de ruptura, n_1 será el exponente de pérdida de propagación antes del punto de ruptura, P_{02} será la potencia

recibida después del punto de ruptura y n_2 será el exponente de pérdida de propagación después del punto de ruptura.

Ingresando nuestros valores obtenidos bajo la metodología antes mencionada, logramos una estimación de la distancia basándose en la potencia recibida, esta potencia es predicha por el modelo de doble pendiente anteriormente demostrada. Las variaciones obtenidas en distancia se describen en la tablas 4.30 y 4.31 para el modelo de propagación de doble pendiente a 50cm dentro de la explanada y a 120cm dentro de los muros incas, respectivamente.

Distancia Real (m)	Distancia Estimada (m)	Error Absoluto	Error Relativo (%)
3	3.4	0.4	13.3
5	6.68	1.68	33.6
10	8.11	1.89	18.9
19	20.12	1.12	5.9
28	24.75	3.25	11.6
40	51.15	11.15	27.9
60	66.23	6.23	10.4

Tabla 4.30: Estimación de la distancia utilizando el modelo desarrollado VS distancia medida en escenario de Explanada

Distancia Real (m)	Distancia Estimada (m)	Error Absoluto	Error Relativo (%)
2	1.95	0.05	2.5
5	6.83	1.83	36.6
11	6.92	4.08	37.09
20	16.35	3.65	18.25
32	32.05	0.05	0.15
50	50.30	0.3	0.6
55	77.98	22.98	41.78

Tabla 4.31: Estimación de la distancia utilizando el modelo desarrollado VS distancia medida en escenario de muros incas

Los valores obtenidos de la distancia estimada pueden llegar a asemejarse al valor real, como también pueden variar abruptamente, esto puede deberse a la morfología específica

del entorno de parque arqueológico y también a que el estudio se desarrolló a alturas cercanas del suelo.

De las tablas 4.30 y 4.31 podemos deducir que una variación de entre 1 a 10 metros podrían estar dentro del rango adecuado para la estimación de la distancia, puesto que se encontrarían dentro de un error relativo de 5 % al 20 %, por otro lado, esta estimación es un tanto elemental para comenzar a entender la geolocalización basada en el algoritmo de la trilateración incluso el algoritmo de la triangulación como se puede observar en (Vara y cols., 2015), que son los métodos más utilizados para la estimación de la distancia dentro de varios entornos ya conocidos. Al implementar el modelo de doble pendiente dentro del algoritmo de la trilateración se podrá obtener valores de distancia de una forma más óptima, puesto que se basa en 3 nodos sensores y un nodo de prueba.

Capítulo V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En esta investigación se modeló el canal de propagación inalámbrico para un ambiente de zona de conservación arqueológica en la región del Cusco, siendo específicos en los parques arqueológicos de Chinchero y Pisac. Obteniendo modelos de propagación a gran escala cercanas al suelo en diferentes alturas de antena receptora 20, 50, 80 y 120 centímetros. Así como modelos de desvanecimiento de primer orden y segundo orden, para cada escenario de parque arqueológico y para cada altura de antena receptora.
2. Se simuló los modelos a gran escala de propagación inalámbrica teóricos y modelos de desvanecimiento a pequeña escala en el programa de MatLab, adecuados para zonas de conservación arqueológica, estos modelos fueron escogidos dentro de la basta teoría existente, dichos modelos fueron puestos a prueba en escenarios similares a los encontrados dentro de los parques arqueológicos.
3. A partir de los modelos simulados se obtuvo una base de datos, los cuales servirán para poder tener una idea inicial del comportamiento de canal bajo condiciones y morfología similar al de los parques arqueológicos. Del mismo modo, estos datos

serán confrontados posteriormente con los valores experimentales, encontrándose así al mejor modelo teórico capaz de predecir la potencia recibida.

4. Los modelos estadísticos desarrollados en teoría fueron analizados aplicando estadísticas de primer y segundo orden sobre el canal de desvanecimiento. Obteniendo así una primera impresión de cómo se podría ver los datos obtenidos experimentalmente dentro de los parques arqueológicos de Chinchero y Pisac debido al movimiento y morfología de este entorno en específico.
5. Al realizar el análisis del modelo obtenido gracias al algoritmo de regresión lineal sobre los valores de potencia recibida obtenidos en la campaña de mediciones, se sugirió correcciones al modelo de propagación inalámbrico para entornos de zona arqueológica, obteniendo así una ecuación que puede predecir el exponente de pérdida de propagación basándose en la altura de la antena receptora.
6. Se validó experimentalmente el modelo de canal de propagación inalámbrica obtenido mediante la obtención de la distancia teórica por el modelo, como se observa en las tablas 5.1 y 5.2. Donde se puede observar que el modelo de doble pendiente obtiene valores de predicción de la distancia aproximada a los valores experimentales, como también existirá valores no tan cercanos, esto debido a la variación de la señal gracias a la morfología del terreno y al desplazamiento móvil de la antena transmisora.
7. los valores de coeficiente de determinación de los modelos de doble pendiente y una pendiente obtienen valores aceptables con valor promedio de 95 %. Demostrando así un alto grado de similitud entre el modelo y los datos experimentales, exponiendo así la eficacia de los modelos al predecir la potencia recibida dentro de los dos parques arqueológicos de la región del Cusco.
8. La altura de antena es un factor importante dentro del parque arqueológico, se ha demostrado que la altura de la antena afecta de forma notoria al exponente de per-

dida de propagación, mientras que el valor del RMSE no se ve muy afectado.

9. Los modelos de Rice y Nakagami describen adecuadamente los desvanecimientos dentro de estos dos parques arqueológicos. Ambos modelos estadísticos demuestran que son capaces de modelar adecuadamente el desvanecimiento a pequeña escala mediante las funciones de distribución de probabilidad, función de distribución acumulativa y las estadísticas de segundo orden LCR y AFD.
10. El modelo de doble pendiente estima de forma adecuada la distancia presentando aproximaciones de hasta 1 metro, por otro lado, también muestra errores de hasta 20 metros, esta última variación puede deberse a la variación morfológica del terreno como también a la altura de antena por lo que posteriormente se podrá considerar el modelo de doble pendiente log-normal, a la que se le adiciona una variable aleatoria gaussiana de media cero y una desviación estándar específica del entorno.

Capítulo VI

TRABAJOS FUTUROS

Esta investigación puede ser una base para el desarrollo de nuevos retos prácticos y teóricos:

1. Difundir la metodología para la experimentación en otros parques arqueológicos de la región del Cusco, aun poco explorados, Ollantaytambo, Saqsayhuaman, Tambomachay, Huchuy Qosqo, escenarios con algunas variaciones a las ya investigadas en esta tesis.
2. Abogar para el uso de los nuevos dispositivos electrónicos transceptores basados en la tecnología LoRa, para su aplicación en el estudio de la propagación inalámbrica móvil o estática dentro de los parques arqueológicos.
3. Estudio de los parámetros eléctricos del suelo agrícola de los parques arqueológicos, así como los muros incas y andenes.
4. Realizar campañas de medición en las diferentes estaciones del año con la intención de indagar más sobre la variabilidad de la señal dentro de los escenarios de parques arqueológicos.
5. Realizar campañas de medición con la polarización horizontal de antena.
6. Realizar campañas de medidas estáticas, con antenas de posición fija.

7. Implementar una red de sensores para la utilización del modelo encontrado con la finalidad de adquirir la posición de los visitantes dentro de estos escenarios gracias al algoritmo de la trilateración.

Referencias

- Abdi, A., Wills, K., Barger, H. A., Alouini, M.-S., y Kaveh, M. (2000). Comparison of the level crossing rate and average fade duration of rayleigh, rice and nakagami fading models with mobile channel data. En *Vehicular technology conference fall 2000. ieee vts fall vtc2000. 52nd vehicular technology conference (cat. no. 00ch37152)* (Vol. 4, pp. 1850–1857).
- Aguilar Almazo, I. (2019). Evaluación experimental de modelos de radiopropagación mediante una red de sensores inalámbricos.
- Alsayyari, A., Kostanic, I., y Otero, C. E. (2015). An empirical path loss model for wireless sensor network deployment in a concrete surface environment. En *2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (Wamicon)* (pp. 1–6).
- Alves, G. C. G. (2015). Modelagem da propagação radiomóvel no ambiente cerrado nas faixas denominadas vhf/uhf.
- (Çonservancy"), S. F. C. (2005). *Git*. Accedido en 01-04-2021 a url <https://git-scm.com>.
- Dhiraj, D. (2006). *On the simulations of correlated nakagami-m fading channels using sum of sinusoids method* (Tesis Doctoral no publicada). PhD thesis, University of Missouri-Columbia.
- Du, K.-L., y Swamy, M. N. (2010). *Wireless communication systems: from rf subsystems to 4g enabling technologies*. Cambridge University Press.

- Giacomin, J. C., Correia, L. H., Heimfarth, T., Pereira, G. M., Silva, V. F., y De Santana, J. L. (2010). Radio channel model of wireless sensor networks operating in 2.4 ghz ism band. *INFOCOMP Journal of Computer Science*, 9(1), 98–106.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge university press.
- Jakes, W. C., y Cox, D. C. (1994). *Microwave mobile communications*. Wiley-IEEE Press.
- Lee, W. C. (1998). *Mobile communications engineering: theory and applications*. McGraw-Hill Education.
- López García, E. (2016). Modelo de estimación de la distancia en interiores basado en medida rssi en una wsn.
- Martinez-Sala, A., Molina-Garcia-Pardo, J.-M., Egea-Ldpez, E., Vales-Alonso, J., Juan-Llacer, L., y Garcia-Haro, J. (2005). An accurate radio channel model for wireless sensor networks simulation. *Journal of communications and networks*, 7(4), 401–407.
- Otero, C. E., Haber, R., Peter, A. M., AlSayyari, A., y Kostanic, I. (2014). A wireless sensor networks' analytics system for predicting performance in on-demand deployments. *IEEE Systems Journal*, 9(4), 1344–1353.
- Parsons, J. D. (2000). *The mobile radio propagation channel*. Wiley.
- Rábanos, J. M. H., Tomas, L. M., y Salis, J. M. R. (2013). *Transmisión por radio*. Editorial Universitaria Ramón Areces.
- Rappaport, T. S., y cols. (1996). *Wireless communications: principles and practice* (Vol. 2). prentice hall PTR New Jersey.
- RU, P. (2017). Características eléctricas de la superficie de la tierra serie p. *vol, 4*, 527–4.
- Saunders, S. R., y Aragón-Zavala, A. (2007). *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley & Sons.

- Simon, M. K., y Alouini, M.-S. (2005). *Digital communication over fading channels* (Vol. 95). John Wiley & Sons.
- Stallings, W. (2009). *Wireless communications & networks*. Pearson Education India.
- Stüber, G. L., y Stèuber, G. L. (1996). *Principles of mobile communication* (Vol. 2). Springer.
- Swami, A., Zhao, Q., Hong, Y.-W., y Tong, L. (2007). *Wireless sensor networks: signal processing and communications perspectives*. John Wiley & Sons.
- Tang, W., Ma, X., Wei, J., y Wang, Z. (2019). Measurement and analysis of near-ground propagation models under different terrains for wireless sensor networks. *Sensors*, 19(8), 1901.
- Vara, N., Poletto, G. A., Cáceres, M., y Busso, A. J. (2015). Cálculo de distancia entre los nodos de una red inalámbrica zigbee en función del parámetro rssi. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 2, 8–13.
- Yacoub, M. D. (1993). *Foundations of mobile radio engineering*. CRC press.
- Zekavat, R., y Buehrer, R. M. (2011). *Handbook of position location: Theory, practice and advances* (Vol. 27). John Wiley & Sons.

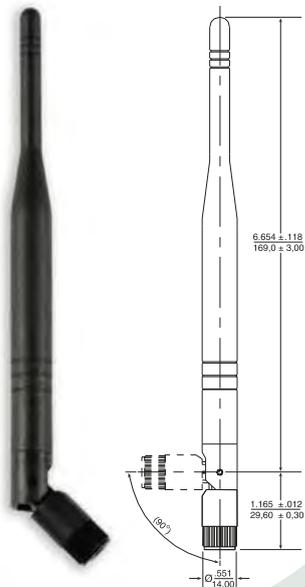
Anexos

Anexos A

DETALLES Y CARACTERÍSTICAS DE LA ANTENA

Wireless External Antenna for 900 MHz Applications

Pulse Part Number: W1063



Features

- Ideal for lower frequency wireless applications in the ISM 900 MHz band
- Omni-directional radiation pattern provides broad 360° coverage
- One-eighth wavelength dipole configuration
- Connection and color options easily integrate with OEM designs

Color Options

- Black*
- Gray (Pantone cool gray 8C)
- Gray (Pantone 429C)
- Gray (Pantone cool gray 7C)

Connector Options

- Reverse SMA (Male)*
- SMA (Male)

* Default Configuration – Please contact Pulse Applications Engineering for assistance in ordering colors and connectors

Weight.....25.6 grams
 Carton.....20/bag; 500/carton

Dimensions: $\frac{\text{Inches}}{\text{mm}}$

Unless otherwise specified, all tolerances are $\pm \frac{.010}{0.25}$

Electrical Specifications @ 25 °C

Note: This part number is lead-free and RoHS compliant. No additional suffix or identifier is required.

Antenna Part No.	Frequency [MHz]	Gain [dBi]	Impedance [Nom]	VSWR	Polarization	Electrical Length	Radiation	Color
W1063	868 – 928	3.0	50 Ω	≤ 2.0	Vertical	1/4, dipole	Omni	Black

Pulse Antennas
 Takatie 6
 90440 Kempele
 Finland
 Tel: +358 207 935 500
www.pulseeng.com/antennas

External Antennas Sales Contacts

USA	858 674 8100	Shanghai	86 21 32181071
UK	44 1483 401 700	China	86 769 5538070
France	33 3 84 35 04 04	Taiwan	886 2 26980228
Singapore	65 6287 8998		



Wireless External Antenna for 900 MHz Applications

Pulse Part Number: W1063

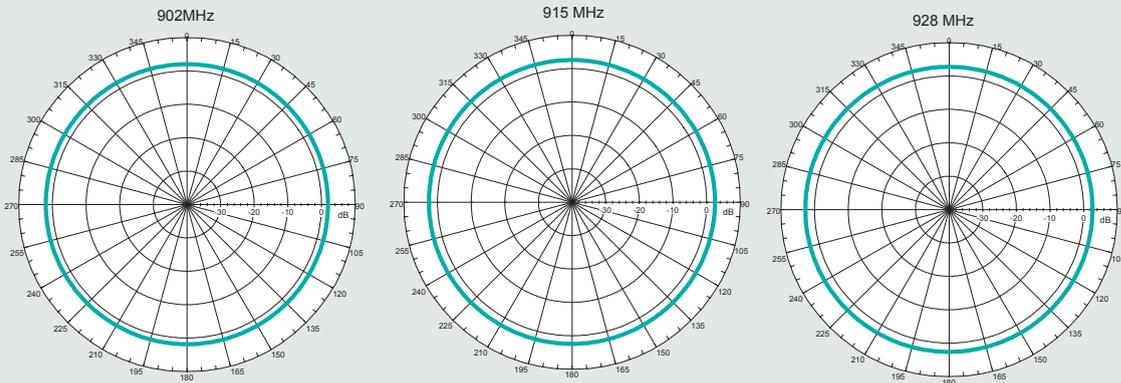
Application Notes

Omni-directional antennas provide a uniform, donut-shaped, 360° radiation pattern. The omni-directional pattern is suitable for point-to-multipoint broadcasting in all directions. This antenna is primarily used for WLAN

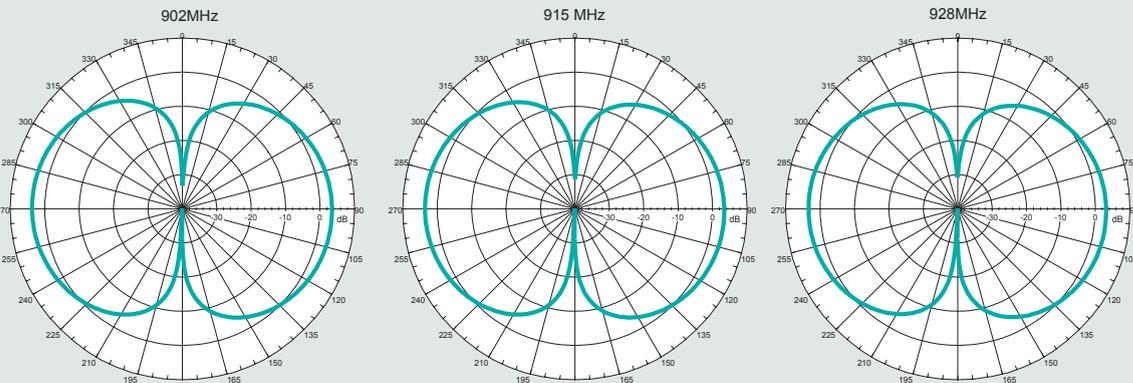
applications. However, it can also be used for a variety of other applications within the specified frequency range. When used as an access point, the antenna is ideally located at the center of the coverage area.

Gain Performance W1063

Horizontal Position



Vertical Position



Pulse Antennas

Takatie 6
90440 Kempele
Finland
Tel: +358 207 935 500
www.pulseeng.com/antennas

External Antennas

Sales Contacts

USA	858 674 8100	Shanghai	86 21 32181071
UK	44 1483 401 700	China	86 769 5538070
France	33 3 84 35 04 04	Taiwan	886 2 26980228
Singapore	65 6287 8998		



© 2008 All Rights Reserved.

Anexos B

HERRAMIENTAS

COMPUTACIONALES

2.0.1. Programas en MatLab:

- Aplicación: Desvanecimiento a larga escala en evaluación de las estadísticas del sombreado, comparando los resultados experimentales y simulados.

Código:

```
1   %desva es nuestros datos experimentales del sombreado
2   histogram(desva,'Normalization','pdf')
3   hold on
4   pd1 = fitdist(desva,'Normal')
5   y = pdf(pd1,x_valores);
6   plot(x_valores,y,'r','LineWidth',2.5)
7   grid on
8   xlabel('Desvanecimiento por Sombra (dB)','FontSize',25)
9   ylabel('Densidad de Probabilidad','FontSize',25)
10  text(-3.5,0.15,'\rightarrow \sigma=1.19631 ','FontSize',25,'
color','k');
11  legend('data','Distribucion Normal Ajustada','FontSize',25)
12
```

Entradas: archivo con los datos experimentales del desvanecimiento a gran escala o
sombreamiento.

Salidas: Distribuciones Simuladas confrontadas con las Distribuciones Experimentales.

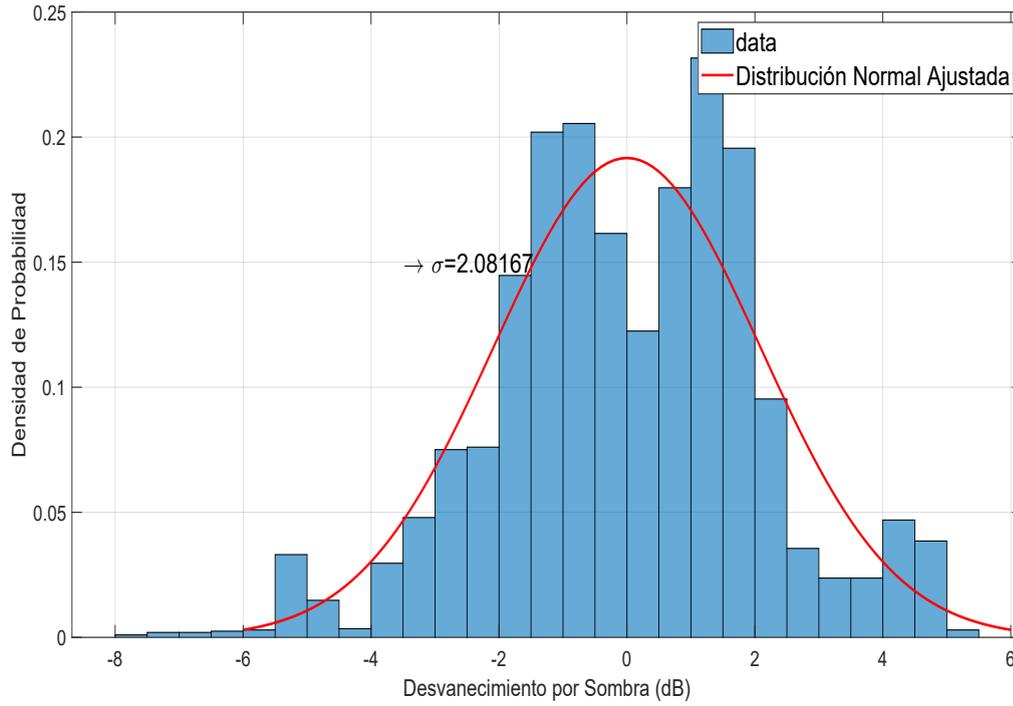


Figura 2.1: Sombreamiento Experimental Vs Sombreamiento Simulado

- Aplicación: Desvanecimiento a pequeña escala en evaluación de sus estadísticas, comparando los resultados experimentales y simulados.

Código:

```
1 fading=datas-fila;
2 volts=0.22361*10.^(fading/20); %conversion a voltios
3
4 histogram(volts,'Normalization','pdf','FaceColor',[.9 .9
5 .9]);hold on
6 x_valores=0.0:.001:max(volts)+0.01;
7 pd = fitdist(volts,'Rician')
8 pd2=fitdist(volts,'Nakagami')
9 pd3=fitdist(volts,'Weibull')
10 pd4=fitdist(volts,'Rayleigh')
11 y = pdf(pd,x_valores);ycdf=cdf(pd,x_valores);
```

```

11     y2=pdf(pd2,x_valores);ycdf2=cdf(pd2,x_valores);
12     y3=pdf(pd3,x_valores);ycdf3=cdf(pd3,x_valores);
13     y4=pdf(pd4,x_valores);ycdf4=cdf(pd4,x_valores);
14     plot(x_valores,y,'r','LineWidth',2.5)
15     plot(x_valores,y2,'g','LineWidth',2.5)
16     plot(x_valores,y3,'b','LineWidth',2.5)
17     plot(x_valores,y4,'k','LineWidth',2.5)
18     grid on
19     xlabel('Amplitud (Voltios)','FontSize',25)
20     ylabel('PDF','FontSize',25)
21     legend('Datos','Rice','Nakagami','Weibull','Rayleigh','
FontSize',25)
22

```

Entradas: archivo con los datos experimentales del desvanecimiento a pequeña escala.

Salidas: Distribuciones Simuladas confrontadas con las Distribuciones Experimentales.

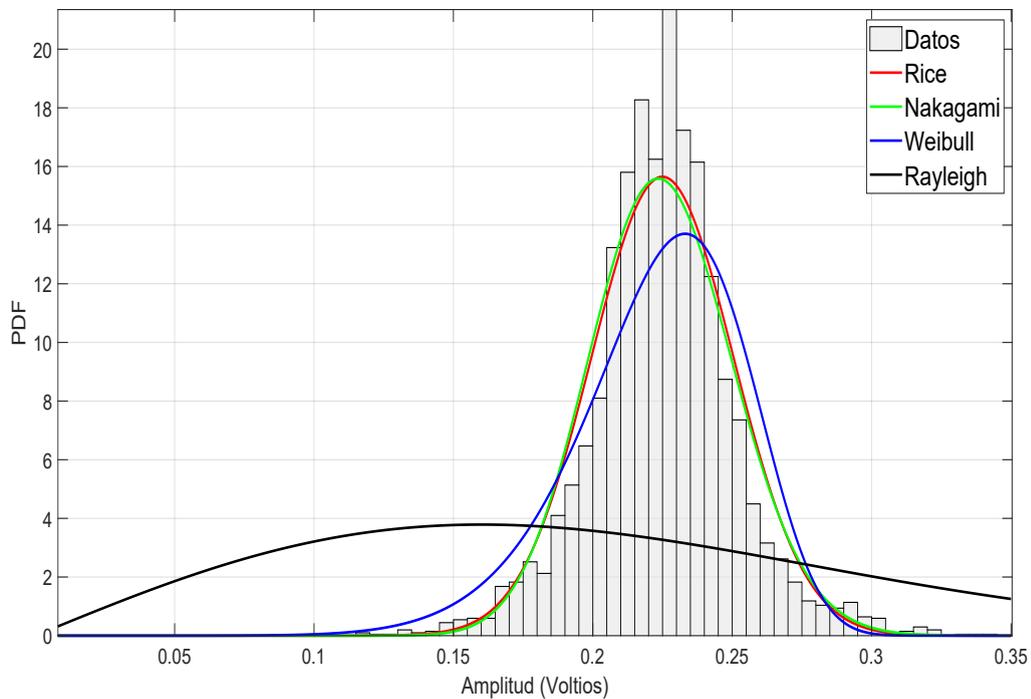


Figura 2.2: Pequeña Escala Experimental Vs Pequeña Escala Simulado

Código:

```

1
2 pd = fitdist(volts,'Rician')
3 pd2=fitdist(volts,'Nakagami')
4 pd3=fitdist(volts,'Weibull')
5 pd4=fitdist(volts,'Rayleigh')
6 ycdf=cdf(pd,x_valores);
7 ycdf2=cdf(pd2,x_valores);
8 ycdf3=cdf(pd3,x_valores);
9 ycdf4=cdf(pd4,x_valores);
10
11 hp=cdfplot(volts);hold on
12 set(hp,'LineWidth',4,'Color','m')
13
14 plot(x_valores,ycdf,'r','LineWidth',2)
15 plot(x_valores,ycdf2,'g','LineWidth',2)
16 plot(x_valores,ycdf3,'b','LineWidth',2)
17 plot(x_valores,ycdf4,'k','LineWidth',2)
18 grid on
19 xlabel('Amplitud (Voltios)','FontSize',25)
20 ylabel('CDF','FontSize',25)
21 legend('Datos','Rice','Nakagami','Weibull','Rayleigh','FontSize
',25)
22
23

```

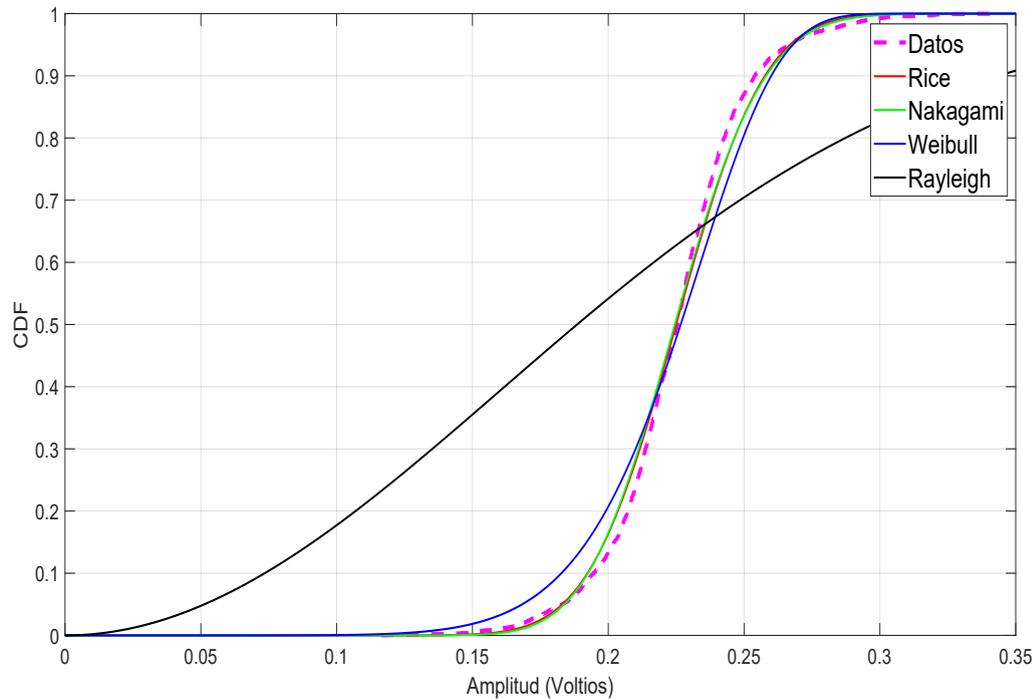


Figura 2.3: Pequeña Escala Experimental Vs Pequeña Escala Simulado

- Aplicación: Datos experimentales de la variación de señal comparado con el algoritmo de regresión lineal.

Código:

```

1     p2a = polyfit(d12,prome0muro2,1);
2     p2b = polyfit(d12,promelmuro2,1);
3     p2c = polyfit(d12,prome2muro2,1);
4     p2d = polyfit(d12,prome3muro2,1);
5     f12a = polyval(p2a,d12);
6     f12b = polyval(p2b,d12);
7     f12c = polyval(p2c,d12);
8     f12d = polyval(p2d,d12);
9     pri2a=(prome0muro2-f12a).^2;
10    pri2b=(promelmuro2-f12b).^2;
11    pri2c=(prome2muro2-f12c).^2;
12    pri2d=(prome3muro2-f12d).^2;
13    seg2a=(prome0muro2-mean(prome0muro2)).^2;
14    seg2b=(promelmuro2-mean(promelmuro2)).^2;

```

```

15     seg2c=(prome2muro2-mean(prome2muro2)).^2;
16     seg2d=(prome3muro2-mean(prome3muro2)).^2;
17     R22a=1-(sum(pri2a)./sum(seg2a));
18     R22b=1-(sum(pri2b)./sum(seg2b));
19     R22c=1-(sum(pri2c)./sum(seg2c));
20     R22d=1-(sum(pri2d)./sum(seg2d));
21

```

Entradas: archivo con los datos experimentales de la variación de la señal

Salidas: algoritmo de regresión lineal simulada confrontada con los datos

Experimentales.

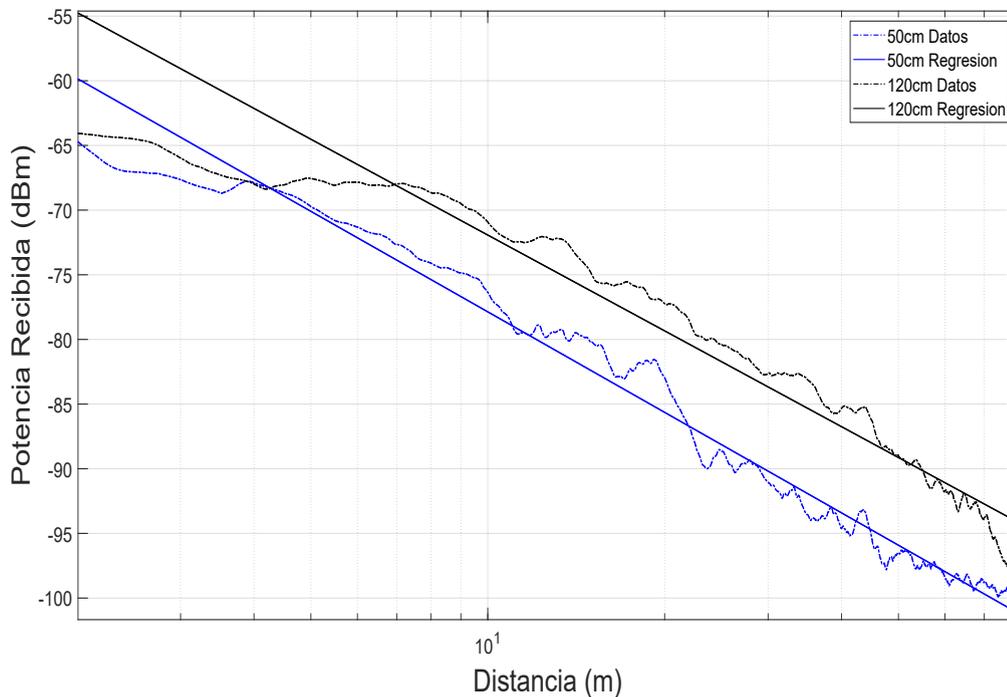


Figura 2.4: Datos Experimentales Vs Algoritmo de Regresión Lineal Simulado

- Aplicación: Datos experimentales de LCR y AFD comparado con los resultados simulados.

Código:

```

1     fc=920;
2     V=0.4;

```

```

3     F=8; %fraccion de longitud de onda
4     lambdac=300/fc;      % m longitud de onda
5     Dx=lambdac/F;      % m sampleo espaciado
6     ts=Dx/V;           % s intervalo de tiempo del sampleado
7     fs=1/ts;           % frecuencia del sampleado
8     kc=2*pi/lambdac;   % constante de propagacion
9     fm=V/lambdac; %frecuencia doppler
10    m=31.7279; %factor de nakagami
11    rmsr=sqrt std volts+mean volts;
12    rrho=volts/rmsr; %variable de LCR y AFD
13
14
15    [axislcr,lcr]=lcrate(rrho,ts);
16    lcr=lcr*lambdac/V;           % conversion a cruces por
longitud de onda
17    Kr=62.6874;
18    rhoo=10.^(axislcr./20);
19
20    lcrtheoretical=sqrt(2*pi*(Kr+1)).*rhoo.*exp(-Kr-(Kr+1).*rhoo
.^2).*besseli(0,2*rhoo*sqrt(Kr*(Kr+1)));
21    lcrNakagami=sqrt(2*pi)*m^(m-0.5).*rhoo.^((2*m)-1).*exp(-m*
rhoo.^2)./gamma(m);
22    rice1=lcrRice(rhoo,Kr);
23    Nakal=lcrNaka(rhoo,m);
24
25
26    axis([min(axislcr) max(axislcr) 0.01 2])
27    grid on
28
29
30    [axisafd,afd]=afduration(rrho,ts);
31    afdinwavelengths = afd*fm;           % conversion de afd
por longitud de onda

```

```

32
33     afdtheoretical= (1-marcumq(sqrt(2*Kr),sqrt(2*(Kr+1)*rhoo.^2)
    ))./lcrtheoretical;
34
35     funs=@(z) z.^((2*m)-1).*exp(-m*(z.^2))
36     x=rhoo;
37     for i=1:length(x)
38         q(i)=integral(funs,0,x(i));
39     end
40
41     afdnakagami=((2*sqrt(m)).*q)./(((sqrt(2*pi)).*rhoo.^(2*m-1))
    .*exp(-m.*rhoo.^2));
42
43     figure, semilogy(axisafd,afdinwavelengths,'k--',axislcr,
    afdtheoretical,'r',axislcr,afdnakagami,'b','LineWidth',2); %
    inwavelengths)
44
45
46

```

Entradas: archivo con los datos experimentales de los valores de señal para LCR y AFD.

Salidas: Valores que caracterizan el AFD y LCR.

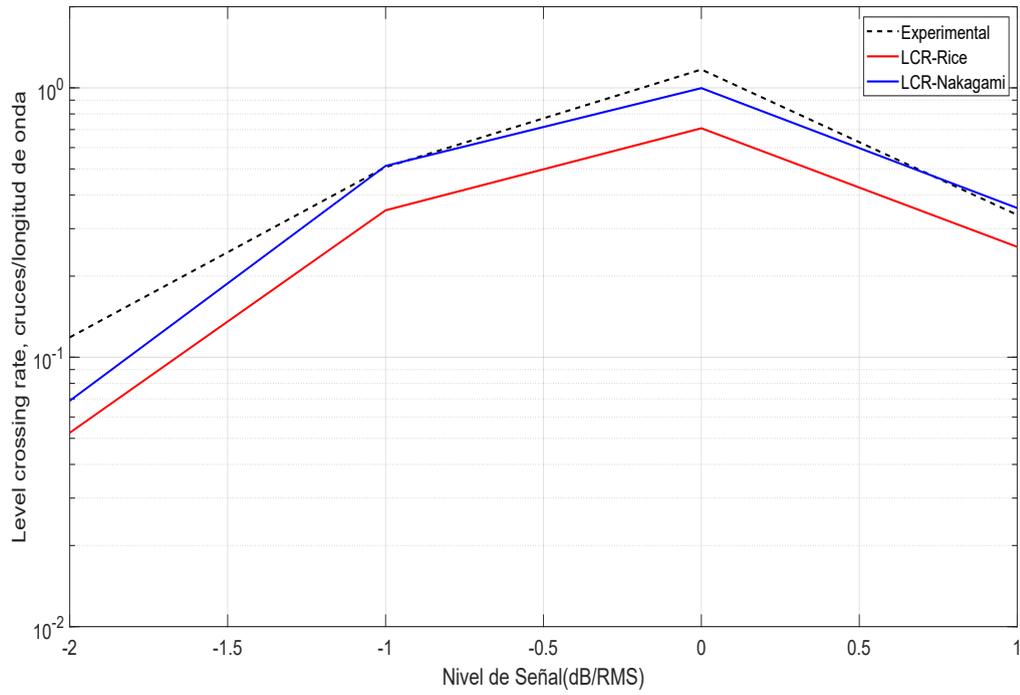


Figura 2.5: Datos Experimentales Vs Simulación de LCR

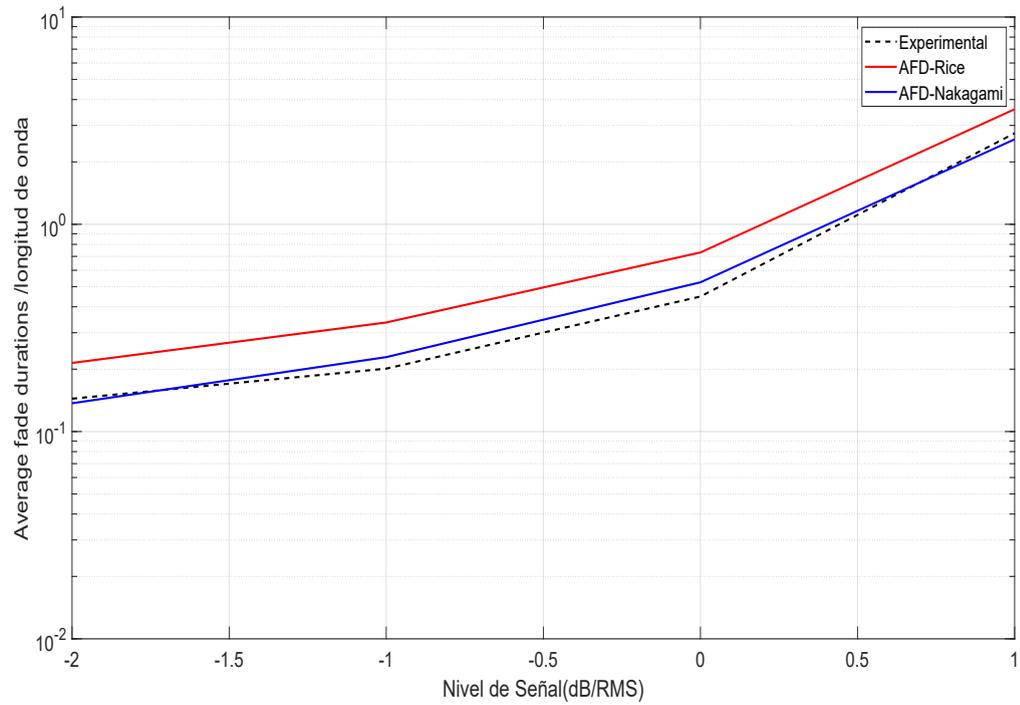


Figura 2.6: Datos Experimentales Vs Simulación de AFD

Anexos C

DIMENSIONES DE LA BASE DE DATOS OBTENIDA EN BASE A SIMULACIONES DE MODELOS DE CANAL TEÓRICOS

Estos son algunas de las dimensiones de la base de datos obtenidos en base a las simulaciones de los modelos teóricos de canal de propagación desarrollados en la teoría, estas dimensiones de la base de datos están totalmente ligadas al entorno donde se quiera adquirir los datos simulados por ejemplo el primer gráfico describe la base de datos obtenida para un entorno de muros incas a una altura de antena de 120cm, figura 3.1, por otro lado la segunda gráfica muestra la base de datos obtenida para un entorno de línea de vista a una altura de 80cm, figura 3.2.

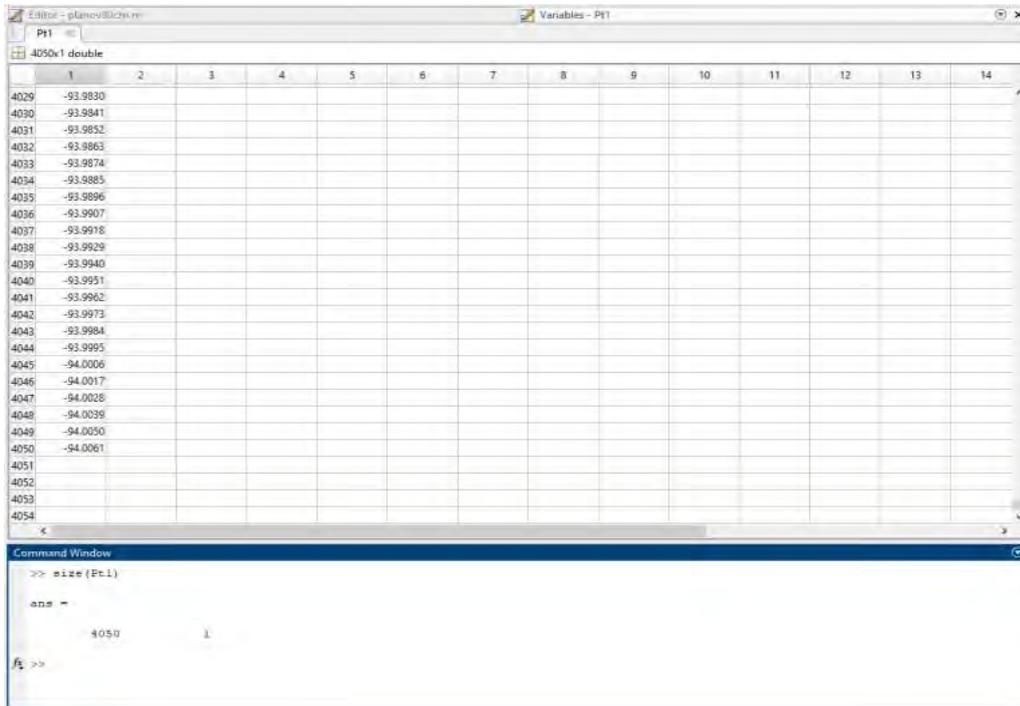


Figura 3.1: Dimensión de la base de datos para entorno de muros incas a 120cm

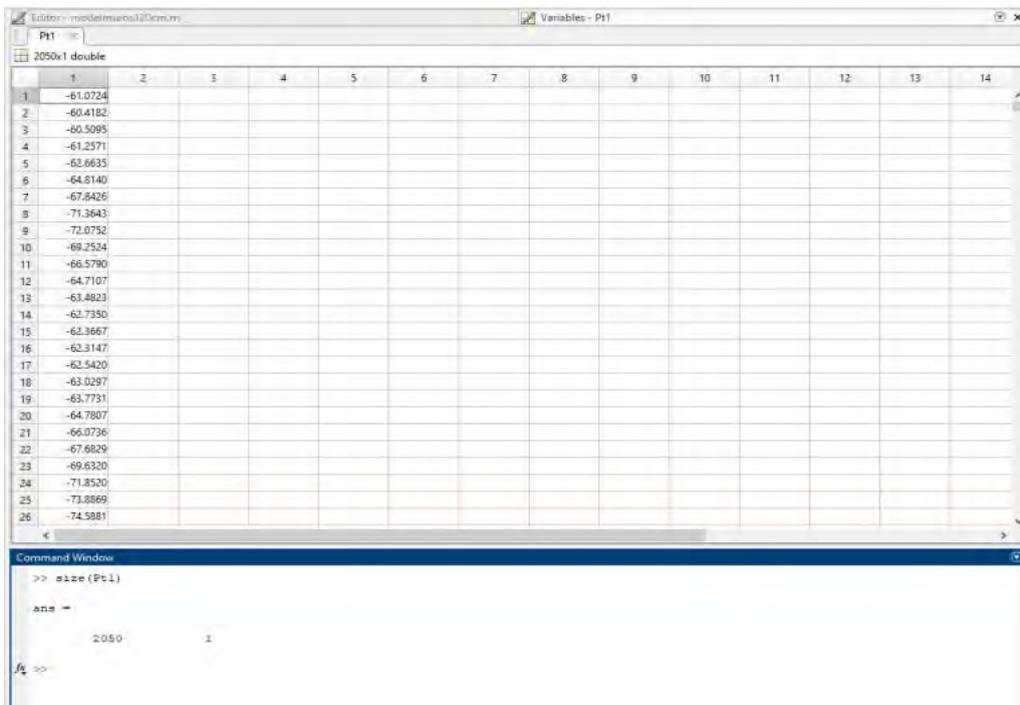


Figura 3.2: Dimensión de la base de datos para entorno de línea de vista a 80cm

Anexos D

FOTOGRAFÍAS DE MEDICIONES REALIZADAS EN LOS PARQUES ARQUEOLÓGICOS



Figura 4.1: Implementación de los transectores dentro del parque arqueológico de Chinchero



Figura 4.2: Explanada Capellanpampa del parque arqueológico de Chinchero

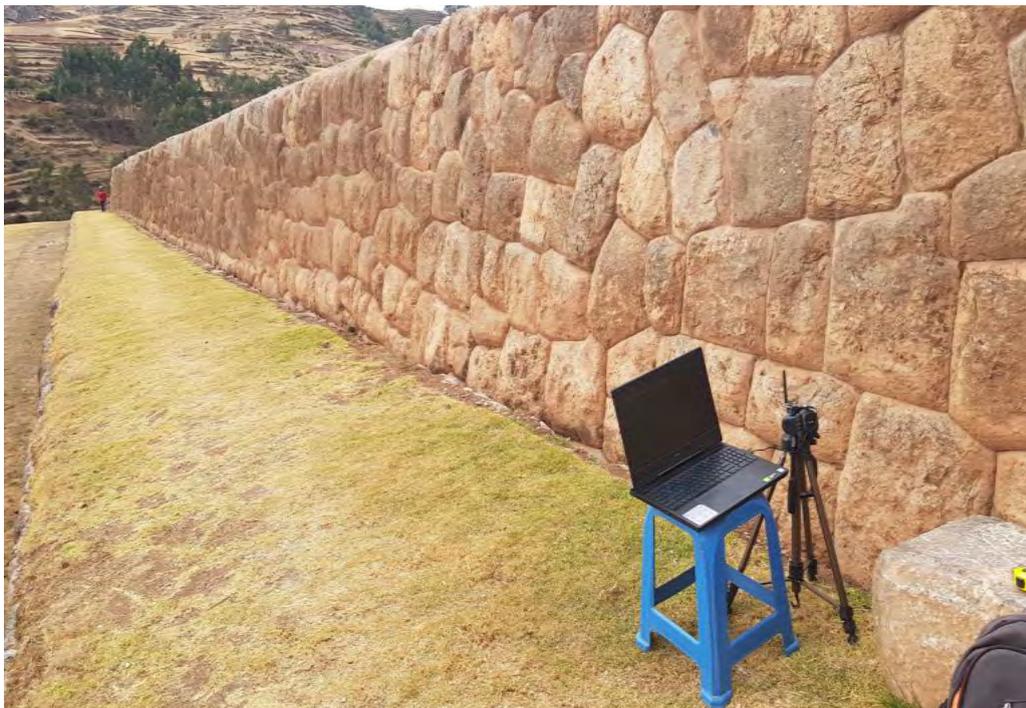


Figura 4.3: Muros Incas del parque arqueológico de Chinchero



Figura 4.4: Andenes de Wataycarcel del parque arqueológico de Chinchero

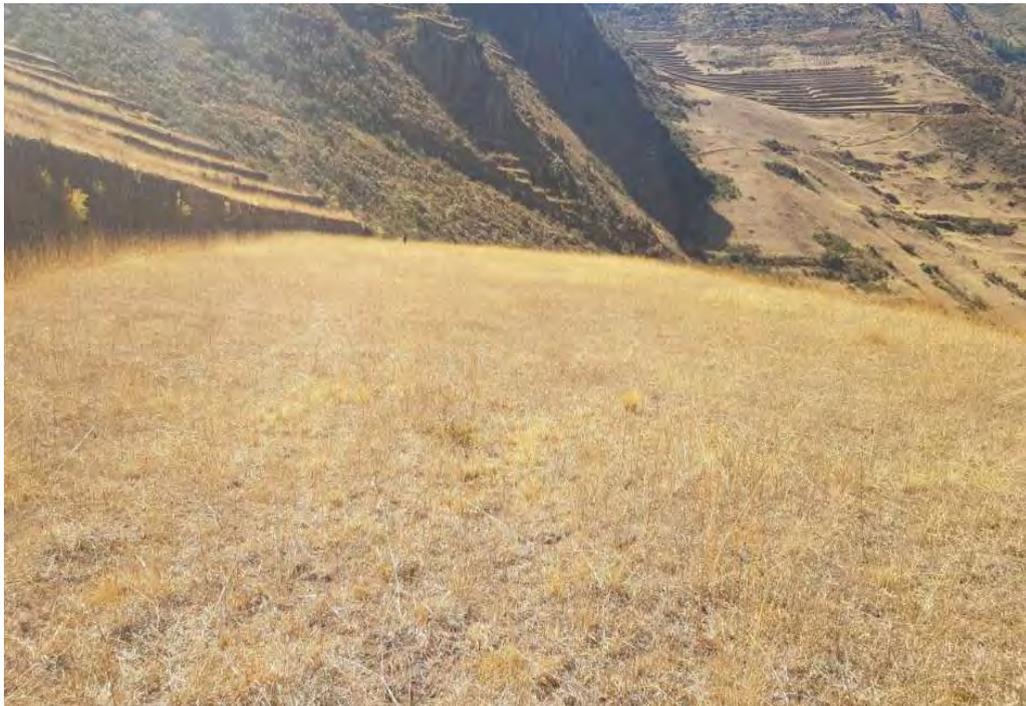


Figura 4.5: Sector Qosqa zona con amplia linea de vista en el parque arqueológico de Pisac



Figura 4.6: Muros Incas en el parque arqueológico de Pisac



Figura 4.7: Andenes en el parque arqueológico de Pisac