

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**DETERMINACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN USANDO  
GRADIENTES DISTANCIA-POTENCIA EN UNA ZONA AGRÍCOLA Y SU  
APLICACIÓN EN UNA PARCELA MEDIANTE EL DISEÑO DE UN  
PROTOTIPO DE RIEGO INTELIGENTE**

**INFORME DE MATERIA INTEGRADORA**

Previo a la obtención del Título de

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**PRESENTADO POR:**

**JOSÉ GREGORY CLEMENTE CARRIEL**

**REMIGIO XAVIER HARO GUERRA**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**AÑO: 2021**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi familia y amigos, quienes me han apoyado desde siempre y sobre todo en la etapa universitaria, siempre dándome ánimos para seguir adelante, y por su puesto a aquellos profesores de la carrera de los cuales no solo me llevo aprendizajes sino también valores.

**José Gregory Clemente Carriel**

Agradezco de manera especial a Dios y a mi familia por ser el soporte de mi vida y también el apoyo moral para culminar mi carrera. Agradezco a todos los profesores que a lo largo de mi trayectoria estudiantil ayudaron a formarme.

**Remigio Xavier Haro Guerra**

## **DEDICATORIA**

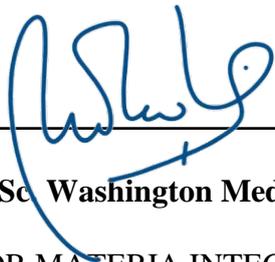
A mi madre y a mi padre quienes han sido mis principales pilares de apoyo, es a ellos a quienes les debo todo lo que he logrado. A mis hermanos por su experiencias vividas y consejos durante todo este proceso.

**José Gregory Clemente Carriel**

A mi esposa, por haberme apoyado incondicionalmente sin esperar alguna recompensa más que verme terminar esta carrera. A mis padres, quienes siempre fueron el compás moral y fuente de ánimos e inspiración en mi vida.

**Remigio Xavier Haro Guerra**

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Washington Medina', written over a horizontal line.

**M.Sc. Washington Medina**

PROFESOR MATERIA INTEGRADORA

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Félix Moncayo R.', written over a horizontal line.

**M.Sc. Félix Moncayo R.**

PROFESOR TUTOR ACADÉMICO

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *José Gregory Clemente Carriel y Remigio Xavier Haro Guerra* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

JOSÉ GREGORY CLEMENTE CARRIEL

**AUTOR**



---

REMIGIO XAVIER HARO GUERRA

**AUTOR**

## RESUMEN

En nuestro país, aún no se explotan las oportunidades que ofrece la Agricultura de Precisión como alternativa para incrementar la productividad en el campo. Las redes de sensores inalámbricos constituyen una herramienta aplicable para la implementación de Agricultura de Precisión, sin embargo, es necesario conducir pruebas de la efectividad de estas tecnologías en el escenario real donde se van a desplegar.

Se llevó a efecto una campaña de mediciones empleando dispositivos del estándar LoRa en la banda ISM de 915 MHz. Se realizó un despliegue de nodos finales LoRa que reportaron los valores de Potencia de Señal Recibida hacia un gestor de base de datos usando el enlace entre cada nodo final y el gateway, luego se implementó un actuador de riego en una parcela de cultivo.

Se obtuvo un modelo de propagación experimental para un cultivo de maíz y un cultivo de cacao, respectivamente. Estos modelos fueron validados por medio de la comparación con modelos de propagación teóricos. Además, se diseñó e implementó un prototipo de riego inteligente basado en la recepción de instrucciones vía LoRa.

**Palabras Clave:** WSN, LoRa, gradiente, propagación, RSS, Riego inteligente

## ABSTRACT

*The advantages offered by Precision Agriculture, have not been exploited yet in our country in order to increase productivity in farming. The Wireless Sensor Networks constitute a suitable tool for the implementation of Precision Agriculture, however there is a need for conducting tests and proof the effectivity of such technologies in the real scenario.*

*A site survey was conducted with the deployment of LoRa devices which operate in the ISM 915 MHz band. Each final node reported Received Signal Strength data to a central processing block using the link between each node and the gateway node, then an actuator was installed in a cultivation plot.*

*As a result, an experimental propagation model was obtained for a corn crop and a cocoa crop, respectively. These models were validated by a comparison with theoretical propagation models. In addition, a smart irrigation prototype based on receiving instructions via LoRa was designed and implemented.*

**Key words:** WSN, LoRa, gradient, propagation, RSS, Smart irrigation

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	I
DEDICATORIA .....	III
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	V
DECLARACIÓN EXPRESA .....	VI
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT.....	VIII
ÍNDICE GENERAL .....	IX
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	XII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	XVI
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1. Definición del Problema .....	2
1.2. Justificación .....	4
1.3. Objetivos.....	6
1.4. Estado del Arte.....	6
1.5. Alcance .....	13
1.6. Metodología.....	14
CAPÍTULO 2.....	15
2. Marco Teórico .....	15
2.1. Redes de sensores inalámbricos (WSN) .....	15

2.2. LPWAN .....	17
2.3. Parámetros de señal de radiofrecuencia .....	21
2.4. Propagación de señales de radiofrecuencia.....	22
2.5. Análisis de regresión.....	31
2.6. Distribuciones de Probabilidad .....	33
2.7. Lenguajes de programación .....	34
2.8. Microcontroladores .....	37
2.9. Sensores .....	42
2.10. Sistemas de control .....	44
2.11. Suelo .....	45
2.12. Sistemas de riego .....	48
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>52</b>
3. Diseño de la solución .....	52
3.1. Planteamiento de la solución .....	52
3.2. Reconocimiento del área de mediciones.....	54
3.3. Planificación del despliegue y diseño del experimento .....	54
3.4. Despliegue de WSN.....	61
3.5. Mediciones de RSS .....	64
3.6. Almacenamiento de datos .....	64
3.7. Procesamiento de datos.....	68
3.8. Modelo de propagación experimental.....	69
3.9. Diseño de prueba de concepto .....	79
3.10. Sistema de riego inteligente .....	84
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>88</b>

4. Resultados .....	88
4.1. Gradientes parciales .....	88
4.2. Gradientes finales obtenidos .....	94
4.3. Resumen de gradientes obtenidos y verificación de hipótesis.....	96
4.4. Comparación con modelos de vegetación preexistentes.....	97
4.5. Análisis de radios de Fresnel en puntos con alta variabilidad de lecturas .....	99
4.6. Resultados de la implementación del prototipo de riego inteligente .....	101
CONCLUSIONES .....	105
RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFÍA .....	108

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1: Red de sensores con topología estrella [28].	16
Ilustración 2.2: Red de sensores con topología malla [28].	16
Ilustración 2.3: Red de sensores con topología híbrida malla - estrella [28].	17
Ilustración 2.4: a) Módulo de desarrollo Cubecell [34] ASR6502, b) Módulo de desarrollo WiFi LoRa 32 [35].	20
Ilustración 2.5: Módulo HT-M01 Mini LoRa Gateway [36].	21
Ilustración 2.6: Zonas de Fresnel. Adaptado de [40].	22
Ilustración 2.7: Geometría de las Zonas de Fresnel.	23
Ilustración 2.8: Escenario de un enlace LoS. Adaptado de [42].	24
Ilustración 2.9: Escenario de un enlace nLoS. Adaptado de [42].	24
Ilustración 2.10: Escenario de un enlace NLoS. Adaptado de [42].	25
Ilustración 2.11: Raspberry Pi 3 Model B [58].	38
Ilustración 2.12: Raspberry Pi Zero [59].	39
Ilustración 2.13: Arduino Uno [61].	40
Ilustración 2.14: Arduino Nano [62].	41
Ilustración 2.15: Arduino Mega [63].	42
Ilustración 2.16: ESP32 [65].	42
Ilustración 2.17: Sensor capacitivo de humedad del suelo [67].	43
Ilustración 2.18: Sensor resistivo de humedad del suelo [67].	44
Ilustración 2.19: Sensor resistivo de humedad del suelo resistente a corrosión [69].	44
Ilustración 2.20: Sistema de control de lazo abierto.	45
Ilustración 2.21: Sistema de control de lazo cerrado.	45
Ilustración 2.22: Componentes del suelo en proporción ideal [72].	46
Ilustración 2.23: Riego por aspersión.	49
Ilustración 2.24: Riego convencional por surcos.	49
Ilustración 2.25: Riego por surco de flujo de oleaje [79].	50
Ilustración 2.26: Riego por aspersión con pivote central.	51
Ilustración 2.27: Riego por goteo subterráneo.	51
Ilustración 3.1: Diagrama de bloques básico de la solución.	53
Ilustración 3.2: Diagrama de bloques detallado de la solución.	53
Ilustración 3.3: Distribución espacial de los cultivos en la Granja de Experimentación Agro-productiva (GEA).	54

Ilustración 3.4: Escenario del despliegue de los sensores para las mediciones. ....	55
Ilustración 3.5: Plan de despliegue para ubicación de los sensores en la plantación de maíz. 57	
Ilustración 3.6: Plan de despliegue para ubicación de los sensores en la plantación de cacao. ....	58
Ilustración 3.7: Muestras tomadas para estimar la densidad de vegetación en los cultivos ....	59
Ilustración 3.8: a) Planificación del despliegue b) Despliegue real de los sensores.....	61
Ilustración 3.9: a) Despliegue de nodo en maíz b) Despliegue de nodo en cacao. ....	62
Ilustración 3.10: Colocación de dispositivos. ....	62
Ilustración 3.11: Código para obtener medición de RSS en LoRa. ....	64
Ilustración 3.12: Arquitectura para almacenamiento de datos. Adaptado de [5]. ....	64
Ilustración 3.13: Arquitectura de gestión de paquetes LoRa. Adaptado de [5]. ....	65
Ilustración 3.14: Arquitectura de gestión de paquetes y administrador de gateways. Adaptado de [5]. ....	65
Ilustración 3.15: Formato .json en un mensaje MQTT. ....	66
Ilustración 3.16: Interfaz de ChirpStack. ....	67
Ilustración 3.17: Extracto de configuración con características de dispositivo y mensaje MQTT. ....	68
Ilustración 3.18: Visualización de dispositivo configurado en HA. ....	68
Ilustración 3.19: Programa DB Browser mostrando una sección de la base de datos de RSS. ....	69
Ilustración 3.20: Función de exportar archivo .db a .json.....	69
Ilustración 3.21: Diagrama de flujo del algoritmo implementado en Python.....	70
Ilustración 3.22: Contenido de archivo de configuración. ....	71
Ilustración 3.23: Obtención de variables a partir de archivo de configuración. ....	72
Ilustración 3.24: Proceso de registros por cada punto desplegado. ....	72
Ilustración 3.25: Generación de resumen estadístico y reporte PMF. ....	73
Ilustración 3.26: Generación de gráficas de dispersión de trama y PMF. ....	74
Ilustración 3.27: Valores promedio de RSS, desviación estándar y distancias logarítmicas... 74	
Ilustración 3.28: Obtención de mínimos cuadrados.....	75
Ilustración 3.29: Gradiente distancia-potencia. ....	75
Ilustración 3.30: Conversión a coordenadas UTM. ....	75
Ilustración 3.31: Cálculo de distancias por UTM. ....	76
Ilustración 3.32: Generación de perfil. ....	77
Ilustración 3.33: Cálculo de línea directa en zona de Fresnel.....	78
Ilustración 3.34: Cálculo de región elipsoidal en zona de Fresnel. ....	78

Ilustración 3.35: Diagrama de bloques del prototipo de riego automático. ....	79
Ilustración 3.36: Sensor resistivo de humedad de suelo resistente a corrosión. ....	80
Ilustración 3.37: Módulo de desarrollo Wireless Stick Lite. ....	80
Ilustración 3.38: Módulo relé. ....	81
Ilustración 3.39: Válvula solenoide. ....	81
Ilustración 3.40: Convertidor de voltaje a 12V. ....	82
Ilustración 3.41: Fuente de voltaje DC de 3.3V y 5V. ....	82
Ilustración 3.42: Diagrama de conexiones del prototipo. ....	83
Ilustración 3.43: Diagrama de flujo simplificado del programa para riego inteligente. ....	85
Ilustración 3.44: Segmento de código que permite decodificar una trama de bajada. ....	86
Ilustración 3.45: Fragmento de la sección Switch...Case del código. ....	86
Ilustración 3.46: Botón de apagado/encendido forzoso de riego. ....	87
Ilustración 4.1: Simulación que ilustra el escenario LoS y nLoS en la plantación de maíz. ...	89
Ilustración 4.2: Simulación que ilustra el escenario LoS y nLoS en la plantación de cacao. ...	89
Ilustración 4.3: Gradiente de referencia LoS. ....	90
Ilustración 4.4: Gradiente parcial del maíz, tramo sin vegetación. ....	91
Ilustración 4.5: Gradiente parcial del maíz, tramo con vegetación. ....	92
Ilustración 4.6: Gradiente parcial del cacao, tramo sin vegetación. ....	93
Ilustración 4.7: Gradiente parcial del cacao, tramo con vegetación. ....	94
Ilustración 4.8: Gradiente para maíz - arriba) Canal de subida; abajo) Canal de bajada. ....	95
Ilustración 4.9: Gradiente para cacao - arriba) Canal de subida; abajo) Canal de bajada. ....	96
Ilustración 4.10: Comparación de modelo experimental con otros modelos (maíz). ....	98
Ilustración 4.11: Comparación de modelo experimental con otros modelos (cacao). ....	98
Ilustración 4.12: Zona de sombra y obstrucción de radio de Fresnel. ....	99
Ilustración 4.13: Gráfica de distribución de probabilidad (pmf) de la posición 05 del maíz. ....	100
Ilustración 4.14: Gráfica de distribución de probabilidad (pmf) de la posición 06 del maíz. ....	101
Ilustración 4.15: Implementación del prototipo de riego inteligente. ....	102
Ilustración 4.16: a) Encendido forzoso de riego b) Apagado forzoso de riego. ....	103
Ilustración 4.17: a) Encendido mediante umbral de humedad de suelo. ....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Extracto de frecuencias LoRaWAN por país [32].	19
Tabla 2.2: Especificaciones de Raspberry Pi 3 Model B [58].	38
Tabla 2.3: Especificaciones de Raspberry Pi Zero [59].	39
Tabla 2.4: Especificaciones de Arduino Uno [61].	40
Tabla 2.5: Especificaciones de Arduino Nano [62].	41
Tabla 2.6: Especificaciones de Arduino Mega 2560 [63].	41
Tabla 3.1: Tiempo de las mediciones en el Maíz.	57
Tabla 3.2: Tiempo de las mediciones en el Cacao.	59
Tabla 3.3: Estimación de la densidad de vegetación.	60
Tabla 3.4: Sección de la bitácora con coordenadas planificadas.	63
Tabla 3.5: Sección de la bitácora de registros diarios.	63
Tabla 3.6: Tabla de conexiones del prototipo.	83
Tabla 3.7: Tabla de alimentaciones del prototipo.	84
Tabla 3.8: Valores de CC y PMP de 0 a 20 cm de profundidad.	84
Tabla 4.1: Resumen de gradientes obtenidos.	96
Tabla 4.2: Resumen de gradientes parciales obtenidos.	97

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1).....	21
Ecuación (2).....	22
Ecuación(3).....	22
Ecuación(4).....	23
Ecuación(5).....	26
Ecuación(6).....	26
Ecuación(7).....	27
Ecuación(8).....	27
Ecuación(9).....	27
Ecuación(10) .....	28
Ecuación(11) .....	29
Ecuación(12) .....	29
Ecuación(13) .....	29
Ecuación(14) .....	30
Ecuación(15) .....	30
Ecuación(16) .....	30
Ecuación(17) .....	31
Ecuación(18) .....	31
Ecuación(19) .....	32
Ecuación(20) .....	32
Ecuación(21) .....	32
Ecuación(22) .....	32
Ecuación(23) .....	32
Ecuación(24) .....	33
Ecuación(25) .....	34
Ecuación(26) .....	34
Ecuación(27) .....	34

# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción

Existen varias razones por las que se puede señalar a la agricultura como una industria de vital importancia para el Ecuador. Una de las razones es el volumen de exportaciones agrícolas, las cuales ascienden a un 30% del total de bienes exportados. Además, la agricultura juega un papel determinante en la subsistencia de la población al ser responsable de producir una gran variedad de alimentos y generar fuentes de empleo.

A pesar de su importancia en la economía, la agricultura enfrenta constantes pérdidas ligadas a riesgos como: sequías, plagas, inundaciones, sobreproducción; o dificultades como el alto costo de insumos agrícolas, la reducida disponibilidad de agua para riego, entre otras.

La Agricultura de Precisión ofrece una alternativa para incrementar la productividad en el campo y para reducir los riesgos inherentes al negocio agrícola. Una herramienta contemporánea para implementar la Agricultura de Precisión la constituyen las Redes de Sensores Inalámbricos.

En el Ecuador, la explotación de estas técnicas aún es incipiente, en parte debido a la falta de demostraciones acerca de la efectividad de los dispositivos necesarios para implementar la Agricultura de Precisión con Redes de Sensores. Los beneficios de implementar Agricultura de Precisión, a nivel de un país, son reales de tal manera que existen países como Holanda, que cuenta con la mitad de territorios cultivados que el Ecuador, pero produce 10 veces más productos agrícolas.

Este proyecto consistió en la determinación de un modelo de propagación experimental que se obtuvo mediante el despliegue de nodos del estándar LoRa, estándar que opera en una banda de frecuencia libre como es la de 915 MHz. Además, se empleó hardware y software abierto, incluyendo el diseño e implementación de un prototipo de riego inteligente.

## **1.1. Definición del Problema**

Existen varias razones por las que se puede señalar a la agricultura como una industria de vital importancia para el Ecuador. Una de las razones es el volumen de exportaciones agrícolas del país, las cuales ascienden a un 30% del total de bienes exportados [1]. Otra razón, que se ha puesto en evidencia recientemente, con referencia a la pandemia del COVID-19, es su papel determinante en la subsistencia de la población [2] al ser la industria responsable de producir una gran variedad de alimentos, además de generar fuentes de empleo.

A pesar de su importancia en la economía, la agricultura sigue siendo un área productiva que enfrenta constantes pérdidas ligadas a riesgos como las sequías, plagas, inundaciones, sobreproducción; o dificultades como el alto costo de los insumos agrícolas, la reducida disponibilidad de agua para riego, entre otras. Ante este escenario, se requiere buscar alternativas técnicas que tiendan a aminorar el efecto de los riesgos y dificultades mencionados.

Una posible solución la ofrece la Agricultura de Precisión (AP), la cual se compone de una serie de herramientas encaminadas a mejorar el desempeño de los cultivos en base al monitoreo y control de factores de incidencia en su desarrollo. Sin embargo, en el país la explotación de estas técnicas todavía es incipiente y se requiere que se generen demostraciones y estudios de su aplicación sobre todo para cultivos de exportación, los cuales según se indica en el artículo de [3], tienen capacidad de invertir en tecnología y capacitación.

La ventaja fundamental de la AP es que permite optimizar el uso del agua de riego, y otros insumos agrícolas, lo cual genera que la producción sea eficiente e incrementa la productividad. Al respecto se pueden citar casos de países que han implementado AP con éxito como Israel, que según [4] pese a tener una tercera parte de las tierras cultivadas de India y tener 4000 veces menos trabajadores en el campo que India, logra tener una mayor producción agrícola.

Con el avance de las tecnologías de comunicaciones, se ha permitido incorporar redes de dispositivos con capacidad de comunicación inalámbrica y con bajo consumo de energía en la AP, redes que han hecho posible la construcción de sistemas de lazo cerrado para diversos propósitos. Una de las principales aplicaciones de las redes de sensores inalámbricos en la AP se centra en el monitoreo de microclimas y control de riego, que tiene por objetivo estimar y satisfacer las necesidades de irrigación mientras se optimiza el uso de recursos como el agua.

El Grupo de Investigación de Redes Inalámbricas Informáticas (GIRNI) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) [5], actualmente se encuentra realizando investigaciones en la Granja de Experimentación Agro-productiva (GEA) de la Facultad de Ciencias de la Vida (FCV) conformada por un área abierta que incluye zonas de cultivo con sembríos de maíz, fréjol, cacao y café, que se encuentran disponibles para estudios en el ámbito académico incluyendo la implementación de proyectos de AP con el objetivo de medir su efecto en la productividad.

En este marco, el GIRNI ha propuesto el despliegue de una red LoRa que opera en la banda ISM de 915 MHz, sin embargo no se dispone de un estudio que permita avalar el posicionamiento de dispositivos de esta tecnología, lo cual es fundamental considerando que no se dispone de modelos de propagación específicos para cada cultivo tal como menciona [6], cuando señala que hay una falta de modelos de propagación apropiados, debido a la variación de los cultivos y el ambiente.

Una de las ventajas de la tecnología LoRa es que se puede implementar con hardware y software libre, siendo este uno de los criterios para su elección por parte del GIRNI. En cuanto al área de telecomunicaciones se debe mencionar que el hecho de que opere en una banda de frecuencia por debajo de los GHz, la hace más adecuada para aplicaciones en el ámbito agrícola, por permitirle cualidades como superar con menor dificultad obstrucciones

como la vegetación y distintos tipos de cultivos, es decir condiciones de no línea de vista (NLOS) [7].

Se debe agregar que es necesario integrar conocimientos multidisciplinarios, debido a que la función de la red de sensores es realizar monitoreo de microclima y para este propósito se debe considerar los criterios técnicos de profesionales en el área agrícola, algunos de los cuales laboran en la granja experimental (GEA) de la ESPOL, y cuentan con la experiencia y conocimiento en el área para contribuir con información y retroalimentación sobre los avances que se efectúen.

## **1.2. Justificación**

El cuarto numeral del artículo 6 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, detalla en su literal b) a las instituciones de educación superior, como actores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología, Innovación y Saberes Ancestrales (SNCTI).

Dentro de la misma ley, en su artículo 61 se establece que la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), debe definir las líneas y áreas de investigación periódicamente, de conformidad con los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo, además señala que lo definido por la SENECYT podrá ser tomado como referencia para las investigaciones que se realicen otros actores del SNCTI.

En cumplimiento de la legislación mencionada, el ACUERDO No. SENECYT-2018-028 define a las “TIC aplicadas a agricultura, ganadería” como una línea de investigación dentro del área de “Agricultura y Ganadería”. De esta manera, se añade un sustento legal para la realización del presente proyecto, debido a que el tema se alinea con el acuerdo emitido por la entidad rectora del SNCTI.

El Ecuador es un país que cuenta con un gran potencial agrícola, el cual puede ser aprovechado para aumentar la productividad con el apoyo de herramientas tecnológicas y

conceptos de agricultura de precisión (AP). Las ventajas de hacer uso intensivo de tecnología en la agricultura son evidentes y existen demostraciones fehacientes como el caso de Holanda, tal como refiere [8], que es un país con la mitad de tierras cultivadas que Ecuador, pero produce diez veces más en el sector agrícola.

La motivación de este proyecto es probar una posible herramienta para la tecnificación de la agricultura en el país, porque a pesar de que existe una oferta de sensores inalámbricos para conformar redes que pueden usarse en la agricultura, se deben probar bajo las condiciones ambientales de nuestro país. Existen casos en los que tales dispositivos han sido diseñados para otras regiones del mundo donde enfrentan distintas condiciones climáticas y por lo tanto no son directamente aplicables de manera local, como menciona [3].

LoRa es una tecnología de bajo consumo energético y opera en una banda por debajo de los GHz, de tal manera que presenta cualidades favorables en cuanto su cobertura y facilidad para superar obstáculos o condiciones de no línea de vista en las comunicaciones. Debido a que es una tecnología reciente, es importante continuar su exploración, por lo que es necesario la implementación de proyectos que aporten información y demostraciones prácticas en el ámbito académico.

Por otra parte, para asegurar un despliegue exitoso de una red de sensores inalámbricos (WSN) dentro del ámbito agrícola, es imprescindible realizar una planificación de la red, lo que incluye estudiar la cobertura en el escenario real. El estudio del medio de propagación inalámbrico en estos casos contribuye a estimar la variabilidad de la señal recibida, lo que a su vez permite diseñar enlaces que tengan mayor fiabilidad.

De la misma manera, la implementación de un sistema de riego inteligente permitiría que una red de sensores forme parte de un sistema de control de lazo cerrado, donde los actuadores se dedicarían al control del riego, con el fin de tener un mejor manejo de este recurso. El efecto deseado con esta implementación es que los técnicos que laboran en la granja

experimental puedan usar este esquema, medir resultados y comparar; de manera que se pueda aprovechar y replicar en otras partes con el fin de hacer uso eficiente de recursos como el agua.

Como beneficiarios de este proyecto se incluye al GIRNI, que obtendrá como resultados de este proyecto, un modelo de propagación para el despliegue de WSNs con tecnología LoRa; y los técnicos del área de agronomía, que laboran en la granja experimental, quienes obtendrán una herramienta experimental de AP para poder hacer pruebas y medir resultados en ocasiones posteriores a la finalización de este proyecto.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar un modelo de propagación en un área agrícola ubicada en el Campus Politécnico por medio del despliegue de una WSN y diseñar un prototipo de un sistema de riego inteligente.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Reconocer el área de despliegue para la delimitación de la zona donde se realizarán las mediciones.
- Diseñar el procedimiento para la medición de parámetros de la señal recibida.
- Realizar mediciones de RSSI en el área de la granja experimental de la ESPOL para la estimación de un modelo de propagación con el uso de gradientes.
- Comparar los resultados obtenidos con otro modelo de propagación para su validación.
- Diseño de una prueba de concepto de riego inteligente aplicada a un área específica.
- Implementación de prototipo para el control de riego inteligente en una parcela.

### **1.4. Estado del Arte**

La AP se ha servido de varias tecnologías desde sus inicios en los años 80 en Estados Unidos, pero no es hasta el surgimiento del IoT alrededor del año 2010 cuando se empiezan a dar aportes de las WSNs en este campo. Se han empleado tecnologías de corto alcance como

ZigBee y de largo alcance como Sigfox y LoRa para el diseño de aplicaciones con WSNs en el ámbito agrícola.

Existen varios estudios que tratan las WSN a nivel de su arquitectura, por el contrario, pocos trabajos se centran en las condiciones del canal inalámbrico, según se afirma en [6]. En este trabajo, los autores realizan la medición de cobertura y planificación de despliegue para la tecnología ZigBee en una granja con cultivos mixtos de 12 acres. La solución propuesta por los autores incluye la medición de la propagación de la señal en diferentes cultivos, presentación de distintos modelos de pérdida de paso y finalmente propone parámetros que pueden usarse para la implementación de los modelos validados.

Por otra parte, en la Universidad de Massachusetts Dartmouth se realizó una comparación del rendimiento de diferentes topologías para una WSN centrado en la fiabilidad de la red, eficiencia energética, escalabilidad [9]. Se obtuvo que, en términos de latencia y eficiencia energética, la topología tipo estrella presenta mejores resultados, mientras que la topología malla consta de mejor fiabilidad y escalabilidad; sin embargo, se recalca que el fallo de un nodo dentro de la topología estrella no representa un cambio en la fiabilidad obtenida debido a que no afecta al funcionamiento del resto de la red.

Un parámetro importante dentro de la medición de cobertura para las redes de sensores inalámbricas corresponde al RSSI. En el estudio realizado en [10], se establece que para el despliegue de una WSN se presentan irregularidades de radio dependiendo de las características de los dispositivos y el medio de transmisión. En los parámetros característicos de los dispositivos se incluye la potencia de transmisión, sensibilidad de recepción, directividad de la antena y su ganancia; mientras que, en el medio de transmisión se considera el tipo de medio, ruido de fondo, condiciones climáticas y obstáculos que se presenten en el medio.

De acuerdo con el estudio realizado por la Universidad de Akron, otro aspecto a tener en cuenta dentro de una WSN para el monitoreo de parámetros es el consumo energético que

requieren los nodos sensores [11]. Se destaca una comparativa acerca del consumo energético diario producido por los dispositivos dentro de ZigBee y LoRaWan donde se concluyó que LoRaWan posee un menor consumo energético para rangos amplios. El estudio fue realizado a partir del despliegue de una WSN lineal basada en clusters con nodos de transferencia, enlaces half-duplex y una estación base.

En la literatura también se hallaron pruebas de concepto que se han propuesto usando nodos y sensores inalámbricos bajo tierra para propósitos de AP, uno de ellos lo constituye la investigación de [12], donde se integra una red de sensores bajo tierra, con sinks ubicados en el eje de un sistema de riego por pivote central que se comunican con un área de servidores y monitoreo. El trabajo incluye un modelo de propagación para la parte subterránea y aérea del canal inalámbrico, buscando establecer un método empírico de predecir enlaces entre los dispositivos.

Con anterioridad, se daban estudios de WSNs en entornos agrícolas haciendo uso de radio-transceivers con capacidad de almacenar datos. En un trabajo realizado por el Centro de Sistemas Agrícolas de Precisión se evalúa el rendimiento de una red desplegada en un huerto de manzanas [13]. Se tuvo en cuenta la variabilidad producida en el rendimiento debido a la distancia y elevación las cuales inciden en las mediciones realizadas. Incluso, se estableció que las medidas de RSSI se asemejan a la forma de predicción teórica de pérdidas en el espacio libre en la mayoría del rango explorado.

La tecnología LoRa es de las más recientes dentro de WSN, por tal motivo se han llevado a cabo estudios de cobertura en escenarios reales para determinar el rango de cobertura y la atenuación del canal inalámbrico, tal como se realiza en [14] para determinar el porcentaje de pérdida de paquetes en el canal de subida en distancias de hasta 30 km. Se debe considerar que este estudio se realizó en Finlandia, donde la banda ISM autorizada para la operación de

LoRa es la de 868-870 MHz y se realizaron las mediciones con configuraciones especiales para alcanzar la máxima distancia.

Según se establece en [15], un parámetro que se debe tener en cuenta para optimización en una WSN es la pérdida de camino existente entre nodos. Dentro del estudio realizado, se analiza la pérdida de camino dada en un entorno rodeado de vegetación para una red de sensores con tecnología ZigBee en el cual se consideran como factores la distancia y la frecuencia. Los autores del estudio analizaron el efecto producido por el follaje y determinaron que el efecto producido en la propagación en las WSNs puede ser predicha a través de modelos de propagación.

Otro trabajo [16], hace un modelamiento y validación de la pérdida de camino en una WSN para granjas de cría de cerdos por medio de ZigBee. Se hace referencia a como los parámetros transmitidos se ven afectados por paredes de ladrillo que componen las granjas, además de árboles, pasto, maíz y calabaza en crecimiento ubicado entre estas granjas. Los autores proponen un modelo empírico añadiendo factores de atenuación debido a las paredes y plantas. Además, se establece que la variación de la altura en las antenas permite reducir la pérdida de camino existente.

En recientes estudios se han dado estimaciones de distancia entre nodos sensores a través de mediciones RSSI en una WSN. En el estudio realizado en [17], se resalta el uso del modelo de propagación de espacio libre y el modelo de reflejo en el suelo para la medición de distancias entre nodos por medio de ZigBee en la banda de 2.4 GHz. Dentro del estudio se determinó que el método de estimación no es recomendable para distancias cortas debido a la baja precisión que existe por obstrucciones en el entorno, mientras que para distancias largas se obtuvo una mejor precisión.

Se encontró que existen soluciones involucrando nodos recolectores móviles para el monitoreo en tiempo real de AP [18], cuyo despliegue se realiza de manera determinística sin

considerar modelos de pérdida de paso o la variabilidad del canal, pues no existe problema de cobertura cuando el sink tiene la capacidad de desplazarse a la cercanía de los nodos. Sin embargo, la solución emplea nodos habilitados para WiFi cuya batería les permite operar únicamente pocas semanas y requiere de un vehículo agrícola para implementar esta propuesta.

Por otra parte, en la publicación de [19], se emplea una metodología experimental para determinar la cobertura real de los sensores previo a su despliegue, obteniendo en el área de implementación una cobertura mucho menor a la teórica. En base a este resultado, realizaron el despliegue para la toma de datos de un vivero de fresas chinas en el que se presenta una solución completa que incluye la articulación de una red mallada, alimentación de equipos del vivero y mediciones de sensores combinado con un Gateway GPRS para comunicaciones a larga distancia con centro de almacenamiento de datos remoto.

Existe un estudio realizado por la Universidad Cape Breton y la Universidad Dalhousie en el que se detalla sobre el modelamiento de un canal RF en una WSN en un ambiente industrial [20]. En el estudio se analiza la pérdida de camino y el retardo en la propagación en función de la separación entre la antena transmisora y receptora para el caso de LOS y NLOS para bandas de frecuencias de 5.8 GHz y 2.4 GHz. Como resultado del estudio, los autores determinaron que en la banda de 2.4 GHz existe una menor pérdida de camino y mayor retardo de propagación que en la banda de 5.8 GHz.

En el experimento realizado en [21], se analiza las características de propagación de una WSN en un invernadero de orquídeas en la banda de 433 MHz. Dentro del estudio se analiza valores de RSSI y pérdida de paquetes a diferentes distancias y potencias de transmisión mostrando que a mayores potencias de transmisión existe mayor fluctuación de los valores obtenidos pero una mejor calidad de recepción de paquetes, por lo que los autores establecen el uso de un valor óptimo de potencia de transmisión que considere el consumo de energía en los nodos y a su vez la calidad en la comunicación.

Un área de la agricultura de precisión donde se han explorado diversas soluciones es la de los sistemas de control para irrigación. En la publicación de [22] se presenta un sistema que emplea la tecnología LoRa, en tres tipos de nodos: sensor, control de riego y gateway. Se combina un dispositivo LoRa SX1278 con una tarjeta Arduino Nano, alimentadas por un panel solar para controlar una válvula solenoide. El riego se activa y desactiva en base a la humedad del suelo o por control a través de una aplicación móvil. En el estudio no se incluye un análisis del canal inalámbrico, ni se implementa el prototipo en un escenario real.

Se debe mencionar también el estudio realizado por [23], en el cual se abarca un análisis experimental del canal inalámbrico de una huerta a través de un modelo de pérdida donde se considera la altura de las antenas y el índice de caída de la potencia haciendo uso de nodos CC2430 con tecnología ZigBee y módulos 1100SE RF para transmitir señales de 2.4GHz y 433MHz respectivamente. Tras el análisis de la pérdida de camino y la pérdida de paquetes, se determinó una mayor influencia de la altura de la antena sobre el canal inalámbrico de 433MHz.

Como parte de un trabajo realizado en Brasil, se detalla acerca del uso de nodos CQE (Channel Quality Estimation) para estimar la calidad de un canal de una WSN industrial [24]. Los nodos CQE son utilizados para obtener muestras de RSSI y LQI en conjunto para detectar la influencia del desvanecimiento por múltiples trayectorias y las interferencias en el entorno por medio del análisis de la variación espacial de estos parámetros. Se determinó que es posible estimar la calidad del canal obteniendo suficientes valores de RSSI y LQI. En el estudio no se realizó una variación de las distancias entre nodos.

Para proveer un despliegue de redes de sensores exitoso en el ámbito agrícola, se requiere realizar un análisis del desempeño de los sistemas inalámbricos involucrados en cuanto cobertura y calidad de enlace, tal como se menciona en [25], donde se conducen experimentos variando la altura de las antenas para evaluar la cobertura de ZigBee en la banda de 2.4 GHz en huertas al aire libre con plantaciones de mango en un clima subtropical y dentro

de viveros, considerando un modelo de tres rayos, con el mismo cultivo. Se comparan las mediciones y los resultados obtenidos con modelos teóricos de propagación existentes.

Dentro del estudio del canal inalámbrico en una red de sensores, resalta la importancia de la estimación del modelo de propagación para un área agrícola con cultivos específicos. En el estudio de [26] se formulan dos nuevos modelos de pérdida de camino basados en la herramienta de ajuste de curvas en MATLAB en conjunto con el algoritmo estocástico de búsqueda, dentro de un terreno con cultivo de alfalfa, para hallar los coeficientes óptimos para los modelos a través de mediciones de RSSI.

Otro enfoque para tratar la ubicación de los dispositivos inalámbricos de una red WSN en un terreno agrícola es la que se presenta en [27], en el que se toman mediciones de RSSI en un cultivo de trigo durante tres etapas de su ciclo productivo para observar la variabilidad que se produce en este factor. Además, se varía la distancia entre nodos y se estima la altura óptima de la antena con un método teórico basado en el radio de Fresnel. Este trabajo considera el rango de comunicación máximo del dispositivo y el rango de muestreo requerido para obtener una densidad de muestras de utilidad en la AP.

En base a lo antes mencionado, el proyecto tiene como enfoque principal la determinación de un modelo de propagación usando un diseño experimental para mediciones de RSSI y obtención de gradientes distancia-potencia. A diferencia de lo revisado, el presente trabajo de titulación consiste en el estudio del canal inalámbrico en un área agrícola de clima tropical de sabana, usando como herramienta de medición sensores inalámbricos y enlaces con la tecnología LoRa.

Por otra parte, se diseñará una prueba de concepto de riego inteligente empleando un nodo LoRa dentro del esquema de control, en la que se deben tomar en cuenta características del suelo, específicas del lugar donde se realiza el estudio, y conceptos del área agrícola para la construcción del algoritmo.

## **1.5. Alcance**

La solución que se propone consiste en el análisis del canal inalámbrico de manera experimental, haciendo mediciones de RSSI durante varios días con dispositivos inalámbricos de la tecnología LoRa en un ambiente de implementación real, que corresponde a una granja agrícola ubicada en la ESPOL la cual posee distintos tipos de cultivos, con el objetivo de sustentar de manera técnica el despliegue de los dispositivos y finalmente obtener un sistema de lazo cerrado que permita realizar control del riego en una parcela determinada en base a una variable medida por sensores.

De manera general, la solución se presenta en tres fases. La primera corresponde al despliegue de una WSN y recolección de datos de RSS del área bajo estudio. Se realizará un diseño de las mediciones, además se obtendrá y almacenará de manera sistemática los datos en un servidor local, a fin de levantar una base de datos que se procesará para obtener la información concerniente a la propagación de la señal.

Una segunda fase corresponde al análisis de las mediciones, la cual tiene por objetivo la obtención del modelo de propagación. Se requiere obtener información del gradiente distancia-potencia y una estadística de la variabilidad de la señal bajo las condiciones de la zona, lo cual permitirá contar con un insumo técnico en cuanto a la parte de telecomunicaciones, que unido a los requerimientos de la granja, posibilite el respaldo para la ubicación de dispositivos inalámbricos y sensores.

En la tercera fase de la propuesta, se proyecta el diseño e implementación de una prueba de concepto de riego inteligente. Se emplearán nodos de la tecnología bajo análisis, así como otros elementos de control para la elaboración del prototipo de riego. En esta fase del proyecto se recogen criterios técnicos del área de agronomía para definir la variable de control y los valores umbrales.

## 1.6. Metodología

Inicialmente, se investigó acerca de previos estudios los cuales se hayan enfocado en el análisis del canal inalámbrico en una WSN dentro y fuera de un entorno agrícola, considerando distintos protocolos de comunicación, tales como Sigfox, Zigbee y LoRaWAN, priorizando este último considerando los requerimientos por parte del cliente.

Luego, se realizó la identificación de microcontroladores los cuales cumplan con los requerimientos a los cuales opera la tecnología LoRa, de manera que estos dispositivos puedan ser desplegados en una WSN para realizar las respectivas mediciones.

Al mismo tiempo, se indagó acerca de los diferentes sistemas de riego y parámetros involucrados dentro del área agrícola, los cuales permitieran un respectivo control de riego que a su vez optimizaran el consumo de agua.

Seguidamente, a través de una planificación de despliegue, se realizó la selección de áreas de cultivo a estudiar dentro del entorno agrícola y se determinaron los puntos de despliegue para el estudio del canal inalámbrico.

Cabe recalcar que, debido a la gran cantidad de muestras que se darían durante el periodo de mediciones, se consideró el uso de un lenguaje de programación para la implementación de un algoritmo el cual permita realizar el procesamiento de los datos medidos, por lo que se consideraron posibles opciones como Python, Java y C++.

Posteriormente, se procedió con el despliegue de los dispositivos de acuerdo con la planificación propuesta, además del registro de despliegue por medio de una bitácora. Una vez terminado el periodo de mediciones, la bitácora permitió realizar el debido procesamiento de datos con el algoritmo implementado para este proceso.

Finalmente, en base a las mediciones realizadas, se obtuvieron los gradientes distancia-potencia para cada cultivo seleccionado, los cuales fueron comparados con modelos teóricos definidos. A su vez, se implementó la prueba de concepto de riego inteligente en una parcela.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. Marco Teórico**

Los conceptos clave que se requieren para el desarrollo del presente proyecto, se incluyen en este capítulo como marco referencial y sustento teórico de las actividades a realizar. Se incluyen definiciones teóricas acerca de redes de sensores inalámbricos, propagación de señales de radiofrecuencia, conceptos del área agrícola y además la descripción de microcontroladores, protocolos y dispositivos que podrían ser usados en la solución.

#### **2.1. Redes de sensores inalámbricos (WSN)**

Las WSN se definen como redes inalámbricas de autoconfiguración y sin infraestructura, diseñadas para el monitoreo de condiciones físicas o ambientales. Pueden llegar a contener una gran cantidad de nodos sensores [28], los cuales cuentan con componentes de radio y alimentación de energía, además de dispositivos encargados de realizar la detección y computación.

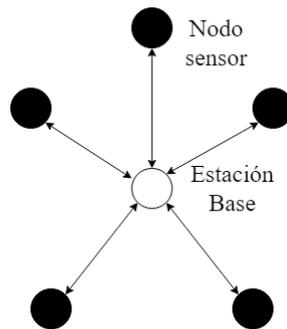
En una WSN, los nodos sensores están limitados en recursos como la velocidad de procesamiento, capacidad de almacenamiento y ancho de banda [28]. Debido a las limitantes que presentan estos nodos, se debe encontrar un equilibrio adecuado entre las capacidades de comunicación y procesamiento de datos.

##### **2.1.1. Topologías de red para WSN**

La elección de una topología de red adecuada en una WSN permite una minimización de parámetros, como consumo de energía, latencia, capacidad para procesamiento de datos y calidad en la comunicación, los cuales corresponden a limitaciones que se encuentran en una WSN [29]. La minimización de estos parámetros se puede manejar mediante la selección de una topología eficiente la cual asegure que los nodos sensores se encuentren a una distancia mínima y se reduzca la probabilidad de que se pierdan mensajes.

### 2.1.1.1. Red estrella

La red estrella es una topología de comunicaciones que consiste en una única estación base la cual posee capacidad de envío y recepción de mensajes hacia nodos remotos [28] con la ventaja de poseer simplicidad y la capacidad de mantener al mínimo el consumo de energía del nodo remoto [29]. En la Ilustración 2.1, se muestra la topología estrella con cinco nodos sensores y una estación base.

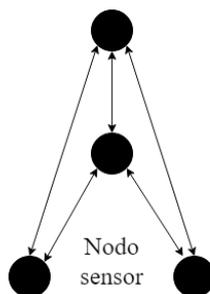


*Ilustración 2.1: Red de sensores con topología estrella [28].*

La desventaja que presenta la topología [28] resulta en el posicionamiento de la estación base para estar dentro del rango de transmisión de cada uno de los nodos remotos involucrados dentro de la red.

### 2.1.1.2. Red malla

La red malla [28] permite la transmisión de datos de un nodo de la red a otro nodo que se encuentre dentro de su rango de transmisión. La comunicación entre nodos se establece por medio de múltiples saltos, de manera que se utilizan nodos intermedios para el establecimiento de comunicación con nodos fuera del rango de transmisión. La topología malla se puede observar en la Ilustración 2.2, conformada con cuatro nodos sensores.

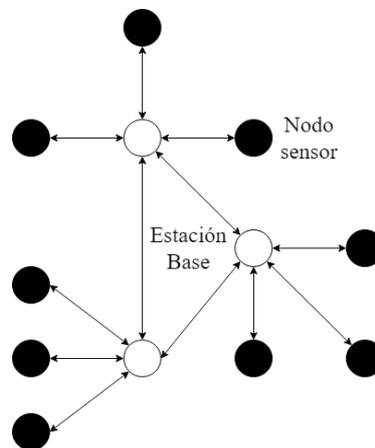


*Ilustración 2.2: Red de sensores con topología malla [28].*

La principal ventaja que representa esta topología se centra en su capacidad de redundancia y escalabilidad, de manera que el fallo de uno de los nodos no representa un inconveniente dentro del funcionamiento de otros nodos dentro de la red [29]. Por otro lado, existe una desventaja con respecto al alto consumo de energía que esta requiere la red, en comparación a otras topologías [28].

### 2.1.1.3. Red híbrida malla – estrella

Un híbrido entre la red malla y estrella permite establecer una comunicación redundante a su vez que mantiene la capacidad de mantener al mínimo el consumo de energía [28]. En este tipo de topología, los nodos sensores con menor potencia no se les atribuye la función de reenvío, lo que permite optimizar la energía; a su vez, a los nodos centrales de la red se les otorga la funcionalidad de múltiples saltos, de manera que se encargan del reenvío de mensajes entre nodos sensores. En la Ilustración 2.3, se aprecian tres estaciones base con sus respectivos tres nodos sensores, conformando una topología híbrida malla – estrella.



*Ilustración 2.3: Red de sensores con topología híbrida malla - estrella [28].*

## 2.2. LPWAN

De manera general, las aplicaciones de del Internet de las Cosas (IoT) requieren nodos energéticamente eficientes y de baja complejidad para diversos usos dentro de redes escalables. Actualmente, tecnologías inalámbricas como redes de área local inalámbrica (WLAN), Bluetooth y ZigBee, son utilizadas para aplicaciones de detección en entornos de corto alcance;

mientras que, redes celulares inalámbricas como 3G, 4G y 5G pueden extenderse a aplicaciones de largo alcance, aunque están diseñadas principalmente para la comunicación de voz y datos [30].

Con el fin de respaldar los requisitos mencionados anteriormente, se ha desarrollado el concepto de tecnologías de redes de área amplia de bajo consumo (LPWAN) [30], la cual cuenta con características de grandes áreas de cobertura, bajas velocidades de transmisión de datos con tamaños de paquetes reducidos y larga vida en la duración de la batería.

### **2.2.1. LoRa**

Largo Alcance (LoRa) es una tecnología basada en la modulación de espectro ensanchado chirp (CSS) capaz de proporcionar comunicaciones de largo alcance y bajo consumo energético con una transmisión de datos segura y baja tasa de datos [31].

#### **2.2.1.1. Modulación de espectro ensanchado LoRa**

La modulación LoRa realiza la codificación de datos, por medio de CSS, utilizando un factor de esparcimiento (SF) de 7 a 12 que permite trabajar a tasas de datos bajas debido a que ocupa un mayor tiempo de transmisión [31]. Este tipo de modulación resulta más completa y resistente al ruido de fondo debido al barrido de dos frecuencias de FSK.

### **2.2.2. LoRaWAN**

Para la red LoRa, se requiere la aplicación de la red de área amplia de largo alcance (LoRaWAN), la cual consiste en un protocolo que permite establecer la comunicación y construcción de la arquitectura del sistema [31]. LoRaWAN, puede incidir sobre aspectos como el tiempo de vida de la batería en nodos, las aplicaciones brindadas por la red, a su vez que su capacidad y calidad a nivel de servicio y seguridad. Los equipos que forman parte del protocolo corresponden a servidores de red y aplicaciones, además de gateways y sus respectivos nodos finales.

En una red LoRaWAN, la información transmitida como paquetes por los nodos finales es generalmente recibida por múltiples gateways, de manera que los paquetes recibidos por cada gateway serán transmitidos hacia servidores de red vía Ethernet, Wi-Fi o satélite como mensajes LoRaWAN [31]. Los servidores de red establecen comunicación con servidores de aplicaciones para la ejecución de aplicaciones de administración y control de dispositivos.

### 2.2.2.1. Frecuencias LoRaWAN

La asociación abierta sin fines de lucro LoRa Alliance establece, por medio de perfiles de cada país, las bandas de operación para LoRaWAN [32]. En la Tabla 2.1, se detallan las distintas bandas permitidas en cinco países con los respectivos planes para LoRaWAN. Se recalca que en países con el nombre en fuente cursiva se esperan cambios en las regulaciones locales, por lo que el plan de canales puede variar. De esta manera, a Ecuador se le atribuye la banda de 902 – 929 MHz considerando sus regulaciones locales.

**Tabla 2.1: Extracto de frecuencias LoRaWAN por país [32].**

Nombre del país	Banda / canales	Plan de canal
Dominica (DM)	902 – 928 MHz	US902-928 AU915-928
República Dominicana (DO)	915 – 928 MHz	AU915-928
Ecuador (EC)	902 – 928 MHz	US902-928 AU915-928 AS923
<i>Egipto (EG)</i>	433.05 – 434.79 MHz	EU433
	865 – 868 MHz	IN865-867
	863 – 870 MHz	EU863-870
El Salvador (SV)	915 – 928 MHz	AU915-928 AS923

### 2.2.2.2. Nodo final LoRa

Consiste en una radio LoRa, sensores, una antena, fuente de alimentación y, en algunos casos, actuadores [31]. Un nodo final puede construirse a través de la combinación de diversas opciones de hardware y software dependiendo de la configuración que se le desee dar al nodo, ya sea para transmitir a uno o varios gateways LoRa.

Existen diversos módulos de prueba LoRa para un nodo final entre los que se incluyen los módulos de desarrollo, los cuales están basados en chips del fabricante Semtech [33]. En la Ilustración 2.4, se aprecian módulos de desarrollo emparejados con un microcontrolador, los cuales disponen de conectividad Wi-Fi y poseen una antena con una banda LoRa de 902 – 928 MHz y pueden alimentarse con 3V o 5V [34] [35].



*Ilustración 2.4: a) Módulo de desarrollo Cubecell [34] ASR6502, b) Módulo de desarrollo WiFi LoRa 32 [35].*

### 2.2.2.3. Gateway LoRa

Debido a que pueden llegar a procesar la información de diversos nodos finales, los gateways LoRa requieren una mayor potencia de procesamiento [31]. Estos dispositivos pueden construirse a partir de hardware como Raspberry Pi o Arduino Yun Shield para la configuración de un gateway LoRa de canal único y son utilizados mayormente para la exploración de redes de radio LoRa.

Al igual que en los nodos finales LoRa, para los gateway LoRa también existen módulos de prueba. Estos módulos permiten la operación simultánea con varios canales, pero requieren la implementación de un microcontrolador para su uso [33]. En la Ilustración 2.5, se

observa el módulo de prueba para un gateway LoRa el cual incluye una antena con una banda LoRa 902 – 928 MHz y puede alimentarse con 5V [36].



*Ilustración 2.5: Módulo HT-M01 Mini LoRa Gateway [36].*

### **2.3. Parámetros de señal de radiofrecuencia**

La actual sección, detalla los parámetros usados para estudiar una señal inalámbrica que es detectada por un receptor. Se describe en particular al RSS, RSSI y SNR.

#### **2.3.1. Potencia de señal recibida (RSS)**

Es el valor de potencia que llega al receptor luego de atravesar el canal de comunicaciones. El objetivo de diseño de un sistema de comunicaciones es cumplir con requerimientos específicos de disponibilidad, y esto en gran medida depende de que el nivel de señal recibido no sea tan bajo que no se pueda detectar, ni tan elevado que cause distorsiones no lineales en la señal [37].

#### **2.3.2. Indicador de potencia de señal recibida (RSSI)**

Es una escala semicuantitativa que se obtiene realizando una cuantización de los valores de RSS y se usa como una herramienta para evaluar la potencia de la señal recibida en función de la localización dentro del área de cobertura [38].

#### **2.3.3. Relación señal a ruido (SNR)**

Es la relación entre el RSS y el nivel de ruido  $N$  en el receptor. A continuación, se define el ruido en el receptor y el SNR [39]:

$$N_{dBm} = -174 \text{ dBm} + 10 \log(B) + F_{dB} \quad (1)$$

$$SNR_{dB} = RSS_{dBm} - N_{dBm} \quad (2)$$

## 2.4. Propagación de señales de radiofrecuencia

Las señales de radiofrecuencia (RF) son ondas electromagnéticas que se propagan normalmente en un medio inalámbrico, aunque este término es usado por la industria para referirse a ondas que van desde 1 MHz a 1 GHz de frecuencia [39]. A continuación, se detallan algunos conceptos importantes y modelos de propagación que pueden utilizarse para la planificación de enlaces con señales RF.

### 2.4.1. Zonas de Fresnel

Una zona de Fresnel es un área tridimensional elíptica, que tiene como eje la línea de vista entre las antenas de transmisión (Tx) y recepción (Rx) de un enlace de comunicaciones inalámbricas. Se considera que mantener sin obstrucciones un 60% de la primera zona de Fresnel, permite tener pérdidas por difracción de 0 dB [39]. En la Ilustración 2.6 se muestra gráficamente el concepto de las zonas de Fresnel, visto en dos dimensiones.

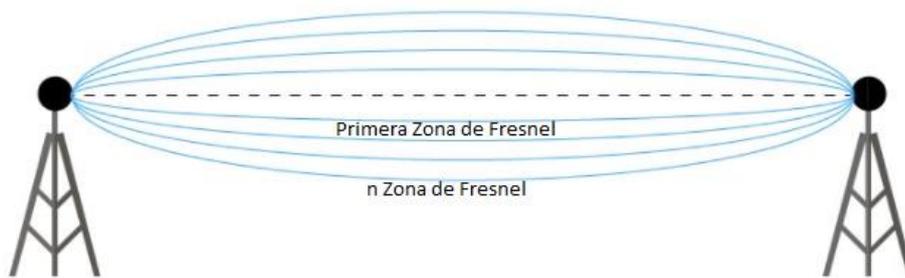


Ilustración 2.6: Zonas de Fresnel. Adaptado de [40]

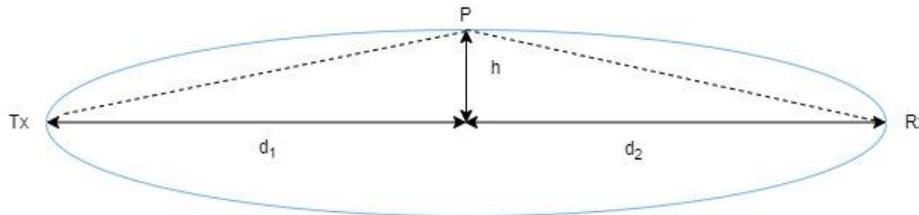
Las zonas de Fresnel pueden ser determinadas con la expresión [39]:

$$h_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (3)$$

donde:

- $h_n$ , es una secuencia de elipsoides que tiene por focos a las antenas de Tx y Rx.

- $n$ , es un número entero que indexa las elipses desde el eje del elipsoide, o línea de vista hacia afuera.
- $\lambda$ , es la longitud de onda de operación.
- $d_1$  y  $d_2$ , son las distancias horizontales desde la antena de Tx y Rx hasta el punto de difracción P, como se indica en la Ilustración 2.7.



*Ilustración 2.7: Geometría de las Zonas de Fresnel*

## 2.4.2. Modos de propagación

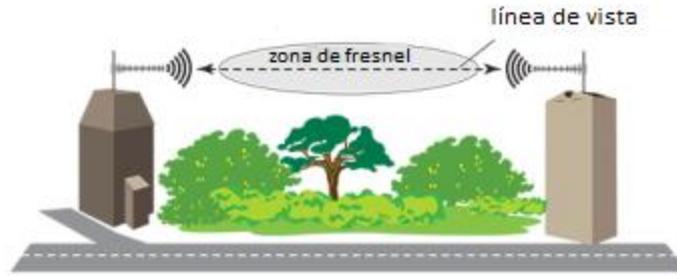
Las ondas electromagnéticas son capaces de auto propagarse, en base a un fenómeno dual que se caracteriza por un campo magnético variante que genera un campo eléctrico, y un campo eléctrico variante que genera un campo magnético. Para modelos de propagación RF a menudo se visualiza a la onda electromagnética como un rayo (su vector de Poynting) en la dirección de propagación [39]. En las siguientes subsecciones se mencionan los modos de propagación según el nivel de obstrucción en el enlace.

### 2.4.2.1. Línea de vista (LoS)

En comunicaciones inalámbricas, la línea de vista se refiere a la condición en la que no existe obstrucción en al menos el 60 % de la primera zona de Fresnel del enlace entre la antena de Tx y la antena de Rx. Para determinar si un enlace cumple con línea de vista, con frecuencia se analiza la curvatura de la tierra, teniendo en cuenta que una aproximación teórica para la máxima distancia de cobertura con LoS se puede obtener con la expresión [39]:

$$distancia \cong \sqrt{2 \times altura \ de \ atena} \ [millas] \quad (4)$$

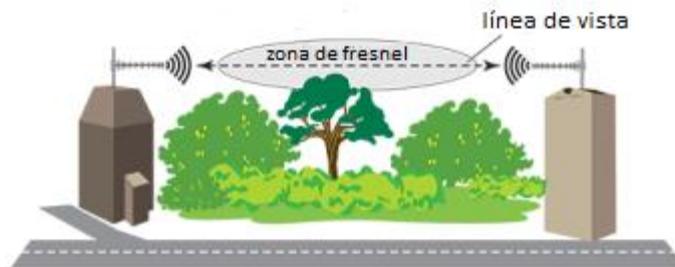
En aplicaciones como las WSN donde las distancias entre las antenas de Tx y Rx son cortas, se puede ignorar el análisis del radio de la tierra [41]. En la Ilustración 2.8, se observa la representación gráfica de un escenario de LOS.



*Ilustración 2.8: Escenario de un enlace LoS. Adaptado de [42]*

#### **2.4.2.2. Línea de vista obstruida (nLoS)**

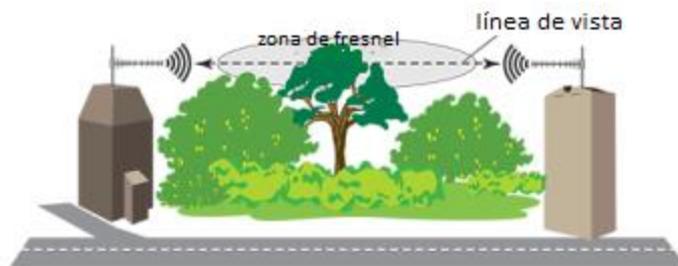
Cuando existe una obstrucción parcial de la primera zona de Fresnel, se produce un enlace con línea de vista obstruida, tal como se aprecia en la Ilustración 2.9. Las obstrucciones no ligadas a la curvatura de la tierra incluyen a la presencia de edificios o vegetación, y se deben considerar como elementos que generarán pérdidas adicionales a las pérdidas en el espacio libre en condición LoS [42].



*Ilustración 2.9: Escenario de un enlace nLoS. Adaptado de [42]*

#### **2.4.2.3. No línea de vista (NLoS)**

Se refiere a un enlace que requiere mecanismos de propagación indirecta para cerrarse [39], debido a que presenta una obstrucción de más del 60% del primer radio de Fresnel como se muestra en Ilustración 2.10. Algunos mecanismos de propagación indirecta son la difracción, refracción, multitrayectoria y además se puede añadir la propagación transhorizonte que incluye la propagación ionosférica, troposférica y terrenal.



*Ilustración 2.10: Escenario de un enlace NLoS. Adaptado de [42]*

La difracción, es el efecto que ocurre cuando una onda electromagnética (OE) cambia de dirección al incidir en el filo de un obstáculo, obteniéndose una cobertura parcial o sombra cerca del obstáculo [39].

La refracción, es el cambio de dirección de propagación de una OE debido a la heterogeneidad del medio de propagación [39].

El efecto multitrayectoria, se refiere a las reflexiones sobre múltiples objetos en los que incide la OE, lo que resulta en varias copias de la onda arribando al receptor [39].

Cuando las OE se reflejan en la capa de plasma ionizado que existe alrededor de la tierra o mejor conocida como ionósfera, se produce la llamada propagación ionosférica [39] que es la base para algunos tipos de comunicaciones transhorizonte.

En la tropósfera, que es la capa más baja de la atmósfera, se da un tipo de propagación que consiste en la reflexión-refracción de las ondas de RF en una especie de ducto [39]. El ducto se forma debido a condiciones de temperatura y humedad diferentes entre capa y capa atmosférica. La propagación troposférica es menos confiable que la propagación ionosférica.

Se denomina onda terrestre, a una OE que sigue la curvatura de la tierra [39]. Dentro de este tipo de ondas que realizan propagación terrestre se incluye a la propagación LoS y a la propagación con reflexión en el suelo.

### **2.4.3. Enlace y presupuesto de enlace**

Para la planificación de enlaces de comunicaciones, es necesario calcular un presupuesto de enlace, de tal manera que se incluya el EIRP y todas pérdidas en el enlace antes

de llegar al receptor. Dependiendo de la aplicación, se puede requerir una medición del piso de ruido en el receptor para determinar el nivel de señal requerido para la detección [39]. La forma básica del presupuesto de enlace es la siguiente:

$$EIRP = Lp - G_R + LM + S \quad (5)$$

donde:

- $EIRP$ , es la potencia isotrópica irradiada efectiva en dBW o dBm
- $LM$ , es el margen de enlace en dB.
- $Lp$ , es la pérdida de paso en dB
- $G_R$ , es la ganancia de la antena de recepción.
- $S$ , es la sensibilidad o umbral del receptor en dBW o dBm.

#### **2.4.3.1. Potencia isotrópica radiada efectiva (EIRP)**

En decibelios, es el equivalente a la suma de la potencia transmitida más la ganancia de la antena de transmisión [39]:

$$EIRP_{dBm} = Pt_{dBm} + Gt_{dB} \quad (6)$$

Para un presupuesto de enlace detallado, se puede incluir las pérdidas por conectores y/radomos en el EIRP.

#### **2.4.3.2. Pérdida de paso (Lp)**

Es el término que representa la potencia disipada o en el trayecto de propagación [41], la cual puede estar conformada por las pérdidas en el espacio libre, pérdidas por absorción, precipitación, debilitamiento multipaso y otros efectos relacionados con la frecuencia de operación y el ambiente [39].

#### **2.4.3.3. Ganancia (G)**

Se define como el ratio entre la intensidad de radiación de la antena versus la intensidad de radiación de una antena isotrópica que emite a una misma potencia total. Por lo general, la ganancia se refiere al valor máximo de ganancia, y este ocurre en la dirección de máxima

directividad [43]. En la ecuación del presupuesto de enlace se consideran dos ganancias, la ganancia de transmisión  $G_t$  y la ganancia de recepción  $G_r$ .

#### 2.4.3.4. Margen de enlace (LM)

Se obtiene al comparar el nivel de la señal recibida esperada con la sensibilidad del receptor [39]. El margen de enlace indica si existe un déficit o un superávit de potencia para que la enlace cierre y exista comunicación. El margen de enlace puede hallarse con la siguiente expresión:

$$LM = EIRP - Lp + G_R - S \quad (7)$$

#### 2.4.4. Modelo de propagación en el espacio libre

El modelo de espacio libre supone que el receptor y el transmisor están ubicados en un ambiente vacío, es decir que no considera superficies u objetos absorbentes obstaculizando la trayectoria. La energía irradiada se esparce en una esfera de radio  $d$ , de tal manera que la potencia recibida decrece en proporción inversa a  $d^2$  [41]. En las subsecciones siguientes, se detalla un criterio bajo el cual el modelo de espacio libre y el modelo de dos rayos se pueden agrupar en un solo modelo particionado.

##### 2.4.4.1. Modelo de Friis (FSP)

El modelo de Friis es un modelo teórico que predice las pérdidas de paso entre dos antenas, con la misma polarización y que tienen sus direcciones de máxima ganancia alineadas. Además, están separadas por una distancia  $d$  suficiente para que ambas antenas se encuentren en la región de campo lejano mutuamente [43]. Las pérdidas de paso dependen de la distancia que separa a las dos antenas y de la frecuencia de operación y. La siguiente expresión corresponde al modelo de Friis en su forma logarítmica:

$$L_{(dB)} = L_0 + 20 \log(f / f_0) + 20 \log(d / d_0) \quad (8)$$

$$L_0 = -10 \log G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0}{c/f_0} \right) = 32.44 \text{ [dB]} \quad (9)$$

donde:

- $L_0$ , es la pérdida de paso a la distancia de referencia  $d_0$ .
- $L_{(dB)}$ , es la pérdida de paso a la distancia  $d$ .
- $f$ , es la frecuencia de operación en MHz.
- $f_0$ , es la frecuencia de referencia de 1 MHz.
- $d$ , es la distancia entre la antena de Tx y la antena de Rx, expresada en Km.
- $d_0$ , es la distancia de referencia de 1 Km.
- $G_T$ , ganancia de la antena de Transmisión (lineal).
- $G_R$ , ganancia de la antena de Recepción (lineal).
- $c$ , es la velocidad de luz:  $3 \times 10^8 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

Las ganancias  $G_T$  y  $G_R$ , tiene un valor de uno (1) para la mayoría de aplicaciones [39], por este motivo se omiten en el cálculo de  $L_0$ .

#### 2.4.4.2. Modelo de dos rayos para reflexión en el suelo (TRP)

El método de trazado de rayos considera que cada trayectoria de propagación es un rayo de luz y que se refleja al incidir en superficies, por lo tanto, revisa los posibles caminos que la señal de radio toma desde la antena de Tx a la antena de Rx. Para obtener buenos resultados en las predicciones requiere de información detallada del área de propagación, y esto lo convierte en un modelo específico para cada sitio [41].

Para la mayoría de casos de propagación existen dos caminos, uno directo y otro reflejado en el piso. El modelo de dos rayos recoge este hecho y pretende dar una predicción más precisa que la provista por el modelo FSP solamente [41]. El modelo de dos rayos se expresa con la siguiente ecuación:

$$P_r = \frac{G_T G_R P_t \lambda^2}{(4\pi D)^2} \left[ 2 \operatorname{sen} \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right]^2 \quad (10)$$

Se define una distancia crítica  $d_{th}$ , a partir de cuyo valor el argumento de la función seno tiende a ser igual a  $\pi/4$ . Este factor, permite decidir si para la distancia  $d$  evaluada, se ingresará únicamente en el modelo FSP o se ingresará en el modelo TRP, considerando que el

modelo TRP es más preciso que el modelo FSP en distancias mayores a  $d_{th}$  [41]. En consecuencia, se puede unir los modelos FSP y TRP en un modelo particionado:

$$d_{th} = 4\pi \cdot \frac{h_t h_r}{\lambda} \quad (11)$$

$$L_{(dB)} = \begin{cases} 32.44 + 20 \log(f / f_0) + 20 \log(d / d_0) & ; 0 < d \leq d_{th} \\ -10 \log(G_T G_R) - 20 \log(h_t h_r) + 40 \log(d) & ; d \geq d_{th} \end{cases} \quad (12)$$

donde:

- $h_t$ , es la altura de la antena de Tx en metros.
- $h_r$ , es la altura de la antena de Rx en metros.
- El resto de parámetros se definieron previamente para el modelo FSP.

#### 2.4.5. Modelos de vegetación

Como se detalló en la definición de nLoS, las pérdidas por vegetación (VEG) se consideran generalmente pérdidas adicionales a las pérdidas en el espacio libre, de tal manera que las pérdidas totales en un enlace con presencia de vegetación se deben calcular como en la siguiente ecuación:

$$L_T = L_{FSP} + L_{VEG} \quad (13)$$

En las subsecciones a continuación, se describen algunos modelos existentes utilizados para predecir las pérdidas por vegetación en los enlaces.

##### 2.4.5.1. Modelo de Weissberger

Es un modelo de decaimiento exponencial (MED), que predice las pérdidas en exceso a las atenuaciones en el espacio libre (modelo de Friis), y se aplica para bloqueos de la trayectoria de propagación donde existan áreas de vegetación caracterizadas por la presencia de árboles con densidad de hojas secas. Para aplicar el modelo, se debe considerar que la distancia del trayecto sobre la vegetación se expresa en metros y el rango de frecuencias que cubre es de 230 MHz a 95 GHz [39].

$$L_{(dB)} = \begin{cases} 1.33 F^{0.284} d_f^{0.588} ; & 14 < d_f \leq 400m \\ 0.45 F^{0.284} d_f & ; \quad 0 < d_f \leq 14m \end{cases} \quad (14)$$

donde:

- $F$ , es la frecuencia de operación en GHz.
- $d_f$ , es la longitud de la trayectoria LoS que atraviesa por la vegetación expresada en metros

#### **2.4.5.2. Modelo temprano de vegetación de la ITU (ITU-R)**

Es un modelo MED, presentado por la ITU, que se basa en diferentes experimentos conducidos en distintos ambientes, e involucrando distintos tipos de vegetación. Este modelo se puede usar como referencia en la planificación de enlaces y presente en la siguiente ecuación [39].

$$L_{(dB)} = 0.2 F^{0.3} d_f^{0.6} \quad (15)$$

donde:

- $F$ , es la frecuencia de operación en MHz.
- $d_f$ , es la longitud de la trayectoria LoS que atraviesa por la vegetación expresada en metros

#### **2.4.5.3. Modelo actualizado de vegetación de la ITU (FITU-R)**

Entre los modelos MED documentados por la ITU, se han realizado actualizaciones de los modelos de vegetación basadas en consensos acerca de su aplicabilidad. Este es el caso del modelo FITU-R que, a diferencia del modelo ITU-R, propone que la magnitud de la atenuación debido a la vegetación tiene un límite, debido a la existencia de caminos de difracción dentro y alrededor de la vegetación [39].

$$L_{(dB)} = 0.39 f^{0.39} d_f^{0.25} \quad (16)$$

donde:

- $f$ , es la frecuencia de operación en MHz.

- $d_f$ , es la longitud de la trayectoria LoS que atraviesa por la vegetación expresada en metros

#### 2.4.6. Modelo de gradiente distancia-potencia

En ambientes reales, el efecto multipaso de propagación de una señal de radio, hace que la potencia recibida en una distancia  $d$  se considere una variable aleatoria; por otra parte, los modelos FSP y TRP realizan una predicción de tipo determinístico, en la que obtienen la potencia recibida en función de la distancia del enlace [41]. Una vía para lograr un modelo más general es el modelo de gradiente distancia-potencia o de debilitamiento de sombra, que se presenta a continuación:

$$P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} - 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + F_{\sigma(dB)} \quad (17)$$

$$L_p(dB) = L_{0(dB)} + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + F_{\sigma(dB)} \quad (18)$$

donde:

- $P_r(d)_{dBm}$ , es la potencia promedio recibida en la distancia  $d$ .
- $P_r(d_0)_{dBm}$ , es la potencia promedio recibida a la distancia de referencia arbitraria  $d_0$ .
- $\alpha$ , es el coeficiente de atenuación de la trayectoria de propagación determinado empíricamente por mediciones de campo; su valor es 2 cuando existen condiciones de propagación en el espacio libre.
- $F_{\sigma(dB)}$ , es una variable aleatoria de distribución Gaussiana con media cero. Se denomina *desviación de debilitamiento de sombra* y se obtiene empíricamente.

#### 2.5. Análisis de regresión

Existen técnicas para el ajuste de curvas, que se usan en aplicaciones científicas o de ingeniería, y estas pretenden obtener coeficientes de un modelo matemático que representa a los datos experimentales. A continuación, se expone la regresión lineal y la regresión no lineal.

### 2.5.1. Regresión lineal

La regresión lineal no se limita al caso de encontrar la pendiente e interceptos de una recta, sino que también se extiende a la búsqueda de coeficientes lineales, lo que puede aplicar para series de potencias e incluso funciones exponenciales.

La técnica para seleccionar una recta que represente a un conjunto de datos  $(x, y)$ , consiste encontrar la suma mínima a partir de los cuadrados de los valores de desviación de la variable dependiente y de los diferentes puntos de la línea. Requiere de la técnica estadística conocida como análisis de regresión, que esencialmente asume que todas las desviaciones de la línea resultan de un error de medición de la variable dependiente y [44].

El análisis de regresión para  $N$  mediciones de pares  $(x_i, y_i)$ , emplea las siguientes expresiones para su cálculo:

$$S_{xx} = \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2/N \quad (19)$$

$$S_{yy} = \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2/N \quad (20)$$

$$S_{xy} = \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / N \quad (21)$$

Luego se obtiene la ecuación para una recta de la forma  $y = mx + b$ , calculando los términos:

$$m = S_{xx} S_{xy} \quad (22)$$

$$b = (\sum y_i - m \sum x_i) / N \quad (23)$$

### 2.5.2. Regresión no lineal

Existen funciones que pueden ser lineales en base a sus coeficientes, pero no son lineales en base a sus variables, por ejemplo  $y = a + bx + cx^2$  o  $y = ae^x$ , sin embargo si la función tiene una forma como  $y = e^{a+bx}$ , no es lineal con respecto a los coeficientes [44].

Es posible tener expresiones que son convertirlas a una forma lineal, pero para los casos en que no se puede obtener dicha forma lineal, aún se puede obtener los coeficientes que

permiten la minimización de la suma de los valores cuadrados a partir de las diferencias entre  $Y_{calculada}$  y  $Y_{observada}$  con un método de prueba y error, que se realiza con algoritmos como el Marquart-Levenberg, descenso más empinado, entre otros [44].

## 2.6. Distribuciones de Probabilidad

Las funciones de distribución de probabilidad describen el comportamiento de las variables aleatorias: si son discretas, se describen con la función de distribución de probabilidad (PDF) y la función de masa de probabilidad (pmf); si son continuas, se describen con la PDF y con la función de densidad de probabilidad (pdf). A continuación, se detallan las definiciones de estas funciones [45].

### 2.6.1. Función de distribución de probabilidad

Dado un experimento con su variable aleatoria asociada  $X$  y dado el número real  $x$ , se define el evento  $\{s: X(s) \leq x\}$  o simplemente  $P(X \leq x)$ . Esta probabilidad depende del valor de  $x$ . La función [45]:

$$F_X(x) = P(X \leq x) \quad (24)$$

se define como la *PDF* o simplemente la *función de distribución* de  $X$ .

La PDF es conocida como la probabilidad de que la variable aleatoria asuma un valor dentro de un rango  $s$ , siendo este conjunto conformado por el punto  $x$  y todos los puntos a la izquierda [45] de  $x$ . Esta función es acumulativa y se obtiene realizando una suma si se trata de variables aleatorias discretas y una integración para el caso de las variables aleatorias continuas.

### 2.6.2. Función de masa de probabilidad

Se considera  $X$  como variable aleatoria discreta que asume valores discretos infinitos con probabilidad diferente a cero. Si se denota  $P(X \leq x_i) = p(x_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots$  entonces [45]:

$$\begin{cases} 0 < p(x_i) \leq 1, & \text{para todo } i \\ \sum_i p(x_i) = 1. \end{cases} \quad (25)$$

Además, la función

$$p_X(x) = P(X = x) \quad (26)$$

se define como la *pmf* de  $X$ .

### 2.6.3. Función de densidad de probabilidad

Asumiendo que  $X$  es una variable aleatoria continua, su PDF,  $F_X(x)$ , es una función continua de  $x$ , y la derivada [45]:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (27)$$

existe para todo  $x$ . La función  $f_X(x)$  es llamada *función de densidad de probabilidad* de  $X$  o simplemente *función de densidad* de  $X$ .

## 2.7. Lenguajes de programación

Los lenguajes de programación muestran similitudes entre ellos debido a diversos factores [46], como compartir la misma base matemática, basarse en el mismo tipo de hardware y conjunto de instrucciones, además de tener como metas brindar una mayor facilidad para el uso de los programadores y ofrecer eficiencia en cuanto a ejecución por parte del hardware.

Debido a la gran variedad de lenguajes de programación disponibles, se destacan los más utilizados según la empresa analista líder en la economía de los desarrolladores, SlashData [47], la cual realiza un seguimiento de las tendencias globales de desarrolladores de software. De acuerdo con SlashData, los lenguajes de programación más utilizados, hasta el período del tercer cuatrimestre del año 2021, corresponden a JavaScript, Python, Java, C/C++, PHP y C#.

### 2.7.1. JavaScript

JavaScript es un lenguaje de programación dinámico de alto nivel el cual se adapta a los estilos de programación funcional y orientado a objetos [48]. A pesar de que su sintaxis se deriva de Java, JavaScript es completamente diferente a Java ya que es capaz desarrollar

aplicaciones web para computadoras de escritorio, teléfonos inteligentes y consolas de juegos, por medio de su intérprete.

JavaScript, en conjunto con HTML y CSS, forman parte de un grupo de herramientas para el desarrollo de páginas web [48]. De esta manera, en una página web, HTML especifica su contenido, CSS realiza su presentación, y JavaScript diseña su comportamiento.

### **2.7.2. Python**

Python resulta en un lenguaje de programación de código abierto, con un alto nivel, el cual es ampliamente utilizado debido al énfasis dado en la legibilidad y simplicidad del código, permitiendo que programadores desarrollen aplicaciones con mayor rapidez [49]. Al igual que otros lenguajes de programación, el código de Python se encuentra diseñado a partir del idioma inglés, por lo que se requiere utilizar el intérprete de Python para poder codificar, probar y ejecutar los programas.

En comparación con otros lenguajes de programación, la mayoría de los programas en Python requieren, considerablemente, menos líneas de código para realizar la misma tarea [49]. Esto lleva a menos errores de programación, lo cual reduce el tiempo de desarrollo requerido. Además, Python viene con una extensa colección de recursos de terceros que amplían las capacidades del lenguaje para la programación de varias tareas, como aplicaciones de escritorio, aplicaciones de base de datos, programación de redes e incluso desarrollo móvil.

### **2.7.3. Java**

Java se define como un lenguaje de programación orientado a objetos, diseñado basándose en el modelo de C++ con una orientación a ser simple y portátil a través de plataformas y sistemas operativos [50]. Además de los componentes básicos que componen a Java, existen distribuciones del software las cuales incluyen muchas bibliotecas de software de apoyo para programación de base de datos, red y la interfaz gráfica de usuario (GUI) [51].

#### **2.7.4. C++**

C++ resulta en un lenguaje híbrido que contiene la funcionalidad del lenguaje de programación C [52], permitiendo generar programas modulares de uso universal o programas portátiles para diversas plataformas; además, admite conceptos de programación orientada a objetos, lo que permite realizar la abstracción de datos, encapsulación de datos, herencia por clases derivadas y la implementación de instrucciones con efectos variables durante la ejecución de un programa.

Este lenguaje de programación provee de un modelo de cálculo y memoria semejante al modelo que manejan la mayoría de computadoras [53]. Además, permite la construcción de lenguaje que permite al programador la introducción y uso de objetos los cuales son de utilidad para el desarrollo de aplicaciones.

#### **2.7.5. PHP**

PHP es un lenguaje de programación simple diseñado para la creación de contenido HTML [54]. Para generar HTML, es necesario el analizador PHP y un servidor web a través del cual enviar archivos de documentos codificados.

Entre sus tareas básicas se incluye el procesamiento de datos, interacción con bases de datos y creación de gráficos. Además, posee la capacidad de ejecutar scripts desde la línea de comandos para tareas de administración del sistema, como copias de seguridad y análisis de registros [54].

#### **2.7.6. C#**

El lenguaje de programación C# es utilizado para diversas aplicaciones, entre las que se incluyen el desarrollo de sitios web, sistemas que se basan en la nube, dispositivos de IoT, y aplicaciones móviles. C# ofrece características orientadas a objetos, genéricas y programación funcional, admitiendo escritura dinámica y estática [55].

## **2.8. Microcontroladores**

Los microcontroladores [56] se definen como microcomputadoras de un solo chip, diseñadas para el control y automatización de procesos y máquinas. Entre los componentes que se encuentran en un microcontrolador, se destaca la unidad central de procesamiento (CPU), la memoria, puertos de entrada/salida (I/O), convertidor analógico a digital (ADC) y digital a analógico (DAC). El uso de microcontroladores permite reducir costos en el área de automatización, además de brindar una mayor flexibilidad en esta área.

### **2.8.1. Raspberry Pi**

Raspberry Pi es una placa de computadora pequeña, potente, barata y orientada a la educación, presentada en 2012 [57]. Su funcionamiento se da igual al de una PC estándar, requiriendo un teclado para la entrada de comandos, una unidad de visualización y una fuente de alimentación.

La gran mayoría de componentes del sistema, de los cuales se destacan las unidades centrales y de procesamiento de gráficos, el hardware de audio y comunicaciones, y el chip de memoria, se encuentran integrados en un solo componente [57]. El procesador de Raspberry Pi consiste en un sistema en chip de 32 bits y 700 MHz basado en la arquitectura ARM11. La memoria flash SD es utilizada como disco duro para el procesador del microcontrolador. La unidad se alimenta a través de un conector micro USB, además de contar con la posibilidad de poseer conectividad a Internet vía cable Ethernet.

Raspberry Pi cuenta con diversas opciones de sistemas operativos [57], aunque la alternativa que mayor uso se le da corresponde a Raspbian por ser de código abierto y gratis, lo que lo vuelve ideal para no variar el precio del dispositivo y ofrecer un mejor manejo.

#### **2.8.1.1. Raspberry Pi 3 Model B**

Este modelo, el cual se puede apreciar en la Ilustración 2.11, resulta de la tercera generación de Raspberry Pi y se caracteriza por ofrecer un procesador diez veces más potente

que la primera generación de Raspberry Pi [58]. Además, se introduce conectividad inalámbrica LAN y Bluetooth, convirtiéndolo en una solución ideal para diseños con requerimientos más potentes. Sus especificaciones se encuentran con mayor detalle en la Tabla 2.2 mostrada a continuación:

**Tabla 2.2: Especificaciones de Raspberry Pi 3 Model B [58].**

Procesador	<p>Conjunto de chips Broadcom BCM2387</p> <p>ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos a 1.2 GHz</p> <p>802.11 b/g/n WLAN y Bluetooth 4.1</p>
Memoria RAM	1 GB LPDDR2
Alimentación	Micro USB 5V 1, 2.5 A
Puertos	<p>Ethernet, HDMI, 4 USB 2.0, 40-pin GPIO, Camera,</p> <p>Display, Tarjeta de Memoria Micro SD</p>



**Ilustración 2.11: Raspberry Pi 3 Model B [58].**

### 2.8.1.2. Raspberry Pi Zero

El modelo, visible por medio de la Ilustración 2.12, se caracteriza por tener un tamaño y costo reducido en comparación a otros modelos de Raspberry Pi [59]. Para mantener el bajo costo del producto se disminuyeron las capacidades del procesador utilizando un ARM de un núcleo a 1 GHz, y la memoria RAM se redujo a 512 MB. En la Tabla 2.3 se muestran las especificaciones del modelo:

**Tabla 2.3: Especificaciones de Raspberry Pi Zero [59].**

Procesador	Conjunto de chips Broadcom BCM2835 ARM de un núcleo a 1 GHz
Memoria RAM	512 MB LPDDR2
Alimentación	Micro USB 5V 160 mA
Puertos	Mini HDMI, 4 USB 2.0, 40-pin GPIO, Camera, Tarjeta de Memoria Micro SD



*Ilustración 2.12: Raspberry Pi Zero [59].*

## **2.8.2. Arduino**

Arduino es considerada una plataforma electrónica de código abierto la cual se basa en el uso sencillo de software y hardware libre [60]. Para programar las placas de Arduino, se utiliza un lenguaje de programación derivado de C/C++ en conjunto con el software Arduino IDE, permitiendo compilar las líneas de código sobre las placas para la ejecución de distintas instrucciones.

### **2.8.2.1. Arduino Uno**

Es una placa de microcontrolador basada en Atmega328P, resultando en la mejor placa para comenzar con la electrónica y codificación [61]. Es la placa más utilizada de Arduino, con la cual pueden realizarse desde prácticas simples hasta proyectos complejos haciendo uso de

diferentes módulos integrables con la placa. Sus características se pueden apreciar en la Tabla 2.4, mientras que la placa puede visualizarse en la Ilustración 2.13.

**Tabla 2.4: Especificaciones de Arduino Uno [61].**

Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Pines digitales de entrada/salida	14
Pines digitales PWM de entrada/salida	6
Pines analógicos de entrada	6
Corriente DC por pin de entrada/salida	20mA
Corriente DC por pin de 3.3V	50mA



**Ilustración 2.13: Arduino Uno [61].**

### 2.8.2.2. Arduino Nano

El Arduino Nano [62] consiste en una placa pequeña y completa la cual es similar a la placa Arduino Uno, difiriendo en pocos aspectos, como se puede apreciar en la Tabla 2.5. Esta placa es mayormente usada para acoplarla en sitios más complicados, ya que su tamaño aporta una ventaja de implementación en entornos complejos. En la Ilustración 2.14, se puede apreciar el modelo de la placa.

**Tabla 2.5: Especificaciones de Arduino Nano [62].**

Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Pines digitales de entrada/salida	22
Pines digitales PWM de entrada/salida	6
Pines analógicos de entrada	8
Corriente DC por pin de entrada/salida	40mA



*Ilustración 2.14: Arduino Nano [62].*

### 2.8.2.3. Arduino Mega 2560

El Arduino Mega, el cual se observa por medio de la Ilustración 2.15, se diferencia por contar con mayor cantidad de pines de entrada/salida, lo cual permite el diseño e implementación de proyectos a mayor escala y complejidad [63]. Como se aprecia en la Tabla 2.6, sus características son similares a las del Arduino Uno.

**Tabla 2.6: Especificaciones de Arduino Mega 2560 [63].**

Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Pines digitales de entrada/salida	14
Pines analógicos de entrada	16
Corriente DC por pin de entrada/salida	20mA
Corriente DC por pin de 3.3V	50mA



*Ilustración 2.15: Arduino Mega [63].*

### **2.8.3. ESP32**

Se conoce a ESP32 como microcontrolador diseñado para aplicaciones móviles, dispositivos electrónicos e IoT [64]. Cuenta con diversas características que le otorgan una mayor fiabilidad en diversas aplicaciones, entre las que se resalta su rango de operación entre temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ , asegurando su funcionamiento en la mayor parte de escenarios.

De manera integrada, se destaca su integración de un único chip combinado con Wi-Fi y Bluetooth [64], lo que le permite funcionar como sistema independiente o como dispositivo esclavo de otro microcontrolador, logrando reducir sobrecargas de comunicación en el procesador de la aplicación principal. El microcontrolador se puede apreciar en la Ilustración 2.16.



*Ilustración 2.16: ESP32 [65]*

## **2.9. Sensores**

Los sensores consisten en dispositivos los cuales reciben diferentes tipos de señales y las convierte en señales eléctricas por medio de un estímulo [66]. Estos sensores se clasifican en diferentes tipos según las aplicaciones, la señal de entrada, precisión y rango.

### 2.9.1. Sensor capacitivo de humedad del suelo

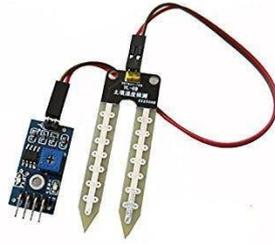
Estos sensores consisten en un material dieléctrico higroscópico intercalado entre un par de electrodos que forman un pequeño condensador [67]. El sensor está compuesto por dos placas metálicas separadas por una fina capa de película de polímero no conductor, como se aprecia en la Ilustración 2.17, de manera que la película atrae la humedad del aire y cuando la humedad entra en contacto con las placas de metal, se genera un cambio de voltaje [68]. Dependiendo del fabricante el sensor puede ser alimentado con 3.3V o 5V y con una corriente máxima alrededor de 35mA.



*Ilustración 2.17: Sensor capacitivo de humedad del suelo [67].*

### 2.9.2. Sensor resistivo de humedad del suelo

Funciona con un principio similar al sensor capacitivo, de manera que mide el cambio eléctrico para producir un valor de humedad relativa [67]. Sin embargo, posee un mecanismo distinto, pues utiliza un material que absorbe la humedad para medir el cambio de resistencia [68]. Es decir, el sensor resistivo mide el cambio de impedancia eléctrica de un medio higroscópico como un polímero conductor, el cual se muestra en la Ilustración 2.18. Al igual que el sensor capacitivo, puede alimentarse con 3.3V o 5V y con corriente máxima cercana a 35mA.



*Ilustración 2.18: Sensor resistivo de humedad del suelo [67].*

### **2.9.3. Sensor resistivo de humedad del suelo resistente a corrosión**

Cuenta con las mismas características que el sensor resistivo de humedad del suelo, haciendo uso de una resistencia analógica para detectar el contenido de humedad en el suelo por medio de una sonda. Su diferencia se resalta específicamente en su sonda [69], observada en la Ilustración 2.19, ya que cuenta con resistencia a la corrosión, garantizando una larga vida útil de aproximadamente 6 meses ubicada dentro del suelo. Este sensor puede alimentarse de 3.3V a 12V con una corriente menor a 20mA.



*Ilustración 2.19: Sensor resistivo de humedad del suelo resistente a corrosión [69].*

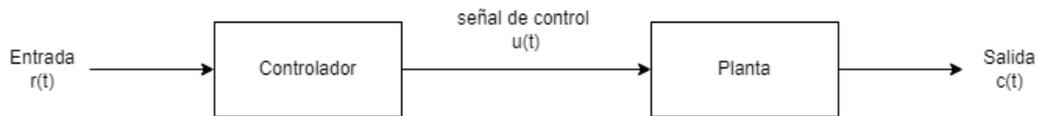
## **2.10. Sistemas de control**

Un sistema de control consiste en una interconexión de componentes que conforman una configuración de sistema que proporcionará una respuesta deseada sobre otro sistema para lograr un objetivo deseado [70].

### **2.10.1. Lazo abierto**

Consiste en un sistema de control en el cual la acción de control solo depende de la señal de entrada y no depende de su respuesta de salida [70]. Este tipo de sistema presenta ciertas ventajas en cuanto a facilidad de diseño y construcción, además de resultar de fácil

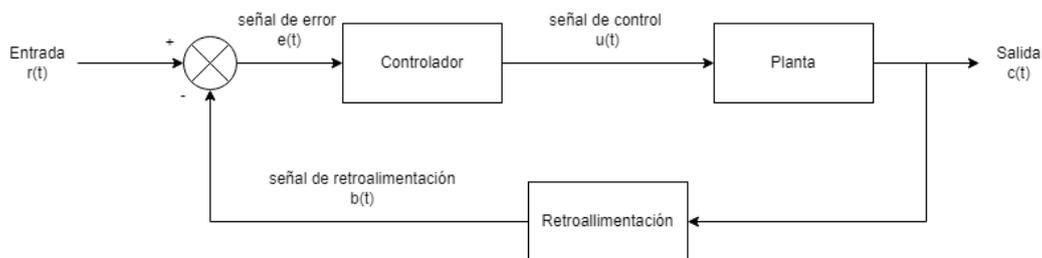
mantenimiento y operación muy estable. Sin embargo, este tipo de sistema no es del todo preciso al momento de manejar parámetros de naturaleza variable, además de requerir recalibración en cada cierto lapso. La representación en diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto se puede apreciar por medio de la Ilustración 2.20.



**Ilustración 2.20: Sistema de control de lazo abierto.**

### 2.10.2. Lazo cerrado

Es un sistema de control donde la acción de control depende tanto de la señal de entrada como la respuesta de salida [70]. A diferencia del sistema de control de lazo abierto, presenta una operación más precisa, pues tiene la capacidad de operar de manera eficiente cuando existen parámetros de naturaleza variable. Además, este sistema tiene la capacidad de automatización al no requerir recalibración. Su única desventaja se muestra en la complejidad del diseño y dificultad de construcción. A través de la Ilustración 2.21, se puede observar la representación en diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado.



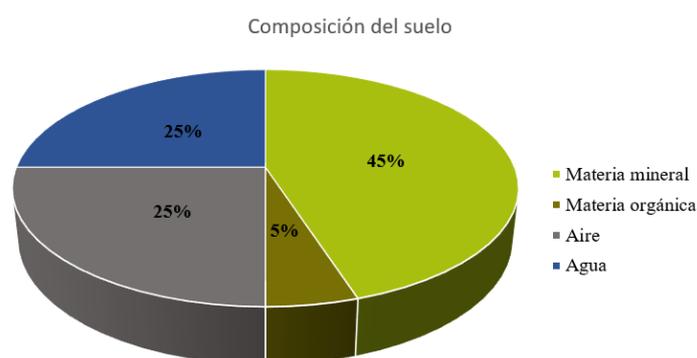
**Ilustración 2.21: Sistema de control de lazo cerrado.**

### 2.11. Suelo

El suelo es considerado como la tierra fina que cubre las superficies terrestres como resultado del desgaste de materiales rocosos o de la acumulación de materia mineral transportada por el agua, viento y hielo [71].

### 2.11.1. Composición del suelo

El suelo consiste en una mezcla de rocas erosionadas, nutrientes, organismos vivos, materia orgánica, agua y aire. Un suelo en condiciones óptimas contiene aproximadamente 45% de material sólido, 5% de materia orgánica y 50% de espacios porosos, que están ocupados por una proporción igual de agua y aire [72]. En la Ilustración 2.22, se muestra una representación gráfica de la distribución de los componentes del suelo.



*Ilustración 2.22: Componentes del suelo en proporción ideal [72].*

La formación del suelo es un proceso notablemente lento debido a que se requieren varios cientos de años para que se forme un centímetro de tierra vegetal [72]. Esta formación se produce a través de la erosión de las rocas y la deposición de sedimentos. El suelo se deriva de diferentes fuentes de material parental y se forma bajo diversas condiciones ambientales.

El tamaño, la forma y la aglomeración de las partículas del suelo determinan el volumen de aire y agua en el suelo [72]. Por ejemplo, los suelos con espacios porosos más grandes tienen más probabilidades de contener más aire y ser más permeables al agua, lo que puede influir en el tipo de cultivos que se pueden cultivar. En general, la calidad del suelo se basa en diferentes propiedades que determinan la capacidad de sustentar plantas, animales y humanos. Estas propiedades hacen del suelo una entidad compleja y duradera que es fundamental para nuestra calidad de vida.

### **2.11.2. Microclima**

El microclima es la agrupación de variables ambientales a las que están expuestas las plantas [73]. Se caracteriza principalmente por la influencia de la superficie terrestre y el resto de vegetación que se encuentra rodeando a la planta, diferenciándolo así del macroclima el cual es mencionada a menudo por pronosticadores del clima local.

La productividad de las plantas, a la larga, depende de la influencia del microclima en procesos de las plantas, como la fotosíntesis, respiración, transpiración y translocación. Para comprender cómo los procesos de las plantas responden al microclima, es necesario medir los diversos componentes del microclima en el entorno [73].

### **2.11.3. Humedad del suelo**

La humedad del suelo se define generalmente como el agua contenida en la superficie del suelo derivada de la lluvia, del deshielo o por atracción capilar del agua subterránea [74]. El contenido de humedad del suelo (SMC) se conoce como una variable de estado clave del ciclo global de la energía y materia y los procesos físicos, que resulta de importancia en los sistemas climatológicos, hidrológicos y ecológicos. El SMC también impacta directamente en los intercambios de gases en la tierra, incluido el dióxido de carbono, e influye fuertemente en la retroalimentación entre la superficie terrestre y el clima.

El agua almacenada en la tierra es una variable clave que controla numerosos procesos clave de retroalimentación y superficie terrestre dentro del sistema climático. El flujo terrestre será mayor y ocurrirá más rápidamente en suelos más húmedos y en cuencas donde las áreas de suelos saturados son más extensas [74].

### **2.11.4. Capacidad de Campo**

El concepto de Capacidad de Campo (CC) tiene un uso generalizado y es comúnmente utilizado por agrónomos, científicos del suelo, ingenieros agrícolas y otros, para referirse al contenido de agua de un suelo recientemente regado [75]. Desafortunadamente, el concepto de

CC es comúnmente malinterpretado. Normalmente, la CC para un suelo dado se trata como una constante; sin embargo, a través de los cambios de profundidad de enraizamiento a través del tiempo, se ha observado que la CC varía con el tiempo.

Veihmeyer y Hendrickson, en 1931, introdujeron el concepto de CC como la cantidad de agua que se retiene en un suelo, considerando factores previos de drenaje de exceso de agua gravitacional y descenso material de la tasa de movimiento descendente del agua [75]. Sus intenciones consistían en la definición de un límite superior del agua disponible de la planta retenida por el suelo, y proporcionar un concepto para alentar a los agricultores a no regar en exceso.

#### **2.11.5. Punto de marchitez permanente**

El nivel de agua contenido en un suelo incide hasta un punto en el que las plantas se marchitan y no se recuperan cuando se colocan en una cámara húmeda, esto se conoce como el punto de marchitez permanente (PMP) [76]. Como límite inferior, PMP, junto con el límite superior determinado por la CC, establece el tamaño del depósito de agua retenida en el suelo que puede ser extraído por las plantas. La CC es una función de las características del suelo, mientras que el PMP es el resultado de diversos factores provenientes de la planta, el suelo y la atmósfera.

#### **2.12. Sistemas de riego**

El propósito de los sistemas de riego consiste en proporcionar la cantidad de agua adecuada para las plantas, de manera que cada planta tiene diferentes necesidades de riego, según la especie, la temporada y el medio ambiente [77]. La selección de un adecuado sistema de riego permite garantizar la supervivencia de las plantas, además de un crecimiento y rendimiento óptimos.

### **2.12.1. Riego por aspersión**

El riego por aspersión, el cual se observa en la Ilustración 2.23, consiste en un sistema de rociadores que permiten aplicar tasas de agua al suelo, en relación a la tasa de infiltración. De manera general, este sistema puede emplearse para la mayoría de condiciones topográficas y tipos de suelo en donde el riego superficial resulte ineficiente y costoso [78].



*Ilustración 2.23: Riego por aspersión.*

### **2.12.2. Riego convencional por surcos**

El riego convencional por surcos, mostrado en la Ilustración 2.24, suministra agua desde un pozo de riego a través de una tubería de suministro subterránea, a la que se conecta una tubería con compuerta. El agua fluye por gravedad en la superficie a través de los surcos entre las hileras de cultivos [79].

Este sistema de riego, generalmente, requiere preparación y mano de obra adicionales para labranza [79]. Entre sus desventajas se destaca la influencia que tiene la variación del terreno sobre la distribución equitativa de agua sobre los cultivos; además, puede causar problemas ambientales, como erosión del suelo, pérdida de nutrientes de los cultivos y filtración profunda del agua.



*Ilustración 2.24: Riego convencional por surcos.*

### **2.12.3. Riego por surco de flujo de oleaje**

El sistema se desarrolló con el fin de abordar problemas asociados al riego convencional por surcos. La principal diferencia radica en la instalación de una válvula de aumento, la cual aplica agua a dos áreas de campo de manera intermitente [79], lo cual se puede visualizar en la Ilustración 2.25. Este tipo de válvula permite reducir la escorrentía y mejorar la eficiencia de distribución.

A pesar de que la válvula representa una ventaja con respecto al rendimiento, existen ciertas falencias como la posibilidad de reducir la cantidad de agua neta aplicada sobre el cultivo y el requerimiento de una mayor gestión a fin de reducir la pérdida potencial de agua [79].



*Ilustración 2.25: Riego por surco de flujo de oleaje [79].*

### **2.12.4. Riego por aspersión con pivote central**

Como se observa en la Ilustración 2.26, este sistema contiene aspersores de agua colocados a una altura determinada entre la línea principal y el nivel del suelo, de manera que el agua es aplicada por encima de las cubiertas de los cultivos [79]. Las pesas deben usarse en combinación con mangueras de caída flexibles para mejorar la distribución del agua y reducir las pérdidas.



*Ilustración 2.26: Riego por aspersión con pivote central.*

### **2.12.5. Riego por goteo**

Consiste en un sistema de riego de baja presión y bajo volumen, en el cual los tubos de goteo se colocan cerca de las raíces, de manera que la cantidad de agua se distribuye en pequeñas cantidades, manteniendo la humedad del suelo necesaria para las plantas [80].

Entre las ventajas que incluye este sistema, se menciona la eficiencia que tiene con respecto al suministro de agua de manera directa sobre el suelo a lo largo de las hileras de cultivos; además, permite el suministro de cantidades muy pequeñas de agua al día, lo que genera un ahorro de energía [80]. Su principal desventaja se centra en un alto costo primario y la adopción de técnicas avanzadas. En la Ilustración 2.27, se aprecia como el riego mencionado deja rastro de humedad sobre áreas del cultivo.



*Ilustración 2.27: Riego por goteo subterráneo.*

## **CAPÍTULO 3**

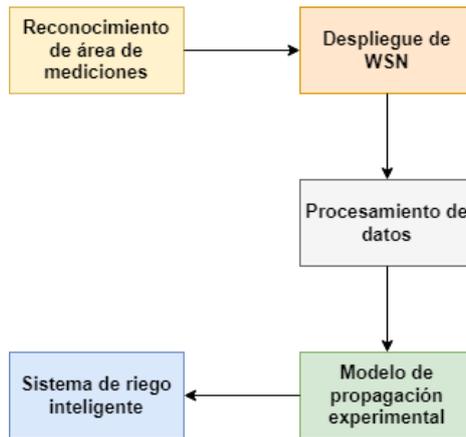
### **3. Diseño de la solución**

Dentro de este capítulo, se detalla la metodología, materiales y procedimientos empleados para la consecución de los objetivos específicos planteados. El presente trabajo es una investigación cuantitativa con hipótesis causales, que pretende medir la relación existente entre la atenuación de la potencia de una señal de RF, la distancia recorrida en su trayectoria de propagación y la atenuación en exceso por presencia de vegetación específica en un entorno real.

Además de la obtención de un modelo de propagación experimental, se realiza una prueba de concepto de riego inteligente en una parcela de cultivo, de esta manera se aplica el conocimiento obtenido durante la etapa previa del trabajo. El prototipo pretende demostrar que se puede realizar un control de riego usando una tecnología de comunicaciones de largo alcance y bajo consumo energético, basándose en el monitoreo del microclima específico del sitio de implementación.

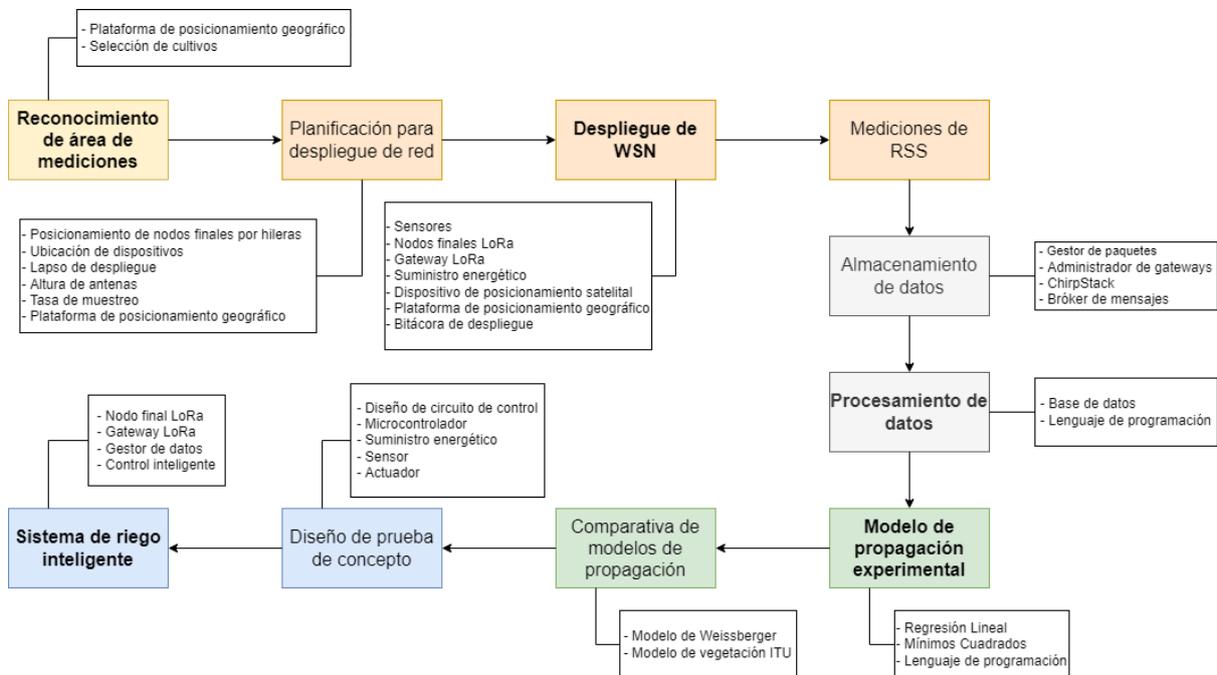
#### **3.1. Planteamiento de la solución**

La solución propuesta se ha dividido en varias etapas consecutivas, y las siguientes secciones detallan las actividades que se realizaron dentro de cada una de ellas. De manera general, la solución se organiza según el diagrama de bloques mostrado en la Ilustración 3.1. El diagrama de bloques de la Ilustración 3.2 ofrece una mirada más detallada de la solución y sirve como resumen esquemático del contenido de este capítulo.



**Ilustración 3.1: Diagrama de bloques básico de la solución.**

Dentro de las etapas del diagrama de bloques básico, se considera un reconocimiento del terreno y la zona de cultivos con el fin de establecer la ubicación de los dispositivos previo a su despliegue. Adicionalmente, se considera una etapa de procesamiento de datos, la cual incluye datos de las mediciones que realizan los dispositivos, y es utilizada para la etapa de modelo de propagación experimental. Finalmente, se diseña una prueba de concepto de un sistema de riego inteligente dentro del terreno.



**Ilustración 3.2: Diagrama de bloques detallado de la solución.**

### 3.2. Reconocimiento del área de mediciones

Las mediciones serán conducidas dentro de la Granja de Experimentación Agro-productiva (GEA) ubicada en el campus Gustavo Galindo Velasco de la ESPOL, donde se cuenta con varias plantaciones de cultivos en distintas etapas de maduración, entre ellos cacao, café, maíz y fréjol. El total del área de cultivos es aproximadamente de 8.1 ha, su distribución espacial y la ubicación de la antena del gateway se puede observar en la Ilustración 3.3.

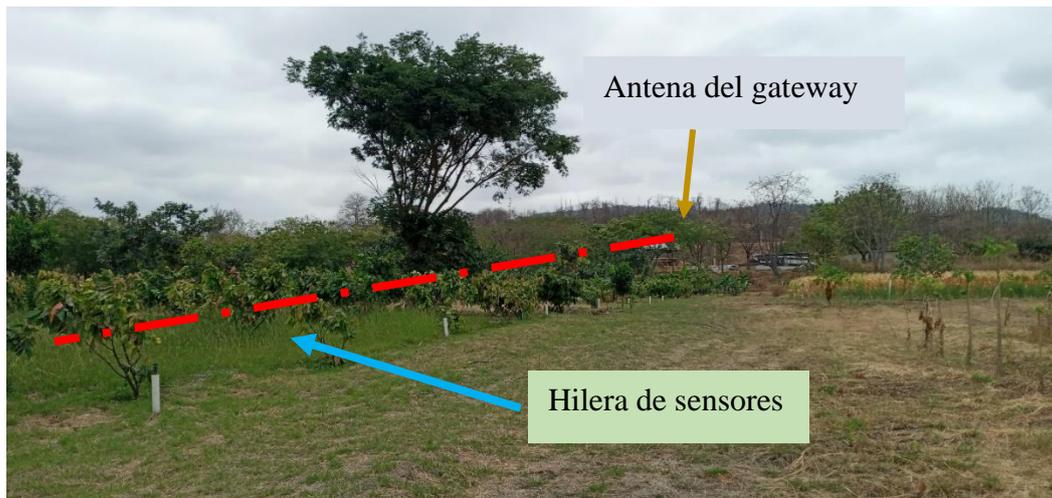


*Ilustración 3.3: Distribución espacial de los cultivos en la Granja de Experimentación Agro-productiva (GEA).*

La ubicación de la antena del gateway se encuentra en línea de vista con las plantaciones de cacao y maíz que se encuentran hacia el norte de la ubicación del gateway. De tal manera que, estos cultivos ofrecen el escenario más favorable para llevar a cabo las mediciones.

### 3.3. Planificación del despliegue y diseño del experimento

Dentro del procedimiento para la ubicación de los nodos se tomará en cuenta que se desplegarán el total de nodos sensores disponibles por parte del cliente más un gateway en topología estrella, y se pretende cubrir la mayor extensión posible para poder abarcar el área del cultivo. Inicialmente se propone realizar el despliegue de los nodos en el cultivo de cacao y en el cultivo de maíz, que tiene 0.82 y 0.66 ha sembradas respectivamente. El escenario real se puede observar en la Ilustración 3.4.



*Ilustración 3.4: Escenario del despliegue de los sensores para las mediciones.*

La planificación del despliegue se realizará considerando las siguientes condiciones:

- El despliegue de los nodos conformará una hilera que será rotada con un ángulo determinado, para barrer el área de cultivo, siendo el eje de rotación la antena del gateway.
- Se debe procurar distancias similares entre los nodos dentro de la zona de cultivo y deben permitir abarcar la mayoría del área de cultivo, considerando el posicionamiento de un mayor número de nodos en las áreas con vegetación, es decir dentro de la plantación objetivo.
- En las áreas de espacio libre, al no existir mayor obstrucción o vegetación, no se requiere una gran concentración de nodos.
- Se hará recopilación de mediciones en condiciones de línea de vista sin obstrucción LoS para obtener mediciones de RSS referenciales.
- Se hará recopilación de mediciones con línea de vista con obstrucción nLoS para modelar el comportamiento de la señal recibida RSS en un ambiente con cultivo de cacao y de maíz al aire libre.

- Se debe considerar un tiempo mínimo de 1 día para tomar datos continuamente en cada hilera de sensores. La toma de datos se realiza cada 5 minutos, lo que equivale a más 250 muestras por día por sensor.
- Se tomará mediciones a un metro de distancia del gateway, para obtener la potencia a un metro de distancia  $P_0$ .
- La altura de la antena de los sensores será de un metro con respecto a la superficie del terreno. Esto, debido a la restricción física que impone la longitud del cable de los sensores tipo sonda, que no es recomendable alterar a fin no introducir distorsiones en las señales digitales.
- La altura de la antena del gateway se fijará en el punto más alto donde sea factible su instalación. En el caso de la granja este valor es de 8m.
- Las transmisiones de los nodos se realizarán cada cinco (5) minutos, más un valor aleatorio de +/- 3 segundos para evitar colisiones en el gateway.

### 3.3.1. Planificación para despliegue en la plantación de maíz

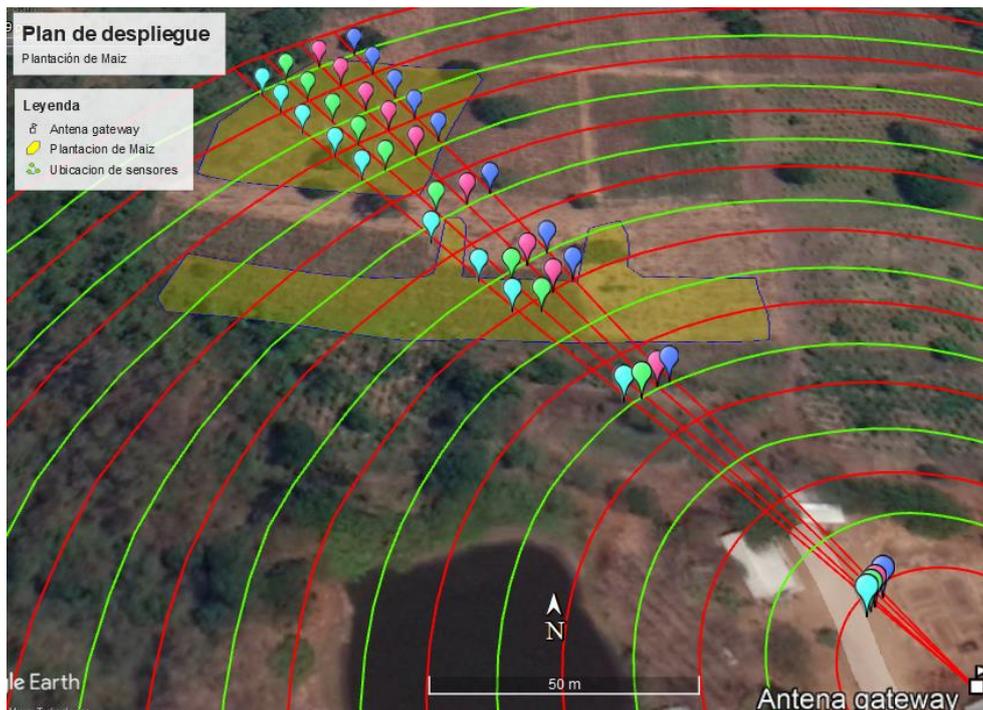


Ilustración 3.5: Plan de despliegue para ubicación de los sensores en la plantación de maíz.

En la Ilustración 3.5 se puede observar la planificación realizada, para obtener las mediciones correspondientes a la plantación de maíz, la cual se encuentra representada por las áreas de color amarillo. Las ubicaciones de los nodos sensores se agrupan bajo diferentes colores para identificar como se seccionará las mediciones en cuanto al tiempo de medición, tal como se detalla en la Tabla 3.1.

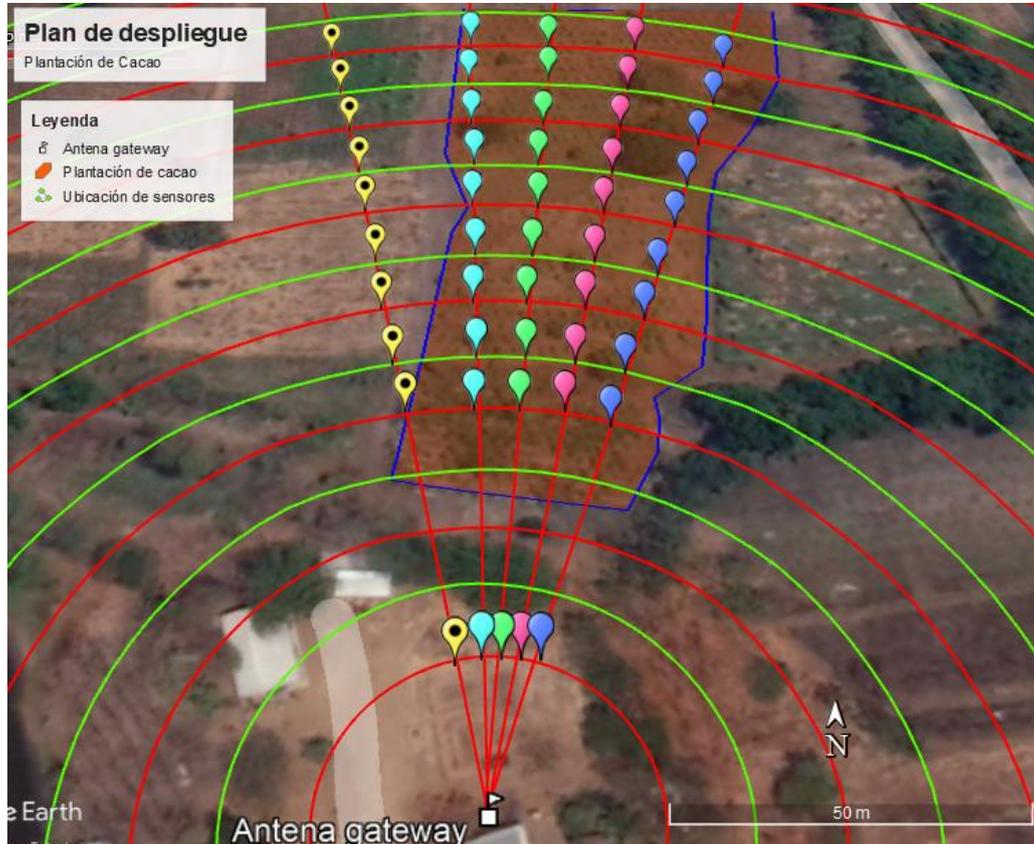
Tabla 3.1: Tiempo de las mediciones en el Maíz

Hileras	Dirección (N : 000°)	periodo
hileras A 	320°	1
hileras B 	322°	2
hileras C 	324°	3
hileras D 	327°	4

Las mediciones se tomarán de manera diaria y se obtendrán datos de una hilera en cada período de toma de datos. Una vez finalizada la recolección de datos en una hilera, se deben reubicar los dispositivos en las nuevas posiciones, en este sentido es importante llevar el registro de la ubicación de los dispositivos en la bitácora creada para este propósito, de tal

manera que las muestras que se produzcan en el período de transición no sean tomadas en cuenta para el análisis de resultados.

### 3.3.2. Planificación del despliegue en la plantación de cacao



*Ilustración 3.6: Plan de despliegue para ubicación de los sensores en la plantación de cacao.*

En la Ilustración 3.6 se puede observar la planificación del despliegue de sensores para obtener las mediciones correspondientes a la plantación de cacao, la cual se encuentra representada por el área de color naranja. Al igual que en la planificación del maíz, las ubicaciones de los nodos sensores se agrupan en distintos colores para identificar como se seccionará las mediciones en cuanto al tiempo de medición, tal como se detalla en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2: Tiempo de las mediciones en el Cacao**

Hileras		Dirección (N : 000°)	período
hilera A		357°	1
hilera B		002°	2
hilera C		008°	3
hilera D		015°	4
hilera L		347°	5

De esta manera, se puede cubrir un máximo de cuatro hileras por semana. Considerando que además se debe tomar mediciones en una hilera con condiciones de línea de vista (hilera con nodos color amarillo de la Ilustración 3.6), el tiempo total para obtener los datos es de tres semanas. Para ubicar los sensores en las posiciones mostradas se usará un dispositivo de posicionamiento satelital y se navegará a las coordenadas indicadas mostradas en Google Earth Pro.

### 3.3.3. Densidad de vegetación

A fin de contar con una medida de la densidad de vegetación en los cultivos de maíz y cacao, se estimó un valor a partir de un muestreo de la cantidad de plantas por área de cultivo según se muestra en la Ilustración 3.7. En la Tabla 3.3 se detalla los valores registrados para cada muestra y el valor estimado de densidad de vegetación para el maíz y el cacao.



**Ilustración 3.7: Muestras tomadas para estimar la densidad de vegetación en los cultivos**

**Tabla 3.3: Estimación de la densidad de vegetación**

Maíz			Cacao		
	Área (m <sup>2</sup> )	#Plantas		Área (m <sup>2</sup> )	#Plantas
<b>Muestra A</b>	55.7	192	<b>Muestra A</b>	67.8	13
<b>Muestra B</b>	98.4	294	<b>Muestra B</b>	78.7	11
<b>Muestra C</b>	60	210	<b>Muestra C</b>	69	10
<b>Total</b>	214.1	696		215.5	34
<b>Densidad de vegetación (#Plantas/ m<sup>2</sup>)</b>	3.251		<b>Densidad de vegetación (#Plantas/ m<sup>2</sup>)</b>	0.158	

#### 3.3.4. Hipótesis

Dentro del área de estudio se considera la densidad de vegetación dada en los diferentes cultivos distribuidos a lo largo del terreno en los cuales se dan casos de LoS y nLoS. Se definen como variables independientes: a) la distancia de propagación LoS; b) la distancia de obstrucción nLoS por vegetación; y como variable dependiente el gradiente distancia-potencia recibida. En base a lo antes mencionado se plantean las siguientes hipótesis:

**H0:** La distancia de obstrucción nLoS por vegetación no produce un mayor valor absoluto del gradiente distancia-potencia recibida en comparación con la distancia de propagación LoS.

**H1:** La distancia de obstrucción nLoS por vegetación produce un mayor valor absoluto del gradiente distancia-potencia recibida en comparación con la distancia de propagación LoS.

**H2:** El valor absoluto del gradiente distancia-potencia recibida es mayor en el cultivo de maíz que en el cultivo de cacao.

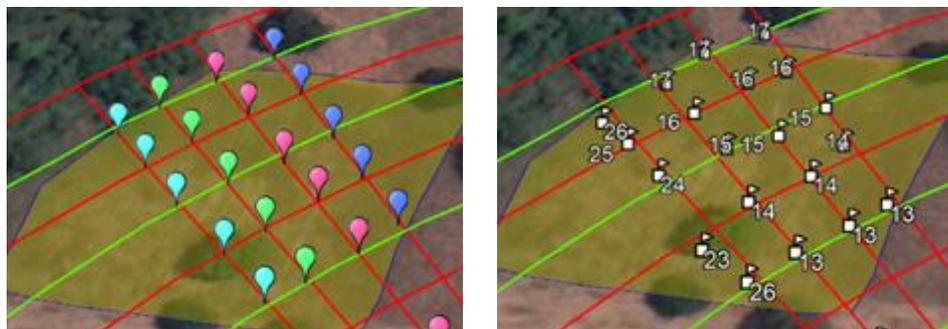
### 3.4. Despliegue de WSN

#### 3.4.1. Despliegue de gateway

El dispositivo gateway LoRa fue ubicado en una casa de dos pisos ubicada dentro de la granja, lo cual le permite contar con un suministro eléctrico además de ubicarse a una altura de 8m. Para poder alimentar la base de datos que se alberga en el Raspberry Pi 3, se dispone de una conexión Ethernet con el gateway; mientras que un router inalámbrico Wi-Fi permite el acceso a la base de datos para dispositivos en la red local.

#### 3.4.2. Despliegue de nodos finales en cultivos

Se realizó una planificación del despliegue de los sensores usando la herramienta Google Earth Pro, dentro de la cual, se registraron las posiciones de interés y posteriormente se utilizó esta información para navegar a los puntos planificados usando un Garmin GPSMAP 64S. Se guardó la ubicación real de los puntos de medición mediante archivos .gpx que genera el equipo de geoposicionamiento satelital, tal como se observa en la Ilustración 3.8.



*Ilustración 3.8: a) Planificación del despliegue b) Despliegue real de los sensores.*

La colocación de los nodos de medición, se efectuó tanto en áreas de cultivo como en áreas de línea de vista. Se utilizaron varillas de aproximadamente 1,50m que se insertaron a presión en el suelo para brindar soporte a los dispositivos, que se aseguraron a 1m de altura. Se puede visualizar un nodo desplegado en la zona de mediciones en la Ilustración 3.9 a) y b).



*Ilustración 3.9: a) Despliegue de nodo en maíz b) Despliegue de nodo en cacao.*

La colocación de los dispositivos se realizó de manera manual, usando amarras de plástico para sujetar los dispositivos a las varillas de soporte, y verificando que la orientación del dispositivo sea en dirección hacia la antena del gateway. La Ilustración 3.10 evidencia el trabajo de campo realizado y además registra el estado de maduración del maíz durante las mediciones realizadas. Se registró una altura promedio de 1.80m en las plantas de cacao y de 2.00m en las plantas de maíz. El maíz se encontraba en el tercer mes de su ciclo de cosecha.



*Ilustración 3.10: Colocación de dispositivos.*

### **3.4.3. Bitácora de despliegue de nodos**

Se procedió a abrir una bitácora de registros, con el propósito de registrar las distancias de los puntos de medición con respecto al gateway, y para tener un registro del tiempo que estuvieron midiendo los dispositivos en las diferentes posiciones planificadas. En la Tabla 3.4, se observa un fragmento de la bitácora, donde se muestran las coordenadas de las ubicaciones planificadas para los sensores que ejecutan las mediciones.

**Tabla 3.4: Sección de la bitácora con coordenadas planificadas**

		Estándar UTM		
		Zona	Hemisferio	
		17	S	
Hilera	Id	Este (UTMX)	Norte (UTMY)	Distancia por UTM
A	MA12	615224,10	9763557,10	236,3041
	MA11	615229,90	9763550,10	227,2142
	MA10	615237,00	9763541,10	215,7592
	MA09	615246,90	9763527,30	198,8420
	MA08	615254,90	9763519,90	188,0136
	MA07	615274,10	9763496,00	157,3748
	MA06	615286,10	9763483,10	139,7684
	MA05	615294,10	9763472,90	126,8198
	MA04	615344,50	9763415,80	50,6654
	MA03	615317,90	9763441,30	87,3964
	MA02	615359,90	9763392,10	22,8974
	MA01	615368,80	9763386,60	12,6811

De igual manera, fue necesario llevar un control de los dispositivos empleados, a fin de contar con su respectiva identificación al momento de realizar el procesamiento de la base de datos de mediciones. Como se puede ver en la Tabla 3.5, se llevó un registro diario de las posiciones en las que se dejaron los sensores, de tal manera que exista información detallada sobre las mediciones que se realizaron.

**Tabla 3.5: Sección de la bitácora de registros diarios.**

			Recolección	
Hilera	Id	Device Id	Inicio	Fin
A	MA12	cc17	08/11/2021-11h00	09/11/2021-11h00
	MA11	cc16		
	MA10	cc15		
	MA09	cc14		
	MA08	cc13		
	MA07	cc12		
	MA06	cc11	09/11/2021-13h30	10/11/2021-11h00
	MA05	cc17		
	MA04	cc15		
	MA03	cc13		
	MA02	cc12		
	MA01	cc11		

### 3.5. Mediciones de RSS

Las mediciones de RSS se obtienen por medio de una línea de código que se encuentra dentro de la librería de LoRa. La línea de código, mostrada en la Ilustración 3.11, retorna el valor promedio de RSS en dBm del último paquete LoRa recibido por el gateway por parte de cada uno de los nodos finales dentro de la red.

```
rssi_lorax = LoRa.packetRssi();
```

Ilustración 3.11: Código para obtener medición de RSS en LoRa.

### 3.6. Almacenamiento de datos

Con el fin administrar la red dispositivos y gestionar las lecturas de RSS a través de una base de datos, se utilizó una arquitectura, mostrada en la Ilustración 3.12, que se compone de la gestión de tramas enviadas y recibidas por el gateway; un servidor MQTT y un bróker de mensajes correspondiente a Home Assistant (HA), siendo este último aplicativo, el creador de los archivos de extensión *.db* donde se guarda la información de todos los dispositivos desplegados para hacer las mediciones de RSS. En las siguientes subsecciones se añade más detalles sobre cómo opera el software y hardware empleado para almacenar los datos de RSS.

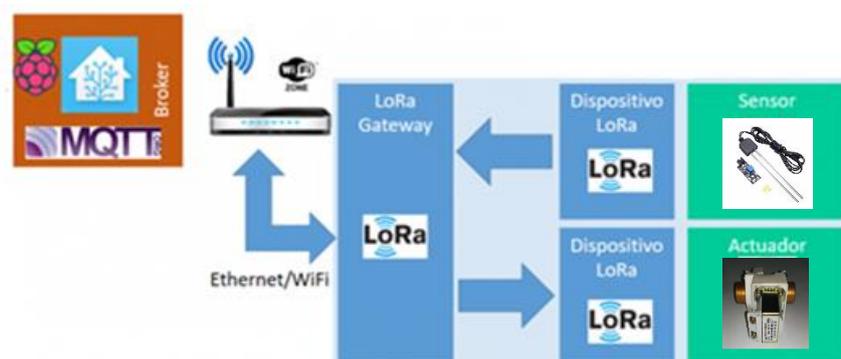
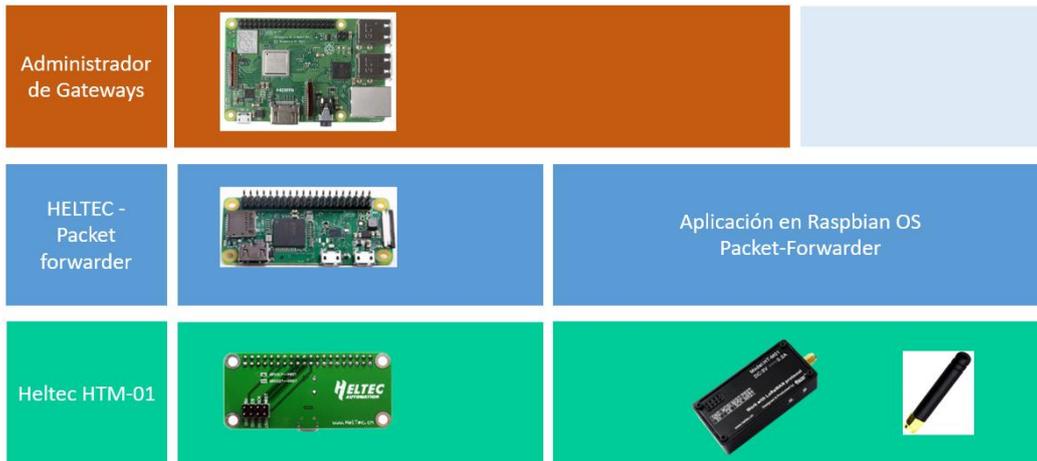


Ilustración 3.12: Arquitectura para almacenamiento de datos. Adaptado de [5].

#### 3.6.1. Packet-Forwarder

Para el almacenamiento de datos, se considera que el gateway LoRa cuenta con un gestor de paquetes denominado Packet-Forwarder, lo que le permite el reenvío de paquetes hacia un administrador de gateways.

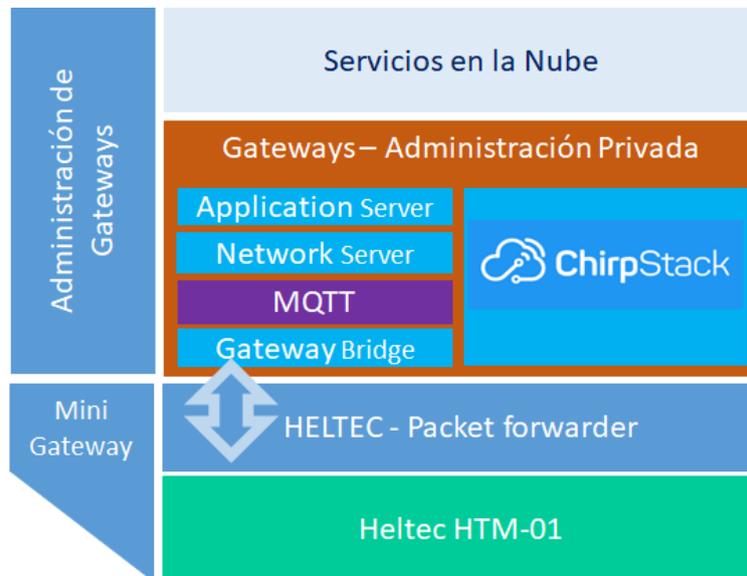


**Ilustración 3.13: Arquitectura de gestión de paquetes LoRa. Adaptado de [5].**

De esta manera, los datos que recibe el gateway se reenvían por medio de SPI hacia la red local utilizando la aplicación Packet-Forwarder, como se visualiza en la Ilustración 3.13, disponible en el sistema operativo de Raspberry Pi.

### 3.6.2. Administración de gateways

Para la administración de gateways el cliente dispone de ChirpStack, el cual permite integrar la gestión de paquetes y un gestor de mensajes MQTT, simplificando la integración de conexiones con un bróker de mensajería.



**Ilustración 3.14: Arquitectura de gestión de paquetes y administrador de gateways. Adaptado de [5].**

Como parte de ChirpStack, se instalan y configuran sus respectivos componentes, que se pueden apreciar en la Ilustración 3.14, por medio del sistema operativo de Raspberry Pi,

componentes los cuales cumplen con funciones específicas dentro de la administración de gateways.

Inicialmente, se tiene el gateway bridge, el cual se encarga de convertir los datos provenientes de Packet Forwarder a un formato de datos de ChirpStack. De los formatos disponibles se selecciona el formato *json*, como se observa en la Ilustración 3.15. A continuación, el MQTT – Mosquitto, como protocolo de red entre los dispositivos y el bróker de mensajes.



```
pi@GWHTM01:~$ mosquitto_sub -v -h 192.168.10.52 -p 1883 -t '#'
gateway/3532363324003700/event/up {"phyPayload":"gHkkAiaAWgACva3e9S78Hns=", "txInfo":{"frequency":902900000, "modulation":
"LORA", "loramodulationInfo":{"bandwidth":125, "spreadingFactor":10, "codeRate":4/5, "polarizationInversion":false}}, "rxIn
fo":{"gatewayID":"NTI2MyQANwA=", "time":null, "timeSinceGPSEPOCH":null, "rssi":-22, "loRaSNR":8, "channel":3, "rfChain":0, "bo
ard":0, "antenna":0, "location":null, "fineTimestampType":"NONE", "context":"haz0RA==", "uplinkID":"Lru9PEgrSeCoqxQyOepDAA==
", "crcStatus":"CRC_OK"}}
gateway/3532363324003700/event/up {"phyPayload":"gHkkAiaAWgACva3e9S78Hns=", "txInfo":{"frequency":902700000, "modulation":
"LORA", "loramodulationInfo":{"bandwidth":125, "spreadingFactor":10, "codeRate":4/5, "polarizationInversion":false}}, "rxIn
fo":{"gatewayID":"NTI2MyQANwA=", "time":null, "timeSinceGPSEPOCH":null, "rssi":-25, "loRaSNR":6.2, "channel":2, "rfChain":0, "bo
ard":0, "antenna":0, "location":null, "fineTimestampType":"NONE", "context":"hf1DPA==", "uplinkID":"rK1yeKnNSg+iCPNjE4yRGQ==
", "crcStatus":"CRC_OK"}}
gateway/3532363324003700/event/up {"phyPayload":"gHkkAiaAWgACva3e9S78Hns=", "txInfo":{"frequency":903100000, "modulation":
"LORA", "loramodulationInfo":{"bandwidth":125, "spreadingFactor":10, "codeRate":4/5, "polarizationInversion":false}}, "rxIn
fo":{"gatewayID":"NTI2MyQANwA=", "time":null, "timeSinceGPSEPOCH":null, "rssi":-27, "loRaSNR":6.5, "channel":4, "rfChain":1, "bo
ard":0, "antenna":0, "location":null, "fineTimestampType":"NONE", "context":"hkwSNA==", "uplinkID":"kSqAK6rxSKzgl7J/1fnUMQ==
", "crcStatus":"CRC_OK"}}
gateway/3532363324003700/event/stats {"gatewayID":"NTI2MyQANwA=", "ip":"192.168.10.52", "time":"2020-09-06T17:22:20Z", "loc
ation":null, "configVersion":"","rxPacketsReceived":11, "rxPacketsReceivedOK":6, "txPacketsReceived":0, "txPacketsEmitted":0
, "metaData":{}}, "statsID":"nfAeH1vKtM6cGdvQnuHGHw=="}
```

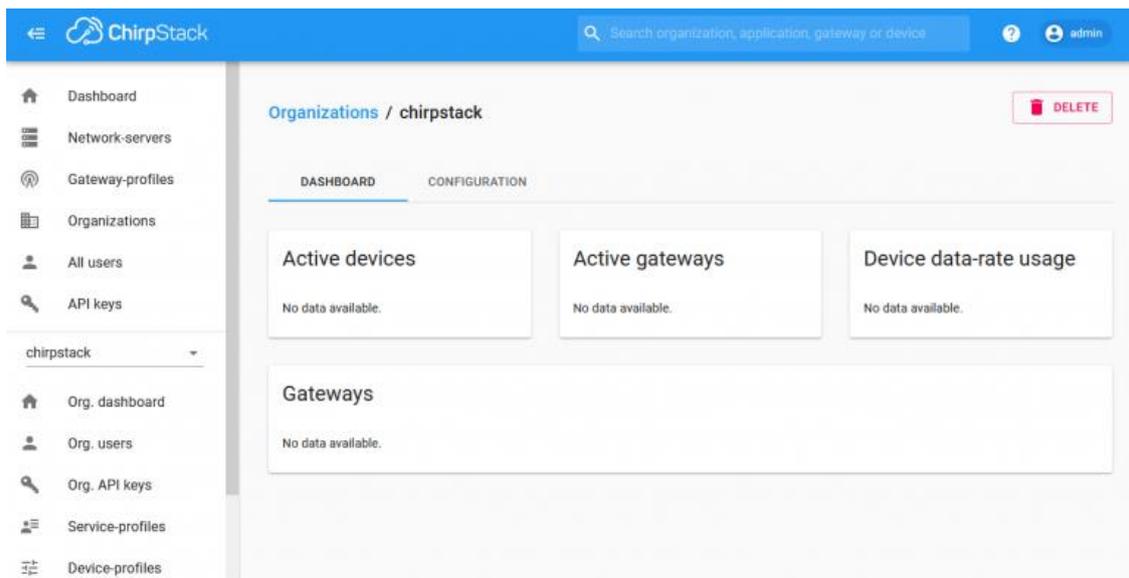
Ilustración 3.15: Formato *.json* en un mensaje MQTT.

Seguidamente, se requiere de un servidor de red el cual permita la revisión de mensajes duplicados, autenticación y gestión de colas de mensajes de envío hacia dispositivos. Para el manejo de los mensajes se requiere de una base de datos, por lo que se considera la instalación de PostgreSQL y además de Redis, esta última utilizada para el almacenamiento de datos de cada sesión, datos no persistentes, de duplicación y meta-data.

Finalmente, para administrar el inventario de dispositivos, solicitudes nuevas de conexión, encriptación y datos de aplicación, es necesario un servidor de aplicación. Este servidor requiere de una base de datos en PostgreSQL.

### 3.6.3. Interfaz de ChirpStack

La instalación y configuración de Packet Forwarder y el administrador de gateways habilita el uso de una página web la cual permite la gestión de los dispositivos dentro de la red, como se muestra en la Ilustración 3.16.



**Ilustración 3.16: Interfaz de ChirpStack.**

En este apartado se incluyen diversas funciones y configuraciones necesarias para el envío de las mediciones que registra el gateway hacia el bróker de mensajes:

- Creación de organización
- Servidor de red
- Perfil de gateway
- Perfil de servicio
- Añadir gateway
- Perfil de servicio de aplicación
- Perfil de dispositivo
- Aplicaciones
- Añadir dispositivo a aplicación

#### **3.6.4. Bróker de mensajes – Home Assistant (HA)**

Se utiliza como bróker de mensajes la aplicación HA, ya que permite un acceso y control de dispositivos más simplificado.

Para que HA registre los datos que transmite un dispositivo, se debe realizar una suscripción a los mensajes MQTT de Mosquitto, que corresponden a las tramas de LoRaWAN.

De esta manera, por medio de un archivo de configuración, como se observa en la Ilustración 3.17, se añaden las características del dispositivo y el mensaje MQTT al que HA debe suscribirse.

```
sensor:
  - platform: mqtt
    name: 'Dispositivo_LRW01_rssi'
    unit_of_measurement: 'dBm'
    state_topic: 'application/1/device/c9c2a03913ac'
    value_template: '{{ value_json.rxInfo[0].rssi }}'
    json_attributes_topic: 'application/1/device/c9
```

**Ilustración 3.17: Extracto de configuración con características de dispositivo y mensaje MQTT.**

Por último, se reinicia la aplicación de HA para visualizar el dispositivo, tal como se aprecia en Ilustración 3.18.



**Ilustración 3.18: Visualización de dispositivo configurado en HA.**

### 3.7. Procesamiento de datos

Las mediciones de RSS se almacenaron en archivos *.db*, que registran las lecturas de todos los dispositivos en la topología de estrella implementada. Para obtener la base de datos, se debe acceder a la red local en la que se encuentra un Raspberry Pi3 que actúa como gestor de base de datos. Este proceso se realizó asistiendo a la granja y accediendo remotamente vía Secure Shell (SSH) al sistema operativo del Raspberry.

A continuación, en la Ilustración 3.19, se puede observar un recorte de la interfaz del programa usado para leer los archivos de la base de datos. Por otra parte, en la Ilustración 3.20, se muestra la función de exportar el archivo de base de datos a un archivo *.json*.

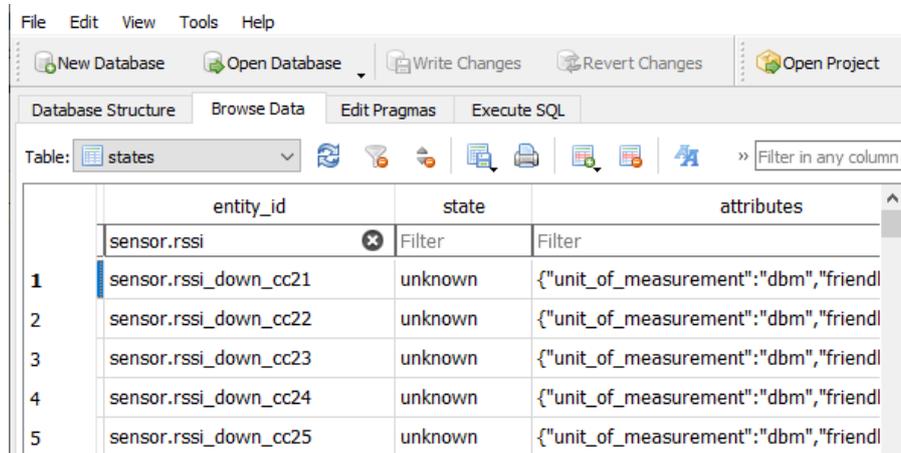


Ilustración 3.19: Programa DB Browser mostrando una sección de la base de datos de RSS.

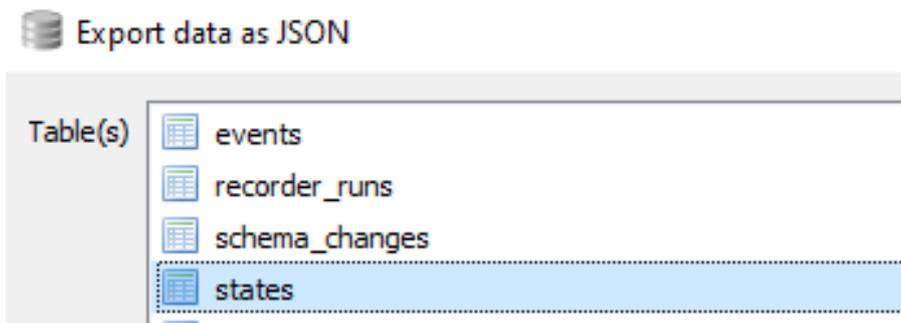


Ilustración 3.20: Función de exportar archivo *.db* a *.json*.

Una vez que se convirtieron las bases de datos descargadas de HA a formato *.json*, se procedió al análisis de datos, usando como herramienta a Python. En la siguiente sección, se detalla el funcionamiento del programa ejecutado para analizar los datos de RSS de las mediciones.

### 3.8. Modelo de propagación experimental

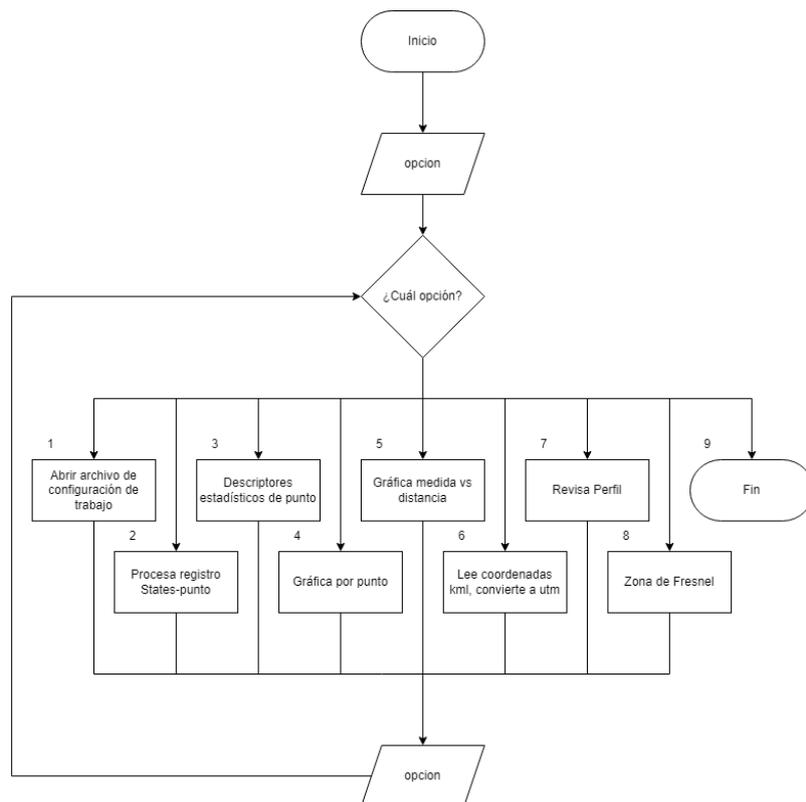
Para obtener el modelo de propagación en base a las mediciones, se realizó un análisis de los datos obtenidos. Esto implicó la ejecución de un algoritmo que fue implementado en

Python y cuyo código fue desarrollado por el GIRNI, sin embargo, se adaptó parte del mismo para las actividades de este trabajo.

El programa tiene el objetivo de obtener valores de potencia promedio en cada posición de medición y aplicar regresión lineal a estos valores promedio para obtener una recta que modele el gradiente distancia-potencia. Se escogió Python como herramienta, por ser un lenguaje de programación libre y gratuito, además de contar con librerías científicas que permiten el análisis de datos y obtención de parámetros estadísticos descriptivos.

### 3.8.1. Diagrama de flujo del algoritmo usado para el análisis de datos

Para el análisis de datos se utilizó un algoritmo el cual cuenta con diversos subprocesos distribuidos a través de un menú de opciones disponible durante la ejecución del programa. En la Ilustración 3.21, se presenta un diagrama de flujo general del programa.



**Ilustración 3.21: Diagrama de flujo del algoritmo implementado en Python.**

En las siguientes secciones se detalla cada una de las opciones disponibles dentro del algoritmo utilizado en Python. Cada una de estas opciones cumplen una función importante

que permiten un adecuado análisis y procesamiento de los datos medidos en los dispositivos desplegados.

### 3.8.2. Abrir archivo de configuración de trabajo

Inicialmente, la primera opción permite realizar una lectura del directorio del proyecto en cuestión, de tal manera que se enlistan los archivos de configuración disponibles. Dentro de este apartado, el programa muestra el listado al usuario, para la respectiva selección del archivo de configuración con el que desea analizar la información. En la Ilustración 3.22, se muestra el contenido de uno de los archivos de configuración que se encuentran en el directorio.

```
{
  "unarchivo" : "states20211110_09h55.json",
  "carpeta_DB" : "BaseDatosJSON",
  "fechainicio" : "2021-11-09 18:30:00.0",
  "fechafin" : "2021-11-10 15:00:00.0",
  "medida" : "rssi",
  "carpeta_rsm" : "resultado_cMA_s2",
  "lecturas" : {
    "sensor.rssi_up_cc11": "cMA01a",
    "sensor.rssi_up_cc12": "cMA01",
    "sensor.rssi_up_cc13": "cMA01b",
    "sensor.rssi_up_cc14": "cMA02",
    "sensor.rssi_up_cc17": "cMA03"},
  "dist_Gtw" : {
    "Ref01": 1.00,
    "Ref13": 25.00,
    "MA01a": 10.60,
    "MA01": 25.00,
    "MA01b": 45.00,
    "MA02": 86.00,
    "MA03": 126.00,
    "MA04": 139.00,
    "MA05": 156.00,
    "MA06": 188.00,
    "MA07": 200.00,
    "MA08": 215.00,
    "MA09": 225.00,
    "MA10": 235.00},
  "precision" : 2,
  "gatewayDB" : {
    "uCfr//5zvhk": "Gw01",
    "uCfr//4dylc": "Gw03"},
  "archivokml" : "Granja2021_MA.kml",
  "carp_coord" : "coordenadas",
  "zonaNum" : 17,
  "zonaLetra" : "M",
  "alturaGw" : 8,
  "alturapunto" : 1,
  "planta_desde" : 90.0,
  "planta_hasta" : 250.0,
  "planta_altura" : 1.50,
  "nFres" : 1,
  "freq" : 915,
  "muestras" : 41
}
```

**Ilustración 3.22: Contenido de archivo de configuración.**

Con el contenido de los archivos de configuraciones, se generaron distintas variables, como se observa en la Ilustración 3.23, las cuales se utilizaron en las otras opciones disponibles dentro del algoritmo.

```

# carga variables desde archivo_config
if archivo_config in disponibles:
    with open(archivo_config) as archivo:
        texto = archivo.read()
        variables = json.loads(texto)
        globals().update(variables)

```

*Ilustración 3.23: Obtención de variables a partir de archivo de configuración.*

### 3.8.3. Procesa registros States-punto

Para la segunda opción, por medio de las bases de datos en formato .json y las fechas de despliegue de los nodos finales, se realizó el procesamiento de cada registro que tuvieron respectivamente los nodos y se elaboró un reporte para cada uno. Como se muestra en la Ilustración 3.24, los reportes generados se almacenan en formato .json dentro del directorio, debido a que fue utilizado en otras opciones dentro del programa.

```

for unsensor in lecturas:
    codigopunto = lecturas[unsensor]
    tablareporte = girni.tablapunto(archivo_ruta,
                                    fechainicio, fechafin,
                                    unsensor, gatewayDB)
    # guarda el reporte en json
    unresultado = carpeta_rsm+'data_'+codigopunto+'.json'
    tablareporte.to_json(unresultado)
    print('Procesado: ', unsensor)

```

*Ilustración 3.24: Proceso de registros por cada punto desplegado.*

### 3.8.4. Descriptores estadísticos de punto

En la tercera opción, se hizo uso de los reportes generados previamente, de tal manera que, por medio de la lectura de cada uno de los reportes, se obtuvieron resúmenes estadísticos descriptivos y un reporte de la función de masa de probabilidad (PMF). Por medio de la Ilustración 3.25, se muestra parte del código utilizado para la obtención de los archivos generados en esta opción del programa.

```

# describe estadísticos de medida
yi_etiqueta = []
descriptor = pd.DataFrame()
errado = []
for etiqueta in tabula.keys():
    if (medida in etiqueta):
        valores = tabula[etiqueta]
        todos = len(valores)
        valores_ok = valores[valores<0]
        valores_ok = valores_ok[valores_ok>(-250)]
        paquete_error = (todos-len(valores_ok))/todos

        descriptor[etiqueta] = valores_ok.describe()
        errado.append(paquete_error)
        yi_etiqueta.append(etiqueta)
descriptor.loc['paquete_errado'] = errado

pmf = {}
for etiqueta in tabula.keys():
    if (medida in etiqueta):
        valores = tabula[etiqueta]
        valores_ok = valores[valores<0]
        valores_ok = valores_ok[valores_ok>(-250)]
        undescriptor = descriptor[etiqueta]
        unapmf = medida_pmf(valores_ok,undescriptor)
        pmf[etiqueta] = unapmf

```

**Ilustración 3.25: Generación de resumen estadístico y reporte PMF.**

Además, se generó un reporte tabulado en .json y .csv los cuales cuentan con información de número de trama, fecha, hora, RSS de subida y RSS de bajada. Estos reportes generados, se aprovecharon dentro del algoritmo de otras opciones en el programa.

### 3.8.5. Gráfica por punto

Seguidamente, la cuarta opción permitió generar una imagen .png la cual contiene las gráficas de dispersión en la trama y PMF, tanto en el canal de subida como en el canal de bajada. Esta opción utilizó el resumen estadístico, el reporte tabulado en .json y el reporte de la PMF para generar las respectivas gráficas. Parte del código utilizado en esta sección se puede visualizar en la Ilustración 3.26.

```

for unenlace in enlace:
    valores = tabulado[unenlace]
    valores_ok = valores[valores<0]
    valores_ok = valores_ok[valores_ok>(-250)]

    yi = tabulado[unenlace]
    yi_mean = np.round(descriptor[unenlace]['mean'],precision)
    yi_std = np.round(descriptor[unenlace]['std'],precision)
    yi_etiq = unenlace+' '+str(yi_mean)+' +/- '+str(yi_std)

    paquete_error = np.round(descriptor[unenlace]['paquete_errado'],precision)
    if paquete_error>0:
        yi_etiq = yi_etiq +' | error:'+str(paquete_error)

    posicion = pmf[unenlace]['posicion']
    conteo = pmf[unenlace]['probabilidad']

```

*Ilustración 3.26: Generación de gráficas de dispersión de trama y PMF.*

### 3.8.6. Gráfica medida vs distancia

Dentro de la quinta opción, se tomaron los resúmenes estadísticos de cada punto para extraer los valores promedio de RSS y la desviación estándar para el canal de subida y bajada. Luego, previo al proceso de regresión lineal por mínimos cuadrados, se convirtieron las distancias de cada punto hasta el gateway a un formato logarítmico en base 10, tal como se muestra en la Ilustración 3.27.

```

di = puntograf['dist_Gtw']

# enlace_up
media_up = puntograf[medida+'_up']
std_up = puntograf[medida+'_up'+'_std']
media_up_techo = media_up + std_up
media_up_piso = media_up - std_up

# enlace_down
media_down = puntograf[medida+'_down']
std_down = puntograf[medida+'_down'+'_std']
media_down_techo = media_down + std_down
media_down_piso = media_down - std_down

# Eje x en log10()
xi = np.array(di)
xillog = np.log10(xi)
n = len(xillog)
yi_up = np.array(media_up)

```

*Ilustración 3.27: Valores promedio de RSS, desviación estándar y distancias logarítmicas.*

Una vez realizado esto, se procedió con la obtención de los mínimos cuadrados por medio de la sección de código que se muestra a continuación en la Ilustración 3.28. La

obtención de mínimos cuadrados utiliza un arreglo conformado por las distancias logarítmicas y un arreglo de *unos* de igual dimensión que el arreglo de distancias.

```
# mínimos cuadrados (least square),
# distancia vs medida
A = np.vstack([xilog, np.ones(n)]).T
[m0, b0] = np.linalg.lstsq(A, yi, rcond=None)[0]
alpha = -m0/10
beta = b0
```

**Ilustración 3.28: Obtención de mínimos cuadrados.**

Los mínimos cuadrados obtenidos, se representan por valores de  $\alpha$  y  $\beta$ , los cuales, de acuerdo con el modelo de gradiente distancia-potencia expresados en (17), representan el coeficiente de atenuación y la potencia promedio recibida a la distancia de referencia. En la Ilustración 3.29,

```
fetxt0 = r'$ rssi = -10(' + str(np.round(alpha,digitos))
fetxt0 = fetxt0 + ')log_{10}(d)' # +('
texto = '+'
if beta <0:
    texto = '-'
fetxt0 = fetxt0 + texto + str(np.round(np.abs(beta),digitos))+ '$'
```

**Ilustración 3.29: Gradiente distancia-potencia.**

### 3.8.7. Lee coordenadas kml, convierte a utm

En esta opción, se obtuvo la conversión de las coordenadas de grados decimales a coordenadas UTM, por medio de la lectura de longitud, latitud en un archivo *.kml* en donde se encuentran las coordenadas de los nodos desplegados. El código para la conversión a coordenadas UTM se puede apreciar por medio de la Ilustración 3.30.

```
#en UTM
coord_utm = utm.from_latlon(latitud,longitud,
                             zonaNum,zonaLetra)
utm_este = np.round(coord_utm[0],precision)
utm_norte = np.round(coord_utm[1],precision)
```

**Ilustración 3.30: Conversión a coordenadas UTM.**

Además, a través de la lectura de altura en el archivo *.kml*, se obtuvo la distancia de los nodos desplegados hacia el gateway, tal como se muestra en la Ilustración 3.31.

```

# distancias a Gateways
dist = 0.0
if punto_nombre.startswith('Gw'):
    n_Gtw = punto_nombre
    x1 = utm_este
    y1 = utm_norte
else:
    x2 = utm_este
    y2 = utm_norte
    dist = np.sqrt((x2-x1)**2 + (y2-y1)**2)
dist = np.round(dist,precision)

```

*Ilustración 3.31: Cálculo de distancias por UTM.*

Esta opción permite almacenar un reporte .csv de las respectivas coordenadas y distancias hacia el gateway de cada punto desplegado.

### **3.8.8. Revisa Perfil**

Para la revisión del perfil, se utilizaron las distancias donde inicializa y finaliza la vegetación desde el gateway para representar de manera gráfica la presencia de vegetación dentro del perfil.

Inicialmente, se generó una plantilla para ubicar el perfil, donde se consideraron los puntos desplegados, incluyendo al gateway. Luego, para ubicar los puntos se consideró la distancia que tiene cada dispositivo desde el gateway y la altura a la que se ubicaron. Finalmente, se añadió una representación gráfica de las antenas entre cada punto y el gateway. Este proceso se puede visualizar por medio de la Ilustración 3.32.

```

# plantacion
plt.fill_between(xi[conplantas],
                 yi[conplantas],
                 plantacion,
                 color='lightgreen')

# perfil
xi = puntos['dist_'+n_Gtw]
yi = puntos['altitud']
plt.plot(xi,yi,color='brown')

# antenas
for unpunto in puntos.index:
    xip = xi[unpunto]
    yip = yi[unpunto]
    if unpunto.startswith('Gw'):
        xigtw = xip
        yigtw = yip+alturaGw
        plt.scatter(xip ,yigtw)
        plt.annotate(unpunto,(xigtw,yigtw))
    else:
        xid = xip
        yid = yip+alturapunto
        plt.plot((xigtw,xid),(yigtw,yid),
                color = 'green',
                linestyle='dotted')
        plt.scatter(xid ,yid)
        plt.annotate(unpunto,(xid,yid), rotation=45)

```

*Ilustración 3.32: Generación de perfil.*

### 3.8.9. Zona de Fresnel

Por último, esta opción permitió mostrar, por medio de un perfil, la zona de Fresnel determinada para uno de los dispositivos desplegados. De igual forma que en la revisión del perfil, se consideraron las distancias de vegetación y su altura, adicionando un factor  $n$  que indica que zona de Fresnel se perfiló.

El algoritmo principal para esta sección se divide en dos partes, de manera que la primera parte consiste en la generación de la línea directa entre la antena de uno de los dispositivos desplegados y la antena del gateway. Esta primera parte se logra apreciar en la Ilustración 3.33.

```

# Zona de Fresnel
if i_punto>0:

    # línea directa
    dy = yi_ant[i_punto]-yi_ant[i_Gw]
    dx = xi[i_punto]-xi[i_Gw]
    m = dy/dx
    alpha = np.arctan(m)
    yi_f = lambda x: m*x + yi_ant[i_Gw]

    xi_D = np.linspace(xi[i_Gw],xi[i_punto],
                       muestras)
    yi_D = yi_f(xi_D)
    dist_D = np.sqrt(dx**2+dy**2)

```

**Ilustración 3.33: Cálculo de línea directa en zona de Fresnel.**

La segunda parte, corresponde a la generación de la región elipsoidal en la que se encuentra la zona de Fresnel. En la Ilustración 3.34, se muestra la obtención de los parámetros de esta región.

```

# zona Fresnel 1
F1_up = np.zeros(len(xi_D))
F1_down = np.zeros(len(xi_D))
for i in range(0,len(xi_D),1):
    d1 = xi_D[i]/np.cos(alpha)
    d2 = dist_D-d1
    F1 = np.sqrt(np.abs(nFres*lamb*d1*d2)/(d1+d2))

    xiu = xi_D[i]-F1*np.sin(np.abs(alpha))
    d1_u = xiu
    d2_u = dist_D-d1_u

    xid = xi_D[i]+F1*np.sin(np.abs(alpha))
    d1_d = xid
    d2_d = dist_D-d1_d
    # Fresnel, formula
    Fup = np.sqrt(np.abs(nFres*lamb*d1_u*d2_u)/(d1_u+d2_u))
    Fdown = np.sqrt(np.abs(nFres*lamb*d1_d*d2_d)/(d1_d+d2_d))

    # Línea directa +/- Fresnel
    F1_up[i] = yi_D[i] + Fup*np.cos(alpha)
    F1_down[i] = yi_D[i] - Fdown*np.cos(alpha)

```

**Ilustración 3.34: Cálculo de región elipsoidal en zona de Fresnel.**

### 3.9. Diseño de prueba de concepto

Se requiere que el prototipo sea capaz de realizar control de riego sobre una parcela de cultivo, considerando lecturas de humedad en tiempo real. Para ello, se configuró el nodo LoRa para que controle la conmutación de un relé, de manera que el relé permita la activación del actuador sobre el sistema de riego. El esquema del prototipo se muestra en la Ilustración 3.35.

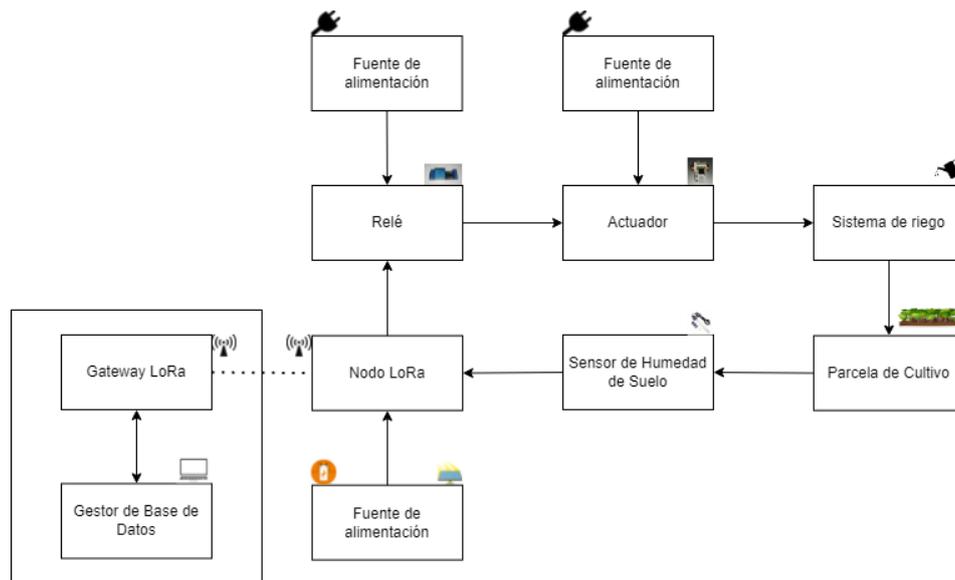


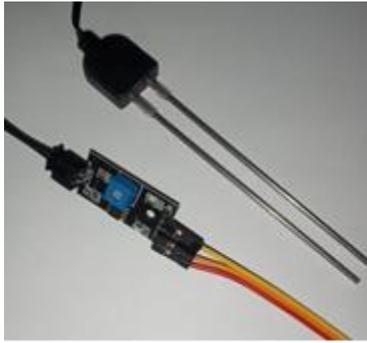
Ilustración 3.35: Diagrama de bloques del prototipo de riego automático.

#### 3.9.1. Parcela de cultivo

La parcela de cultivo corresponde a una huerta que tiene cultivos de hierbaluisa en un área aproximada de  $36\text{m}^2$  y se encuentra a 15 metros del gateway.

#### 3.9.2. Sensor de humedad de suelo

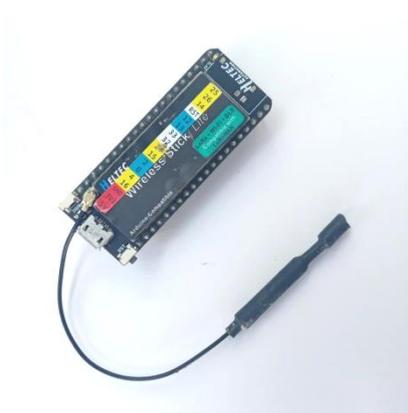
Para la prueba de concepto, se consideró al sensor resistivo de humedad del suelo resistente a corrosión, visible en la Ilustración 3.36, debido a su garantía de larga útil de aproximadamente 6 meses en operación, además de su rango de operación que incluye los 3.3V y un consumo de corriente bajo de 20mA.



*Ilustración 3.36: Sensor resistivo de humedad de suelo resistente a corrosión.*

### **3.9.3. Nodo LoRa**

El nodo LoRa a utilizar para controlar el riego consiste en el dispositivo Wireless Stick Lite del fabricante Heltec, que es un ESP32 más un módulo LoRa y se alimenta de 3.3V. Este dispositivo, que se aprecia en la Ilustración 3.37, permite recibir los datos medidos por el sensor y los envía al gestor de base de datos por medio del gateway LoRa. A su vez, recibe la instrucción desde el gestor de base de datos para ejecutar una acción sobre el relé.



*Ilustración 3.37: Módulo de desarrollo Wireless Stick Lite.*

### **3.9.4. Relé**

El prototipo controla al actuador mediante un módulo de relé, el cual contiene 6 pines y opera a 5V. Este módulo, el cual se aprecia en la Ilustración 3.38, permite energizar a la electroválvula en base a una señal de control que recibe del MCU. Su circuito interno incluye un relé de 5V y un optoacoplador.



*Ilustración 3.38: Módulo relé.*

### **3.9.5. Actuador**

Para controlar el flujo de agua en el sistema de riego, se requiere la implementación de una válvula solenoide de media pulgada, la cual se visualiza en la Ilustración 3.39, que se active una vez que el relé conmute. Esta válvula, de manera específica, posee un voltaje de operación de 12V.



*Ilustración 3.39: Válvula solenoide.*

### **3.9.6. Sistema de riego**

Se consideró al sistema de riego por goteo, debido a su operación con baja presión y volumen que permiten que el agua se distribuya en pequeñas cantidades, logrando un bajo consumo de agua a su vez que mantiene la humedad del suelo necesaria para las plantas.

### **3.9.7. Gateway LoRa**

El gateway LoRa a utilizar durante la prueba concepto corresponde al mismo dispositivo utilizado durante la etapa de despliegue de WSN y mediciones de RSS, de manera que se puede aprovechar su configuración y añadir el nodo LoRa a ChirpStack y HA.

### **3.9.8. Gestor de base de datos**

El gestor de base de datos utilizado corresponde al HA, ya que permite el registro de los valores medidos por el sensor de humedad de suelo y ejecutar acciones en base a lo medido.

### 3.9.9. Fuente de alimentación

Como fuente de alimentación general, se incluyó un convertidor de voltaje a 12V conectado a una toma de corriente. Esta conexión alimenta de manera directa al actuador, mientras que, por medio de un convertidor de voltaje de 12V a 5V y 3.3V, se alimentó al relé y al nodo LoRa respectivamente. En la Ilustración 3.40 e Ilustración 3.41 se aprecian los convertidores de voltaje.



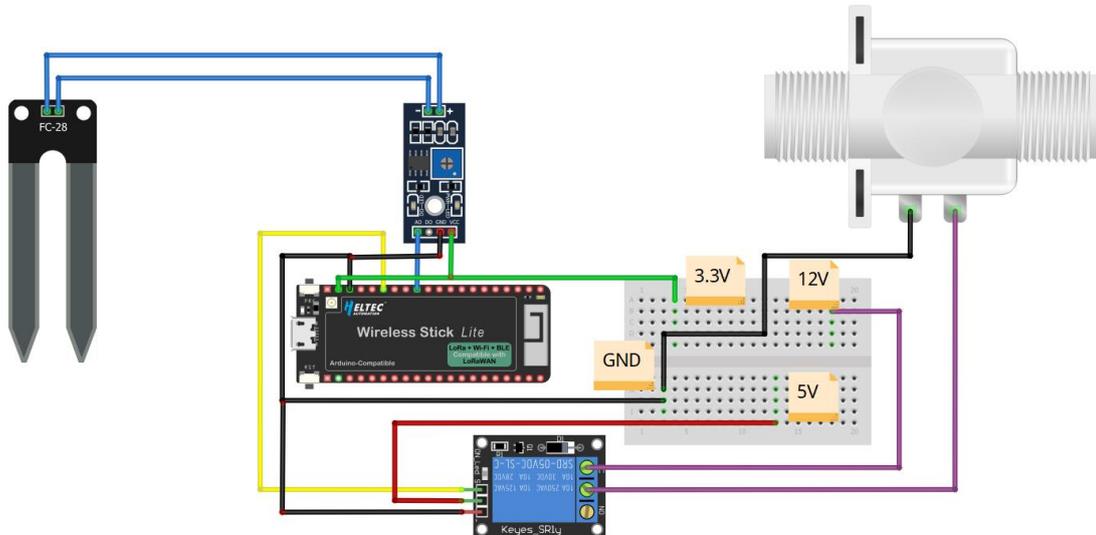
*Ilustración 3.40: Convertidor de voltaje a 12V.*



*Ilustración 3.41: Fuente de voltaje DC de 3.3V y 5V.*

### 3.9.10. Diagramas de conexiones

Se realizaron las conexiones del prototipo acorde a la Ilustración 3.42, y este circuito fue colocado en contenedores herméticos y dentro de un cajetín plástico que fue instalado en la parcela de cultivo. En la Tabla 3.6 se detallan las conexiones del prototipo en cuanto los pines usados en el MCU; mientras que en Tabla 3.7, se resume los voltajes de alimentación del sensor de humedad de suelo, el relé y la válvula solenoide.



**Ilustración 3.42: Diagrama de conexiones del prototipo.**

En la Ilustración 3.42 se muestra el diagrama de conexiones del prototipo implementado para la prueba de concepto. A continuación, en la Tabla 3.6 y Tabla 3.7 se detallan las conexiones del prototipo y alimentación de cada módulo respectivamente.

**Tabla 3.6: Tabla de conexiones del prototipo.**

Módulo	Denominación de pin en el módulo	Denominación de pin en MCU
Sensor de Humedad de suelo.	A0	GPIO12
Relé	COM	GPIO15
Fuente de Alimentación	GND	GND

**Tabla 3.7: Tabla de alimentaciones del prototipo.**

<b>Módulo</b>	<b>Alimentación</b>
Sensor de Humedad de suelo.	3.3 VDC
Relé	5 VDC
Válvula Solenoide	12 VDC

### **3.10. Sistema de riego inteligente**

Para la implementación del control inteligente de riego se optó por un control de lazo cerrado, en este caso la variable de control es la humedad del suelo y la variable controlada es el tiempo de riego. Para establecer los umbrales de humedad de suelo se consideraron las mediciones existentes de los parámetros CC y PMP realizados en la granja. En la Tabla 3.8: Valores de CC y PMP de 0 a 20 cm de profundidad. se observa los valores calculados para la profundidad de 0 a 20cm por el Ingeniero Robinson Peña de la FCV de la ESPOL.

**Tabla 3.8: Valores de CC y PMP de 0 a 20 cm de profundidad.**

<b>Lisímetro</b>	<b>CC</b>	<b>PMP</b>
L1	38,80	17,64
L2	38,80	10,19
L3	38,80	10,19
L4	38,93	17,69
L5	39,20	17,80
L6	39,20	17,80
L7	39,20	17,80
<b>PROMEDIO</b>	<b>38,99</b>	<b>15,59</b>

Se observa entonces que: el umbral superior, cuando la tierra ha sido regada recientemente, es de 38.99%; el umbral inferior, cuando se llega un punto irreversible de falta de humedad para la planta, es de 15.59%; los valores obtenidos son el promedio de siete (7)

mediciones diferentes para el mismo suelo. Con esta información, se procedió a calibrar el sensor de humedad de suelo seleccionado.

### 3.10.1. Programa del MCU usado para control de riego

Para detallar el algoritmo construido a fin obtener un control de riego inteligente, por medio de la Ilustración 3.43, se presenta el diagrama de flujo simplificado del programa cargado en el MCU, y en los párrafos posteriores se añaden explicaciones de secciones de código adicionales.

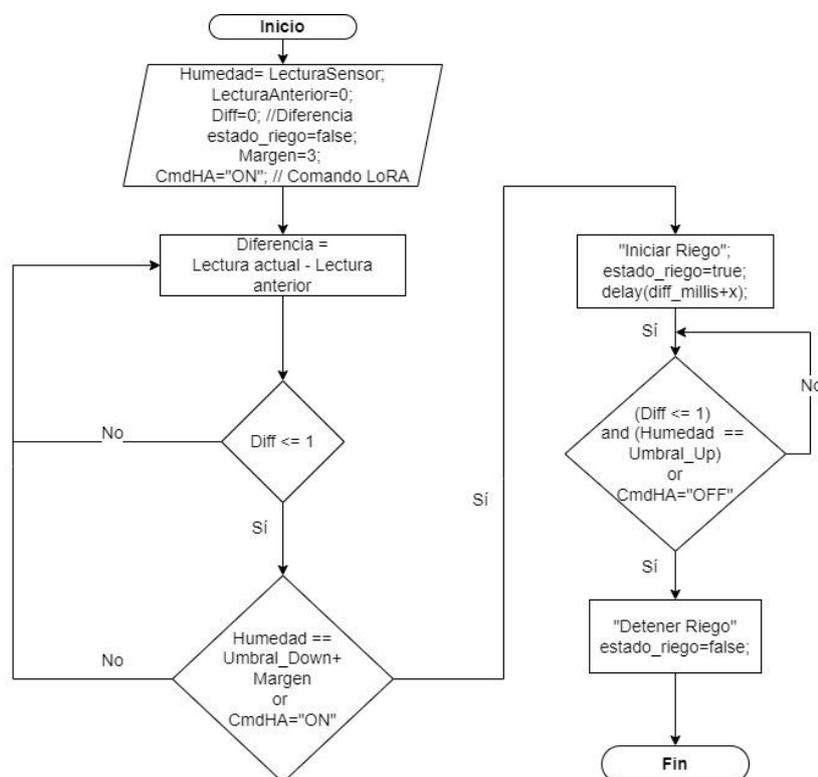


Ilustración 3.43: Diagrama de flujo simplificado del programa para riego inteligente.

Como se observa en el pseudocódigo del diagrama de flujo de la Ilustración 3.43, se puede controlar al actuador por medio de los umbrales de humedad, pero también mediante comandos enviados desde HA, es decir a través del enlace LoRa. De esta manera, existe la posibilidad de forzar el riego o la detención del riego por parte del usuario. Esta funcionalidad, se logra mediante una sección de la estructura *Switch...Case* del código de Arduino; la librería de LoRaWan permite decodificar la trama del enlace de bajada, de donde se obtiene un parámetro que activa uno de los casos del *Switch...Case*.

```

void downLinkDataHandle(McpsIndication_t *mcpsIndication){
    lora_printf("+REV DATA:%s,RXSIZE %d,PORT %d\r\n",
               mcpsIndication->RxSlot?"RXWIN2":"RXWIN1",
               mcpsIndication->BufferSize,
               mcpsIndication->Port);
    lora_printf("+REV DATA:");

    actuador_pin[mcpsIndication->Buffer[0],//estado
                 mcpsIndication->Buffer[1],//duracion en minutos
                 lecturaSensor);

    for(uint8_t i=0;i<mcpsIndication->BufferSize;i++) {
        lora_printf("%02X",mcpsIndication->Buffer[i]);
    }
    lora_printf("\r\n");
}

```

**Ilustración 3.44: Segmento de código que permite decodificar una trama de bajada.**

En la Ilustración 3.44 se muestra una sección de código que emplea la función *downLinkDataHandle( )* que permite extraer datos de la trama que envía HA a través del gateway, hacia el MCU. Dentro de esta función se ha introducido otra función llamada *actuador\_pin( )*, que recibe como parámetros de entrada al *estado* y *duración*, y estos datos están contenidos en la trama de bajada, por lo que equivalen a la orden proveniente del HA para activar o desactivar el riego.

La función *actuador\_pin( )* cuenta con cuatro casos dentro de su estructura *Switch...Case* dos se activan en base a las lecturas del sensor de humedad de suelo y dos en base a los comandos enviados desde HA. A continuación, en la Ilustración 3.45, se muestra un fragmento de la sección de código, que corresponde al caso 49.

```

switch(estado) {
case 49: {
    //-----LEE EL SENSOR
    output_value = SensorHS();
    //-----CALCULA LA DIFERENCIA ENTRE LECTURA ACTUAL Y ANTERIOR
    difference=output_value-lecturaSensor;
    //-----ORDENA EL ENCENDIDO DE LA VALVULA

    if (difference ==0)
    {
        contador=contador+1;
        if (contador==3 and output_value==18)//si se ha llegado al umbral inferior y las 3 ultimas lecturas son iguales
        {
            contador=0;//resetea el contador
            diff_millis=millis()-temp_millis;
            delay(round(float(diff_millis+diff_millis*0.05)*1000));

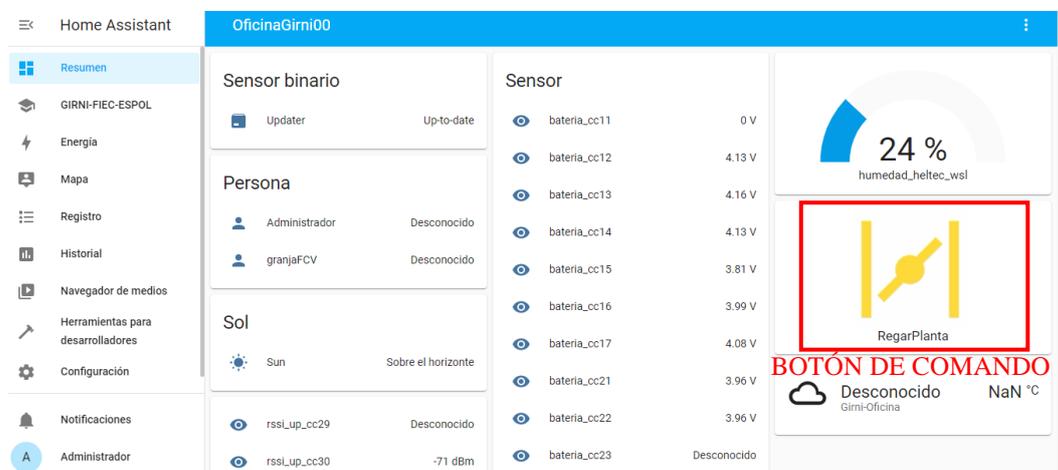
            pinMode(pinActuador,OUTPUT);
            digitalWrite(pinActuador, HIGH);
            estado = true;
            minutos = 1;
            if (serial_msg)
            {
                Serial.print("actuador: ON ");
            }

```

**Ilustración 3.45: Fragmento de la sección Switch...Case del código.**

El caso 49 ordena el encendido del riego cuando se ha alcanzado el umbral inferior de humedad y además se han dado tres lecturas con el mismo valor consecutivamente. Se establece un período de riego del 5% del tiempo transcurrido desde la última irrigación y además se aumenta la frecuencia de muestreo mientras se está regando (*minutos=1*).

De la misma manera, el caso 50 ordena el apagado del riego una vez que se han obtenido tres lecturas iguales del umbral superior de humedad; mientras que el caso 51 y caso 52 corresponden al encendido y apagado desde HA. En el recuadro de color rojo en la Ilustración 3.46, se observa el botón creado en HA para activar o desactivar de manera forzosa el riego.



**Ilustración 3.46: Botón de apagado/encendido forzoso de riego.**

# CAPÍTULO 4

## 4. Resultados

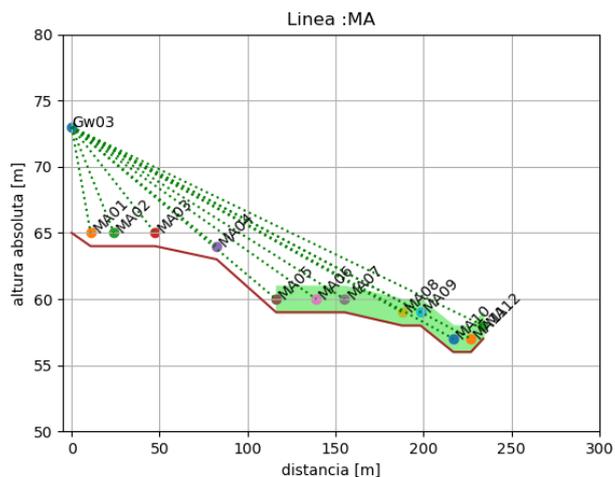
Este capítulo se compone de los resultados obtenidos durante las mediciones experimentales de RSS en la GEA de la ESPOL, que fueron realizadas en el mes de noviembre de 2021, tiempo durante el que no se dieron precipitaciones y se usaron los dispositivos provistos por el cliente para realizar dicha tarea.

Se incluyen las rectas obtenidas empleando regresión lineal, que corresponden a los gradientes experimentales, tanto para la plantación de cacao, como para la plantación de maíz. Adicionalmente se compara dichos gradientes experimentales, con modelos de propagación existentes para ambientes con vegetación.

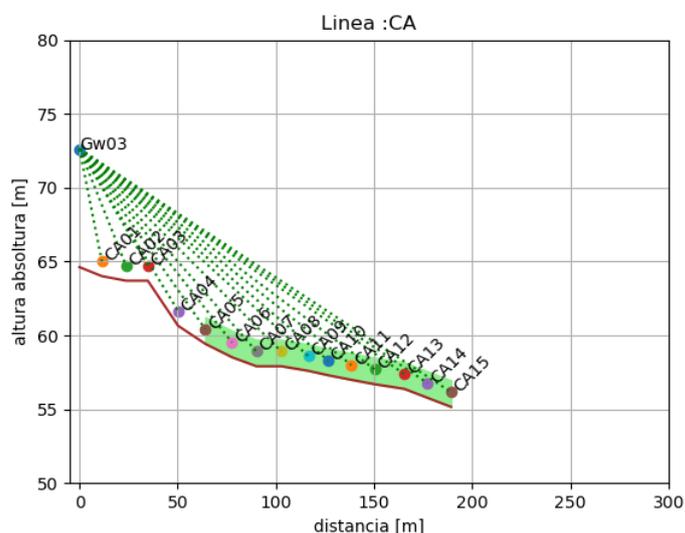
La obtención del modelo de propagación experimental, arroja resultados necesarios para la implementación de actuadores en el área agrícola estudiada, porque da una mejor idea de cómo funciona el canal inalámbrico en las condiciones reales, durante un tiempo prolongado. De esta manera, el capítulo finaliza mostrando el funcionamiento del prototipo de riego inteligente, que se diseñó con el fin de aprovechar de manera práctica algunos resultados obtenidos durante las mediciones.

### 4.1. Gradientes parciales

A fin de analizar más detalladamente los resultados de las mediciones, se obtuvieron gradientes parciales para cada caso, considerando que existen dos ambientes de propagación: uno de LoS y otro de nLoS. Para registrar este hecho, se muestra la simulación generada por el algoritmo de Python en la Ilustración 4.1 y en la Ilustración 4.2 , donde se distingue el perfil de terreno y los dos ambientes de propagación tanto para el maíz como para el cacao.

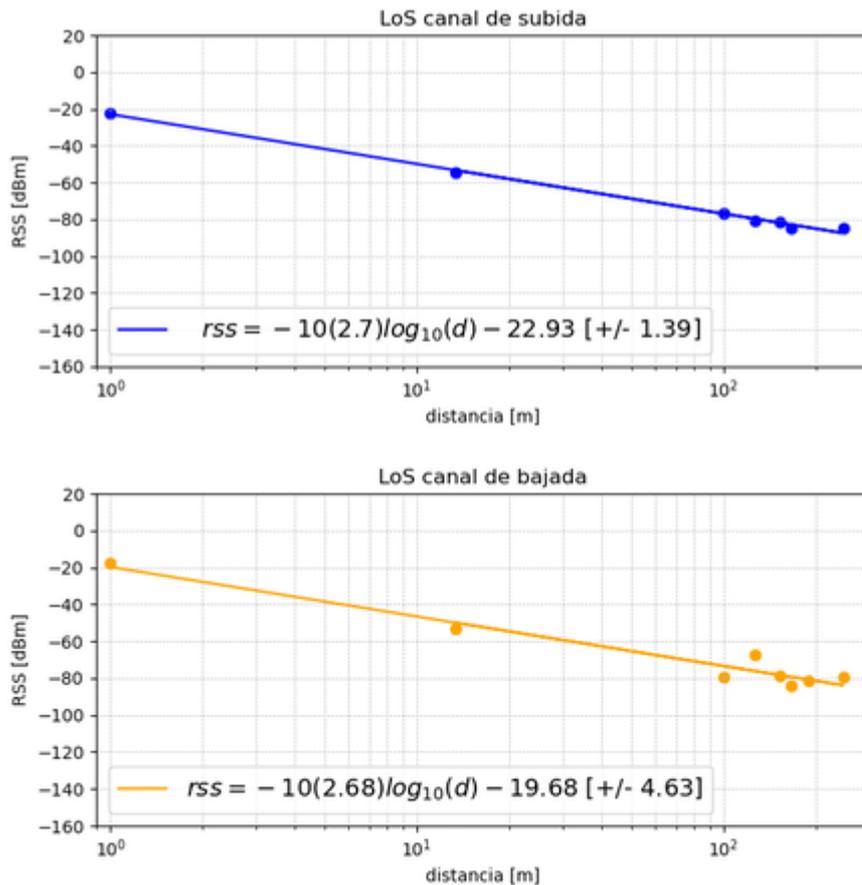


**Ilustración 4.1: Simulación que ilustra el escenario LoS y nLoS en la plantación de maíz.**



**Ilustración 4.2: Simulación que ilustra el escenario LoS y nLoS en la plantación de cacao.**

Como referencia se presenta el resultado obtenido en la hilera de línea de vista (tramo sin obstrucciones por vegetación), que se observa en la Ilustración 4.3. El valor del gradiente de referencia LoS para el canal de subida es de -2.82 y para el canal de bajada es de -2.88. Se recuerda que el gradiente para línea de vista teórico es de -2, sin embargo este valor ocurre en condiciones ideales donde no existe ninguna superficie como el suelo donde se puedan generar reflexiones de la señal.



**Ilustración 4.3: Gradiente de referencia LoS**

En la siguiente sección, se muestra el análisis de los gradientes parciales obtenidos para las plantaciones de maíz y cacao.

#### **4.1.1. Gradiente parcial en el tramo sin vegetación del maíz**

En la Ilustración 4.4 se puede observar el gradiente parcial correspondiente al tramo sin vegetación de las mediciones efectuadas para evaluar la cobertura hacia la plantación de maíz. Esto corresponde a las ubicaciones de los dispositivos de medición desde la 01 hasta la 04 (ver sección de planificación del en el Capítulo 3). Dentro de la misma gráfica se indica la ecuación de la recta baja la forma:  $RSS = -10(\alpha)\log_{10}(d) + b$ ; donde  $\alpha$  es el valor absoluto del gradiente y b es el término independiente, además entre corchetes se muestra la desviación estándar del conjunto de datos.

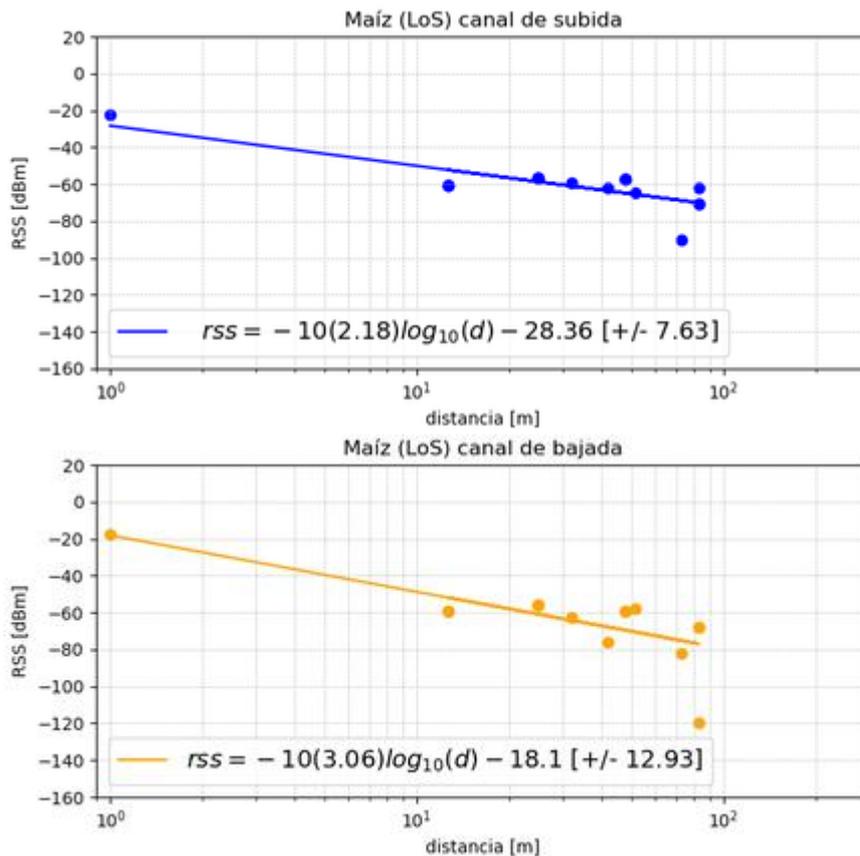
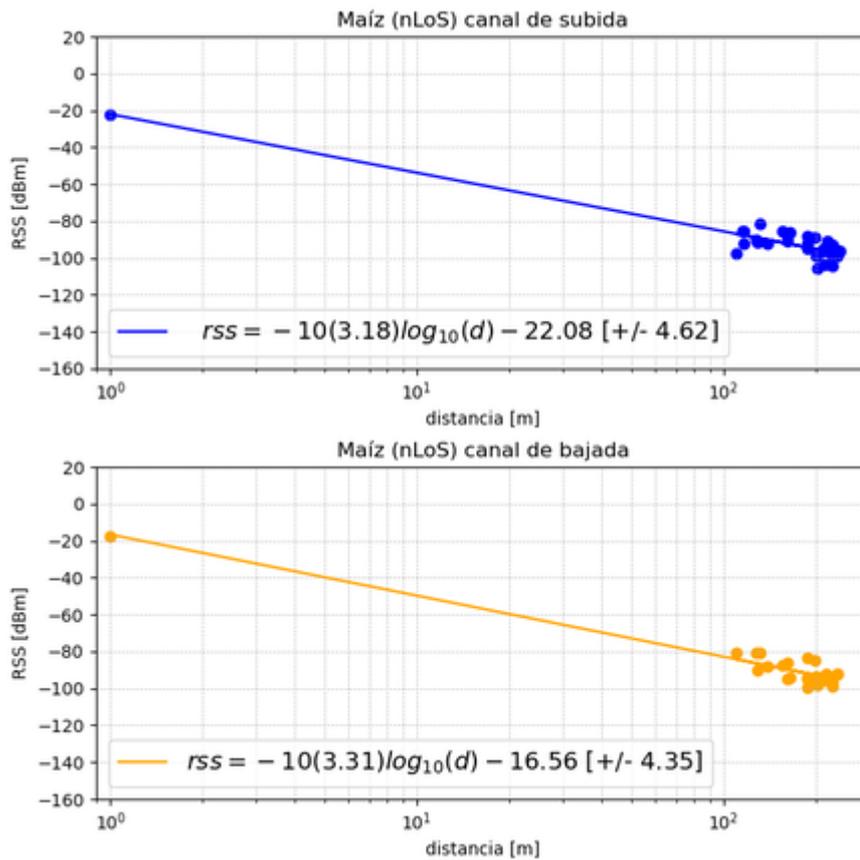


Ilustración 4.4: Gradiente parcial del maíz, tramo sin vegetación

#### 4.1.2. Gradiente parcial en tramo con vegetación del maíz

De manera similar, se procedió a realizar el gradiente parcial únicamente considerando las muestras ubicadas dentro del área con cultivos. Se obtuvieron las gráficas de la Ilustración 4.5, en donde se puede verificar que el gradiente es de -3.18 para el canal de subida y de -3.57 para el canal de bajada.

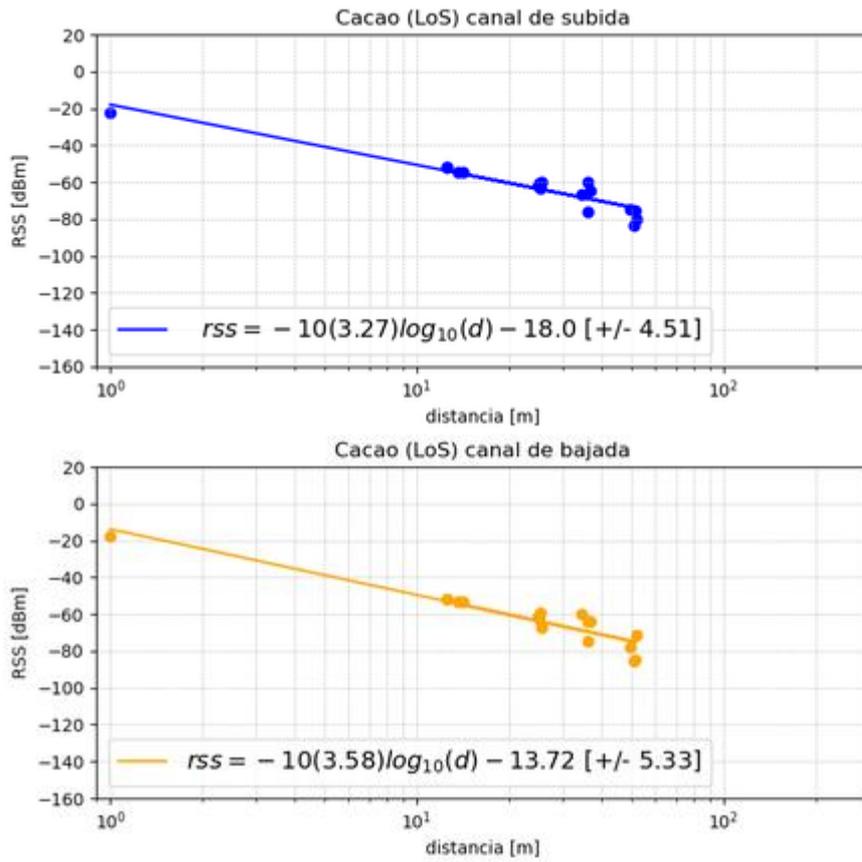
La variación del gradiente entre el canal de subida y el canal de bajada se atribuye a que la recepción de la señal es mejor en el Gateway del cliente debido a que está equipado con una antena de mejores características que las de los nodos terminales, esto le permite tener una mejor apertura para recepción de la señal y por lo tanto se registra menos variabilidad en las muestras de RSS del canal de subida.



*Ilustración 4.5: Gradiente parcial del maíz, tramo con vegetación*

### 4.1.3. Gradiente parcial en tramo sin vegetación del cacao

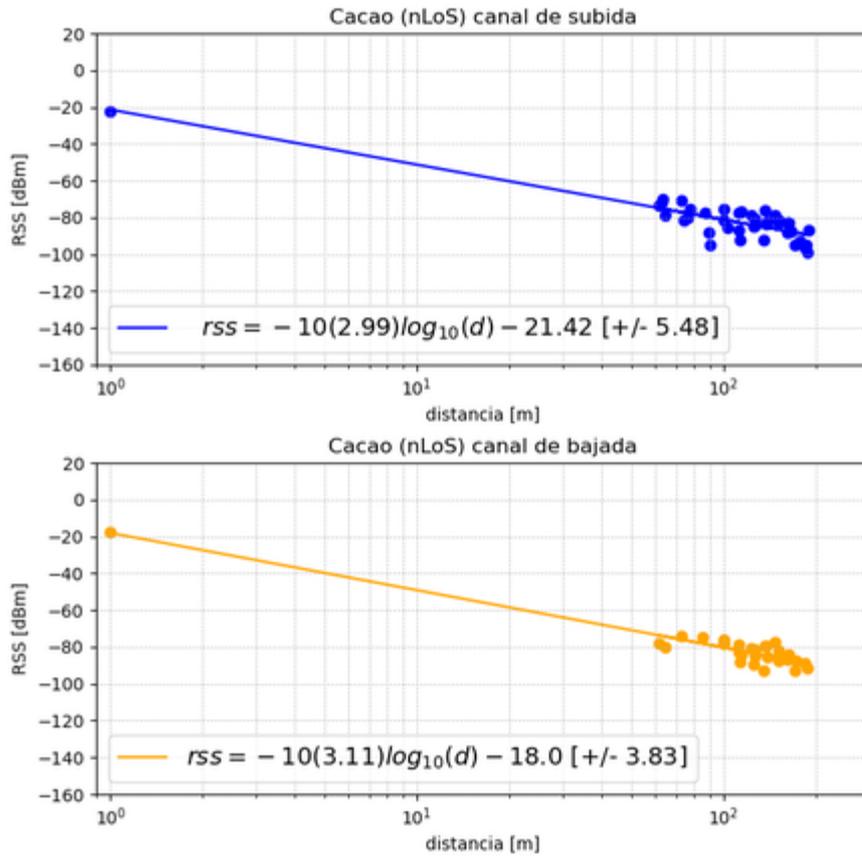
El gradiente parcial en el tramo sin obstrucciones por vegetación de cacao, se muestra en la Ilustración 4.6; entonces, el gradiente para el canal de subida es -3.27 y el gradiente para el canal de bajada es de - 3.58.



*Ilustración 4.6: Gradiente parcial del cacao, tramo sin vegetación*

#### 4.1.4. Gradiente parcial en tramo con vegetación del cacao

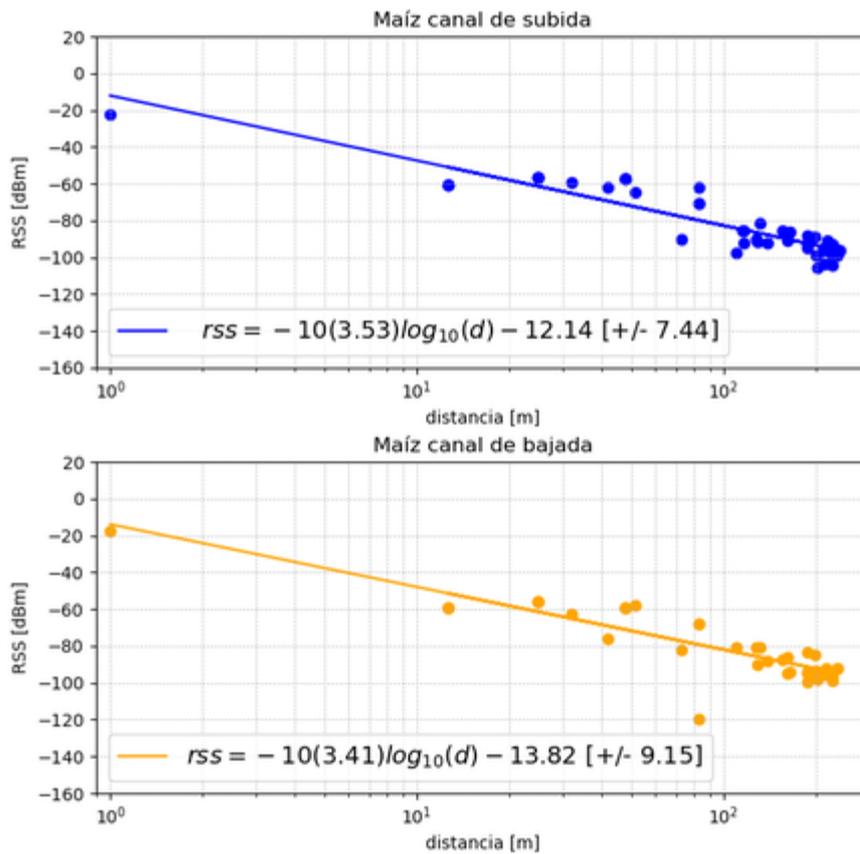
El gradiente parcial en el tramo con vegetación de cacao, se muestra en la Ilustración 4.7; entonces, el gradiente para el canal de subida es -3.03 y el gradiente para el canal de bajada es de - 3.07



**Ilustración 4.7: Gradiente parcial del cacao, tramo con vegetación**

## 4.2. Gradientes finales obtenidos

En esta sección se muestran los gradientes obtenidos para la plantación de maíz y para la plantación de cacao. Como se observa en la Ilustración 4.8 y en la Ilustración 4.9, se muestran las rectas obtenidas para modelar la potencia recibida versus la distancia logarítmica con respecto al gateway en las dos plantaciones que sirvieron como escenario real para las mediciones. Dentro de las gráficas se muestra la ecuación de la recta bajo la forma:  $RSS = -10(\alpha)\log_{10}(d) + b$ ; donde  $\alpha$  es el valor absoluto del gradiente y  $b$  es el término independiente, además entre corchetes se muestra la desviación estándar del conjunto de datos.



**Ilustración 4.8:** Gradiente para maíz - arriba) Canal de subida; abajo) Canal de bajada

Las gráficas se componen de un conjunto de puntos que representan un promedio de RSS obtenido de entre 230 y 250 muestras. El algoritmo aplicó regresión lineal a estos puntos obtenidos para determinar la ecuación de la recta; la pendiente de la recta, que se muestra entre paréntesis, es el gradiente distancia-potencia.

El resultado mostrado fue depurado porque contenía puntos que debieron ser analizados con mayor detalle en vista que mostraban una variabilidad atípica, esto se determinó analizando su gráfica distribución de probabilidad, el perfil del terreno y la primera zona de fresnel del enlace respectivo. Los resultados de este análisis se discuten en la subsección 4.7.

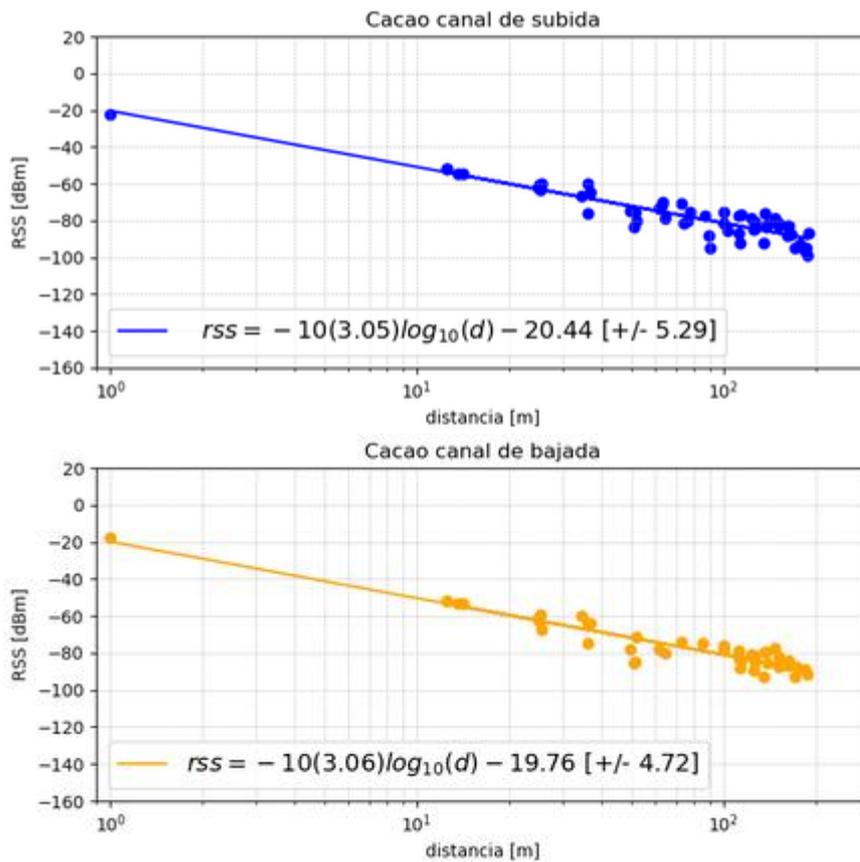


Ilustración 4.9: Gradiente para cacao - arriba) Canal de subida; abajo) Canal de bajada

### 4.3. Resumen de gradientes obtenidos y verificación de hipótesis

A continuación, se muestran las tablas resumen de los gradientes obtenidos en valor absoluto. Se registran los gradientes totales en la Tabla 4.1, así como los gradientes parciales en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1: Resumen de gradientes obtenidos

	Maíz	Cacao	LoS
$ \alpha $ subida	3.53	3.05	2.70
$ \alpha $ bajada	3.41	3.06	2.68

**Tabla 4.2: Resumen de gradientes parciales obtenidos**

	<b>Maíz LoS</b>	<b>Maíz nLoS</b>	<b>Cacao LoS</b>	<b>Cacao nLoS</b>	<b>LoS</b>
$ \alpha $ subida	2.18	3.18	3.27	2.99	2.70
$ \alpha $ bajada	3.06	3.31	3.58	3.11	2.68

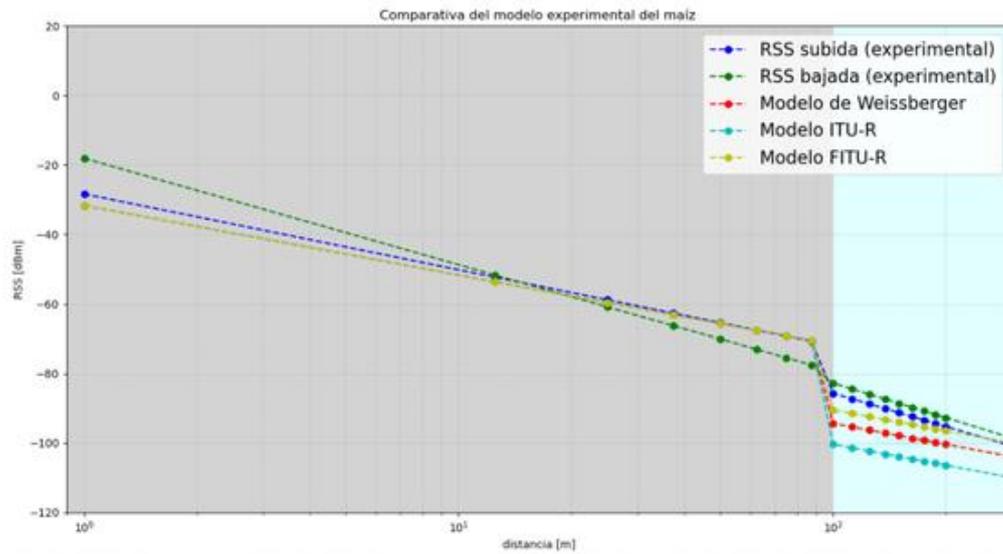
Se verifica que los resultados no son concluyentes en cuanto a H0 y H1. La evidencia apoya la hipótesis H1 porque los gradientes parciales en valor absoluto correspondientes al segmento nLoS de maíz y de cacao son mayores que los valores de referencia LoS obtenidos experimentalmente. Esto es:

- Maíz canal de subida:  $(3.18 > 2.70)$
- Maíz canal de bajada:  $(3.31 > 2.68)$
- Cacao canal de subida:  $(2.99 > 2.70)$
- Cacao canal de bajada:  $(3.11 > 2.68)$

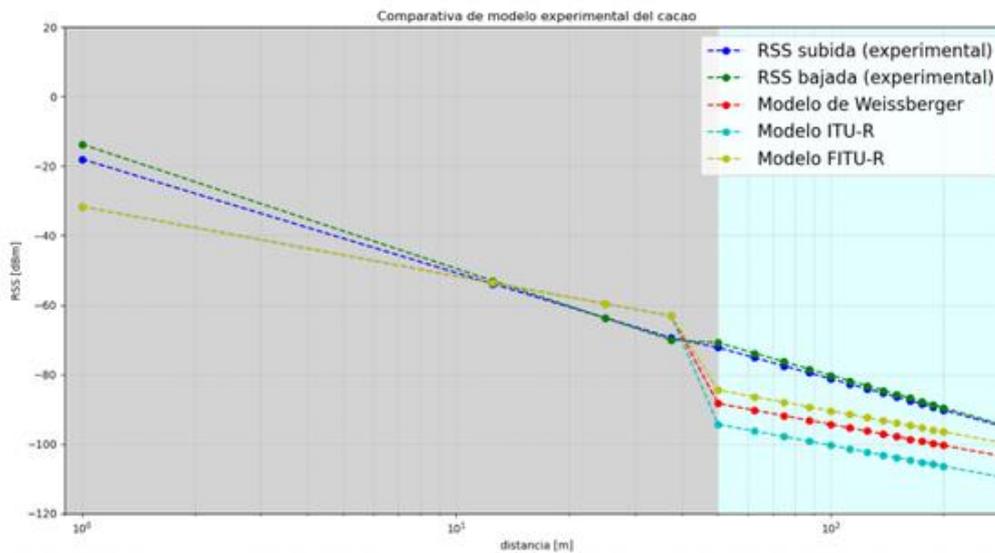
En cuanto a H2, la evidencia obtenida apoya a esta hipótesis porque el valor absoluto del gradiente del maíz en el canal de subida es mayor al de su par en el cacao  $(3.53 > 3.05)$  y en el canal de bajada se tiene que el gradiente del maíz también supera en valor absoluto al gradiente del cacao  $(3.41 > 3.06)$ .

#### **4.4. Comparación con modelos de vegetación preexistentes**

A fin de validar los resultados obtenidos, se procedió a comparar los modelos experimentales de propagación obtenidos con modelos de predicción de pérdidas en ambientes con vegetación. Se seleccionaron los modelos presentados en las ecuaciones (14), (15) y (16); estos modelos fueron calculados y graficados para las mismas distancias de prueba, que se utilizaron en el modelo experimental. El resultado se aprecia en la Ilustración 4.10 para el caso maíz, y en la Ilustración 4.11 para el caso cacao.



**Ilustración 4.10: Comparación de modelo experimental con otros modelos (maíz)**



**Ilustración 4.11: Comparación de modelo experimental con otros modelos (cacao)**

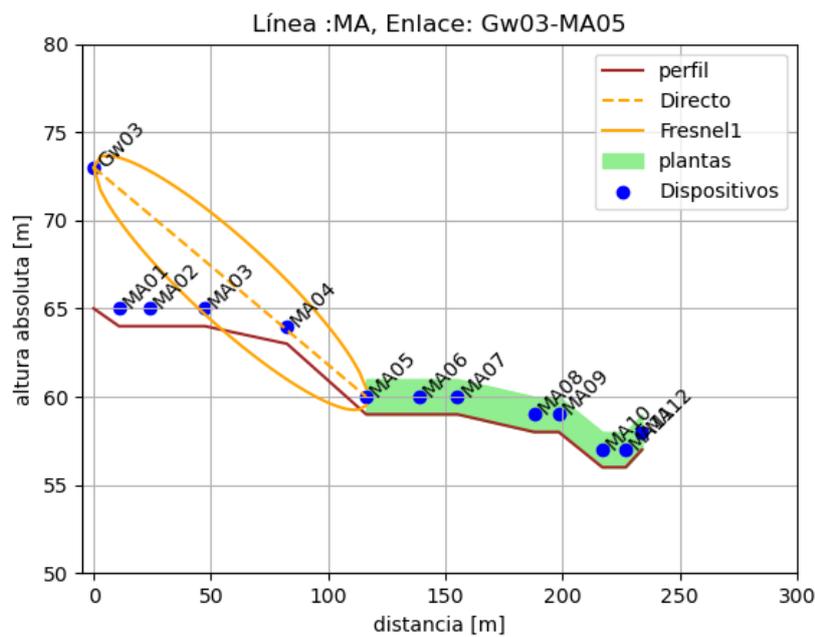
En la parte izquierda de las gráficas (fondo color gris) se comparan los gradientes parciales de la sección sin vegetación, con el modelo de espacio libre de la ecuación (8); se evidencia que el gradiente experimental es mayor que el gradiente teórico para espacio libre, como se había determinado en la verificación de las hipótesis.

Se puede apreciar que los modelos de propagación teóricos, sobrestiman la atenuación de la señal en las distancias que se ubican dentro de la plantación (fondo color celeste), esto sucede porque dichos modelos se basan en otros tipos de vegetación, especialmente árboles y

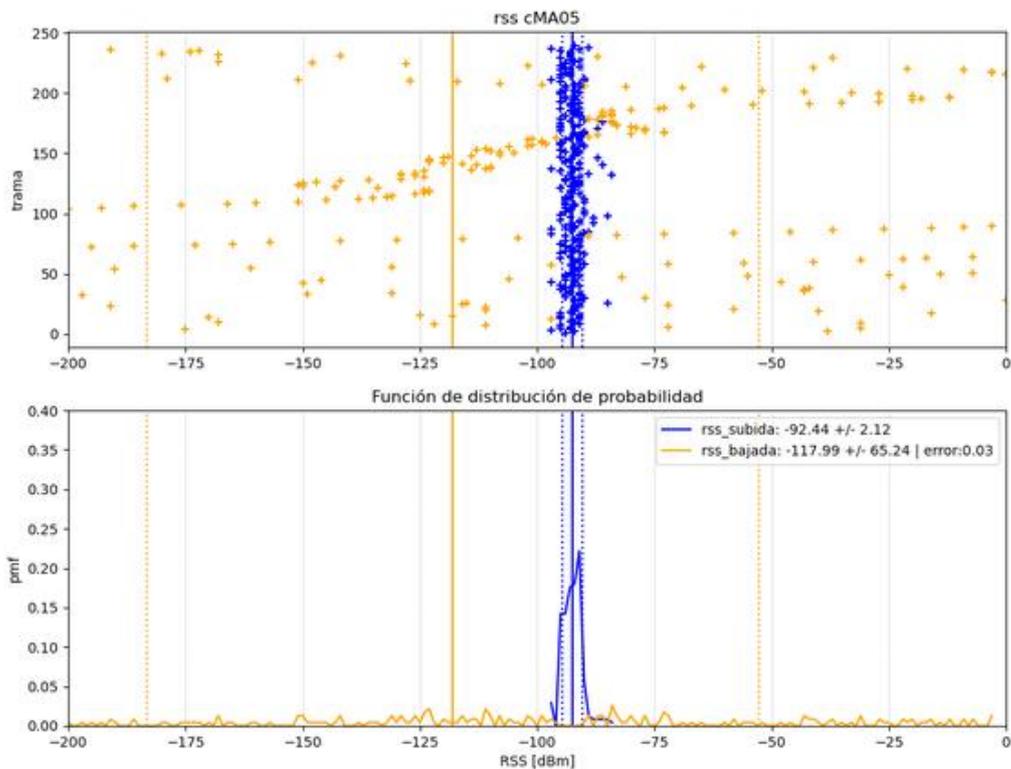
por lo tanto computan mayores pérdidas por follaje o vegetación. Por otra parte, se observa que a medida que se incrementa la distancia logarítmica, se reduce el desfase entre los modelos teóricos y el modelo experimental.

#### 4.5. Análisis de radios de Fresnel en puntos con alta variabilidad de lecturas

Se encontraron resultados de relevancia para la implementación de actuadores, porque existen posiciones que, debido al perfil del terreno, tienen un radio de Fresnel obstruido y se configura una zona de sombra. Este caso se halló en las mediciones extraídas por dispositivos que se encontraban junto al desnivel que presenta el terreno, un ejemplo de esto se muestra en la Ilustración 4.12 y además se verifica la alta variabilidad del canal de bajada en la Ilustración 4.13.



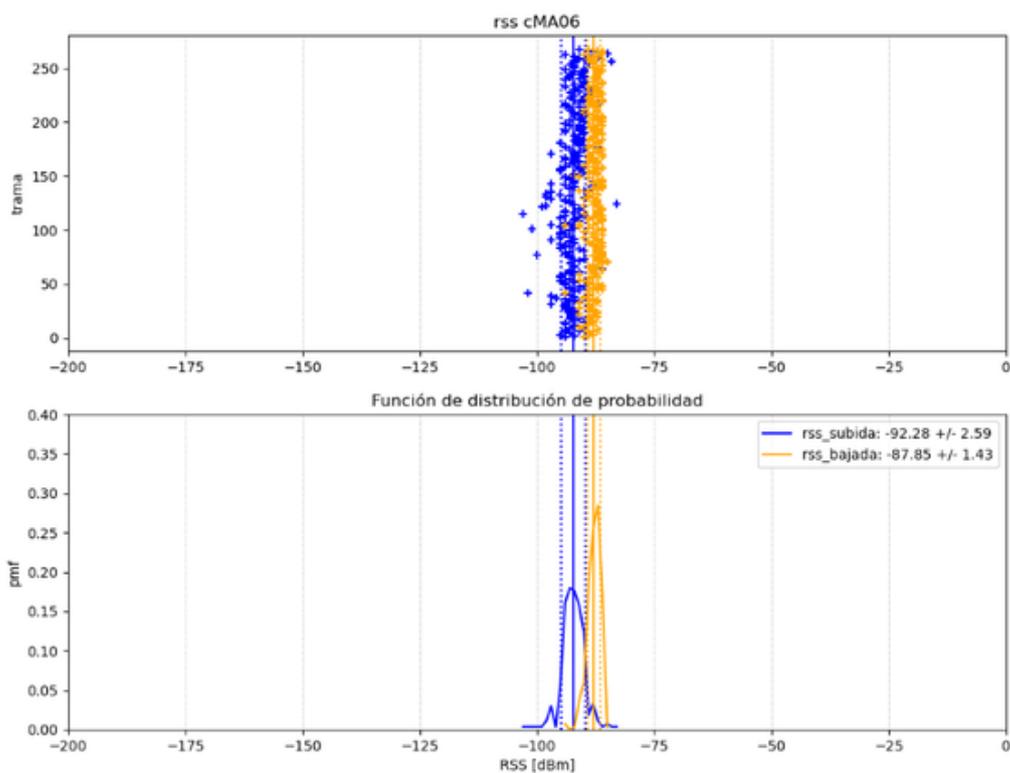
**Ilustración 4.12: Zona de sombra y obstrucción de radio de Fresnel**



**Ilustración 4.13: Gráfica de distribución de probabilidad (pmf) de la posición 05 del maíz**

En parte superior de la Ilustración 4.13 se evidencia que el canal de bajada presenta una alta variabilidad de los valores de RSS registrados, de tal manera que en la gráfica de distribución de probabilidad correspondiente no se observa ningún pico, sino que se observan múltiples pulsos cercanos al valor de probabilidad cero. Por otra parte, el canal de subida, muestra que los valores de RSS se concentran alrededor de -92.44 y esto se refleja en la distribución de probabilidad al conformarse un pico centrado en ese mismo valor.

Para hacer visible el contraste de lo mostrado en el caso anterior, se muestra lo que ocurrió en la posición 06 del maíz en la Ilustración 4.14. En este caso, se tuvo un punto con baja variabilidad en las lecturas de RSS tanto para el canal de bajada, como para el canal de subida. Esta característica lo hace un sitio admisible para la instalación de dispositivos controladores.



**Ilustración 4.14:** Gráfica de distribución de probabilidad (pmf) de la posición 06 del maíz

Los resultados de esta subsección manifestaron la importancia de una planificación de la WSN en base a las condiciones reales de propagación, porque mostraron la influencia del perfil del terreno en la correcta recepción de señales enviadas desde el gateway, y en última instancia desde el procesamiento central, que es responsable del control de riego en el caso del prototipo diseñado dentro de este trabajo.

#### **4.6. Resultados de la implementación del prototipo de riego inteligente**

El prototipo de riego inteligente diseñado para este proyecto emplea el mismo protocolo de comunicación que los dispositivos usados para realizar las mediciones de RSS, es decir se comunica inalámbricamente a través de transporte LoRa con el bloque de procesamiento central. De esta manera, mediante las mediciones obtenidas en la primera etapa, se garantiza un canal lo suficientemente estable para colocar un actuador en ciertas ubicaciones del área estudiada.

En particular, para llevar a cabo la prueba de concepto de riego inteligente, se ubicó el prototipo a 15 metros de la ubicación de la antena del gateway, donde se encuentra una pequeña parcela que cuenta riego por goteo. Como se muestra en la Ilustración 4.15, el prototipo fue construido de tal manera que tenga una alimentación eléctrica desde la red pública para los componentes del circuito de control, aunque el control se realiza de manera inalámbrica y centralizada.



**Ilustración 4.15: Implementación del prototipo de riego inteligente**

Como se detalló en el Capítulo 3, el prototipo tiene como objetivo controlar remotamente y en base al parámetro de humedad de suelo, el tiempo de riego de la parcela. Adicionalmente se debe poder accionar o detener el riego de manera forzosa, cuando el usuario lo requiera. En la Ilustración 4.16 se muestra una captura de los mensajes seriales que se obtuvieron, demostrando que se puede accionar el prototipo mediante un comando desde HA.

La Ilustración 4.16 a) muestra en su parte izquierda, el estado del comando en HA que se torna de color amarillo una vez que se ha ordenado el inicio del riego; en la parte derecha se muestra los mensajes que se imprimen en la pantalla serial donde se verifica que se recibe una instrucción por el canal de bajada LoRa, que establece que se instaure el estado 51 que corresponde al encendido del riego de manera forzosa.

La Ilustración 4.16 b) se obtuvo inmediatamente después de la Ilustración 4.16 a), como se puede intuir al observar los registros de tiempo que van desde las 13:52:26.143 hasta las 13:53:29.356, sin embargo, se registra el caso de apagado forzoso. Se puede verificar que se recibe una instrucción por el canal de bajada LoRa que establece que se ingrese al estado 52, e inmediatamente se reporta el apagado del riego.



**Ilustración 4.16: a) Encendido forzoso de riego b) Apagado forzoso de riego**

Para demostrar el funcionamiento del prototipo mediante los umbrales de humedad de suelo, se utilizó una opción del HA que permite establecer un estado arbitrariamente en una entidad, de esta manera se pudo simular que el prototipo había alcanzado los umbrales establecidos. De manera similar al caso de encendido/apagado forzoso, se muestran los mensajes seriales obtenidos bajo este esquema en la Ilustración 4.17.

a)

Entidad  
sensor.humedad\_heltec\_wsl X

---

Estado  
39

---

Atributos del estado (YAML, opcional)

```
1 unit_of_measurement: '%'  
2 friendly_name: humedad_heltec_wsl  
3
```

ESTABLECER ESTADO ↻

```
14:20:11.622 -> instruccion recibida: 49 Estado: 49  
14:20:11.666 -> Humedad: 28%  
14:20:11.666 -> Humedad ant: 28  
14:20:11.709 -> Humedad actual: 28  
14:20:11.709 -> Diferencia: 0  
14:20:11.709 -> Contador: 1
```

[...]

```
14:20:51.771 -> Humedad: 28%  
14:20:51.771 -> Humedad ant: 28  
14:20:51.771 -> Humedad actual: 28  
14:20:51.771 -> Diferencia: 0  
14:20:51.771 -> Contador: 3  
14:21:01.925 -> actuador_caso49: ON duraci3n ():  
14:21:01.925 -> hasta umbral superior  
14:21:01.925 -> Humedad: 28%  
14:21:01.925 -> Estado rele: 1
```

b)

Entidad  
sensor.humedad\_heltec\_wsl X

---

Estado  
18

---

Atributos del estado (YAML, opcional)

```
1 unit_of_measurement: '%'  
2 friendly_name: humedad_heltec_wsl  
3
```

ESTABLECER ESTADO ↻

```
14:21:36.750 -> instruccion recibida: 50 Estado: 50  
14:21:36.797 -> Humedad: 28%  
14:21:36.797 -> Humedad ant: 28  
14:21:36.797 -> Humedad actual: 28  
14:21:36.797 -> Diferencia: 0  
14:21:36.797 -> Contador: 1
```

[...]

```
14:25:09.101 -> Humedad ant: 28  
14:25:09.101 -> Humedad actual: 28  
14:25:09.101 -> Diferencia: 0  
14:25:09.101 -> Contador: 3  
14:25:19.273 -> actuador_caso50: OFF duraci3n ():  
14:25:19.273 -> hasta umbral inferior3200  
14:25:19.273 -> Humedad: 28%  
14:25:19.273 -> Estado rele: 0
```

**Ilustraci3n 4.17: a) Encendido mediante umbral de humedad de suelo**

**b) Apagado mediante umbral de humedad de suelo.**

## CONCLUSIONES

El despliegue de una WSN con propósito de realizar mediciones de RSS en un ambiente real con presencia de vegetación permitió la obtención de un modelo de propagación experimental específico del sitio, el mismo que puede ser reevaluado si se realiza en condiciones similares a las descritas en este proyecto, es decir bajo las condiciones de la GEA sin precipitaciones y en las mismas áreas agrícolas donde se efectuó este experimento.

Se pudo verificar que los modelos teóricos de propagación aplicados a ambientes con vegetación ITU-R, FITU-R, Weissberger sobrestiman las pérdidas por atenuación en comparación con el modelo de propagación experimental obtenido, por tal motivo se refuerza la necesidad de la evaluación de cobertura en el sitio para obtener resultados óptimos en el despliegue de dispositivos inalámbricos.

Las hipótesis de investigación se verificaron por medio de los resultados obtenidos durante el análisis parcial de gradientes, considerando que existen dos escenarios de propagación en ambos cultivos. La evidencia apoyó la hipótesis de que el maíz por ser un cultivo con mayor densidad de vegetación y mayor altura, produce un mayor valor absoluto en el gradiente, es decir se tiene más atenuación de la señal en el maíz que en el cacao.

En cuanto a la hipótesis de que el gradiente del área con vegetación es mayor en valor absoluto al del gradiente de la referencia en línea de vista, la evidencia apoyó esta hipótesis tanto en el caso del cacao como el caso del maíz. Se descartó la hipótesis nula, en la que los cultivos no generaban mayor atenuación en comparación con el gradiente de línea de vista experimental.

El análisis detallado de la base de datos de mediciones permitió distinguir ubicaciones en las que no es recomendable poner en funcionamiento actuadores que sean controlados de manera central. En estas posiciones se determinó la presencia una obstrucción importante del radio de Fresnel debido al perfil del terreno, por lo que se relacionó con el concepto de una

zona de sombra. Se pudo observar que en estos puntos existía una gran variabilidad de las muestras, por lo tanto, se concluyó que no es recomendable depender de un dispositivo inalámbrico con tecnología LoRa que se ubique en las proximidades del declive en el terreno, porque, aunque no genera una obstrucción total de la señal, afecta la confiabilidad de la comunicación.

El prototipo de riego inteligente implementado utilizó el mismo estándar de comunicaciones evaluado durante las mediciones, esto permitió demostrar un resultado práctico en el que se probó que es posible realizar control de riego de manera centralizada y remota, en base a parámetros ambientales de microclima usando el estándar LoRa.

## RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos sugieren que el modelo obtenido es específico para el sitio y las circunstancias en que se obtuvo, por tal motivo se recomienda para futuros trabajos repetir el experimento y además probar variaciones con condiciones diferentes e incluir datos meteorológicos para hallar si existe correlación de las variables ambientales con la respuesta del canal en ambientes de propagación con vegetación.

Se recomienda para futuras mediciones, evitar colocar nodos finales en las proximidades de un declive de terreno, para evitar inestabilidad de las comunicaciones, esto es especialmente importante si se desea colocar un actuador que sea controlado en base a instrucciones que sean recibidas inalámbricamente.

Así mismo se recomienda que se consideren parámetros de calidad de enlaces como el número de paquetes enviados y recibidos, para una ampliación del análisis mostrado en este trabajo con respecto a los puntos que demostraron una alta variabilidad en las mediciones de RSS.

Dentro de la campaña de mediciones se vio la necesidad de contar con una mayor cantidad de dispositivos de medición, por tal motivo se recomienda utilizar al menos una cantidad igual a la cantidad de puntos que cubran un hilera íntegramente e idealmente, que se cubran todas las hileras planificadas al mismo tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. L. Pino Peralta, H. R. Aguilar, G. E. Apolo Loayza and L. A. Sisalema Morejón, "Aporte del sector agropecuario a la economía del Ecuador: Análisis crítico de su evolución en el período de dolarización. Años 2000-2016," *Espacios*, vol. 39, no. 32, pp. 7-16, 2018.
- [2] Diario El Universo, "Sector agrícola, pilar fundamental en la economía," *El Universo*, 17 octubre 2021.
- [3] V. Rueda Ayala, "Agricultura de Precisión como herramienta para el Desarrollo de la Agricultura en el Ecuador," *ECUADOR ES CALIDAD: Revista Científica Ecuatoriana*, vol. 1, no. 1, p. 14, 2015.
- [4] A. Guntoju and S. Udayan, "LEVERAGING INTERNET OF THINGS (IOT): A COMPARATIVE STUDY OF ISRAELI AND INDIAN FARMING PRACTICES," *International Journal of Advance & Innovative Research*, vol. 5, no. 4, pp. 190-198, 2018.
- [5] GIRNI-ESPOL, "GIRNI Grupo de Investigación de Redes de Información Inalámbricas," GIRNI, 9 octubre 2021. [Online]. Available: <http://blog.espol.edu.ec/girni/>. [Accessed 10 octubre 2021].
- [6] D. Ndzi, H. Azizi, F. Ramli, M. Kamarudin, A. Zakaria, A. Y. Shakaff, M. Jaafar, S. Zhou and R. Farook, "Wireless sensor network coverage measurement and planning in mixed crop farming," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 105, no. 1, pp. 83-94, 2014.
- [7] A. Rahman and M. Suryanegara, "The Development of IoT LoRa: A Performance Evaluation on LoS and Non-LoS Environment at 915 MHz ISM Frequency," in *2017 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, Bali, 2017.
- [8] Diario La Hora, «Ecuador está lejos de su potencial agrícola,» *La Hora*, 19 Octubre 2021.
- [9] A. Shrestha and L. Xing, "A Performance Comparison of Different Topologies for Wireless Sensor Networks," in *2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Sardinia, 2013.
- [10] Z. Fang, Z. Zhao, D. Geng, Y. Xuan, L. Du and X. Cui, "RSSI variability characterization and calibration method in wireless sensor network," in *The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, Harbin, 2010.
- [11] A. Kurtoglu, J. Carletta and K.-S. Lee, "Energy Consumption in Long-Range Linear Wireless Sensor Networks using LoRaWan and ZigBee," in *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Boston, 2017.

- [12] X. Dong, M. Vuran and S. Irmak, "Autonomous precision agriculture through integration of underground sensor networks with center pivot irrigation systems," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 7, pp. 1975-1987, 2012.
- [13] P. Andrade-Sanchez, F. J. Pierce and T. V. Elliot, "Performance Assessment of Wireless Sensor Networks in Agricultural Settings," Minneapolis, 2007.
- [14] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen and M. Pettissalo, "On the Coverage of LPWANs: Range and Channel Attenuation Model for LoRa Technology," in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Copenhagen, 2015.
- [15] N. Sabri, S. A. Aljunid, M. S. Salim, R. Kamaruddin, R. B. Ahmad and M. F. Malek, "Path Loss Analysis of WSN Wave Propagation in Vegetation," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 423, no. 1, pp. 1-8, 2013.
- [16] Z. Hong, L. Shuang, Z. Limin and Y. Lu, "Modeling and validation on path loss of WSN in pig breeding farm," *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 205-212, 2017.
- [17] M. Malajner, K. Benkic, P. Planinsic and Z. Cucej, "The Accuracy of Propagation Models for Distance Measurement between WSN Nodes," in *2009 16th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, Chalkida, 2009.
- [18] A. Gupta, H. Gupta, P. Kumari, R. Mishra, S. Saraswat and T. Dutta, "A Real-time Precision Agriculture Monitoring System using Mobile Sink in WSNs," in *2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, Indore, 2018.
- [19] J. Xia, Z. Tang, X. Shi, L. Fan and H. Li, "An environment monitoring system for precise agriculture based on wireless sensor networks," in *2011 Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, Beijing, 2011.
- [20] S. Luo, N. Polu, Z. Chen and J. Slipp, "RF Channel Modeling of a WSN Testbed for Industrial Environment," in *2011 IEEE Radio and Wireless Symposium*, Phoenix, 2011.
- [21] L. Xiamoin, Z. Ying, L. Xiwen, L. Teng, L. Yongxin and K. Qingjun, "Experiment of propagation characteristics based on 433MHz channel of WSN in orchid greenhouse," *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 29, no. 13, pp. 182-189, 2013.
- [22] A. Islam, K. Akter, N. J. Nipu, A. Das, M. Rahman and M. Rahman, "IoT Based Power Efficient Agro Field Monitoring and Irrigation Control System: An Empirical Implementation in Precision Agriculture," in *2018 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*, Chittagong, 2018.

- [23] W. Zhang, Y. He, F. Liu, C. Miao, S. Sun, C. Liu and J. Jin, "Research on WSN Channel Fading Model and Experimental Analysis in Orchard Environment," *Computer and Computing Technologies in Agriculture V*, vol. 369, no. 5, pp. 326-333, 2012.
- [24] R. Gomes, G. Rocha, A. Lima, I. Fonseca and M. Alencar, "Distributed Approach for Channel Quality Estimation Using Dedicated Nodes in Industrial WSN," in *2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Washington, 2014.
- [25] A. Harun, A. Shakaff, A. Zakaria, L. Kamarudin, M. Jaafar and D. Ndzi, "Wireless Sensor Networks Mapping and Deployment in Tropical Precision Farming," in *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling & Simulation*, Langkawi, 2011.
- [26] H. M. Jawad, A. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, N. F. Abdullah, M. Ismail and M. J. Abu-AlShaeer, "Accurate Empirical Path-loss Model Based on Particle Swarm Optimization for Wireless Sensor Networks in Smart Agriculture," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 552 - 561, 2019.
- [27] H. Liu, Z. Meng and Y. Shang, "Sensor Nodes Placement for Farmland Environmental Monitoring Applications," in *2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Beijing, 2009.
- [28] M. A. Matin, *Wireless Sensor Networks - Technology and Protocols*, Rijeka: InTech, 2012.
- [29] S. Sharma, D. Kumar and K. Kishore, "Wireless Sensor Networks-A Review on Topologies and Node Architecture," *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 19-25, 2013.
- [30] B. S. Chaudhari and M. Zennaro, *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, London: Elsevier, 2020.
- [31] P. Seneviratne, *Beginning LoRa Radio Networks with Arduino*, Mulleriyawa: Apress, 2019.
- [32] LoRa Alliance, "RP002-1.0.0 LoRaWAN Regional Parameters," LoRa Alliance, Inc, Fremont, 2019.
- [33] GIRNI-ESPOL, "LoRa 915MHz módulos," GIRNI, 12 Enero 2021. [Online]. Available: <http://blog.espol.edu.ec/girni/lora-915mhz-modulos/>. [Accessed 30 Noviembre 2021].
- [34] Heltec Automation, "CubeCell GPS-6502," Heltec Automation, 30 Abril 2020. [Online]. Available: <https://heltec.org/project/htcc-ab02s/>. [Accessed 30 Noviembre 2021].
- [35] Heltec Automation, "WiFi LoRa 32 (V2)," Heltec Automation, 17 Abril 2018. [Online]. Available: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>. [Accessed 30 Noviembre 2021].

- [36] Heltec Automation, "HT-M01 Mini LoRa Gateway," Heltec Automation, 25 April 2019. [Online]. Available: <https://heltec.org/project/ht-m01/>. [Accessed 30 Noviembre 2021].
- [37] R. K. Krane, Propagation Handbook for Wireless Communication System Design, CRC Press, 2003.
- [38] D. M. Dobkin, RF Engineering for Wireless Networks- Hardware, Antennas, and Propagation, Elsevier, 2005.
- [39] J. S. Seybold, Introduction to RF Propagation, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [40] TEKON ELECTRONICS, "Line of Sight - The Real Range of Wireless Communications," [Online]. Available: <https://www.tekonelectronics.com/download.php?fd=61&l=en&key=350e47f96d4e34728077ff8b2ef25416>. [Accessed 2021].
- [41] N. Sabri, S. A. Aljund, M. S. Salim, R. Kamaruddin, R. B. Ahmad and M. F. Malek, "Path Loss Analysis Wave Propagation in Vegetation," in International Conference on Science & Engineering in Mathematics (ScieTech 2013), Jakarta, 2013.
- [42] Global and L-Com, "WiFi Antenna Installation Best Practices - Design Guide," 2011. [Online]. Available: <http://www.chinetco.com/antenna/antenna/wifi%20antenna%20installation%20best%20practices.pdf>. [Accessed 2021].
- [43] S. R. Saunders and A. Aragón Zavala, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Segunda ed., John Wiley & Sons, Ltd, 2007, p. 71.
- [44] E. Joseph Billo, Excel for Scientists and Engineers-Numerical Methods, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [45] T. T. Soong , Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers, John Wiley & Sons, 2004.
- [46] Y. Chen, Introduction to Programming Languages, Kendall Hunt, 2020.
- [47] Developer Nation, "State of the Developer Nation 21st Edition - Q3 2021," 29 Octubre 2021. [Online]. Available: <https://www.developernation.net/resources/reports/state-of-the-developer-nation-q3-2021>. [Accessed 4 Diciembre 2021].
- [48] D. Flanagan, JavaScript: The Definitive Guide, Sebastopol: O'Reilly, 2011.
- [49] J. Chan, Learn Python in One Day and Learn It Well Python for Beginners with Hands-on Project The only book you need to start coding in Python immediately, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014.

- [50] L. Lemay and C. L. Perkins, Teach Yourself JAVA in 21 Days, Indianapolis: Sams.net, 1996.
- [51] T. Parr, "Introduction to Java," 4 Septiembre 2003. [Online]. Available: <https://www.cs.usfca.edu/~parrt/doc/java/>. [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [52] U. Kirch-Prinz and P. Prinz, A Complete Guide to Programming in C++, London: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 2002.
- [53] B. Stroustrup, "An Overview of the C++ Programming Language," 12 Enero 1998. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/2334185\\_An\\_Overview\\_of\\_the\\_C\\_Programming\\_Language](https://www.researchgate.net/publication/2334185_An_Overview_of_the_C_Programming_Language). [Accessed 28 Noviembre 2021].
- [54] K. Tatroe and P. MacIntyre, Programming PHP Creating Dynamic Web Pages, Sebastopol: O'Reilly, 2020.
- [55] I. Griffiths, Programming C# 8.0 Build Cloud, Web, and Desktop Applications, Sebastopol: O'Reilly, 2020.
- [56] A. V. Deshmukh, Microcontrollers Theory and Applications, Pune: Tata McGraw-Hill, 2005.
- [57] M. Maksimović, V. Vujović, N. Davidović, V. Milošević and B. Perišić, "Raspberry Pi as Internet of Things hardware: Performances and Constraints," in IcETAN 2014, Vrnjačka Banja, 2014.
- [58] Raspberry Pi, "Raspberry Pi 3 Model B," Raspberry Pi, 28 Noviembre 2021. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>. [Accessed 28 Noviembre 2021].
- [59] Raspberry Pi, "Raspberry Pi Zero," Raspberry Pi, 28 Noviembre 2021. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero/>. [Accessed 28 Noviembre 2021].
- [60] Arduino, "What is Arduino?," Arduino, [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>. [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [61] Arduino, "Arduino Uno Rev3," Arduino, [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/>. [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [62] Arduino, "Arduino Nano," Arduino, [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>. [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [63] Arduino, "Arduino Mega 2560 Rev3," Arduino, [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>. [Accessed 5 Diciembre 2021].

- [64] Espressif Systems, "ESP32 Series," 15 Octubre 2021. [Online]. Available: [https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents?keys=&field\\_type\\_tid%5B%5D=492&field\\_type\\_tid%5B%5D=14&field\\_download\\_document\\_type\\_tid%5B%5D=510](https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents?keys=&field_type_tid%5B%5D=492&field_type_tid%5B%5D=14&field_download_document_type_tid%5B%5D=510). [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [65] Electrónica I+D, "Tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM-32D," Plastimedia.Studio, 5 Diciembre 2021. [Online]. Available: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/bluetooth/tarjeta-de-desarrollo-esp32-wroom-32d-tarjetas-modulos-de-desarrollo-con-de-wifi-y-bluetooth-esp32u-con-conector-u-fl-tarjeta-comunicaci%C3%B3n-wi-fi-bluetooth-esp32u-iot-esp32-node>. [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [66] B. C. Patel, G. R. Sinha and N. Goel, "Introduction to sensors," 21 Noviembre 2020. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/347050409\\_Introduction\\_to\\_sensors#:~:text=A%20sensor%20is%20a%20device,such%20as%20current%20or%20voltage..](https://www.researchgate.net/publication/347050409_Introduction_to_sensors#:~:text=A%20sensor%20is%20a%20device,such%20as%20current%20or%20voltage..) [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [67] D. Gupta, "hackster.io," Hackster, 12 Julio 2018. [Online]. Available: <https://www.hackster.io/devashish-gupta/capacitive-v-s-resistive-soil-moisture-sensor-e241f2>. [Accessed 30 Noviembre 2021].
- [68] A. Salamat, "A Comparative Study of Resistive and Capacitive Humidity Sensor," *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 2, no. 6, pp. 231-236, Junio 2015.
- [69] ICStation, "ICStation Resistive Soil Moisture Sensor with Corrosion Resistant Probe," [Online]. Available: <https://www.amazon.com/dp/B076DDWDJK>. [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [70] H. Kahraman, "Academia.edu," 12 Abril 2020. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/17666183/OPEN\\_LOOP\\_vs\\_CLOSED\\_LOOP\\_CONTROL\\_SYSTEMS\\_EXPERIMENT\\_REPORT](https://www.academia.edu/17666183/OPEN_LOOP_vs_CLOSED_LOOP_CONTROL_SYSTEMS_EXPERIMENT_REPORT). [Accessed 30 Noviembre 2021].
- [71] S. Nortcliff, H. Hulpke, C. G. Bannick, K. Terytze, G. Knoop, M. Bredemeier and H. Schulte-Bisping, "Soil, Definition, Function, and Utilization of Soil," 10 Diciembre 2006. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/227557214\\_Soil\\_Definition\\_Function\\_and\\_Utilization\\_of\\_Soil](https://www.researchgate.net/publication/227557214_Soil_Definition_Function_and_Utilization_of_Soil). [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [72] S. D. Kalev and G. S. Toor, "The Composition of Soils and Sediments," in *Green Chemistry*, Wimauma, Elsevier Inc., 2018, pp. 339-357.
- [73] M. B. Jones, *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis (Second Edition)*, Pergamon: Pergamon Press, 1985.
- [74] G. P. Petropoulos, H. M. Griffiths, W. Dorigo, A. Xaver and A. Gruber, "TU WIEN DEPARTMENT OF GEODESY AND GEOINFORMATION," 13 Diciembre 2018.

[Online]. Available: <https://www.geo.tuwien.ac.at/downloads/wd/book/>. [Accessed 30 Noviembre 2021].

- [75] D. K. Cassel and D. R. Nielsen, *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5.1, Second Edition, Madison: American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc., 1986.
- [76] J. Tolk, "Soils, Permanent Wilting Points," 9 Enero 2003. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/43255754\\_Soils\\_Permanent\\_Wilting\\_Points](https://www.researchgate.net/publication/43255754_Soils_Permanent_Wilting_Points). [Accessed 29 Noviembre 2021].
- [77] B. Leib and N. Bumgarner, "Basics of Irrigation and Introduction to Systems and Management in the Residential Landscape," 13 Abril 2020. [Online]. Available: [https://extension.tennessee.edu/publications/Documents/Forms/AllItems.aspx?Paged=TRUE&p\\_FileLeafRef=W858%2dC%2epdf&p\\_ID=10410&PageFirstRow=1951&&View={992802F9-46C6-4EC6-996D-A2948EBB9D65}](https://extension.tennessee.edu/publications/Documents/Forms/AllItems.aspx?Paged=TRUE&p_FileLeafRef=W858%2dC%2epdf&p_ID=10410&PageFirstRow=1951&&View={992802F9-46C6-4EC6-996D-A2948EBB9D65}). [Accessed 5 Diciembre 2021].
- [78] R. M. Hagan, H. R. Haise and T. W. Edminster, *Irrigation of Agricultural Lands*, Volume 11, Madison: American Society of Agronomy, Inc., 1967.
- [79] S. H. Amosson, L. New, L. Almas, F. Bretz and T. Marek, *Economics of Irrigation Systems*, College Station: Texas A&M System, 2002.
- [80] T. M. Elheesin Shareef and Z. Ma, "Essentials of Drip Irrigation System for Saving Water and Nutrients to Plant Roots: As a Guide for Growers," *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 11, no. 9, pp. 1129-1145, 2019.