

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Evaluación de la conectividad LoRaWAN en el sector de Garzota 3 en Guayaquil

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Telecomunicaciones**

Presentado por:

German David Villegas Espinales

Ronny Eduardo Gavilánez Gunsha

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## **Dedicatoria**

Dedico el presente proyecto a familiares y amigos que me apoyaron durante todo este tiempo.

**Ronny Eduardo Gavilánez Gunsha**

## **Dedicatoria**

A mis padres, Germán Arturo y Marcela María, fuente inagotable de amor, sacrificio y apoyo constante.

A mi pareja Romina Cedeño por su comprensión, aliento y paciencia infinita; a mis queridos hermanos, Marcela Nicole, Sebastián y Rafael, por compartir risas y alegrías en cada paso; y a toda mi amada familia, cuyo respaldo incondicional ha sido mi mayor fortaleza.

Finalmente, a cada uno de mis amigos, en especial a Miguel Del Rosario y Jorge González, por ser mis copilotos en este viaje académico.

Este logro es también suyo, y esta tesis lleva impresa la gratitud y el cariño que siento por cada uno de ustedes. ¡Gracias por ser mi mayor inspiración y apoyo!

**Germán David Villegas Espinales**

## **Agradecimientos**

Agradezco primeramente a Dios por ayudarme a continuar, a mis padres y hermanos por apoyarme todo este tiempo.

Al PhD. German Vargas por su ayuda con la documentación y consejos para la realización del proyecto.

A los profesores que a lo largo de la carrera impartieron los conocimientos que se reflejan en lo realizado.

**Ronny Eduardo Gavilánez Gunsha**



## **Agradecimientos**

Agradezco a la ESPOL por brindarme la oportunidad de explorar las Telecomunicaciones.

Mi profundo agradecimiento al PhD. Germán Vargas por su orientación experta. Reconozco la colaboración invaluable del Ing. Jhonny Naranjo y la inspiración de los profesores, en especial, la M.Sc. Verónica Soto.

Este trabajo se enriqueció con sus conocimientos. Su apoyo y contribuciones fueron fundamentales para el éxito de este proyecto, que representa un hito en mi formación universitaria.

A todos, mi sincero agradecimiento por su influencia positiva en este viaje académico.

**Germán David Villegas Espinales**

## Declaración Expresa

Nosotros Gavilánez Gunsha Ronny y Villegas Espinales Germán acordamos reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra autorizada a sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, y para crear y usar obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos en que la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se publicarán ni divulgarán, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 1 de febrero del 2024.

*Ronny Gavilánez G.*

---

Autor 1



---

Autor 2

## Evaluadores



**M.Sc. Verónica Soto Vera**

Profesor de Materia



**PhD. Germán Vargas López**

Tutor de proyecto

## Resumen

Este proyecto aborda la falta de implementación de la tecnología LoRaWAN en Guayaquil, Ecuador, proponiendo evaluar su propagación en la zona de Garzota 3. Se busca determinar el modelo de propagación, establecer la cobertura de señal y comparar LoRaWAN con alternativas. El objetivo es mejorar la conectividad y facilitar soluciones IoT en la ciudad. La metodología del proyecto implicó un estudio teórico de LoRaWAN, seguido por un análisis del entorno en Garzota 3. La recolección de datos se realizó utilizando una radio base y sensores Dragino. Los resultados se analizaron mediante métricas como DMA y EMA. Se propuso el modelo TeccialLora mediante ajuste de mínimos cuadrados. La comparación con modelos reconocidos por la ITU mostró que TeccialLora se ajusta eficientemente. La validación con nuevas mediciones confirmó la consistencia del modelo, aunque los modelos Ericsson y Okumura-Hata mostraron mayor precisión. La comparación con otras tecnologías LPWAN favoreció a LoRaWAN en términos de rendimiento general. El informe concluye que LoRaWAN se adapta a los modelos de propagación, lo que respalda la viabilidad de esta tecnología en la zona de Garzota 3. Se recomienda ampliar y diversificar las mediciones, además realizar validaciones adicionales en campo para optimizar la implementación de LoRaWAN.

**Palabras Clave:** Modelo de propagación, Implementación tecnológica, IoT (Internet de las Cosas), Mediciones de campo.

### **Abstract**

This project addresses the lack of implementation of LoRaWAN technology in Guayaquil, Ecuador, proposing to evaluate its propagation in the Garzota 3 area. It looks to decide the propagation model, set up the signal coverage and compare LoRaWAN with alternatives. The aim is to help to improve connectivity and facilitate IoT solutions in the city. The project method involved a theoretical study of LoRaWAN, followed by an analysis of the environment in Garzota 3. Data collection was performed using a radio base and Dragino sensors. The results were analyzed using metrics such as DMA and EMA. The TeccialLora model was proposed using least squares fitting. Comparison with ITU-recognized models showed that TeccialLora fits efficiently. Validation with new measurements confirmed the consistency of the model, although the Ericsson and Okumura-Hata models showed higher accuracy. Comparison with other LPWAN technologies favored LoRaWAN in terms of overall performance. The report concludes that LoRaWAN fits the propagation models, which supports the feasibility of this technology in the Garzota 3 area. It is recommended to extend and diversify the measurements, as well as to perform added field validations to perfect the implementation of LoRaWAN.

**Keywords:** Propagation model, Technology implementation, IoT (Internet of Things), Field measurements.

## Índice General

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice General.....	III
Abreviaturas.....	V
Simbología.....	VI
Índice de Figuras.....	VII
Índice de Tablas.....	VII
Índice de Apéndices.....	VIII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Justificación del problema.....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	4
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	4
1.5 Marco teórico.....	5
1.5.1 <i>LoRaWAN</i> .....	5
1.5.2 <i>Modelo de propagación</i> .....	5
1.5.2.1 <i>Modelo Okumura – Hata</i> .....	6
1.5.2.2 <i>Modelo 3GPP</i> .....	7
1.5.2.3 <i>Modelo de Ericsson</i> .....	7
1.5.3 <i>Presencia de LoRaWAN</i> .....	8
1.5.4 <i>Alternativas inalámbricas</i> .....	9
Capítulo 2.....	11
2.1 Metodología.....	12
2.2. Estudio teórico.....	12
2.3 Análisis de situación.....	13

2.3.1 <i>Infraestructura existente</i> .....	13
2.3.2 <i>Equipos</i> .....	14
2.4 Recolección de datos.....	17
2.5 Análisis de resultados.....	17
Capítulo 3.....	20
3.1 Resultados .....	21
3.2 Validación.....	28
Capitulo 4.....	30
4.1 Conclusiones .....	31
4.2 Recomendaciones .....	32
Referencias.....	33
Apéndices.....	35

## Abreviaturas

<b>ESPOL</b>	Escuela Superior Politécnica del Litoral
<b>LoRaWAN</b>	Long Range Wide Area Network (Red de área extensa de largo alcance)
<b>IoT</b>	Internet of Things (Internet de las Cosas)
<b>LPWAN</b>	Low Power Wide Area Network (Red de área extensa de bajo consumo)
<b>NB-IoT</b>	Narrow Band Internet of Things (Internet de las Cosas de Banda Estrecha)
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)
<b>3GPP</b>	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project (Proyecto de Asociación de 3 <sup>a</sup> Generación)
<b>DMA</b>	Diferencia de Medias Aritméticas
<b>EMA</b>	Error Medio Absoluto
<b>IP</b>	Internet Protocol (Protocolo de Internet)
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator (Indicador de intensidad de la señal recibida)



**Simbología**

<b>dB</b>	Decibelio
<b>Km</b>	Kilómetro
<b>m</b>	Metro
<b>MHz</b>	Megahercio
<b>GHz</b>	Gigahercio

## Índice de Figuras

Figura 2.1 Diagrama de secuencias Metodológico .....	12
Figura 2.2 Mapa Esquemático de la Red .....	14
Figura 3.1 Puntos de medición.....	21
Figura 3.2 Ajuste de mínimos cuadrados para TeccialLora .....	22
Figura 3.3 Gráfica de Path Loss versus Distancia de los modelos de propagación.....	24
Figura 3.4 Mapa de cobertura Ericsson .....	25
Figura 3.5 Mapa de cobertura Okumura-Hata .....	26
Figura 3.6 Mapa de cobertura 3GPP.....	26
Figura 3.7 Comparación entre Tecnologías LPWAN.....	27
Figura 3.8 Gráfica para la validación de Path Loss versus Distancia de los modelos de propagación.....	29

## Índice de Tablas

Tabla 1.1 Tabla Factores del modelo Ericsson según las condiciones del terreno. ....	8
Tabla 2.1 Especificaciones de estación base. ....	15
Tabla 2.2 Especificaciones Estación Móvil.....	16
Tabla 3.1 Diferencia Media Aritmética y Error Medio Absoluto de los modelos de propagación.....	23
Tabla 3.2 Diferencia Media Aritmética y Error Medio Absoluto para la validación de los modelos.....	29

## Índice de Apéndices

Apéndice 1 Tabla de mediciones y predicciones de modelos de propagación. ....	35
Apéndice 2 Tabla de mediciones y predicciones de modelos de propagación para la validación .....	36
Apéndice 3 Coordenadas de la estación base .....	36
Apéndice 4 Coordenadas de los puntos de medición para la validación .....	36
Apéndice 5 Tabla de comparación de tecnologías inalámbricas.....	37
Apéndice 6 Coordenadas de los puntos de medición.....	37
Apéndice 7 Equipo de medición.....	38
Apéndice 8 Modelo de equipo .....	39
Apéndice 9 Edificio cliente y antena transmisora.....	39
Apéndice 10 Código para ajuste de mínimos cuadrados .....	40
Apéndice 11 Código para predicciones de Okumura-Hata.....	41
Apéndice 12 Código para predicciones de 3GPP .....	42
Apéndice 13 Código para predicciones de TeccialLora.....	42
Apéndice 14 Código para predicciones de Ericsson.....	43
Apéndice 15 Formato del Informe Final.....	44

## **Capítulo 1**

## 1.1 Introducción

En el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, la tecnología LoRaWAN ha demostrado ser una solución prometedora con su amplia cobertura y eficiencia en el consumo de energía. A pesar de su exitoso despliegue en naciones desarrolladas, en Guayaquil, Ecuador, su implementación ha enfrentado desafíos notables.

Este problema radica en la falta de conocimiento sobre la propagación y aplicaciones de LoRaWAN en la ciudad. Su adopción ha sido limitada por la falta de conocimiento sobre sus ventajas, pese a su potencial en diversos sectores. El proyecto propone abordar esta problemática al brindar información y recursos que permitan a la comunidad local comprender mejor cómo LoRaWAN puede ser implementada en diferentes ámbitos.

Esta tecnología puede implementarse en espacios como: optimización de recursos energéticos, monitorización del sector agrícola, monitoreo remoto de salud y sistemas de vigilancia inteligentes, lo que conlleva a mejoras significativas en la calidad de vida en Guayaquil.

Los resultados esperados de este estudio son esenciales para analizar cómo funciona la red LoRaWAN en la zona de La Garzota 3 en Guayaquil. A través de la implementación de esta tecnología y la recopilación de datos de propagación, se podrá analizar la cobertura, intensidad y estabilidad de la señal en dicho lugar. Estos datos se compilarán en un informe detallado que abordará los niveles de señal en el sector asignado, el modelo de propagación ideado a través de la información recopilada y, finalmente, se evaluará la viabilidad de implementar una red LoRaWAN. Si no es factible, se buscará el modelo de red más adecuado para optimizar la conectividad en la zona.

## **1.2 Descripción del problema**

Dentro de la ciudad de Guayaquil, la tecnología LoRa y su protocolo de red dedicado en redes de baja potencia y una cobertura amplia, LoRaWAN, se implementa en escasas ocasiones, desaprovechando las ventajas que este protocolo ofrece como lo son el ahorro de energía y su compatibilidad con redes IoT (Internet of Things), características que en la actualidad se buscan dentro de las soluciones tecnológicas para el ámbito de las telecomunicaciones. Esta situación del poco uso del protocolo LoRaWAN, se debe a varios factores, como lo son el desconocimiento de los beneficios de esta tecnología por parte de empresas y organizaciones y la existencia de alternativas tecnológicas que son más populares o eficientes dependiendo de la aplicación deseada. Teccial S.A., empresa ecuatoriana dedicada a soluciones informáticas relacionadas con las telecomunicaciones, busca mediante este proyecto abordar esta problemática al proporcionar información y recursos para que la comunidad local comprenda mejor cómo LoRaWAN puede ser implementada en diferentes sectores.

### **1.3 Justificación del problema**

El avance tecnológico es un proceso que cada vez se produce con más rapidez, sobre todo en el sector de telecomunicaciones, debido a que cada día aparecen nuevas tecnologías dedicadas a solucionar problemas específicos, como el ahorro de energía, la compatibilidad de protocolos con redes IoT y la eficiencia en la transmisión de datos, pero el desconocimiento de estas nuevas soluciones conlleva a los países menos desarrollados a estancarse y a seguir aplicando métodos poco convencionales, es por esto que LoRaWAN es un protocolo candidato a implementarse en diferentes sectores, lo que podría conducir a satisfacer las necesidades de conectividad, estimular el crecimiento económico, elevar el bienestar social y asegurar la sostenibilidad en Guayaquil.

### **1.4 Objetivos**

#### ***1.4.1 Objetivo general***

Elaborar un informe que permita evaluar la viabilidad y eficacia de la implementación de la tecnología LoRaWAN para mejorar la conectividad y habilitar soluciones de Internet de las Cosas (IoT) en el sector de Garzota 3 en Guayaquil, con el propósito de proporcionar una base sólida para la toma de decisiones relacionadas con la implementación de esta tecnología en la ciudad.

#### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Determinar el modelo propagación de la señal inalámbrica en tecnología LoRaWAN en la zona de Garzota 3.
2. Identificar los niveles y establecer la cobertura de señal LoRaWAN de los equipos terminales en Garzota 3.

3. Comparar LoRaWAN con tecnologías alternativas considerando sus ventajas y desventajas en términos de cobertura, consumo de energía, capacidad de dispositivos y costos

## **1.5 Marco teórico**

### ***1.5.1 LoRaWAN***

LoRaWAN es una red de área amplia de bajo consumo (LPWAN (Low Power Wide Area Network)) diseñada para dispositivos de consumo reducido. El estándar de red LoRaWAN se centra en los requisitos inherentes del Internet de las Cosas, como lo son conectividad bidireccional segura, consumo energético reducido, comunicación de largo alcance, velocidades de datos bajas, frecuencias de transmisión bajas, movilidad y servicios de ubicación.

LoRaWAN es un protocolo de red punto a multipunto que utiliza la solución de modulación LoRa de Semtech. El protocolo LoRaWAN es un estándar global que proporciona comunicación dúplex con un alcance de hasta 15 kilómetros. Consume muy poca energía por sí solo y puede durar hasta 10 años con una sola batería (Alai Secure, 2020).

### ***1.5.2 Modelo de propagación***

Un modelo de propagación se define como un conjunto de fórmulas matemáticas, diagramas y algoritmos diseñados para describir las características de transmisión de señales radioeléctricas en un entorno específico. Su propósito principal es prever la potencia de la señal recibida a una distancia determinada del transmisor, así como las variaciones en dicha potencia cerca de puntos de interés (Luis Fernando, César Augusto, & Dora María, 2009).



Los modelos de propagación se clasifican en modelos empíricos o estadísticos, modelos teóricos o deterministas, también como una combinación de ambos, conocidos como modelos semi empíricos. Aquellos que estiman la potencia de la señal en cualquier punto entre el transmisor y el receptor se denominan modelos de "gran escala", los cuales resultan útiles para calcular la cobertura de un sistema radioeléctrico (Pedraza Martinez, Hernández Suárez, & Salcedo Parra, 2008).

### 1.5.2.1 Modelo Okumura – Hata

El modelo empírico de propagación Okumura-Hata es utilizado para prever la disminución de señal en áreas urbanas. Este modelo se aplica en frecuencias que van desde 150 hasta 1920 MHz y para distancias que oscilan entre 1 y 100 kilómetros. Fue concebido por Yoshihisa Okumura y se fundamenta en una serie de curvas que proporcionan la disminución relativa de la señal en comparación con el espacio libre, para entornos urbanos con terreno casi plano. Considera una altura de antena de la estación base de 30 a 200 metros y una altura de antena móvil de 1 a 10 metros. El modelo de Okumura es reconocido por su simplicidad y practicidad en términos de precisión para predecir la pérdida de señal, y se ha consolidado como un estándar en la planificación de sistemas de radio móvil terrestre en Japón (Correa, 2016).

La ecuación (1.1) representa las pérdidas en el ambiente y es descrita a continuación:

$$L_{O-H}(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log(h_{te})) \log(d) \quad (1.1)$$

Siendo  $f_c$  (MHz) la frecuencia de operación,  $h_{te}$  (m) altura del transmisor, y  $d$  (Km) la separación entre las antenas. El parámetro  $a(h_{re})$  es el factor de corrección del receptor (Y. Okumura, 1968) .

La ecuación (1.1) es complementada por la ecuación (1.2), para determinar  $a(h_{re})$  en ambientes suburbanos:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log(f_c) - 0.7)h_{re} - (1.56 \log(f_c) - 0.8) \quad (1.2)$$

### 1.5.2.2 Modelo 3GPP

El modelo empírico de propagación 3GPP es empleado para anticipar la pérdida de señal en entornos urbanos. Se aplica en frecuencias que van desde 150 MHz hasta 1500 MHz, considerando antenas transmisoras de 30 a 200 metros y receptoras de 1 a 10 metros (M. A. Eslava-Gutiérrez, 2014).

El modelo de propagación 3GPP se basa en mediciones de campo y se utiliza para planificar la cobertura de sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación (3G) y cuarta generación (4G) (Vilchez Díaz, 2018).

### 1.5.2.3 Modelo de Ericsson

Este modelo representa una evolución del modelo Okumura-Hata, y ha sido desarrollado por la empresa Ericsson para pronosticar la pérdida de señal en áreas urbanas y suburbanas. Aunque los detalles exactos del modelo no siempre son divulgados debido a su carácter propietario, se sabe que tiene en cuenta factores como la distancia entre la estación base y el receptor, la frecuencia de operación, la altura de las antenas y otros parámetros del entorno (Reinier Alonso Quintana, 2013).

$L(dB)$  es la pérdida de trayectoria del modelo Ericsson que se expresa habitualmente de la siguiente manera (1.3):

$$L(dB) = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_{te}) + a_3 \log(h_{te}) \log(d) - 3.2 \log((11.75h_{re})^2) + g(f_c) \quad (1.3)$$

Donde se tiene que:

$h_{te}$  (m) es la altura del transmisor.

$h_{re}$  (m) es la altura del receptor expresada en metros.

$d$  (Km) indica la separación entre el transmisor y receptor.

$f_c$  (MHz) es la frecuencia en la que opera la transmisión.

$a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son constantes de la expresión que dependen del tipo terreno.

En la Tabla 1.1 se describen los factores del modelo Ericsson para cada tipo de escenario, los valores numéricos reemplazan las constantes en la ecuación (1.3).

**Tabla 1.1**

*Tabla Factores del modelo Ericsson según las condiciones del terreno.*

<b>Factor</b>	<b>Urbano</b>	<b>Suburbano</b>	<b>Rural</b>
$a_0$	36.2	43.20	45.95
$a_1$	30.3	68.93	100.6
$a_2$	-12.0	-12.0	-12.0
$a_3$	0.1	0.1	0.1

La función  $g(f_c)$  que representa las pérdidas ocasionadas por la frecuencia de transmisión es (1.4):

$$g(f_c) = 44.9 \log(f_c) - 4.78(\log(f_c))^2 \quad (1.4)$$

### **1.5.3 Presencia de LoRaWAN**

La tecnología LoRaWAN, la cual, en términos de impulsar su adopción y estandarización, es apoyada por la organización no lucrativa LoRa Alliance, ha sido

ampliamente implementada en todo el mundo, de hecho, su cobertura abarca más de 160 países y sigue en expansión, consolidándose como una infraestructura sólida para impulsar la conectividad de dispositivos IoT. En la actualidad, las completas capacidades de roaming LoRaWAN se encuentran disponibles en 27 países, y se ha extendido incluso a través de conexiones satelitales.

Este alcance global ha permitido implementaciones exitosas en diversas regiones. En Ámsterdam, forma parte integral de la red europea que monitorea la calidad del aire y contaminación acústica. En Asia, específicamente en Seúl, Corea del Sur, una red LoRaWAN vigila la calidad del aire y la humedad del suelo. Asimismo, en San Francisco, California, se ha desplegado una red para monitorear los niveles de agua en ríos y arroyos locales. En Latinoamérica, Buenos Aires, Argentina, ha implementado una red LoRaWAN para supervisar el tráfico vehicular y las condiciones climáticas (TEKTELIC Communications Inc. , 2023).

#### ***1.5.4 Alternativas inalámbricas***

Existen varias alternativas de redes inalámbricas a la tecnología LoRaWAN para la comunicación de dispositivos IoT.

Zigbee es una tecnología inalámbrica de bajo consumo energético que opera en la banda de 2.4 GHz, permitiendo la transmisión de datos sin cables y la comunicación directa entre dispositivos dentro de una red de malla. Su diseño eficiente y rentable, junto con protocolos de seguridad avanzados como el cifrado AES de 128 bits, garantizan su accesibilidad y seguridad en una variedad de aplicaciones industriales y domésticas. Además, su interoperabilidad con estándares abiertos facilita la integración de dispositivos de diferentes fabricantes, mientras que su ancho de banda de hasta 250 kbps y su alcance de hasta 100 metros en exteriores lo hacen adecuado para aplicaciones IoT que requieren baja latencia y cobertura amplia (Castañeda, 2023).

Otra opción es Sigfox, que es una tecnología de comunicación inalámbrica de baja potencia usada en redes remotas para la comunicación de dispositivos IoT y que opera en las bandas de frecuencia sin licencia para la transmisión de datos, destacándose por ser una solución de bajo costo en infraestructura y dispositivos en comparación con otras tecnologías de IoT. Sus dispositivos son eficientes en energía, promoviendo la longevidad y sostenibilidad, haciéndolo ideal para aplicaciones con pequeñas y esporádicas transmisiones de datos. Finalmente, ofrece una transmisión de datos a baja velocidad, típicamente entre 100 y 1000 bits por segundo (bps), lo adecuado para aplicaciones con requerimientos mínimos de datos, como sensores y dispositivos de seguimiento.

Además, la cobertura de Sigfox es global y amplia, utilizando una red de operadores y socios en diferentes países y regiones para ofrecer conectividad en todo el mundo, con un alcance que puede extenderse a varios kilómetros en áreas urbanas y rurales. Opera en la banda de frecuencia no licenciada de sub-gigahertz, adaptándose a diferentes regiones y garantizando una penetración eficiente en edificios y una cobertura extendida (Miguel, 2021).

También se encuentra NB-IoT, o Narrowband Internet of Things, como otra opción de tecnología móvil, esta utiliza la banda de frecuencia de espectro radioeléctrico celular (LTE), con flexibilidad para operar en diferentes bandas como 800 MHz, 900 MHz y 1800 MHz en la transmisión de datos, ofreciendo eficiencia energética y hasta 10 años de duración de batería. Destaca por su amplia cobertura en interiores y bajo tierra, lo que lo vuelve idóneo para medidores inteligentes y sensores de estacionamiento. En cuanto a su seguridad, su desarrollo en un espectro licenciado garantiza un servicio confiable. Finalmente, la capacidad de NB-IoT para respaldar numerosos dispositivos en áreas pequeñas lo hace perfecto para despliegues densos de IoT, aprovechando la infraestructura existente para una disponibilidad amplia y adaptándose a los avances en tecnología celular (Miguel, 2021).

## Capítulo 2

## 2.1 Metodología

Para la evaluación de la conectividad LoRaWAN en el sector de Garzota 3 en Guayaquil se realizó un diagrama de secuencias, que se muestra en la Figura 2.1:

**Figura 2.1**

*Diagrama de secuencias Metodológico*



El diagrama de secuencias de la Figura 2.1 cuenta con cinco actividades fundamentales para la realización del proyecto, las cuales a la vez se dividen en subactividades. Primero, se procede a abordar la ejecución de un marco teórico tras la revisión de papers y estudios afines. Este proceso sienta las bases para un análisis contextual y una visita de campo, destinados a

obtener una comprensión profunda del entorno y las herramientas pertinentes. Es crucial destacar que este paso precede a la recolección de datos, que constituye la información base.

Dentro de este trabajo, se contempla un análisis de resultados donde se comparan y contrastan los hallazgos teóricos con las observaciones prácticas.

Finalmente, se presenta un informe de resultados, cuyo formato se encuentra en el Apéndice 15 del presente documento.

## **2.2. Estudio teórico**

Como primer paso se llevó a cabo una investigación teórica, es decir una revisión de literatura que principalmente LoRaWAN y estudios de conectividad realizados anteriormente que se asimilasen a los requerimientos del proyecto.

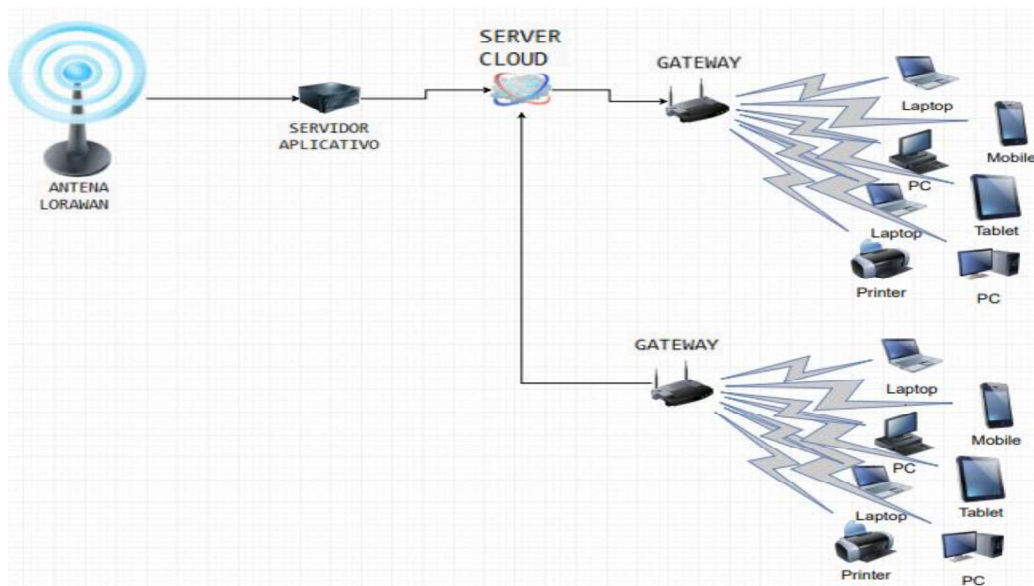
## **2.3 Análisis de situación**

La ejecución de un análisis del entorno en donde se encuentran los puntos de medición de señal fue importante para precisar la estrategia de recolección de datos y determinar el modelo de propagación de la tecnología LoRaWAN en el sector Garzota 3.

### ***2.3.1 Infraestructura existente***

Uno de los pasos más importantes para la determinación de un modelo de propagación, es el reconocimiento de la zona, por lo que se realizó una visita de campo a la Garzota 3.



**Figura 2.2***Mapa Esquemático de la Red*

La Figura 2.2 muestra la topología con la que trabaja TECCIAL S.A para la transmisión inalámbrica de una red LoRaWAN. La antena de LoRaWAN se encuentra ubicada en las instalaciones de la empresa aproximadamente a 30 metros sobre el nivel del suelo.

Después de llevar a cabo una evaluación del sector en un radio de 300 metros (distancia acordada con el cliente) alrededor de la estación base, y debido a que la tecnología usada opera en la banda de 868 y 900 MHz, se determinó que la Garzota 3 se presenta como una zona suburbana con construcciones de baja y mediana altura, por lo cual ejemplos de modelos apropiados para implementarse son el de Okumura – Hata, 3GPP y Ericsson.

### **2.3.2 Equipos**

Para el estudio se utilizó una estación base localizada en la empresa TECCIAL S.A. vista en el Apéndice 9, la cual cuenta con un servidor donde se recolecta información de las mediciones tomadas con un sensor LoRaWAN. La estación base es Gateway LoRaWAN para

exteriores, de la marca DRAGINO modelo DLOS8N el cual funciona como un puente entre una red LoRaWAN inalámbrica y una red IP mediante Wifi, Ethernet, 3G o 4G.

**Tabla 2.1**

*Especificaciones de estación base.*

<b>Especificaciones LoRa</b>	<b>Especificaciones Generales</b>	<b>Temperatura</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad: -140dBm</li> <li>• Potencia Máxima de salida: 27dBm</li> <li>• 1 x SX1302 + 2 x 1250 LoRa Transceiver</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 x Puerto Host USB</li> <li>• Alimentación: 12v, 2A DC</li> <li>• 1 x Interface Mini-PCIe</li> <li>• 1 x 2.4G WiFi (802.11 bgn)</li> <li>• 10M/100M puerto PoE RJ45 x1</li> <li>• Conector RP-SMA para Antena LoRa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de operación: -20~85°C</li> </ul>

La Tabla 2.1 muestra las especificaciones de la estación base, resaltando las especificaciones LoRa, las cuales facilitan aplicaciones IoT eficientes y versátiles.

La estación móvil utilizada en el proyecto es un nodo sensor de la marca DRAGINO modelo LSN50-V2, diseñado para aplicaciones de largo alcance y resistente al agua, visto en los Apéndices 7 y 8.

Con una batería de respaldo y configuración personalizable, ofrece versatilidad para diversas necesidades de recopilación de datos remotos, esto sumado a su diseño compacto y eficiencia energética, lo hacen ideal para aplicaciones IoT. Las especificaciones generales de la estación móvil son descritas en la Tabla 2.2:

**Tabla 2.2***Especificaciones estación móvil.*

<b>DRAGINO LSN50-V2</b>	
<b>Comunicación Inalámbrica</b>	Utiliza tecnología LoRa para la transmisión de datos de larga distancia basado en el módulo SX1276/SX1278. Compatible con la especificación LoRaWAN para conectividad a redes IoT.
<b>Alcance Inalámbrico</b>	Caracterizado por un rango de comunicación extendido, especialmente en entornos abiertos. Cuenta con un presupuesto de enlace de 168 dB.
<b>Batería</b>	Alimentado por una batería de larga duración de 8500 mA para facilitar su uso en ubicaciones remotas.
<b>Sensores Integrados</b>	Puede incluir una variedad de sensores según la aplicación, como sensores de temperatura, humedad, acelerómetros, etc.
<b>Protección Ambiental</b>	Clasificación de resistencia al agua y al polvo IP66 que significa protección total contra polvo y resistencia a potentes chorros de agua.
<b>Diseño Compacto</b>	Tamaño (65 x 50 x 50mm) y peso (140 g) optimizados para facilitar la instalación en diferentes entornos.
<b>Antena Integrada</b>	Puede tener una antena integrada para mejorar el rendimiento de la comunicación.

**2.2.3. Entorno**

Se utilizó la función de medición de la aplicación Google Earth para estimar la distancia entre los puntos de medición y la estación base. Además, se reconoció la topografía del terreno para entender cómo las características geográficas, como edificios, afectan la propagación de la señal tomando en consideración la elevación y la orientación de las antenas.

## **2.4 Recolección de datos**

La recolección de datos se llevó a cabo experimentalmente en dos entornos: primero, en ambiente abierto, el cual consiste en ubicar la estación móvil en diferentes localizaciones dentro de un radio de 300 metros partiendo desde la radio base, y a una altura de 1 metro, con el fin de tomar las coordenadas y datos de los niveles de señal que envía el nodo sensor hacia el Gateway para exteriores, datos que se guardan en un servidor dentro de la empresa del cliente, y que sirven como guía para la formulación del modelo de propagación de la tecnología LoRaWAN en el sector de la Garzota 3 de la ciudad de Guayaquil. Las mediciones se realizaron en diferentes días y localidades. Las coordenadas de la estación base y de los puntos de medición se detallan en los Apéndices 3 y 6 respectivamente.

Para el segundo ambiente, que es el ambiente cerrado, se posicionó el nodo sensor dentro de locales comerciales con previa autorización de los propietarios.

## **2.5 Análisis de resultados**

Tras la recolección de datos, se comparó los niveles de señal obtenidos en las mediciones actuales, con las que fueron recopiladas en un intervalo anterior de 15 días por parte TECCIAL S.A. Posteriormente se procedió a la elaboración de los códigos de programación empleando el lenguaje de programación Python dentro el entorno de desarrollo integrado conocido como PyCharm, estos códigos de programación tenían como objetivo, la determinación de los niveles de pérdida de trayectoria, insertando cada uno de los parámetros pertenecientes a los modelos de Okumura – Hata, 3GPP y Ericsson, dichos códigos se encuentran en los Apéndices 11, 12 y 14.

La precisión de cada uno de los modelos de propagación se analizó gráficamente mediante diagramas de dispersión de las pérdidas de recorrido predichas con respecto a la distancia entre el punto de medición y la estación base. Mientras que, en el campo aritmético,

se utilizaron dos medidas de dispersión, la Diferencia de Medias Aritméticas (DMA) y el Error Medio Absoluto (EMA). La primera indica cuánto varían los datos respecto a la media, una DMA más indica una mayor dispersión de los datos, y el EMA es una medida estadística que evalúa la precisión de un modelo o la discrepancia entre valores observados y valores predichos. Se utiliza comúnmente en problemas de regresión para cuantificar cuán cerca o lejos están las predicciones del modelo de los valores reales.

Las Diferencia Media Absoluta y el Error Medio Absoluto se definen en las ecuaciones (2.1) y (2.2):

$$DMA = \frac{\sum_{k=1}^n E_k - R_k}{n} \quad (2.1)$$

$$EMA = \frac{\sum_{k=1}^n |E_k - R_k|}{n} \quad (2.2)$$

Donde:

$E_k$  es la pérdida de recorrido calculada mediante las ecuaciones del modelo

$R_k$  es la pérdida de recorrido obtenida mediante las mediciones de niveles de señal y los parámetros de los equipos de medición.

$n$  es el número de paquetes recibidos para cada ubicación

La DMA es útil para entender cuánto se alejan, en promedio, las predicciones de los modelos de propagación de la pérdida de trayecto promedio. Si se tiene un valor positivo, los modelos sobreestiman las muestras, lo cual se refiere a que las estimaciones del modelo son mayores a los datos recopilados en las mediciones; por otro lado, al resultar negativo se dice que los modelos subestiman y por lo tanto las predicciones son menores que los valores de Path Loss recolectados. El EMA mide cuánto se equivoca, según las medias aritméticas, una

proyección comparada con la realidad. Un EMA más bajo significa que las predicciones son más precisas.

Para determinar el modelo de propagación según las mediciones tomadas, se realizó un ajuste de mínimos cuadrados, el cual se basa en encontrar la mejor línea o curva que se adapte a un conjunto de datos. El ajuste se utiliza cuando se tiene varios puntos en un gráfico de dispersión, y se desea encontrar una línea que pase lo más cerca posible de todos esos puntos. Este ajuste se realiza sobre la gráfica de la pérdida de trayecto obtenida en cada medición versus la distancia de estas mediciones con respecto a la estación base.

El código fuente para este ajuste de mínimos cuadrados se encuentra en el Apéndice 10 mientras que el código para sus predicciones se presenta en el Apéndice 13. A este nuevo modelo de programación se lo denominó TeccialLora y se procedió a comparar los tres mencionados anteriormente con el fin de analizar su precisión.

La comparación entre las diferentes LPWAN (Low Power Wide Area Network), se realizó de forma teórica, analizando cada parámetro importante en la implementación de estas tecnologías como lo son la cobertura, el rango, entre otros. Los resultados de esta sección son presentados en el capítulo 3.

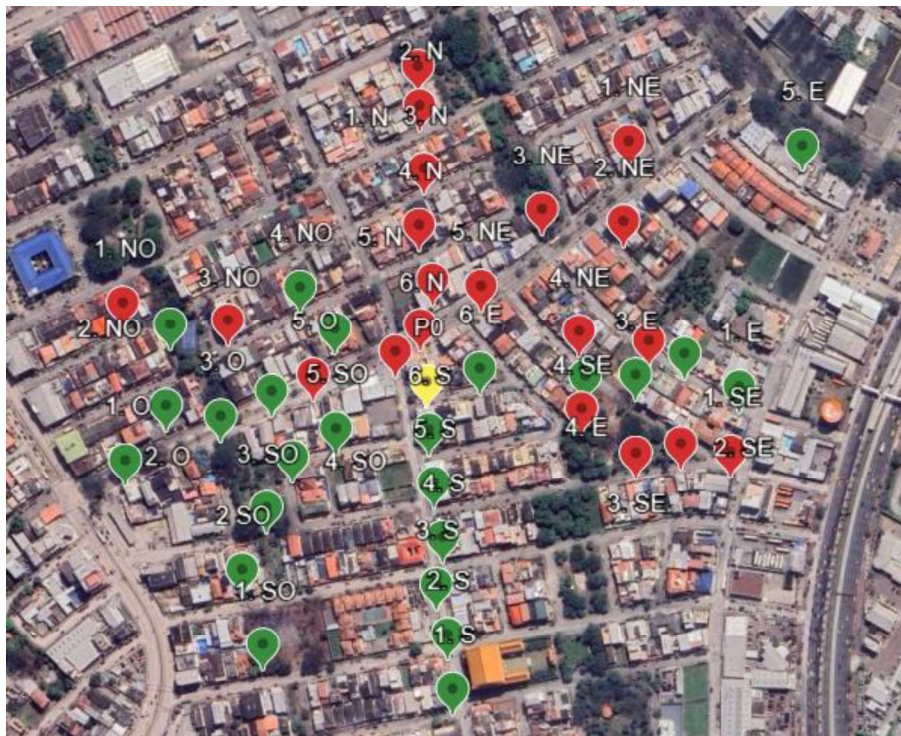
## Capítulo 3

### 3.1 Resultados

Para la selección de un modelo de propagación, se establecieron inicialmente puntos de medición, con una distancia máxima de 300 metros, y cada punto de medición se posicionó con saltos de 50 metros entre ellos.

**Figura 3.1**

*Puntos de medición*



La Figura 3.1 representa un proyecto en Google Earth, colocando los puntos donde se efectuaron las medidas, clasificándolos por NLOS y LOS, se exhibe la disposición de los puntos de medición alrededor del punto central, identificado en color amarillo, donde se ubica la antena LoRaWAN. Se eligieron diversos escenarios para obtener una gama variada de mediciones, los puntos de etiqueta verde que representan lugares con línea de vista, y los de etiqueta roja que indican lugares sin línea de vista. Cada punto se sometió a 15 minutos en

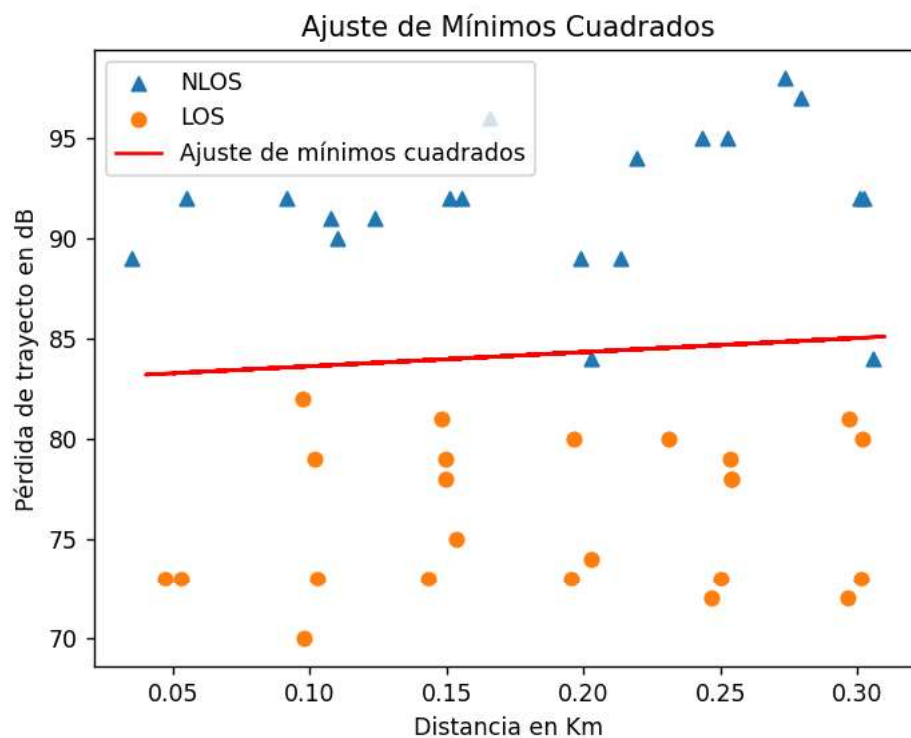


diferentes horarios del día, contemplando varias condiciones, aunque algunas, como el clima, resultan incontrolables.

La distancia entre los puntos de medición y la pérdida de trayectoria respectiva en cada uno de esos puntos es la información necesaria para la determinación del modelo propuesto llamado TeccialLora, el cual como se mencionó en el capítulo 2, se realizó mediante un ajuste de mínimos cuadrados.

**Figura 3.2**

*Ajuste de mínimos cuadrados para TeccialLora*



La Figura 3.2 proyecta en su eje vertical la pérdida de trayecto de los puntos de medición, la diferencia entre la potencia transmitida y recibida, mientras que el eje horizontal contiene la distancia respecto a la antena. Los triángulos, representan lugares donde no se tenía línea de vista, es decir, que se encuentra un obstáculo físico entre el transmisor y el receptor, mientras que los círculos son puntos donde existía línea de vista, receptor y transmisor se

observan directamente. El ajuste de mínimos cuadrados, entendido como la línea que se acerca más a puntos en un gráfico de dispersión, reduciendo al mínimo la suma de las distancias verticales cuadradas, se representa mediante la recta que está atravesando los puntos y triángulos aproximadamente por la mitad de estos.

Tomando en cuenta la Figura 3.2, se contempla una recta elevada 82,8751 dB en el eje Y, con una pendiente de 7,2789; por lo cual se describe como una ecuación lineal (3.1):

$$\mathbf{TeccialLora = 82,8751 + 7,2789 \log (d)} \quad (3.1)$$

La ecuación (3.1) modela pérdida de trayecto del modelo TeccialLora en relación con la distancia (d). Indica que la pérdida de camino aumenta logarítmicamente con la distancia, con una constante inicial y un factor de crecimiento específicos.

En el Apéndice 1, se presentan los datos del RSSI promedio de 44 puntos de medición, utilizados para calcular la pérdida de camino promedio. Este valor se compara con las predicciones de pérdida utilizando los modelos Okumura-Hata, 3GPP, Ericsson y TeccialLora.

**Tabla 3.1**

*Diferencia Media Aritmética y Error Medio Absoluto de los modelos de propagación*

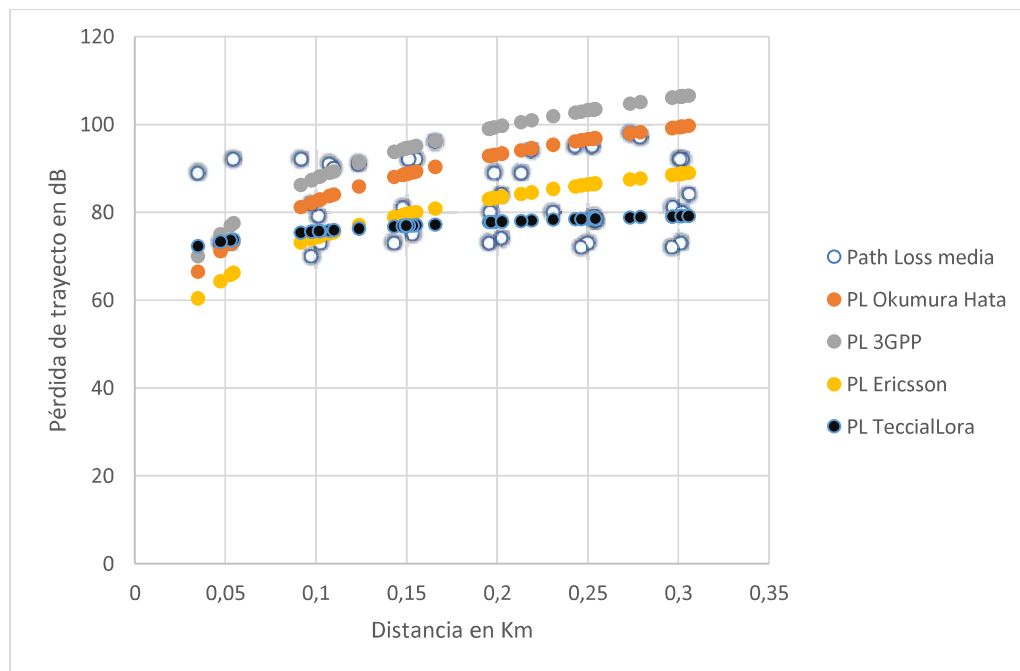
	<i>Okumura Hata</i>	<i>3GPP</i>	<i>Ericsson</i>	<i>TeccialLora</i>
<b>DMA</b>	7.116	13.096	-2.302	-6,030
<b>EMA</b>	10.962	15.008	9.168	8,275

En la Tabla 3.1 se presentan la Diferencia Media Aritmética y Error Medio Absoluto de los modelos, la primera demuestra que tanto el modelo Okumura Hata como el 3GPP, sobreestiman a el Path Loss experimental, es decir, se encuentran por encima de los valores obtenidos durante las mediciones realizadas; mientras que el modelo Ericsson y el TeccialLora

lo subestiman, al contrario del caso anterior, estos modelos presentan valores por debajo de los medidos. Por su parte el Error Medio Absoluto presenta como el modelo que más se ajusta a la información recolectada, al modelo TeccialLora, seguido del Ericsson, Okumura Hata y el 3GPP respectivamente.

### Figura 3.3

*Gráfica de Path Loss versus Distancia de los modelos de propagación.*



En la Figura 3.3 se visualizan las predicciones de Path Loss de los modelos de predicción y las mediciones de Path Loss reales versus las distancias entre transmisor y receptor. El error de cada modelo se puede entender como la distancia entre los puntos del color que represente el modelo y los puntos sin relleno.

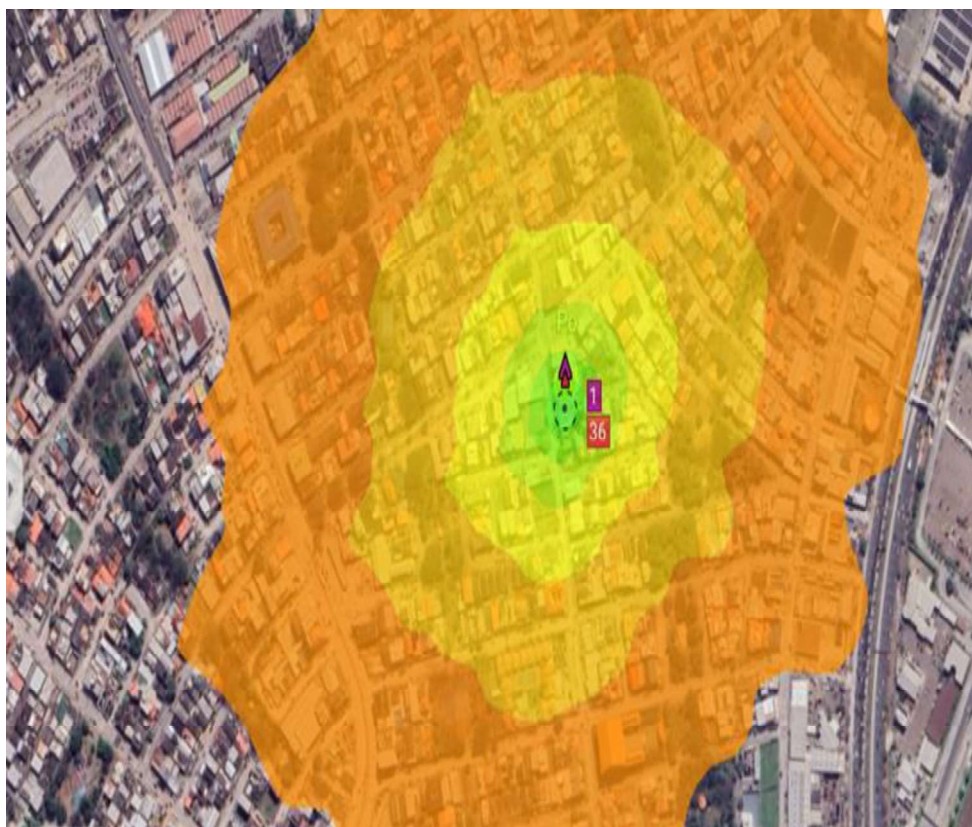
El diagrama de dispersión de la Figura 3.3 presenta una representación gráfica del DMA y el EMA, representando al modelo 3GPP como una sobreestimación de las muestras tomadas y además con una distancia entre puntos mayor en comparación a los demás modelos, caso contrario a lo que sucede con los modelos TeccialLora, Ericsson y Okumura Hata los cuales se

encuentran prácticamente en la mitad de la dispersión de las muestras, teniendo un EMA aceptable.

Además, se observó que las predicciones tienden a crecer y las muestras tienden a dispersarse, por motivos de línea de vista, propio de los modelos predictivos y dependientes de la separación entre la estación base y el dispositivo receptor.

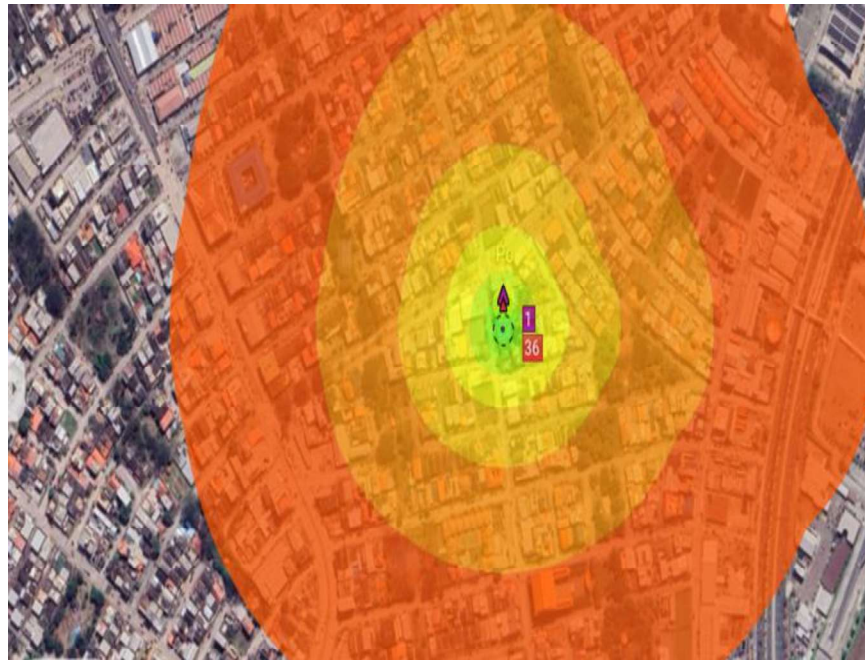
### **Figura 3.4**

*Mapa de cobertura Ericsson*

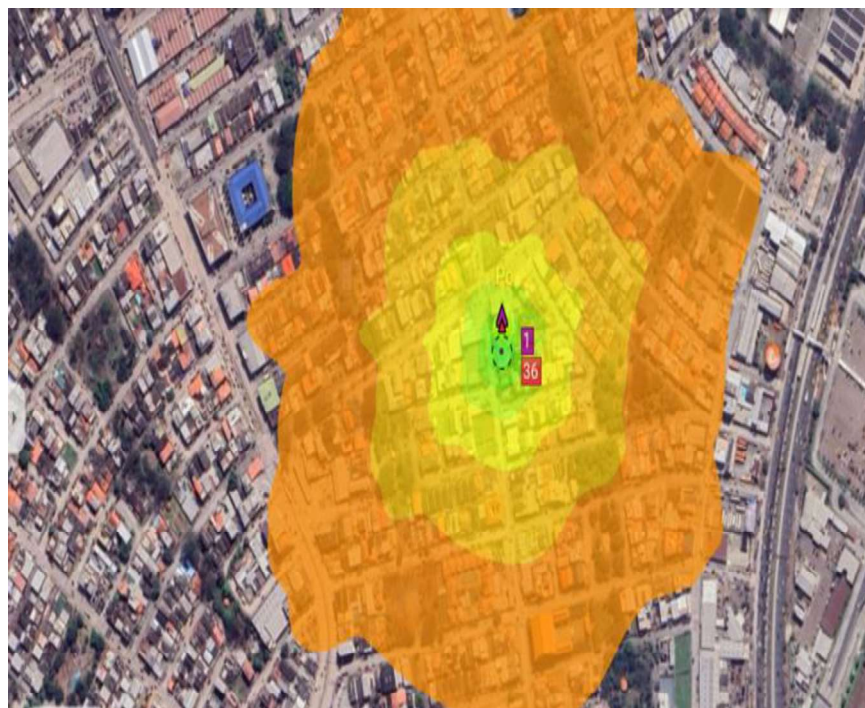


**Figura 3.5**

*Mapa de cobertura Okumura-Hata*

**Figura 3.6**

*Mapa de cobertura 3GPP*





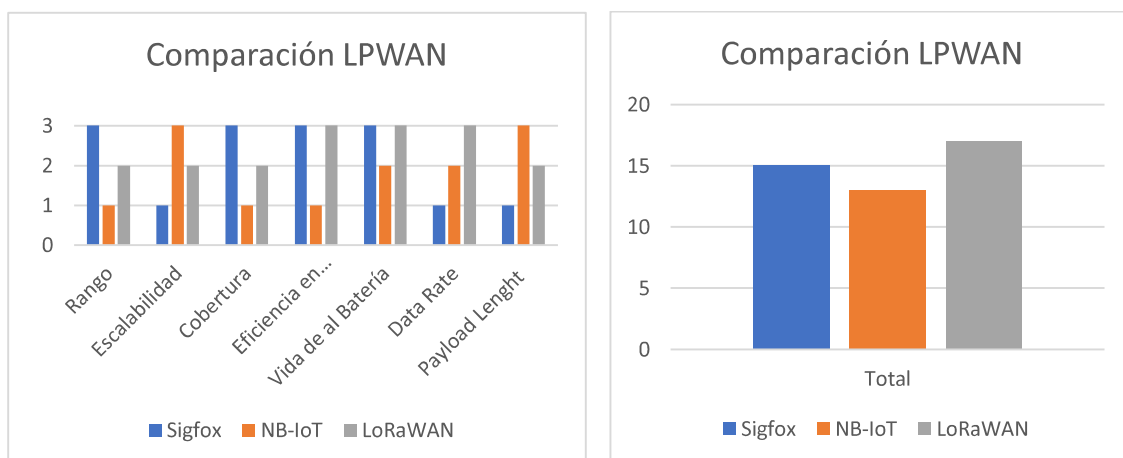
Las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6 contienen mapas de cobertura, los modelos Ericsson Okumura–Hata y el modelo de propagación 3GPP son respectivamente visualizados, los cuales muestran la intensidad de la señal o servicio en la Garzota 3. Estos mapas visualizan la disponibilidad y calidad de la cobertura de red, indicando las áreas con buena o deficiente recepción de señal según los colores, representando con el verde y el rojo, una mejor intensidad y una peor respectivamente.

Se observa consistentemente que la recepción de señal es más robusta en proximidad a la antena, dada la irradiación en 360° de la antena LoRaWAN empleada. A medida que los puntos se alejan del transmisor, la intensidad de la señal exhibe un decaimiento. Aunque la apariencia inicial podría sugerir que el modelo de Okumura-Hata presenta una cobertura más extensa, la representación en colores cálidos indica una debilidad de señal en las zonas exteriores del gráfico.

**Figura 3.7**

a) *Comparación entre Tecnologías LPWAN*

b) *Resultado de comparación entre Tecnologías LPWAN.*



Se llevó a cabo una comparación teórica de diversas tecnologías LPWAN (Low Power Wide Area Network), similar a LoRaWAN y adecuadas para el proyecto. La Figura 3.7 a) muestra una comparación en forma de diagrama de barras, con una síntesis resumida en la Figura 3.7 b).

En la Figura 3.7 a), el eje vertical representa las calificaciones en un rango de [1,3]. Donde, 1 indica la calificación para la tecnología inalámbrica que tiene un rendimiento menos adecuado según las necesidades del proyecto, mientras que 3 indica el mejor desempeño. Los aspectos claves evaluados incluyen el rango, la cobertura, la velocidad de transmisión de datos y los gastos asociados. Acorde a esta valoración tanto LoRaWAN como Sigfox fueron superiores a NB-IoT por lo que se presentan como opciones tecnológicas válidas.

Sin embargo, según se exhibe en la Figura 3.7 b), que recopila las calificaciones de cada factor de manera compacta, LoRaWAN se posiciona en el primer lugar. Las valoraciones de cada tecnología se detallan en el Apéndice 5.

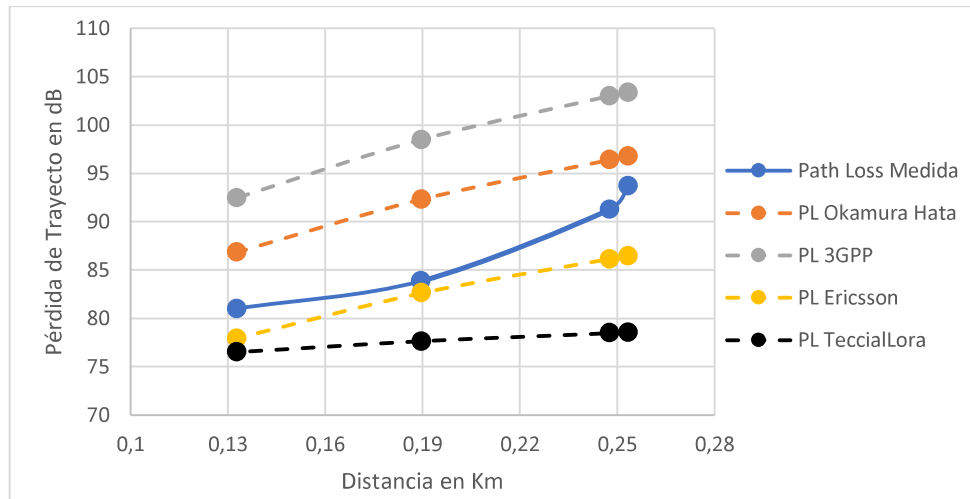
### **3.2 Validación**

Para la validación de los resultados, se procedió a tomar nuevas mediciones en distintos puntos alrededor de la estación base, las características y coordenadas de estos puntos se detallan en los Apéndices 2 y 4. Esta validación se realiza con el fin de observar el comportamiento del modelo TeccialLora, con respecto a nuevos escenarios, además sirve para ratificar las predicciones de los tres modelos restantes.

Como se observa en la Figura 3.8, donde se representan los nuevos puntos de medición en contraste a las predicciones, las pérdidas tienden a elevarse si aumenta la distancia, es decir, que se forma una tendencia creciente que se traduce como una menor dispersión en los datos.

**Figura 3.8**

*Gráfica para la validación de Path Loss versus Distancia de los modelos de propagación*



También se puede visualizar en la Figura 3.8, que todos los modelos obtuvieron nuevos valores de EMA y DMA lo cual se resume en la siguiente Tabla 3.2.

**Tabla 3.2**

*Diferencia Media Aritmética y Error Medio Absoluto para la validación de los modelos*

	<i>Okumura Hata</i>	<i>3GPP</i>	<i>Ericsson</i>	<i>TeccialLora</i>
<b>DMA</b>	5,608229025	11,86572441	-4,18439671	-9,680191532
<b>EMA</b>	5,608229025	11,86572441	4,18439671	9,680191532

Tomando en cuenta la Tabla 3.2 el modelo TeccialLora aumenta su error en 1 dB, siendo superado en términos de precisión por los modelos Ericsson y Okumura-Hata, los cuales tras la validación de resultados toman el primer y segundo lugar en este aspecto, resultando que el modelo con mayor desviación continúa siendo el 3GPP.



## **Capitulo 4**

## 4.1 Conclusiones

- El informe elaborado proporciona una evaluación integral respecto al comportamiento que posee la difusión de la señal inalámbrica LoRaWAN en el sector de Garzota 3 en Guayaquil, comparando cuatro modelos de propagación para áreas urbanas. Los resultados obtenidos demuestran que LoRaWAN es factible en el sector de Garzota 3 porque se adapta de manera efectiva a las características geográficas y urbanísticas de la zona, esto debido a que las predicciones de pérdida de trayecto de los modelos Ericsson y TeccialLora tienen un error de 9 y 8 dB con respecto a los datos reales, proporcionando una cobertura adecuada para posibles implementaciones de Internet de las Cosas (IoT).
- Tras la validación de datos del proyecto, el modelo de propagación Ericsson obtuvo un error medio absoluto de 4.18 dB, seguido del modelo Okumura-Hata, el cual cuenta con una desviación de 5.61 dB y finalmente el modelo TeccialLora y 3GPP con errores de 9.68 dB y 11.87 dB respectivamente. En porcentaje, el modelo Ericsson muestra una precisión superior de 1,63 % en comparación con el modelo subsecuente. En cuanto a los otros dos modelos, presenta una mejora del 6.28% y 8.78%, respectivamente. Por lo tanto, el modelo Ericsson es el más efectivo para predecir los niveles de señal LoRaWAN en el sector.
- La comparación de tecnologías LPWAN realizada en el estudio proporciona una clara indicación de que LoRaWAN emerge como la opción líder entre las tecnologías mencionadas, superando incluso a alternativas similares como Sigfox. Esto sugiere que LoRaWAN ofrece un rendimiento sobresaliente en los aspectos de rango, cobertura, data rate y costos, lo que respalda su idoneidad para ser implementada considerando los objetivos establecidos.

## 4.2 Recomendaciones

- Considerar la posibilidad de expansión de la red y evaluar su escalabilidad. Esto implica anticipar el crecimiento futuro de la demanda y garantizar que la infraestructura pueda manejar mayores cargas de dispositivos y datos.
- Al realizar mediciones para cada modelo de propagación, priorizar que los parámetros compartidos, como lo son la elevación de los equipos y la frecuencia de la transmisión, sean consistentes y uniformes. Esto asegura la validez y la comparabilidad de los resultados obtenidos entre los distintos modelos evaluados. Al mantener los parámetros constantes, se crean condiciones equitativas para que cada modelo sea evaluado bajo las mismas circunstancias, lo que facilita la identificación del modelo más apropiado para el entorno estudiado.
- Ampliar el número de mediciones y el tiempo en el que se efectúan dichas tomas de datos. Esto proporcionará una base más sólida para comprender la dinámica de la conectividad LoRaWAN en diferentes condiciones climáticas y ambientes, lo que contribuirá a una implementación más robusta y eficiente de la tecnología en el sector. La validación práctica ayudará a confirmar la precisión del modelo en condiciones del mundo real.

## Referencias

- Alai Secure. (15 de 10 de 2020). *Alai Secure*. Obtenido de Alai Secure:  
<https://alaisecure.es/glosario/LoRaWAN-que-es-para-que-sirve-y-como-funciona/>
- Castañeda, F. (29 de 10 de 2023). *Topes de Gama*. Obtenido de Topes de Gama:  
<https://topesdegama.com/listas/audio/auriculares-inalambricos-alternativa-airpods>
- Correa, A. P. (2016). *MODELO MATEMÁTICO ADAPTADO DE PÉRDIDAS DE TRAYECTORIA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN EN LA BANDA DE 850 MHz PARA UNA ZONA URBANA DE QUITO*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Jiménez, J. (07 de 08 de 2023). *RedesZone*. Obtenido de RedesZone:  
<https://www.redeszone.net/tutoriales/redes-wifi/redes-LoRaWAN-publicas-privadas/>
- Luis Fernando, P. M., César Augusto, H. S., & Dora María, B. L. (2009). *ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA UN MODELO DE PROPAGACIÓN DE LA TELEFONÍA MÓVIL DE LA UNIVERSIDAD MILITAR*. Bogotá: Ciencia e Ingeniería Neogranadina.
- M. A. Eslava-Gutiérrez, S. V.-B.-B. (2014). *Desarrollo e implementación de una interfaz gráfica de usuario para el cálculo y comparación de modelos de propagación electromagnética en exteriores*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Miguel, R. d. (21 de 07 de 2021). Los mejores cargadores inalámbricos para el móvil. *EL PAÍS*.
- Pedraza Martinez, L. F., Hernández Suárez, C. A., & Salcedo Parra. (2008). *Modelo de propagación de interiores para la Facultad Tecnológica de la Universidad*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Reinier Alonso Quintana, R. B. (2013). *Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico*. Santa Clara: Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones.

TEKTELIC Communications Inc. . (16 de 01 de 2023). *LoRa Alliance*. Obtenido de <https://lora-alliance.org>: <https://lora-alliance.org/LoRaWAN-news/LoRaWAN-most-common-applications-and-use-cases/>

Vilchez Díaz, V. A. (2018). *Implementación de los modelos de propagación de gran escala entre 0.5 GHz y 100 GHz de acuerdo a las especificaciones del 3GPP para aplicaciones móviles 5G*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Y. Okumura, E. O. (1968). *Field strength and its variability in the VHF and UHF land mobile radio service*.

## Apéndices

### Apéndice 1

Tabla de mediciones y predicciones de modelos de propagación.

Punto	Línea de Vista	Av Medición dBm	Distancia km	Path Loss media	PL Okumura Hata	PL 3GPP	PL Ericsson	PL TeccialLora
1. N		-99	0,2734	98	97,89682136	104,6502609	87,43529491	78,77561426
2. N		-98	0,2792	97	98,21796298	105,0043698	87,71197208	78,84197556
3. N		-95	0,2192	94	94,51671604	100,923165	84,52319035	78,07714309
4. N		-97	0,1659	96	90,25471407	96,22363987	80,8512943	77,19643517
5. N		-93	0,0917	92	81,18512211	86,2229933	73,03745489	75,32227803
6. N		-93	0,0547	92	73,28129819	77,5077887	66,22797427	73,68901734
1. NE		-93	0,3024	92	99,43908096	106,3508438	88,76401718	79,09430962
2. NE		-96	0,2431	95	96,09987637	102,6688474	85,88715034	78,40429025
3. NE		-90	0,1987	89	93,01463369	99,2668838	83,22908249	77,76675003
4. NE		-93	0,1555	92	89,26433229	95,13158874	79,99803825	76,99178086
5. NE		-92	0,1076	91	83,6312395	88,9202211	75,14488911	75,82774822
1. E		-74	0,3012	73	99,378254	106,2837725	88,71161217	79,08174022
2. E		-74	0,2502	73	96,54026972	103,1544501	86,26656795	78,49529394
3. E		-75	0,2027	74	93,31953587	99,60308624	83,49176869	77,82975558
4. E		-76	0,1535	75	89,06629767	94,91322454	79,827423	76,95085863
5. E		-74	0,1026	73	82,90332101	88,11757687	74,51775636	75,67732981
6. E		-74	0,0529	73	72,76942276	76,94336582	65,78697181	73,58324246
1. SE		-93	0,3008	92	99,35792448	106,2613561	88,69409742	79,07753929
2. SE		-96	0,2526	95	96,68631341	103,3154861	86,3923908	78,52547268
3. SE		-90	0,2133	89	94,09931227	100,4629119	84,16357923	77,99089001
4. SE		-93	0,1512	92	88,83534278	94,65856057	79,62844553	76,90313368
5. SE		-92	0,1239	91	85,78908018	91,29957863	77,00396067	76,27364838
1. S		-73	0,2966	72	99,14281738	106,0241668	88,5087735	79,03308917
2. S		-73	0,24649	72	96,31173084	102,9024501	86,06967198	78,44806824
3. S		-74	0,1954	73	92,75843248	98,98438181	83,00835424	77,71380814
4. S		-74	0,1431	73	87,99304048	93,72979028	78,90276626	76,72907879
5. S		-71	0,0977	70	82,1546943	87,29209859	73,87278259	75,52263221
6. S		-74	0,04726	73	71,04474497	75,04163825	64,3010885	73,22685187
1. SO		-82	0,2969	81	99,15828288	106,0412199	88,52209769	79,03628499
2. SO		-80	0,2533	79	96,72864818	103,3621669	86,42886401	78,53422081
3. SO		-81	0,1966	80	92,85209375	99,08765805	83,08904741	77,73316248
4. SO		-82	0,148	81	88,5081012	94,29772545	79,34651299	76,83551188
5. SO		-83	0,0975	82	82,123346	87,25753219	73,8457747	75,51615434
1. O		-81	0,3018	80	99,40869772	106,3173415	88,73784072	79,08803117
2. O		-79	0,254	78	96,77086611	103,4087187	86,46523655	78,5429448
3. O		-81	0,231	80	95,31883638	101,8076284	85,21425115	78,24289471
4. O		-80	0,1497	79	88,68281948	94,49037973	79,49704022	76,87161599
5. O		-91	0,1101	90	83,98260912	89,30766116	75,44760899	75,90035589
6. O		-90	0,035	89	66,45051945	69,97578459	60,34296772	72,27749267

1. NO		-85	0,3058	84	99,61012209	106,5394434	88,91137639	79,12965387
2. NO		-79	0,2542	78	96,78290701	103,4219957	86,4756103	78,54543295
3. NO		-85	0,2028	84	93,32708111	99,61140605	83,49826923	77,83131474
4. NO		-79	0,1498	78	88,69303514	94,5016441	79,50584145	76,87372697
5. NO		-80	0,1016	79	82,7534867	87,95236107	74,38866773	75,64636777

## Apéndice 2

*Tabla de mediciones y predicciones de modelos de propagación para la validación*

Punto	Línea de Vista	Av Medición dBm	Distancia km	Path loss media	PL Okumura Hata	PL 3GPP	PL Ericsson	PL TeccialLora
P1		-94,71	0,2534	93,71	96,73468645	103,368825	86,43406623	78,53546857
P2		-92,25	0,2476	91,25	96,38046635	102,9782418	86,12889054	78,46227188
P3		-84,87	0,1896	83,87	92,29747204	98,47610069	82,61121721	77,61855443
P4		-82	0,1328	81	86,85029126	92,46973016	77,91823918	76,49293899

## Apéndice 3

*Coordenadas de la estación base*

Punto	Latitud	Longitud
P0	2°08'49"S	79°53'23"W

## Apéndice 4

*Coordenadas de los puntos de medición para la validación*

Punto	Latitud	Longitud
P1	2°08'42"S	79°53'27"W
P2	2°08'42"S	79°53'19"W
P3	2°08'46"S	79°53'18"W
P4	2°08'53"S	79°53'26"W

## Apéndice 5

*Tabla de comparación de tecnologías inalámbricas*

Tecnología	Rango	Escalabilidad	Cobertura	Eficiencia Costos	Batería	Data Rate	Payload Lenght	Total
Sigfox	3	1	3	3	3	1	1	15
NB-IoT	1	3	1	1	2	2	3	13
LoRaWAN	2	2	2	3	3	3	2	17

## Apéndice 6

*Coordenadas de los puntos de medición*

Puntos	Latitud	Longitud	Punto	Latitud	Longitud
1. N	2°08'39"S	79°53'23"W	1. S	2°08'59"S	79°53'22"W
2. N	2°08'41"S	79°53'23"W	2. S	2°08'57"S	79°53'22"W
3. N	2°08'43"S	79°53'23"W	3. S	2°08'56"S	79°53'23"W
4. N	2°08'44"S	79°53'23"W	4. S	2°08'54"S	79°53'23"W
5. N	2°08'46"S	79°53'27"W	5. S	2°08'52"S	79°53'23"W
6. N	2°08'47"S	79°53'23"W	6. S	2°08'51"S	79°53'26"W
1. NE	2°08'42"S	79°53'17"W	1. SO	2°08'57"S	79°53'28"W
2. NE	2°08'44"S	79°53'17"W	2. SO	2°08'55"S	79°53'29"W
3. NE	2°08'44"S	79°53'19"W	3. SO	2°08'53"S	79°53'28"W
4. NE	2°08'48"S	79°53'18"W	4. SO	2°08'52"S	79°53'27"W
5. NE	2°08'48"S	79°53'18"W	5. SO	2°08'51"S	79°53'26"W
1. E	2°08'49"S	79°53'13"W	1. O	2°08'52"S	79°53'32"W
2. E	2°08'48"S	79°53'15"W	2. O	2°08'50"S	79°53'31"W
3. E	2°08'49"S	79°53'17"W	3. O	2°08'50"S	79°53'28"W
4. E	2°08'49"S	79°53'18"W	4. O	2°08'50"S	79°53'28"W
5. E	2°08'49"S	79°53'20"W	5. O	2°08'49"S	79°53'27"W
6. E	2°08'49"S	79°53'21"W	6. O	2°08'49"S	79°53'24"W



<b>1. SE</b>	2°08'51"S	79°53'14"W	<b>1. NO</b>	2°08'47"S	79°53'33"W
<b>2. SE</b>	2°08'51"S	79°53'15"W	<b>2. NO</b>	2°08'47"S	79°53'31"W
<b>3. SE</b>	2°08'51"S	79°53'17"W	<b>3. NO</b>	2°08'47"S	79°53'29"W
<b>4. SE</b>	2°08'50"S	79°53'18"W	<b>4. NO</b>	2°08'46"S	79°53'27"W
<b>5. SE</b>	2°08'50"S	79°53'19"W	<b>5. NO</b>	2°08'48"S	79°53'26"W

## Apéndice 7

### *Equipo de medición*



## Apéndice 8

*Modelo de equipo*



## Apéndice 9

*Edificio cliente y antena transmisora*



## Apéndice 10

### *Código para ajuste de mínimos cuadrados*

```
archivo_excel = 'C:\\Users\\david\\Desktop\\libro3.xlsx'
df = pd.read_excel(archivo_excel)

# Seleccionar las dos columnas
x = df['Distancia']
y = df['Path loss media']
x1=df['DistanciaNLOS']
y1=df['PL_NLOS']
x2=df['DistanciaLOS ']
y2=df['PL_LOS']
# Ajuste de mínimos cuadrados
coefficients = np.polyfit(x, y, 1)
slope, intercept = coefficients

# Crear la línea de ajuste
line_of_best_fit = slope * x + intercept

print(f"Coeficiente de pendiente (slope): {slope}")
print(f"Intercepto: {intercept}")

# Visualizar los resultados
plt.scatter(x1, y1, marker='^', label='NLOS')
plt.scatter(x2, y2, label='LOS')
plt.plot(x, line_of_best_fit, color='red', label='Ajuste de
mínimos cuadrados')
plt.legend()
plt.xlabel('Distancia en Km')
plt.ylabel('Path loss en dB')
plt.title('Ajuste de Mínimos Cuadrados')
plt.show()
```

## Apéndice 11

### *Código para predicciones de Okumura-Hata*

```
archivo_excel = 'C:\\Users\\david\\Desktop\\Libro1.xlsx'
df = pd.read_excel(archivo_excel)

# Parámetros del modelo Okumura-Hata
frecuencia = 900 # en MHz
altura_transmisor = 30 # en metros
altura_receptor = 1 # en metros
distancia = df['Distancia'] # asume que tienes una columna
llamada 'Distancia' en tu archivo

# Cálculo de la pérdida de paso según el modelo Okumura-Hata
L0 = 69.55 + 26.16 * (np.log10(frecuencia))
A=13.82*np.log10(altura_transmisor)
Ch= 0.8 + (1.1 * np.log10(frecuencia) - 0.7)*altura_receptor -
1.56 * np.log10(frecuencia)
B= (44.9 - 6.55 * np.log10(altura_transmisor)) *
np.log10(distancia)

pérdida_de_paso = L0 - Ch - A + B
Lsuburbana= pérdida_de_paso-2*(np.log10(frecuencia/28))**2 -
5.4

# Agregar la pérdida de paso al DataFrame
df['Pérdida de Paso'] = Lsuburbana

# Guardar el resultado en un nuevo archivo Excel
df.to_excel('C:\\Users\\david\\Desktop\\integradora\\Resultado
sOH.xlsx', index=False)
```

## Apéndice 12

### *Código para predicciones de 3GPP*

```

archivo_excel = 'C:\\Users\\david\\Desktop\\Libro1.xlsx'
df = pd.read_excel(archivo_excel)

#Parametros
f= 0.9 # en GHz
hb= 30 # en metros
hm= 1 # en metros
distancia = df['Distancia']
hroof= 6 # en metros
w= 5 # en metros

#Calculos
L= 161.04 - 7.1*np.log10(w)+7.5*np.log10(hroof)-(24.37-
3.7*((hroof/hb)**2))*np.log10(hb)+(43.42-
3.1*np.log10(hb))*(np.log10(distancia*1000)-3)+20*np.log10(f)-
(3.2*(np.log10(11.75*hm))**2-4.97)

# Agregar la pérdida de paso al DataFrame
df['Pérdida de Paso'] = L

# Guardar el resultado en un nuevo archivo Excel
df.to_excel('C:\\Users\\david\\Desktop\\integradora\\Resultado
s3gpp.xlsx', index=False)

```

## Apéndice 13

### *Código para predicciones de TeccialLora*

```

# Cargar datos desde un archivo Excel
archivo_excel = 'C:\\Users\\david\\Desktop\\Libro1.xlsx'
df = pd.read_excel(archivo_excel)
distancia = df['Distancia'] # asume que tienes una columna
llamada 'Distancia' en tu archivo

#Cálculo de LP
L= 82.87511786074401 + 7.278928898292474 * np.log10(distancia)

# Agregar la pérdida de paso al DataFrame
df['Pérdida de Paso'] = L

# Guardar el resultado en un nuevo archivo Excel
df.to_excel('C:\\Users\\david\\Desktop\\integradora\\Resultado
sTL.xlsx', index=False)

```

## Apéndice 14

### *Código para predicciones de Ericsson*

```
archivo_excel = 'C:\\Users\\david\\Desktop\\Libro1.xlsx'
df = pd.read_excel(archivo_excel)
#Parametros
a0=36.2
a1=30.2
a2=-12.0
a3= 0.1
f=900 # en MHz
distancia = df['Distancia'] #en km
hb=30 # en metros
hr= 1 # en metros
#Calculos
gf= 44.49*np.log10(f)-4.78*(np.log10(f))**2
PL= a0 + a1*np.log10(distancia) + a2*np.log10(hb) +a3 *
np.log10(hb) * np.log10(distancia)-
3.2*(np.log10(11.75*hr))**2 + gf

# Agregar la pérdida de paso al DataFrame
df['Pérdida de Paso'] = PL

# Guardar el resultado en un nuevo archivo Excel
df.to_excel('C:\\Users\\david\\Desktop\\integradora\\Resultado
sEricsson.xlsx', index=False)
```

## Apéndice 15

### *Formato del Informe Final*

#### **1. Introducción:**

##### **Resumen:**

Síntesis del proyecto

##### **Contexto:**

Breve descripción de la importancia de determinar el modelo de propagación para LoRaWAN en Guayaquil.

##### **Objetivos:**

Establecer los objetivos específicos de la determinación del modelo de propagación.

#### **2. Metodología:**

##### **Descripción de Herramientas:**

Detalles sobre las herramientas y equipos utilizados para la medición y el análisis de la propagación de señales LoRaWAN.

##### **Procedimiento de Medición:**

Descripción detallada de cómo se realizaron las mediciones, incluyendo ubicaciones específicas, frecuencias utilizadas, potencia de transmisión, etc.

#### **3. Entorno Geográfico:**

##### **Edificaciones y Obstáculos:**

Evaluación de cómo las edificaciones y obstáculos influyen en la propagación de señales.

#### **4. Modelo de Propagación:**

**Modelos Utilizados:**

Descripción de los modelos de propagación utilizados

**5. Resultados:****Mapas de Cobertura:**

Presentación de mapas que ilustren la cobertura predicha por el modelo en comparación con la cobertura real medida.

**Análisis de Resultados:**

Interpretación de los resultados obtenidos y comparación con expectativas teóricas.

**6. Validación de Resultados:****Pruebas de Campo:**

Descripción de pruebas de campo realizadas para validar los resultados del modelo.

**Comparación con Datos Reales:**

Comparación entre los datos obtenidos del modelo y los datos medidos en campo.

**7. Limitaciones del Modelo:**

Identificación de factores que el modelo no tiene en cuenta y cómo pueden afectar los resultados.

**8. Conclusiones:**

Principales conclusiones de la determinación del modelo de propagación.

**9. Recomendaciones:**

Si es necesario, recomendaciones para ajustar el modelo en base a los resultados y limitaciones identificadas.



**10. Referencias:**

Fuentes de información teórica.

**11. Anexos:****Datos Crudos:**

Inclusión de datos crudos recopilados durante la determinación del modelo.

**Gráficos Adicionales:**

Cualquier gráfico o mapa adicional que respalde la información presentada.