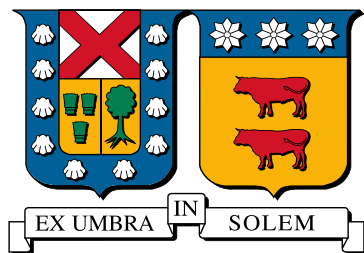


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA
MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO - CHILE



“CARACTERIZACIÓN DEL CANAL
INALÁMBRICO PARA DESPLIEGUE DE
REDES IOT”

OSCAR MATIAS VILLARROEL QUEZADA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRÓNICO, MENCIÓN COMPUTADORES

PROFESOR GUIA: DR. MELISSA DIAGO MOSQUERA
PROFESOR CORREFERENTE: DR. MIGUEL GUTIERREZ

ABRIL 2025

Agradecimientos

A Dios, por prestarme salud, fuerza, paciencia y conocimiento.

A mis padres Margarita y Lupercio, por su amor incondicional.

A Natalia por el cariño y la compañía a toda prueba.

A la familia Voigt Caselli, por ser luz en la oscuridad.

A todos mis amigos, que me han dado alegría en este camino.

A todos mis profesores, por su gran inspiración, forjadores de rigor y profesionalismo.

*Mira, todo esto lo hace Dios, dos y aun tres veces con el hombre,
para retraer su alma de la tumba, para alumbrarle con la luz de la vida.*

Job 33

Caracterización del canal inalámbrico para despliegue de redes

IoT

Oscar Matías Villarroel Quezada

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico.

Universidad Técnica Federico Santa María

Profesora Guía: Dra. Melissa Diago Mosquera

Abril 2025

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo la caracterización de un canal inalámbrico en entornos de Internet de las Cosas (IoT) utilizando el Indicador de Potencia de Señal Recibida (RSSI) obtenido a través de una campaña de medición. Para lograr esto, se desarrollaron equipos de medición específicos, considerando un transmisor y un receptor. También se llevaron a cabo campañas de medición en entornos agrícolas. Los datos recopilados fueron analizados con modelos de propagación como el Log-Distance Path Loss Model, con el fin de evaluar la pérdida de señal en función de la distancia y la altura del transmisor con respecto a la vegetación.

Las mediciones se realizaron considerando dos alturas: sobre el cultivo y a la altura del cultivo, permitiendo comparar el impacto de la vegetación en la propagación de la señal. Los resultados obtenidos incluyen un conjunto de datos representativo para despliegues IoT y un análisis de la atenuación de la señal en función de estos factores. Este trabajo contribuye al entendimiento y optimización de redes IoT, especialmente en aplicaciones como Smart Farming, proporcionando información para mejorar la eficiencia en la colocación de dispositivos y el diseño de redes de comunicación inalámbrica en entornos agrícolas.

Palabras Clave: RSSI; modelos de propagación; LoRa; smart farming; comunicación inalámbrica

Wireless channel characterization for IoT network deployment

Oscar Matías Villarroel Quezada

Thesis for the fulfillment of the B.S. in Electronics Engineering.

Universidad Técnica Federico Santa María

Advisor: Dr. Melissa Diago Mosquera

April 2025

Abstract

This project aims to characterize a wireless channel in Internet of Things (IoT) environments using the Received Signal Strength Indicator (RSSI) obtained through a measurement campaign. To achieve this, specific measurement equipment was developed, considering a transmitter and a receiver, also measurement campaigns were conducted in agricultural environments. The collected data was analyzed using propagation models such as the Log-Distance Path Loss Model to evaluate signal loss as a function of distance and transmitter height relative to vegetation.

The measurements were carried out considering two heights: above the crop and at crop level, allowing for a comparison of the impact of vegetation on signal propagation. The obtained results include a representative dataset for IoT deployments and an analysis of signal attenuation based on these factors. This work contributes to the understanding and optimization of IoT networks, particularly in applications such as Smart Farming, providing valuable insights to improve the efficiency of device placement and the design of wireless communication networks in agricultural environments.

Keywords: RSSI; propagation models; LoRa; smart farming; wireless communication

Índice de contenidos

1. Introducción	1
1.1. Contexto General	1
1.2. Objetivo General	1
1.3. Objetivos Específicos	1
2. Marco Teórico	2
2.1. Redes IoT y su relevancia	2
2.2. Propagación de señales inalámbricas	3
2.3. Modelos de propagación	4
2.3.1. Free Space Path Loss	4
2.3.2. Log-Distance Path Loss	5
2.4. Regresión Lineal	7
2.5. RSSI y su aplicación	8
2.6. Tecnologías IoT:	9
2.6.1. LoraWan	9
2.6.2. ZigBee	10
3. Estado del arte	11
3.1. IoT	11
3.2. Protocolos de red IoT	11
3.3. Aplicaciones IoT	12
3.4. Modelado del canal inalámbrico	13
4. Metodología	14
4.1. Diseño de equipos de medición	14
4.1.1. Módulo Transmisor	16
4.1.2. Módulo Receptor	16
4.2. Campañas de medición	18
4.3. Procesamiento y análisis de datos	20
4.4. Modelos de propagación aplicados	21

5. Resultados	21
5.1. Datos obtenidos	21
5.2. Análisis de las mediciones con LoRa	22
5.2.1. Exploración con datos en bruto	22
5.2.2. Comparación en Diferentes Alturas	24
5.3. Análisis comparativo de las mediciones con ZigBee y LoRa	26
5.3.1. Evaluación de la caracterización	30
6. Conclusión	33
6.1. Trabajo Futuro	35
Referencias	37
7. Anexos	40

Índice de tablas

3.1. Comparación de Protocolos IoT	12
4.2. Características técnicas principales de XBee S2C y Semtech SX1276.	15
5.3. Resultados del ajuste de modelos de propagación para diferentes tecnologías, potencias y alturas.	33

Índice de figuras

2.1. Esquema de capas de redes IoT.[1]	2
2.2. Efecto de Pathloss, Shadowing y Multipath en la potencia recibida.	4
4.3. Diagrama de conexiones.	15
4.4. Equipos desarrollados para campaña.	17
4.5. Diagrama de comunicación entre módulos.	17
4.6. Imagen Satelital de campo de ciruelos, Fundo Santa Sofía, ...	18
4.7. Altura de equipos de medición	19
4.8. Interior del cultivo de Ciruelos	20

5.9. Posición real de mediciones.	22
5.10. Mediciones Distribuidas espacialmente de RSSI, SNR y paquetes recibidos, día 1, LoRa a 17 [dBm]	23
5.11. RSSI vs Distancia a distintas alturas.	24
5.12. Aplicación de modelos de propagación a 17 [dBm].	25
5.13. Mediciones Distribuidas espacialmente, día 2, LoRa a 6 [dBm], $h_1 = 4.8$ [m] . .	27
5.14. Mediciones Distribuidas espacialmente, día 2, LoRa a 6 [dBm], $h_2 = 1.5$ [m] . .	27
5.15. Mediciones Distribuidas espacialmente, día 2, ZigBee a -2 [dBm], $h_1 = 4.8$ [m] . .	28
5.16. Mediciones Distribuidas espacialmente, día 2, ZigBee a -2 [dBm], $h_2 = 1.5$ [m] . .	28
5.17. Comparación con LoRa a 6 [dBm] de RSSI a altura $h_1 = 4.8$ [m]	29
5.18. Comparación con ZigBee de RSSI a altura $h_1 = 4.8$ [m]	29
5.19. Modelos de Path loss con LoRa a $h_1 = 4.8$ [m]	30
5.20. Modelos de Path loss con LoRa a $h_2 = 1.5$ [m]	31
5.21. Modelos de Path loss con ZigBee a $h_1 = 4.8$ [m]	31
5.22. Modelos de Path loss con ZigBee a $h_2 = 1.5$ [m]	32
5.23. CDF Modelos de propagación, LoRa a 17 [dBm]	34
5.24. CDF Modelos de propagación, LoRa a 6 [dBm] y ZigBee a -2 [dBm]	34

Índice de códigos

7.1. Seudocódigo transmisor.	40
7.2. Seudocódigo receptor.	41
7.3. Seudocódigo preprocesamiento de datos	42
7.4. Seudocódigo obtención de modelos de propagación	42

1. Introducción

1.1. Contexto General

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) ha revolucionado la forma de interactuar con el entorno, permitiendo la interconexión de dispositivos y sensores en aplicaciones que abarcan desde la industria hasta la agricultura inteligente (Smart Farming). Para garantizar el éxito de estas redes, es crucial comprender las características de los canales de comunicación inalámbricos y cómo las condiciones del entorno afectan el rendimiento de las mismas.

1.2. Objetivo General

Caracterizar un canal inalámbrico en entornos IoT utilizando datos de RSSI obtenidos mediante campañas de medición.

1.3. Objetivos Específicos

- Diseñar y desarrollar equipos para la medición de RSSI.
- Realizar campañas de medición en entornos de cultivos de ciruelo.
- Procesar los datos recolectados y ajustarlos a modelos de propagación.
- Analizar las variaciones en el canal debido a factores como altura del transmisor.

2. Marco Teórico

2.1. Redes IoT y su relevancia

Las redes de Internet de las Cosas (IoT) permiten la interconexión de dispositivos que recopilan y transmiten datos, facilitando aplicaciones como monitoreo ambiental, gestión de recursos y automatización. Estas redes son esenciales en áreas como ciudades inteligentes, salud, logística y agricultura de precisión. La relevancia de las redes IoT está en su capacidad para optimizar procesos, reducir costos operativos y mejorar la toma de decisiones a partir de datos en tiempo real. Entre las principales tecnologías utilizadas en IoT se encuentran Zigbee, LoRaWAN, NB-IoT y Wi-Fi, cada una con características específicas en términos de alcance, consumo energético y velocidad de transmisión.

Un esquema del funcionamiento general del IoT es el que se muestra en la figura 2.1, donde se tiene la capa de sensores, la cual se conecta a través de distintos protocolos con la plataforma que almacena los datos, generalmente en la nube, y los procesa para generar datos estadísticos. Finalmente la capa de aplicación, la cual se ajusta al contexto en el que se está utilizando la tecnología, ya sea agricultura, salud, hogar inteligente, etc.

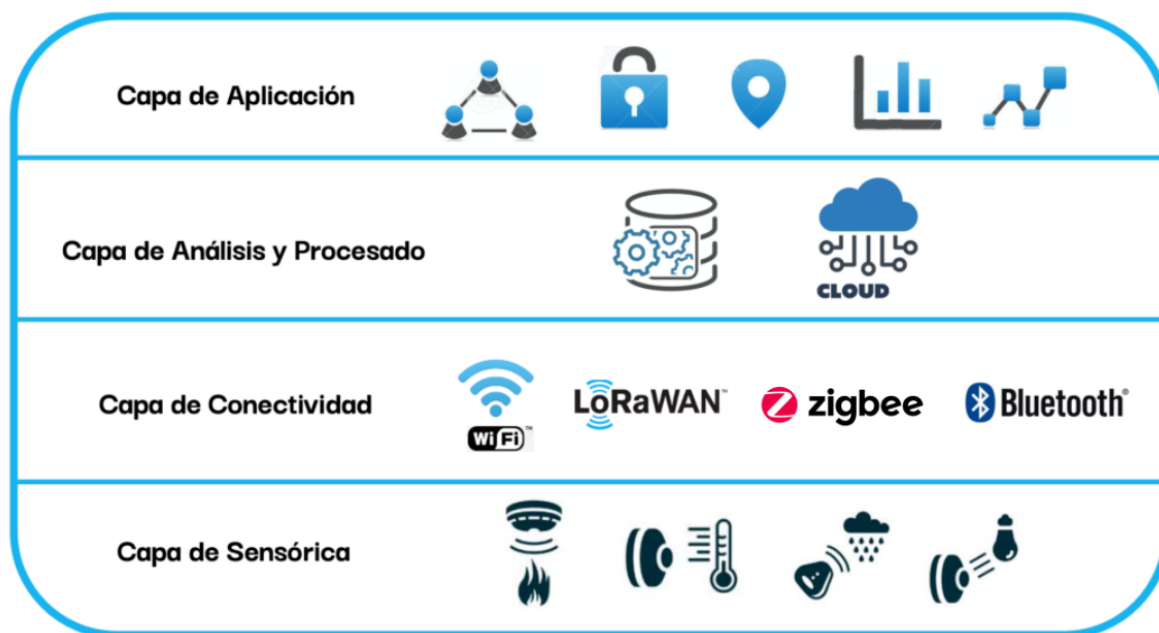


Figura 2.1: Esquema de capas de redes IoT.[1]

2.2. Propagación de señales inalámbricas

La propagación de señales inalámbricas es el proceso mediante el cual las ondas de radio viajan desde el transmisor hasta el receptor. Este fenómeno está influenciado por múltiples factores, como la distancia, la frecuencia de operación, la presencia de obstáculos, la topografía y las condiciones atmosféricas. En términos generales, la propagación de señales se puede clasificar en tres tipos principales:

- Propagación en espacio libre: Se refiere a la transmisión de ondas sin la interferencia de obstáculos, siguiendo la ley de propagación en espacio libre, donde la potencia recibida disminuye con el cuadrado de la distancia debido a la dispersión de energía.
- Propagación por reflexión, refracción y difracción: Ocurre cuando la señal interactúa con superficies u obstáculos, generando múltiples trayectorias que pueden reforzar o atenuar la señal en función de los cambios de fase de los componentes reflejados.
- Propagación por dispersión: Se presenta cuando la señal se dispersa por irregularidades del entorno, como superficies rugosas o vegetación densa, causando que la energía se disperse en múltiples direcciones. Este fenómeno está estrechamente relacionado con el desvanecimiento por múltiples trayectorias (multipath fading), donde diferentes componentes de la señal llegan al receptor con desfases que pueden sumarse de manera constructiva o destructiva.

Los principales efectos que afectan la propagación de la señal incluyen la pérdida de trayectoria (path loss), que es el decaimiento de la potencia de una onda electromagnética que viaja a través del espacio, el sombreado (shadowing), referido un área bloqueada por algún obstáculo en el cuál la señal se debilita, y el desvanecimiento debido a múltiples trayectorias (multipath fading). En 2.2 se muestran cada uno de estos efectos en la potencia de la señal con respecto a la distancia.

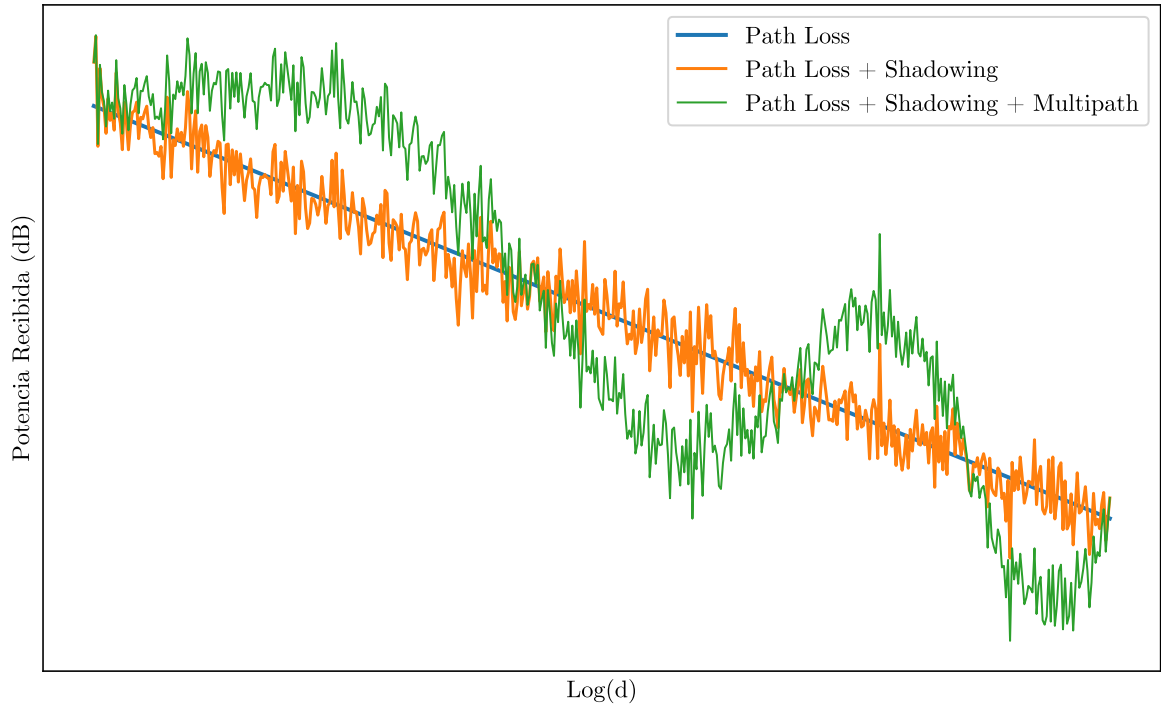


Figura 2.2: Efecto de Pathloss, Shadowing y Multipath en la potencia recibida.

2.3. Modelos de propagación

Los modelos de propagación son herramientas matemáticas que permiten predecir el comportamiento de las señales de radio en diferentes escenarios. Estos modelos son fundamentales para planificar la cobertura de redes y optimizar la ubicación de los dispositivos. Los más utilizados son el Free Space Path Loss (FSPL), que se aplica principalmente en entornos sin obstáculos y utiliza la distancia y la frecuencia para calcular la pérdida de la señal, y el Log-Distance Path Loss que extiende el FSPL considerando la variabilidad del entorno. Estos modelos permiten estimar la pérdida de señal y diseñar redes más eficientes, adaptándose a las condiciones del entorno donde se desplegarán los dispositivos.

2.3.1. Free Space Path Loss

El modelo FSPL es uno de los más utilizados para predecir la pérdida de señal en condiciones ideales, donde no existen obstáculos entre el transmisor y el receptor. Este modelo sirve como referencia base para comparar la atenuación mínima que experimenta una señal. La ecuación

del modelo es la siguiente:

$$PL_{FSPL} = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (2.1)$$

Donde:

- PL_{FS} es la pérdida de trayectoria en decibels (dB).
- d es la distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros.
- f es la frecuencia de operación en MHz.
- c es la velocidad de la luz en vacío.

Este modelo es adecuado para escenarios abiertos y sin interferencias. Sin embargo, en entornos agrícolas con vegetación, estructuras y variaciones en el terreno, el FSPL tiende a subestimar la pérdida real de la señal.

2.3.2. Log-Distance Path Loss

El modelo Log-Distance Path Loss es empleado para considerar atenuaciones adicionales causadas por obstáculos como la vegetación, árboles y estructuras presentes en los distintos entornos. A diferencia del FSPL, el Log-Distance Path Loss introduce un factor de decaimiento que ajusta la pérdida de señal en función de las características del entorno. La expresión general es:

$$PL_{LOG} = PL_0 + 10n \log_{10}(d/d_0) + X_\sigma \quad (2.2)$$

Donde:

- PL_{LOG} es la pérdida de trayectoria calculada en dB.
- PL_0 es la pérdida de espacio libre, a la distancia de referencia d_0 .

- n es el exponente de pérdida de trayectoria, dependiente de las condiciones del entorno.
- d es la distancia entre el transmisor y receptor.
- X_σ es una variable aleatoria de distribución normal que representa la variabilidad debido a la dispersión.

Para la estimación del exponente de pérdida de trayectoria n y la calibración del modelo, se emplean dos modelos ampliamente utilizados en la literatura:

- Modelo Close-In (CI):

Este modelo utiliza una distancia de referencia fija (generalmente 1 metro) y ajusta el modelo a partir de mediciones experimentales cercanas al transmisor. La principal ventaja del modelo CI esta en su consistencia física y la facilidad para comparar resultados entre diferentes entornos y frecuencias de operación. Además, al basarse en una referencia física clara, resulta más interpretativo en términos prácticos de propagación. El exponente de pérdida de trayectoria n se obtiene mediante regresión lineal sobre los datos registrados. Para el ajuste del modelo se usa la misma ecuación 2.2 que describe al modelo Log-Distance.

- Modelo de Intercepto Flotante (Floating Intercept, FI):

Este modelo ajusta simultáneamente tanto la pendiente como el intercepto de la curva de pérdida de trayectoria mediante regresión lineal, sin requerir una distancia de referencia fija. Su flexibilidad le permite adaptarse mejor a entornos con alta variabilidad y dispersión de señales, como zonas con vegetación o estructuras irregulares. Si bien proporciona un mejor ajuste estadístico en muchos casos, puede carecer de la interpretabilidad física directa que ofrece el modelo CI.

La ecuación utilizada es:

$$PL_{FI} = \alpha + 10\beta \log(d) + X_\sigma \quad (2.3)$$

Donde:

- PL_{FI} es la pérdida de trayectoria en dB.

- α es el intercepto de la regresión lineal.
- β es la pendiente de la curva ajustada mediante regresión lineal.
- d es la distancia entre el transmisor y el receptor.
- X_σ es un término aleatorio de distribución normal que representa la variabilidad de la propagación.

Cabe destacar que otros modelos, como HATA, Okumura y Rayleigh, consideran parámetros adicionales como la altura de las antenas para obtener predicciones más precisas. Sin embargo, estos modelos están diseñados para aplicaciones en entornos urbanos y suburbanos a escalas de distancia mayores a 1 km. Dado que este trabajo se enfoca en escenarios con menores distancias y condiciones específicas de propagación en entornos agrícolas, estos modelos no se utilizarán en la evaluación de la pérdida de trayectoria.

2.4. Regresión Lineal

La regresión es un método matemático-estadístico ampliamente utilizado en las ciencias e ingeniería para caracterizar un grupo de datos según la relación entre las variables dependientes e independientes. Este método consiste en ajustar una curva o función escogida a los datos que se tienen.

La regresión más común y fácil de calcular es la regresión lineal, la cual ajusta una función con parámetros que tienen una relación lineal con los predictores (variables independientes), indistintamente si estos son lineales con respecto a la variable a estimar (variable dependiente) o no [2]. Un ejemplo de regresión lineal simple es:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(x) \quad (2.4)$$

donde β_0 y β_1 son los parámetros a ajustar, x la variable independiente e y la variable dependiente.

Para ajustar la curva a los datos se utilizan distintos algoritmos, donde el más común es el algoritmo de mínimos cuadrados, basado principalmente en determinar la curva que tenga la

mínima distancia euclidiana con los puntos que se tienen.

Una forma para poder comparar distintos ajustes es la raíz del error cuadrático medio o RMSE por sus siglas en inglés. Esta medida evalúa que tanto se acerca en promedio la curva ajustada a los puntos y se calcula como se muestra en la ecuación 2.5, donde N es la cantidad de puntos, y_i es el valor real del punto e $\hat{y}_i$ es el valor estimado por la función ajustada. Mientras menor sea el valor del RMSE, mejor es el ajuste.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (2.5)$$

2.5. RSSI y su aplicación

Es una medida de la intensidad de la señal que recibe un dispositivo. Se expresa en decibelios-milivatio (dBm) y permite evaluar la calidad de la comunicación inalámbrica. Valores cercanos a 0 dBm indican una señal fuerte, mientras que valores más negativos representan señales débiles. El RSSI es ampliamente utilizado en la caracterización de canales y la evaluación de la cobertura de redes inalámbricas. Sin embargo, su variabilidad puede verse afectada por el entorno, la configuración del hardware y las condiciones atmosféricas.

El RSSI también se emplea en la estimación de la pérdida de trayectoria (Path Loss, PL) al compararlo con la potencia de transmisión. En general, la pérdida de trayectoria se define como:

$$PL = P_{TX} - RSSI \quad (2.6)$$

Donde:

- PL es la pérdida de trayectoria en dB a una distancia d ,
- P_{TX} es la potencia de transmisión en dBm,
- $RSSI$ es la potencia de señal recibida en dBm.

Dado un conjunto de mediciones experimentales de RSSI y distancia, se puede ajustar cualquier

modelo de pérdida de trayectoria de la forma general:

$$PL(d, \theta) = f(d, \theta) \quad (2.7)$$

Donde:

- $f(d, \theta)$ es una función general que describe la pérdida de trayectoria en función de la distancia d ,
- θ es un conjunto de parámetros del modelo, que pueden incluir coeficientes de atenuación, exponente de pérdida de trayectoria, interferencias u otros factores.

Para estimar los parámetros del modelo θ , se minimiza el error entre los valores medidos $PL_{medido}(d)$ y los valores predichos $PL_{modelo}(d, \theta)$, generalmente a través de mínimos cuadrados:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^N (PL_{medido}(d_i) - PL_{modelo}(d_i, \theta))^2 \quad (2.8)$$

2.6. Tecnologías IoT:

2.6.1. LoraWan

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) es un protocolo de comunicación diseñado para redes IoT que requieren bajo consumo energético y largo alcance. Opera en bandas de frecuencia sin licencia, como 915 MHz en América, y utiliza la modulación LoRa basada en tecnología de espectro ensanchado. Entre sus principales características se destacan:

- Spreading Factor (SF)
Ajusta la tasa de datos y el alcance de la señal. Un SF más alto incrementa el alcance pero reduce la velocidad de transmisión.
- Bajo consumo
Permite que los dispositivos operen durante años con baterías convencionales.

- Escalabilidad

Soporta redes con miles de dispositivos conectados.

- Seguridad

Integra mecanismos de autenticación y cifrado para proteger la información transmitida.

Estas características hacen de LoRaWAN una opción ideal para aplicaciones en áreas rurales y agrícolas, donde se requieren comunicaciones robustas a largas distancias.

2.6.2. ZigBee

Zigbee es un protocolo de comunicación inalámbrico diseñado para aplicaciones de IoT que requieren bajo consumo energético, comunicación en malla y conectividad de corto a mediano alcance. Opera en la banda de 2.4 GHz a nivel global y en algunas bandas específicas como 915 MHz en América y 868 MHz en Europa. Utiliza el estándar IEEE 802.15.4 para la capa física y de enlace, lo que permite redes confiables y escalables.

Entre sus principales características se destacan:

- Redes en malla (Mesh)

Permite la interconexión entre dispositivos, aumentando la cobertura y la tolerancia a fallos mediante el enrutamiento dinámico de datos.

- Bajo consumo

Diseñado para dispositivos con baterías de larga duración, ideal para sensores y actuadores en entornos industriales y domésticos.

- Escalabilidad

Soporta redes con cientos de dispositivos interconectados, permitiendo la creación de sistemas IoT complejos.

- Seguridad

Implementa mecanismos de cifrado AES-128 y autenticación para garantizar la privacidad y la integridad de los datos transmitidos.

Estas características hacen de Zigbee una solución ideal para aplicaciones en automatización del hogar, monitoreo industrial y control de iluminación, donde se requiere comunicación confiable entre múltiples dispositivos dentro de un área determinada.

3. Estado del arte

3.1. IoT

Internet of Things ha tenido gran desarrollo durante el último tiempo, pues provee herramientas eficaces para dar soporte a diversas aplicaciones, tales como industria, transporte, logística, salud. Esta tecnología consiste en equipos inteligentes que se comunican entre sí. En [3] y [4] los autores entregan una descripción general del concepto, considerando sus tecnologías habilitantes, protocolos y aplicaciones. Esto es de utilidad para comprender los fundamentos técnicos y prácticos del IoT. En particular, [3] muestra además de lo anterior, una revisión práctica de protocolos y tecnologías.

Dentro de las diversas aplicaciones que tiene el IoT se encuentra el soporte que brinda a Smart Farming. En [5] se revisa el *Smart Farming* de forma exhaustiva y cómo impacta el IoT en esta aplicación. Por otra parte, en [6] los autores plantean las tecnologías involucradas en el soporte que brinda el IoT al Smart Farming. Este estudio involucra desde la arquitectura de red y capas, topologías de red y protocolos. Dentro de las aplicaciones planteadas se encuentran: *agricultura de precisión*, monitoreo de invernaderos, monitoreo de animales y el seguimiento y rastreo de los cultivos.

3.2. Protocolos de red IoT

En [6] y [7] se revisan los distintos protocolos de red utilizados en aplicaciones de agricultura de precisión. El primer artículo explica, revisa y compara respecto de varios criterios como consumo energético, seguridad y tasa de propagación. Esta información permite tomar una decisión ajustada a los requerimientos de la aplicación. El segundo artículo también revisa de forma comparativa los distintos protocolos, pero considerando además criterios como estándar, bandas de frecuencia, tasa de transmisión, distancia de transmisión y costo. Otra novedad

de este artículo es que considera protocolos de comunicación inalámbricos más usados en la actualidad tales como LoRaWAN, ZigBee y Comunicación Móvil. En el Cuadro 3.1 se resume la comparación entre protocolos considerando solo la información necesaria para el propósito de este trabajo.

Parámetro	Banda de Frecuencia	Tasa de Transmisión	Rango de Transmisión	Consumo Energético
WiFi	5-60 GHz	1-7 Mb/s	20-100 m	Alto
LoRaWAN	868-900 MHz	0.3-50 Kb/s	<30 Km	Muy Bajo
Mobile	865 MHz 2.4 GHz	2G: 50-100 Kb/s 3G: 200 Kb/s 4G: 0.1-1 Gb/s	Entire Cellular Area	Medio
WiMAX	2-66 GHz	1 Mb/s - 1 Gb/s 50-100 Mb/s	<50 Km	Medio
LR-WPAN	868-915 MHz 2.4 GHz	40-250 Kb/s	10-20 m	Bajo
RFID	868-960 MHz	40-160 Kb/s	1-5 m	Bajo
ZigBee	2.4 GHz	20-250 Kb/s	10-20 m	Bajo
SigFox	200 KHz	100-600 bit/s	30-50 Km	Bajo
Bluetooth	2.4 GHz	1-24 Mb/s	8-10 m	Muy Bajo

Tabla 3.1: Comparación de Protocolos IoT

3.3. Aplicaciones IoT

El trabajo en [8] hace una revisión de todos los conceptos mencionados hasta ahora, desde las tecnologías habilitantes y protocolos hasta las aplicaciones, incluyendo además una serie de desafíos pendientes en el desarrollo de la tecnología IoT con redes de sensores inalámbricos. Cabe destacar que este trabajo no menciona la caracterización de la propagación del canal inalámbrico como un desafío.

Una aplicación implementada sobre el estandar IEEE 802.15.4 se hace en [9], en que se aproxima la pérdida de paquetes por medio del modelo de Gilbert-Elliott, usando un equipo Waveshare Open 2530 operando en la banda 2.4 GHz con protocolo ZigBee. Este trabajo de título, a diferencia de lo realizado en [9], pretende generar un modelo del canal inalámbrico.

En [10] y [11] los autores utilizan protocolos Wifi, Bluetooth, ZigBee y LoRaWAN para estimar la ubicación de un objeto en espacios cerrados (indoor). Para la estimación de la ubicación se

utiliza triangulación, que es la medición en tres distintos puntos. La comparación se realiza según la exactitud de la ubicación. Este estudio es de interés porque en el se usa RSSI (Received signal strength indicator) para estimar distancia de la siguiente forma:

$$RSSI = -10n\log_{10}(d) + C \quad (3.9)$$

Donde n corresponde a *Path loss exponent* y C es una constante que puede considerarse como pérdidas del sistema. Además, se ajustan estos parámetros de la curva de distancia, pero no indica qué método fue usado para el ajuste de curva.

Por otra parte, en [12] se muestra un algoritmo de auto-ubicación para redes de sensores inalámbricos. El algoritmo usa la estimación de *Path loss*, por lo que usan un modelo para ambientes con vegetación dado por:

$$PL = PL_0 + 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.10)$$

Donde PL_0 representa *Path loss* a una distancia de referencia d_0 , n denota *Path loss exponent* y X_σ es una variable aleatoria normal $X_\sigma \sim N(0, \sigma)$.

Los modelos mostrados en [10] y [12] son relevantes para este trabajo ya que se usa RSSI para estimar parámetros del canal inalámbrico y ajustar curvas de modelos.

3.4. Modelado del canal inalámbrico

La ecuación 3.9 describe una relación entre el índice de fuerza de la señal recibida y la distancia entre el emisor y el receptor de dicha señal, mientras que la ecuación 3.10 describe un modelo que describe las pérdidas de potencia de señal respecto de la distancia entre emisor y receptor. Estas ecuaciones describen un aspecto de la propagación de señal en un canal inalámbrico y tienen parámetros que deben ser ajustados para que sea concordante con la realidad.

El trabajo en [13] propone un modelo empírico de *Path Loss*, para una red implementada sobre protocolo *WiMAX* operando en banda de 2.63 GHz en una zona rural (Outdoor). Para ajustar los parámetros del modelo se usan mediciones de RSSI y CINR (Carrier to interference plus noise ratio). Los ajustes se hacen usando ajuste de curva de MATLAB. El trabajo concluye

que el modelo con mejor ajuste es SUI (Stanford University Interim). Los otros modelos revisados son *FSPL*(Free Space Path Loss) y *Cost-Hata 231 Walfisch Ikegami*, resultando estos con menor exactitud. Por otra parte, en [14] se realiza una estimación de los parámetros del modelo *FSPL*, pero implementando una red sobre el protocolo *LoRaWAN* en un entorno de exterior. Se realizan muestras a diferentes frecuencias (433 MHz, 868 MHz y 2.4 GHz), también considerando distintos *Spreading Factors*, que es la rapidez a la que cambia la frecuencia a lo largo del ancho de banda de un canal. Este artículo no presta mayor información sobre el canal inalámbrico, solo mencionando que es exterior. Siguiendo en la misma línea, en [15] se propone la estimación de los parámetros en dos modelos, que son *FSPL* y *Two-Ray Path Loss*. Para la toma de muestras se implementan dos redes sobre los protocolos ZigBee y LoRaWAN. Los ajustes de parámetros se hacen usando Regresión Lineal. Se destaca de este artículo que el modelado del canal inalámbrico se realiza sobre un entorno montañoso y rocoso. Un estudio similar se realiza en [16] sobre *Two-Ray Path Loss* en entorno boscoso, dando una acabada explicación sobre la aplicación de ese modelo en dichas condiciones. Además, incluye una comparación de los resultados de modelos que consideran exceso de follaje conocidos como modelos MED (Modified exponential decay). La diferencia con los trabajos anteriores es que no se considera la medición de *RSSI* para estimar los parámetros del modelo, sino un generador de señales inalámbricas de prueba en banda de frecuencia en torno a los 900 MHz. En [17] se emplea una novedosa técnica de modelado de Path Loss y Shadowing en la banda de 3.5 GHz, comparando los resultados del ajuste con otros modelos MED.

De todos los trabajos mencionados anteriormente, se tiene información sobre una diversidad de entornos de aplicación IoT, protocolos de comunicación IoT, implementaciones de prueba y tipos de modelado del canal inalámbrico con sus respectivas formas de contraste del ajuste del modelo con mediciones.

4. Metodología

4.1. Diseño de equipos de medición

Para la realización de las mediciones, se diseñan dos equipos específicos: uno para el transmisor y otro para el receptor. La implementación de ambos dispositivos es la misma, y se muestra

en la figura 4.3. Este diseño se basa en el módulo *LILYGO TTGO LoRa32 V1.3*, que integra un microcontrolador ESP32 y un transceptor *Semtech LoRa SX1276*. Este, se conecta a un módulo RF Xbee S2C, además de un módulo GPS y un módulo para tarjeta SD. Ambos dispositivos se montan en una estructura hecha con impresión 3D y son alimentadas con una batería portátil de 5V.

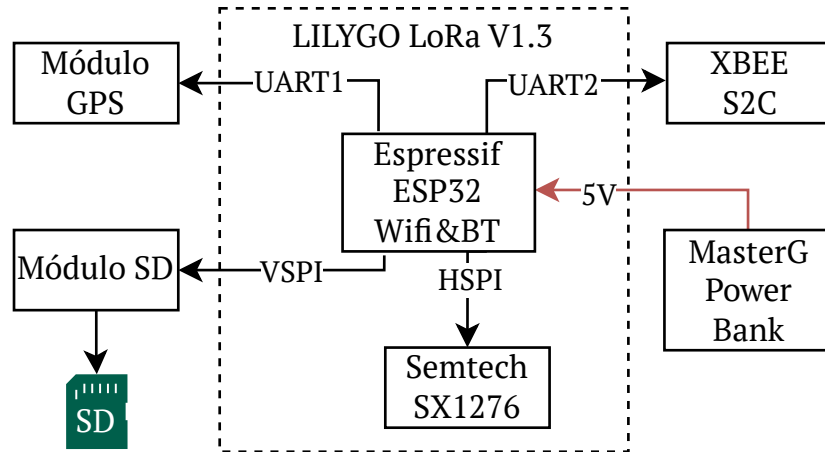


Figura 4.3: Diagrama de conexiones.

Los módulos principales de comunicación (Lora y Zigbee) son seleccionados debido a su bajo consumo energético, rango de cobertura y facilidad de programación. A continuación, en la Tabla 4.2, se muestran las principales características de cada uno de estos módulos.

Característica	XBee S2C	Semtech SX1276
Transceiver Chipset	Silicon Labs EM357 SoC	LoRaTM Modem
Operation Frequency	2.4 [GHz]	915 [MHz]
Data Rate RF	250 [Kbps]	Up to 300 [Kbps]
Outdoor Range (Line-of-Sight)	1200 [m]	3200 [m]
Max Transmit Power	3.1 [mW] (+5 [dBm]) 6.3 [mW] (+8 [dBm])	100 [mW] (+20 [dBm]) constant RF output
Receiver Sensitivity	-100 [dBm]	-148 [dBm]
Power Consumption (Rx)	28 [mA]	9.9 [mA]

Tabla 4.2: Características técnicas principales de XBee S2C y Semtech SX1276.

4.1.1. Módulo Transmisor

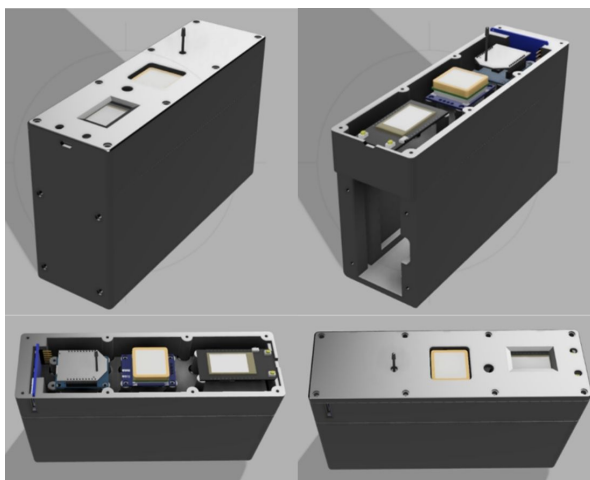
El equipo transmisor es programado para enviar tramas de datos a intervalos regulares al recibir una instrucción desde el controlador vía Bluetooth. En particular se realizan 50 transmisiones por posición. La configuración del protocolo LoRa incluye la selección de Spreading Factor: SF 7, una frecuencia de operación de 915 [MHz] . Por otra parte previamente se ha configurado el equipo XBee S2C para que su potencia de transmisión sea de -2 [dBm]. Cabe destacar que a diferencia de LoRa, Zigbee no proporciona información sobre la relación señal a ruido (SNR), lo que limita el análisis comparativo de calidad de señal. Otra diferencia es que debido a que hay un tiempo muerto entre transmisiones debido a la demora para el rescate de datos de RSSI, se programa para enviar tramas de datos de 15 paquetes.

El transmisor es montado en una estructura que permite ajustar la altura para las pruebas. En el Código 7.1, se provee un pseudocódigo del programa desarrollado para el microcontrolador del equipo transmisor. Como nota para el lector, todos los códigos referenciados en el documento se pueden encontrar al final de este, en la sección Anexos.

4.1.2. Módulo Receptor

El equipo receptor es diseñado para captar las señales transmitidas, registrar el RSSI, la relación señal a ruido (SNR) y la tasa de error de paquetes (PER). Para asegurar la precisión de la localización, se integra un módulo GPS, que permite almacenar las coordenadas exactas en cada punto de medición. Los datos recopilados son almacenados en una tarjeta SD para su posterior procesamiento. En el código 7.2, se provee un pseudocódigo del programa desarrollado para el microcontrolador del equipo receptor.

En la Figura 4.4a se muestra un modelo de la caja usada como soporte para los distintos componentes del equipo de medición. Por otra parte, en la Figura 4.4a se muestra el resultado final de la construcción y ensamble de los equipos, que se ocupan finalmente durante las campañas de medición.



(a) Diseño de la caja



(b) Resultado final del desarrollo.

Figura 4.4: Equipos desarrollados para campaña.

El sistema de comunicación diseñado para los experimentos se representa en la Figura 4.5, donde se muestran los módulos involucrados, los flujos de datos y las tecnologías inalámbricas utilizadas (LoRa y ZigBee) para la transmisión de información entre el transmisor y el receptor.

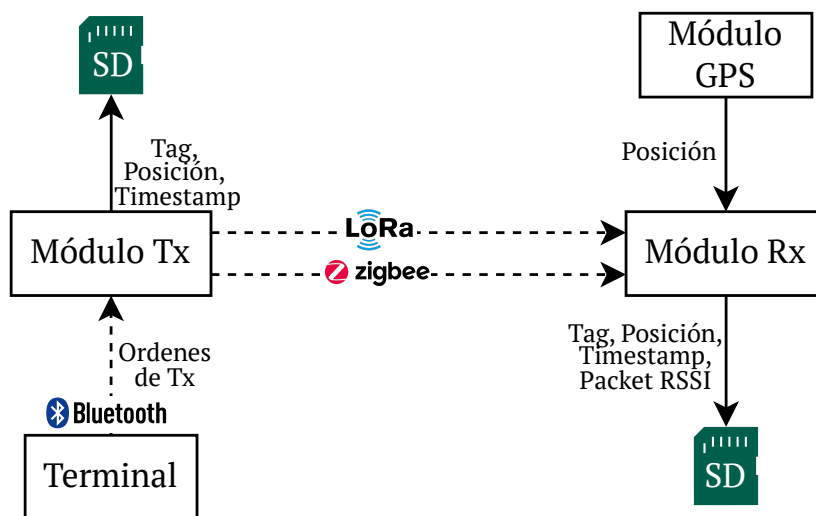


Figura 4.5: Diagrama de comunicación entre módulos.

4.2. Campañas de medición

Las pruebas se llevan a cabo en un cultivo de ciruelos del Fundo Santa Sofía, ubicado en la comuna de Melipilla, a una hora y media de Viña del Mar. En la Figura 4.6, se muestra la ubicación en vista satelital provista por Google Maps [18], junto a un acercamiento del campo particular donde se desarrolla la campaña. Las mediciones se organizan en una disposición tipo grilla con puntos de muestreo cada 15 metros aproximadamente, y se usa el módulo GPS para validar la posición. La altura de los ciruelos en los cultivos es aproximadamente entre los 3.5 y 4.5 metros en el momento de la campaña de medición.

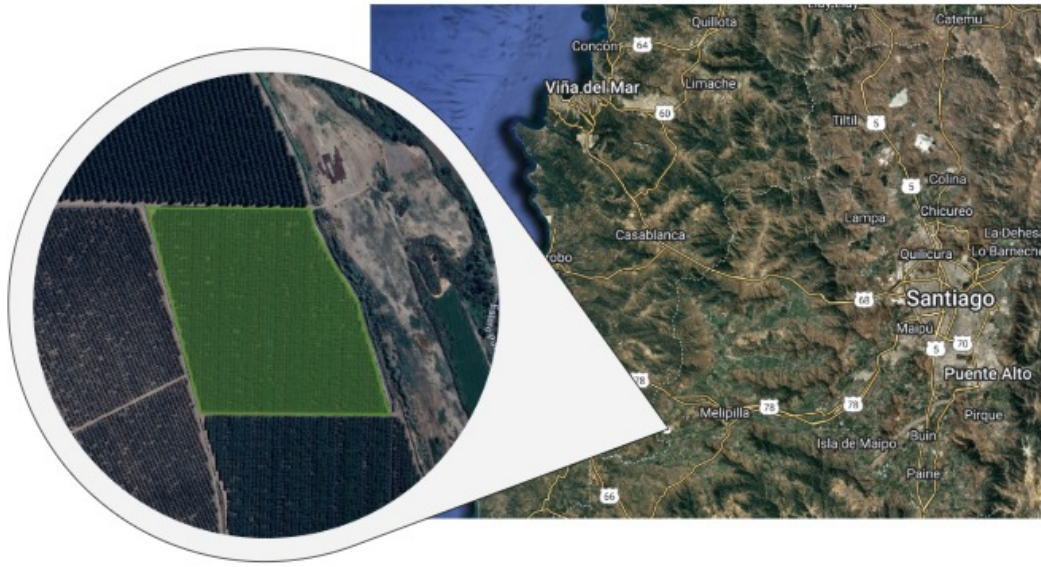


Figura 4.6: Imagen Satelital de campo de ciruelos, Fundo Santa Sofía,

Las mediciones se realizan considerando dos alturas específicas h_1 y h_2 :

- Sobre el cultivo, h_1 : A una altura de 4.8 [m], lo que permite evaluar la propagación de la señal sin interferencia directa de la vegetación. Para esto se utiliza una vara telescópica, como se muestra en la Figura 4.7a.
- A la altura del cultivo, h_2 : A 1.5 [m], reflejando condiciones más representativas de los dispositivos IoT en aplicaciones agrícolas. Para esto se monta el equipo desarrollado en un atril ajustado a 1.5 [m], como muestra la Figura 4.7b.



(a) Equipo Transmisor a 4.8 [m]



(b) Soporte para equipo a 1.5 [m]

Figura 4.7: Altura de equipos de medición

Las mediciones se llevan a cabo en dos días diferentes con configuraciones distintas:

- En el primer día, las mediciones se realizan a distintas alturas h_1 y h_2 definidas anteriormente, utilizando únicamente protocolo de comunicación LoRa, configurado con la potencia de transmisión por defecto del equipo Semtech SX1276, es decir, 17 [dBm].
- En el segundo día, se efectúan mediciones comparativas entre LoRa y ZigBee, ambas configuradas para operar a baja potencia de transmisión (-2 [dBm] en ZigBee y 6 [dBm] en LoRa, utilizando esta protocolo antenas con una ganancia de 2 [dBi]). Esta configuración en los niveles de potencia de transmisión se realiza con el objetivo de establecer condiciones similares entre ambas tecnologías, permitiendo así una comparación que tenga niveles de potencia más equiparables.

El segundo día no se realizan todas las mediciones planificadas con Zigbee debido a que la baja potencia de transmisión configurada, impide cubrir completamente el área determinada para la campaña.



Figura 4.8: Interior del cultivo de Ciruelos

4.3. Procesamiento y análisis de datos

Los datos recolectados, que incluyen el RSSI, la relación señal a ruido (SNR), en el caso de LoRa , y la tasa de error de paquetes (PER), son procesados utilizando Python. El procesamiento comienza con la limpieza de datos, eliminando mediciones atípicas o erróneas detectadas mediante técnicas de filtrado estadístico, es decir, no se incluyen las mediciones muy alejadas de

la media. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis exploratorio para identificar patrones y variaciones en función de la distancia y la altura del transmisor.

Para asegurar la precisión en la ubicación de las mediciones, se integran las coordenadas obtenidas del módulo GPS con los datos de RSSI, lo que permite trazar curvas de atenuación de la señal en los distintos escenarios agrícolas. Se utiliza regresión lineal [2] para ajustar los datos experimentales al modelo de propagación y evaluar la correlación entre la distancia y la pérdida de señal.

El análisis se complementa con gráficos comparativos que muestran la variación del RSSI en función de la distancia y las configuraciones de red, proporcionando una visión de cómo el entorno agrícola afecta la propagación de la señal. En el Código 7.3, se muestra el pseudocódigo de la implementación del preprocesamiento de los datos.

4.4. Modelos de propagación aplicados

Para la caracterización del canal inalámbrico en entornos agrícolas, se aplica principalmente el modelo de pérdida por trayectoria logarítmica (Log-Distance Path Loss, definido en la Ecuación 2.2), y de forma complementaria, el modelo de pérdida en espacio libre (Free Space Path Loss, definido en Ecuación 2.1). Estos modelos se seleccionan por su capacidad para representar tanto escenarios ideales como reales en la propagación de ondas de radiocomunicación. En el Código 7.4, se presenta el pseudocódigo utilizado para el ajuste de los modelos.

Todos los programas utilizados durante el desarrollo de este trabajo tanto del firmware como software, junto con los conjunto de datos obtenidos por las campañas de medición, se encuentran en [19] y [20]

5. Resultados

5.1. Datos obtenidos

Los datos recopilados en las campañas de medición incluyen valores de RSSI, relación señal a ruido (SNR), tasa de error de paquetes (PER) y coordenadas GPS asociadas a cada punto de medición. En la Figura 5.9 se muestra la posición geográfica exacta de los 36 puntos de

medición obtenidos, correspondiente a una imagen satelital del campo. Cabe notar que no todas las posiciones de las campañas de medición tienen con exactitud en el mismo lugar debido tanto a errores en el posicionamiento durante la campaña como errores de GPS.

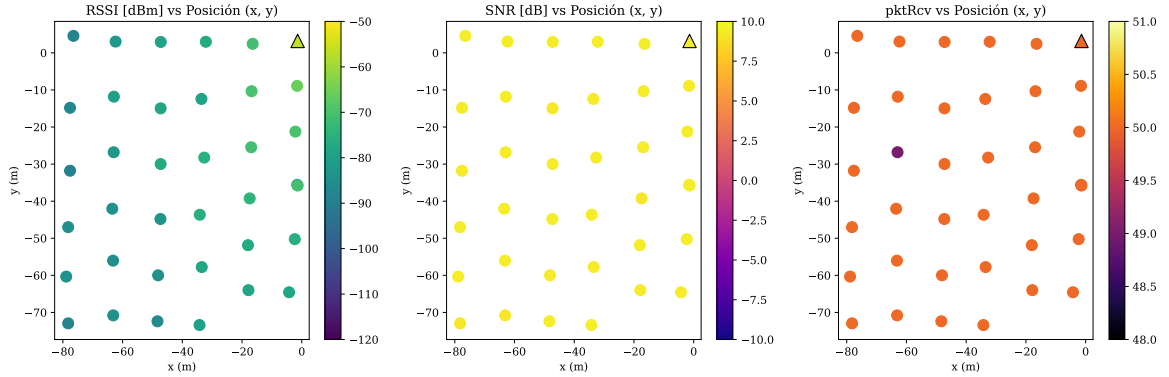


Figura 5.9: Posición real de mediciones.

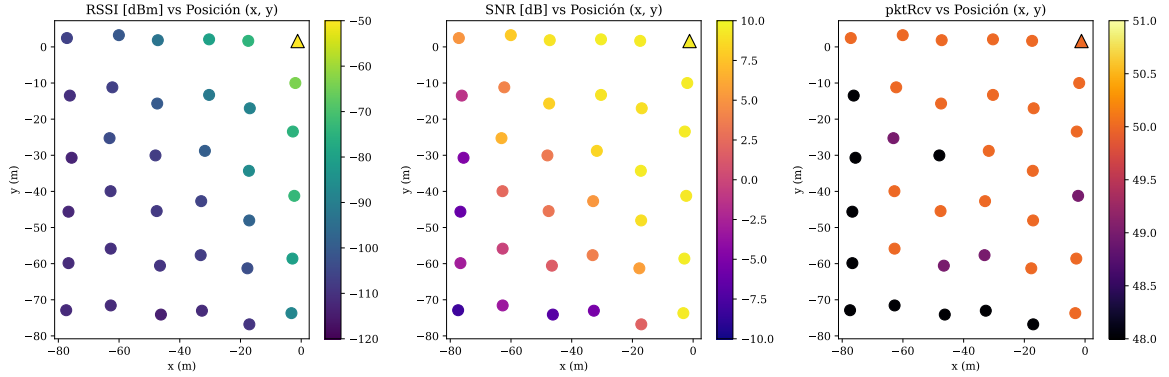
5.2. Análisis de las mediciones con LoRa

5.2.1. Exploración con datos en bruto

Antes de aplicar modelos de propagación y realizar ajustes estadísticos, se realiza un análisis exploratorio utilizando los datos en bruto recolectados durante la campaña de medición. Este análisis permite observar patrones iniciales en la atenuación de la señal sin ningún tipo de procesamiento previo.



(a) Mediciones Distribuidas espacialmente, $h_1 = 4.8$ [m]



(b) Mediciones Distribuidas espacialmente, $h_2 = 1.5$ [m]

Figura 5.10: Mediciones Distribuidas espacialmente de RSSI, SNR y paquetes recibidos, día 1, LoRa a 17 [dBm]

En la Figuras 5.10a y 5.10b se muestran los valores medios de RSSI, SNR y la cantidad de paquetes recibidos (PER) en cada punto de medición, considerando la cantidad de paquetes enviados mencionada en el Marco Teórico.

Como se ve en dichas Figuras, la variabilidad en los valores de RSSI, SNR y PER refleja la presencia de interferencias durante las mediciones. Los valores de RSSI muestran variaciones significativas en función de la distancia y la altura del transmisor. Esta situación no queda tan clara al comparar las Figuras 5.10a y 5.10b, sin embargo, en la Figura 5.11 es posible observar de forma más clara una atenuación notable en las mediciones tomadas a la altura h_2 , es decir, con vegetación densa, lo que indica a simple vista la influencia del follaje y otros obstáculos naturales en la propagación de la señal.

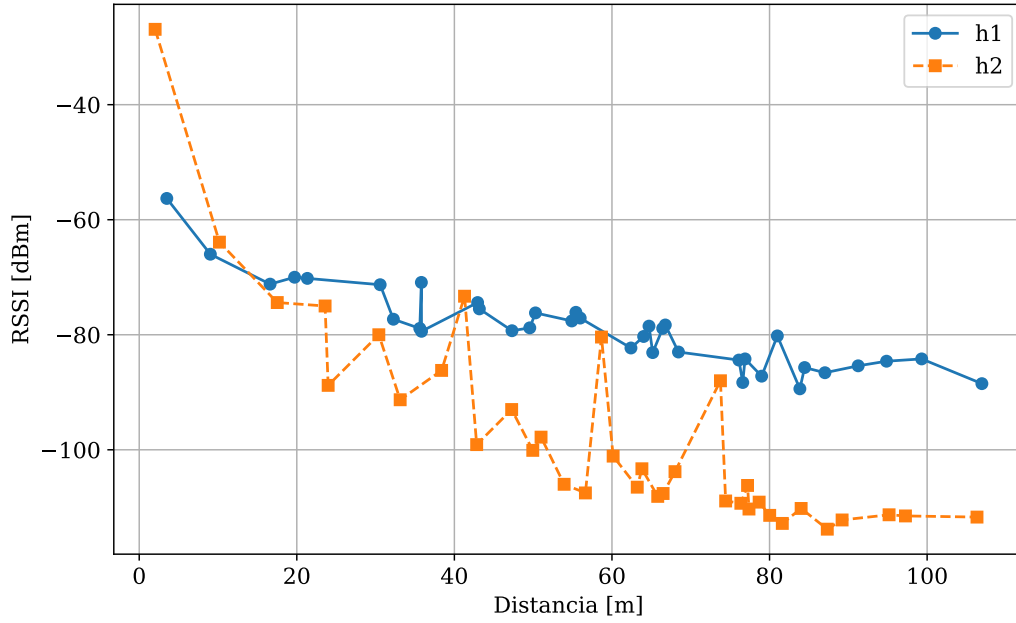


Figura 5.11: RSSI vs Distancia a distintas alturas.

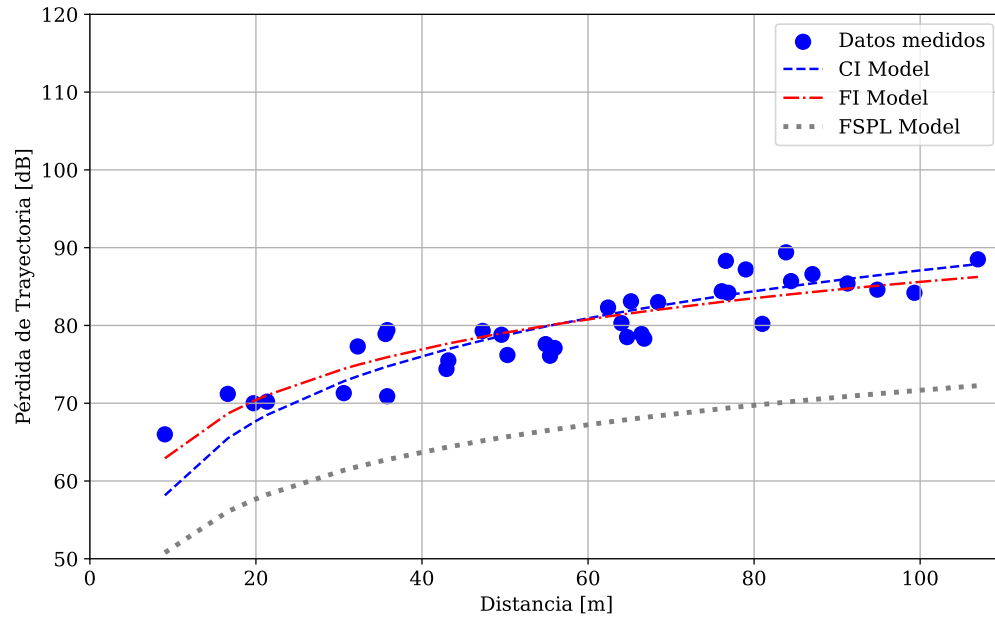
5.2.2. Comparación en Diferentes Alturas

Uno de los aspectos clave en esta investigación es la comparación de los modelos en función de la altura de transmisión. Se analizan dos configuraciones: transmisión sobre el cultivo (h_1) y transmisión a la altura del cultivo (h_2) como ya se ha indicado en Metodología.

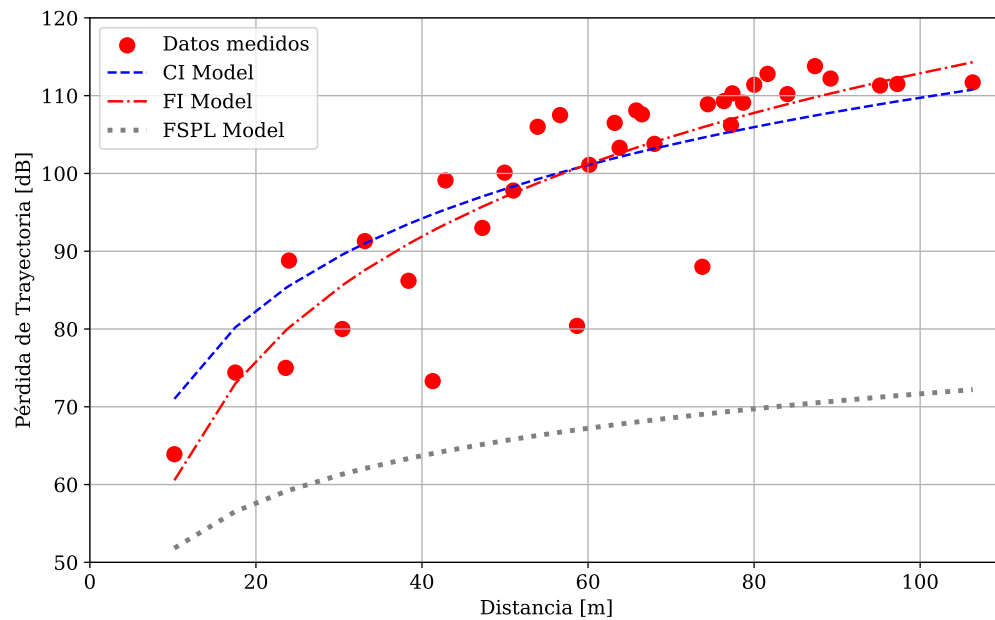
Para caracterizar el canal, se comparan las mediciones experimentales aplicando el Log-Distance Path Loss Model, con el Free Space Path Loss Model (FSPL). Como se ha mencionado en Metodología, en el procesamiento usando Log-Distance Path Loss Model se considera tanto el modelo Close-In como el Floating Intercept, representados por la Ecuaciones 2.2 y 2.3 respectivamente, pero con diferente programación, como se contextualiza en el código 7.4.

En las Figuras 5.12a y 5.12b se presentan gráficas que muestran tanto los valores medidos de forma experimental en las campañas de medición como los estimados por cada modelo en ambas configuraciones de altura, :

Comparando los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos de propagación, se aprecia un comportamiento claramente diferenciado según la altura del transmisor. Cuando la



(a) Path loss a $h_1 = 4.8 [m]$



(b) Path loss a $h_2 = 1.5 [m]$

Figura 5.12: Aplicación de modelos de propagación a 17 [dBm].

transmisión se realiza sobre el cultivo, a una altura h_1 de 4.8 [m], la señal sufre una menor atenuación, pues tanto en distancias más cercanas al transmisor (en torno a 40 [m]) como las mas lejanas (en torno a 100 [m]) la estimación de los modelos indica menor pérdida de trayectoria. En contraste, cuando el transmisor se sitúa a la altura del cultivo, a $h_2 = 1.5$ [m], la pérdida de trayectoria es mayor y presenta una variabilidad más acentuada. Esta situación es debido a un entorno más complejo, con mayor obstrucción. Cabe destacar que en este último caso, hay tres puntos en particular que destacan claramente en la Figura 5.11, donde la fuerza de la señal recibida medida se asemeja a la potencia recibida en altura h_1 . Estos puntos corresponden a las mediciones al nivel del cultivo, pero dentro de una misma hilera, como se puede ver en la Figura 4.8 donde se puede notar que en el interior de esta, hay mucho menor cantidad de obstáculos para la propagación de la señal.

5.3. Análisis comparativo de las mediciones con ZigBee y LoRa

Se llevan a cabo pruebas utilizando tanto la tecnología LoRa como Zigbee en el entorno agrícola, como ha sido explicado en Metodología. Los resultados de este conjunto de mediciones se detallan a continuación.

En primer lugar, se puede notar en la Figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 que la ubicación espacial de las mediciones coincide aproximadamente con las mediciones del día anterior de campaña. Además, los valores de RSSI obtenidos con LoRa denotan una disminución respecto a los datos obtenidos con potencia de transmisión de 17 [dBm], lo que puede verse en el gráfico de la Figura 5.17.

Por otra parte, ZigBee muestra una caída más abrupta del RSSI, lo que evidencia un menor alcance efectivo a la potencia de transmisión configurada, en ambientes con vegetación densa. Además, en la mayoría de los casos presentaron niveles de señal muy débiles, como se ve en la Figura 5.16 o perdidas de paquetes frecuentes, sobre todo en las muestras con altura h_2 , como se puede apreciar en el gráfico de la Figura 5.18.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de distintos modelos de pérdida de trayectoria para la caracterización del canal inalámbrico usando datos tanto de protocolo LoRa como ZigBee, a las alturas h_1 y h_2 ya mencionadas con anterioridad.

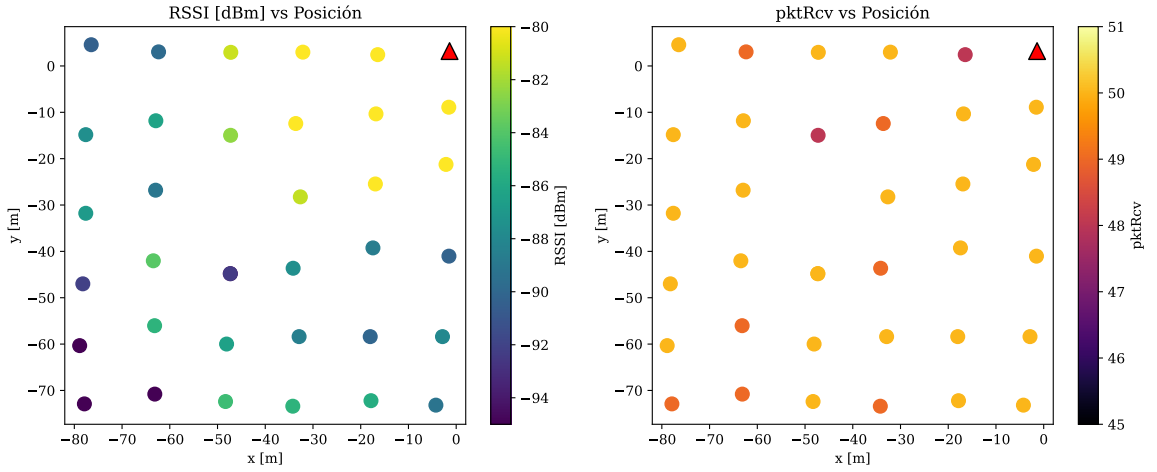


Figura 5.13: Mediciones Distribuidas espacialmente, día 2, LoRa a 6 [dBm], $h_1 = 4.8$ [m]

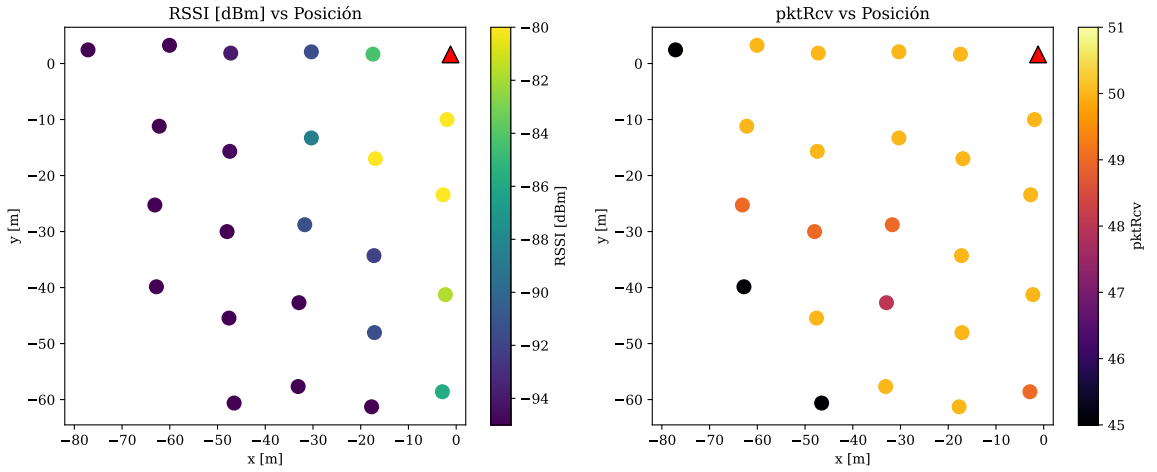


Figura 5.14: Mediciones Distribuidas espacialmente, día 2, LoRa a 6 [dBm], $h_2 = 1.5$ [m]

En las Figuras 5.19 y 5.20, donde se toman muestras LoRa con una potencia de transmisión de 6 [dBm], se puede observar un contraste significativo en el comportamiento de la pérdida de trayectoria según la altura del transmisor. Cuando el equipo se encuentra sobre el follaje (altura h_1), los datos experimentales siguen una tendencia más uniforme. En cambio, al situar el transmisor a la altura del cultivo (1.5 m), la señal experimenta una mayor dispersión debido a la interacción directa con la vegetación, lo que se traduce en una pérdida más irregular.

En los gráficos de las Figuras 5.21 y 5.22 que presentan el comportamiento del canal utilizando ZigBee a -2 [dBm], el impacto de la potencia reducida y la sensibilidad de esta tecnología al

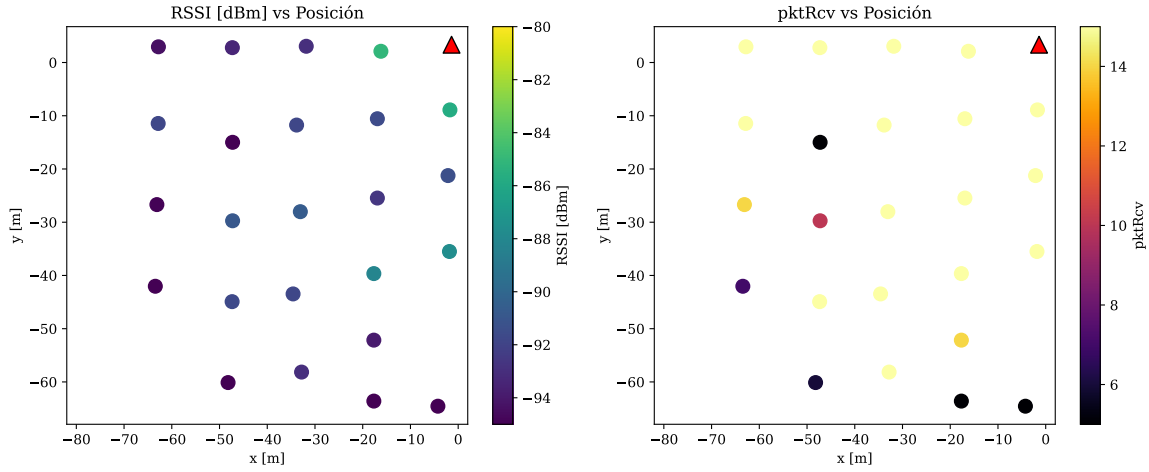


Figura 5.15: Mediciones Distribuidas espacialmente, día 2, ZigBee a -2 [dBm], $h_1 = 4.8$ [m]

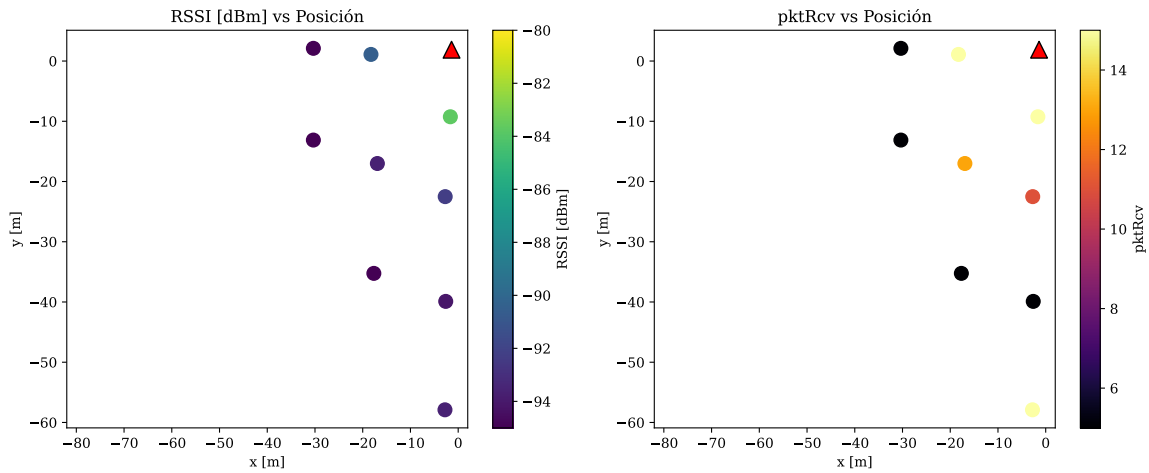


Figura 5.16: Mediciones Distribuidas espacialmente, día 2, ZigBee a -2 [dBm], $h_2 = 1.5$ [m]

entorno son evidentes. A una altura de 4.8 m, aunque la señal presenta una caída abrupta con la distancia, el modelo FI logra ajustarse razonablemente a los datos, mientras que el modelo CI muestra discrepancias en los tramos extremos. Al ubicar el transmisor a 1.5 m, debido a la escasez de datos obtenidos no es posible hacer un análisis más detallado. En este caso, ni CI ni FSPL logran seguir adecuadamente la tendencia de los datos, siendo nuevamente el modelo FI el único con cierto grado de representación.

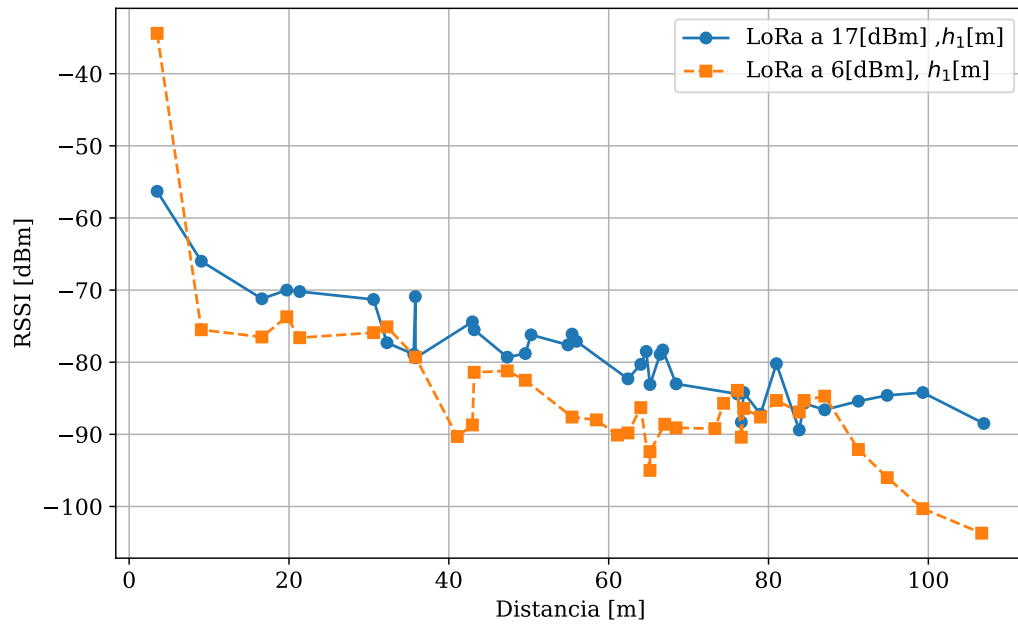


Figura 5.17: Comparación con LoRa a 6 [dBm] de RSSI a altura $h_1 = 4.8$ [m]

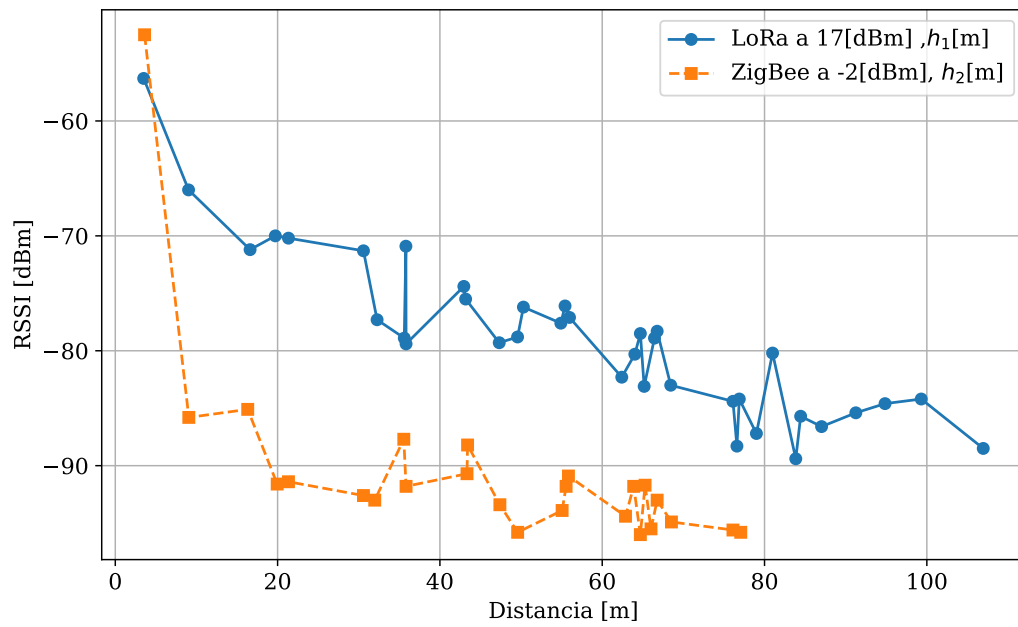


Figura 5.18: Comparación con ZigBee de RSSI a altura $h_1 = 4.8$ [m]

5.3.1. Evaluación de la caracterización

Para evaluar la precisión de los modelos de propagación, se calcula el error medio cuadrático (RMSE) como métrica estadística.

En la Tabla 5.3, la columna n/β corresponde al exponente de pérdida (modelo CI y FSPL) o la pendiente del ajuste (modelo FI), mientras que $PL(d_0)/\alpha$ representa la pérdida de referencia a 1 m (modelo CI) o el intercepto del modelo FI. Esta tabla es una comparativa que muestra la diferencia en términos estadísticos, usando como métrica el RMSE, entre los valores medidos y los estimado por cada modelo, donde los parámetros del modelo son los dados por las Ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3:

Los resultados presentados en la Tabla 5.3 permiten evaluar comparativamente el desempeño de cada modelo en función de su capacidad de ajuste a los datos medidos. En términos generales, el modelo Floating Intercept muestra una mayor robustez frente a escenarios con dispersión y atenuación variable, como ocurre al medir a nivel del cultivo (h_2) o con configuración de menor potencia de transmisión. Esto se observa particularmente en las pruebas

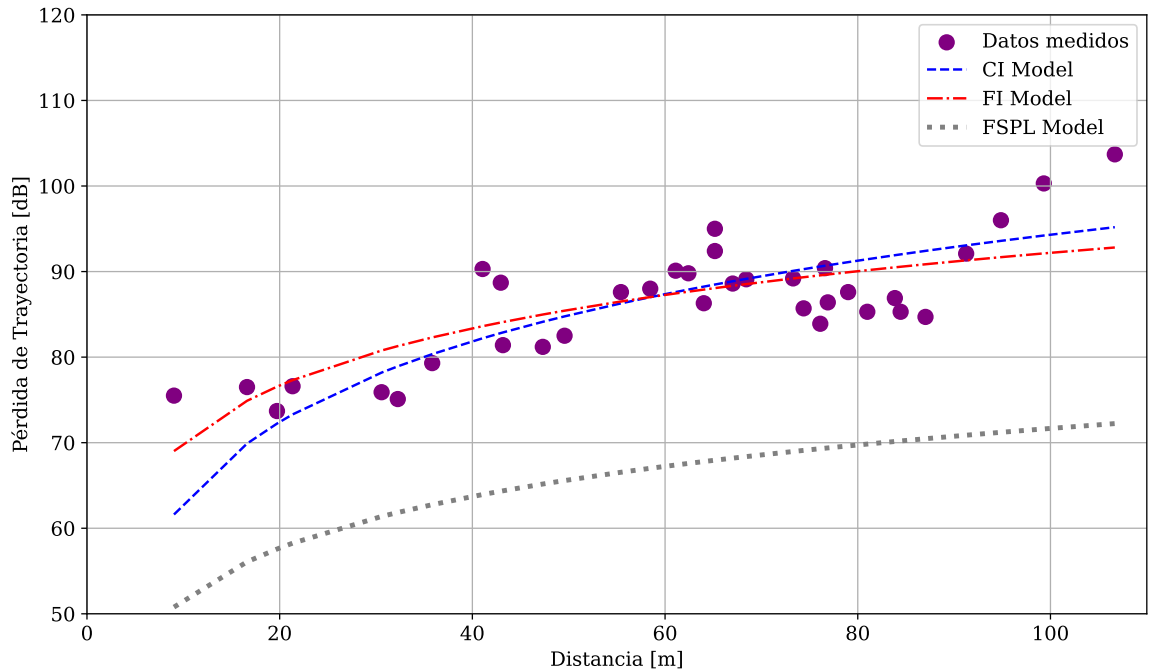


Figura 5.19: Modelos de Path loss con LoRa a $h_1 = 4.8$ [m]

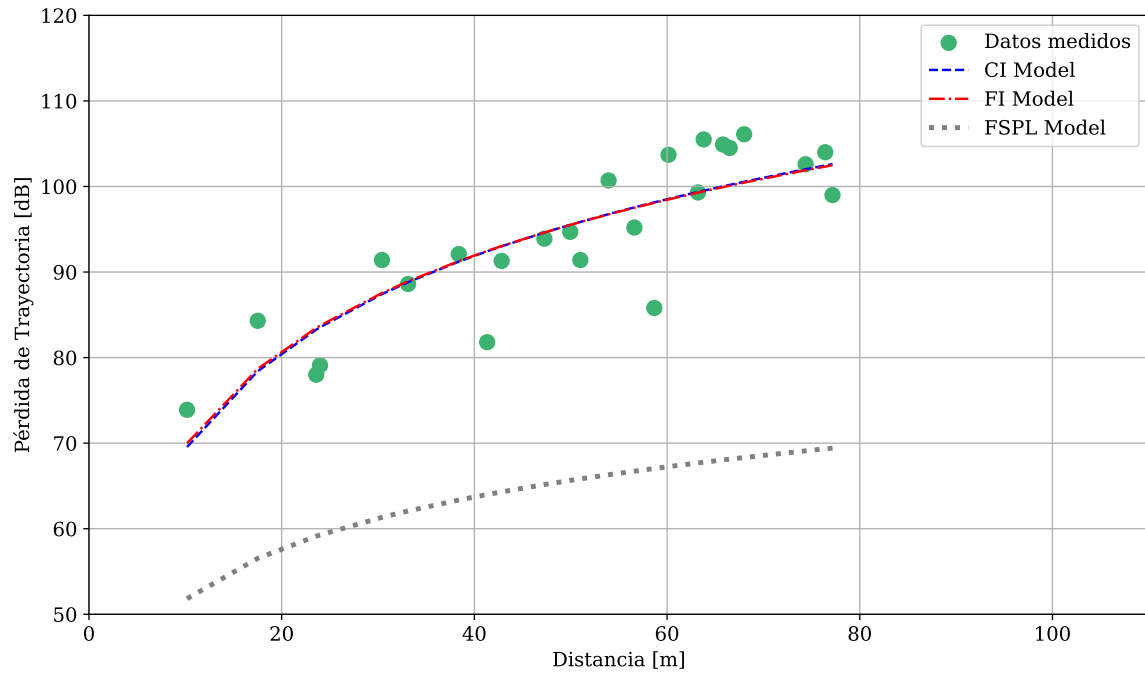


Figura 5.20: Modelos de Path loss con LoRa a $h_2 = 1.5$ [m]

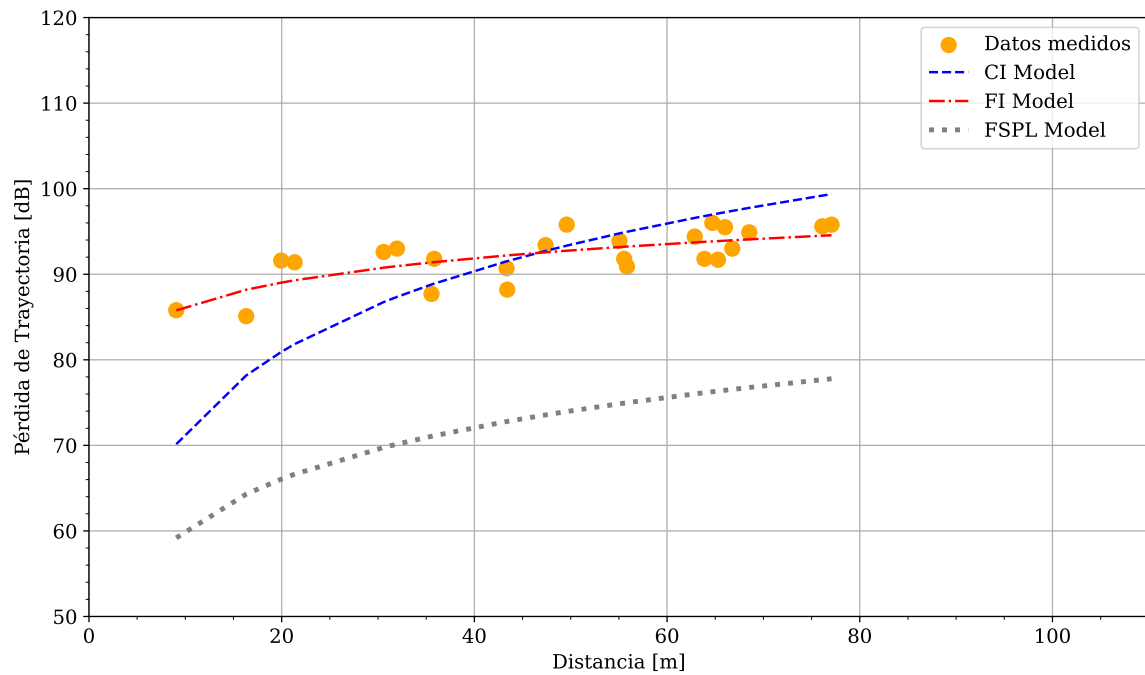


Figura 5.21: Modelos de Path loss con ZigBee a $h_1 = 4.8$ [m]

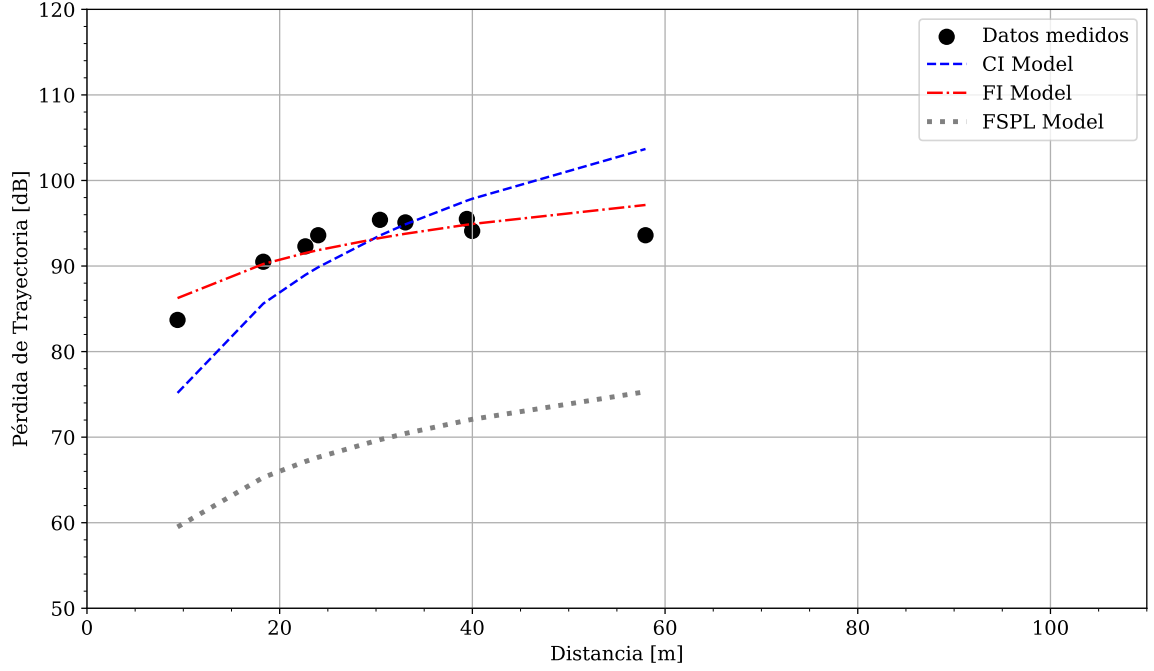


Figura 5.22: Modelos de Path loss con ZigBee a $h_2 = 1.5$ [m]

con ZigBee, donde el FI presenta los menores errores (RMSE), a pesar del bajo nivel de señal y las altas pérdidas. Estos resultados también se pueden ver en la literatura que aborda este problema [21] [22].

En los escenarios con LoRa a mayor altura (h_1), donde el transmisor se encuentra sobre los cultivos y la línea de vista es menos obstructiva, el modelo Close-In también proporciona buenos ajustes, por ejemplo, con valor RMSE inferior a 3.1 [dB] en el caso LoRa a 17 [dBm]. Este comportamiento refleja una propagación más estable y menos afectada por interferencias del entorno inmediato. Sin embargo, en los casos de menor altura h_1 , y por tanto donde aumenta la interacción directa con el follaje, el error asociado al modelo CI aumenta considerablemente, mientras que el FI mantiene un ajuste más coherente con los datos, pues en estos casos se observa un menor RMSE.

Esta tendencia también se ve reflejada en las Figuras 5.23 y 5.24, donde se presentan las funciones de distribución acumulada del Error absoluto para los distintos modelos evaluados. En ambos gráficos, las curvas correspondientes al modelo Floating Intercept se encuentran claramente desplazadas hacia la izquierda, lo que indica una mayor proporción de errores

Escenario	Modelo	n / β	$PL(d_0) / \alpha$ [dB]	RMSE [dB]
LoRa 17 [dBm] $h_1 = 4.8$ [m]	CI	2.77	31.68	3.09
	FI	2.17	42.15	2.74
	FSPL	2.00	31.68	13.73
LoRa 17 [dBm] $h_1 = 1.5$ [m]	CI	3.90	31.68	7.42
	FI	5.28	7.39	6.75
	FSPL	2.00	31.68	34.24
LoRa 6 [dBm] $h_1 = 4.8$ [m]	CI	3.14	31.68	5.02
	FI	2.19	48.41	4.47
	FSPL	2.00	31.68	20.42
LoRa 6 [dBm] $h_1 = 1.5$ [m]	CI	3.76	31.68	4.91
	FI	3.69	32.77	4.91
	FSPL	2.00	31.68	29.73
ZigBee -2 [dBm] $h_1 = 4.8$ [m]	CI	3.15	40.05	5.54
	FI	0.94	76.83	2.06
	FSPL	2.00	40.05	19.69
ZigBee -2 [dBm] $h_1 = 1.5$ [m]	CI	3.61	40.05	5.22
	FI	1.38	72.84	1.83
	FSPL	2.00	40.05	23.96

Tabla 5.3: Resultados del ajuste de modelos de propagación para diferentes tecnologías, potencias y alturas.

bajos y, por tanto, un mejor ajuste global. En particular, se destaca el comportamiento del FI en escenarios críticos, como ZigBee en $h_2 = 1.5$ [m], donde la señal presenta mayor atenuación, sin embargo, debido la escasez de datos para el conjunto de mediciones, la baja tasa de error puede considerarse no confiable. Por otro lado, el modelo Close-In ofrece un buen desempeño tanto en condiciones favorables, LoRa a $h_1 = 4.8$ [m], como en condiciones menos favorables como el caso a $h_2 = 1.5$ [m].

6. Conclusión

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten concluir que la propagación de señales en entornos agrícolas está fuertemente determinada por factores como la altura del transmisor, la densidad de vegetación y la potencia de transmisión empleada. Se confirma que los modelos simples como el Free Space Path Loss (FSPL) no son adecuados para representar escenarios con obstáculos naturales, ya que tienden a subestimar de manera sistemática la pérdida de

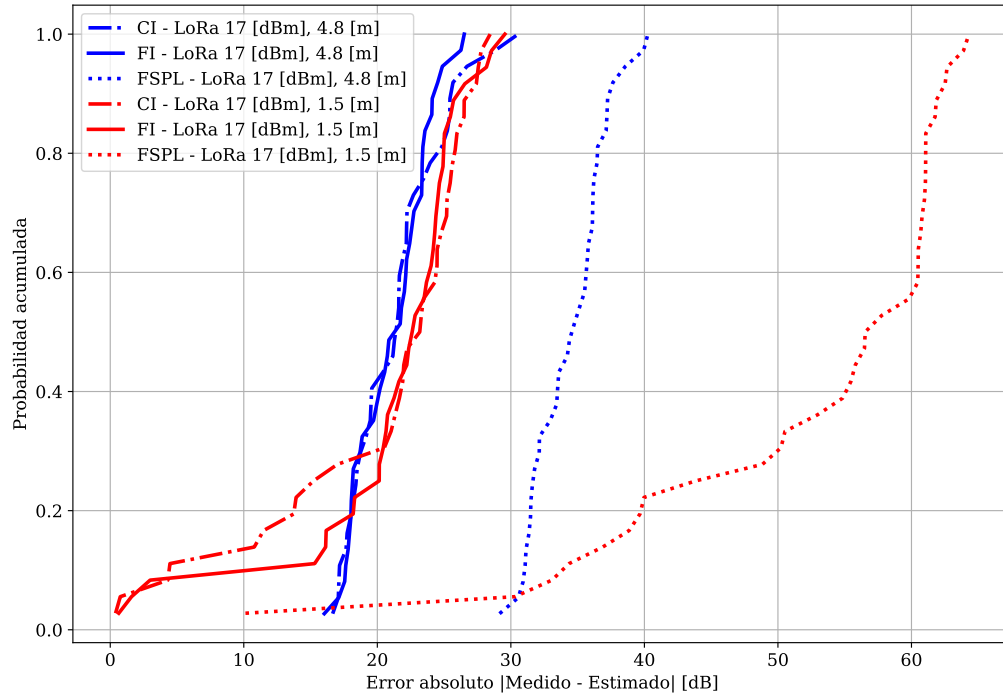


Figura 5.23: CDF Modelos de propagación, LoRa a 17 [dBm]

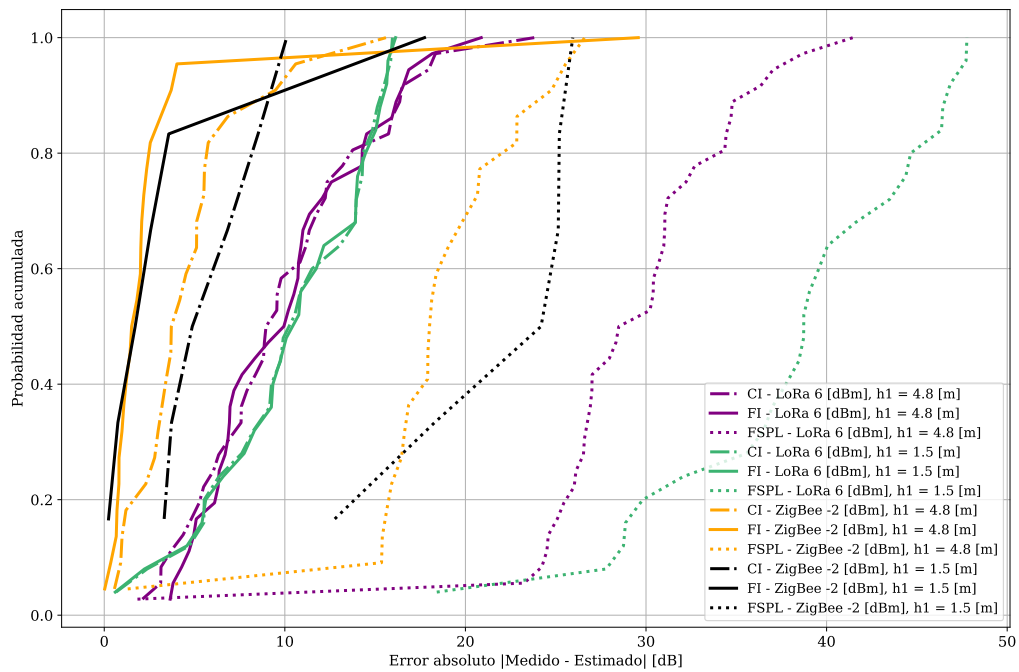


Figura 5.24: CDF Modelos de propagación, LoRa a 6 [dBm] y ZigBee a -2 [dBm]

señal en todos los casos evaluados.

En contraste, los modelos logarítmicos de distancia, específicamente el modelo Close-In (CI) y el modelo Floating Intercept (FI), demostraron un mejor desempeño, con capacidad para ajustarse a los datos experimentales de manera coherente. Este comportamiento se observa en las pruebas realizadas con LoRa a 17 [dBm], donde ambos modelos ofrecieron ajustes de alta calidad. En particular, al transmitir sobre el follaje (h_1), el modelo CI presentó un error bajo y una excelente correspondencia con el patrón de pérdida observado, lo que indica que bajo condiciones más limpias, con menor dispersión por vegetación, este modelo es efectivo. Por otro lado, al nivel del cultivo (h_2), donde se introduce mayor variabilidad en la propagación por efecto del follaje de la vegetación en el cultivo, el modelo FI se comportó de forma más robusta, al adaptarse mejor a la dispersión de los datos y mantener un error más contenido que el modelo CI.

Asimismo, se pudo observar que el uso de potencias menores, como en el caso de LoRa a 6 [dBm], sigue permitiendo una caracterización aceptable del canal, aunque con un ajuste menos preciso que en el caso de 17 [dBm]. Esto refuerza la importancia de la potencia de transmisión como factor crítico en la planificación de redes IoT en entornos de smart farming.

Finalmente, en lo que respecta a la comparación entre tecnologías, si bien los datos recolectados con ZigBee permiten identificar ciertas tendencias, como una mayor pérdida de paquetes y mayor dispersión de la fuerza de la señal, la cantidad y calidad de las mediciones obtenidas no es suficiente para establecer conclusiones sólidas respecto a su desempeño frente a LoRa. Por lo tanto, no es posible emitir una afirmación concluyente en torno a cuál tecnología ofrece mejor desempeño bajo condiciones agrícolas con vegetación densa.

6.1. Trabajo Futuro

Para mejorar la cobertura y eficiencia de la comunicación en aplicaciones agrícolas, se sugiere implementar campañas de medición con mayor cobertura espacial y mejores condiciones de potencia de transmisión y sensibilidad en los equipos de comunicación. Se recomienda evaluar el uso de dispositivos con mayor potencia de transmisión, como el XBee S2C Pro para el caso particular del protocolo ZigBee, que alcanza hasta 18 [dBm]. También, futuras investigaciones



podrían explorar:

- Aplicación de técnicas de aprendizaje de máquinas para optimizar modelos de propagación.
- Evaluación de otras tecnologías de comunicación IoT en entornos agrícolas.
- Implementación de redes híbridas que combinen LoRaWAN con otras tecnologías.
- Comparación del comportamiento de la propagación en distintos tipos de cultivos.
- Evaluación de tecnologías de comunicación IoT y modelos de propagación en entornos industriales como minería, energía o productiva.

Referencias

- [1] Generalitat Valencia. *Internet of Things, IoT*. Ene. de 2022. URL: <https://www.istecdigital.es/internet-of-things-iot>.
- [2] Joaquin Amat Rodrigo. *Regresión lineal múltiple con Python*. Sep. de 2023. URL: <https://cienciadedatos.net/documentos/py10b-regresion-lineal-multiple-python>.
- [3] Ala Al-Fuqaha et al. “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications”. En: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 17 (4 oct. de 2015), págs. 2347-2376. ISSN: 1553877X. DOI: [10.1109/COMST.2015.2444095](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095).
- [4] Haider A.H. Alobaidy et al. “Wireless Transmissions, Propagation and Channel Modeling for IoT Technologies: Applications and Challenges”. En: *IEEE Access* 10 (2022), págs. 24095-24131. ISSN: 21693536. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3151967](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151967).
- [5] Verónica Saiz-Rubio y Francisco Rovira-Más. *From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management*. 2020. DOI: [10.3390/agronomy10020207](https://doi.org/10.3390/agronomy10020207).
- [6] Muhammad Shoaib Farooq et al. “A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming”. En: *IEEE Access* 7 (2019), págs. 156237-156271. ISSN: 21693536. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2949703](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949703).
- [7] Shadi Al-Sarawi et al. “Internet of Things (IoT) communication protocols: Review”. En: *ICIT 2017 - 8th International Conference on Information Technology, Proceedings* (oct. de 2017), págs. 685-690. DOI: [10.1109/ICITECH.2017.8079928](https://doi.org/10.1109/ICITECH.2017.8079928).
- [8] Md Najmul Mowla et al. “Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture Applications: A Survey”. En: *IEEE Access* 11 (2023), págs. 145813-145852. ISSN: 21693536. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3346299](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346299).
- [9] Manlio Bacco et al. “IEEE 802.15.4 Air-Ground UAV Communications in Smart Farming Scenarios”. En: *IEEE Communications Letters* 22 (9 sep. de 2018), págs. 1910-1913. ISSN: 15582558. DOI: [10.1109/LCOMM.2018.2855211](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2855211).
- [10] Sebastian Sadowski y Petros Spachos. “RSSI-Based Indoor Localization with the Internet of Things”. En: *IEEE Access* 6 (jun. de 2018), págs. 30149-30161. ISSN: 21693536. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2843325](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2843325).

- [11] D. Dinev y A. Haka. “RSSI study of wireless Internet of Things technologies”. En: *Journal of Physics: Conference Series* 2339.1 (2022). ISSN: 17426596. DOI: [10.1088/1742-6596/2339/1/012014](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2339/1/012014).
- [12] Pooyan Abouzar, David G. Michelson y Maziyar Hamdi. “RSSI-Based Distributed Self-Localization for Wireless Sensor Networks Used in Precision Agriculture”. En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15 (10 oct. de 2016), págs. 6638-6650. ISSN: 15361276. DOI: [10.1109/TWC.2016.2586844](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2586844).
- [13] Chaudhuri Manoj Kumar Swain y Susmita Das. “Development of an empirical path loss model for a deployed 2.63GHz WiMAX network in a rural environment”. En: *2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference, PCITC 2015 - Proceedings* (mar. de 2016), págs. 355-360. DOI: [10.1109/PCITC.2015.7438191](https://doi.org/10.1109/PCITC.2015.7438191).
- [14] Yurii Onykienko et al. “Using RSSI Data for LoRa Network Path Loss Modeling”. En: *Proceedings - IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO* (2022), págs. 576-580. ISSN: 26933535. DOI: [10.1109/ELNANO54667.2022.9927036](https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927036).
- [15] Tajudeen Olawale Olasupo. “Wireless communication modeling for the deployment of tiny iot devices in rocky and mountainous environments”. En: *IEEE Sensors Letters* 3.7 (jul. de 2019). ISSN: 24751472. DOI: [10.1109/LSENS.2019.2918331](https://doi.org/10.1109/LSENS.2019.2918331).
- [16] Johannes Hejselbaek et al. “Empirical Study of Near Ground Propagation in Forest Terrain for Internet-of-Things Type Device-to-Device Communication”. En: *IEEE Access* 6 (2018), págs. 54052-54063. ISSN: 21693536. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2871368](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2871368).
- [17] Melissa Eugenia Diago-Mosquera, Alejandro Aragón-Zavala y Mauricio Rodríguez. “Testing a 5G Communication System: Kriging-Aided O2I Path Loss Modeling Based on 3.5 GHz Measurement Analysis”. En: *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 6716 21.20 (oct. de 2021), pág. 6716. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/S21206716](https://doi.org/10.3390/S21206716). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/20/6716>.
- [18] Google Maps. *Ubicación del terreno de pruebas*. Consultado en febrero de 2025. 2025. URL: <https://maps.app.goo.gl/vTJqKNN8opZC3GBE7>.
- [19] Oscar Villarroel Hernan Urzua. *Repositorio de dispositivos IoT*. Disponible en GitHub. 2024. URL: <https://github.com/oscariyopiyo/dispositivos-iot>.

- [20] Oscar Villarroel. *Memoria de título - Caracterización de canal en IoT agrícola*. Repositorio asociado al trabajo de memoria. 2025. URL: <https://github.com/oscariyopiyo/memoria>.
- [21] Hicham Klaina et al. “Analysis of low power wide area network wireless technologies in smart agriculture for large-scale farm monitoring and tractor communications”. En: *Measurement* 187 (2022), pág. 110231. ISSN: 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110231>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121011404>.
- [22] T. Kanimozhi et al. “Performance Comparison of Zigbee and LoRa Wireless Networks in a Building Environment”. En: (2023), págs. 1-5. DOI: [10.1109/ICECCT56650.2023.10179693](https://doi.org/10.1109/ICECCT56650.2023.10179693).

7. Anexos

```
CONFIGURAR pines para GPS, XBEE, LoRa y SD
CONFIGURAR SPI, UART y Bluetooth

LOOP:
  LLAMAR receivedBluetooth()
  WHILE GPS disponible:
    LEER datos GPS
    ESPERAR 10 ms

receivedBluetooth:
  IF comando recibido:
    IF comando == "lora":
      ESTADO = 1
    ELSE IF comando == "zb":
      ESTADO = 2
    ELSE IF ESTADO == 1 (LoRa):
      LLAMAR medicionesLoRa
    ELSE IF ESTADO == 2 (ZigBee):
      LLAMAR medicionesZigBee

medicionesLoRa:
  LEER datos GPS
  FOR i = 1 HASTA numMediciones HACER:
    LEER datos GPS
    GUARDAR datos en SD
    LLAMAR transmitirLoRa()
    ESPERAR DELAY_LoRa

medicionesZigBee:
  LEER datos GPS
  FOR i = 1 HASTA numMediciones HACER:
    LEER datos GPS
    GUARDAR datos en SD
    LLAMAR transmitirZigBee()
    ESPERAR DELAY_ZB

transmitirLoRa:
  CONSTRUIR paquete de datos
  ENVIAR paquete vía LoRa

transmitirZigBee:
  CONSTRUIR paquete de datos
  ENVIAR paquete vía ZigBee
```

Código 7.1: Seudocódigo transmisor.

```
CONFIGURAR pines para GPS, XBEE, LoRa y SD
CONFIGURAR SPI, UART y Bluetooth

LOOP:
    WHILE GPS disponible:
        LEER datos GPS
        LLAMAR receivedLoRa
        LLAMAR receivedZigBee

receivedLoRa:
    IF Paquete LoRa recibido:
        LEER datos del paquete
        OBTENER RSSI y SNR
        WHILE GPS disponible:
            LEER datos GPS
            GUARDAR datos en SD

receivedZigBee:
    IF Paquete ZigBee recibido:
        LEER datos del paquete
        OBTENER RSSI vía comando AT
        WHILE GPS disponible:
            LEER datos GPS
            GUARDAR datos en SD

obtenerRSSI:
    ENVIAR comando AT para obtener RSSI
    IF respuesta recibida:
        CONVERTIR valor RSSI
        RETORNAR RSSI
    ELSE:
        RETORNAR 0

waitForResponse:
    ESPERAR respuesta dentro del tiempo límite
    IF respuesta = expectedResponse:
        RETORNAR True
    ELSE:
        RETORNAR False
```

Código 7.2: Seudocódigo receptor.

```
Inicio
1. Importar librerías necesarias.
2. Definir función Haversine para calcular la distancia entre dos
   coordenadas:
   a) Convertir latitudes y longitudes de grados a radianes.
   b) Calcular diferencias de latitud y longitud.
   c) Aplicar la fórmula de Haversine para obtener la distancia en metros.
   d) Retornar la distancia calculada.
3. Definir función para calcular posición relativa (x, y) en metros:
   a) Convertir latitudes y longitudes de grados a radianes.
   b) Calcular diferencias de latitud y longitud.
   c) Calcular coordenadas x e y en metros usando la proyección aproximada.
   d) Retornar valores (x, y).
4. Definir función para procesar datos de posicionamiento y señal:
   a) Cargar archivo CSV con datos de recepción.
   b) Calcular la distancia desde la referencia usando la función Haversine.
   c) Calcular posiciones relativas (x, y) en metros.
   d) Redondear valores calculados a dos decimales.
   e) Guardar archivo CSV con datos procesados.
5. Generar gráficos de dispersión:
   a) Crear gráfico de RSSI en función de (x, y).
   b) Crear gráfico de SNR en función de (x, y).
   c) Crear gráfico de paquetes recibidos (pktRcv) en función de (x, y).
   d) Configurar etiquetas y colores.
   e) Guardar la figura en archivo.
   f) Mostrar gráficos.
6. Ejecutar la función con los parámetros de referencia y archivo de datos.
Fin
```

Código 7.3: Seudocódigo preprocesamiento de datos

```
Inicio
1. Importar librerías necesarias.
2. Cargar datos desde un archivo CSV y preparar la información.
3. Aplicar modelo Close-In (CI):
   a) Ajustar el parámetro n mediante optimización.
   b) Calcular la pérdida de trayectoria estimada.
4. Aplicar modelo Floating Intercept (FI):
   a) Ajustar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  mediante optimización.
   b) Calcular la pérdida de trayectoria estimada.
5. Calcular y comparar errores (RMSE) para ambos modelos.
6. Mostrar resultados y generar gráficos comparativos.
Fin
```

Código 7.4: Seudocódigo obtención de modelos de propagación