



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: MODELAMIENTO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN
DEL CANAL INALÁMBRICO SUBACUÁTICO DE BAJA
PROFUNDIDAD EN LA BANDA DE 2,4 GHZ EMPLEANDO UNA
RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.**

AUTOR: MOYA ROMERO, JUAN SEBASTIÁN

DIRECTOR: ING. VIZCAINO, PATRICIO MSc.

COLABORADOR: ING. GUALSAQUÍ, MARCO MSc.

**SANGOLQUÍ
2016**

Certificado de Tutoría**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA****INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES****CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "MODELAMIENTO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO SUBACUÁTICO DE BAJA PROFUNDIDAD EN LA BANDA DE 2,4 GHz EMPLEANDO UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.", realizado por el señor Juan Sebastián Moya Romero, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor Juan Sebastián Moya Romero, para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 12 de Julio del 2016



Ing. Patricio Vizcaíno E. MSc.
DIRECTOR

Autoría de Responsabilidad**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA****INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Juan Sebastián Moya Romero, con cédula de identidad N° 1715001317 declaro que este trabajo de titulación “MODELAMIENTO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO SUBACUÁTICO DE BAJA PROFUNDIDAD EN LA BANDA DE 2,4 GHz EMPLEANDO UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existente, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 12 de Julio del 2016



Juan Sebastián Moya Romero

1715001317

Autorización**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA****INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES****AUTORIZACIÓN**

Yo, Juan Sebastián Moya Romero, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "MODELAMIENTO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO SUBACUÁTICO DE BAJA PROFUNDIDAD EN LA BANDA DE 2,4 GHZ EMPLEANDO UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad

Sangolquí, 12 de Julio del 2016

Juan Sebastián Moya Romero

1715001317

DEDICATORIA

A mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera, gracias por su infinito amor y por la fuerza que me dieron en los momentos más duros. A mi padre por enseñarme que nada es imposible en esta vida y que todo se consigue en base a esfuerzo y dedicación, a mi madre por enseñarme que en la vida aparte de ser un gran profesional se debe ser también una gran persona y a mi hermana por aconsejarme, apoyarme y sacarme una sonrisa cada vez que lo necesité y cuando no también. Agradezco a Dios por darme salud y vida para poder cumplir esta ansiada meta.

Juan Sebastián Moya Romero

AGRADECIMIENTO

A mis padres Walter y Alexandra por ser el motor para cumplir cada una de mis metas, por su infinita entrega, sacrificio y apoyo en cada paso que he dado. Por sus sabias palabras de aliento para verme convertido en un profesional. Gracias por ser el ejemplo más grande de superación, rectitud y lucha. A mi hermana María Alejandra por ser mi soporte y por sus acertadas palabras cada vez que las he necesitado. Gracias por ser la mejor hermana de este mundo y por ser mi aliada siempre. A mi novia Ely por ayudarme a superar cualquier reto y subirme los ánimos en los momentos más difíciles. Gracias por el amor y el apoyo y los hermosos momentos que me ha dado durante todo este tiempo. A mis amigos Carlos, Paúl Alexander y Jefferson porque ustedes siempre estuvieron a mi lado ya sea compartiendo aulas conmigo o compartiendo momentos de calidad durante esta etapa. A los ingenieros William López y Alejandra Galarza, por transmitirme desinteresadamente sus conocimientos respecto a este tema en la fase inicial de mi proyecto. A mis directores Patricio Vizcaíno y a Marco Gualsaquí por su ayuda y orientación en esta etapa final de mi carrera. Gracias por su paciencia, tiempo y voluntad para ayudarme a cumplir tan anhelada meta.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE TUTORÍA.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN DE PUBLIACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
GLOSARIO	xvii
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación e Importancia.....	2
1.3 Alcance	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO II	7
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	7
2.1. Redes inalámbricas de sensores (WSN)	7
2.1.1. Elementos de una WSN.....	9
2.2. Estándar IEEE 802.15.4.....	9
2.3. Tecnología Zigbee.....	10
2.4. Relación Zigbee/ IEEE 802.15.4.....	11

2.4.1.	Capa Física (PHY)	12
2.4.2.	Capa de Control de Acceso al Medio (MAC)	12
2.4.3.	Capa de Red (NWK)	13
2.4.3.1	Tipos de Nodos	14
2.4.3.2	Topologías de Red	14
2.4.4.	Capa de Aplicación (APL)	15
2.5.	Características físicas del medio de transmisión subacuático	16
2.5.1.	Comunicaciones basadas en ondas electromagnéticas, acústicas y ópticas.....	16
2.5.2.	Comparación entre los distintos métodos de transmisión subacuáticos.....	17
2.6.	Modelos de Propagación.....	18
2.7.	Conductividad Eléctrica.....	20
2.8.	Ajuste de Curvas.....	21
CAPÍTULO III		22
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1.	Hardware.....	22
3.1.1.	IRIS XM2110.....	22
3.1.2.	Circuito de alimentación externo para la mota	25
3.1.3.	Gateway MIB520 (Mote Interface Boards)	25
3.1.4.	Medidor de Conductividad Eléctrica FIELDSCOUT	26
3.2.	Software.....	27
3.2.1.	TinyOs.....	27
3.2.2.	NesC.....	30
3.2.3.	Matlab®.....	31
3.3.	Técnica para la obtención del modelo de pérdidas por propagación.....	32
3.3.1.	Variable RSSI.....	32
3.3.2.	Cálculo del RSSI a partir del valor obtenido de la mota.....	33
CAPÍTULO IV		34

4.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED.....	34
4.1.	Requerimientos del diseño	34
4.2.	Criterios de diseño.....	35
4.3.	Escenarios acuáticos donde se realizarán las pruebas.....	36
4.4.	Despliegue de la red Inalámbrica Punto a Punto	37
4.5.	Implementación de la red Inalámbrica Punto a Punto.....	38
	CAPÍTULO V	40
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
5.1.	Escenario 1: Agua Dulce.....	42
5.1.1.	Ajuste de RSSI versus Profundidad para los dos intervalos.	43
5.1.1.1	Ajuste Cuadrático.....	43
5.1.1.2	Ajuste Logarítmico.	45
5.1.1.3	Ajuste Exponencial.....	47
5.1.2.	Varianza y Desviación Estándar.	50
5.2.	Escenario 2: Agua Salada Tipo 1	51
5.2.1.	Ajuste de RSSI versus Profundidad para los dos intervalos.....	52
5.2.1.1	Ajuste Cuadrático.....	52
5.2.1.2	Ajuste Logarítmico.	54
5.2.1.3	Ajuste Exponencial.....	56
5.2.2.	Varianza y Desviación Estándar	58
5.3.	Escenario 3: Agua Salada Tipo 2	59
5.3.1.	Ajuste de RSSI versus Profundidad para los dos intervalos.....	60
5.3.1.1	Ajuste Cuadrático.....	61
5.3.1.2	Ajuste Logarítmico.	63
5.3.1.3	Ajuste Exponencial.....	65
5.3.2.	Varianza y Desviación Estándar	67
5.4.	Escenario 4: Agua Salada Tipo 3.....	68
5.4.1.	Ajuste de RSSI versus Profundidad para los dos intervalos.....	69
5.4.1.1	Ajuste Cuadrático.....	70
5.4.1.2	Ajuste Logarítmico.	72

5.4.1.3	Ajuste Exponencial.....	74
5.4.2.	Varianza y Desviación Estándar	77
5.5.	Comparación entre los distintos tipos de ajuste de curvas.....	77
5.5.1.	Escenario 1.....	78
5.5.2.	Escenario 2.....	79
5.5.3.	Escenario 3.....	80
5.5.4.	Escenario 4.....	82
5.6.	Modelamiento de los distintos escenarios	83
5.6.1.	Modelamiento del primer intervalo para los cuatro escenarios	83
5.6.2.	Modelamiento del segundo intervalo para los cuatro escenarios	85
5.7.	Comparación entre los distintos escenarios.....	87
5.7.1.	Comparación de valores de RSSI en función de la profundidad	87
5.7.2.	Comparación de las pérdidas de propagación en función de la profundidad para todos los escenarios.....	88
5.7.3.	Comparación de la Varianza según los escenarios y número de muestras	89
5.7.4.	Comparación de la Desviación Estándar según los escenarios y número de muestras.....	90
CAPÍTULO VI	91
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
6.1.	Conclusiones.....	91
6.2.	Recomendaciones.....	93
6.3.	Trabajos Futuros.....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de una WSN	9
Figura 2. Pila de protocolos Zigbee.	11
Figura 3. Interfaz de capa MAC con sus vecinas.....	13
Figura 4. Topologías Zigbee.....	14
Figura 5. Mota IRIS.....	23
Figura 6. Conector de expansión de 51 pines	24
Figura 7. Circuito regulador de tensión	25
Figura 8. Gateway MIB520.....	26
Figura 9. Especificaciones del medidor de CE FIELDSCOUT	26
Figura 10. Elementos de una componente.....	29
Figura 11. Protecciones herméticas de las motas	34
Figura 12. Escenario de pruebas.....	35
Figura 13. Esquema de medidas RSSI	35
Figura 14. Tipos de aguas con sus respectivas conductividades.....	37
Figura 15. Área de estudio, vista satelital.....	38
Figura 16 Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para los distintos escenarios.....	41
Figura 17. Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para el escenario 1.	42
Figura 18. Ajuste cuadrático de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 1.	44
Figura 19. Errores al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 1 : a) Error MAE, b) Error Porcentual	45
Figura 20. Ajuste logarítmico de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 1.	46
Figura 21. Errores al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 1: a) Error MAE, b) Error Porcentual	47
Figura 22. Ajuste exponencial de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario1	48
Figura 23. Errores al realizar el ajuste exponencial para el escenario 1: a) Error MAE, b) Error Porcentual	49
Figura 24. Variación espacial de: a) Varianza versus Profundidad, b) Desviación Estándar versus Profundidad, para el escenario 1	50

Figura 25. Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para el escenario 2.....	51
Figura 26. Ajuste cuadrático de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 2.....	53
Figura 27. Errores al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 2: a) Error MAE, b) Error Porcentual.....	54
Figura 28. Ajuste logarítmico de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 2.....	55
Figura 29. Errores al realizar el ajuste logarítmico ara el escenario 2: a) Error MAE, b) Error Porcentual.....	56
Figura 30. Ajuste exponencial de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 2.....	57
Figura 31. Errores al realizar el ajuste exponencial para el escenario 2: a) Error MAE, b) Error Porcentual.....	58
Figura 32. Variación espacial de: a) Varianza versus Profundidad , b) Desviación Estándar versus Profundidad, para el escenario 2.....	59
Figura 33. Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para el escenario 3.....	60
Figura 34. Ajuste cuadrático de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 3.....	62
Figura 35. Errores al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 3: a) Error MAE, b) Error Porcentual.....	63
Figura 36. Ajuste logarítmico de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 3.....	64
Figura 37. Errores al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 3: a) Error MAE, b) Error Porcentual.....	65
Figura 38. Ajuste exponencial de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 3.....	66
Figura 39. Errores al realizar el ajuste exponencial para el escenario 3: a) Error MAE, b) Error Porcentual.....	67
Figura 40. Variación espacial de: a) Varianza versus Profundidad , b) Desviación Estándar versus Profundidad, para el escenario 3.....	68
Figura 41. Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para el escenario 4.....	69
Figura 42. Ajuste cuadrático de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 4.....	70
Figura 43. Errores al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 4: a) Error MAE, b) Error Porcentual.....	72

Figura 44. Ajuste logarítmico de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 4.....	73
Figura 45. Errores al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 4: a) Error MAE, b) Error Porcentual.....	74
Figura 46. Ajuste exponencial de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 4.....	75
Figura 47. Errores al realizar el ajuste exponencial para el escenario 4: a) Error MAE, b) Error Porcentual.....	76
Figura 48. Variación espacial de: a) Varianza versus Profundidad, b) Desviación Estándar versus Profundidad, para el escenario 4.....	77
Figura 49. Comparación de errores para cada tipo de ajuste: a) Error MAE b) Error porcentual.....	78
Figura 50. Comparación de errores para cada tipo de ajuste: a) Error MAE b) Error porcentual.....	79
Figura 51. Comparación de errores para cada tipo de ajuste: a) Error MAE b) Error porcentual.....	80
Figura 52. Comparación de errores para cada tipo de ajuste: a) Error MAE b) Error porcentual.....	82
Figura 53. Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para los distintos escenarios.....	87
Figura 54. Pérdidas de propagación en función de la profundidad para los distintos escenarios.....	88
Figura 55. Variación espacial de valores de Varianza versus Profundidad para: a) 200 muestras, b) 250 muestras, c) 300 muestras, d) 350 muestras, e) 400 muestras.....	89
Figura 56. Variación espacial de valores de Desviación Estándar versus Profundidad para: a) 200 muestras, b) 250 muestras, c) 300 muestras, d) 350 muestras, e) 400 muestras.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales parámetros de la capa física	12
Tabla 2. Comparación de las distintas comunicaciones inalámbricas subacuáticas.....	17
Tabla 3. Especificaciones básicas de las motas IRIS XM2110	23
Tabla 4. Especificaciones del equipo de CE FIELDSCOUT.....	27
Tabla 5. Escenarios donde se realizarán las pruebas.....	40
Tabla 6. Errores MAE y Porcentual para cada ajuste en el escenario 1	78
Tabla 7. Errores MAE y Porcentual para cada ajuste en el escenario 2	80
Tabla 8. Errores MAE y Porcentual para cada ajuste en el escenario 3	81
Tabla 9. Errores MAE y Porcentual para cada ajuste en el escenario 4	83
Tabla 10. Constantes a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 , c_2 , a_3 , b_3 , c_3 , a_4 , b_4 y c_4 para el primer intervalo de los cuatro escenarios.....	84
Tabla 11. Constantes a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 , c_2 , a_3 , b_3 , c_3 , a_4 , b_4 y c_4 para el segundo intervalo los cuatro escenarios.....	86

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se realizó un modelamiento Semi-empírico de pérdidas de propagación para redes inalámbricas punto a punto utilizando tecnología Zigbee en un ambiente subacuático. Se trabajó con equipos MEMSIC que operan en la banda ISM de 2.4 GHz. Las pruebas se realizaron en cuatro escenarios acuáticos distintos donde se varió los niveles de conductividad del agua. El primer escenario fue realizado en agua dulce con una conductividad de 550 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], seguido por tres escenarios de agua salada con conductividades de 3, 5 y 7 [mS/cm] respectivamente con el fin de analizar el desempeño de la red al variar estos parámetros. En todos los escenarios se utilizó una red punto a punto en la cual un dispositivo actuó de *Gateway* y otro de *End Device*. Se fue variando la distancia vertical de separación entre las motas hasta llegar al umbral máximo de recepción. En todo este rango de distancia se obtuvieron los valores de Indicador de Fuerza de Señal Recibida (*RSSI, Received Signal Strenght Indicator*). Con los datos obtenidos se procedió a graficar las curvas de RSSI versus la Distancia para cada escenario con el objetivo de adquirir una idea previa de la pérdida de trayecto de la red. Las motas fueron programadas con un periodo de muestreo de 250 milisegundos, y para cada profundidad se tomaron datos con 200, 250, 300, 350 y 400 muestras para posteriormente determinar el número de muestras óptimo para realizar las pruebas. Por medio de la herramienta Matlab®, se realizó el ajuste de las curvas obtenidas en cada escenario para luego encontrar las constantes de ajuste. Finalmente con toda la información recopilada se obtuvo un modelo general semi-empírico para el canal de propagación subacuático en enlaces punto a punto para la banda ISM de 2.4 GHz utilizando tecnología Zigbee.

PALABRAS CLAVE:

- Zigbee
- ISM
- RED WSN

ABSTRACT

In this research a semi-empirical model for propagation losses of point to point wireless networks using ZigBee in underwater environments was performed. The research was done with MEMSIC equipment operating in 2.4 GHz ISM band. Tests were conducted in four different scenarios where the water conductivity levels were varied. First stage was done in fresh water with 550 [mS / m] conductivity, followed by three salty scenarios with conductivities of 3, 5 and 7 [mS / m] respectively in order to analyze network performance by varying these parameters. In all scenarios, a peer-to-peer network was used, where a device acted as Coordinator and another acted as End Device. The vertical distance between the devices was varied until reaching the maximum reception threshold; throughout this range Received Signal Strength Indicator (RSSI, Received Signal Strength Indicator) values were obtained. Once RSSI data obtained, we proceeded to plot RSSI versus distance curves for each scenario with the aim of acquiring a previous idea of the path loss of the network. The devices were programmed with a sampling period of 250 milliseconds, for each depth 200, 250, 300, 350 and 400 samples were taken to determine the optimal number of samples for testing. Through Matlab® tool, an adjustment of the obtained curves at each scenario was done to find the constants. Finally with the total collected information, a semi-empirical general propagation model for underwater peer to peer communications at 2.4 GHz ISM band using Zigbee technology was obtained

KEYWORDS:

- Zigbee
- ISM
- WIRELESS SENSOR NETWORK

GLOSARIO

A

- AODV** Ad hoc On Demand Distance Vector, algoritmo de enrutamiento diseñado para redes móviles inalámbricas.
- ACK** Acknowledgement, acuse de recibo.

B

- Bit** Unidad mínima de información, que puede tener solo dos valores (cero o uno).
- Beacon** Señal guía que sincroniza los dispositivos añadidos a una red.
- BPSK** Binary Phase Shift Keying, modulación por desplazamiento de Fase Binaria.
- Buffer** Instrumento digital reservado para el almacenamiento temporal de información digital.

C

- COM** Interfaz de comunicaciones de datos digitales utilizado por computadoras y periféricos.
- CSMA/CA** Acceso múltiple por detección de portadora evitando colisiones.

D

- DSSS** Direct Sequence Spread Spectrum. Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.
- dBm** Unidad de medida utilizada en las telecomunicaciones para expresar la potencia absoluta mediante una relación logarítmica en base a 1mW.

E

Estación Base Instalación fija de radio para la comunicación bidireccional.

EM Ondas Electromagnéticas. Se conoce como onda electromagnética, a la difusión de la radiación de este tipo por medio del aire.

G

Gateway Puerta de enlace. Dispositivo dedicado a intercomunicar sistemas con diferentes protocolos de comunicación.

I

ISM Bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética.

Interfaz Zona de comunicación o acción de un sistema sobre otro.

IEEE Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos. Es una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización, entre otras cosas.

M

Mesh Término que refiere a una topología inteligente de red móvil.

N

NesC Lenguaje de programación basado en C, orientado a sistemas embebidos que incorporan el manejo de red.

R

RF Radio Frecuencia.

Router Enrutador de información a través de una red.

RSSI Received Signal Strenght Indicator

T

Topología Forma en la que está diseñada una red, sea en el plano físico o lógico.

TinyOS Sistema operativo libre y de código abierto, basado en un modelo de programación característico de los sistemas embebidos, diseñado para redes de sensores inalámbricos.

U

UART Universal Asynchronous Receiver Transmitter. Dispositivo encargado del control de los úertos y dispositivos serie.

W

WSN Wireless Sensor Network. Redes de Sensores Inalámbricos.

Z

Zigbee Estándar de comunicaciones inalámbricas de bajo costo.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El uso de la tecnología inalámbrica se ha convertido en un tema de continua investigación respecto a la transmisión de datos y a las distancias de cobertura, por lo cual ha ido adquiriendo mayor interés en lugares donde no es posible la instalación de redes alámbricas. Lo fundamental en este tipo de tecnología es el hecho de dejar en el pasado los cables brindando mayor libertad de movimiento al usuario sin necesidad de dejar de establecer una conexión, a más de permitir la conexión de gran cantidad de equipos dispositivos móviles. Es por ello que en la actualidad globalmente existe un predominio de infraestructuras de telecomunicaciones de medios de transmisión no guiados. (Alliance, 2004)

A medida que transcurren los años, la tecnología inalámbrica avanza abismalmente. Se siguen mejorando los protocolos con el objetivo de obtener mejoras en alcance, tasas de transmisión, optimización de recursos, etc. Entre las redes inalámbricas existentes en la actualidad se encuentra la tecnología Zigbee, la cual fue creada con el objetivo de cubrir la necesidad del mercado de un sistema de comunicaciones de bajo costo para el envío de pequeños paquetes de información, el cual tenga como característica el bajo consumo energético y que brinde seguridad y fiabilidad. Zigbee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes WPAN y opera en las bandas libres de 868MHz, 915MHz y 2.4GHz (Jarquín, 2008).

Para realizar un diseño de una red inalámbrica es de suma importancia tener en cuenta aspectos como las pérdidas de potencia que sufrirán las ondas de radio frecuencia al comunicarse desde el emisor hasta el receptor. Al conocer esto se tendrá una idea clara de la cobertura que tendrá dicha red. Las pérdidas producidas en la comunicación dependerán del medio por el cual se establezca la comunicación. Los modelos de propagación sirven para predecir las pérdidas de propagación en decibeles de un ambiente. Los modelos de predicción se clasifican en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos y semi-empíricos que es una combinación de ambos (García, Rodríguez, & Castillo, 2002).

En (Jiang & Georgakopoulos, 2011), se realiza un estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en agua dulce para frecuencias entre 23KHz y 1GHz. Concluyeron que la pérdida de propagación incrementa lentamente para frecuencias inferiores a 1MHz, mientras que se mantiene constante entre 1MHz y 100MHz, y que luego incrementa abruptamente para frecuencias superiores. En (Sendra, Lloret, & Ardid, 2012), se realiza un estudio del comportamiento de señales electromagnéticas en la banda ISM de 2,4GHz en ambientes subacuáticos, utilizando dispositivos compatibles con el estándar IEEE 802.11. Se realizaron mediciones con diferentes modulaciones y a diferentes frecuencias para las diferentes distancias entre sensores. Observaron que su sistema de comunicación bajo el agua tenía un comportamiento óptimo a 16 cm, al trabajar con las modulaciones BPSK y QPSK. Estas modulaciones también tuvieron un buen desempeño en las distancias de 17 cm. En (Anguita, Brizzolara, & Parodi, 2009) se descartó el método de RF para la comunicación bajo el agua, ya que esta se atenúa fuertemente. Así que tomaron como no válida la frecuencia de 2,4 GHz.

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

A lo largo de la historia, los mares, ríos y distintos ecosistemas acuáticos han tenido una importancia muy marcada para el desarrollo de la vida humana. Las tres cuartas

partes de la superficie terrestre están cubiertas de agua. En la antigüedad los pueblos buscaban instalar sus comunidades alrededor de ríos o de lugares en donde se pueda obtener agua para el consumo de sus habitantes. El agua es el fundamento de la vida, es un recurso crucial para la humanidad y para el resto de los seres vivos. Actualmente gracias a estos ecosistemas acuáticos se realizan un sinnúmero de actividades económicas, deportivas, investigativas, etc.

Dado el creciente avance de las redes inalámbricas, surge la necesidad de desarrollar modelos y métodos que permitan una mejor planificación y dimensionamiento de dichas redes, que a su vez permitan incrementar el desempeño en términos de velocidad de transmisión e interacción con otras tecnologías inalámbricas de telecomunicaciones. Para realizar el diseño de un enlace, se deben tomar en cuenta varios parámetros tales como la distancia entre las antenas transmisoras y receptoras, ganancia de la antena de transmisión, potencia de transmisión, potencia de recepción, distintos tipos de pérdidas, coeficientes del medio, etc (Bustamante, 2007).

Un problema de las comunicaciones inalámbricas, es la distancia de cobertura de la red debido a las pérdidas de potencia producidas en el canal. Existe escasa documentación acerca de comunicaciones subacuáticas en alta frecuencia debido a que la mayoría de los trabajos están diseñados para bajas frecuencias ya que así buscan obtener grandes distancias de comunicación, evitando las pérdidas de potencia que se generan en las altas frecuencias. Se encuentran algunos modelos de propagación realizados para diversas redes inalámbricas, sin embargo no se han encontrado estudios sobre el modelamiento de pérdidas de propagación del canal inalámbrico subacuático usando una red de sensores inalámbricos basados en Zigbee que operen en la banda de 2.4 GHz . Por otra parte, no se tiene claro el desempeño de Zigbee al someterlo a ambientes subacuáticos con diferentes conductividades, por lo cual se realizarán pruebas con distintos valores de conductividad para analizar cuál es el efecto producido en la comunicación al variar

dichos niveles. En el país no se hallan investigaciones en relación a este tema, por lo cual este proyecto servirá como una base para futuras investigaciones.

El proyecto nace con el fin de obtener un modelo de pérdidas de propagación del canal subacuático usando una red de sensores inalámbricos basados en el estándar 802.15.4 cuando se sumergen en distintos tipos de agua con diferentes conductividades. Se tendrá una idea clara de las pérdidas de la red al someterla a estos ambientes, y a su vez para obtener un resultado sobre la cobertura que nos brinda la tecnología Zigbee en estos escenarios.

1.3 ALCANCE

En el transcurso de la investigación, se realizará una revisión de la literatura científica existente sobre las comunicaciones inalámbricas subacuáticas por Radio Frecuencia. A partir de la literatura consultada se revisará el comportamiento de esta tecnología al someterla a este ambiente. En el marco teórico se detallará el funcionamiento del estándar IEEE 802.15.4 y se presentará un estudio sobre las distintas comunicaciones inalámbricas subacuáticas basadas en ondas electromagnéticas.

Este proyecto busca determinar un modelo Semi-Empírico de pérdidas propagación para redes inalámbricas punto a punto utilizando la tecnología Zigbee en un ambiente subacuático. Para la implementación, en su fase inicial se utilizará un tanque plástico de 0,80 mts de altura por 0,60 mts de diámetro el cual será llenado con agua dulce. En su segunda fase se agregará distintas cantidades cloruro de sodio para obtener tres diferentes valores de conductividad y ver cómo afecta esto en la comunicación. En estos escenarios, habrá una estructura plástica que servirá de soporte para fijar las motas que se encontrarán inmersas en el agua y que a su vez permitirá medir las diferentes profundidades a las que estas se encuentren.

Cada mota que se sumergirá en el tanque, irá dentro de una funda Ziploc de doble protección hermética; y a su vez la mota y la funda Ziploc irán dentro de un envase plástico completamente hermético que anulará cualquier posibilidad de que se introduzca agua al dispositivo.

Se realizarán pruebas de conectividad entre el Gateway y el nodo, donde se irá variando la distancia de separación entre las motas, posteriormente se determinará el alcance vertical máximo de la red. Luego, se establecerá una expresión que represente el Modelo Semi-Empírico de Pérdidas Propagación de la tecnología Zigbee sometida a un ambiente subacuático.

Finalmente se presentarán conclusiones y recomendaciones con el fin de generar propuestas de mejoramiento para investigaciones futuras, deseando que este proyecto de investigación sirva como base para posteriores trabajos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar un modelo Semi-Empírico de pérdidas de potencia por propagación del canal inalámbrico subacuático de baja profundidad en la banda de 2,4 GHz empleando una red punto a punto de sensores inalámbricos Zigbee.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el Estado del Arte sobre las comunicaciones inalámbricas subacuáticas basadas en redes de sensores inalámbricos, por medio de investigaciones y trabajos relacionados.

- Implementar una red inalámbrica subacuática punto a punto basada en el estándar IEEE 802.15.4 con el fin de determinar la atenuación radioeléctrica a diferentes niveles de profundidad en agua dulce y en tres tipos de agua salada.
- Conformar una base de datos con los valores obtenidos del parámetro RSSI a diferentes profundidades en los distintos escenarios subacuáticos donde se realizarán las pruebas.
- Realizar las mediciones variando el número de muestras y los niveles de conductividad del agua para determinar los efectos producidos al realizar estas variaciones.
- Analizar los valores adquiridos en las pruebas para luego definir un modelo propio de esta red inalámbrica al ser sometida a cada uno de los diferentes ambientes.

CAPITULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES (WSN)

A lo largo de la historia, los sensores han constituido parte fundamental para el desarrollo de la sociedad. Existen varios tipos de sensores tales como sensores de corriente, de efecto Hall, de humedad, posición, presión, fuerza, temperatura, voltaje, entre muchos otros. Sin embargo la mayoría de estos sensores no poseen la función de procesamiento y análisis de datos por sí mismos, sino que simplemente actúan como dispositivos para la detección de variaciones en magnitudes físicas o químicas, para luego transformar estos cambios en variables eléctricas.

Actualmente el avance de la tecnología ha permitido evolucionar ampliamente las actividades de monitorización, seguimiento y control. Han surgido nuevas necesidades donde se debe recolectar inalámbricamente grandes volúmenes de datos provenientes de diferentes entornos. Es ahí donde surge una nueva generación en redes de sensores, llamados Wireless Sensor Network (WSN). Estas redes de sensores inalámbricos, se basan en dispositivos de bajo coste y consumo que pueden estar compuestos por un gran número de dispositivos autónomos distribuidos físicamente, llamados nodos sensores, los mismos que serán ubicados alrededor del escenario que se desee monitorizar. Estos nodos tienen la capacidad de almacenar, reorganizarse y comunicar de forma inalámbrica en la red los datos adquiridos.

Por otro lado, en lugar de enviar los datos en bruto a los nodos responsables de la fusión, los nodos sensores utilizan sus capacidades de procesamiento para llevar a cabo localmente cálculos simples y transmitir solamente los datos requeridos y parcialmente procesados. Por lo tanto, estas propiedades de las redes inalámbricas de sensores presentan desafíos únicos para el desarrollo de protocolos de comunicación (Tapia, 2009).

Las WSN pueden ser utilizadas en un sinnúmero de aplicaciones dadas todas las prestaciones que presentan y permiten monitorizar áreas que son muy peligrosas para los humanos. Se pueden encontrar estas redes en aplicaciones de transporte, militares, ambientales, domésticas, comerciales, etc. Entre la gran variedad de aplicaciones que utilizan WSN se encuentran la seguridad nacional, la vigilancia de los recursos espaciales en busca de amenazas potenciales y artificiales en el espacio, vigilancia del medio ambiente, la guerra urbana, análisis y predicción de tiempo y clima, el control de la aceleración sísmica, tensión, temperatura, velocidad del viento, entre muchas otras (Akyildiz, 2002).

Entre las principales ventajas de las WSN tenemos:

- Integración con otras tecnologías.
- Menor uso de recurso.
- Bajo consumo energético.
- Bajo costo y facilidad de instalación.
- Tiempo de respuesta.
- Seguridad.
- Topología dinámica de la red.

2.1.1 Elementos de una WSN

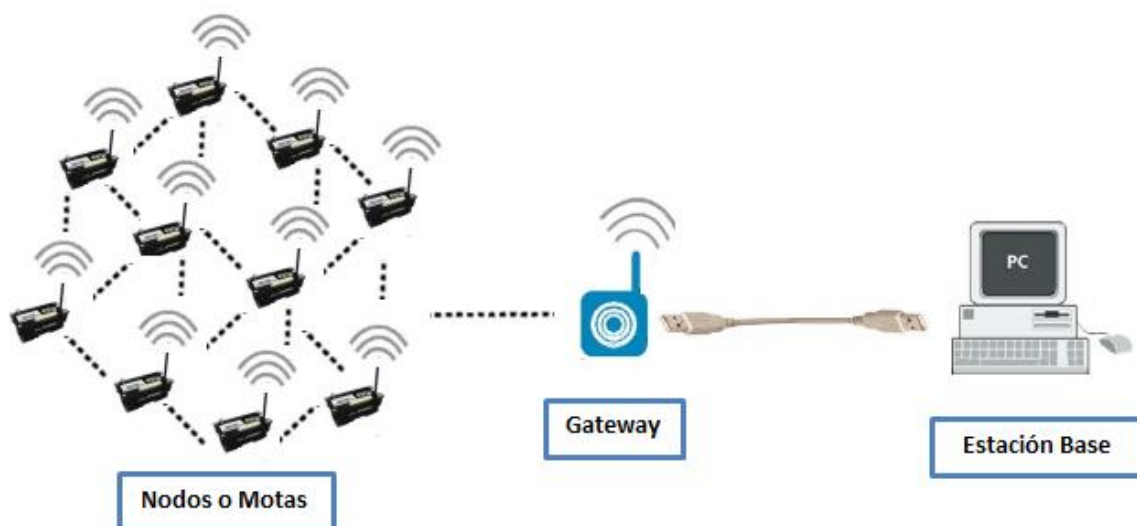


Figura 1: Elementos de una WSN

Fuente: (Albarracín, 2012)

- **Sensores:** Son los encargados de tomar la información del medio y convertirla en señales eléctricas.
- **Nodos o Motas:** Son aquellos que toman los datos del sensor para luego enviarla a la estación base.
- **Gateway:** Son los elementos para la interconexión entre la red de sensores y una red de datos (TCP/IP).
- **Estación Base:** Es el recolector de datos basado en un ordenador común o sistema embebido.

2.2 Estándar IEEE 802.15.4

Este estándar define los niveles físico (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) de las redes inalámbricas personales WPAN (Wireless personal área network). Sus principales características son el bajo consumo de energía, bajos costos y bajas tasas de transmisión.

El estándar IEEE 802.15.4 opera en la banda libre ISM de 2,4 GHz a nivel mundial y a su vez en Europa opera en la banda de 868 MHz y 915 MHz para Estados Unidos. Permite implementar redes con topología estrella o punto a punto. Maneja el direccionamiento a nivel de capa MAC y para acceder al medio de transmisión utiliza Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA) (Acosta & Ortega, 2006).

Este estándar fue promovido con el objetivo principal de la comunicación e interoperabilidad entre dispositivos fabricados por diferentes compañías que requieran de poco consumo energético. Además cuenta con las siguientes tasas de transmisión:

- 20 kbps: Para la banda de 868MHz.
- 40 kbps: Para la banda de 915MHz.
- 250 kbps: Para la banda de 2,4 GHz.

2.3 Tecnología Zigbee

El estándar ZigBee es un conjunto de protocolos utilizado para la radiodifusión digital de bajo consumo energético, el cual está basado en el estándar IEEE 802.15.4 y es utilizado para el armado de redes inalámbricas de corta distancia y baja velocidad de datos (Dignani & Tinetti, 2011).

Fue desarrollado por Zigbee Alliance, el cual es un consorcio sin fines de lucro compuesto por más de setenta compañías, las cuales buscan diseñar redes ad hoc de auto organización para radios digitales y cuyo enfoque fue el desarrollo de dispositivos para distintas aplicaciones que provean al usuario soluciones inalámbricas rentables, de fácil uso, que garanticen seguridad y confiabilidad (Acosta & Ortega, 2006).

2.4 Relación Zigbee/ IEEE 802.15.4

La relación existente entre ambos está basada en la arquitectura definida por capas del modelo OSI. El estándar IEEE 802.15.4 se encarga de las capas bajas del protocolo, es decir de La Capa Física (PHY) y de la Capa de Control de Acceso al Medio (MAC), mientras que las capas superiores, es decir de la capa de Red (NWK) y la Capa de Aplicación (APL) han sido establecidas por Zigbee Alliance (Che *et al.*, 2010). En la Figura 2 se puede observar las capas de la tecnología Zigbee y su relación con el estándar IEE 802.15.4.

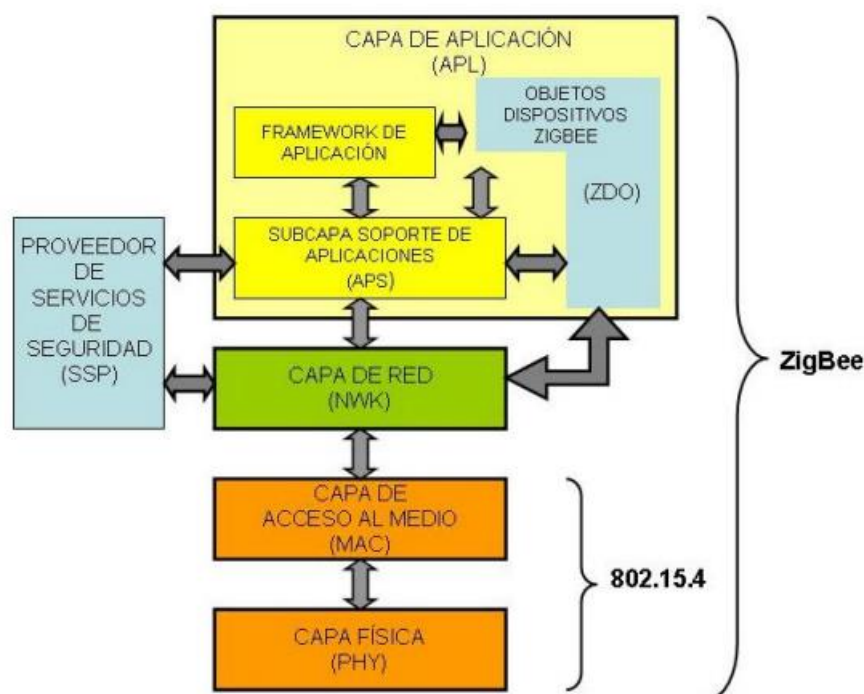


Figura 2: Stack de protocolos Zigbee

Fuente: (Reims, Vizcaíno, & Lara, 2015).

2.4.1 Capa Física (PHY)

El estándar IEEE 802.15.4 es el encargado del manejo de esta capa. La PHY define las funciones y la relación con la capa MAC y además es la encargada de aspectos

como la potencia del transmisor, la sensibilidad del receptor, selección de canales, control de tasas de datos y modulación de cada banda.

En el estándar IEEE 802.15.4-2006, se hace referencia a la existencia de cuatro tipos de capas físicas las cuales pueden ser seleccionadas por el usuario dependiendo de la ubicación geográfica de la red. Estas cuatro capas se diferencian principalmente por la frecuencia y modulación con la que trabajan como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1

Principales parámetros de la capa física

REGIÓN	BANDAS DE FRECUENCIA	# DE CANALES	ESPACIAMIENTO ENTRE CANALES	MODULACIÓN	VEL. DE TX
EUROPA	868-868.6 MHz	1	-	BPSK	20 Kbps
AMERICA DEL NORTE	915-928 MHz	10	2 MHz	O-QPSK, BPSK	40 Kbps
RESTO DE PAISES	2.4- 2.485 GHz	16	5 MHz	O-QPSK	250 Kbps

Fuente: (Kelley, Manoj, & Jamshidi, 2009).

2.4.2 Capa de Control de Acceso al Medio (MAC)

Esta capa provee una interfaz entre la capa física y la próxima capa sobre la de MAC que es la capa de red. El protocolo IEEE802.15.4 se compone de las especificaciones para PHY y MAC por lo tanto, la capa que sigue puede ser cualquiera de acuerdo al protocolo usado (Dignani & Tinetti, 2011).

La capa MAC presenta las siguientes características:

- Acuse de recibo (ACK)
- Mecanismos de acceso al canal
- Validación de trama
- Control de guías (Beacon)
- Sondeo de canal (Scan) MAC brinda dos tipos de servicios hacia capas superiores, por medio de dos puntos de Acceso a Servicios (SAPs).

1. Un SAP de datos MCPS-SAP.

2. Un SAP de control o manejo (NLME-SAP, del inglés Network Layer Management Entity-Service Access Point) (Jiang & Georgakopoulos, 2011).

La Figura 3 permite apreciar cómo es la comunicación entre capas.

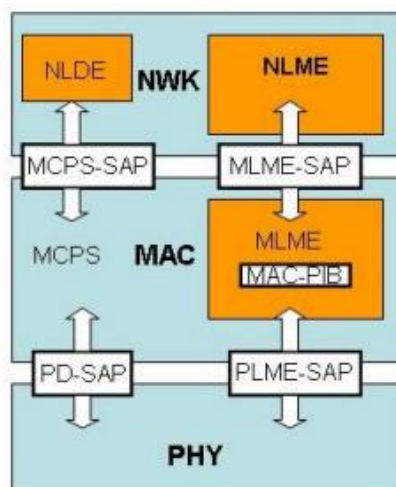


Figura 3: Interfaz de capa MAC con sus vecinas

Fuente: (Jiang & Georgakopoulos, 2011)

2.4.3 Capa de Red (NWK)

Esta capa es construida sobre las características de la capa MAC, con el fin de permitir una mayor cobertura de la red para así lograr que nuevas redes puedan ser agregadas para consolidarse o dividirse según la aplicación requerida. La capa de red brinda a Zigbee funciones para el armado y manejo de redes y una interfaz simple para relacionarla con las aplicaciones de los usuarios.

2.4.3.1 Tipos de Nodos

Según la función que cumpla cada nodo en la red se puede clasificar en (Albarracín, 2012):

- **Coordinador Zigbee (Zigbee coordinator, ZC):** Es el dispositivo más completo, encargado de administrar e iniciar la formación de la red inalámbrica, escoge un canal libre y lo gestiona, selecciona un identificador de red (PAN ID) y posteriormente puede actuar como router. Es un dispositivo de tipo (FFD, Full Function Device). El ZC es el encargado de crear la red, controla el acceso de los nuevos nodos, y generalmente hace las funciones de Gateway.
- **Router ZigBee (RZ):** Mantiene la lista de nodos asociados y tiene la capacidad de enrutar mensajes en la red. Es el encargado de permitir que otros dispositivos se incorporen a dicha red, mediante los parámetros de configuración que posee.
- **Dispositivo Final – ZigBee End Device (ZED):** Tiene la capacidad de censado y envío de mensajes al router, pero no puede formar parte de la ruta de otros nodos de la red. La mayor parte del tiempo se encuentra en modo *sleep*, para reducir consumo de energía y despierta cuando es necesario.

2.4.3.2 Topologías de Red

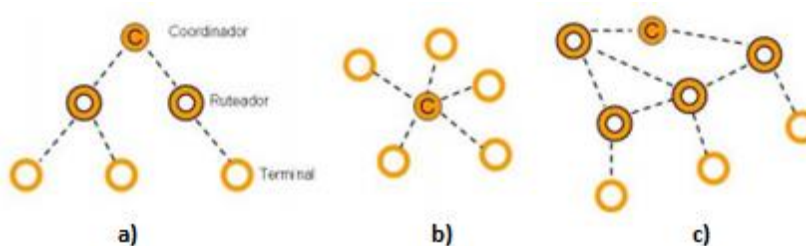


Figura 4: Topologías Zigbee

Fuente: (Dignani & Tinetti, 2011)

- a) Topología Árbol:** En esta topología los nodos ruteadores pueden tener nodos hijos. Existe comunicación directa solamente a través de la relación padre-hijo, es decir que los ruteadores y los dispositivos finales se asocian con los nodos presentes en la red. Existe un ruteo jerárquico con un camino posible entre dos nodos (Dignani & Tinetti, 2011).
- b) Topología Estrella:** Es la topología más sencilla y consiste en un nodo coordinador con uno o varios hijos. El rango de la red se limita al rango de transmisión del coordinador. Es de fácil configuración. El nodo coordinador es el único encargado del ruteo de paquetes (Dignani & Tinetti, 2011).
- c) Topología Malla:** Es una extensión de la topología punto a punto donde los nodos ruteadores pueden tener nodos hijos. Existe comunicación directa entre dos nodos FFD siempre que se encuentren dentro del rango de cobertura. Los nodos terminales solo pueden gestionar datos con los respectivos nodos padres.

2.4.4 Capa de Aplicación (APL)

Se compone de la subcapa APS (Application Support) y la ZDO (ZigBee Device Object). Sus cometidos son mantener las Tablas para los enlaces (binding) que consiste en adaptar dos dispositivos entre sí, basados en los servicios y necesidades que presenten. Cada subcapa se puede definir con:

- APS: Busca descubrir a otros dispositivos que están operando en su mismo espacio operativo.
- ZDO: Define el rol de un dispositivo dentro de la red.

En la capa de aplicación se inician o responden pedidos de enlace y se establece una relación segura entre dispositivos seleccionando un método de seguridad como una clave (Dignani & Tinetti, 2011).

2.5 Características físicas del medio de transmisión subacuático

Los sistemas de comunicaciones subacuáticos pueden utilizar principalmente tres métodos de transmisión de información. Estos pueden ser basados en ondas acústicas, ondas electromagnéticas y señales ópticas.

2.5.1 Comunicaciones basadas en ondas electromagnéticas, acústicas y ópticas

En la actualidad la mayoría de las comunicaciones bajo el agua se basan en señales acústicas y constituyen la mejor solución de ingeniería en la mayoría de las aplicaciones a larga distancia (Che, Wells, Dickers, Kear, & Gong, 2010), pero su rendimiento es afectado en aguas poco profundas debido a la propagación por múltiples trayectos, además poseen un bajo ancho de banda (Kelley, Manoj, & Jamshidi, 2009). Por otro lado, la latencia del canal provocado por la velocidad de

propagación bajo el agua es otro problema en este tipo de comunicaciones subacuáticas.

Los sistemas ópticos basados en láser, presentan sustancialmente mayor velocidad de propagación que los sistemas de comunicación acústicos, pero la fuerte retrodispersión (*backscattering*) provocado por partículas suspendidas en el agua restringe las aplicaciones de los sistemas ópticos a distancias muy cortas (Jiang & Georgakopoulos, 2011). Las ondas ópticas únicamente presentan un buen rendimiento en aguas muy claras y además necesitan de una estricta alineación de sus nodos. Este requisito de línea de vista al usar comunicaciones ópticas genera una limitación significativa de su aplicación bajo el agua (Che, Wells, Dickers, Kear, & Gong, 2010).

Los sistemas basados en ondas electromagnéticas (EM) son otra posible solución para la comunicación bajo el agua. La velocidad de las ondas EM en el agua es más de cuatro órdenes superior que las ondas acústicas, con lo cual la latencia del canal se reduce ampliamente. Por otra parte las ondas EM tienen menos sensibilidad a efectos de reflexión y refracción en aguas poco profundas en comparación a las ondas acústicas. Otra ventaja frente a las comunicaciones ópticas, es que las comunicaciones por ondas EM son poco afectadas por las partículas suspendidas en el agua (Jiang & Georgakopoulos, 2011). La principal limitación de las comunicaciones subacuáticas basadas en ondas EM es la elevada atenuación producida en altas frecuencias por la conductividad del agua. Las ondas EM sufren una atenuación del orden del $\left[\frac{dB}{m}\right]$ para una frecuencia de 30 kHz, mientras que una onda acústica a esa misma frecuencia presenta una atenuación del orden del $\left[\frac{dB}{Km}\right]$ (Aparicio & Ureña, 2010).

2.5.2 Comparación entre los distintos métodos de transmisión subacuáticos

En la Tabla 2 se muestra una comparación de las tres principales tecnologías de la comunicación subacuática en términos de beneficios, limitaciones y requisitos.

Tabla 2

Comparación de las distintas comunicaciones inalámbricas subacuáticas

MÉTODO DE PROPAGACIÓN	BENEFICIOS	LIMITACIONES
ACÚSTICO	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tecnología probada. ➤ Amplios rangos de transmisión: Hasta 20 km. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Afectado por turbidez, ruido ambiental, salinidad, y gradientes de presión. ➤ Experimenta reflexiones y atenuación al transmitirse a través de dos distintos medios. (Aire/Agua) ➤ Bajo rendimiento en agua poco profunda. ➤ Bajo ancho de banda (0 b/s hasta 20kb/s). ➤ Produce impacto en la vida marina.
ÓPTICO	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bajo costo. ➤ Ancho de banda ultra alto: Gigabits por segundo. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Requiere línea de vista. ➤ No cruza los límites de aire/agua fácilmente. ➤ Susceptible a la turbidez, partículas y contaminación marina. ➤ Requiere buena alineación de nodos. ➤ Corto rango de cobertura.
RF	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cruza aire/agua/ suelo marino fácilmente. ➤ Mejor desempeño en aguas poco profundas. ➤ Inmune a ruido acústico. ➤ No se ve afectado por la turbulencia y salinidad. ➤ Ancho de banda alto: Hasta 100 Mb/s en un rango muy cercano. ➤ Puede operar sin línea de vista. ➤ No se ve afectado por sedimentos marinos. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Limitado rango de cobertura subacuática. ➤ Susceptible a interferencia electromagnética (EMI). ➤ Elevada atenuación producida en altas frecuencias por la conductividad del agua.

Fuente: (Che, Wells, Dickers, Kear, & Gong, 2010).

2.6 Modelos de Propagación

Los modelos de propagación son un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos que son utilizados para la representación de las características de radio de un determinado entorno (Neskovic, Neskovic, & Paunovic, 2000). Estos modelos se enfocan en la predicción de las pérdidas de potencia en decibeles de una comunicación en un determinado ambiente, así como en la variación de la potencia en la proximidad espacial de un lugar en particular (Fernández & Cueva, 2006).

Un modelo de propagación permite anticiparnos a los resultados, es decir tener una idea previa respecto a la potencia que se obtendrá en el receptor ya sea fijo o móvil, después de que el emisor haya establecido la comunicación y atravesado un determinado medio. Por otro lado nos permitirá determinar referencias sobre el rendimiento de un sistema de comunicaciones, con lo cual se podría trabajar en el control y mejora del mismo.

Para establecer un modelo de propagación para un determinado ambiente, se toman un gran número de mediciones, las cuales se promedian para luego matemáticamente obtener una relación que defina el comportamiento de la comunicación en cada entorno. Un modelo se considera aceptable o no aceptable en relación a lo bien que puede explicar y predecir comportamientos.

Los modelos de predicción se clasifican en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos y semi-empíricos que es una combinación de ambos.

- **Modelos Empíricos o Estadísticos:** Son basados en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas del fenómeno tomadas sobre el terreno. En este tipo de modelo se tienen en cuenta relaciones estadísticamente significativas entre variables que en rigor sólo son válidas

para el contexto espacio-temporal en el que se calibraron. La precisión de este tipo de modelos no sólo depende de la precisión de las medidas, sino también de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas (Neskovic, Neskovic, & Paunovic, 2000).

- **Modelos Teóricos o Determinísticos:** Para el desarrollo de estos modelos se necesitan enormes bases de datos de características relativas al entorno, las cuales en la práctica son imposibles o extremadamente difíciles de obtener. Los algoritmos usados por estos modelos son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes. Su implementación se restringe a pequeñas áreas, donde si su implementación es correcta, proporcionan gran precisión en su predicción, en relación con los modelos empíricos (Fernández & Cueva, 2006).
- **Modelos Semi-Empíricos:** Son el resultado de la combinación de modelos empíricos y teóricos, es decir son creados en base a datos teóricos y datos obtenidos experimentalmente.

2.7 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica se refiere a la medida de la capacidad que tiene un material o una sustancia para dejar pasar o circular libremente la corriente eléctrica. Esta variable depende de la cantidad de sales disueltas presentes en un líquido y es inversamente proporcional a la resistividad del mismo. Para medios líquidos, la conductividad se encuentra determinada por la cantidad de presencia de sales en la solución, cuya descomposición generará iones positivos y negativos que serán capaces de conducir la energía eléctrica si el líquido es sometido a un campo eléctrico. En el suelo esta se encuentra directamente relacionada con la concentración de sales solubles presentes (Álvarez, 2004). Según los organismos de normalización Europeos se expresa en miliSiemens por metro [mS/m].

Si se utilizan instrumentos convencionales, como por ejemplo, el método amperimétrico, el valor de la conductividad se lo obtiene al aplicar un voltaje entre dos electrodos y medir la resistencia de la solución. Las soluciones que tienen un valor alto de conductividad, provocarán corrientes mayores. Si se desea contener la intensidad de la corriente de una solución que es altamente conductiva, se deberá reducir la superficie de la sonda o aumentar la distancia entre los polos.

Únicamente con el método de 4 anillos se tiene la posibilidad de medir diferentes rangos usando una única sonda. Este método permite obtener lecturas lineales en un vasto rango, sin necesidad de polarización, y sin que se deba realizar limpiezas por las incrustaciones.

Según el tipo de agua, la conductividad varía también, es por ello que en el agua dulce toma un valor típico de 0.01 [S/m], mientras que para el agua salada la conductividad tiene un valor típico de 4 [S/m] (Rhodes, 2007).

2.8 Ajuste de curvas

El ajuste de curvas es utilizado para solucionar un sinnúmero de problemas de investigación, experimentales, de ingeniería y muchos otros que requieren de curvas que describan matemáticamente las relaciones entre las variables de dichos problemas. Se conoce como ajuste de curvas al proceso de obtener las curvas que mejor describan el comportamiento de determinados datos (Proaño, 2010). Otra aplicación es la de obtener una función que en base a algunos puntos de medición obtenidos se pueda estimar otros puntos que no fueron medidos empíricamente. Para la consecución de este objetivo se utilizan, entre otros, interpolación y aproximación por el método de mínimos cuadrados. En los métodos por interpolación la función pasa exactamente por los puntos observados, mientras que para el

método de aproximación se busca que una función pase lo más cerca posible por los puntos observados.

Se llama desviación a la diferencia entre los datos originales y las curvas aproximadas. La minimización del sumatorio de las desviaciones cuadradas es el encuadre que se ha usado con el fin de obtener las funciones o las curvas que mejor se ajustan a determinados datos (Proaño, 2010).

En la presente investigación se utilizarán los ajustes cuadrático, logarítmico y exponencial con el fin de determinar cuál es el ajuste óptimo para cada escenario. Una vez realizados estos ajustes, se concluirá cuál es la función que mejor describe el comportamiento de las curvas obtenidas en las pruebas.

CAPITULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Hardware

Para la realización del proyecto se utilizaron equipos de la marca MEMSIC (Crossbow), dada la disponibilidad de estos WSN en el laboratorio de Sistema Avanzados de Telecomunicaciones Radio Frecuencia de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. MEMSIC nos permite contar con docenas, cientos o incluso miles de motas, alimentadas por baterías, dispersas en el área de trabajo con las cuales se podrá recolectar la información de sensores, tales como: temperatura, humedad, iluminación, vibración, entre muchas otras.

3.1.1 IRIS XM2110

Los nodos IRIS XM2110 son la última generación de motas producidas por Crossbow. Este modelo cuenta con 16 canales de comunicaciones (2405 a 2485 MHz). Está compuesto por un microprocesador Atmega1281, el cual brinda un rango de radio tres veces superior y el doble de memoria de programación en comparación a modelos anteriores de motas MICAz (Gordón, Vásquez, Gordillo, & Lara, 2012). En la Figura 5 se muestra la mota y en la Tabla 3 se detallarán las principales características de estas motas.



Figura 5: Mota IRIS.

Fuente: (MEMSIC, 2012).

Tabla 3

Especificaciones básicas de las motas IRIS XM2110

IRIS XM2110	
Rendimiento del procesador	
Microprocesador	ATMega1281
Memoria Programable Flash	128 Kbytes
RAM	8 Kbytes
Configuración EEPROM	4 Kbytes
Comunicación Serial	UART
Conversor Análogo Digital	10 bit ADC
Otras Interfaces	I/O Digital, I2C, SPI
Transceiver RF	
Banda de Frecuencia	2405 MHz hasta 2485 MHz
Velocidad de Tx de datos	250 kbps
Potencia de Tx RF	+3dBm (typ)
Sensibilidad de recepción	-101 dBm (typ)
Ganancia de Antena	2 dBi
Electromecánico	
Baterías	2 baterías AA
Alimentación Externa	2.7 V- 3.3 V
Tamaño (mm)	58x32x7 (Excluyendo Baterías)
Peso (gramos)	12 (Excluyendo Baterías)
Conector de Expansión	51 pines

Fuente: (MEMSIC, 2012)

La mota IRIS XM2110 tiene un conector de expansión de 51 pines (Figura 6), el cual permite manejar entradas analógicas, entradas y salidas digitales, I2C, SPI e interfaces UART. Gracias a este conector de 51 pines podemos trabajar con un sinnúmero de periféricos externos.

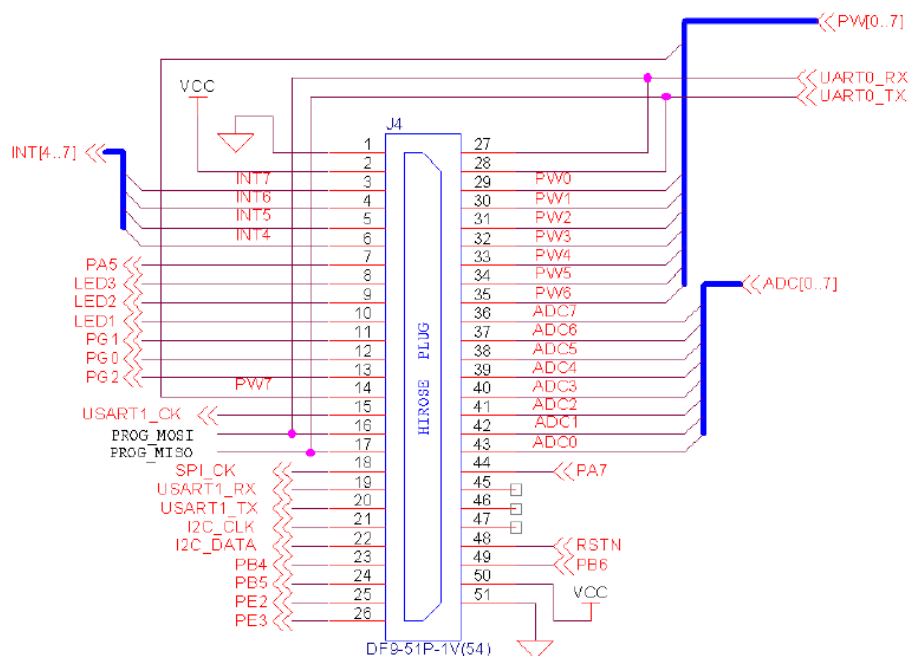


Figura 6: Conector de expansión de 51 pines.

Fuente: (MEMSIC, 2012).

➤ Antenas

Las motas IRIS incorporan una antena modelo XM2110, la cual tiene una longitud de 1.2 pulgadas. Esta antena es de un cuarto de onda de tipo monopolo (omnidireccional) y su ganancia depende del plano de tierra. (Gordón, Vásquez, Gordillo, & Lara, 2012).

3.1.2 Circuito de alimentación externo para la mota

Dado que se realizarán un gran número pruebas, es necesario garantizar que la mota que se encuentre bajo el agua esté completamente cargada la batería para evitar posibles errores en las mediciones debido a la descarga de las baterías. Para alimentar al nodo, se adaptó una fuente de mayor capacidad. Se utilizó una batería seca recargable de 6V de 3700 mA/h, la cual después de pasar por un circuito regulador de tensión compuesto por un transistor LM317 alimentará con 3 Voltios a la mota. El LM317 es un regulador de tensión lineal ajustable capaz de suministrar a su salida en condiciones normales un rango que va desde 1,2 hasta 37 Voltios y una intensidad de 1,5 A.

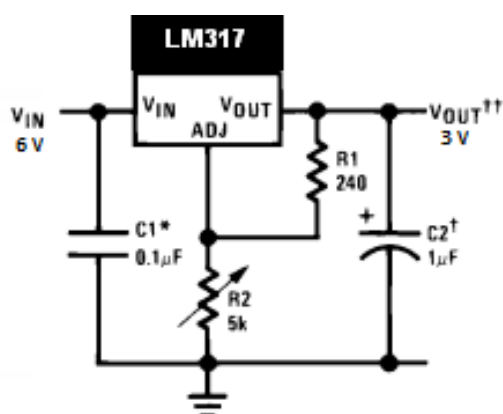


Figura 7: Circuito regulador de tensión.

3.1.3 Gateway MIB520 (Mote Interface Boards)

Es el dispositivo encargado de la interconexión entre la red de sensores vía interfaz de radio y el servidor de datos mediante comunicación USB. Por medio del MIB520 se pueden programar y cargar los distintos programas en las motas. El MIB520 ofrece dos puertos separados: el primero dedicado a la programación de la mota y el segundo destinado a la comunicación de datos a través de USB (MEMSIC, 2012). La

alimentación por USB elimina la necesidad de una fuente de alimentación externa al dispositivo que está conectado al Gateway.



Figura 8: Gateway MIB520.

Fuente: (MEMSIC, 2012).

3.1.4 Medidor de Conductividad Eléctrica FIELDSCOUT

Para la medición de los niveles de Conductividad Eléctrica (CE) de las distintas aguas en las que se realizarán las pruebas se utilizó el medidor de CE FIELDSCOUT. Este instrumento fue diseñado para la medición directa de sales en suelos, así como en soluciones de agua o de nutrientes. Fue desarrollado por Spectrum® Technologies, Inc.



Figura 9: Especificaciones del medidor de CE FIELDSCOUT.

Fuente: (FIELDSCOUT, 2009)

En la Tabla 4 se muestran las especificaciones del equipo.

Tabla 4

Especificaciones del equipo de CE FIELDSCOUT.

Medidor de CE FIELDSCOUT	
Lectura	Display LCD digital
Rango CE	0.00-19.99 mS/cm
Rango de Temperatura	0 - 55 °C
Exactitud CE	±1% Escala Completa
Exactitud Temperatura	±0.5 °C
Resolución CE	0.01 mS/cm
Calibración	Manual, 1 punto
Compensación de Temperatura	Automática de 0 a 50°C
Alimentación	Cuatro baterías LR44 de 1.5 V
Duración de la batería	150 horas
Auto apagado	Después de 8.5 minutos
Longitud de la Sonda	19.5 cm
Diámetro de la Sonda	0.8 cm

Fuente: (FIELDSCOUT, 2009).

3.2 Software

3.2.1 TinyOS

Es un sistema operativo libre y de código abierto, diseñado para sistemas embebidos inalámbricos de baja potencia tales como los utilizados en redes WSN, redes de área personal, edificios inteligentes y contadores inteligentes. TinyOS está escrito en nesC, el cual es un dialecto del lenguaje C.

Está diseñado para incorporar novedades rápidamente y para funcionar bajo las importantes restricciones de memoria, operaciones de concurrencia intensiva, bajo consumo energético, entre otras características que son propias de las redes de sensores. TinyOS está desarrollado por un consorcio liderado por la Universidad de

California en Berkeley en cooperación con Intel Research. El diseño de Kernel de TinyOS está basado en una estructura con dos niveles de planificación (Suárez, 2009):

- **Eventos:** Son utilizados para realizar un proceso pequeño, como por ejemplo cuando hay una interrupción en el contador del timer, o cuando se necesita atender las interrupciones de un conversor análogo-digital. Además permite interrumpir las tareas que estén ejecutándose. Esta es la solución ideal para lograr un alto rendimiento en aplicaciones de concurrencia intensiva (Galarza, Gualsaquí, & Vizcaíno, 2016).
- **Tareas:** Son utilizadas para realizar una mayor cantidad de procesamiento y no son críticas en tiempo, como puede ser el caso de calcular el promedio en un arreglo. Se las ejecuta en su totalidad, pero la solicitud de iniciación y finalización de una tarea funcionan separadamente. De esta manera los eventos que son rápidamente ejecutables pueden ser procesados inmediatamente permitiendo así interrumpir tareas que presenten mayor complejidad (Suárez, 2009).

Este sistema operativo está basado en un conjunto de componentes de sistema. Cada componente trabaja con eventos y comandos que permiten la rápida transición de un estado a otro. Un componente provee y usa interfaces que son el único punto de acceso al componente. Cada componente se asigna temporalmente al contexto de ejecución mientras duren los cambios del estado. Además a este modelo se le ha aumentado la noción de tareas, las cuales permiten que los componentes soliciten el contexto de ejecución en la CPU para realizar cálculos o procesamientos duraderos.

Un componente está compuesto por los siguientes cuatro elementos:

- Manejador de comandos.

- Manejador de eventos.
- Un bloque con tareas simples.
- Un frame o un bloque de tamaño fijo y estáticamente asignado en el cual se representa el estado interno del componente.

En la Figura 10 se muestran los 4 elementos descritos por los que está formada una componente.

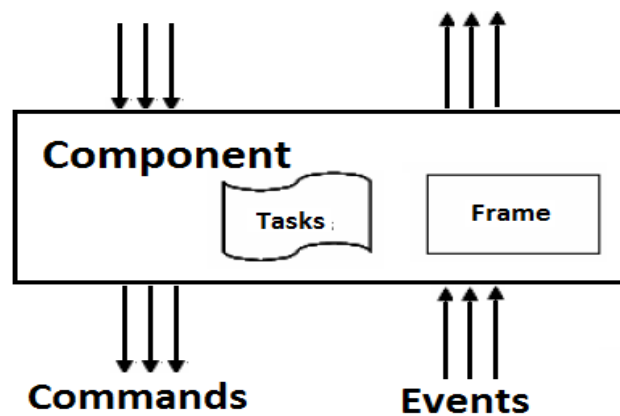


Figura 10: Elementos de una componente.

Fuente: (Suárez, 2009).

El componente se encarga de declarar los comandos que serán utilizados y los eventos a señalar, de esta manera se crean capas o niveles de componentes. Los componentes de niveles superiores proveen comandos a los de niveles inferiores, y éstos señalan eventos a los componentes de un nivel superior. Se introduce una interfaz bidireccional en TinyOS para proporcionar una definición abstracta de la interacción de dos componentes vía comandos y eventos.

Los comandos se pueden definir como peticiones, hechas a componentes de capas inferiores. Estos comandos proporcionan retroalimentación, brindando la información del estado al que lo envió. Un evento señalará la respuesta de si el comando fue aceptado o no.

Los eventos de componentes de capas inferiores y las interrupciones cuando se está directamente conectado al hardware son los encargados de llamar a los manejadores de eventos. Las tareas y los comandos tienen una labor similar a las de las interrupciones. Los eventos tienen preferencia sobre las tareas.

Las tareas se ejecutan hasta que lleguen a su conclusión, y únicamente pueden ser pospuestas por eventos. Estas tareas son puestas en cola por medio de un planificador de tareas o también llamado *task scheduler* (Suárez, 2009).

3.2.2 NesC

Es un lenguaje de programación orientado a sistemas embebidos que se encuentra basado en C. Es diseñado para soportar el modelo de ejecución de TinyOS. NesC realiza optimizaciones en la compilación del programa, detectando posibles errores, simplificando el desarrollo de aplicaciones, reduciendo el tamaño del código, y eliminando muchas fuentes potenciales de errores.

Este lenguaje realiza una separación entre la construcción y la composición, ya que las aplicaciones están conformadas por una serie de componentes que están agrupados y relacionados entre sí. Como se había explicado anteriormente, NesC utiliza interfaces bidireccionales, lo que significa que las interfaces son los accesos a los componentes, los cuales están conformados por comandos y eventos y que son los que implementarán las funciones. Los comandos son implementados por el proveedor de una interfaz, mientras que los eventos son implementados por el que los utiliza. NesC presenta dos tipos de componentes (Gay, Levis, Behren, Welsh, Brewer, & Culler, 2005):

- ❖ **Módulos:** Son aquellos que suministran el código de la aplicación, implementando una o más interfaces, las cuales son los únicos puntos de acceso al componente.

- ❖ **Configuraciones:** Se las utiliza para para vincular los componentes entre sí, conectando las interfaces que son provistas por unos componentes con las interfaces utilizadas por otros. Las configuraciones se encargan de ensamblar todos los componentes de la aplicación.

Toda aplicación realizada en TinyOS, se compone al menos de un componente módulo, un componente de configuración y un *Makefile*. El *Makefile* es el archivo encargado de la compilación (Galarza, Gualsaquí, & Vizcaíno, 2016).

3.2.3 Matlab ®

Para el modelamiento, se utilizará el *software Matrix LABORatory* (Matlab). Este es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación. Se puede utilizar este software para:

- Modelado y Simulación.
- Análisis y procesamiento de datos.
- Desarrollo de algoritmos.
- Visualización y representación de gráficos.
- Computación matemática.

Se pueden importar datos a Matlab a través de archivos, de otras aplicaciones o de dispositivos externos. Una vez que se encuentren importados los datos, podemos explorarlos, analizarlos y trabajar con ellos. También se pueden crear *scripts* y funciones para reusar y automatizar el trabajo.

Matlab nos permite trabajar con *Toolboxes*, las mismas que extienden el entorno para solucionar problemas en varios tipos de aplicaciones incluyendo procesamiento de señales, comunicaciones, procesamiento de imágenes, visión por ordenador, diseño de control, robótica, y muchas otras.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizará específicamente el *Toolbox Curve Fitting*, con el cual podremos realizar nuestro análisis utilizando las bibliotecas de los distintos modelos que presenta este software, o si no se desea trabajar con dichos modelos se nos permite crear nuestras propias ecuaciones. Se ampliará la información del modelado en el Capítulo 5.

3.3 Técnica para la obtención del modelo de pérdidas por propagación

3.3.1 Variable RSSI

RSSI son las siglas de Received Signal Strenght Indicator. Esta variable es un indicador que se utiliza para la medición de la potencia de una señal recibida por un dispositivo en redes inalámbricas. Esta es una escala en relación a 1mW.

La relación entre la distancia y la potencia de la señal recibida no es un valor estable y lineal debido a que es afectada por reflexiones, difracciones y multitrayectos presentes en las transmisiones. El principal inconveniente al utilizar RSSI es la inestabilidad y la susceptibilidad a la interferencia observados en entornos reales (Fang, Zhao, Geng, Xuan, Du, & Cui, 2010).

El indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI) viene como una configuración básica en la mayoría de los chips de comunicaciones y ha atraído mucha atención por parte de los investigadores dada la diversidad de aplicaciones que se pueden realizar. La simplicidad de RSSI es especialmente atractivo para la localización en redes de sensores inalámbricos debido a su costo, tamaño y restricciones de energía (Fang, Zhao, Geng, Xuan, Du, & Cui, 2010).

Se debe aclarar que el RSSI indica la intensidad de la señal recibida, no la calidad de la misma. Si se deseara determinar la calidad de la señal, se debe contrastar la intensidad de la señal respecto a la relación señal/ruido (Eb/No).

Para dispositivos embebidos, la potencia de recepción es transformada a RSSI como la potencia recibida en función de la potencia de referencia.

$$RSSI = 10 \times \log \frac{P_{RX}}{P_{ref}} [dBm] \quad (3.1)$$

Dónde:

P_{RX} : Potencia de recepción obtenida por la mota.

P_{ref} : Potencia de referencia cuyo valor es 1 mW.

En la ecuación 3.1 se muestra que al aumentar la potencia de recepción, aumentará también el valor de RSSI (Akar, 2010).

3.3.2 Cálculo del RSSI a partir del valor obtenido de la mota

Para realizar la conversión de los valores de RSSI adquiridos por las motas se debe utilizar la siguiente relación que se especifica en el *datasheet* del módulo AT86RF230.

$$RSSI [dBm] = PHY_ED_LEVEL - RSSI \text{ offset} \quad (3.2)$$

Dónde:

PHY_ED_LEVEL: Es un registro de 8 bits de longitud, en el cual se registran los valores de RSSI obtenidos por la mota.

RSSI offset: -91 [dBm].

RSSI [dBm]: Valor final de RSSI.

CAPITULO 4

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED

4.1 REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO

Dado que se realizará una comunicación subacuática y que las motas IRIS XM2110 que se utilizarán para el desarrollo del proyecto son para uso terrestre y no para uso acuático, se debe realizar una adaptación para evitar que el agua pueda dañar los equipos. Se debe considerar que dicha protección no debe contener ningún elemento metálico para evitar interferencias en la comunicación.

Las motas tendrán doble protección ya que irán envueltas en un recubrimiento Ziploc transparente de doble cierre hermético y esta a su vez irá dentro de una caja plástica hermética como se puede observar en la Figura 11.



Figura 11: Protecciones herméticas de las motas.

Ambas motas se fijarán en una estructura compuesta por dos tubos plásticos verticales, la misma que servirá para evitar que las motas se muevan y permitirá variar la distancia de separación entre ellas. Esta estructura se encontrará dentro del tanque plástico donde se realizarán las pruebas como se puede observar en la Figura 12.

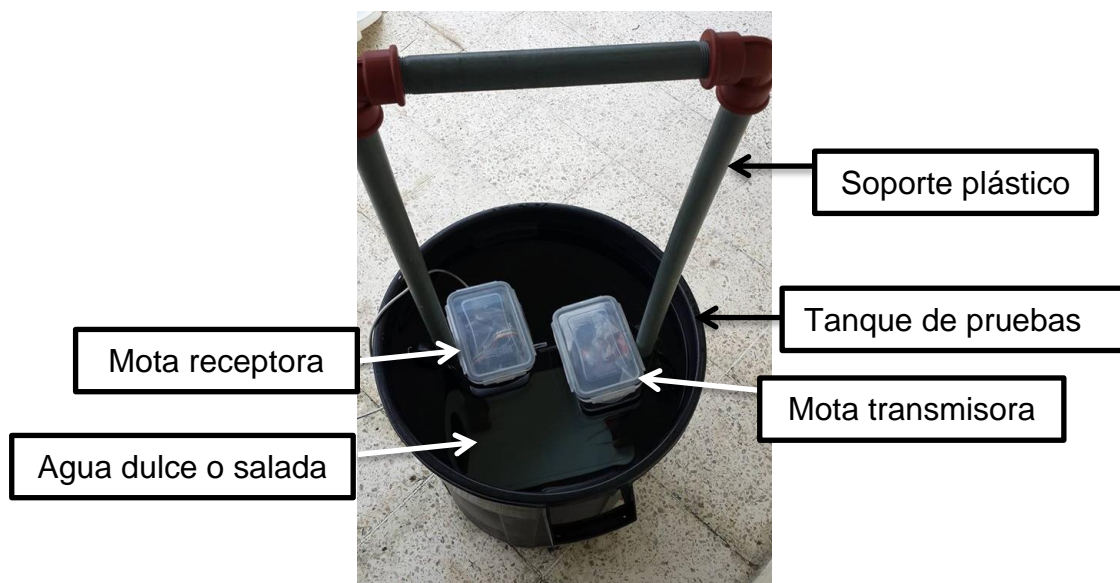


Figura 12: Escenario de pruebas.

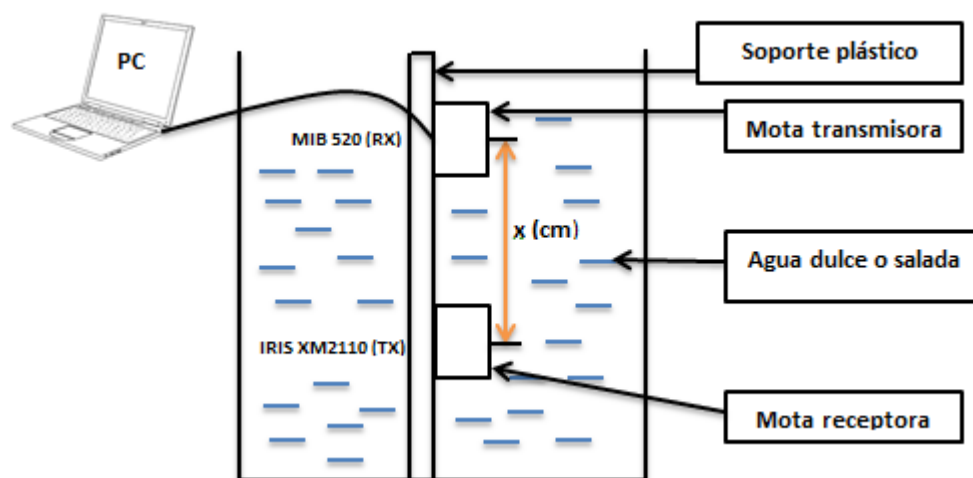


Figura 13: Esquema de medidas RSSI.

4.2 Criterios de Diseño

La red inalámbrica estará conformada por una mota transmisora que será la que se va a sumergir a diferentes profundidades, y por una mota receptora (Ver Figura 12) que será fija y que se encontrará conectada al Gateway MIB520, el mismo que servirá de puente entre la PC y la red inalámbrica por medio de un cable USB. La mota móvil (transmisor) se encargará de enviar paquetes en difusión a la mota fija (receptor) la cual será la encargada de obtener de los paquetes recibidos los valores de RSSI.

Para la programación de las motas se configuró que el periodo de muestreo sea cada 250ms. Se obtendrán las mediciones de valores RSSI con intervalos de profundidad (x) de 2,5 cm hasta determinar el alcance vertical máximo de la red y se realizarán muestreos con 200, 250, 300, 350 y 400 muestras para cada punto. Dado que los valores de las mediciones pueden variar ya sea por los dispositivos, por condiciones externas, o por el operador, en esta investigación para cada profundidad de sumersión se realizarán diez iteraciones con cada uno de los números de muestras descritos anteriormente para obtener un valor más preciso. Luego se procederá a obtener la media de los valores adquiridos y se determinará la varianza y desviación estándar en cada punto y con cada número de muestras. Una vez obtenidos los promedios, se procederá a realizar la correspondiente conversión a dBm. Se realizará el mismo procedimiento descrito para cada escenario acuático donde se realizarán las pruebas.

4.3 Escenarios acuáticos donde se realizarán las pruebas

Se realizarán las pruebas subacuáticas en agua con cuatro distintos niveles de conductividad. Según la concentración de sales disueltas, la conductividad varía y es por ello que en el agua dulce toma un valor típico de 0.01 [S/m], mientras que para el

agua salada la conductividad tiene un valor típico de [4 S/m] (Álvarez, 2004). Para esta investigación se realizarán las pruebas con los siguientes tipos de agua:

- a) Tipo 1: Agua Dulce (550 $\mu\text{S}/\text{cm}$)
- b) Tipo 2: Agua Salada (3 mS/cm)
- c) Tipo 3: Agua Salada (5 mS/cm)
- d) Tipo 4: Agua Salada (7 mS/cm)

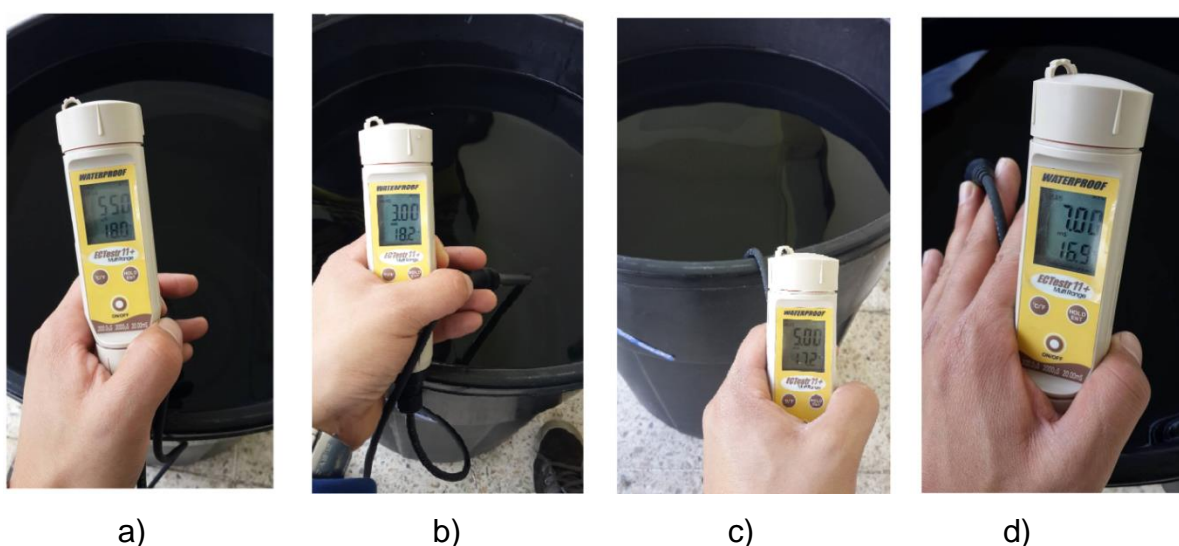


Figura 14: Tipos de agua con sus respectivas conductividades.

Se eligieron dichos valores de conductividad ya que se quería realizar pruebas con niveles de salinidad bajo, medio y alto y en agua dulce con el fin de analizar el comportamiento de la red al variar los niveles de conductividad del agua donde se encuentra inmersa la red. Es importante mencionar que las mediciones se realizaron en época de verano y la temperatura del agua estaba en el rango de [16.9 °C – 18.5 °C].

4.4 Despliegue de la Red Inalámbrica Punto a Punto

El escenario de implementación que se dispuso para la realización de las pruebas de la red diseñada fue frente a los Laboratorios de Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. En la Figura 14 se puede observar una imagen satelital de la ubicación de la red.



Figura 15: Área de estudio, vista satelital.

4.5 Implementación de la red Inalámbrica Punto a Punto

Una vez concluido el diseño de la red, se debe proceder a tratar los aspectos relacionados con la programación y configuración de la red. Por otro lado ya se debe tener definidos los *softwares* necesarios para poner en marcha todas las etapas de la WSN. Entre estos aspectos mencionados se tienen:

- **Programación y Configuración de las motas:** Cada mota a utilizarse tiene su respectiva aplicación. Dado que la comunicación es punto a punto, se tendrá una mota transmisora y una receptora. Se utilizará un algoritmo desarrollado por los creadores de TinyOS llamado RSSI Demo. Este consta de diferentes componentes programados en NesC, entre los cuales se encuentran un componente para la mota transmisora, uno para la mota receptora y un componente que permite al usuario inspeccionar y modificar a su gusto los mensajes que serán enviados.
- **Adquisición de Datos:** Para la adquisición y el análisis de los datos obtenidos de la red inalámbrica se utilizó la Matlab®. Se trabajó con el puerto serie para conformar la base de datos con los valores de RSSI recolectados, posteriormente con los resultados obtenidos se realizaron las distintas gráficas para proceder con el análisis de las mismas. Se escogió trabajar con esta herramienta ya que resuelve una infinidad de problemas matemáticos de manera rápida y eficaz.
- **Máquina Virtual:** Para poder trabajar con TinyOS, se utilizó una máquina Virtual de Windows 7 Home Premium que fue proporcionada por la ingeniera Alejandra Galarza. Esta máquina virtual corría bajo el software VMWare Workstation 8. Se utilizó una máquina virtual dados los inconvenientes ocurridos al instalar TinyOS bajo la máquina física de Windows 7.

Todo el código de programación en Matlab y en NesC se muestra en los Anexos.

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se expondrán las pruebas realizadas para determinar un modelo de propagación subacuático de enlaces punto a punto en la banda ISM de 2.4 GHz con tecnología Zigbee para cada uno de los cuatro distintos escenarios en los que se realizaron los experimentos. Se realizará un análisis descriptivo de los resultados obtenidos tomando en cuenta la media, varianza, desviación estándar, error porcentual y error MAE. Se analizarán también los datos obtenidos al variar los números de muestras para cada prueba. Se definirán cuatro distintos escenarios como se especifica en la Tabla 5.

Tabla 5

Escenarios donde se realizarán las pruebas

Escenario	Tipo de Agua	Nivel de conductividad
1	Agua Dulce	550 [μ S/cm]
2	Agua Salada Tipo 1	3 [mS/cm]
3	Agua Salada Tipo 2	5 [mS/cm]
4	Agua Salada Tipo 3	7 [mS/cm]

En la Figura 16 se observa el comportamiento de la variable RSSI (*Received Strenght Signal Indicator*) en función de la profundidad a la que se sumergieron las motas. Los umbrales máximos de recepción alcanzados varían dependiendo del escenario. Los puntos observados corresponden a la media de los valores obtenidos con 200, 250, 300, 350 y 400 iteraciones en función de cada nivel de profundidad para cada escenario.

Para todos los escenarios se aprecia una discontinuidad entre los 7.5 y 10 cm de profundidad a la cual le llamaremos franja inestable, por lo cual se dividirá el análisis en dos partes:

1. De 0 a 7,5cm
2. De 10 a 20 cm.

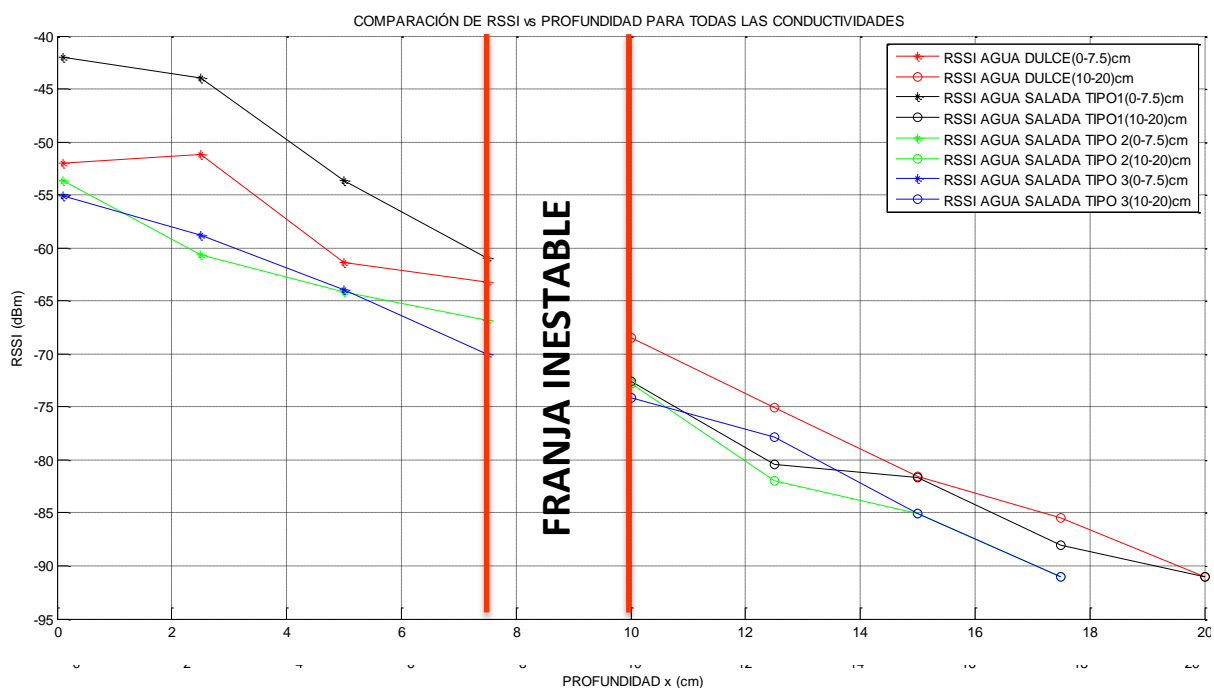


Figura 16: Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para los distintos escenarios.

Se realizará el análisis y modelamiento de cada escenario separado en dos intervalos con el fin de evitar errores producidos por valores atípicos presentes dentro de la franja inestable, por lo cual los valores obtenidos entre la profundidad de 7,5-10cm no serán analizados.

5.1 Escenario 1: Agua Dulce

El primer escenario fue realizado en agua dulce, donde la conductividad típica de este escenario es de $550 \text{ } [\mu\text{S/cm}]$. En la Figura 17 se observa el comportamiento de la variable RSSI en función de la Profundidad (x). Como se mencionó anteriormente, para cada profundidad de sumersión de la mota móvil, se realizaron diez iteraciones con cada número de muestras utilizado, es decir 10 iteraciones con 200 muestras, 10 iteraciones con 250 muestras y así sucesivamente hasta llegar a 400 muestras para cada uno de los distintos niveles de profundidad. Los valores de RSSI presentados en la Figura 17 corresponden al promedio de los resultados obtenidos de todos los números de muestras para cada nivel profundidad.

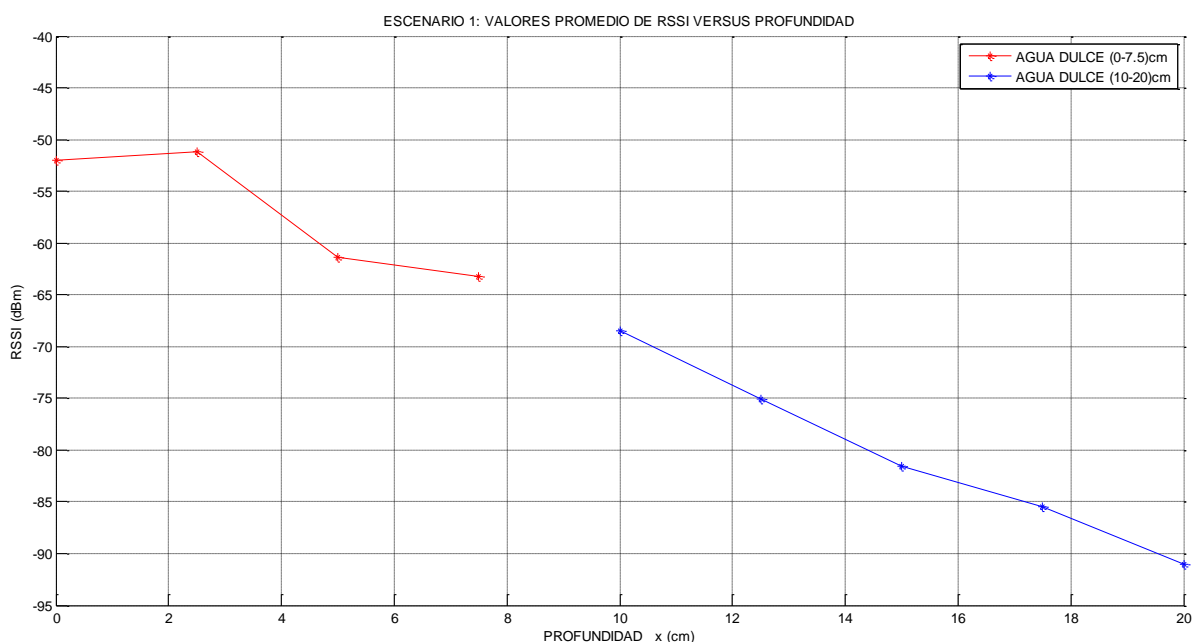


Figura 17: Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para el escenario 1.

Como se puede observar en la Figura 17, los dos intervalos poseen una tendencia logarítmica decreciente.

5.1.1 Ajuste de RSSI versus Profundidad para los dos intervalos

Con los datos obtenidos de la Figura 5.2, se procedió a realizar el ajuste de las curvas para cada intervalo por separado. Se realizarán tres distintos tipos de ajustes para establecer cuál es el ajuste que mejor describe el comportamiento de la red para este escenario. Para determinar cuál es el ajuste óptimo para cada intervalo, se experimentará con ajuste cuadrático, logarítmico y exponencial para posteriormente en base a una comparación, establecer cuál es el indicado para realizar el modelamiento.

5.1.1.1 Ajuste Cuadrático

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.1 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.2.

$$P_{RX_{a_dulce_1}} = a_1 * x^2 + b_1 * x + c_1 \quad (5.1)$$

$$P_{RX_{a_dulce_2}} = a_1' * x^2 + b_1' * x + c_1' \quad (5.2)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_dulce_1}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_dulce_2}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_1, b_1 y c_1 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.
- a_1', b_1' y c_1' : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 18 se aprecia el ajuste cuadrático mediante la herramienta *curve fitting* de Matlab®.

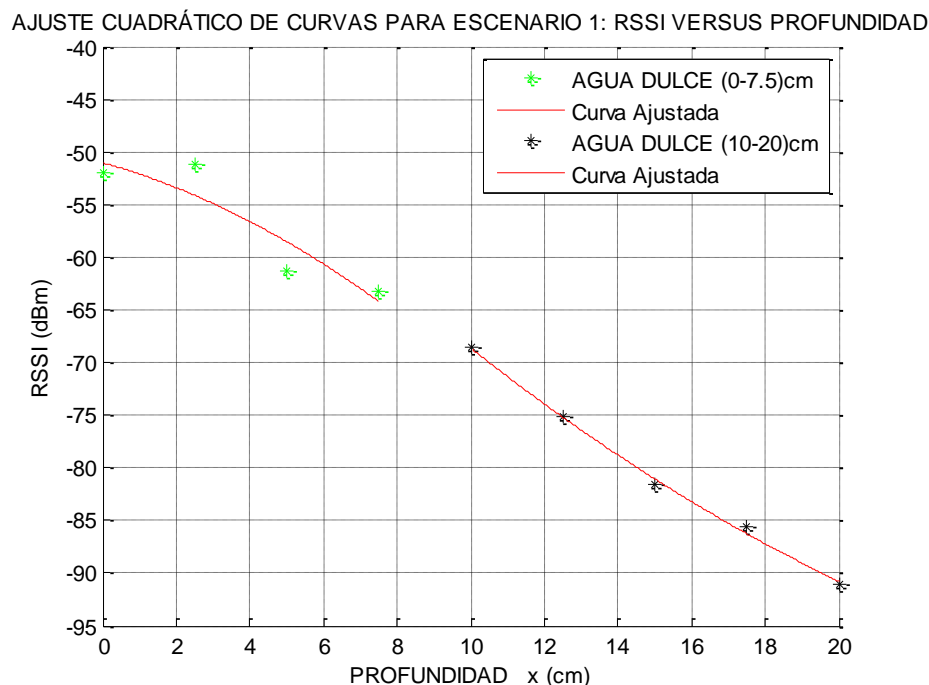


Figura 18: Ajuste cuadrático de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario1.

Luego de realizar el ajuste de las curvas, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste cuadrático son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a1 = -0.1035, \quad b1 = -0.9776, \quad c1 = -51.01$$

Segundo Intervalo:

$$a1' = 0.05409, \quad b1' = -3.837, \quad c1' = -35.63$$

En la Figura 19 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 1. Se nota claramente como en el primer intervalo los

errores de ajuste son mayores que los del segundo intervalo, lo cual puede ser causado por efecto del campo cercano o zona de Fresnel.

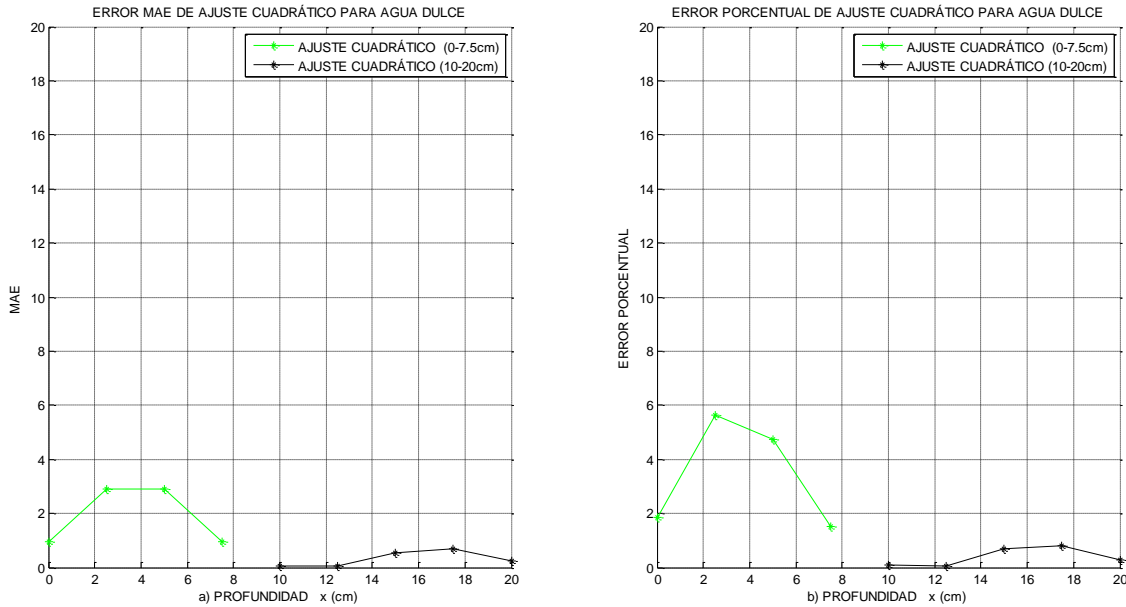


Figura 19: Errores al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 1:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.1.1.2 Ajuste Logarítmico

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.3 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.4.

$$P_{RX_{a_dulce_1}} = a_1 + 10 * b_1 * \log(x) \quad (5.3)$$

$$P_{RX_{a_dulce_2}} = a_1' + 10 * b_1' * \log(x) \quad (5.4)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_dulce_1}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_dulce_2}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_1 y b_1 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.

- a'_1 y b'_1 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 20 se aprecia el ajuste logarítmico mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab®*.

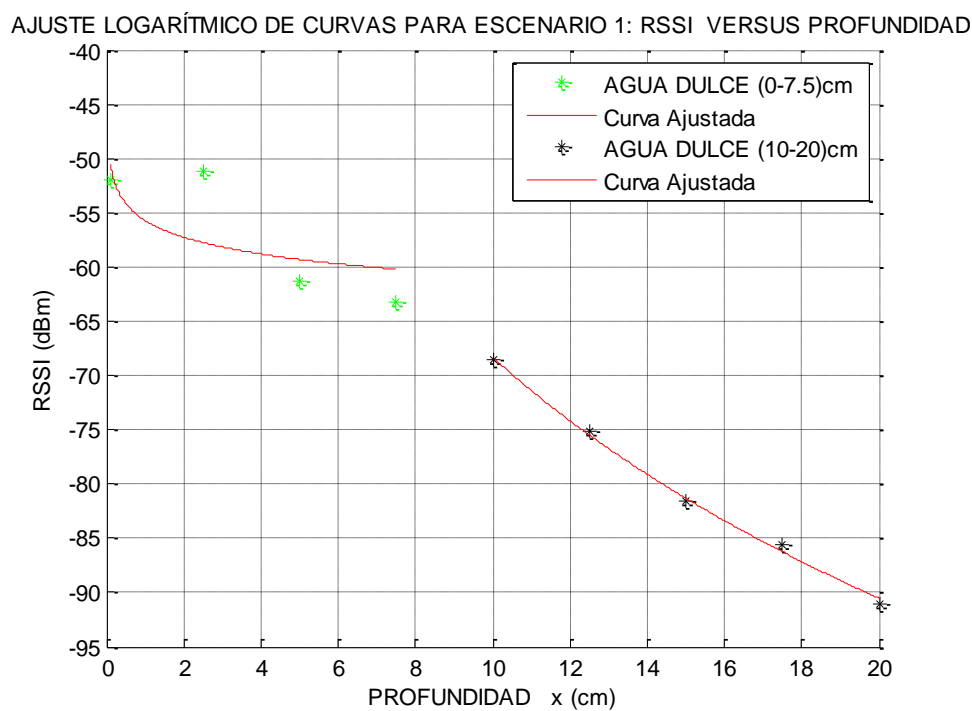


Figura 20: Ajuste logarítmico de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario1.

Luego de realizar el ajuste de las curvas, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste logarítmico son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$\mathbf{a1 = -55.68, \quad b1 = -0.5174}$$

Segundo Intervalo:

$$a_1' = 5.501, \quad b_1' = -7.379$$

En la Figura 21 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 1. Se nota claramente como en el primer intervalo los errores de ajuste son mayores que los del segundo intervalo, lo cual puede ser causado por efecto del campo cercano o zona de Fresnel.

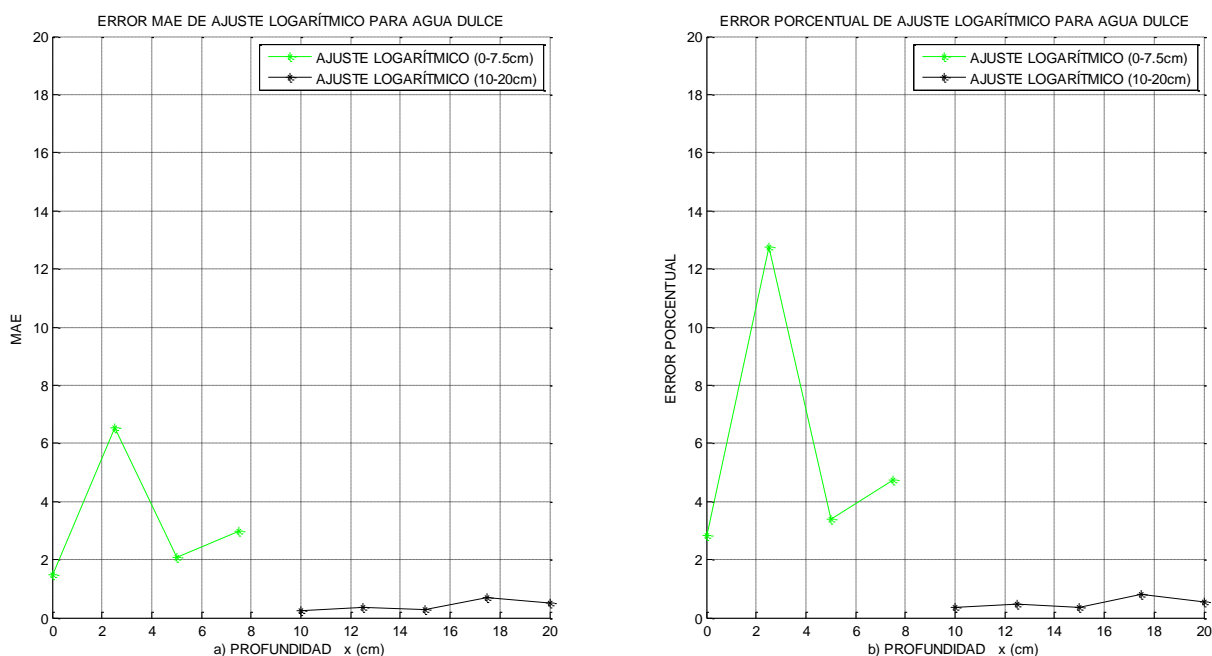


Figura 21: Errores al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 1:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.1.1.3 Ajuste Exponencial

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.5 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.6.

$$P_{RXa_dulce_1} = a_1 * e^{(b_1 * x)} \quad (5.5)$$

$$P_{RXa_dulce_2} = a_1' * e^{(b_1' * x)} \quad (5.6)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_{dulce_1}}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_{dulce_2}}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_1 y b_1 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.
- a'_1 y b'_1 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- e : Es el número correspondiente a Euler.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 22 se aprecia el ajuste exponencial mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab®*.

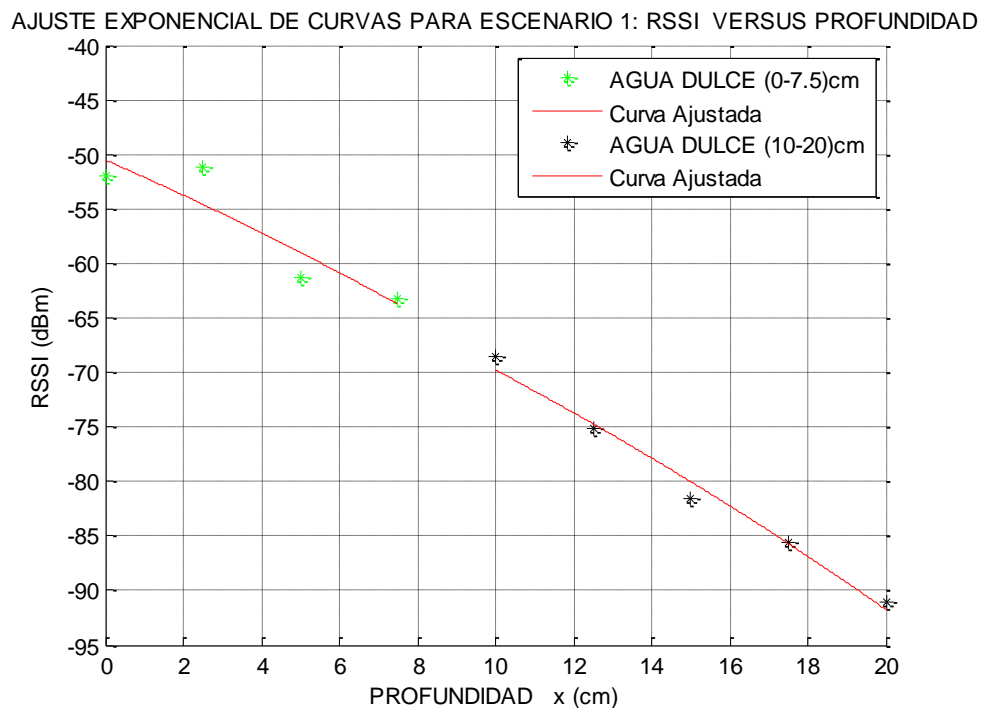


Figura 22: Ajuste exponencial de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario1.

Luego de realizar el ajuste de las curvas, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste exponencial son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a_1 = -50.49, \quad b_1 = 0.03103$$

Segundo Intervalo:

$$a_1' = -53.05, \quad b_1' = 0.02737$$

En la Figura 23 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste exponencial para el escenario 1. Se nota claramente como en el primer intervalo los errores de ajuste son mayores que los del segundo intervalo, lo cual puede ser causado por efecto del campo cercano o zona de Fresnel.

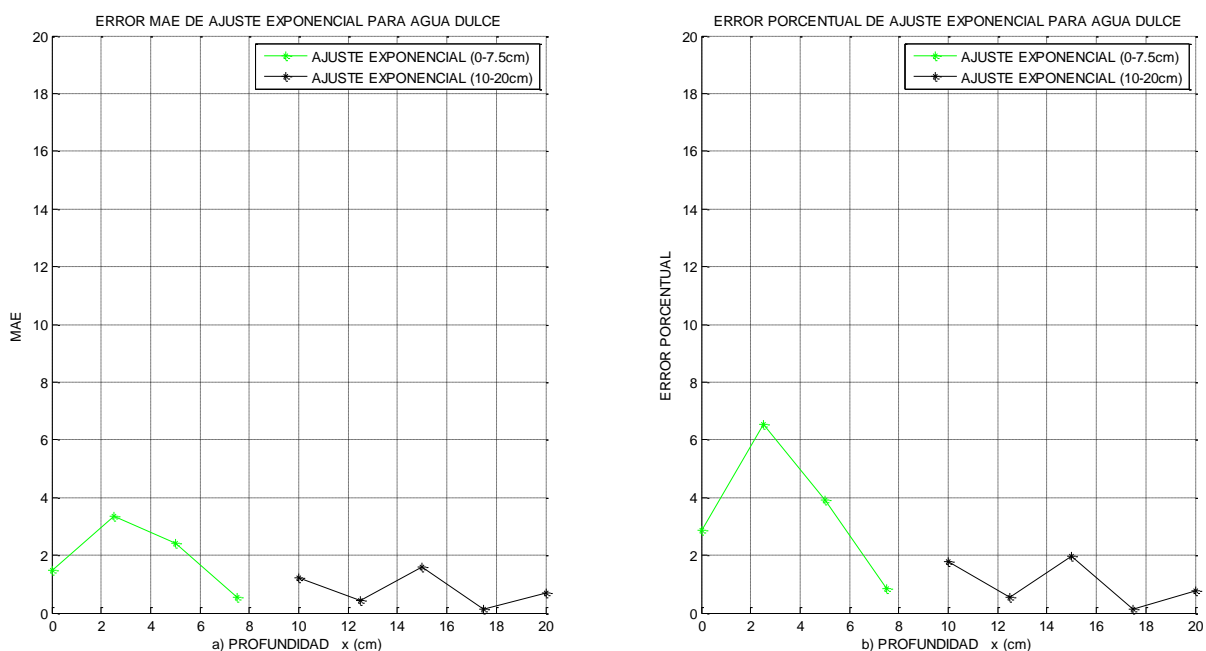


Figura 23: Errores al realizar el ajuste exponencial para el escenario 1:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.1.2 Varianza y Desviación Estándar

Dado que se realizaron pruebas con cinco números de muestras distintos, se presenta una gráfica que expone el comportamiento de la varianza y de la desviación estándar al permutar el número de muestras en este escenario.

Como se puede apreciar en la Figura 24, el peor desempeño de varianza y de desviación estándar se presenta al utilizar 200 muestras para la adquisición de datos, mientras que el mejor desempeño se obtuvo al utilizar 350 o 400 muestras.

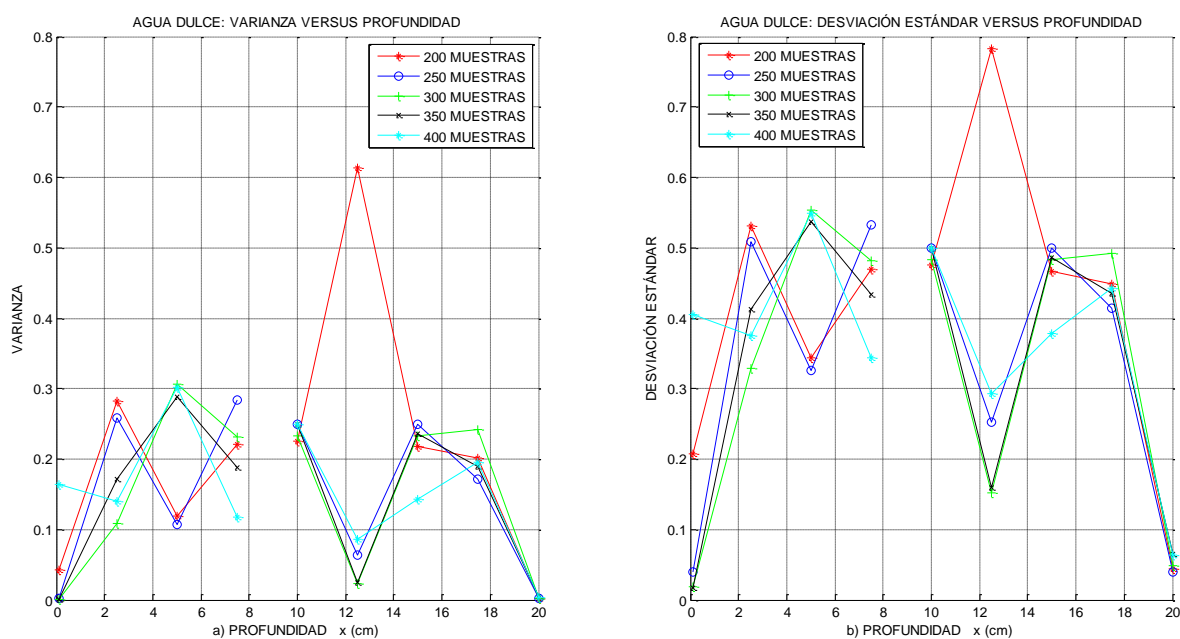


Figura 24: Variación espacial de: a) Varianza versus Profundidad, b) Desviación Estándar versus Profundidad, para el escenario 1.

5.2 Escenario 2: Agua Salada Tipo 1

El segundo escenario fue realizado en agua salada con conductividad 3 [mS/cm]. En la Figura 25 se observa el comportamiento de la variable RSSI en función de la Profundidad. Como se mencionó, para cada profundidad de sumersión de la mota móvil, se realizaron diez iteraciones con cada número de muestras utilizado en los distintos niveles de profundidad. Los valores de RSSI presentados en la Figura 25 corresponden al promedio de los resultados obtenidos de todos los números de muestras para cada nivel profundidad.

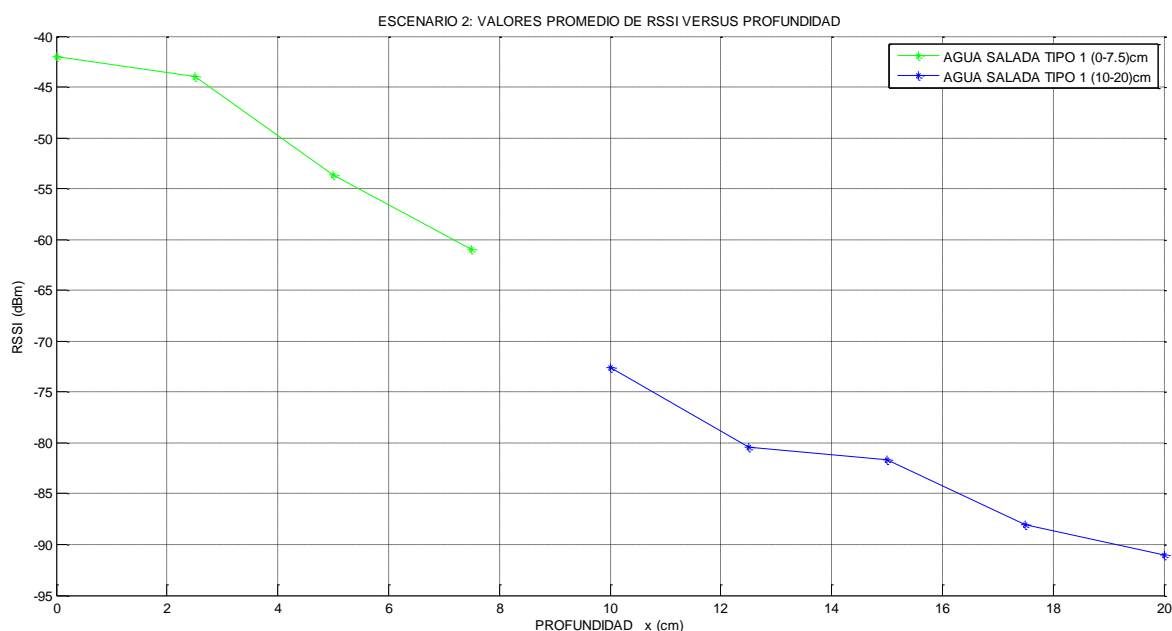


Figura 25: Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para el escenario 2.

Como se puede observar en la Figura 25, los dos intervalos poseen una tendencia logarítmica decreciente similar a los resultados anteriores.

5.2.1 Ajuste de RSSI versus Profundidad para los dos intervalos

Con los datos obtenidos de la Figura 5.10, se procedió a realizar el ajuste de las curvas para cada intervalo por separado. Se realizarán tres distintos tipos de ajustes para establecer cuál es el ajuste que mejor describe el comportamiento de la red para este escenario. Para determinar cuál es el ajuste óptimo para cada intervalo, se experimentará con ajuste cuadrático, logarítmico y exponencial para posteriormente en base a una comparación, establecer cuál es el óptimo para realizar el modelamiento.

5.2.1.1 Ajuste Cuadrático

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.7 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.8.

$$P_{RX_{a_salada_t1_1}} = a_2 * x^2 + b_2 * x + c_2 \quad (5.7)$$

$$P_{RX_{a_salada_t1_2}} = a_2' * x^2 + b_2' * x + c_2' \quad (5.8)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_salada_t1_1}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_salada_t1_2}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_2, b_2 y c_2 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.
- a_2', b_2' y c_2' : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 26 se aprecia el ajuste cuadrático para el segundo escenario mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab*®.

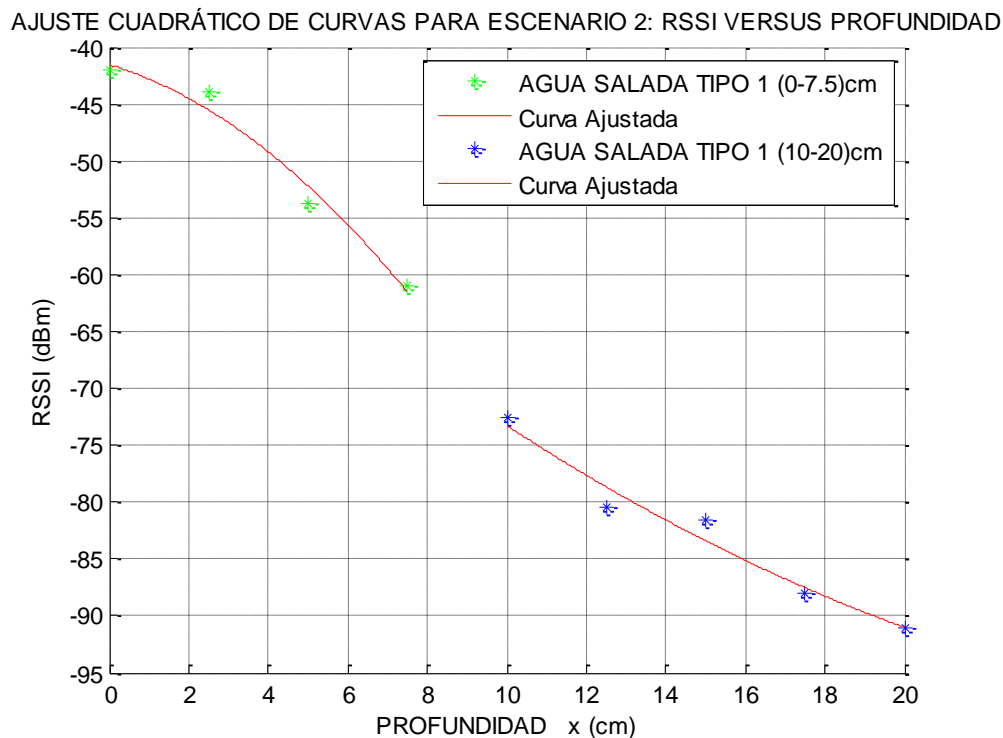


Figura 26: Ajuste cuadrático de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 2.

Luego de realizar el ajuste de las curvas, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste cuadrático son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a_2 = -0.215, \quad b_2 = -1.052, \quad c_2 = -41.52$$

Segundo Intervalo:

$$a_2' = 0.05061, \quad b_2' = -3.291, \quad c_2' = -45.39$$

En la Figura 27 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 2. Con este tipo de ajuste no se encuentra una diferencia significativa en los errores de ajuste del primer y segundo intervalo.

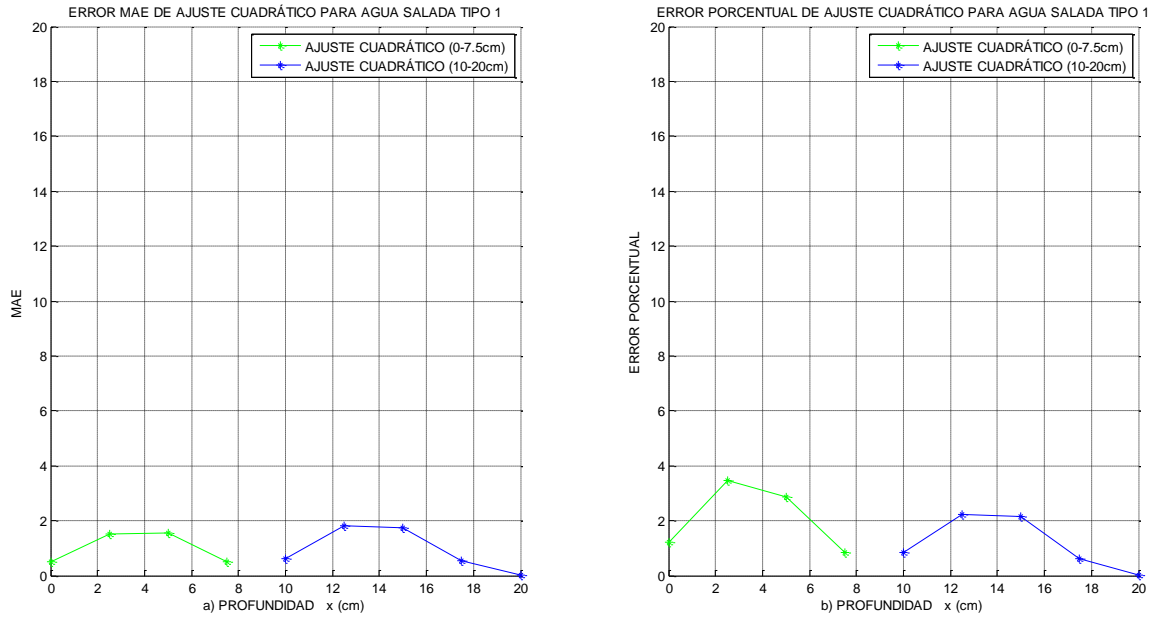


Figura 27: Errores al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 2:
a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.2.1.2 Ajuste Logarítmico

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.9 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.10.

$$P_{RX_{a_salada_t1_1}} = a_2 + 10 * b_2 * \log(x) \quad (5.9)$$

$$P_{RX_{a_salada_t1_2}} = a_2' + 10 * b_2' * \log(x) \quad (5.10)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_salada_t1_1}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_salada_t1_2}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.

- a_2 y b_2 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab*® para el primer intervalo.
- a'_2 y b'_2 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab*® para el segundo intervalo.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 28 se aprecia el ajuste logarítmico mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab*®.

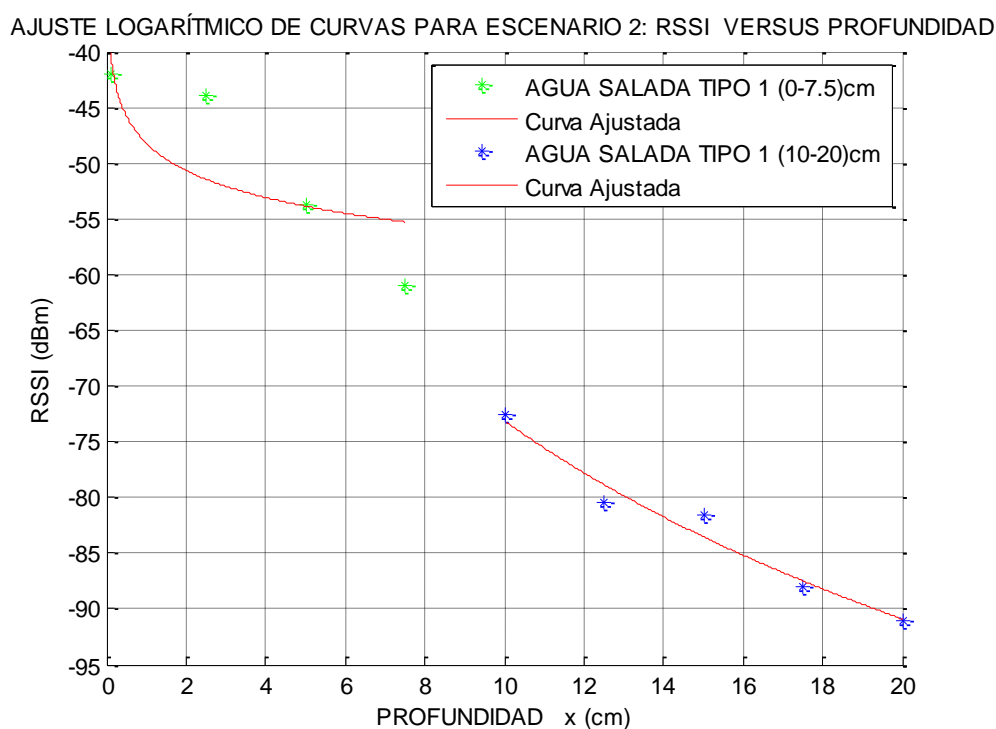


Figura 28: Ajuste logarítmico de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 2.

Luego de realizar el ajuste logarítmico, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste logarítmico son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$\mathbf{a2} = -48.2, \mathbf{b2} = -0.8085$$

Segundo Intervalo:

$$a_2' = -13.87, \quad b_2' = -5.919$$

En la Figura 29 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 2. Se nota claramente como en el primer intervalo los errores de ajuste son mayores que los del segundo intervalo, lo cual puede ser causado por efecto del campo cercano o zona de Fresnel.

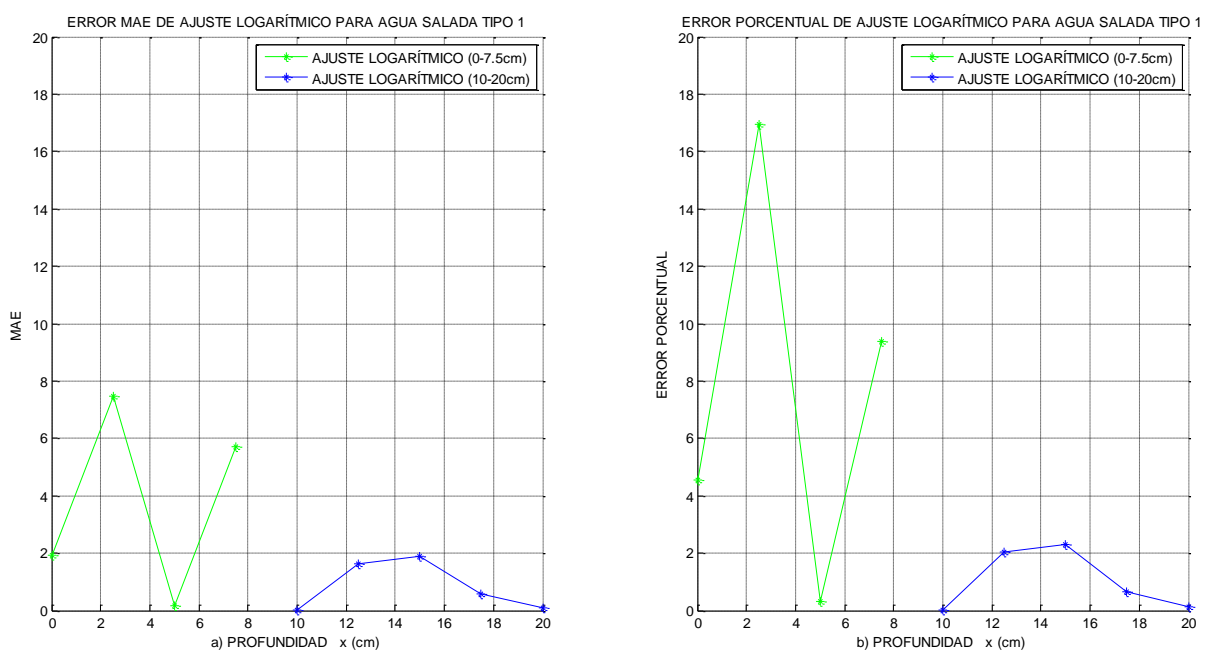


Figura 29: Errores al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 2:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.2.1.3 Ajuste Exponencial

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.11 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.12.

$$P_{RX_{a_{salada_t1_1}}} = a_2 * e^{(b_2 * x)} \quad (5.11)$$

$$P_{RX_{a_{salada_t1_2}}} = a_2' * e^{(b_2' * x)} \quad (5.12)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_{salada_{t1_1}}}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_{salada_{t1_2}}}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_2 y b_2 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.
- a'_2 y b'_2 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- e : Es el número correspondiente a Euler.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 30 se aprecia el ajuste exponencial mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab®*.

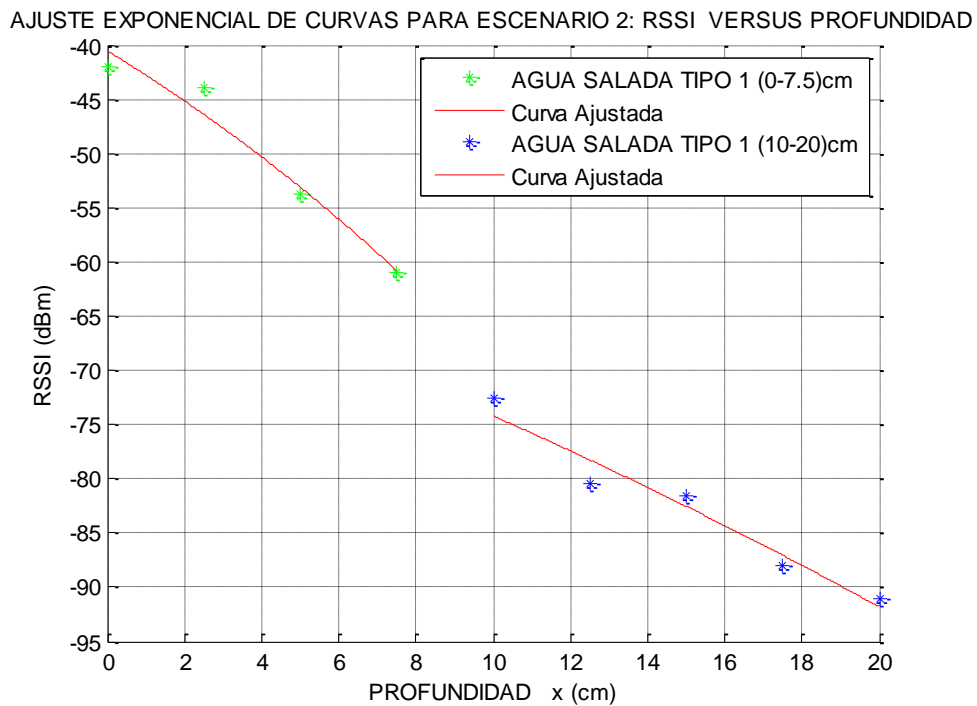


Figura 30: Ajuste exponencial de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 2.

Luego de realizar el ajuste de las curvas, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste exponencial son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a_2 = -40.48, \quad b_2 = 0.05411$$

Segundo Intervalo:

$$a_2' = -59.94, \quad b_2' = 0.0213$$

En la Figura 31 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste exponencial para el escenario 2. En el primer intervalo los errores de ajuste son ligeramente mayores que los del segundo intervalo.

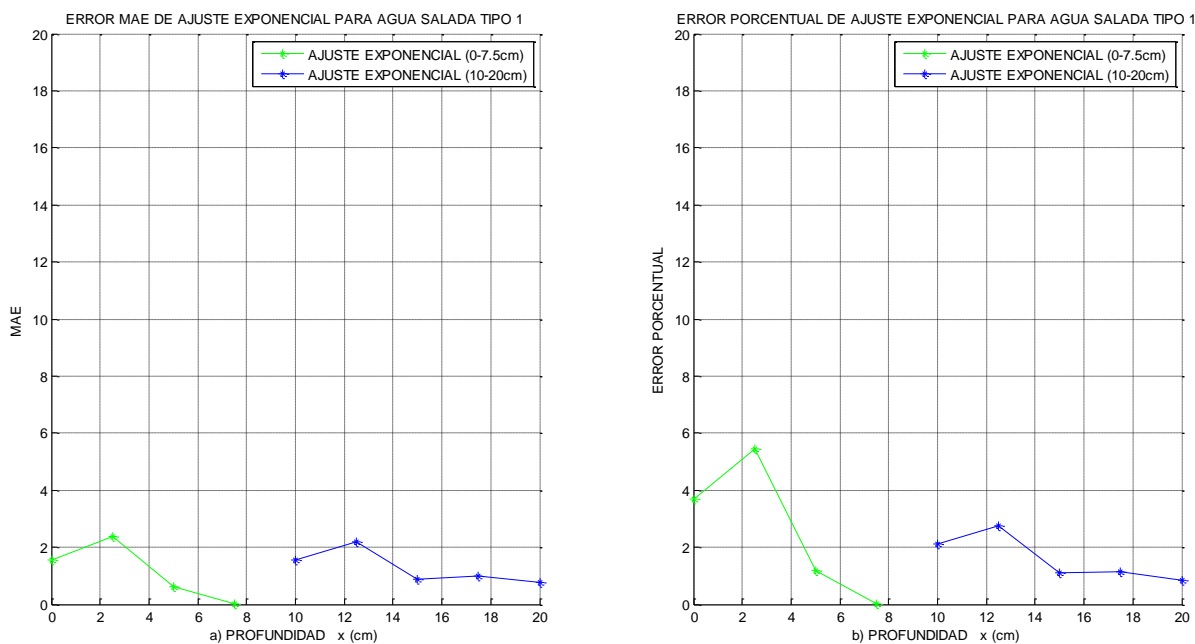


Figura 31: Errores al realizar el ajuste exponencial para el escenario 2:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.2.2 Varianza y Desviación Estándar

Dado que se realizaron pruebas con cinco números de muestras distintos, se presenta una gráfica que expone el comportamiento de la varianza y de la desviación estándar al permutar el número de muestras en este escenario.

Como se puede apreciar en la Figura 32, el peor desempeño de varianza y de desviación estándar se presenta al utilizar 300 muestras para la adquisición de datos, mientras que el mejor desempeño se obtuvo al utilizar 400 muestras.

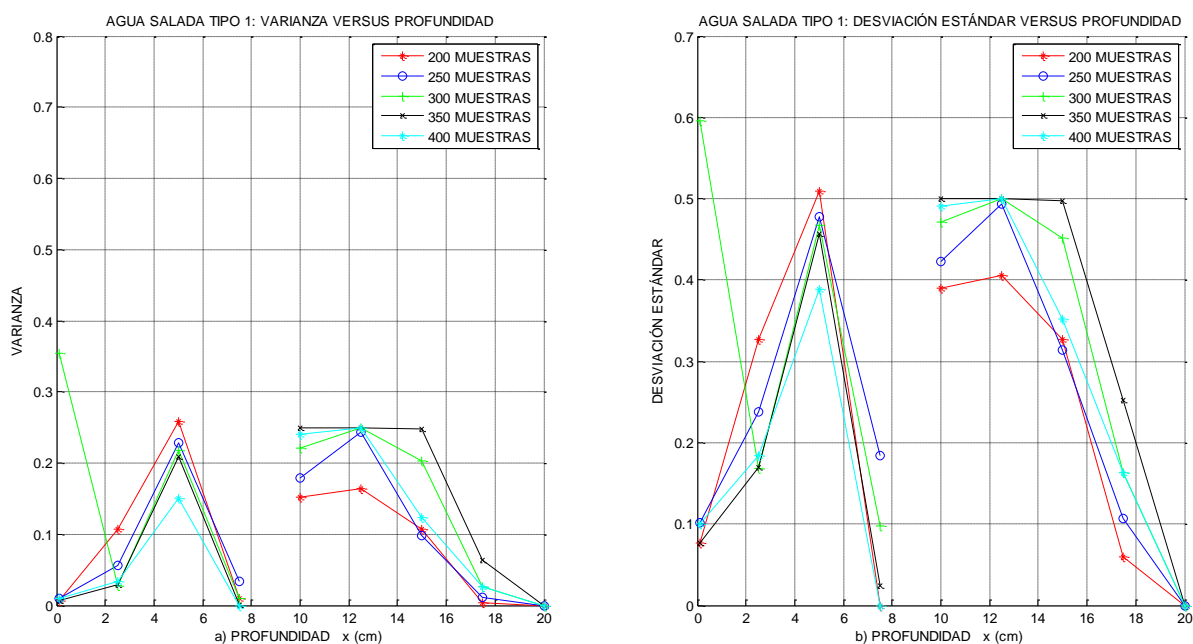


Figura 32: Variación espacial de: a) Varianza versus Profundidad, b) Desviación Estándar versus Profundidad, para el escenario 2.

5.3 Escenario 3: Agua Salada Tipo 2

El tercer escenario fue realizado en agua salada con conductividad 5 [mS/cm]. En la Figura 33 se observa el comportamiento de la variable RSSI en función de la Profundidad. Como se mencionó, para cada profundidad de sumersión de la mota móvil, se realizaron diez iteraciones con cada número de muestras utilizado en los distintos niveles de profundidad. Los valores presentados en la Figura 33 corresponden al promedio de los resultados obtenidos de todos los números de muestras para cada nivel profundidad.

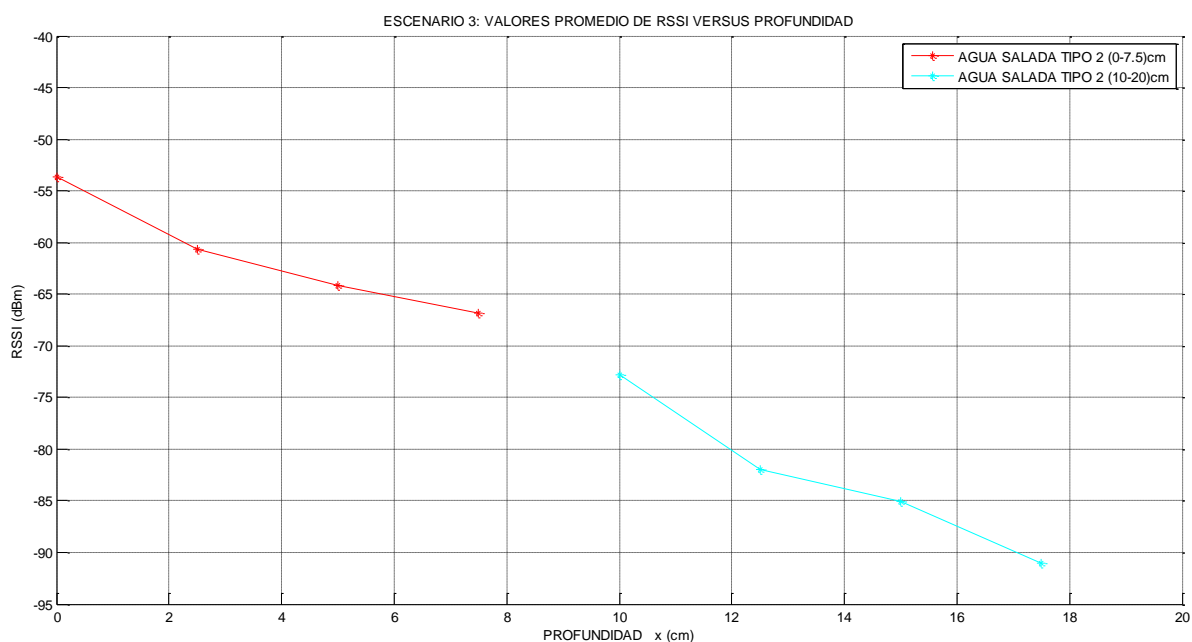


Figura 33: Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para el escenario 3.

Como se puede observar en la Figura 33, los dos intervalos poseen una tendencia logarítmica decreciente similar a los resultados anteriores.

5.3.1 Ajuste de RSSI versus Profundidad para los dos intervalos

Con los datos obtenidos de la Figura 5.18, se procedió a realizar el ajuste de las curvas para cada intervalo por separado. Se realizarán tres distintos tipos de ajustes para establecer cuál es el ajuste que mejor describe el comportamiento de la red para este escenario. Para determinar cuál es el ajuste óptimo para cada intervalo, se experimentará con ajuste cuadrático, logarítmico y exponencial para posteriormente en base a una comparación, establecer cuál es el óptimo para realizar el modelamiento.

5.3.1.1 Ajuste Cuadrático

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.13 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.14.

$$P_{RX_{a_salada_t2_1}} = a_3 * x^2 + b_3 * x + c_3 \quad (5.13)$$

$$P_{RX_{a_salada_t2_2}} = a_3' * x^2 + b_3' * x + c_3' \quad (5.14)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_salada_t2_1}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_salada_t2_2}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_3, b_3 y c_3 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.
- a_3', b_3' y c_3' : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 34 se aprecia el ajuste cuadrático para el tercer escenario mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab*®.

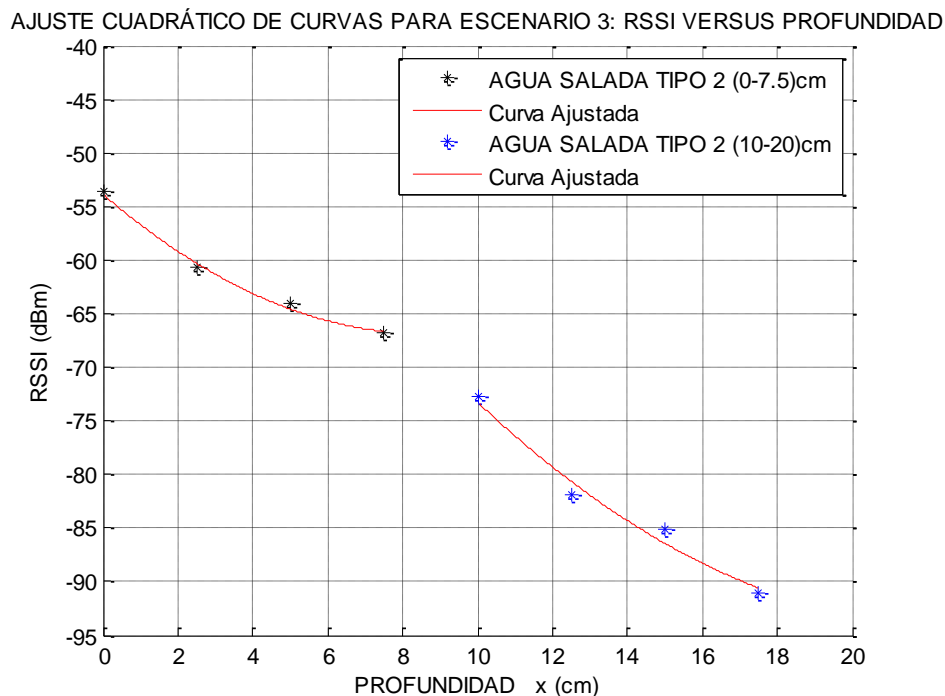


Figura 34: Ajuste cuadrático de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 3.

Luego de realizar el ajuste de las curvas, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste cuadrático son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a_3 = 0.1743, \quad b_3 = -3.021, \quad c_3 = -53.8$$

Segundo Intervalo:

$$a_3' = 0.1296, \quad b_3' = -5.878, \quad c_3' = -27.38$$

En la Figura 35 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 3. Con este tipo de ajuste no se encuentra una diferencia significativa en los errores de ajuste del primer y segundo intervalo.

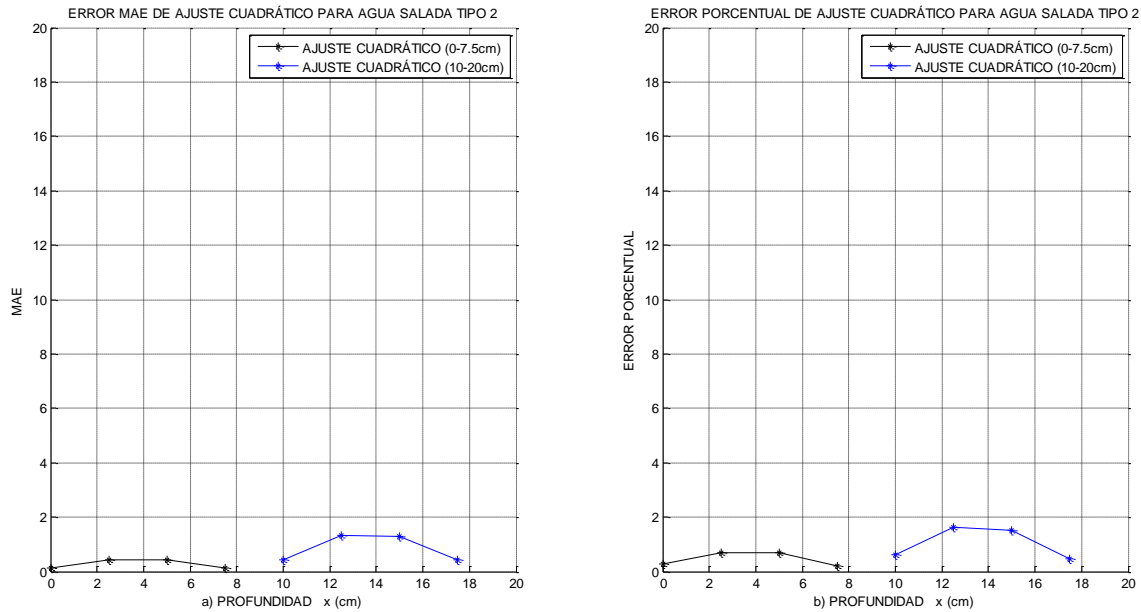


Figura 35: Errores al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 3:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.3.1.2 Ajuste Logarítmico

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.15 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.16.

$$P_{RX_{a_{salada}_{t2_1}}} = a_3 + 10 * b_3 * \log(x) \quad (5.15)$$

$$P_{RX_{a_{salada}_{t2_2}}} = a_3' + 10 * b_3' * \log(x) \quad (5.16)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_{salada}_{t2_1}}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_{salada}_{t2_2}}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_3 y b_3 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.

- a'_3 y b'_3 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 36 se aprecia el ajuste logarítmico mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab®*.

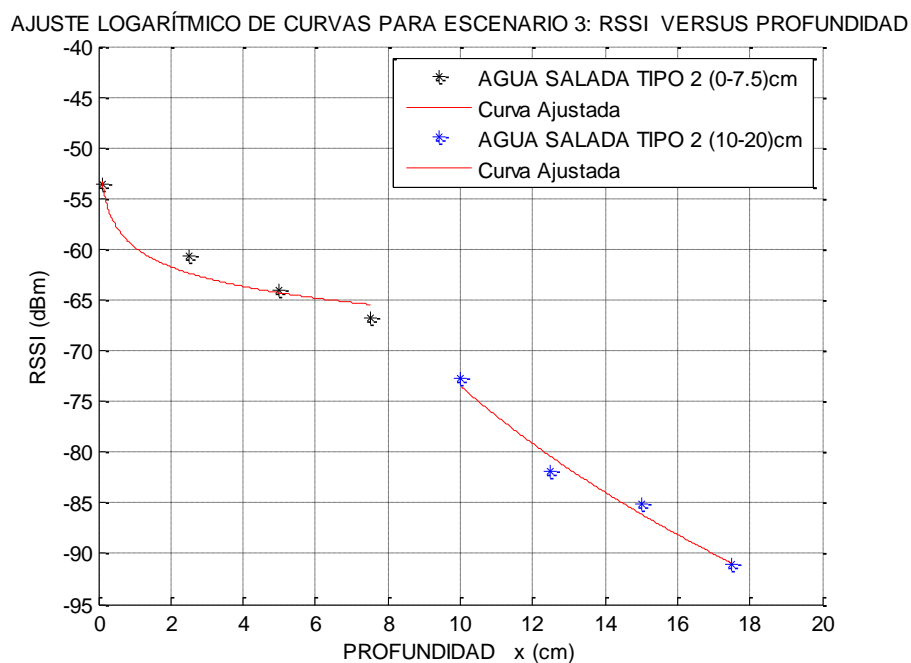


Figura 36: Ajuste logarítmico de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 3.

Luego de realizar el ajuste logarítmico, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste logarítmico son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a_3 = -59.74, \quad b_3 = -0.6509$$

Segundo Intervalo:

$$a'_3 = -1.507, \quad b'_3 = -7.191$$

En la Figura 37 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 3. Para este tipo de ajuste, no se encuentra una diferencia muy notable entre los errores del primer y segundo intervalo.

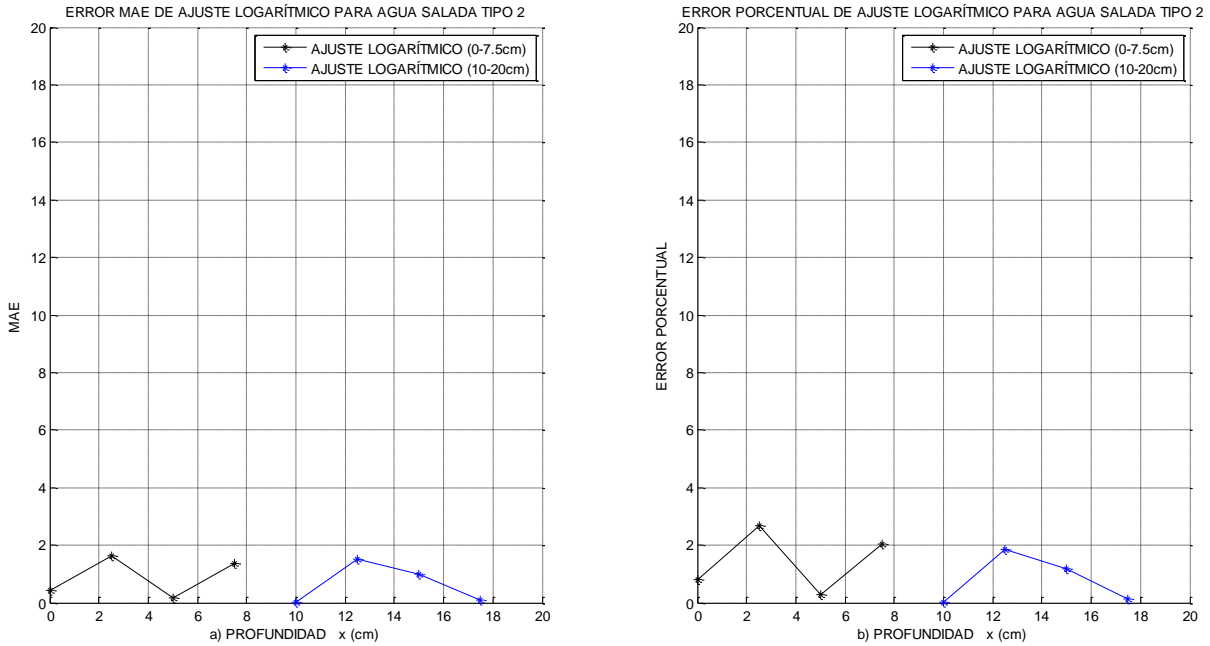


Figura 37: Errores al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 3:
a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.3.1.3 Ajuste Exponencial

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.17 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.18.

$$P_{RX_{a_salada_t2_1}} = a_3 * e^{(b_3 * x)} \quad (5.17)$$

$$P_{RX_{a_salada_t2_2}} = a_3' * e^{(b_3' * x)} \quad (5.18)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_salada_t2_1}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.

- $P_{RX_{a_salada_t2_2}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_3 y b_3 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.
- a'_3 y b'_3 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- e : Es el número correspondiente a Euler.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 38 se aprecia el ajuste exponencial mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab®*.

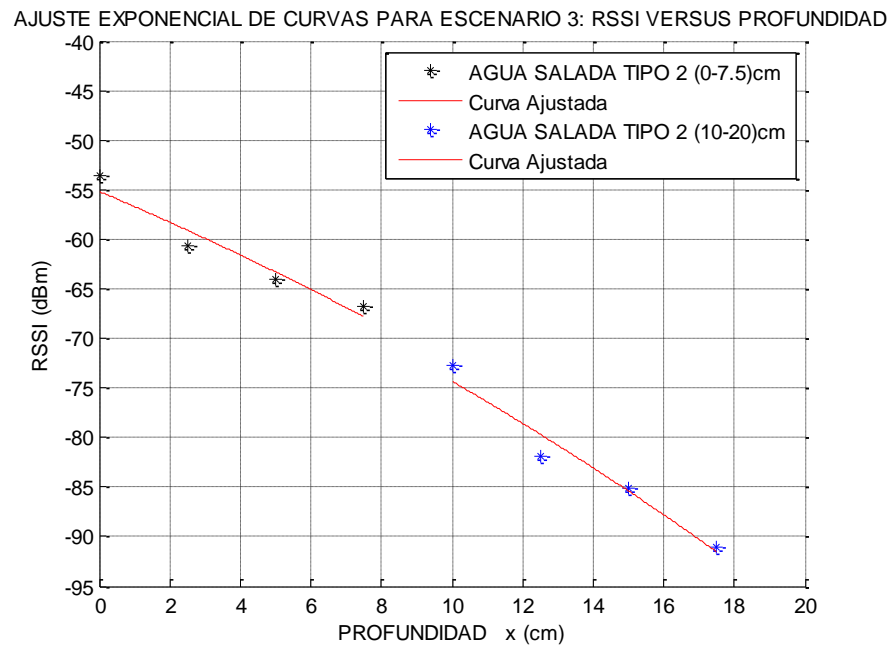


Figura 38: Ajuste exponencial de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 3.

Luego de realizar el ajuste de las curvas, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste exponencial son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a_3 = -55.14, \quad b_3 = 0.02754$$

Segundo Intervalo:

$$a_3' = -56.28, \quad b_3' = 0.02776$$

En la Figura 39 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste exponencial para el escenario 3. En el primer intervalo los errores de ajuste son ligeramente mayores que los del segundo intervalo.

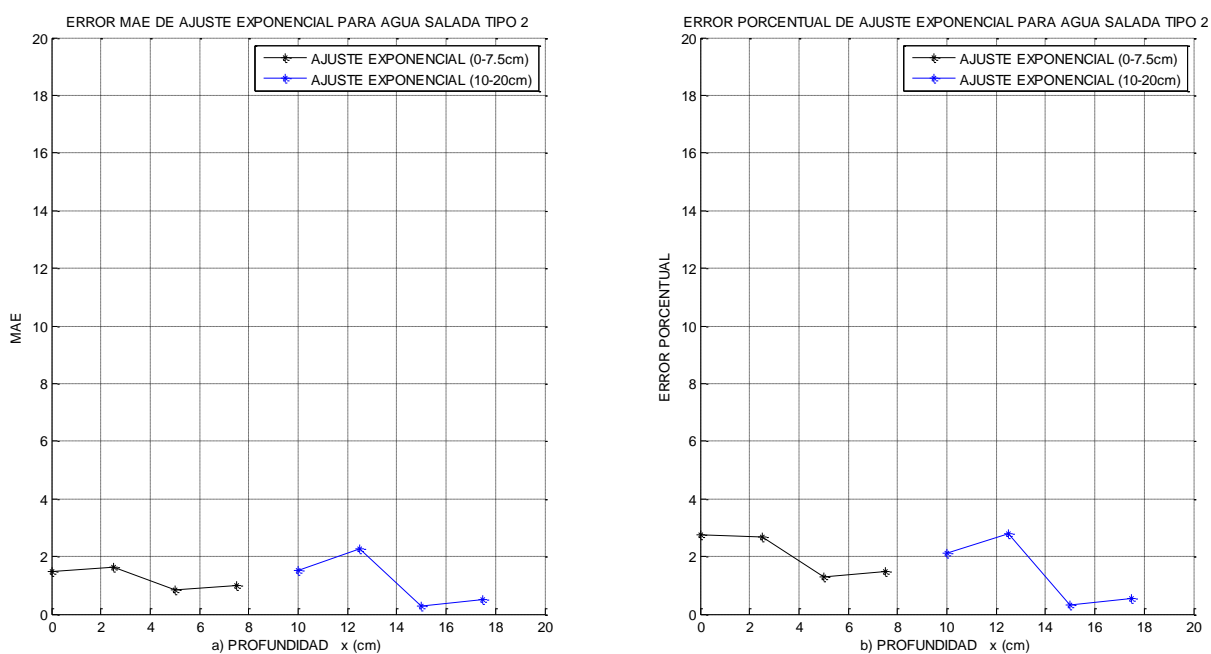


Figura 39: Errores al realizar el ajuste exponencial para el escenario 3:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.3.2 Varianza y Desviación Estándar

Dado que se realizaron pruebas con cinco números de muestras distintos, se presenta una gráfica que expone el comportamiento de la varianza y de la desviación estándar al permutar el número de muestras en este escenario.

Como se puede apreciar en la Figura 40, el peor desempeño de varianza y de desviación estándar se presenta al utilizar 200 muestras para la adquisición de datos, mientras que el mejor desempeño se obtuvo al utilizar 400 muestras.

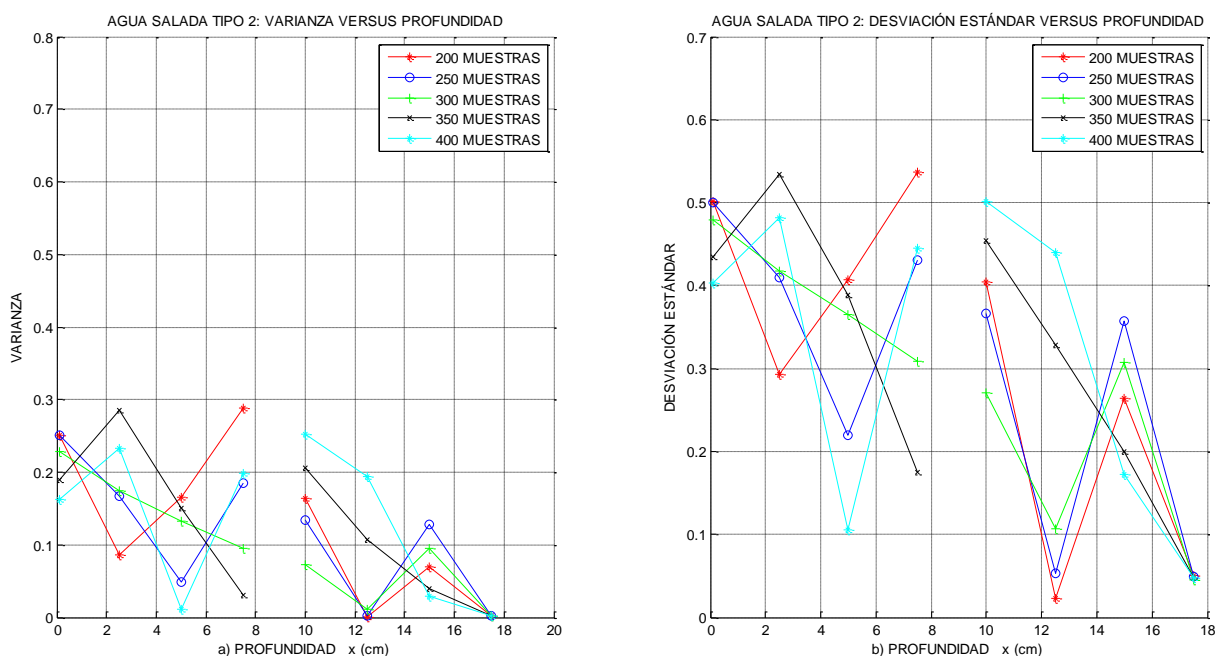


Figura 40: Variación espacial de: a) Varianza versus Profundidad, b) Desviación Estándar versus Profundidad, para el escenario 3.

5.4 Escenario 4: Agua Salada Tipo 3

El cuarto escenario fue realizado en agua salada con conductividad 7 [mS/cm]. En la Figura 41 se observa el comportamiento de la variable RSSI en función de la Profundidad. Como se mencionó, para cada profundidad de sumersión de la mota móvil, se realizaron diez iteraciones con cada número de muestras utilizado en los distintos niveles de profundidad. Los valores presentados en la Figura 41 corresponden al promedio de los resultados obtenidos de todos los números de muestras para cada nivel profundidad.

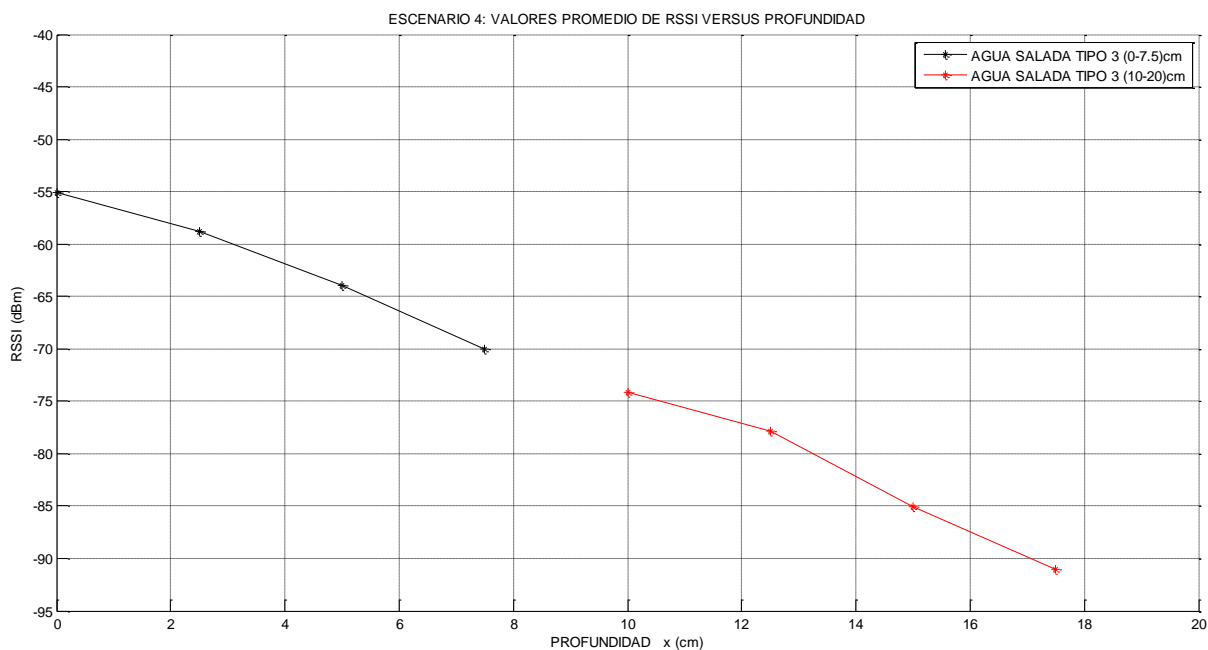


Figura 41: Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para el escenario 4.

Como se puede observar en la Figura 41, los dos intervalos poseen una tendencia logarítmica decreciente similar a los resultados anteriores.

5.4.1 Ajuste de RSSI versus Profundidad para los dos intervalos

Con los datos obtenidos de la Figura 5.26, se procedió a realizar el ajuste de las curvas para cada intervalo por separado. Se realizarán tres distintos tipos de ajustes para establecer cuál es el ajuste que mejor describe el comportamiento de la red para este escenario. Para determinar cuál es el ajuste óptimo para cada intervalo, se experimentará con ajuste cuadrático, logarítmico y exponencial para posteriormente en base a una comparación, establecer cuál es el óptimo para realizar el modelamiento.

5.4.1.1 Ajuste Cuadrático

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.19 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.20.

$$P_{RX_{a_salada_t3_1}} = a_4 * x^2 + b_4 * x + c_4 \quad (5.19)$$

$$P_{RX_{a_salada_t3_2}} = a_4' * x^2 + b_4' * x + c_4' \quad (5.20)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_salada_t3_1}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_salada_t3_2}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_4, b_4 y c_4 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.
- a_4', b_4' y c_4' : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 42 se aprecia el ajuste cuadrático para el cuarto escenario mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab*®.

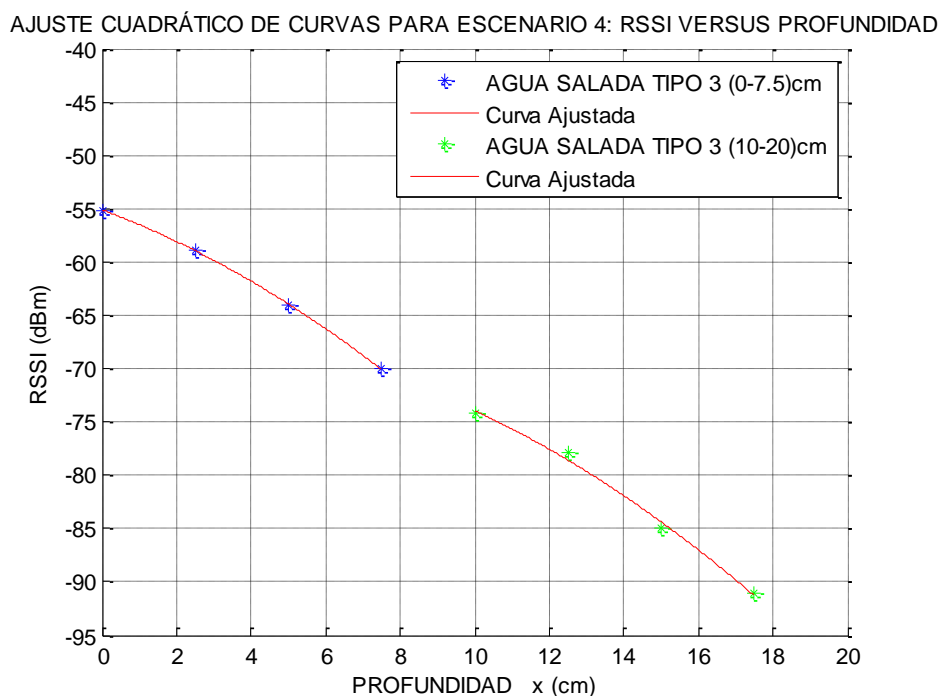


Figura 42: Ajuste cuadrático de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 4.

Luego de realizar el ajuste de las curvas, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste cuadrático son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a_4 = -0.09215, \quad b_4 = -1.302, \quad c_4 = -55.08$$

Segundo Intervalo:

$$a_4' = -0.09187, \quad b_4' = 0.2184, \quad c_4' = -66.92$$

En la Figura 43 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 4. Para este escenario, con el ajuste cuadrático se

observa que los errores del segundo intervalo son más altos que los del primer intervalo.

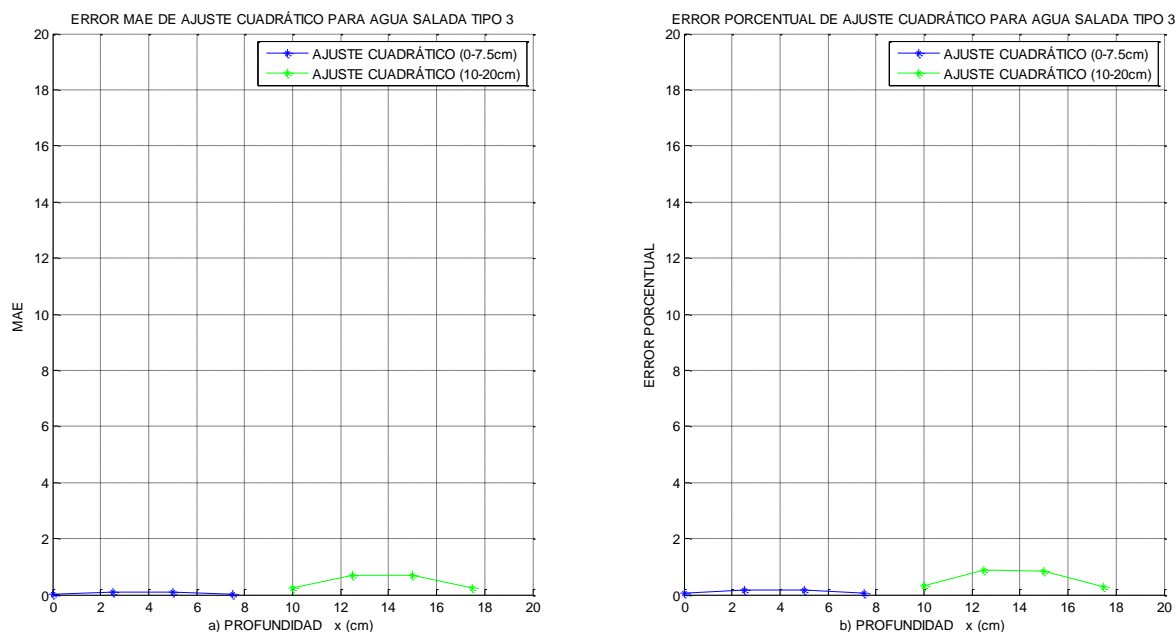


Figura 43: Errores al realizar el ajuste cuadrático para el escenario 4:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.4.1.2 Ajuste Logarítmico

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.21 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.22.

$$P_{RX_{a_salada_t3_1}} = a_4 + 10 * b_4 * \log(x) \quad (5.21)$$

$$P_{RX_{a_salada_t3_2}} = a_4' + 10 * b_4' * \log(x) \quad (5.22)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_salada_t3_1}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.

- $P_{RX_{a_salada_t3_2}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_4 y b_4 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.
- a'_4 y b'_4 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 44 se aprecia el ajuste logarítmico mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab®*.

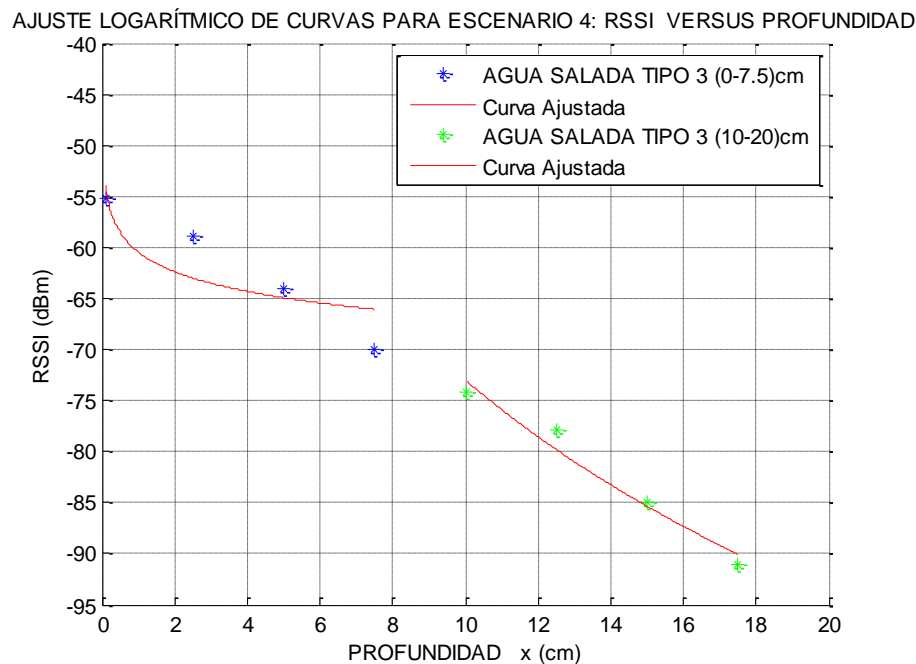


Figura 44: Ajuste logarítmico de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 4.

Luego de realizar el ajuste logarítmico, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste logarítmico son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a_4 = -60.42, \quad b_4 = -0.6446$$

Segundo Intervalo:

$$a_4' = -2.603, \quad b_4' = -7.033$$

En la Figura 45 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 4. Para este tipo de ajuste, no se encuentra una diferencia muy notable entre los errores del primer y segundo intervalo.

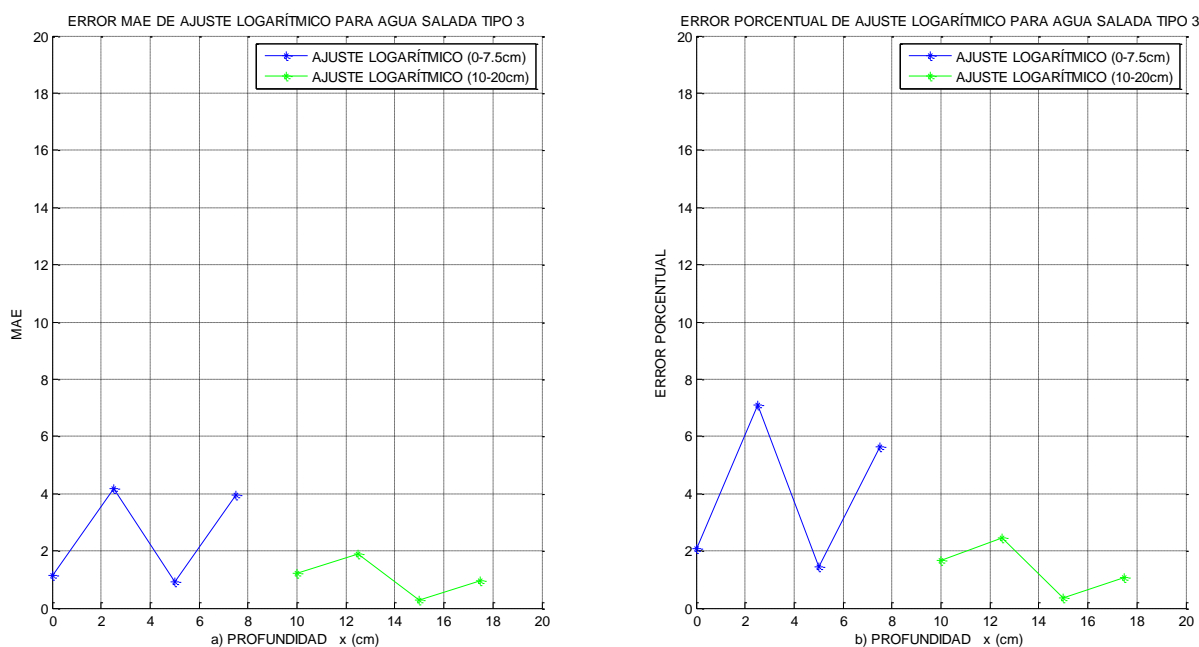


Figura 45: Errores al realizar el ajuste logarítmico para el escenario 4:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.4.1.3 Ajuste Exponencial

Para este tipo de ajuste se utilizará la ecuación 5.17 para realizar el ajuste del primer intervalo, mientras que para el segundo intervalo se utilizará la ecuación 5.18.

$$P_{RX_{a_{salada_t3_1}}} = a_4 * e^{(b_4 * x)} \quad (5.23)$$

$$P_{RX_{a_salada_t3_2}} = a_4' * e^{(b_4' * x)} \quad (5.24)$$

Dónde:

- $P_{RX_{a_salada_t3_1}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el primer intervalo.
- $P_{RX_{a_salada_t3_2}}$: corresponde a la potencia de recepción desde el transmisor hacia el receptor en [dB] para el segundo intervalo.
- a_4 y b_4 : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el primer intervalo.
- a_4' y b_4' : son constantes obtenidas a partir del ajuste con *curve fitting* por medio de *Matlab®* para el segundo intervalo.
- e : Es el número correspondiente a Euler.
- x : es la profundidad en centímetros (0 – 20).

En la Figura 46 se aprecia el ajuste exponencial mediante la herramienta *curve fitting* de *Matlab®*.

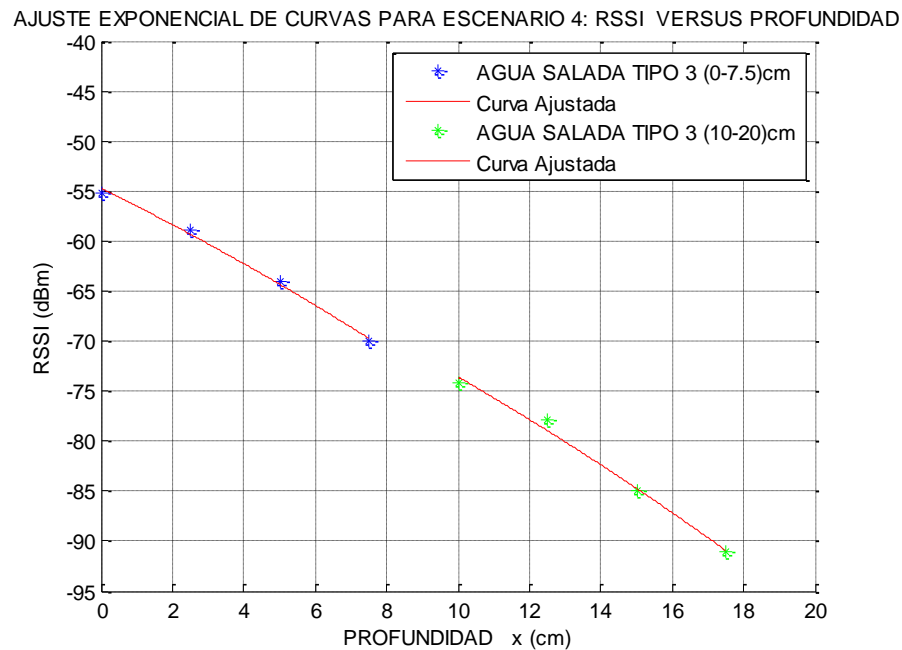


Figura 46: Ajuste exponencial de RSSI promedio versus Profundidad para el escenario 4.

Luego de realizar el ajuste de las curvas, los coeficientes obtenidos al utilizar el ajuste exponencial son los siguientes:

Primer Intervalo:

$$a_4 = -54.67, \quad b_4 = 0.03237$$

Segundo Intervalo:

$$a_4' = -55.41, \quad b_4' = 0.02828$$

En la Figura 47 se observan los errores MAE y porcentual al realizar el ajuste exponencial para el escenario 4. En el segundo intervalo los errores de ajuste son ligeramente mayores que los del primer intervalo.

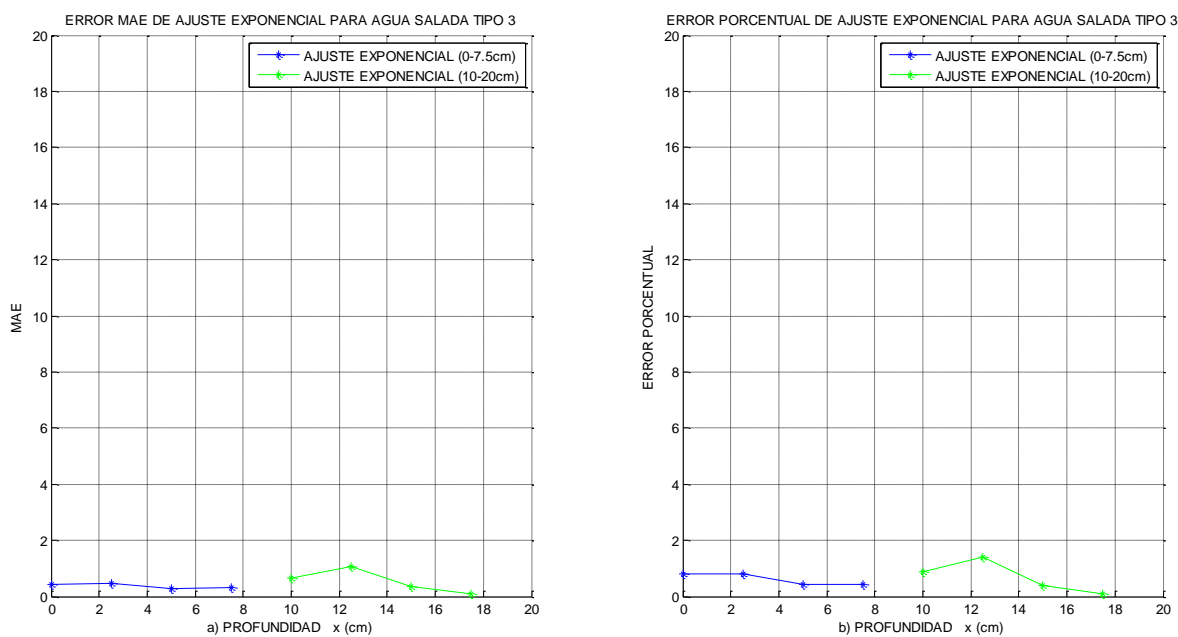


Figura 47: Errores al realizar el ajuste exponencial para el escenario 4:

a) Error MAE, b) Error Porcentual

5.4.2 Varianza y Desviación Estándar

Dado que se realizaron pruebas con cinco números de muestras distintos, se presenta una gráfica que expone el comportamiento de la varianza y de la desviación estándar al permutar el número de muestras en este escenario.

Como se puede apreciar en la Figura 48, el peor desempeño de varianza y de desviación estándar se presenta al utilizar 250 muestras para la adquisición de datos, mientras que el mejor desempeño se obtuvo al utilizar 400 muestras.

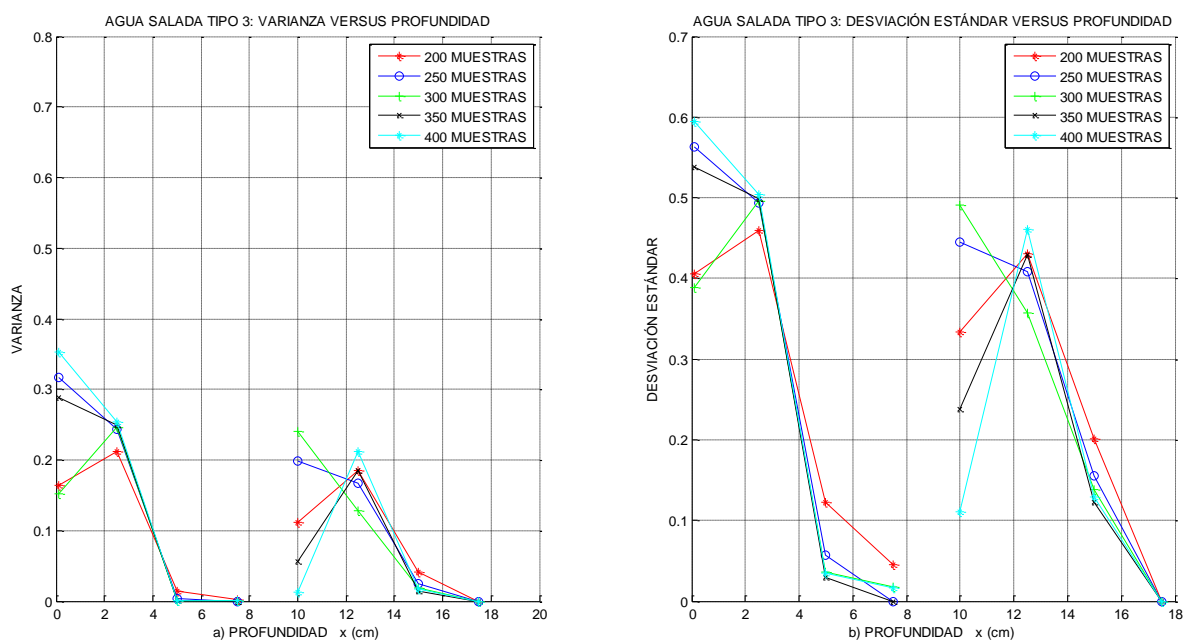


Figura 48: Variación espacial de: a) Varianza versus Profundidad, b) Desviación Estándar versus Profundidad, para el escenario 4.

5.5 Comparación entre los distintos tipos de ajuste de curvas

En esta sección se realizará un análisis comparativo de los errores obtenidos al realizar cada tipo de ajuste de curvas para cada escenario. Se determinará cual es el ajuste óptimo para cada escenario e intervalo en función de los errores obtenidos al realizar dichos ajustes.

5.5.1 Escenario 1

En la Figura 49 se muestran los errores obtenidos luego de realizar los tres tipos de ajuste de curvas para el primer escenario.

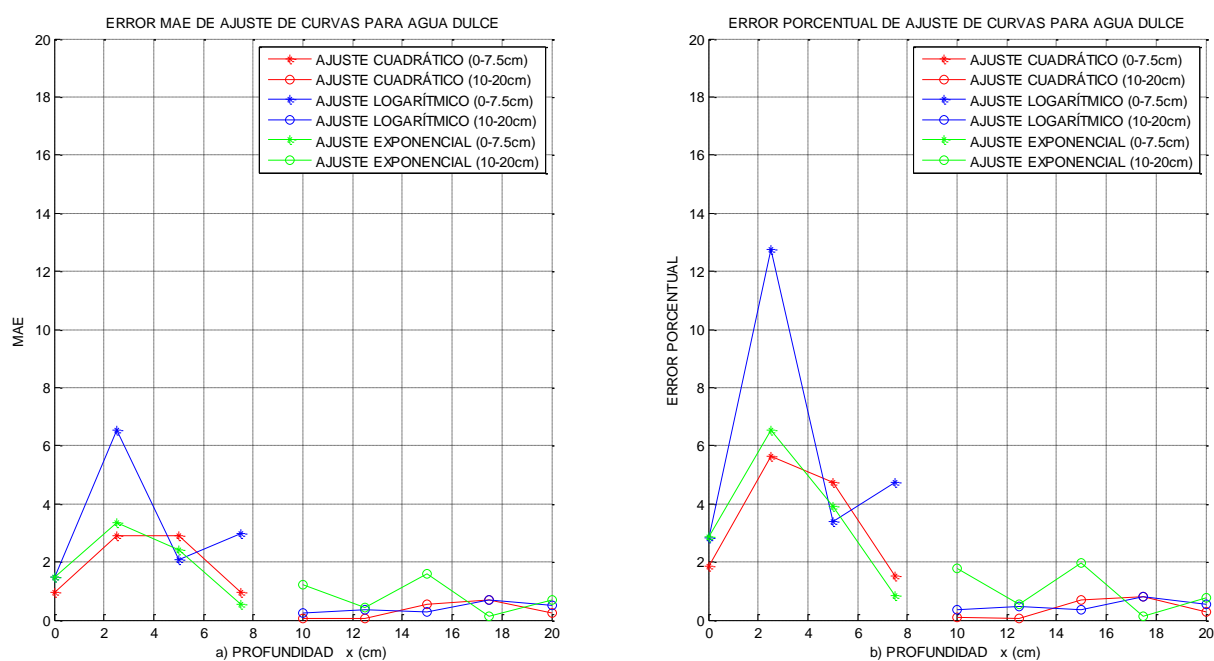


Figura 49: Comparación de errores para cada tipo de ajuste:

a) Error MAE, b) Error porcentual

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos al realizar cada tipo de ajuste para el primer escenario.

Tabla 6

Errores MAE y Porcentual para cada ajuste en el escenario 1.

AGUA DULCE						
PROFUNDIDAD	ERROR MAE			ERROR PORCENTUAL		
	CUADRÁTICO	LOGARÍTMICO	EXPONENCIAL	CUADRÁTICO	LOGARÍTMICO	EXPONENCIAL
0	0.96337952	1.463379524	1.48337952	1.853601842	2.815632805	2.854114036
2.5	2.89435524	6.534355238	3.35435524	5.652414404	12.76100568	6.550752863
5	2.89692381	2.07692381	2.40692381	4.719890849	3.383883845	3.921545201
7.5	0.96455571	2.985444286	0.52455571	1.526305766	4.724144785	0.830053046
10	0.07314524	0.236854762	1.22314524	0.106739526	0.345637871	1.784913731

12.5	0.04978381	0.33978381	0.42021619	0.066289836	0.452440521	0.559540586
15	0.5586381	0.298638095	1.6086381	0.684784783	0.366073892	1.971886437
17.5	0.69688	0.69688	0.11688	0.814843986	0.814843986	0.136664799
20	0.25715619	0.49715619	0.70284381	0.282598051	0.546342558	0.772379973

Se observa que para este escenario tanto para el primero como para el segundo intervalo, el ajuste cuadrático es el que mejor se acopla a los valores obtenidos de RSSI y por ende es el que presenta los errores más bajos. Por esta razón se procederá a realizar el modelamiento de este escenario con dicho ajuste.

5.5.2 Escenario 2

En la Figura 50 se muestran los errores obtenidos luego de realizar los tres tipos de ajuste de curvas para el segundo escenario.

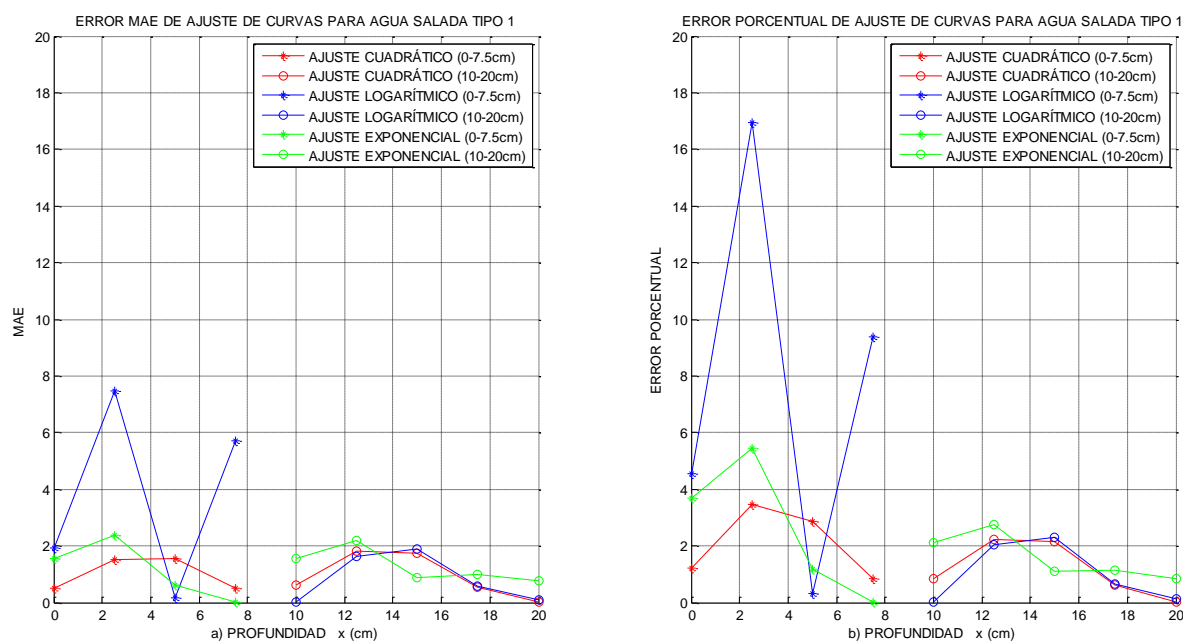


Figura 50: Comparación de errores para cada tipo de ajuste:

a) Error MAE, b) Error porcentual

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos al realizar cada tipo de ajuste para el segundo escenario.

Tabla 7

Errores MAE y Porcentual para cada ajuste en el escenario 2.

AGUA SALADA TIPO 1						
PROFUNDIDAD	ERROR MAE			ERROR PORCENTUAL		
	CUADRÁTICO	LOGARÍTMICO	EXPONENCIAL	CUADRÁTICO	LOGARÍTMICO	EXPONENCIAL
0	0.51127	1.91127	1.55127	1.216403882	4.547257316	3.690752147
2.5	1.52828048	7.458280476	2.38828048	3.476389224	16.96539753	5.432636635
5	1.53646587	0.163534127	0.62646587	2.861924034	0.304609596	1.166897206
7.5	0.50908762	5.710912381	0.00091238	0.834694219	9.363546401	0.001495928
10	0.60880048	0.00119952	1.53880048	0.838207938	0.001651522	2.11864941
12.5	1.80667937	1.636679365	2.20667937	2.246088954	2.03474258	2.743374524
15	1.75548	1.87548	0.89548	2.150940788	2.297973449	1.097206723
17.5	0.53535667	0.575356667	1.00535667	0.608184608	0.653626056	1.142121666
20	0.03	0.11	0.78	0.032967033	0.120879121	0.857142857

Se observa que para este escenario en el primer intervalo, el ajuste cuadrático presenta el mejor desempeño, mientras que para el segundo intervalo, el ajuste logarítmico es el que presenta los errores más bajos. Por esta razón se procederá a realizar el modelamiento de este escenario con ajuste cuadrático para el primer intervalo y ajuste logarítmico para el segundo intervalo.

5.5.3 Escenario 3

En la Figura 51 se muestran los errores obtenidos luego de realizar los tres tipos de ajuste de curvas para el tercer escenario.

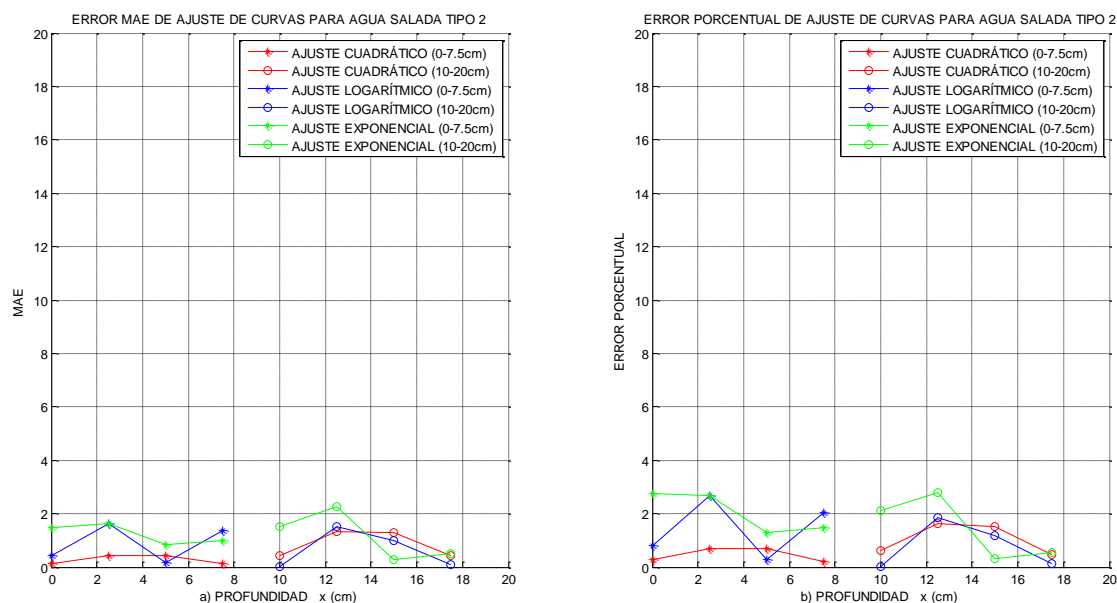


Figura 51: Comparación de errores para cada tipo de ajuste:

a) Error MAE, b) Error porcentual

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos al realizar cada tipo de ajuste para el tercer escenario.

Tabla 8

Errores MAE y Porcentual para cada ajuste en el escenario 3.

AGUA SALADA TIPO 2						
PROFUNDIDAD	ERROR MAE			ERROR PORCENTUAL		
	CUADRÁTICO	LOGARÍTMICO	EXPONENCIAL	CUADRÁTICO	LOGARÍTMICO	EXPONENCIAL
0	0.14121429	0.428785714	1.48121429	0.263170864	0.799096939	2.760431997
2.5	0.43180571	1.628194286	1.63180571	0.711355626	2.682283116	2.688232567
5	0.43349476	0.173494762	0.83650524	0.676104785	0.27059298	1.304664434
7.5	0.14204429	1.372044286	0.98795571	0.212634645	2.053895656	1.478930354
10	0.43677476	0.00322524	1.52677476	0.600268554	0.004432514	2.098278017
12.5	1.31998524	1.529985238	2.27998524	1.611310398	1.867658098	2.783185609
15	1.29945429	0.999454286	0.27945429	1.527322467	1.174715415	0.328458507
17.5	0.43771286	0.107712857	0.49228714	0.481015232	0.118368752	0.540988476

Se observa que para este escenario en el primer intervalo, el ajuste cuadrático presenta el mejor desempeño, mientras que para el segundo intervalo, el ajuste logarítmico es el que presenta los errores más bajos. Por esta razón se procederá a realizar el modelamiento de este escenario con ajuste cuadrático para el primer intervalo y ajuste logarítmico para el segundo intervalo.

5.5.4 Escenario 4

En la Figura 52 se muestran los errores obtenidos luego de realizar los tres tipos de ajuste de curvas para el cuarto escenario.

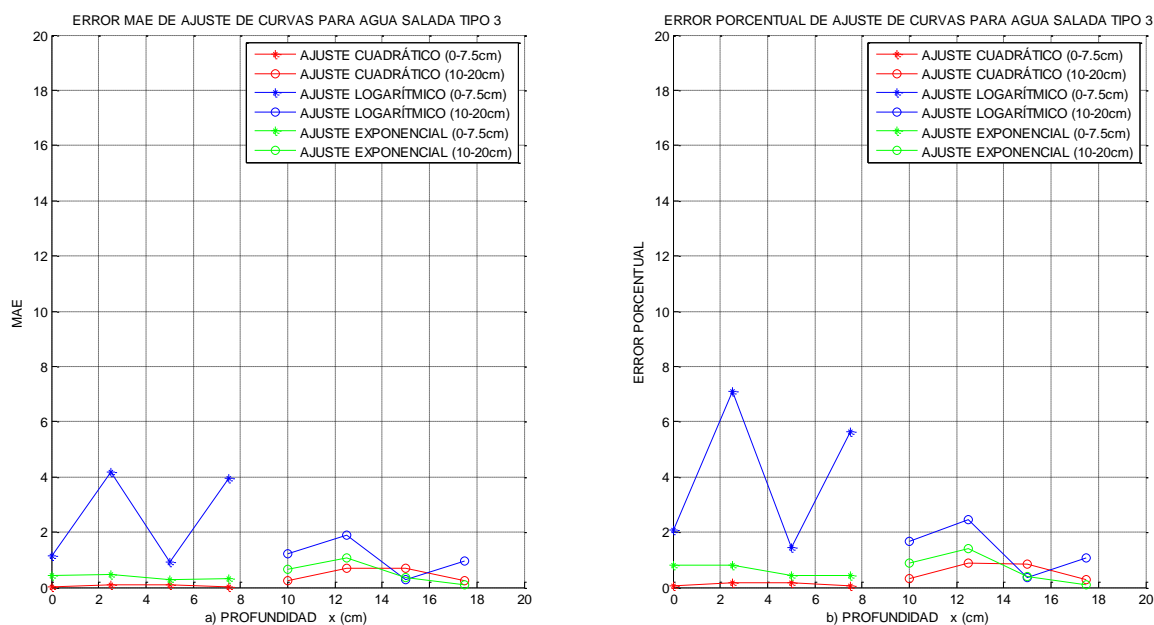


Figura 52: Comparación de errores para cada tipo de ajuste:

a) Error MAE, b) Error porcentual

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos al realizar cada tipo de ajuste para el cuarto escenario.

Tabla 9

Errores MAE y Porcentual para cada ajuste en el escenario 4.

AGUA SALADA TIPO 3						
PROFUNDIDAD	ERROR MAE			ERROR PORCENTUAL		
	CUADRÁTICO	LOGARÍTMICO	EXPONENCIAL	CUADRÁTICO	LOGARÍTMICO	EXPONENCIAL
0	0.03733857	1.147338571	0.44733857	0.067743783	2.081629123	0.81161134
2.5	0.10350095	4.163500952	0.46350095	0.175972647	7.07879765	0.788045799
5	0.0970719	0.922928095	0.2829281	0.151681783	1.442141129	0.442095383
7.5	0.03001667	3.939983333	0.29998333	0.042880967	5.628548959	0.428547716
10	0.23138333	1.231383333	0.64138333	0.311999749	1.660410416	0.864848121
12.5	0.69914381	1.89914381	1.07914381	0.89817076	2.439777647	1.386346275
15	0.7038219	0.296178095	0.3438219	0.827793769	0.348347191	0.404383022
17.5	0.24	0.97	0.1	0.263736264	1.065934066	0.10989011

Se observa que para este escenario tanto para el primero como para el segundo intervalo, el ajuste cuadrático es el que mejor se acopla a los valores obtenidos de RSSI y por ende es el que presenta los errores más bajos. Por esta razón se procederá a realizar el modelamiento de este escenario con dicho ajuste.

5.6 Modelamiento de los distintos escenarios

Como se observa en las Figuras 5.3, 5.11, 5.19 y 5.27, se concluye que para establecer un modelo general del canal de propagación subacuático se debe realizar dos modelos independientes para cada escenario debido a la existencia de dos intervalos. Se debe analizar el primer intervalo de los cuatro escenarios para posteriormente analizar el segundo intervalo de los cuatro escenarios.

5.6.1 Modelamiento del primer intervalo para los cuatro escenarios

En la Tabla 10 se listan los valores de las constantes a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 , c_2 , a_3 , b_3 , c_3 , a_4 , b_4 y c_4 , las cuales fueron obtenidas desde *Matlab®* al realizar el ajuste de las curvas por medio de la herramienta *curve fitting*. Usando las ecuaciones 5.1, 5.7, 5.13 y 5.19 se realizó un ajuste cuadrático, con lo que se representó la potencia de recepción en función de los valores de RSSI en la comunicación inalámbrica subacuática.

Tabla 10

Constantes de ajuste para el primer intervalo de los cuatro escenarios.

ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4
a1 = -0.1035	a2 = - 0.215	a3 = 0.1743	a4 = - 0.09215
b1 = -0.9776	b2 = - 1.052	b3 = - 3.021	b4 = - 1.302
c1 = -51.01	c2 = - 41.52	c3 = - 53.8	c4 = - 55.08

Por tanto, las ecuaciones de potencia de recepción en función de los valores de RSSI para los distintos escenarios en el primer intervalo quedarán así.

- Escenario 1: $P_{RX_{a_dulce}} = -0.1035 * x^2 - 0.9776 * x - 51.01$ (5.25)

- Escenario 2: $P_{RX_{a_salada_t1}} = -0.215 * x^2 - 1.052 * x - 41.52$ (5.26)

- Escenario 3: $P_{RX_{a_salada_t2}} = 0.1743 * x^2 - 3.021 * x - 53.8$ (5.27)

- Escenario 4: $P_{RX_{a_salada_t3}} = -0.09215 * x^2 - 1.302 * x - 55.08$ (5.28)

La propagación de la señal en el agua depende de las pérdidas producidas en el camino. Se debe tomar en cuenta la ecuación 5.29, que representa las pérdidas de propagación para los distintos escenarios:

$$\begin{aligned}
 P_{RX}(dBm) &= P_{TX}(dBm) - L_{escenario}(dB) + G_{TX}(dBi) + G_{RX}(dBi) \\
 L_{escenario}(dB) &= P_{TX}(dBm) - P_{RX}(dBm) + G_{TX}(dBi) + G_{RX}(dBi)
 \end{aligned}
 \tag{5.29}$$

Dónde:

- P_{RX} : potencia de recepción.
- P_{TX} : potencia de transmisión.
- $L_{escenario}$: pérdidas en el trayecto desde el transmisor hacia el receptor para cada escenario.
- G_{TX} : ganancia de la antena transmisora.
- G_{RX} : ganancia de la antena receptora.

Se reemplazará en la ecuación 5.29 los valores de las ecuaciones 5.25, 5.26, 5.27 y 5.28, así como también los valores de P_{TX}, G_{TX} y G_{RX} que se especifican en la Tabla 3. Reemplazando estos valores se obtienen las siguientes ecuaciones que representan las pérdidas de propagación para cada escenario subacuático.

$$\begin{aligned} \text{Escenario 1: } L_{a_dulce} &= 3 + 0.1035 * x^2 + 0.9776 * x + 51.01 + 2 + 2 \\ L_{a_dulce} &= \mathbf{0.1035 * x^2 + 0.9776 * x + 58.01} \quad \mathbf{(5.30)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Escenario 2: } L_{a_salada_t1} &= 3 + 0.215 * x^2 + 1.052 * x + 41.52 + 2 + 2 \\ L_{a_salada_t1} &= \mathbf{0.215 * x^2 + 1.052 * x + 48.52} \quad \mathbf{(5.31)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Escenario 3: } L_{a_salada_t2} &= 3 - 0.1743 * x^2 + 3.021 * x + 53.8 + 2 + 2 \\ L_{a_salada_t2} &= \mathbf{-0.1743 * x^2 + 3.021 * x + 60.8} \quad \mathbf{(5.32)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Escenario 4: } L_{a_salada_t3} &= 3 + 0.09215 * x^2 + 1.302 * x + 55.08 + 2 + 2 \\ L_{a_salada_t3} &= \mathbf{0.09215 * x^2 + 1.302 * x + 62.08} \quad \mathbf{(5.33)} \end{aligned}$$

5.6.2 Modelamiento del segundo intervalo para los cuatro escenarios

Para esta sección se realizan los mismos cálculos especificados en la sección anterior, con la diferencia de que esta vez serán para el segundo intervalo. En la Tabla 11 se listan los valores de las constantes $a1', b1', c1', a2', b2', a3', b3', a4', b4'$ y $c4'$ las cuales fueron obtenidas desde *Matlab*® al realizar el ajuste de las curvas por medio de la herramienta *curve fitting*. Usando las ecuaciones 5.2 y 5.20 se realizó un ajuste cuadrático, mientras que con las ecuaciones 5.10 y 5.16 se realizó un ajuste logarítmico, con lo que se representó la potencia de recepción en función de los valores de RSSI para la comunicación inalámbrica subacuática.

Tabla 11

Constantes de ajuste del segundo intervalo de los cuatro escenarios.

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
$a1' = 0.05409$	$a2' = - 13.87$	$a3' = - 1.507$	$a4' = - 0.09187$
$b1' = - 3.837$	$b2' = - 5.919$	$b3' = - 7.191$	$b4' = - 0.2184$
$c1' = -35.63$			$c4' = - 66.92$

Por tanto, las ecuaciones de potencia de recepción en función de los valores de RSSI para los distintos escenarios en el segundo intervalo quedarán así.

- Escenario 1: $P_{RX_{a_{dulce}}} = 0.05409 * x^2 - 3.837 * x - 35.63$ (5.34)
- Escenario 2: $P_{RX_{a_{salada_{t1}}} = -13.87 - 10 * 5.919 * \log(x)$ (5.35)
- Escenario 3: $P_{RX_{a_{salada_{t2}}} = -1.507 - 10 * 7.191 * \log(x)$ (5.36)
- Escenario 4: $P_{RX_{a_{salada_{t3}}} = -0.09187 * x^2 - 0.2187 * x - 66.92$ (5.37)

Se reemplazará en la ecuación 5.29 los valores de las ecuaciones 5.34, 5.35, 5.36 y 5.37, así como también los valores de P_{TX}, G_{TX} y G_{RX} que se especifican en la Tabla 3. Reemplazando estos valores se obtienen las siguientes ecuaciones que representan las pérdidas de propagación para cada escenario subacuático.

$$\begin{aligned} \text{Escenario 1: } L_{a_{dulce}} &= 3 - 0.05409 * x^2 + 3.837 * x + 35.63 + 2 + 2 \\ L_{a_{dulce}} &= -0.05409 * x^2 + 3.837 * x + 42.63 \end{aligned} \quad (5.38)$$

$$\begin{aligned} \text{Escenario 2: } L_{a_{salada_{t1}} &= 3 + 13.87 + 10 * 5.919 * \log(x) + 2 + 2 \\ L_{a_{salada_{t1}} &= 20.87 + 59.19 * \log(x) \end{aligned} \quad (5.39)$$

$$\begin{aligned} \text{Escenario 3: } L_{a_{salada_{t2}} &= 3 + 1.507 + 10 * 7.191 * \log(x) + 2 + 2 \\ L_{a_{salada_{t2}} &= 8.507 + 71.91 * \log(x) \end{aligned} \quad (5.40)$$

Escenario 4: $L_{a_salada_t3} = 3 + 0.09187 * x^2 + 0.2187 * x + 66.92 + 2 + 2$

$$L_{a_salada_t3} = 0.09187 * x^2 + 0.2187 * x + 73.92 \quad (5.41)$$

5.7 Comparación entre los distintos escenarios

En esta sección se realizará una comparación de los distintos escenarios en función del RSSI, de la varianza y de la desviación estándar con los diferentes números de muestras con los que se realizaron las pruebas.

5.7.1 Comparación de valores de RSSI en función de la profundidad

En la Figura 53 se exponen los resultados correspondientes a la media de los valores obtenidos con 200, 250, 300, 350 y 400 iteraciones en función de cada nivel de profundidad para cada escenario de pruebas.

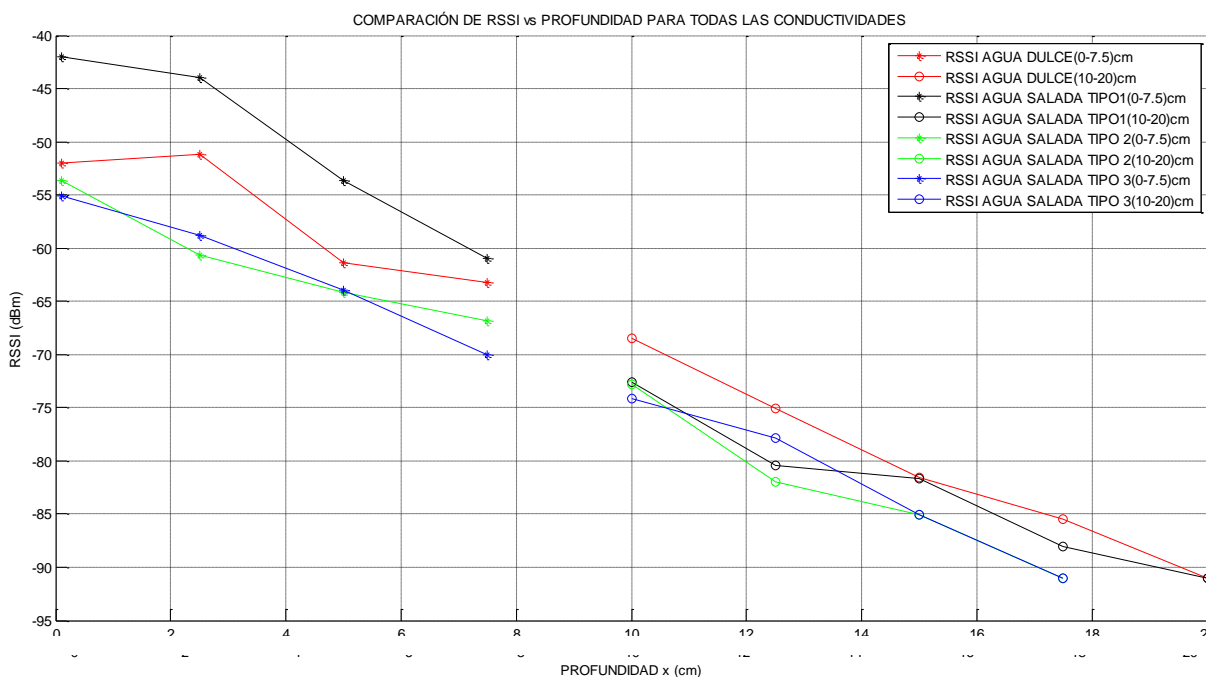


Figura 53: Variabilidad espacial de RSSI promedio en función de la profundidad para los distintos escenarios.

Los umbrales máximos de recepción alcanzados varían dependiendo del escenario. Se determina que los mejores desempeños en cuanto a la potencia de recepción se obtuvieron al trabajar con conductividades de 550[uS/cm] y 3[mS/cm], tanto por umbrales máximos de recepción como por valores de RSSI obtenidos.

5.7.2 Comparación de las pérdidas de propagación en función de la profundidad para todos los escenarios

En la Figura 54 se presentan los resultados obtenidos de las pérdidas de propagación en función de los niveles de profundidad para cada escenario de pruebas.

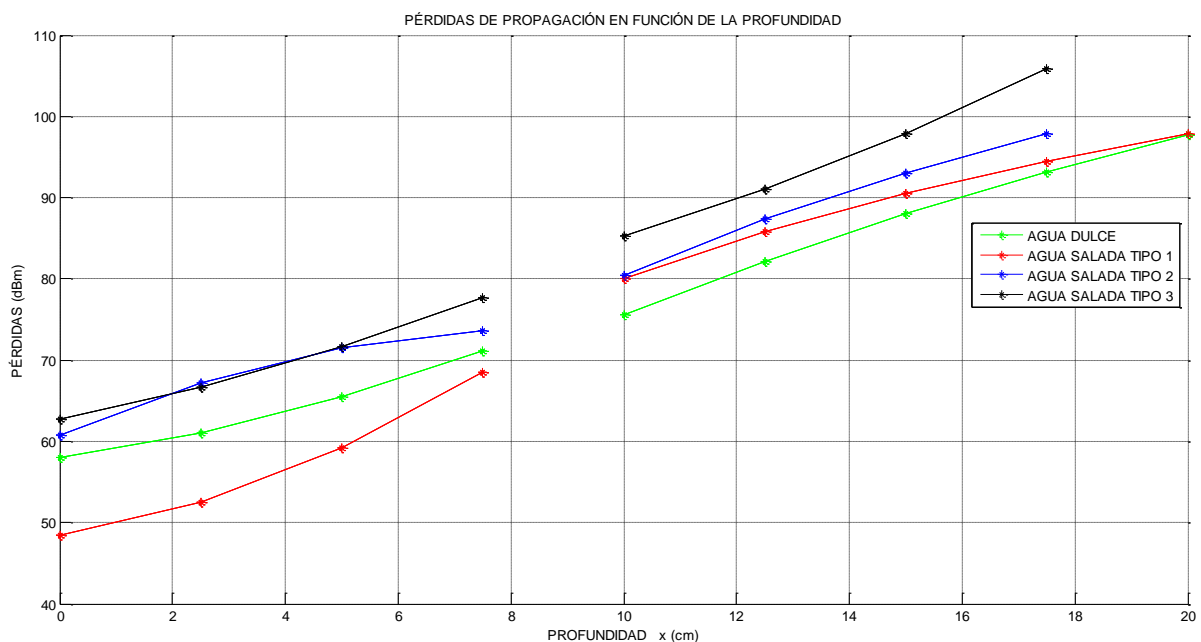


Figura 54: Pérdidas de propagación en función de la profundidad para los distintos escenarios.

Se puede observar claramente que los valores de pérdidas de propagación más altos se obtuvieron en el escenario 4 (agua salada tipo 3), mientras que los

mejores desempeños corresponden a los escenarios 1 y 2, los mismos que alcanzaron los máximos umbrales de recepción.

5.7.3 Comparación de la Varianza según los escenarios y número de muestras

En la Figura 55 se presentan los valores obtenidos de Varianza en función de la Profundidad para cada número de muestras utilizado en los distintos escenarios.

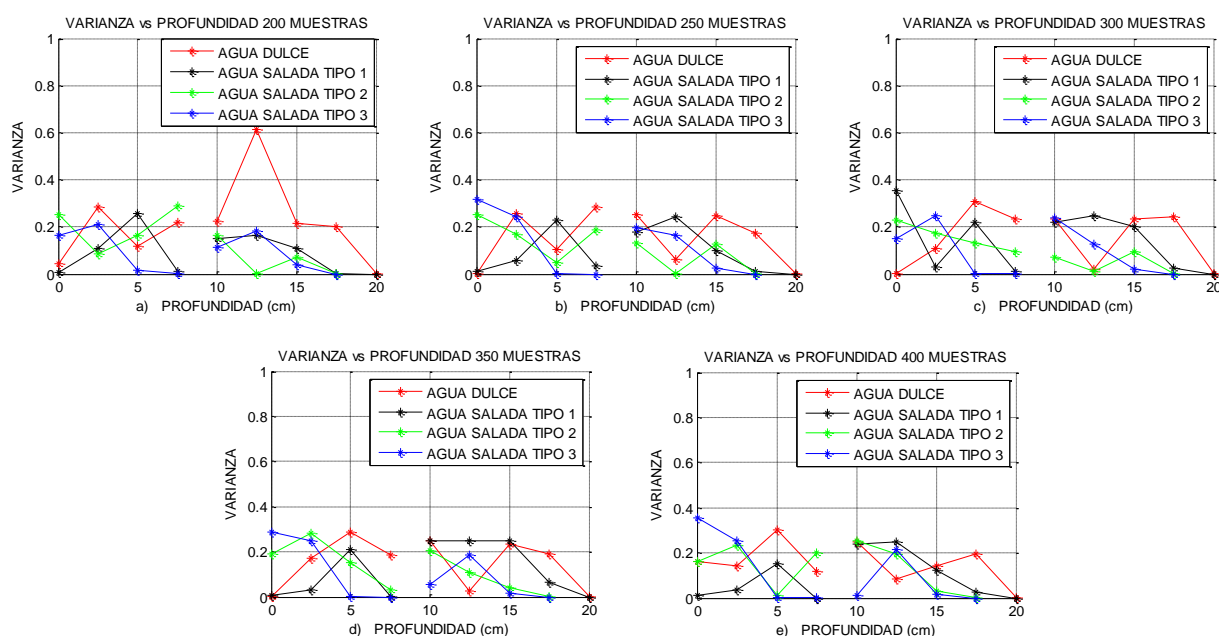


Figura 55: Variación espacial de valores de Varianza versus Profundidad para: a) 200 muestras, b) 250 muestras, c) 300 muestras, d) 350 muestras, e) 400 muestras

Como se puede observar en la Figura 55, el mejor desempeño de varianza se lo obtuvo al realizar las pruebas en el escenario 4, es decir en el agua salada con conductividad 7 [mS/cm], mientras que el peor desempeño se dio en el primer escenario que corresponde al agua dulce. Se aprecia el mismo comportamiento para todos los números de muestras.

5.7.4 Comparación de la Desviación Estándar según los escenarios y número de muestras

En la Figura 56 se presentan los valores obtenidos de la Desviación Estándar en función de la Profundidad para cada número de muestras utilizado en los distintos escenarios.

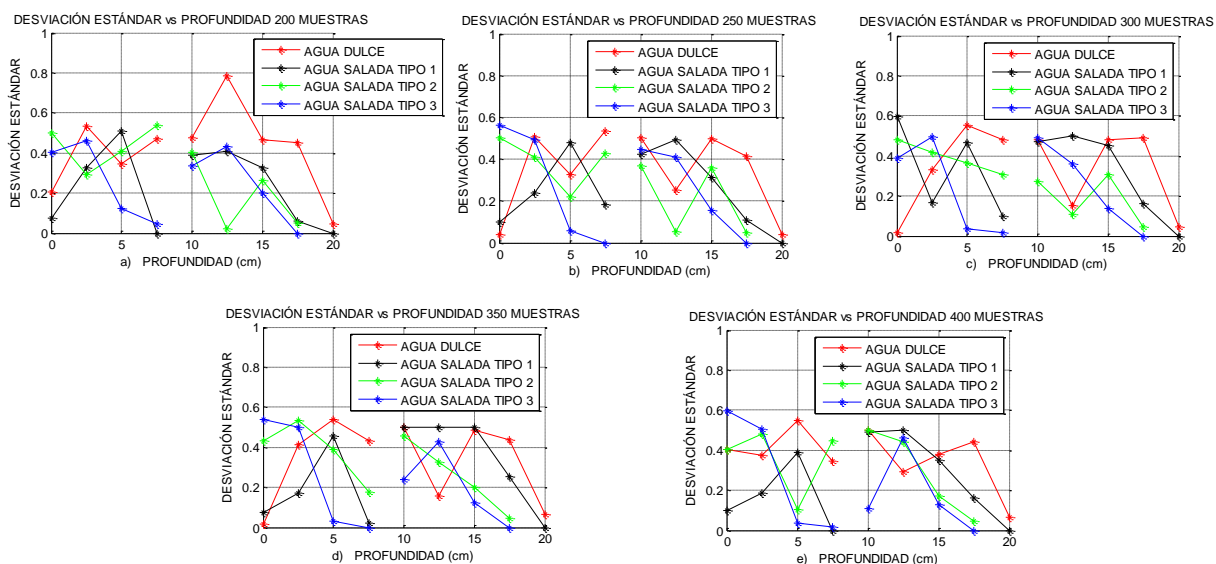


Figura 56: Variación espacial de valores de Desviación Estándar versus Profundidad para: a) 200 muestras, b) 250 muestras, c) 300 muestras, d) 350 muestras, e) 400 muestras

Como se aprecia en la Figura 56, el mejor desempeño de desviación estándar presentó al realizar las pruebas en el escenario 4, es decir en el agua salada con conductividad 7[mS/cm], mientras que el peor desempeño se dio en el primer escenario que corresponde al agua dulce. Se aprecia el mismo comportamiento para todos los números de muestras.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se realizaron pruebas subacuáticas de comunicación utilizando una red de sensores inalámbricos basados en *Zigbee*, los cuales operan en la banda ISM (2.4GHz). Estas pruebas fueron realizadas en cuatro escenarios distintos: agua dulce (550[uS/cm]), agua salada tipo 1 (3[mS/cm]), agua salada tipo 2 (5[mS/cm]) y agua salada tipo 3 (7[mS/cm]), donde se variaron los niveles de cloruro de sodio con el fin de alterar dichas conductividades para analizar el desempeño de la red al realizar estos cambios.
- Se alcanzó una distancia de 20 centímetros al variar la conductividad entre 550[uS/cm] y 3[mS/cm], por otro lado al cambiar la conductividad entre 5[mS/cm] y 7[mS/cm] se alcanzó una profundidad de 17,5 cm. Estos resultados muestran que la conductividad eléctrica del agua afecta en los niveles de profundidad máxima de la red como se observa en este trabajo.
- Se han obtenido las curvas de atenuación de la potencia de radiofrecuencia en la banda de 2,4 GHz bajo el estándar Zigbee en cuatro distintos escenarios subacuáticos. Esto constituye un aporte para futuras aplicaciones dentro de distintos campos tecnológicos, industriales, entre otros.

- Se ha conformado una base de datos correspondiente al modelamiento de un canal radioeléctrico subacuático, la cual está conformada por 510 000 muestras obtenidas por medio de mediciones en cuatro escenarios acuáticos distintos.
- El tiempo de adquisición de datos por cada iteración incrementa en relación de 12 segundos por cada 50 muestras, pero se comprobó que se mantiene constante para cada número de muestras sin importar la profundidad a la que se encuentre inmersa la mota, esto se da por la configuración establecida de 250 ms de periodo de muestreo al programar las motas.
- Se observó una discontinuidad entre los 7,5 y 10 centímetros de profundidad, por lo cual, se analizaron los resultados en dos intervalos independientes (0-7,5cm y 10-20cm) para cada uno de los cuatro escenarios acuáticos. Se despreciaron los valores de RSSI obtenidos dentro del rango de discontinuidad con el fin de evitar valores atípicos de RSSI que puedan alterar los valores reales.
- Fue posible obtener un modelo matemático de pérdidas de propagación del canal inalámbrico subacuático en la banda de 2,4 GHz empleando una red de sensores inalámbricos basados en Zigbee, el cual permite determinar las pérdidas de potencia en función de la profundidad. Después de comparar entre los modelos cuadrático, exponencial y logarítmico, se determinó que el modelo cuadrático fue el que presentó el mínimo error MAE y error relativo porcentual, por lo que se concluye que el modelo cuadrático es el que mejor se ajustó a las medidas encontradas.
- Las pérdidas de potencia más altas se registraron para el agua salada tipo 3 (7[mS/cm]) con un valor medio aproximado de 82,35 dBm, mientras que las pérdidas de potencia más bajas se registraron para el agua salada tipo 1

(3[mS/cm]) con un valor medio aproximado de 75,25 dBm. Se determinó que a medida que aumenta la profundidad de sumersión de las motas, se producirán mayores pérdidas de propagación.

- Tanto en agua dulce como en agua salada, se observa que las pérdidas de potencia siguen el mismo comportamiento de exponencial decreciente para el primer y segundo intervalo. El patrón de comportamiento de la curva de pérdidas de potencia es muy similar a la del canal radioeléctrico en el aire.
- Los valores más altos de varianza y desviación estándar obtenidos al estimar las pérdidas del canal radioeléctrico en el agua, que se obtuvieron en el agua salada tipo 3 (7 [mS/cm]) con una desviación estándar media 0.2313 de y una varianza media de 0.1063, mientras que los valores más bajos se presentaron en el agua dulce (550 [uS/cm]) con una desviación estándar media de 0.3721 y una varianza media de 0.1558. Se atribuye este fenómeno a que la salinidad mejora la conductividad eléctrica y por ende los escenarios de conductividad más alta presentaron los valores de varianza y desviación estándar más bajos.

6.2 Recomendaciones

- Desde el punto de vista de la minimización de la variación de los valores de RSSI, se recomienda realizar las pruebas en un solo día de manera que las mediciones sean continuas en espacio y tiempo y los intervalos entre las medidas de RSSI sea mínimo.
- Utilizar baterías con mayor capacidad de corriente (A/hr) con el fin de prolongar el tiempo de operación de los nodos y así evitar la manipulación de los componentes de la red para el reemplazo de las baterías.

- Se recomienda evitar el uso de máquinas virtuales para la instalación de las distintas herramientas de software y para la adquisición de datos ya que éstas generan problemas de compatibilidad e inesperadamente pueden dejar de funcionar.

6.3 Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se propone:

- Realizar el mismo experimento pero con agua de mar, con el fin de estudiar los efectos producidos por los distintos componentes del agua de mar en el desempeño de la red.
- Modelamiento de la propagación de las señales EM subacuáticas en las estrechas bandas de 2,4 GHz con valores de conductividad entre 0 y 10 [mS/cm] con el fin de conformar una mayor base de datos para futuras aplicaciones y ampliar el análisis de los datos obtenidos.
- Con la base de datos aportada, ampliarla y realizar sobre ella un análisis multivariante de las medidas para la caracterización del canal radioeléctrico en ambientes subacuáticos y buscar mediante el análisis de dependencias las correlaciones correspondientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, M., & Ortega, P. (2006). Estudio del estándar IEEE 802.15. 4 ZIGBEE para comunicaciones inalámbricas de área personal de bajo consumo de energía y su comparación en el estándar IEEE 802.15. 1 BLUETOOTH.

Akar, F. (2010). *Recent Advances in Circuits, Systems, Signal Processing and Communications*. Estambul.

Akyildiz, I. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4), 393-422.

Albarracín, A. (2012). *Desarrollo de un Prototipo de Red Sensorial implementada con la Tecnología Zigbee para monitorización de la Calidad del Agua*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5881/1/T-ESPE033914.pdf>

Alliance, Z. (2004). Zigbee Overview. Europe.

Álvarez, U. (2004). *Manual de actividades experimentales para el alumno*. Obtenido de https://books.google.es/books?id=zuaqjh3c3lUC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.

Anguita, D., Brizzolara, D., & Parodi, G. (2009). Optical communication for underwater wireless sensor networks: A VHDL-implementation of a physical layer 802.15.4 compatible. Bremen: Proc. IEEE OCEANS.

Aparicio, J., & Ureña, J. (2010). *Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (I)*. Madrid: Departamento de Ing. Electrónica. Universidad de Extremadura.

- Bustamante, I. (2007). *Desarrollo de software para el análisis de modelos de propagación en las bandas 850 y 1900 MHz*.
- Che, X., Wells, I., Dickers, G., Kear, P., & Gong, X. (2010). Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks . *Communications Magazine, IEEE*, 48(12), 143-151.
- Dignani, J. P., & Tinetti, F. (2011). *Análisis del protocolo Zigbee*. La Plata: Tesis Pregrado, Facultad de Informática.
- Fang, Z., Zhao, Z., Geng, D., Xuan, Y., Du, L., & Cui, X. (2010). RSSI variability characterization and calibration method in wireless sensor network. *IEEE International Conference*, (págs. 1532-1537).
- Fernández, N. G., & Cueva, J. M. (2006). *Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo*. Oviedo.
- FIELDSCOUT. (2009). *Direct Soil EC Meter Product Manual*. Illinois: Revisión FIELDSCOUT.
- Galarza, A. E., Gualsaquí, M., & Vizcaíno, P. (2016). *Diseño e implementación de un prototipo de sistema de radiolocalización mediante una red de sensores inalámbricos (WSN)*. Sangolquí: Universidad de las fuerzas Armadas ESPE.
- García, J. C., Rodríguez, O. A., & Castillo, J. L. (2002). Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la zona de Caldas Parte 1: Modelos para áreas urbanas. *X Congreso Internacional de Telecomunicaciones*. Valdivia.

- Gay, D., Levis, P., Behren, R., Welsh, M., Brewer, E., & Culler, D. (2005). The nesC language: A holistic approach to networked embedded systems . *Acm Sigplan Notices* , 1-11.
- Gordón, M. E., Vásquez, B. S., Gordillo, R., & Lara, R. (2012). Análisis de desempeño de redes de Sensores Inalámbricos en Tiempo Real aplicadas a Monitorización Volcánica. Tesis Pregrado. Sangolquí: Universidad de las fuerzas Armadas ESPE.
- Jarquín, O. S. (2008). Comunicaciones de Datos Inalámbricas (Wireless Data): Tecnologías y Tendencias.
- Jiang, S., & Georgakopoulos, S. (2011). Electromagnetic wave propagation into fresh water. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. (págs. 3(07), 261.). Miami.: Florida International University.
- Kelley, B., Manoj, K., & Jamshidi, M. (2009). Broadband RF communications in underwater environments using multi-carrier modulation. *IEEE International Conference in Systems Man and Cybernetics*, (págs. 2303-2308).
- MEMSIC. (2012). *MPR-MIB Users Manual*. California: Revisión MEMSIC.
- Neskovic, A., Neskovic, N., & Paunovic, G. (2000). Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, (págs. 3(3), 2-12).
- Proaño, M. R. (2010). Técnicas optimizadas de ajuste de curvas independientes y curvas integradas. *II Congreso Ciencia y Tecnología*. Sangolquí: Universidad de las fuerzas Armadas ESPE.

Reims, A., Vizcaíno, P., & Lara, R. (2015). *Modelamiento del canal de propagación en enlaces punto a punto para la banda de 2.4 GHz con tecnología Zigbee*. Sangolquí: Tesis Pregrado. Universidad de las fuerzas Armadas ESPE. .

Rhodes, M. (2007). Electromagnetic Propagation in Sea Water and its value in Military Systems. *SEAS DTC Technical Conference*.

Sendra, S., Lloret, J., & Ardid, M. (2012). Comunicaciones inalámbricas subacuáticas a 2, 4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia.

Suárez, J. U. (2009). *Estudio comparativo de sistemas operativos de tiempo real aplicado a redes de sensores inalámbricas*.

Tapia, F. (2009). *Redes de sensores inalámbricos*.