

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Diseño y planificación de una red LORAWAN de sensores para control de riego en cultivos de cacao durante el verano

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Telecomunicaciones**

Presentado por:

Pablo Fernando Eras Caraguay

Harold Arnaldo Figueroa Velasco

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2022

## **DEDICATORIA**

A mis padres quienes han sido el pilar fundamental para mi desarrollo ético, moral y profesional, a ellos les debo todos mis logros, ya que siempre han estado a mi lado dándome el impulso y la motivación para culminar mis estudios y ser un gran profesional. A mis hermanas y a todos los que de alguna manera aportaron con sus consejos durante mi proceso de formación y creyeron siempre en mí.

**Harold Arnaldo Figueroa Velasco**

A mis padres cuyo amor, esfuerzo y enseñanzas que me han inculcado, me han permitido salir adelante en mi vida, logrando así poder culminar unas etapas más importantes. A mis hermanos y abuelas cuyo apoyo y consejos me han servido de guía a lo largo de mi vida.

**Pablo Fernando Eras Caraguay**

# **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco de manera especial a Dios y a mi familia por ser mi principal motivación y apoyo moral a lo largo de la etapa universitaria, y por supuesto a todos aquellos profesores, tutores y ayudantes de los cuales no solo adquirí conocimiento científico, sino también aprendí muchos valores y experiencias profesionales.

**Harold Arnaldo Figueroa Velasco**

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres que, gracias a su amor y sacrificio, me han dado la fuerza de salir adelante en mis estudios. A mis hermanos por su estar siempre presentes y apoyándome. Agradecer a mis abuelas, que siempre han estado apoyándome y motivándome durante esta etapa académica. Finalmente agradecer a aquellos docentes y amigos que me brindaron su ayuda durante mi carrera universitaria.

**Pablo Fernando Eras Caraguay**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Pablo Fernando Eras Caraguay* y *Harold Arnaldo Figueroa Velasco* 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”

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'P' and 'E' followed by a horizontal line, all enclosed within a dashed oval.

Pablo Fernando Eras Caraguay

**AUTOR**

A handwritten signature in black ink, written in a cursive style, with the name 'Harold Arnaldo Figueroa Velasco' clearly legible, positioned above a horizontal dotted line.

Harold Arnaldo Figueroa Velasco

**AUTOR**

# TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Firmado electrónicamente por:  
**BORIS GABRIEL  
RAMOS SANCHEZ**

---

**M.Sc. Jorge Brito Collantes**  
PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Ph. D. Boris Ramos Sánchez**  
PROFESOR TUTOR ACADÉMICO

## RESUMEN

La poca disponibilidad de agua durante las épocas de estiaje, provocan una baja producción del cacao debido a que no hay un control preciso a la hora de suministrar el agua en los cultivos, dado que los sistemas de riego funcionan manualmente mediante el uso de válvulas. El presente proyecto pretende diseñar y planificar una red LoRaWAN para el despliegue de sensores en la Granja ESPOL que puedan operar en base a dicha tecnología LoRa, la cual será adaptada a un sistema de riego tradicional de micro-aspersores que funcione en base a los parámetros de humedad del suelo y así controlar el riego de agua en cultivos de cacao durante el verano. Se realizaron mediciones de RSSI para determinar la cobertura de la hectárea de cacao en la que se trabajó. Como resultados se obtuvieron diferentes modelos de propagación para diferentes alturas que pueda tomar un nodo sensor en el cultivo, considerando la vegetación silvestre de la zona y de los desniveles del terreno en cuestión. Una vez establecida la cobertura, se procedió a condicionar la activación de una electroválvula que permita el flujo de agua de acuerdo a las lecturas de porcentaje de humedad del suelo. En base al despliegue de la WSN (Wireless Sensor Networks), los resultados de RSSI permitieron establecer los modelos de propagación experimental de la zona estudiada, además, se pudo evidenciar que el sensor capacitivo presenta una mejor respuesta ante los estados de humedad del suelo.

**Palabras Clave:** WSN, LoRaWAN, Propagación, Electroválvula.

## **ABSTRACT**

The low availability of water during the dry season causes low cocoa production because there is no precise control when supplying water to the crops, due to the fact that the irrigation systems operate manually by using valves. This project aims to design and plan a LoRaWAN network for the deployment of sensors in the ESPOL Farm that can operate based on this LoRa technology, which will be adapted to a traditional micro-sprinkler irrigation system that works based on soil moisture parameters and thus control the irrigation of water in cocoa crops during the summer. RSSI measurements were performed to determine the coverage of the hectare of cocoa in which the work was carried out. As results, different propagation models were obtained for different heights that a sensor node can take in the crop, considering the wild vegetation of the area and the unevenness of the terrain in question. Once the coverage was established, the activation of a solenoid valve was conditioned to allow the flow of water according to the soil moisture percentage readings. Based on the deployment of the WSN, the RSSI results allowed to establish the experimental propagation models of the studied area, in addition, it could be evidenced that the capacitive sensor presents a better response to soil moisture conditions.

**Keywords:** WSN, LoRaWAN, Propagation, Solenoid valve.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del problema .....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General .....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 MARCO TEÓRICO .....	4
1.4.1 ¿Qué es un sistema de riego? .....	4
1.4.2 Tipos de sistemas de riego .....	5
1.4.3 ¿Qué es una comunicación inalámbrica? .....	6
1.4.4 ¿Qué es una red inalámbrica? .....	6
1.4.5 ¿Qué es una red de sensores inalámbricos (WSN)? .....	7
1.4.6 Regulaciones y estándares de las WSN .....	7
1.4.7 Tipos de redes inalámbricas .....	8
1.4.8 ¿Qué es en modelo de propagación? .....	10
1.4.9 Estado del Arte .....	11
CAPÍTULO 2.....	13
2. Metodología.....	13
2.1 Justificación de la solución .....	13
2.2 Planteamiento de la solución.....	14
2.3 Recolección y procesamiento de datos .....	16
2.4 Descripción del área de estudio .....	20
2.4.1 Ubicación y extensión .....	20
2.5 Recopilación de información.....	22
2.5.1 Topografía.....	22
2.5.2 Fuente de Agua .....	27
2.5.3 Suelos.....	29
2.5.4 Data Climática.....	30
2.6 Diseño de la solución .....	31
2.6.1 Nodos sensores de humedad del suelo .....	31
2.6.2 Actuador.....	32

2.7	Materiales.....	33
2.7.1	Módulo HELTEC CUBECCELL AB-01 (HTCC-AB01) .....	33
2.7.2	SENSOR DE HUMEDAD CONDUCTIVO (MODELO HD-38).....	34
2.7.3	SENSOR DE HUMEDAD CAPACITIVO .....	35
2.7.4	MODULO DE CARGA TP4560 .....	36
2.7.5	Panel solar 5V.....	36
2.7.6	BATERÍA LI-ION ULTRAFIRE 18650 3.7V 4800mAH .....	37
2.7.7	RELÉ 5V – CANAL 1 .....	37
2.7.8	Diodo 1N4007.....	38
2.7.9	Electroválvula.....	39
2.8	Marco Regulatorio .....	39
CAPÍTULO 3.....		42
3.	Resultados Y ANÁLISIS .....	42
3.1	Comparativa RSSI de los rayos.....	43
3.1.1	Resultados RSSI.....	43
3.1.2	Graficas comparativas de RSSI por altura .....	52
3.1.3	Gradientes parciales por altura .....	54
3.1.4	Gradientes Totales por altura.....	81
3.1.5	Comparación del modelo de propagación con modelos empíricos y semi-empíricos .....	87
3.2	Resultados de la implementación del prototipo .....	104
3.2.1	Sensores de humedad de suelo .....	104
3.2.2	Lecturas de humedad del suelo en laboratorio .....	105
3.2.3	Resultados de humedad .....	106
3.2.4	Resultados del funcionamiento del actuador .....	108
3.3	Análisis de costos.....	110
CAPÍTULO 4.....		113
4.	Conclusiones Y Recomendaciones .....	113
4.1	Conclusiones.....	113
4.2	Recomendaciones.....	115

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1-Riego por goteo.....	5
Figura 1.2-Riego por microaspersión.....	5
Figura 1.3-Tipos de comunicaciones inalámbricas.....	6
Figura 1.4-Red inalámbrica .....	6
Figura 1.5-Red LoRaWAN.....	9
Figura 1.6-Red LoRaWAN en campo agrícola .....	9
Figura 1.7 Red Wifi.....	10
Figura 2.1-Diagrama de bloques de la solución .....	14
Figura 2.2-Acceso mediante SSH .....	16
Figura 2.3-Archivo database de Home Assistant.....	16
Figura 2.4-Diagrama de Bloques de la solución .....	17
Figura 2.5-Valor almacenados en la categoría “states” .....	17
Figura 2.6-Exportacion de los datos almacenados en “states” .....	18
Figura 2.7-Archivo JSON.....	18
Figura 2.8-Algoritmo para lectura de archivos.json .....	19
Figura 2.9-Archivo CSV .....	19
Figura 2.10-Datos en CSV.....	19
Figura 2.11- Imagen satelital de las vías de acceso a la Granja Espol .....	21
Figura 2.12- Imagen satelital del área de cultivo destinada al proyecto en la Granja Espol .....	22
Figura 2.13- Granja Experimental Agrícola (GEA).....	22
Figura 2.14- Cultivo de cacao a trabajar.....	23
Figura 2.15 – Gateway LoRaWAN .....	23
Figura 2.16 – WSN en el cultivo de cacao.....	24
Figura 2.17 – Perfil de nivelación del Rayo A.....	24
Figura 2.18 – Perfil de nivelación del Rayo B.....	25

Figura 2.19 – Perfil de nivelación del Rayo C.....	25
Figura 2.20 – Distanciamiento de los nodos.....	26
Figura 2.21-Lago Artificial ESPOL.....	27
Figura 2.22-Sistema de Riego (NETAFIM).....	28
Figura 2.23-Bombas para el riego.....	28
Figura 2.24-Temporizador de riego.....	28
Figura 2.25- Especie de plantas para sobra más común (plátano).....	30
Figura 2.26- Sensor de humedad del suelo conductivo.....	31
Figura 2.27- Sensor de humedad del suelo capacitivo.....	32
Figura 2.28- Sensor Actuador.....	32
Figura 2.29-Modulo HTCC-AB02.....	33
Figura 2.30-Sensor de Humedad HD-38.....	35
Figura 2.31 Sensor de Humedad Capacitivo.....	35
Figura 2.32- Modulo de carga TP4560.....	36
Figura 2.33- Panel Solar.....	36
Figura 2.34 - Batería Li-ion ULTRAFIRE.....	37
Figura 2.35- Modulo Relé - 1 Canal.....	38
Figura 2.36- Diodo 1N4007.....	38
Figura 2.37- Electroválvula.....	39
Figura 3.1 – Ubicación de los rayos y nodos en el Google Earth Pro.....	42
Figura 3.2 – RSSI vs Distancia de zona sin cultivo cacao.....	43
Figura 3.3 – RSSI vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 0.5m.....	44
Figura 3.4 – RSSI vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 0.5m.....	45
Figura 3.5 – RSSI vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m.....	45
Figura 3.6 – Perfil de elevación para el rayo A.....	46
Figura 3.7 – RSSI vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 0.5m.....	47

Figura 3.8 – RSSI vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 1m .....	47
Figura 3.9 – RSSI vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m .....	48
Figura 3.10 – Perfil de elevación para el rayo B .....	49
Figura 3.11 – RSSI vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 0.5m .....	49
Figura 3.12 – RSSI vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 1m .....	50
Figura 3.13 – RSSI vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m .....	50
Figura 3.14 – Perfil de elevación para el rayo C .....	51
Figura 3.15 – RSSI vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 0.5m .....	52
Figura 3.16 – RSSI vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 1m .....	53
Figura 3.17 – RSSI vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 2m .....	53
Figura 3.18 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 0.5m.....	54
Figura 3.19 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 0.5m.....	56
Figura 3.20 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 1m.....	57
Figura 3.21 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 1m.....	58
Figura 3.22 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m.....	59
Figura 3.23 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes .....	60
Figura 3.24 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m.....	61
Figura 3.25 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes .....	62
Figura 3.26 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 0.5m.....	63

Figura 3.27 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 0.5m.....	64
Figura 3.28 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 1m.....	65
Figura 3.29 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 1m.....	66
Figura 3.30 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m.....	67
Figura 3.31 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes.....	68
Figura 3.32 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m.....	69
Figura 3.33 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes.....	70
Figura 3.34 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia Logarítmica del Rayo C con nodos a una altura de 0.5m.....	71
Figura 3.35 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 0.5m.....	72
Figura 3.36 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 1m.....	73
Figura 3.37 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 1m.....	74
Figura 3.38 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m.....	75
Figura 3.39 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes.....	76
Figura 3.40 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m.....	77

Figura 3.41 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes .....	78
Figura 3.42 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 0.5m.....	81
Figura 3.43 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 0.5m.....	82
Figura 3.44 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 1m.....	83
Figura 3.45 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 1m.....	84
Figura 3.46 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 2m.....	85
Figura 3.47 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 2m.....	86
Figura 3.48 – Tabla de valores en el programa JMP .....	88
Figura 3.49 – Correlación de RSSI UP y logaritmo de la distancia – Modelo semi-empírico .....	88
Figura 3.50 – Correlación de RSSI DOWN y logaritmo de la distancia – Modelo semi-empírico.....	89
Figura 3.51 – Correlación de RSSI UP y logaritmo de la distancia – Modelo empírico .	91
Figura 3.52 – Correlación de RSSI DOWN y logaritmo de la distancia – Modelo empírico .....	91
Figura 3.53 – Modelo multi-gradiente a 0.5m de altura vs modelo empírico y semi-empírico.....	92
Figura 3.54 – Modelo multi-gradiente a 1m de altura vs modelo empírico y semi-empírico .....	93
Figura 3.55 – Modelo multi-gradiente a 2m de altura vs modelo empírico y semi-empírico .....	94

Figura 3.56 – Errores porcentuales promedios con modelos de propagación a 0.5m de altura.....	97
Figura 3.57 – Comparación de RSSI en los modelos de propagación a 0.5m de altura	97
Figura 3.58 – Errores porcentuales promedios con modelos de propagación a 1m de altura.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura 3.59 – Comparación de RSSI en los modelos de propagación a 1m de altura .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura 3.60 – Errores porcentuales promedios con modelos de propagación a 2m de altura.....	103
Figura 3.61 – Comparación de RSSI en los modelos de propagación a 2m de altura .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura 3.62 – Nodos de humedad .....	104
Figura 3.63 – Zona radicular del cacao .....	105
Figura 3.64 – Humedad recolectada por el sensor capacitivo .....	106
Figura 3.65 – Humedad recolectada por el sensor conductivo .....	107
Figura 3.66 – Sensor de humedad colocado a 50cm de una planta de cacao .....	108
Figura 3.67 – Electroválvula desactivado con suelo seco .....	109
Figura 3.68 – Electroválvula activada con suelo con demasiada humedad.....	109
Apéndice 1 – Cultivo de cacao .....	116
Apéndice 2 – Instalación de la red LoRaWAN.....	116
Apéndice 3 – Sensor para la medición de RSSI.....	116
Apéndice 4 – Cultivo de cacao .....	116
Apéndice 5 – Nodos de humedad .....	116

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1- Características del estándar IEEE 802.15.4.....	7
Tabla 1.2- Comparacion entre tecnologias inalambricas.....	8
Tabla 2.1 -Información de parámetros de diseño de la Granja Espol.....	20
Tabla 2.2 – Coordinadas del Gateway .....	23
Tabla 2.3 – Distancia desde el gateway a cada nodo sensor.....	25
Tabla 2.4 – Altura de cada nodo sobre el nivel del mar.....	25
Tabla 2.5- Especificaciones Técnica HTCC-AB01 .....	33
Tabla 2.6- Especificaciones Eléctricas HTCC-AB01.....	34
Tabla 2.7 – Especificaciones del HD-38.....	35
Tabla 2.8 – Especificaciones técnicas TP4560 .....	36
Tabla 2.9 – Especificaciones técnicas Panel Solar 5V.....	37
Tabla 2.10 – Especificaciones técnicas modulo Relé – 1 Canal.....	38
Tabla 2.11 – Especificaciones técnicas del diodo 1N4007.....	39
Tabla 2.12. Límites generales para cualquier transmisor intencional Fuente: UIT-R SM.2153-5.....	40
Tabla 3.1 – Bitácora de mediciones .....	42
Tabla 3.2 – Resumen de mediciones de la zona sin cultivo de cacao.....	44
Tabla 3.3 – Resumen de mediciones del Rayo A.....	46
Tabla 3.4 – Resumen de mediciones del Rayo B.....	48
Tabla 3.5 – Resumen de mediciones del Rayo C.....	51
Tabla 3.6 – Resumen de gradientes parciales .....	79
Tabla 3.7 – Resumen de 3 gradientes parciales a 2m .....	79
Tabla 3.8 – Resumen de gradientes totales .....	86
Tabla 3.9 – Constantes del modelo semi-empirico.....	89
Tabla 3.10 – Parámetros de ajusta del modelo semi-empirico.....	90
Tabla 3.11 – Constantes del modelo empírico .....	92

Tabla 3.12 – Parámetros de ajuste del modelo empírico.....	92
Tabla 3.13 – Resumen de valores de humedad de los nodos.....	105
Tabla 3.14 – Costos de los elementos adquiridos para una red LoRaWAN .....	110

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El cacao en el Ecuador es un producto de los más significativos del país. Antes del boom petrolero, durante casi un siglo fue la principal fuente económica del país; la mayor parte de la producción de esta fruta es destinada a ser distribuida alrededor del mercado internacional. Desde la década de los 80 ha generado importantes divisas, siendo en la actualidad el sexto producto más exportado dentro de las exportaciones no petroleras y es el principal exportador mundial de cacao fino y de aroma.

Existen dos tipos de Cacao: 1. Fino de Aroma, Nacional o sabor Arriba y 2. Cacao “al granel” o “común”, o también conocido el CCN51 “Colección Castro Naranjal 51”. La producción del Cacao en Ecuador se concentra en un 80% en las provincias de Guayas, Los Ríos, Manabí, Esmeraldas, El Oro y Santa Elena, mientras que el resto se distribuye en las provincias de Chimborazo, Bolívar, Cotopaxi, Pichincha, Azuay, Sucumbíos, Orellana, Napo y Zamora Chinchipe.

A nivel de producción nacional, la región del Guayas, donde se desarrolla el presente proyecto de tesis, es una de las zonas más importantes, representando el 28% de la producción, siendo su principal variedad cultivada la forastera CCN-51, estando las plantaciones establecidas bajo el sistema de secano (uso exclusivo de agua de lluvia). Es debido a esto, que una de las principales problemáticas de los productores en esta locación, es el déficit hídrico en los meses de estiaje o verano, ocasionado por bajas precipitaciones, situación que se viene presentando más significativamente año tras año a consecuencia de escenarios globales como el cambio climático y locales como la deforestación de áreas. Esta situación, afecta directamente la floración y el brote de hojas jóvenes; convirtiéndose en un limitante dentro del ciclo productivo, con repercusión en rendimientos.

### 1.1 Descripción del problema

El presente proyecto busca dar una demostración de la solución a la empresa FIGCONSUL S.A, cuyo problema principal es la poca disponibilidad de agua durante las

épocas de estiaje, provocando una baja producción del cacao debido a que no hay un control preciso a la hora de suministrar el agua en los cultivos, dado que el sistema de riego instalado funciona manualmente mediante el uso de válvulas. El manejo de este recurso y de otros utilizados en la agricultura del cacao y que son de aplicación manual, pretenden ser optimizados mediante el estudio de los datos arrojados por herramientas de medición de parámetros como la humedad en el suelo.

El escenario en el que se llevará a cabo el diseño y planificación de la red de sensores será en la granja de cultivos de la ESPOL, debido a que cuenta con condiciones de suelo similares a la de los predios del cliente ubicado en la parroquia Sabanilla del cantón Pedro Carbo. Este cultivo experimental cuenta con un sistema de riego por micro aspersión previamente instalado, con la diferencia de que la granja posee una superficie irregular en comparación con el terreno del cliente que no cuenta con alteraciones en el nivel del suelo, pero de todas formas estos resultados experimentales sirven para poder demostrar que el sistema de riego controlado por sensores es capaz de funcionar eficientemente en cualquier condición de terreno.

## **1.2 Justificación del problema**

El desarrollo de este proyecto cuenta con el objetivo de hacer agricultura de precisión mediante la ayuda de una serie de herramientas que permitan mejorar la eficiencia en el proceso de cultivo y la optimización del suministro de agua; para esto se presenta una posible solución de del diseño y planificación de una red inalámbrica, donde se desplegarán dispositivos en puntos de alto interés dentro de los cultivos de cacao, cuya finalidad será recabar la información del suelo y del ambiente mediante sensores de humedad. El emplear tecnología inalámbrica implica muchos beneficios dado que, es de instalación fácil y sencilla, provee de una mayor cobertura sin la necesidad del uso de cables haciéndola ideal para zonas agrícolas en donde no existen algún tipo de cableado, además que es escalable, permitiendo añadir cada vez más dispositivos en el terreno y ser conectados a la red sin ningún inconveniente.

Cada cultivo tiene su propia necesidad de agua para el desarrollo, por lo que el riego debe ser aplicado con una mayor eficacia. Para esto se proponen alternativas orientadas a las tecnologías actuales, como por ejemplo el riego por programación de

autocontrol, los cuales se ejecutan de forma automática en base a parámetros de control (humedad, temperatura, entre otros) y sean estos los que le permitan al sistema tomar decisiones de riego en tiempo real.

La planificación de la red de sensores del presente proyecto busca el desarrollo de un mapa de cobertura empleando modelos de propagación que utilizan gradientes o múltiples gradientes, dado que, a partir de los mismos, se va a recolectar datos a través de una tecnología de comunicación inalámbrica, por lo cual es importante que la distribución de los nodos en el terreno sea óptima junto con una buena cobertura de la red, tratando de abarcar una mayor distancia del cultivo y que la ubicación sea en puntos en donde el terreno presente condiciones heterogéneas de humedad, los cuales son el punto de estudio primordial del presente proyecto. Al tratarse de terreno de dimensiones extensas, se propone usar varios nodos (al menos 4 por hectárea), dado que, al recabar más información y tener más variables en consideración, mayor será la precisión y un funcionamiento óptimo del riego.

El presente proyecto también busca tener un alcance para fincas o haciendas de pequeños y medianos agricultores, los cuales no cuentan con los mismos recursos de grandes compañías dedicadas a la agricultura, pero pueden emplear infraestructuras cercanas a la finca o hacienda, como el uso de casas, postes de luz o estructuras con buena altitud para la colocación de un Gateway. La utilización de estos recursos tiene como finalidad minimizar la inversión, en lugar de invertir en construcciones de torres dedicadas como es en el caso de grandes empresas que necesitan cubrir extensos terrenos.

Aunque hoy en día las explotaciones de estas herramientas tecnológicas todavía generan escepticismos en la comunidad agrícola, se requiere de demostraciones para poder presentar estas posibles soluciones y seguir mejorando su uso, principalmente para los cultivos de exportación de cacao donde se requiere de una mayor calidad en el producto final, para lo cual es necesario mejorar con precisión los requerimientos de la planta del cacao durante su desarrollo. Además, se debe tener en cuenta que los medianos y pequeños agricultores poseen escasos conocimientos técnicos, por lo que el proyecto se enfoca en que la solución sea lo más automatizada e interactiva posible,

para que los agricultores puedan manejar el riego sin tanto conocimiento técnico, como por ejemplo en el caso de una casa domótica.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Diseñar y planificar una red LoRaWAN para el despliegue de sensores para controlar la poca disponibilidad de agua en cultivos de cacao durante el verano.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Estimar la cobertura del sistema y distribución óptima de los sensores en base a modelos de propagación de gradientes.
- Analizar los escenarios de propagación en base a la altura de las antenas de los nodos, altura del cultivo, densidad del cultivo, humedad del suelo y otros parámetros ambientales.
- Elaborar el presupuesto del proyecto y analizar la rentabilidad del mismo.
- Implementar un prototipo de dispositivo que controle el riego del cultivo en base a las lecturas de la red de sensores.

### **1.4 MARCO TEÓRICO**

#### **1.4.1 ¿Qué es un sistema de riego?**

Un sistema de riego es de gran importancia para el cultivo de plantaciones, dado que este es el encargado de suministrar el agua para la sobrevivencia del cultivo. Antes de implementar cualquier tipo de sistema de riego, es necesario saber cuál es el más idóneo para el tipo de cultivo que se está sembrando, y además se considerar cual es el más conveniente para el terreno. [1]

## 1.4.2 Tipos de sistemas de riego

### 1.4.2.1 Sistema de riego por goteo

Un riego por goteo, tal como se muestra en Figura 1.1, es el más eficiente para la optimización del agua, dado que el suministro es constante y uniforme, permitiendo mantener el agua en la zona radicular del cultivo. Sin embargo, las limitantes son sus altos costos de implementación y su respectivo mantenimiento. [2]



Figura 1.1-Riego por goteo [25]

### 1.4.2.2 Sistema de riego por microaspersión

Un sistema de micro aspersion, tal como se observar en la Figura 1.2, posee pocos diámetros de cobertura, pero se encuentran más próximos a las raíces del cultivo, y su uso permite las disminuciones de pérdidas por escorrentía, ya que el agua es aplicada sobre una superficie limitada del terreno en forma pulverizada y se desplaza en el suelo en función de tres factores muy importantes como; las propiedades y características del perfil físico del suelo, el volumen de agua aplicado y el caudal del emisor. [3]



Figura 1.2-Riego por micro-aspersión [26]

### 1.4.3 ¿Qué es una comunicación inalámbrica?

Es el tipo de comunicación en donde no se emplea un medio de propagación físico, es decir, que se usa la modulación de ondas electromagnéticas, las cuales se propagan por el espacio sin la necesidad de un medio físico. Los únicos elementos físicos en un medio inalámbrico corresponden únicamente al transmisor y al receptor de la señal como, por ejemplo: antenas, laptops, teléfonos móviles, etc. [4], tal como se visualiza en la Figura 1.3:

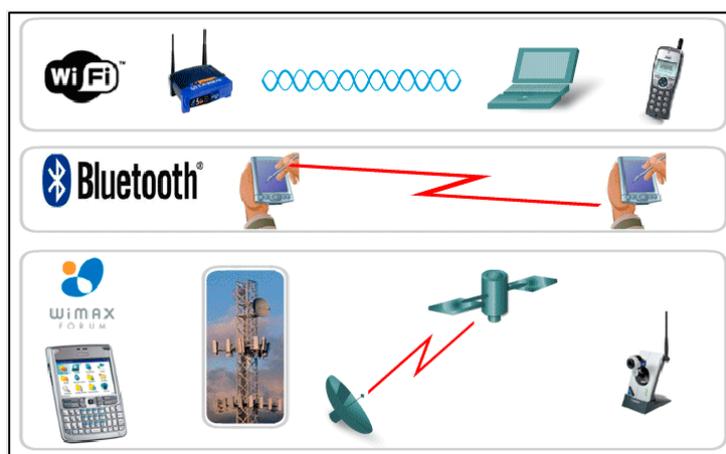


Figura 1.3-Tipos de comunicaciones inalámbricas [27]

### 1.4.4 ¿Qué es una red inalámbrica?

Es como cualquier red física implementada, pero su función es conectar a los dispositivos sin la necesidad de cables, tal como se puede observar en la Figura 1.4. Una red inalámbrica está clasificada por radios de cobertura y por rango de frecuencia. [4]



Figura 1.4-Red inalámbrica [28]

#### 1.4.5 ¿Qué es una red de sensores inalámbricos (WSN)?

Una WSN (red de sensores inalámbricos) corresponde a un conjunto de dispositivos que algunos casos cuentan con una implementación de bajo costo y de bajo consumo energético, los cuales son capaces de recopilar información de su entorno, procesarla localmente y comunicarla de manera inalámbrica a un nodo central. Esta red consta de numerosos dispositivos que se encuentran distribuidos en un área específica, y los cuales pueden controlar parámetros como temperatura, sonido, vibraciones, presión, movimiento, entre otros. [5]

#### 1.4.6 Regulaciones y estándares de las WSN

Los estándares inalámbricos más conocidos son para redes LAN el IEEE 802.11b (WIFI), para redes PAN, el protocolo IEEE 802.15.1 (Bluetooth IEEE, 2002) y IEEE 802.15.4 (ZigBee IEEE, 2003). Usan las bandas ISM (Instrumentation, Scientific and Medical radio bands), 902-928 MHz (EEUU), 868-870 MHz (Europa), 433.05-434.79 MHz (EEUU y Europa) y 314-316 MHz (Japón) y la banda de GHz de 2.4 - 2.4835 GHz (Universalmente Aceptada).

Actualmente, IEEE 802.15.4 se ha convertido en un estándar que rige características de redes de bajo consumo, tales como ZigBee y 6LowPAN. Además, que la capa PHY se caracteriza por operar dentro de las bandas de frecuencia entre 868 MHz y 2.4 GHz. De este rango de frecuencias, IEEE 802.15.4 emplea tres bandas de frecuencias ISM establecidas por la ITU (Unión Internacional de Comunicaciones), tal como se observa en la Tabla 1.1:

**Tabla 1.1- Características del estándar IEEE 802.15.4 [6]**

Características	Región		
	Europa	América	Mundial
Número de canales	1	10	16
Banda de frecuencias (MHz)	868.3	902-928	2400-2438.5
Tasa de Datos (kbps)	20	40	250

Estas bandas que emplea IEEE 802.15.4 también son empleadas por otros estándares y tecnologías como LoRaWAN, WLAN (IEEE 802.11) y Bluetooth (IEEE

802.15.1). En la tabla 1.2 que se muestra a continuación se puede observar la comparativa entre estas tecnologías inalámbricas. [6]

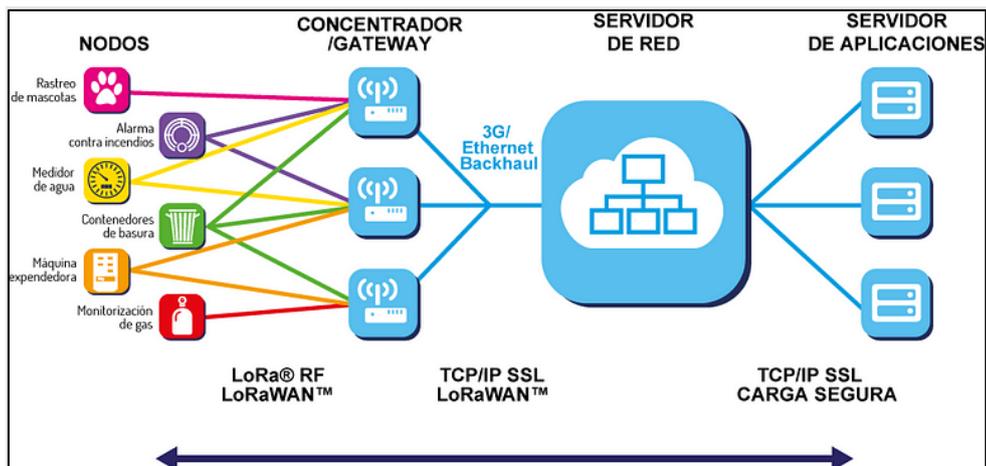
**Tabla 1.2- Comparación entre tecnologías inalámbricas [6]**

<b>Comparación entre tecnologías inalámbricas WI-FI, Bluetooth, Zigbee</b>			
	<b>WIFI (IEEE 802.311g)</b>	<b>Bluetooth (IEEE 802.15.1)</b>	<b>ZigBee (IEEE 802.15.4)</b>
<b>Radio</b>	DSSS, (Direct sequence spread spectrum)	FHSS, (frequency hopping spread spectrum)	DSSS, (Direct sequence spread spectrum)
<b>Velocidad</b>	54 Mbps	1 Mbps	250 kbps
<b>N° de nodos por master</b>	32	7	64.000
<b>Latencia</b>	Hasta 3 s	Hasta 10 s	30 ms
<b>Tipo de datos</b>	Video, audio, gráficos, películas, ficheros.	Audio, gráficos, películas, ficheros	Pequeños paquetes de datos
<b>Alcance (m)</b>	100	10 (v 1.1)	70 - 100
<b>Expansión</b>	Roaming	no	si
<b>Duración Batería</b>	12 y 48 horas	1 semana	100 – 1000 días
<b>Costo (\$)</b>	9	9	9
<b>Complejidad</b>	Complejo	Muy Complejo	Sencillo
<b>Aplicación principal</b>	WLAN	WPAN	Control y monitorización
<b>Memoria necesaria</b>	1 MB+	250 KB +	4 KB – 32 KB
<b>Parámetros más importantes</b>	Velocidad y Flexibilidad	Costes y perfiles de aplicación	Fiabilidad, Bajo consumo y bajo coste

## 1.4.7 Tipos de redes inalámbricas

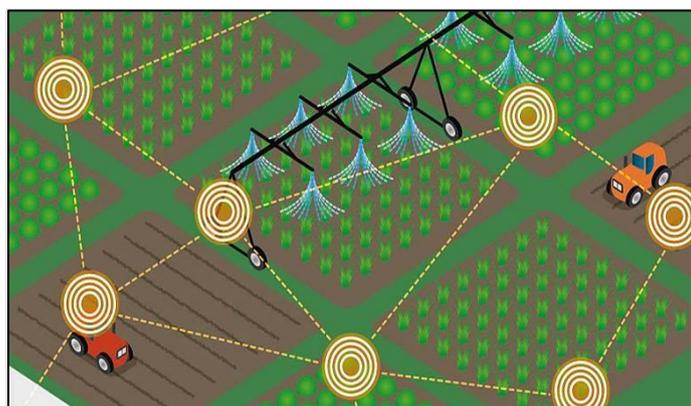
### 1.4.7.1 ¿Qué es una red LoRaWAN?

LoRaWAN es una tecnología inalámbrica la cual emplea cierto tipo de modulación en radiofrecuencia tal como se puede observar en la Figura 1.5. Las ventajas que presenta esta tecnología es que es tolerable a altas interferencias y tiene un radio de cobertura muy amplio, llegando a tener un alcance entre los 10 a 20 km de distancia. Además, que posee un bajo consumo energético, lo que le permite tener un buen rendimiento por largo tiempo.



**Figura 1.5-Red LoRaWAN [7]**

LoRaWAN es ideal para redes IoT para grandes distancias, en las que se necesiten la implementación de sensores y/o actuadores que no dispongan de un sistema eléctrico. Un ejemplo claro del uso de esta red es en lugares con poca cobertura, como lo son las zonas agrícolas o ganaderas, tal como se muestra en la Figura 1.6: [7]



**Figura 1.6-Red LoRaWAN en campo agrícola [29]**

#### 1.4.7.2 ¿Qué es una red ZigBee?

ZigBee es un estándar que define un conjunto de protocolos para el armado de redes inalámbricas de corta distancia y baja velocidad de datos. Opera en las bandas de 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz y puede transferir datos hasta 250Kbps.

La idea de usar una conexión inalámbrica para controlar sensores y adquirir datos tiene muchos años. Existen numerosas soluciones propietarias usadas en domótica, pero el gran inconveniente que tienen es la incompatibilidad entre sensores, controles y equipos de procesamiento de datos que obliga a hacer pasarelas (gateways) para

interconectar dispositivos de diferentes marcas [8]. El estándar ZigBee fue diseñado con las siguientes especificaciones:

- Ultra bajo consumo que permita usar equipos a batería
- Bajo costo de dispositivos y de instalación y mantenimiento de ellos.
- Alcance corto (típico menor a 50 metros).
- Optimizado para ciclo efectivo de transmisión menor a 0.1 %
- Velocidad de transmisión menor que 250 kbps. Típica: menor que 20 kbps.

#### 1.4.7.3 ¿Qué es una red Wifi?

Una red Wifi es el conjunto entre una red de datos fijas y dispositivos que operan de forma inalámbrica tal como se muestra en la Figura 1.8, permitiendo el acceso a Internet y el intercambio de información entre los dispositivos. La conectividad desde los dispositivos al internet se basa establecer una conexión a un punto de acceso inalámbrico (router), permitiendo que los dispositivos se conecten a la red determinada. [9]



Figura 1.7 Red Wifi [33]

#### 1.4.8 ¿Qué es un modelo de propagación?

Se considera un modelo de propagación a un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos, los cuales representan las características de radiofrecuencia en un cierto tipo ambiente. Por lo general, los modelos de propagación se clasifican en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos, o una combinación de estos dos denominado semi-empíricos. Un modelo empírico se basa en mediciones

de campo, mientras que los modelos determinísticos se basan en principios fundamentales de la propagación de ondas de radio. [10]

#### **1.4.9 Estado del Arte**

Algunos de los proyectos orientados a los riegos por programación, han buscado implementar redes de sensores a lo largo de los cultivos, como por ejemplo el proyecto “DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN WEB PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE RIEGO DE CULTIVOS MEDIANTE EL USO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS” [11], del Centro Experimental San Francisco de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi, muestra como se ha desarrollado una aplicación web para el monitoreo y el control del riego de cultivos, esto en base a sensores inalámbricos, con el fin de recabar información y poder contribuir a la optimización del agua y al desarrollo de los cultivos. Para el desarrollo de este aplicativo, los autores se han basado en un par de redes, ZigBee para la comunicación con los sensores y Wifi para el almacenamiento de datos en la Nube.

En la Universidad Técnica Estatal de Quevedo [12] se ha enfocado en proyectos orientados a los riegos inteligentes, surgiendo así el proyecto “IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE RIEGO MEDIANTE RED INALÁMBRICA DE SENSORES DE HUMEDAD”, en donde implementó un sistema de riego por aspersión cuya activación correspondía a una red de sensores inalámbricos en base a la tecnología ZigBee con el estándar IEEE 802.15.4. El presente proyecto buscaba solucionar las limitaciones de recurso hídricos dentro de la Finca “El Paraíso” para los cultivos de pimiento. Al final, los resultados del proyecto demostraron un correcto funcionamiento del sistema de riego en zonas que verdaderamente se necesitaba del riego, esto en base al censado constante de la humedad del suelo, además, que evidenció una mejora en la producción en relación al resto del cultivo en donde se realizaba un riego manual.

El uso de WSN también ha sido propuesto en otros países como Colombia [13], cuyos autores han planteado un sistema de redes inalámbricas de sensores, enfocándose en la optimización de recursos y control de riesgos agroambientales y agroclimáticos para cultivos como el café, plátano, maíz, cacao, caña panelera, frijol y

legumbres en general. Dentro del proyecto se empleó tecnologías como ZigBee y Wifi, los cuales sirvieron como medio para la comunicación de la red y los sensores, recolectándose y enviándose datos la humedad del suelo en base a diferentes escenarios, donde los sensores estuvieron en diferentes posiciones y diferentes profundidades, esto con el fin de determinar la profundidad que alcanza la lluvia para determinar si es beneficioso para los cultivos.

Finalmente, México también ha propuesto su proyecto “SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO EN TIEMPO REAL CON BALANCE HÍDRICO, MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO Y LISÍMETRO” [14] en donde se ha implementado un sistema de riego en donde se riega en el momento oportuno y con la cantidad de agua necesaria, en base a sensores como TRIME TDR y un Lisímetro dentro de un cultivo de calabazas. Para esto, los autores han monitoreado y evaluado el sistema mediante internet y dispositivos móviles por medio de una computadora central configurado como servidor tanto Web y en WAP (Wireless Application Protocol). Los resultados del proyecto demuestran como que el uso de sensores inteligentes permite un control exacto del riego, además que al integrar información (sea meteorológica, tipo de cultivo, tipo de suelo) a los algoritmos de software, permitieron una estimación objetiva del riego para el cultivo.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Justificación de la solución

En el Estado del Arte del capítulo anterior, se detallaron algunas de las soluciones que se han implementado para los sistemas de riego en base a una red WSN (redes de sensores inalámbricos), y en cuya investigación se han encontrado diferentes tipos de comunicaciones inalámbricas, como por ejemplo ZigBee, WiFi y LoRaWAN que se han empleado para los sistemas de riego. Por ejemplo, se han implementado WSN en base al uso de tecnologías de comunicación del tipo ZigBee para el control de riego, con un bajo consumo energético, pero considerando un área de cultivo pequeña, dado que este tipo de comunicación no alcanza grandes radios de cobertura (llegando a alcanzar distancias de 10m a 75m), por lo que para implementaciones en grandes hectáreas de cultivo no es la tecnología ideal.

Otro caso es el uso de redes Wifi, que también permite la recolección de datos de una WSN y que permite almacenar datos en la Nube. Sin embargo, el radio de cobertura de WiFi, pese ser mayor al de ZigBee, tampoco es muy amplio (llegando a 45m en interiores y 90m en exteriores), además, se debe considerar una arquitectura que provea del servicio de internet a la red WiFi, algo que no es sencillo de implementar en zonas remotas de los cultivos, y el consumo de energía es considerable.

Por consiguiente, de las diversas soluciones que existen, se ha optado por orientarse por los sistemas de riego controlado por las WSN empleando la tecnología de comunicación LoRaWAN. La razón de escoger una red inalámbrica LoRaWAN, es dado que ofrece muchos beneficios, permitiendo una gran cobertura que puede llegar hasta los 10 Km y a un bajo costo energético. Su amplia cobertura permite tener una comunicación con zonas remotas, como lo son residencias rurales o plantaciones agrícolas, siendo este último el entorno a considerar en el presente proyecto; en donde redes inalámbricas como la telefonía móvil o una red WiFi son de presencia casi nula; por lo que el emplear LoRaWAN es la mejor opción para este tipo de escenarios. Otro punto que se debe tomar en cuenta es que, al tratarse de zonas extensas o remotas, las fuentes de energía, como lo son la energía eléctrica son nulas en este tipo de lugares,

por lo que los sensores de una red LoRaWAN deben ser capaces de transmitir y recibir de una forma confiable y al menor costo energético posible, con la finalidad de tener un funcionamiento un largo periodo de tiempo.

Cabe recalcar que el presente proyecto posee un mismo enfoque a otros proyectos de materia integradora que se han venido desarrollando dentro de GEA, pero orientado a otros cultivos como el maíz, pero con resultados imprecisos. Por lo que el proyecto busca mejorar las deficiencias que se han presentado en investigaciones pasadas, con el fin de establecer un modelo de propagación más exacto y el cual tenga una aplicación orientada a los sistemas de riego dentro de la granja ESPOL.

## 2.2 Planteamiento de la solución

Para la solución propuesta, se ha segmentado en algunas áreas dentro de un diagrama de bloques, tal como se observa en la Figura 2.1, el cual permite observar de forma detallada la solución mediante un resumen de forma esquemática:

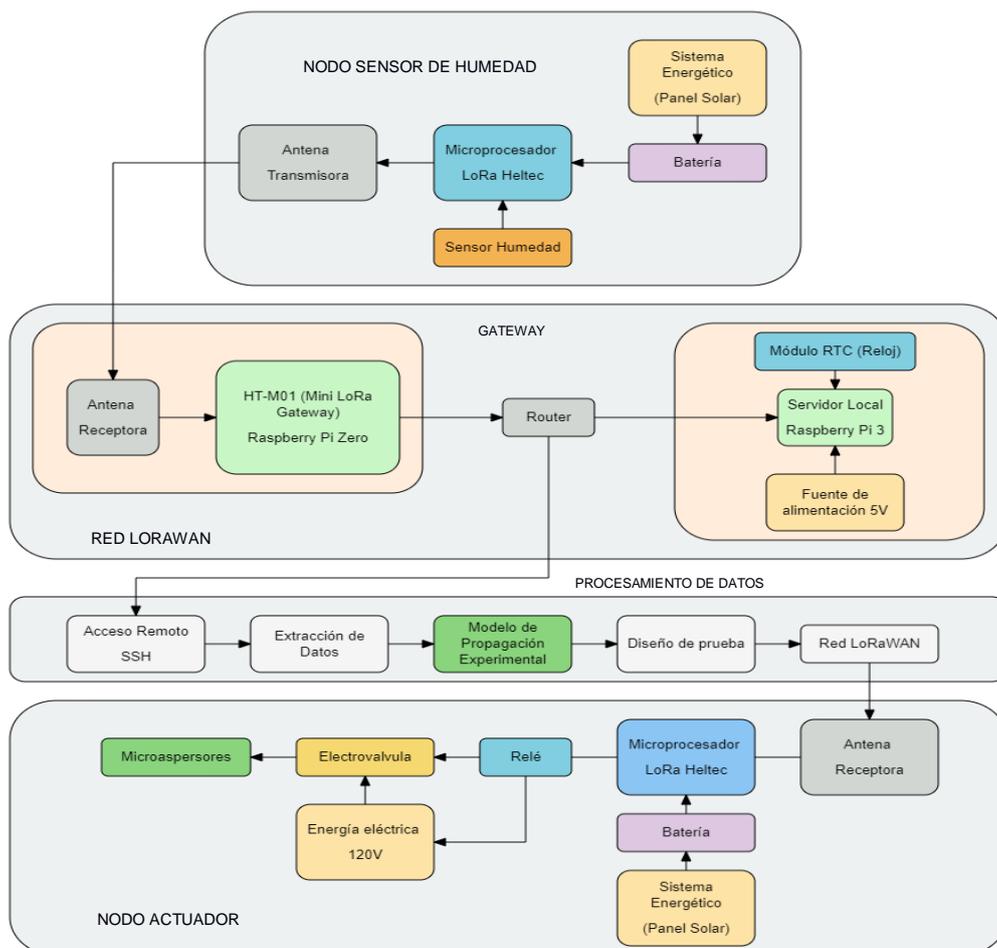


Figura 2.1-Diagrama de bloques de la solución

Teniendo claro que se va a emplear LoRaWAN como la tecnología de comunicación, se ha procedido a identificar los microcontroladores que operan en dicha tecnología, para luego ser desplegados en el terreno de trabajo, con la finalidad de establecer una WSN que permiten la recolección de datos del entorno. Estos microcontroladores serán la parte central del “Nodo Sensor de Humedad”, que tal como se muestra en la Figura 2.1, consta de componentes energéticos y del sensor de humedad. Este nodo será el encargado de enviar datos como RSSI y de humedad al Gateway LoRaWAN.

El Gateway LoRaWAN consta de varias secciones para su funcionamiento, tal como se muestra en el diagrama de bloques. El Gateway está conformado por la unión de dos componentes: HELTEC HT-M01 (mini Gateway LoRaWAN) junto con una Raspberry Pi Zero cuya función es la gestión del Gateway de la red. Los datos que son receptados en el Gateway son enviados vía Ethernet a la WAN del router, y de este son enviados a los dispositivos de la parte administrativa por medio de la LAN. Esta parte de administración de datos está conformada por una Raspberry Pi 3, cuya función es tanto para gestión del Gateway y el procesamiento de los datos recolectados, esto mediante el “Home Assistant”, que almacena los datos, sincronizados a un reloj, el cual sirve para la sincronización de los nodos, y a su vez permite determinar el tiempo cuando se presenten fallas de eléctricas en el sistema.

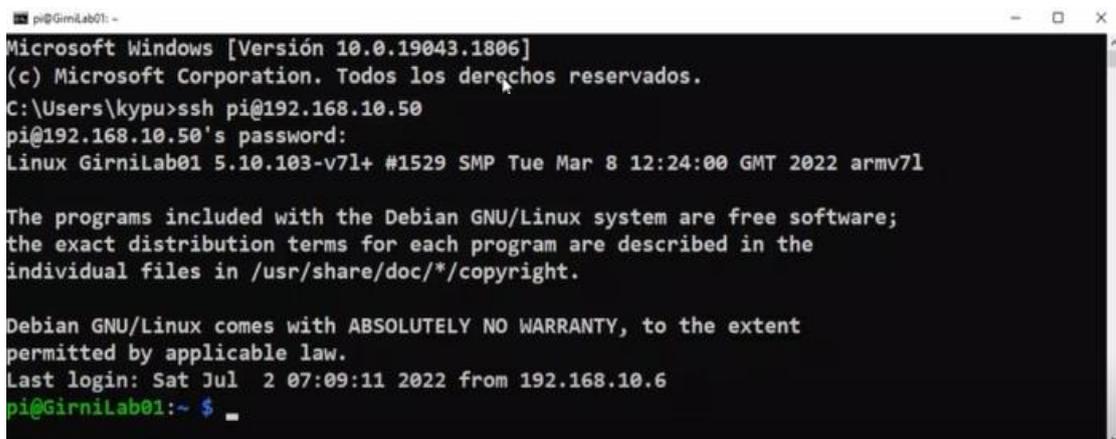
Para la recolección de datos, se ha llevado a cabo una planificación de despliegue, en el cual se ha seleccionado un área del cultivo, y dicha planificación de despliegue se detallará a profundidad en las siguientes secciones de este capítulo. Así mismo, se han establecido los puntos de despliegue en base a un trazado de rayos, por medio de herramientas digitales como lo es Google Maps Pro.

La data recolectada permitirá determinar un modelo de propagación en base a múltiples gradientes distancia-potencia, donde el modelo permitirá el determinar los puntos óptimos para la colocación de nodos sensores. Para determinar la eficacia de este modelo, se entra en una etapa de prueba, en donde se configura la red LoRaWAN en base al modelo experimental y en donde se pondrá a prueba un “nodo sensor actuador”, tal como se muestra en la Figura 2.1, el cual consta de un módulo LoRaWAN con su respectiva fuente energética, pero ahora cuenta con un componente actuador, que se basa en un relé de un canal, el cual permitirá la activación de una electroválvula

que permita o no el flujo de agua hacia los micro aspersores, en base a las lecturas de humedad enviadas por los “nodos sensores de humedad”.

### 2.3 Recolección y procesamiento de datos

Para obtener los datos que se generan el Home Assistant dentro de la red LoRaWAN, se procede ingresar al sistema remotamente mediante SSH a través de una red generada por el router, tal como se puede observar a continuación:



```
pi@GirniLab01: ~  
Microsoft Windows [Versión 10.0.19043.1806]  
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.  
C:\Users\kyphu>ssh pi@192.168.10.50  
pi@192.168.10.50's password:  
Linux GirniLab01 5.10.103-v7l+ #1529 SMP Tue Mar 8 12:24:00 GMT 2022 armv7l  
  
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;  
the exact distribution terms for each program are described in the  
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.  
  
Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent  
permitted by applicable law.  
Last login: Sat Jul 2 07:09:11 2022 from 192.168.10.6  
pi@GirniLab01:~$
```

Figura 2.2- Acceso mediante SSH

Tal como se muestra en la Figura 2.2, se accede mediante SSH por medio del “símbolo del sistema” en donde al ingresar la dirección IP que tiene configurado la red LoRaWAN se accede a la información de registrada en el Home Assistant y a su vez permite descargar un “Data Base File” tal como se muestra en la Figura 2.3:

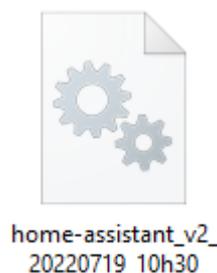
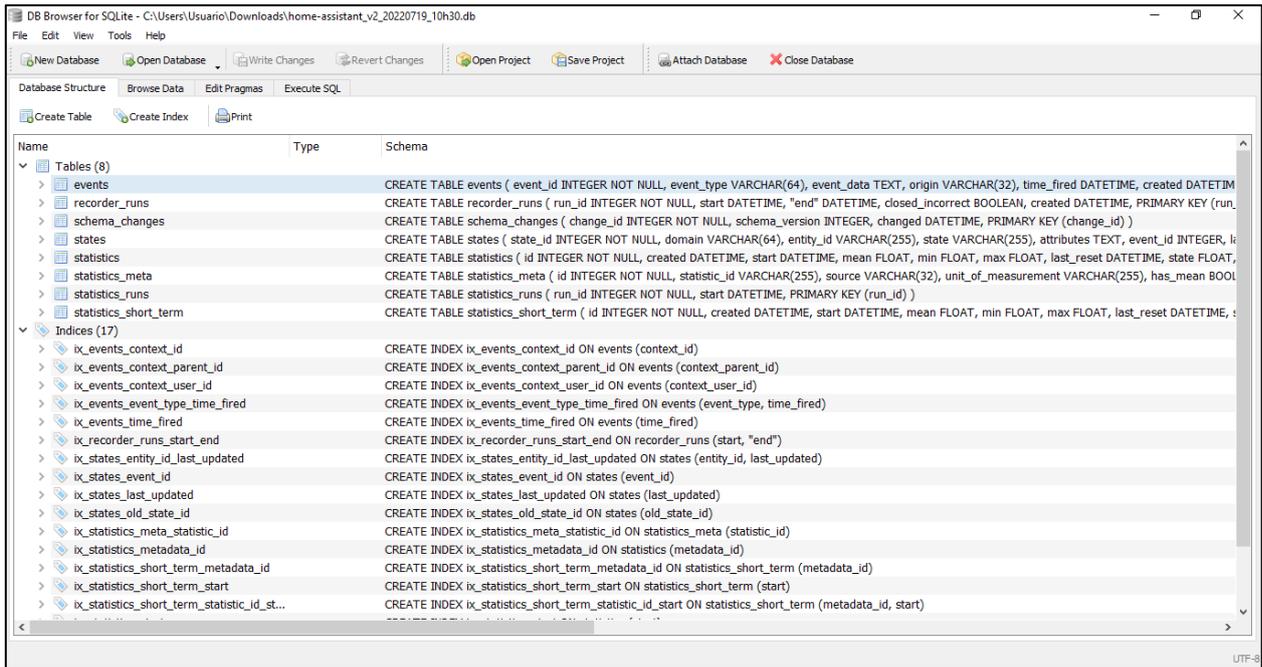


Figura 2.3- Archivo database de Home Assistant

Para la lectura de archivos del tipo “database” se procede a emplear un software como “DB Browser” para la visualización de los datos tal como se muestra en la Figura 2.4:



**Figura 2.4-Diagrama de Bloques de la solución**

Mediante el DB Browser se puede navegar entre los datos, tales como los eventos, estados, estadísticas, etc. Para el desarrollo del modelo propagación, se procede a obtener los datos de RSSI que se almacenan en la categoría de “states”, tal como se muestra en la Figura2.5:

	state_id	domain	entity_id	state	attributes	event_id	last_changed	last_updated	created
1	109150	sensor	sensor.rssi_up_cc24	-76	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162396	2022-07-09 09:07:04.207966	2022-07-09 09:12:06.178726	2022-07-09 09:12:06
2	109151	sensor	sensor.snr_up_cc24	7.5	{"unit_of_measurement":"db","friendly_name":"s..."}	162397	2022-07-09 09:12:06.181198	2022-07-09 09:12:06.181198	2022-07-09 09:12:06
3	109152	sensor	sensor.channel_up_cc24	2	{"friendly_name":"channel_up_cc24"}	162398	2022-07-09 09:12:06.183027	2022-07-09 09:12:06.183027	2022-07-09 09:12:06
4	109153	sensor	sensor.rssi_up_cc24	-75	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162399	2022-07-09 09:12:06.192132	2022-07-09 09:12:06.192132	2022-07-09 09:12:06
5	109154	sensor	sensor.rssi_up_cc22	-79	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162403	2022-07-09 09:07:48.105279	2022-07-09 09:12:50.069936	2022-07-09 09:12:50
6	109155	sensor	sensor.snr_up_cc22	6.5	{"unit_of_measurement":"db","friendly_name":"s..."}	162404	2022-07-09 09:12:50.072496	2022-07-09 09:12:50.072496	2022-07-09 09:12:50
7	109156	sensor	sensor.rssi_up_cc22	-82	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162405	2022-07-09 09:12:50.083868	2022-07-09 09:12:50.083868	2022-07-09 09:12:50
8	109157	sensor	sensor.rssi_up_cc26	-85	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162410	2022-07-09 09:08:37.965696	2022-07-09 09:13:39.414392	2022-07-09 09:13:39
9	109158	sensor	sensor.snr_up_cc26	6.5	{"unit_of_measurement":"db","friendly_name":"s..."}	162411	2022-07-09 09:13:39.417627	2022-07-09 09:13:39.417627	2022-07-09 09:13:39
10	109159	sensor	sensor.channel_up_cc26	1	{"friendly_name":"channel_up_cc26"}	162412	2022-07-09 09:13:39.420843	2022-07-09 09:13:39.420843	2022-07-09 09:13:39
11	109160	sensor	sensor.rssi_up_cc26	-76	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162413	2022-07-09 09:13:39.432955	2022-07-09 09:13:39.432955	2022-07-09 09:13:39
12	109161	sensor	sensor.rssi_up_cc28	-94	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162414	2022-07-09 09:08:51.581709	2022-07-09 09:13:52.704210	2022-07-09 09:13:52
13	109162	sensor	sensor.rssi_up_cc28	-93	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162415	2022-07-09 09:13:52.707261	2022-07-09 09:13:52.707261	2022-07-09 09:13:52
14	109163	sensor	sensor.rssi_up_cc23	-84	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162417	2022-07-09 09:09:05.561649	2022-07-09 09:14:07.147263	2022-07-09 09:14:07
15	109164	sensor	sensor.snr_up_cc23	7.8	{"unit_of_measurement":"db","friendly_name":"s..."}	162418	2022-07-09 09:14:07.150521	2022-07-09 09:14:07.150521	2022-07-09 09:14:07
16	109165	sensor	sensor.channel_up_cc23	5	{"friendly_name":"channel_up_cc23"}	162419	2022-07-09 09:14:07.152785	2022-07-09 09:14:07.152785	2022-07-09 09:14:07
17	109166	sensor	sensor.rssi_down_cc23	-71	{"unit_of_measurement":"dbm","friendly_name":"..."}	162420	2022-07-09 09:14:07.157661	2022-07-09 09:14:07.157661	2022-07-09 09:14:07
18	109167	sensor	sensor.rssi_up_cc23	-85	{"applicationID":"11","applicationName":"LeeRssi..."}	162421	2022-07-09 09:14:07.163644	2022-07-09 09:14:07.163644	2022-07-09 09:14:07

**Figura 2.5-Valor almacenados en la categoría “states”**

Para poder trabajar con la data almacenada en “states”, se procede a exportar la información. Para la exportación de los datos existen tres formas: SQL, CSV o JSON, tal como se indica en la Figura 2.6:



**Figura 2.6-Exportacion de los datos almacenados en “states”**

De las tres formas de exportación, se elige el formato JSON, tal como se muestra en la Figura 2.7, para el tratamiento de datos en un software como PYTHON.



states.json

**Figura 2.7-Archivo JSON**

Para la lectura de los archivos JSON pueden ser extraídos mediante un algoritmo implementado en PYTHON y a su vez se pueden exportar los datos a un CSV para una mejor visualización de los datos. Los algoritmos que se emplean para lectura y el procesamiento de datos se los puede encontrar en el blog del GIRNI (Grupo De Investigación De Redes Información Inalámbricas).

Implementando el algoritmo en Python, tal como se muestra en la Figura 2.8, se puede extraer los datos del archivo “states.json” y a su vez pasarlos a un archivo CSV.

```

1 import numpy as np
2 import json
3 import pandas as pd
4 import datetime as dt
5 import os
6
7 # INGRESO
8 # archivo de entrada
9 unarchivoDB = "states.json"
10 carpeta_DB = "Base"
11
12 # fecha intervalo
13 fechainicio = "2022-07-01 12:40:00.0"
14 fechafin = "2022-07-06 09:50:00.0"
15 zonaGMT = -5
16
17 unsensor = "sensor.rssi_up_cc28"
18 nodo = "cc28"
19 modelo_disp = "modulo" # capsula, modulo desarrollo
20 ubicado = "RAYO A"
21 carpeta_rsm = "resultado_Test"
22
23 # gatewayID simplifica identificador
24 gatewayDB = {'uCfr//4dyIc': 'Gw03'}
25
26 # PROCEDIMIENTO -----

```

**Figura 2.8- Algoritmo para lectura de archivos.json**

Al ejecutar el algoritmo, devuelve un archivo CSV del dispositivo de interés, tal como se muestra en la Figura 2.9 y al abrir de detallan los datos como en la Figura 2.10:



Data\_RAYO  
A\_cc21

**Figura 2.9- Archivo CSV**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1		publishedAt	ubicado	modelo_disp	dispositivo	fCnt	rssi_up	snr_up	channel_up	rfChain_up	gtw_rx	dr_down	rssi_down	snr_down	bateria_V	frequency	bandw
2	1	49:48.7	RAYO A	modulo	cc21	8611	-76	5.8	3	0	Gw03	10	-79	7	3.49	902900000	
3	2	54:50.2	RAYO A	modulo	cc21	8612	-83	6	0	0	Gw03	10	-74	7	3.49	902300000	
4	3	59:51.4	RAYO A	modulo	cc21	8613	-75	5.2	6	1	Gw03	10	-79	7	3.49	903500000	
5	4	04:52.9	RAYO A	modulo	cc21	8614	-83	6.2	5	1	Gw03	10	-75	7	3.49	903300000	
6	5	09:55.0	RAYO A	modulo	cc21	8615	-75	7.5	4	1	Gw03	10	-73	7	3.49	903100000	
7	6	14:57.1	RAYO A	modulo	cc21	8616	-85	5.2	2	0	Gw03	10	-75	7	3.49	902700000	
8	7	19:58.6	RAYO A	modulo	cc21	8617	-75	7	7	1	Gw03	10	-75	7	3.49	903700000	
9	8	25:00.4	RAYO A	modulo	cc21	8618	-79	6.8	5	1	Gw03	10	-76	8	3.49	903300000	
10	9	30:02.0	RAYO A	modulo	cc21	8619	-76	5.5	1	0	Gw03	10	-71	6	3.49	902500000	
11	10	35:03.4	RAYO A	modulo	cc21	8620	-87	6	3	0	Gw03	10	-75	7	3.49	902900000	
12	11	40:05.2	RAYO A	modulo	cc21	8621	-75	6	6	1	Gw03	10	-73	7	3.49	903500000	
13	12	45:07.0	RAYO A	modulo	cc21	8622	-87	6.2	0	0	Gw03	10	-72	7	3.49	902300000	
14	13	50:08.5	RAYO A	modulo	cc21	8623	-74	6.5	5	1	Gw03	10	-80	7	3.49	903300000	
15	14	55:10.0	RAYO A	modulo	cc21	8624	-83	6.2	1	0	Gw03	10	-75	7	3.49	902500000	
16	15	00:11.3	RAYO A	modulo	cc21	8625	-75	5.2	2	0	Gw03	10	-78	6	3.49	902700000	
17	16	05:13.2	RAYO A	modulo	cc21	8626	-85	7.2	4	1	Gw03	10	-75	7	3.49	903100000	
18	17	10:15.0	RAYO A	modulo	cc21	8627	-81	6	0	0	Gw03	10	-77	7	3.49	902300000	
19	18	15:16.8	RAYO A	modulo	cc21	8628	-82	7.2	7	1	Gw03	10	-77	7	3.49	903700000	
20	19	20:18.5	RAYO A	modulo	cc21	8629	-75	6.5	6	1	Gw03	10	-76	7	3.49	903500000	
21	20	25:20.0	RAYO A	modulo	cc21	8630	-85	6.8	3	0	Gw03	10	-73	7	3.49	902900000	
22	21	30:21.7	RAYO A	modulo	cc21	8631	-77	7.5	4	1	Gw03	10	-75	7	3.49	903100000	
23	22	35:23.0	RAYO A	modulo	cc21	8632	-82	8	2	0	Gw03	10	-75	7	3.49	902700000	

**Figura 2.10- Datos en CSV**

Los datos CSV que se generan pueden ser importados mediante otro algoritmo en PYTHON para el análisis y tratamiento de datos para la obtención de resultados como promedios RSSI, pérdidas, zonas de Fresnel, entre otros datos de interés. Todos estos datos serán detallados en la sección de resultados.

## 2.4 Descripción del área de estudio

### 2.4.1 Ubicación y extensión

#### 2.4.1.1 Ubicación geográfica

**Tabla 2.1 -Información de parámetros de diseño de la Granja Espol**

<b>Datos del cultivo</b>				
<b>CULTIVO</b>	<b>AREA (Ha)</b>	<b>Esp. Lat. (m)</b>	<b>Esp.Emi. (m)</b>	<b>Phr (mm/h)</b>
CEBOLLA	0.36	1.6	0.3	7.71
SANDIA-MELON	0.54	1.6	0.3	3.85
TOMATE Y PIMIENTO	0.5	1.6	0.3	3.85
YUCA Y PLATANO	0.24	9	9	3.79
MAIZ	0.71	20	20	4.58
CACO	0.68	9	9	3.79
CACAO	0.75	6	3	3.22
AGROFORESTERIA CAFE	0.91	3	0.3	1.78
CACO	3.44	7	5	2.00
<b>AREA TOTAL (Ha)</b>	<b>8.13</b>			

La granja de investigaciones de la ESPOL, en la que se llevó a cabo el desarrollo del presente proyecto se encuentra ubicada dentro del campus Gustavo Galindo Velasco en el Km. 30.5 Vía Perimetral. Esta granja cuenta con un área total de cultivo de 8.3 Ha, tal como se muestra en la Tabla 2.1 donde tenemos la tabla con los parámetros de diseño en la cual dentro de los datos de cultivo se observa que 4,87 Ha han sido destinadas para el cultivo e investigación de la planta de cacao. De esta área destinada al cacao, por fines prácticos y económicos se optó por trabajar con una sola hectárea de cultivo en la cual se cuenta con un sistema de riego basado en microaspersión controlada con temporizadores que se activan cada día por aproximadamente 3 horas a partir de las 6 pm dependiendo de las necesidades hídricas de la planta y de la presencia de precipitaciones, las dos electroválvulas destinadas a esta hectárea se acciona a la par con el motor, pero a su vez también se las puede configurar para que se accionen manualmente.

### 2.4.1.2 Vías de acceso

La Granja de la ESPOL cuenta con dos vías de acceso, aunque la más corta se encuentra deshabilitada indefinidamente debido a reportes de actos delictivos en la zona, quedando como principal vía de acceso la ruta que empieza desde el desvío junto al comedor de FADCOM, la ruta ha sido marcada en la vista satelital para una mejor interpretación, en la Figura 2.11, que se muestra a continuación. Cabe recalcar que únicamente tienen acceso a la zona personal administrativo, trabajadores y estudiantes con propósitos académicos e investigativos. Al igual que en muchos predios destinados a la agricultura el acceso es a través de camino de tierra con cierta dificultad de paso en pendientes un tanto pronunciadas.

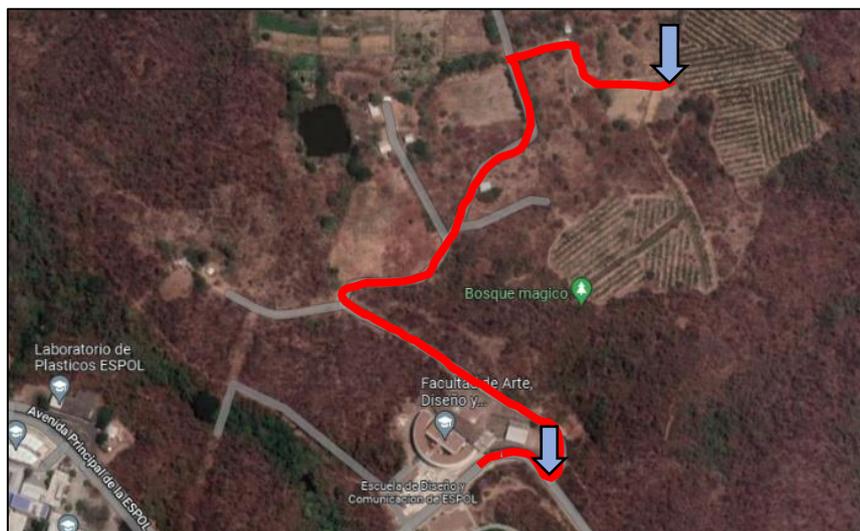


Figura 2.11- Imagen satelital de las vías de acceso a la Granja Espol

### 2.4.1.3 Extensión

Por medio del trazado de un polígono en un mapa con vista satelital, se constató que la extensión real del área sobre el cual se desarrolla el presente proyecto es de aproximadamente 11,808.24 m<sup>2</sup>, tal como se observa en la Figura 2.12, sobre esta área se encuentran ya instaladas previamente 2 electroválvulas que satisfacen las necesidades hídricas de las plantas de cacao. El agua es distribuida por medio de micro aspersores que están ubicados a una separación de 3 m de distancia uno del otro en cada hilera de cultivo.

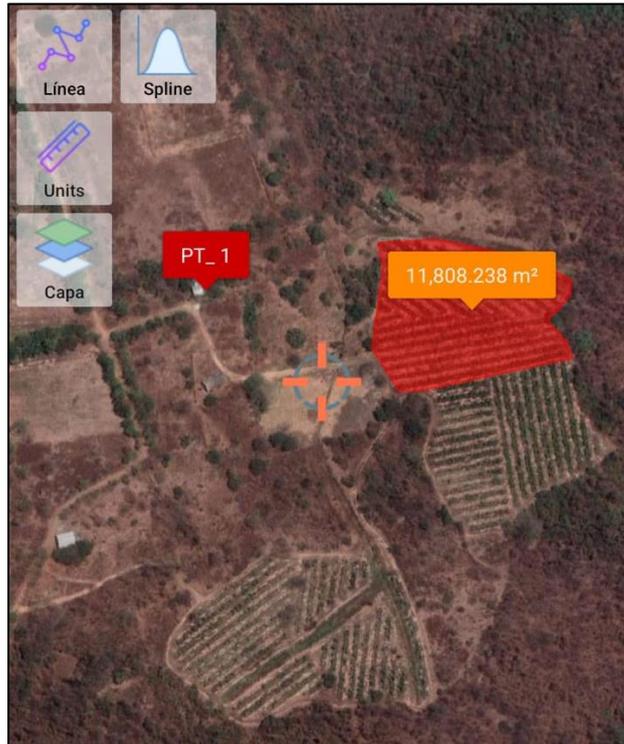


Figura 2.12- Imagen satelital del área de cultivo destinada al proyecto en la Granja Espol

## 2.5 Recopilación de información

### 2.5.1 Topografía

#### 2.5.1.1 Área de Trabajo

El presente proyecto se desarrolla en GEA (Granja Experimental Agrícola) localizada en la ESPOL. La granja cuenta con una variedad de cultivos, tales como cacao, maíz y papaya, cuya distribución se muestra en la Figura 2.13.



Figura 2.13- Granja Experimental Agrícola (GEA)

De esta distribución de cultivos se ha seleccionado el área de cacao que se muestra en la Figura 2.14, correspondiente a un total de una hectárea, en la cual será desplegada una red de sensores. Previo a la recolección de datos, se ha procedido al movimiento del Gateway que provee de la red LoRaWAN, a una ubicación cercana al cultivo de cacao, con las coordenadas de la Tabla 2.2:

**Tabla 2.2 – Coordenadas del Gateway**

	LATITUD	LONGITUD
Gateway	-2.13946	-79.96087



**Figura 2.14- Cultivo de cacao a trabajar**

El Gateway fue colocado en una garita de los guardas que resguardan los cultivos, cuyos componentes como la antena, router, microcontrolador son mostrados en la Figura 2.15:



**Figura 2.15 – Gateway LoRaWAN**

### 2.5.1.2 Despliegue de los nodos

Para el despliegue de los nodos, se ha establecido un trazado de tres rayos denominados A, B y C, tal como se observa en la Figura 2.16. Cada rayo alberga un total de 8 nodos sensores para la recolección de datos RSSI, que son enviados al gateway, teniendo en consideración que cada medición es de 2 días, para la recolección de al menos 300 muestras, y considerando que se varía la altura (50 cm, 1m y 2m).

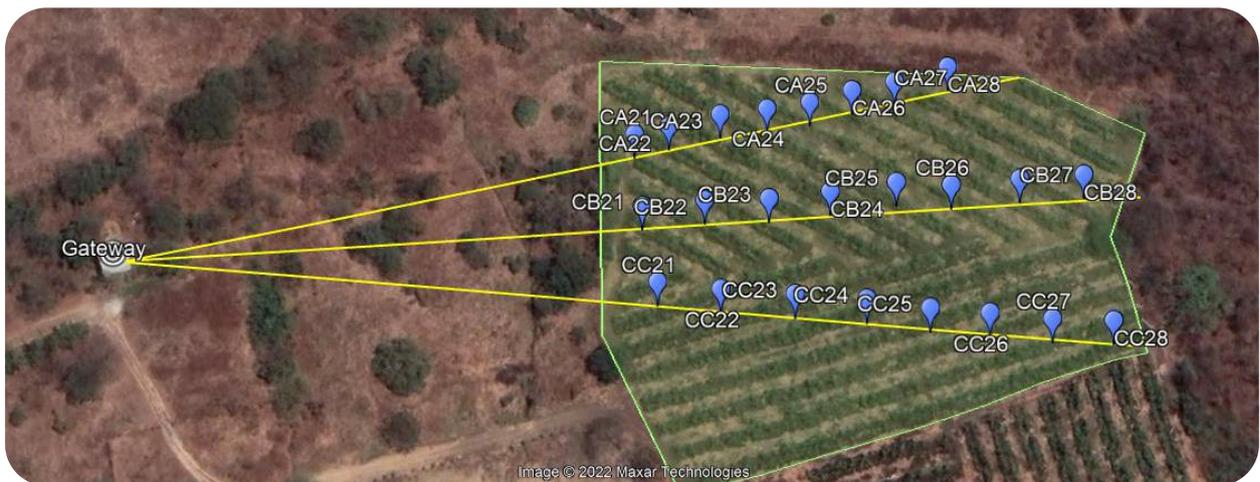


Figura 2.16 – WSN en el cultivo de cacao

Cada nodo se encuentra identificado por CX2Y, donde “X” representa a las variables A, B y C, indicando en rayo se encuentra el nodo, y “Y” representa el número del sensor que va desde el número 1 hasta el número 8.

Cabe mencionar que el terreno no es plano, sino que presenta varios desniveles, los cuales se pueden observar en la Figura 2.17, Figura 2.18 y Figura 2.19, que corresponde al Perfil de Nivelación a lo largo de cada rayo:

#### Rayo A

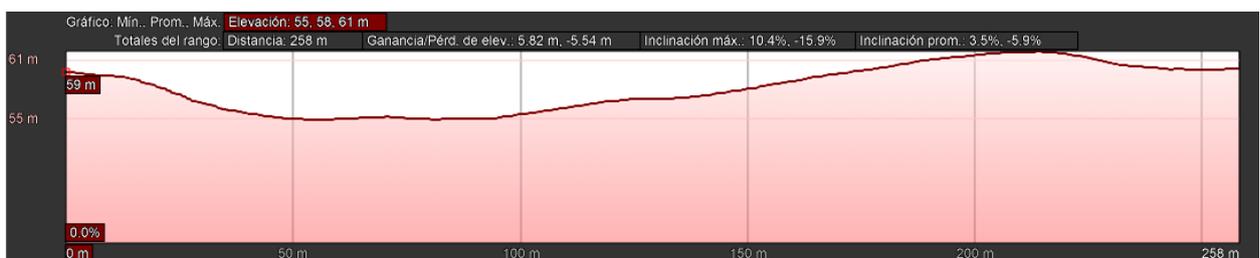


Figura 2.17 – Perfil de nivelación del Rayo A

## Rayo B



**Figura 2.18 – Perfil de nivelación del Rayo B**

## Rayo C



**Figura 2.19 – Perfil de nivelación del Rayo C**

Teniendo el perfil de nivelación de cada rayo, se puede obtener la distancia que existe desde el gateway, así como a que altura se encuentra cada nodo con respecto al nivel del mar, cuyos datos se presentan en las Tablas 2.3 y 2.4:

**Tabla 2.3 – Distancia desde el gateway a cada nodo sensor**

Distancias desde el Gateway al sensor								
	CC21	CC22	CC23	CC24	CC25	CC26	CC27	CC28
RAYO A	130 m	142 m	154 m	166 m	177 m	188 m	200 m	213 m
RAYO B	131 m	147 m	163 m	178 m	195 m	209 m	226 m	243 m
RAYO C	135 m	150 m	169 m	187 m	203 m	218 m	234 m	250 m

**Tabla 2.4 – Altura de cada nodo sobre el nivel del mar**

Elevaciones sobre el nivel del mar									
	Gateway	CC21	CC22	CC23	CC24	CC25	CC26	CC27	CC28
RAYO A	59 m	56 m	56 m	57 m	57 m	58 m	58 m	59 m	59 m
RAYO B	59 m	57 m	58 m	59 m	59 m	60 m	61 m	60 m	59 m
RAYO C	59 m	57 m	58 m	60 m	61 m	61 m	61 m	60 m	57 m

### 2.5.1.3 Consideraciones para la colocación de los nodos

Para la colocación de cada nodo en las plantaciones de cacao, se ponen cerca de cada planta, siguiendo el trazado de rayo correspondiente, y se distancian uno del otro siguiendo el surco de cada línea de plantación, tal como se observa en la Figura 2.20:



**Figura 2.20 – Distanciamiento de los nodos**

Tal como se puede observar en la figura 2.20, cada sección roja representa el área en que le corresponde a cada nodo y se puede visualizar que cada sección del nodo se encuentra en un surco del plantío, presentándose una separación de 10m aproximadamente.

### 2.5.1.4 Proceso de definición del gradiente-distancia

Para el desarrollo de la cobertura de la zona agrícola, es necesario establecer la cobertura del área de trabajo. Para esto, se emplea el modelamiento de propagación de gradiente-distancia, el cual será determinado en base a las medidas de RSSI recolectadas y las distancias, cuyos valores serán procesadas por un algoritmo, esto con el fin de concluir en un modelo de propagación, que permita una planificación de la red inalámbrica con el fin estimar los resultados de una manera más precisa.

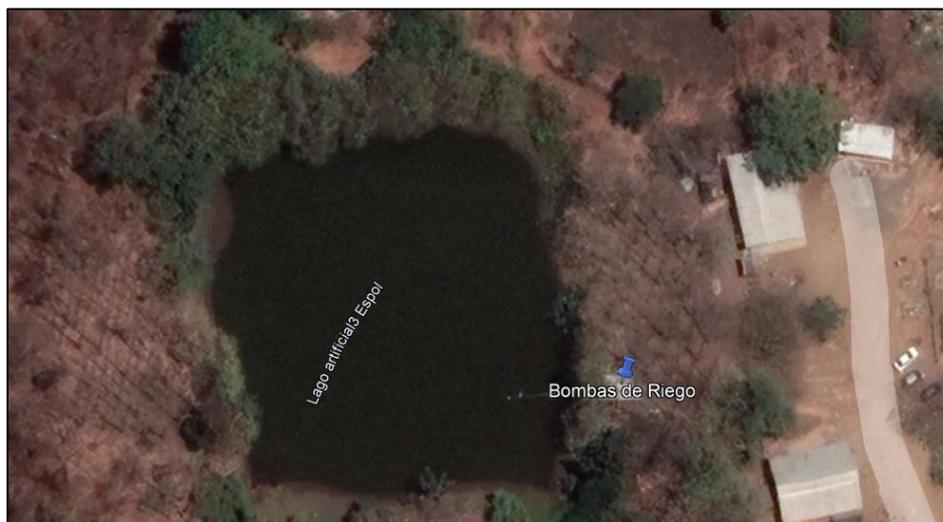
Al tener tres diferentes rayos y tres diferentes alturas de las antenas de los nodos, se plantea diferenciar el comportamiento de cada modelo gradiente distancia-potencia de forma individual para cada rayo y para cada una de las alturas definidas. Finalmente, se plantea determinar un modelo total el cual abarcará los 3 rayos, pero con diferentes alturas.

### 2.5.1.5 Implementación de un modelo estadístico

El implementar un modelo de propagación implica que se emplea un modelo matemático que representa de manera teórica el comportamiento de una red inalámbrica. Además, al tratarse de una recolección de datos obtenidos de una muestra, esto implica que se considera al modelo como de índole estadístico, dado que datos como RSSI y ecuaciones de recta potencia-distancia, se basan en análisis estadísticos tales como promedio, regresión lineal, desviación estándar, entre otros.

### 2.5.2 Fuente de Agua

En GEA el suministro de agua para el riego de los cultivos se obtiene principalmente del lago artificial localizado en la zona, tal como se muestra en la Figura 2.21:



**Figura 2.21-Lago Artificial ESPOL**

El agua del lago es distribuida por un sistema de riego de la marca NETAFIM, tal como se muestran en las Figuras 2.22, 2.23 y 2.24, el cual cuenta con una red de tuberías a lo largo de los cultivos. Además, que cuenta con un sistema de riego automatizado pero que opera mediante un temporizador, el cual comienza el riego a partir de las 6pm durante un intervalo de 3 horas por hectárea. En base a la información proporcionada por los integrantes de GEA, un sistema de este tipo cuesta aproximadamente \$12 000 por hectárea.



Figura 2.22-Sistema de Riego (NETAFIM)



Figura 2.23-Bombas para el riego



Figura 2.24-Temporizador de riego

### 2.5.3 Suelos

El cacao requiere suelos muy ricos en materia orgánica, profundos, francos arcillosos, con buen drenaje y topografía regular. El factor limitante del suelo en el desarrollo del cacao es la delgada capa húmica. Esta capa se degrada muy rápidamente cuando la superficie del suelo queda expuesta al sol, al viento y a la lluvia directa. Por ello es común el empleo de plantas leguminosas auxiliares que proporcionen la sombra necesaria y sean una fuente constante de sustancias nitrogenadas para el cultivo.

Las plantaciones están localizadas en suelos que varían desde arcillas pesadas muy erosionadas hasta arenas volcánicas recién formadas y limos, con pH que oscilan entre 4,0 y 7,0. Se puede decir que el cacao es una planta que prospera en una amplia diversidad de tipos de suelo, es por esto que el tipo de suelo sobre el que esta plantado el cultivo de cacao en la granja de la ESPOL sigue siendo un suelo rico en nutrientes y con un buen pH a pesar de ser del tipo franco arenoso, siendo este el tipo de suelo con más predominancia en la costa ecuatoriana, ya que precisamente el suelo de los predios del cliente en el que se pretende hacer la implementación del presente proyecto es del tipo franco-arenoso y parcelas que también cuentan con el tipo franco-arcilloso.

El cacao es un cultivo típicamente umbrófilo. El objetivo del sombreado al inicio de la plantación es reducir la cantidad de radiación que llega al cultivo para reducir la actividad de la planta y proteger al cultivo de los vientos que la puedan perjudicar. Cuando el cultivo se halla establecido se podrá reducir el porcentaje de sombreado hasta un 25 o 30 %. Fue por esto que al inicio de la plantación junto a las plantas de cacao se colocaron en ciertas partes palmas de plátano, para que hicieran sombra a la planta de cacao hasta que alcance cierto nivel de desarrollo, estas palmas fueron retiradas en las zonas donde la madurez de la planta de cacao ha llegado a su totalidad. La luminosidad deberá estar comprendida más o menos al 50 % durante los primeros 4 años de vida de las plantas, para que estas alcancen un buen desarrollo y limiten el crecimiento de las malas hierbas.

Para el sombreado del cultivo se emplean las llamadas especies para sombra, que generalmente son otros árboles frutales intercalados en el cultivo con marcos de plantación regulares. Las especies más empleadas son las musáceas (plátano, topocho y cambures) para sombras temporales y de leguminosas como el poró o bucare (*Eritrina* sp.) y las guabas (Ingas) para sombras permanentes, un ejemplo de esto se puede

apreciar en la Figura 2.25 en la que se utiliza la palma de plátano dentro de la granja para proveer sombra temporal. En nuevas plantaciones de cacao se están empezando a emplear otras especies de sombreado que otorgan un mayor beneficio económico como son especies maderables (laurel, cedro, cenízaro y terminalia) y/o frutales (cítricos, aguacate, zapote, árbol del pan, palmera datilera, etc.).



**Figura 2.25- Especie de plantas para sombra más común (plátano)**

#### **2.5.4 Data Climática**

El cacao no soporta temperaturas bajas, siendo su límite medio anual de temperatura los 21 °C ya que es difícil cultivar cacao satisfactoriamente con una temperatura más baja. Las temperaturas extremas muy altas pueden provocar alteraciones fisiológicas en el árbol por lo que es un cultivo que debe estar bajo sombra para que los rayos solares no incidan directamente y se incremente la temperatura.

La temperatura determina la formación de flores. Cuando ésta es menor de 21 °C la floración es menor que a 25 °C, donde la floración es normal y abundante. Esto provoca que en determinadas zonas la producción de mazorcas sea estacional y durante algunas semanas no haya cosecha, cuando las temperaturas sean inferiores a 22 °C.

El cacao es una planta sensible a la escasez de agua, pero también al encharcamiento por lo que se precisarán de suelos provistos de un buen drenaje. Un anegamiento o estancamiento puede provocar la asfixia de las raíces y su muerte en muy poco tiempo.

Las necesidades de agua oscilan entre 1500 y 2500 mm en las zonas bajas más cálidas y entre 1200 y 1500 mm en las zonas más frescas o los valles altos.

Vientos continuos pueden provocar un desecamiento, muerte y caída de las hojas. Por ello en las zonas costeras es preciso el empleo de cortavientos para que el cacao no sufra daños. Los cortavientos suelen estar formados por distintas especies arbóreas (frutales o madereras) que se disponen alrededor de los árboles de cacao.

## 2.6 Diseño de la solución

Una vez determinando tanto la cobertura del área de trabajo, así como el modelo de propagación, se procede a la implementación de los nodos LoRa junto a un sensor de humedad, cuyas lecturas se enviarán al Gateway LoRaWAN de la red en base al modelo de propagación configurado en el gateway. Para esto, se emplearán los siguientes componentes:

### 2.6.1 Nodos sensores de humedad del suelo

Para cada nodo sensor que se plantea como solución, cuyos diagramas esquemáticos se presentan en las Figuras 2.26 y 2.27, constan de:

- Modulo LoRa Cube Cell Heltec AB02 (915 MHz) + Antena
- Batería Li-ion de 5V.
- Panel solar.
- Módulo de carga TP4056.
- Sensor de humedad de suelo conductivo: HD38
- Sensor de humedad de suelo capacitivo.

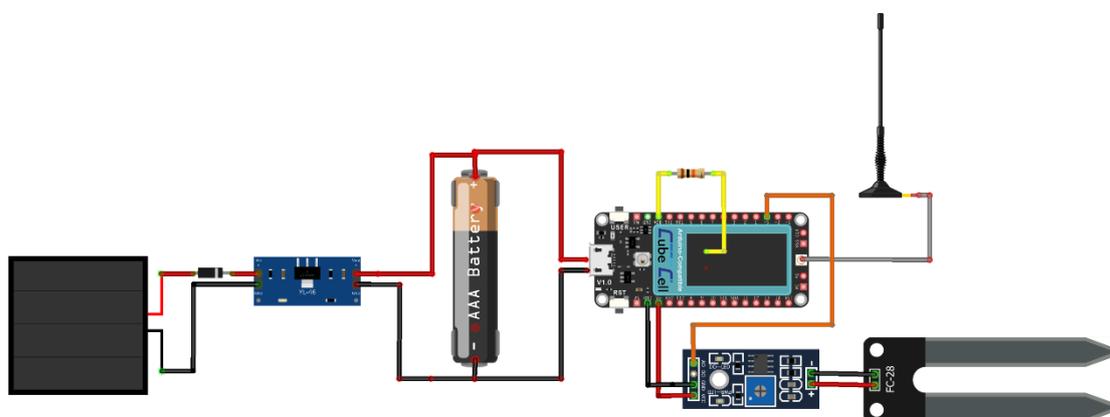
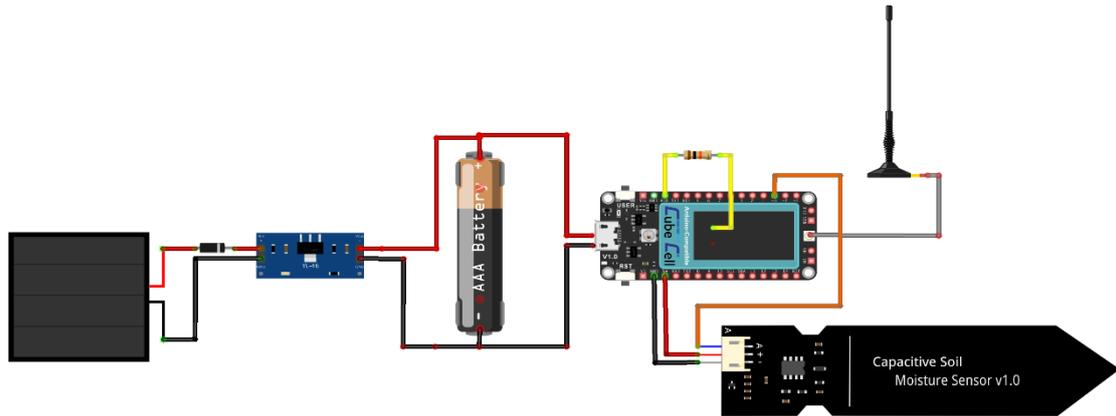


Figura 2.26- Sensor de humedad del suelo conductivo

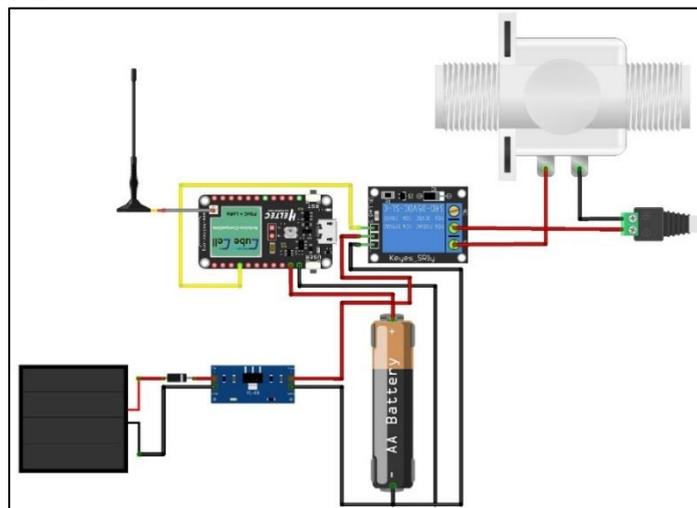


**Figura 2.27- Sensor de humedad del suelo capacitivo**

## 2.6.2 Actuador

De la misma manera que los nodos sensores de humedad, el actuador que se muestra en la Figura 2.28, contiene:

- Modulo LoRa Cube Cell Heltec AB02 (915 MHz) + Antena
- Batería Li-ion de 5V.
- Panel solar.
- Módulo de carga TP4056.
- Relé
- Electroválvula



**Figura 2.28- Sensor Actuador**

La operatividad del nodo actuador estará regida por el nivel de humedad que se encuentre en el suelo, en donde el Gateway le enviará una orden al nodo, en donde si el

exceso de agua pasa lo límites establecidos, se activará el relé y por ende la electroválvula, la cual opera con energía eléctrica AC.

## 2.7 Materiales

### 2.7.1 Módulo HELTEC CUBECELL AB-02 (HTCC-AB01)

El módulo CUBECELL es un componente electrónico desarrollado por HELTEC el cual se lo puede apreciar en la Figura 2.29, cuya funcionalidad está orientada a aplicaciones de LoRa/LoRaWAN. Estos módulos están basados en los modelos ASR605x, cuyos chips ya tienen integrado MCUs como PSoC y SX1262, además que han sido desarrollados de tal forma que sean compatibles con Arduino. Por último, el modelo HTCC-AB02, está diseñado de forma amigable para desarrolladores, permitiendo ejecutar protocolos LoRaWAN de manera estable, así como la incorporación de elementos externos, como baterías y paneles solares. [15]



Figura 2.29-Modulo HTCC-AB02 [15]

#### 2.7.1.1 Especificaciones técnicas del módulo HTCC-AB02

Tabla 2.5- Especificaciones Técnica HTCC-AB02 [15]

Recurso	Parámetros	
Comunicación inalámbrica	LoRa	
	Nodo-a-Nodo o LoRaWAN	
Área LoRaWAN	Versión de Hardware	Frecuencia
	LF	EU433
		CN470
	HF	IN865
		EU868
		US915
		AU915
KR920		
AS923		
Máxima Potencia de Salida LoRa	22 dB ± 1dB	
Batería	3.7 V de Litio	
Dimensiones	41.5 x 25 x 7.6 mm	

Energía solar	5.5 – 7 V (Panel Solar)
Bajo Consumo	3.5 $\mu$ A (Deep Sleep)
Temperatura de operación	-40 a 80°C

### 2.7.1.2 Especificaciones Eléctricas del módulo HTCC-AB02

**Tabla 2.6- Especificaciones Eléctricas HTCC-AB01 [15]**

Recurso	Condición	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Fuente de Alimentación	Alimentación USB ( $\geq 500$ mA)	4.7V	5V	6V
	Alimentación batería de litio ( $\geq 250$ mA)	3.3V	3.7V	4.2V
	Alimentación 3.3 V (pin) ( $\geq 150$ mA)	2.7V	3.3V	3.5V
	Alimentación 5 V (pin) ( $\geq 500$ mA)	4.7V	5V	6V
Consumo de energía (mA)	Modo LoRa Rx		10mA	
	LoRa 10 dB output		70mA	
	LoRa 14 dB output		90mA	
	LoRa 17 dB output		100mA	
	LoRa 20 dB output		105mA	
	Sleep Mode (USB)		9.6mA	
	Sleep Mode (Batería)		11 $\mu$ A	
Salida	3.3V (pin)			500mA
	5V (pin-solo con USB)		Igual a la corriente de entrada	
	Control de potencia del dispositivo externo			350mA

### 2.7.2 SENSOR DE HUMEDAD CONDUCTIVO (MODELO HD-38)

Consiste de un módulo de humedad del suelo del tipo conductivo tal como se observa en la Figura 2.30, resistente a la corrosión, cuya funcionalidad está dirigida para el control de humedad de suelo o de tierra de plantas. El modelo HD-38 está conformado por un par de terminales denominadas sondas, separadas adecuadamente conectada a un módulo que se encarga del tratamiento de los datos, donde se presentan dos tipos de salidas: Análoga o Digital. Para la calibración de este sensor, cuenta con una sensibilidad ajustable por medio un potenciómetro. [16]



Figura 2.30-Sensor de Humedad HD-38 [16]

### 2.7.2.1 Especificaciones del sensor de humedad HD-38

Tabla 2.7 – Especificaciones del HD-38

Característica	Parámetros
Voltaje de alimentación	3.3 V – 12V
Corriente	30mA
A0	Salida Analógica
D0	Salida Digital
Temperatura de operación	-25 a 85°C

### 2.7.3 SENSOR DE HUMEDAD CAPACITIVO

Este sensor de humedad de la Figura 2.31, al igual que modelo conductivo, también permite medir la humedad del suelo, pero mediante la variación de la capacitancia, además que es el más habitual en sistemas de riego automático. La principal ventaja que maneja este sensor capacitivo es que no posee problemas de oxidación en sus electrodos, además que su precisión es ligeramente superior a los del tipo conductivo. [17]



Figura 2.31 Sensor de Humedad Capacitivo

## 2.7.4 MODULO DE CARGA TP4560

El módulo de carga TP4560 de la Figura 2.32, permite cargar baterías del tipo LiPo/LiIon de una celda. El módulo funciona con baterías de voltajes de carga nominal de 3.7V y de carga completa a 4.2V. [18]

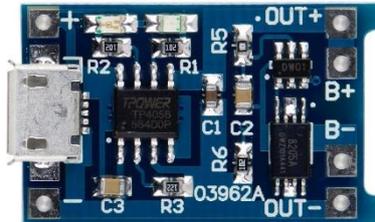


Figura 2.32- Modulo de carga TP4560 [18]

### 2.7.4.1 Especificaciones técnicas del TP4560

Tabla 2.8 – Especificaciones técnicas TP4560

Característica	Parámetros
Voltaje de alimentación	4.5 V – 5.5V
Cargador	CC/CV (Corriente Constante/Voltaje Constante)
Voltaje de carga en CV	4.2V
Precisión de carga	1.5%
LED Rojo	Cargando
LED Verde	Carga Completa

## 2.7.5 Panel solar 5V

Una celda solar es un dispositivo electrónico que es capaz de capturar la luz solar y convertirla en electricidad. Estas celdas solares son juntadas para formar unidades más grandes, denominadas paneles solares tal como se observa en la Figura 2.33. Existen diversos voltajes de salida que un panel puede ofrecer, estando desde los 4V hasta los 12V, implicando que a más voltaje mayor serán sus dimensiones. [19]



Figura 2.33- Panel Solar [19]

### 2.7.5.1 Especificaciones técnicas del Panel Solar

Tabla 2.9 – Especificaciones técnicas Panel Solar 5V [19]

Característica	Parámetros	
Voltaje	5V	
Energía	1W	
Corriente	Luz Indirecta	40mA
	Luz Directa	125mA
	Luz Directa (A nivel del mar)	200mA
Dimensiones	107x61mm	

### 2.7.6 BATERÍA LI-ION ULTRAFIRE 18650 3.7V 4800MAH

Las baterías del tipo Li-Ion como se muestran en la Figura 2.34, son para uso de dispositivos que requirieren de una corriente significativa, además que permiten ser recargadas. [20]



Figura 2.34 - Batería Li-ion ULTRAFIRE [20]

### 2.7.7 RELÉ 5V – CANAL 1

Un módulo Relé o Relay de Canal 1, como se puede observar en la Figura 2.35 permite la conmutación de cargas de potencias. Este módulo provee de la electrónica necesaria para manipular la bobina del relevador y de la señal de control, la cual puede provenir de un circuito de control como TTL o de un CMOS como los microcontroladores o tarjetas de Arduino, desde los voltajes de 3.3V a 5V. [21]

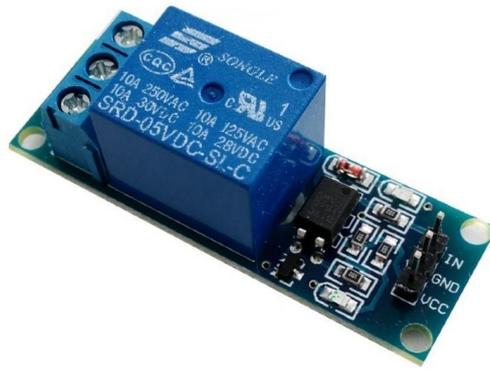


Figura 2.35- Modulo Relé - 1 Canal [21]

### 2.7.7.1 Especificaciones técnicas del módulo relé

Tabla 2.10 – Especificaciones técnicas modulo Relé – 1 Canal [21]

Característica	Parámetros
Carga máxima	AC 250V / 10 A, DC 30V / 10 A
Corriente de activación	5mA
Voltaje de funcionamiento	5V
DC+ (VCC)	Fuente de alimentación positiva
DC- (GND)	Fuente de alimentación negativa
IN	Controlador de nivel alto o bajo
NO	Interfaz normalmente abierta
COM	Interfaz común
NC	Interfaz normalmente cerrada

### 2.7.8 Diodo 1N4007

El diodo del tipo 1N4007 de la Figura 2.36, permite el flujo de corriente eléctrica en un solo sentido, cuyo comportamiento se describe de la siguiente manera:

- Polarización directa: permite el paso de la corriente eléctrica.
- Polarización inversa: impide el paso de corriente eléctrica.

El uso de estos diodos se usa regularmente como rectificadores de señales, ya sea aplicado en fuentes del tipo AC o DC. [22]



Figura 2.36- Diodo 1N4007 [22]

### 2.7.8.1 Especificaciones técnicas del diodo 1N4007

Tabla 2.11 – Especificaciones técnicas del diodo 1N4007 [22]

Característica	Parámetros
Voltaje repetitiva inversa de pico	1000V
Caída de voltaje directa	1.1Vmax
Corriente rectificadora media con polarización directa $I_o$	1A
Corriente máxima de pico	30Amax
Disipación de potencia a 25°C	-50°C a 175°C
Capacitación total	15pF

### 2.7.9 Electroválvula

Las electroválvulas como la de la Figura 2.37, son dispositivos que se activan mediante pulsos eléctricos, en el cual circula una corriente a través del solenoide que permite abrir o cerrar una válvula, controlando de esta forma el flujo de agua, aire, vapor, aceites, etc. Por lo general, el uso de electroválvulas son empleadas en lugares de difícil acceso o de lejanos. En el ámbito agrícola, el uso de estos dispositivos permite el flujo de agua hacia los cultivos a través de una red de tuberías. [23]



Figura 2.37- Electroválvula [23]

## 2.8 Marco Regulatorio

El estado ecuatoriano, a través del Gobierno Central tiene competencias exclusivas sobre el espectro radioeléctrico y el régimen general de telecomunicaciones. Dispone del derecho de administrar, regular y controlar los sectores estratégicos de telecomunicaciones y espectro radioeléctrico, lo cual incluye la potestad para emitir políticas públicas, planes y normas técnicas nacionales, de cumplimiento en todos los niveles de gobierno del Estado.

De acuerdo a LA AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE LAS TELECOMUNICACIONES - ARCOTEL, se hacen las siguientes consideraciones:

En el artículo 109 del Reglamento Ibídem, se determina que, por excepción, los equipos que hacen uso de espectro radioeléctrico en bandas de espectro de uso libre, requerirán de homologación, cuando así lo determine la ARCOTEL.

El numeral 1 del artículo 96 de la LOT determina que el espectro de uso libre “Son aquellas bandas de frecuencias que pueden ser utilizadas por el público en general, con sujeción a lo que establezca el ordenamiento jurídico vigente y sin necesidad de título habilitante, ni registro”.

Además, se ha expedido una NORMA TÉCNICA DE ESPECTRO DE USO LIBRE Y DE ESPECTRO PARA USO DETERMINADO EN BANDAS LIBRES, en la cual se presentan los siguientes artículos considerados de mayor importancia:

**ARTÍCULO 3.- ÁMBITO DE APLICACIÓN PARA ESPECTRO DE USO LIBRE.-** Se aplica a equipos que ocupen las bandas de frecuencias establecidas en el numeral 2 del Anexo 1 de esta Norma el cual indica que ningún transmisor intencional deberá sobrepasar los límites de intensidad de campo indicados en la tabla 2.1, siempre y cuando no se destinen a la prestación de servicios de telecomunicaciones, a la operación de redes privadas o al soporte de servicios de radiodifusión.

**Tabla 2.12. Límites generales para cualquier transmisor intencional**

**Fuente: UIT-R SM.2153-5**

<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b>Intensidad de campo (µV/m)</b>	<b>Distancia de medición (m)</b>
0.009-0.490	2400/f(kHz)	300
0.490-1.705	24000/f(kHz)	30
1.705-30.0	30	30
30-88	100	3
88-216	150	3
216-960	200	3
Por encima de 960	500	3

**ARTÍCULO 4.- HABILITACIÓN.** - El empleo de espectro de uso libre no requiere la obtención de ningún título habilitante.

**ARTÍCULO 6.- INTERFERENCIA.** - Un equipo, salvo los equipos ICM, que utiliza espectro de uso libre no puede ocasionar interferencia perjudicial a ninguna estación de radiocomunicaciones que pertenezca a un servicio concesionado, autorizado o registrado por la ARCOTEL, independientemente de la fecha de concesión, autorización o registro, aún si dicho equipo cumple con las características técnicas establecidas en la

presente norma técnica. En caso de que se produzca una interferencia perjudicial, se deberá suspender inmediatamente la operación del equipo, bajo pena de las sanciones establecidas en la regulación vigente. La operación no podrá reanudarse hasta que la ARCOTEL emita un informe técnico favorable, indicando que se ha subsanado la interferencia perjudicial.

Los equipos que utilicen espectro de uso libre y las estaciones que pertenezcan a los servicios de radiocomunicaciones que funcionan en estas bandas, deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de las aplicaciones ICM.

**ARTÍCULO 9.- RESPONSABILIDAD.** - El usuario de equipos que empleen espectro de uso libre es responsable del cumplimiento de todas las condiciones técnicas especificadas en esta normativa. El incumplimiento de lo dispuesto en la presente norma técnica constituye una infracción y genera las sanciones previstas en la Ley Orgánica de Telecomunicaciones, su Reglamento General y demás normativa aplicable.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente capítulo se basa en los resultados que se han obtenido durante el periodo de mediciones experimentales de RSSI y de humedad que se han llevado a cabo en GEA, en base a la distribución de la Figura 3.1. Durante este periodo que abarca desde finales de junio hasta inicios de agosto, no se presentaron precipitaciones, por lo que el ambiente fue de verano al 100%. Todas las mediciones que se han llevado han seguido el siguiente cronograma de la Tabla 3.1:

**Tabla 3.1 – Bitácora de mediciones**

Rayo	Altura	Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de fin	Hora de fin
A	1m	29/06/2022	12:45:00	01/07/2022	12:00:00
	0.5m	01/07/2022	12:40:00	06/07/2022	9:50:00
	2m	06/07/2022	11:30:00	08/07/2022	9:50:00
B	1m	08/07/2022	10:45:00	11/07/2022	12:30:00
	0.5m	11/07/2022	12:45:00	13/07/2022	10:00:00
	2m	13/07/2022	10:30:00	15/07/2022	12:15:00
C	1m	15/07/2022	12:50:00	19/07/2022	10:30:00
	0.5m	21/07/2022	10:55:00	26/07/2022	10:10:00
	2m	19/07/2022	11:30:00	21/07/2022	10:20:00
Zona Sin Cultivo	1m	28/07/2022	11:40:00	02/08/2022	09:20:00



**Figura 3.1 – Ubicación de los rayos y nodos en el Google Earth Pro**

En este capítulo también se incluyen gráficas y rectas de cada medición realizada por cada rayo y por cada altura definida, las cuales servirán para la determinación de los gradientes experimentales en base a la regresión lineal de la data recolectada en el cultivo de cacao. Adicionalmente, los gradientes experimentales fueron comparados tomando en cuenta el perfil de nivelación del terreno y la densidad de vegetación.

Finalmente, la obtención del modelo de propagación experimental permite una aproximación real de la cobertura presente en el cultivo de cacao, cuyo modelo permitió la colocación de los sensores actuadores para el control del sistema de riego.

### 3.1 Comparativa RSSI de los rayos

#### 3.1.1 Resultados RSSI

Para la presente sección se muestran cada una de las lecturas de RSSI tanto en subida como en bajada, que fueron registradas por cada uno de los rayos, donde se observa las potencias RSSI a diferentes niveles de altura y con su respectivo promedio (RSSI AV).

##### 3.1.1.1 Zona sin cultivo de cacao

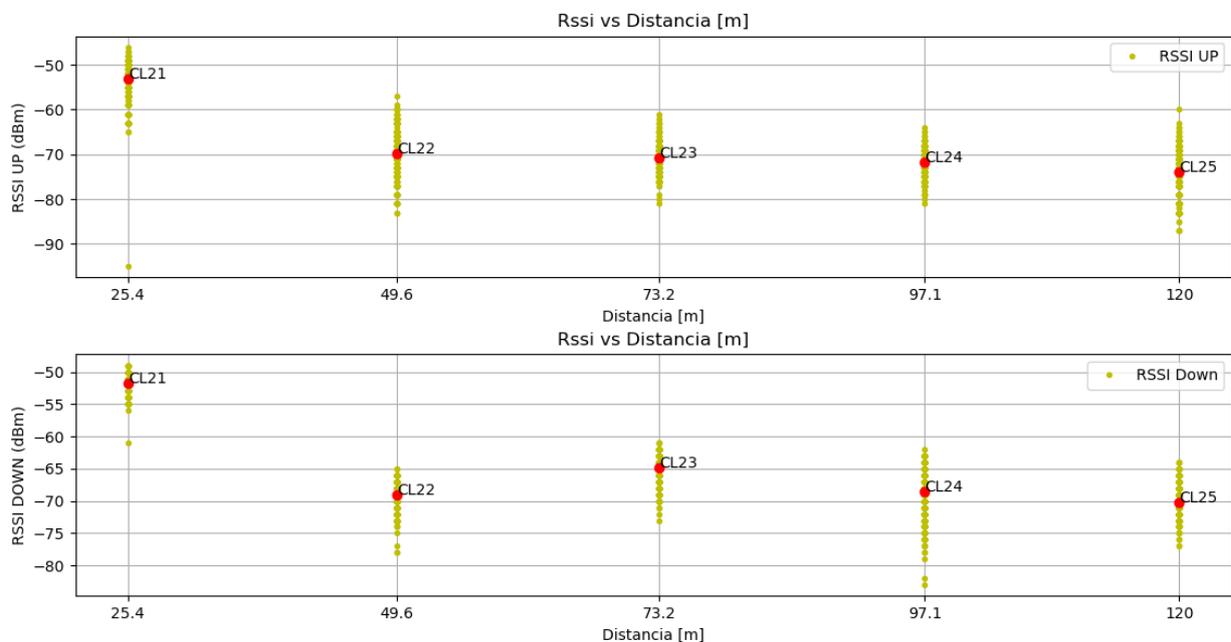


Figura 3.2 – RSSI vs Distancia de zona sin cultivo cacao

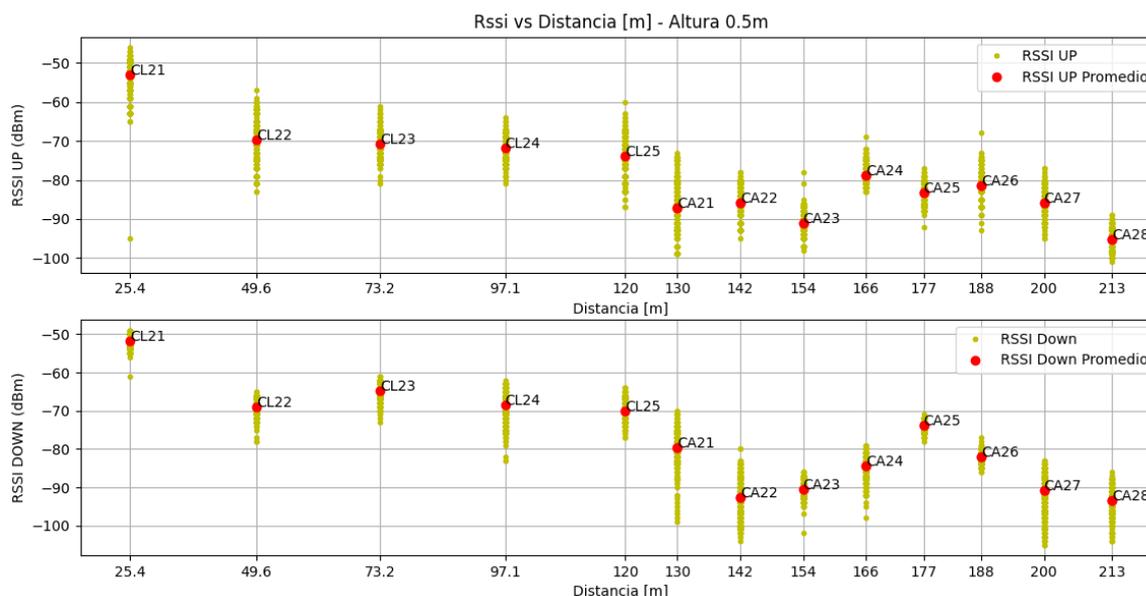
En la Figura 3.2 se muestra los datos de RSSI UP y RSSI DOWN de la zona sin cultivo que se encuentra entre el Gateway y el cultivo de cacao. Esta zona conformada por vegetación silvestre permite diseñar el modelo de propagación multi-gradientes, de tal forma que se establezca diversos gradientes. Para este caso, se asigna un primer gradiente para esta zona sin cultivo y un segundo y hasta tercer gradiente (En ciertos casos) para la zona de cacao.

En la Tabla 3.2 se puede encontrar un resumen de estas mediciones. Se puede observar que la potencia RSSI disminuye a medida que se aumenta la distancia entre el Gateway, y el nodo.

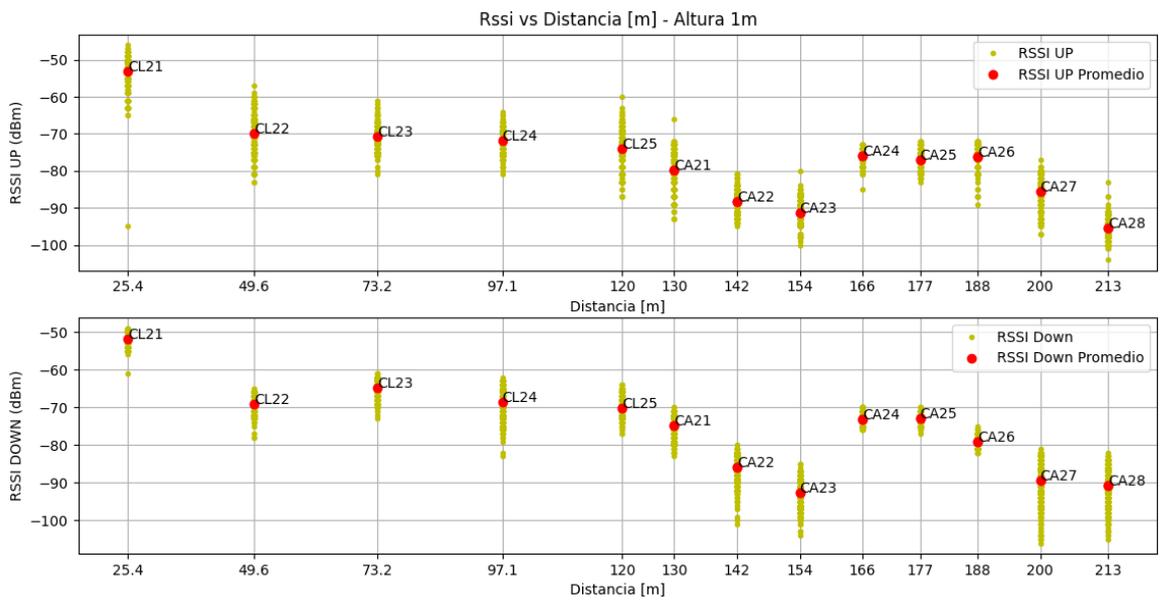
**Tabla 3.2 – Resumen de mediciones de la zona sin cultivo de cacao**

Zona sin vegetación			
Nodo	Distancia desde el nodo [m]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]
CL21	25.4	-53.132	-51.822
CL22	49.6	-69.762	-69.038
CL23	73.2	-70.838	-64.780
CL24	97.1	-71.770	-68.534
CL25	120	-73.918	-70.142

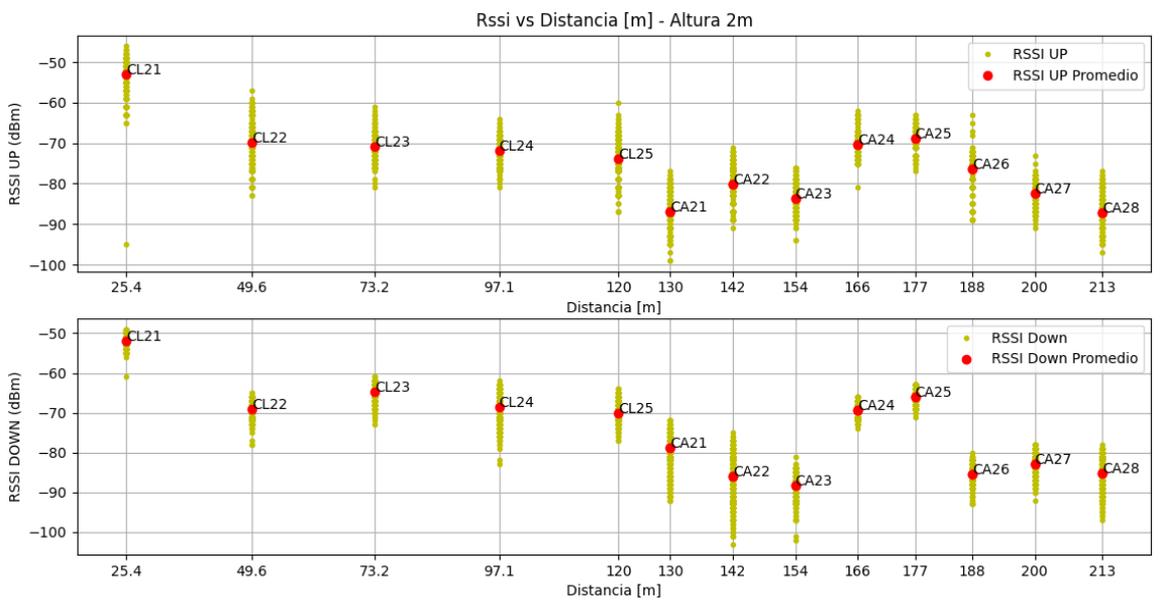
### 3.1.1.2 Lecturas RSSI del Rayo A



**Figura 3.3 – RSSI vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 0.5m**



**Figura 3.4 – RSSI vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 0.5m**



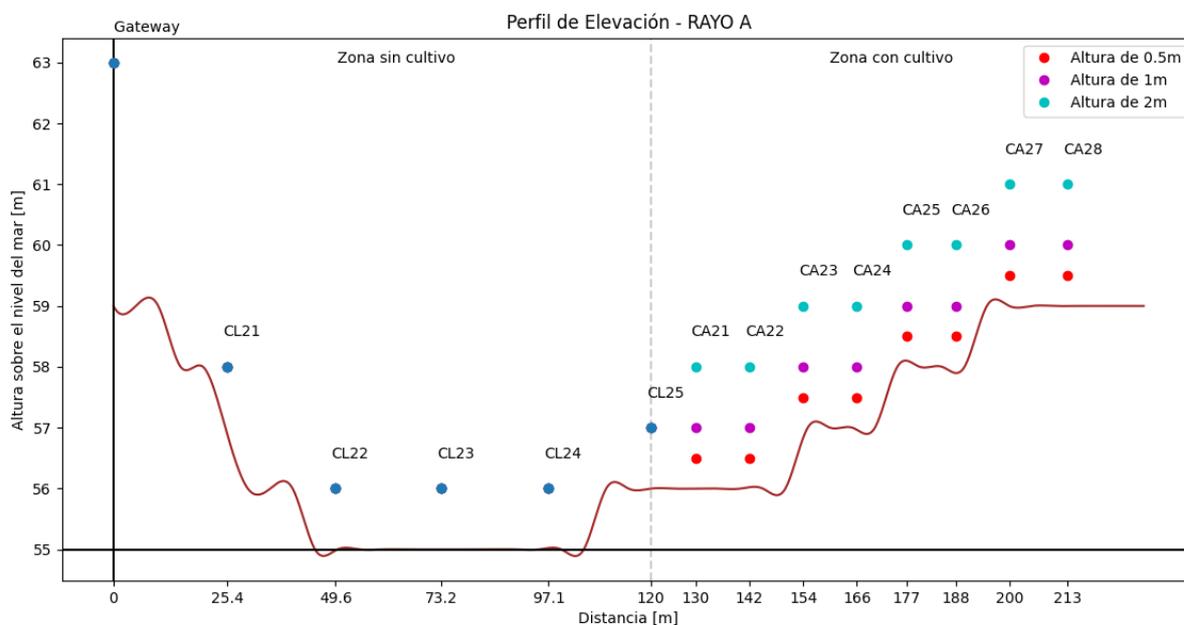
**Figura 3.5 – RSSI vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m**

Tal como se puede observar en las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5, corresponden a las mediciones RSSI UP y RSSI DOWN que se obtuvieron con el Rayo A. Para cada gráfica se observa que se sigue un patrón de bajada y de subida a lo largo del rayo. Se debe

considerar que el perfil de nivelación no es plano, que presenta niveles y desniveles tal como se observa en la Figura 3.5, y que además toda el área del cultivo se encuentra rodeada de vegetación silvestre. En conjunto estos factores afectan directamente a los valores de RSSI que transmite cada nodo. Esto se puede apreciar en las mediciones RSSI de la Tabla 3.3 donde el RSSI de subida como de bajada no poseen el mismo nivel de potencia.

**Tabla 3.3 – Resumen de mediciones del Rayo A**

RAYO A							
Altura:		0.5m		1m		2m	
Nodo	Distancia desde el nodo [m]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]
CA21	130	-87.266	-79.740	-79.884	-74.798	-86.936	
CA22	142	-85.968	-92.604	-88.282	-85.772	-80.184	-86.064
CA23	154	-90.956	-90.512	-91.212	-92.746	-83.67	-88.192
CA24	166	-78.824	-84.448	-76.01	-73.182	-70.378	-69.232
CA25	177	-83.236	-73.806	-77.134	-72.770	-68.782	-66.042
CA26	188	-81.426	-82.146	-76.216	-79.118	-76.282	-85.534
CA27	200	-85.84	-90.476	-85.674	-89.242	-82.498	-83.002
CA28	213	-95.304	-93.440	-95.406	-90.786	-87.186	-85.270



**Figura 3.6 – Perfil de elevación para el rayo A**

### 3.1.1.3 Lecturas RSSI del Rayo B

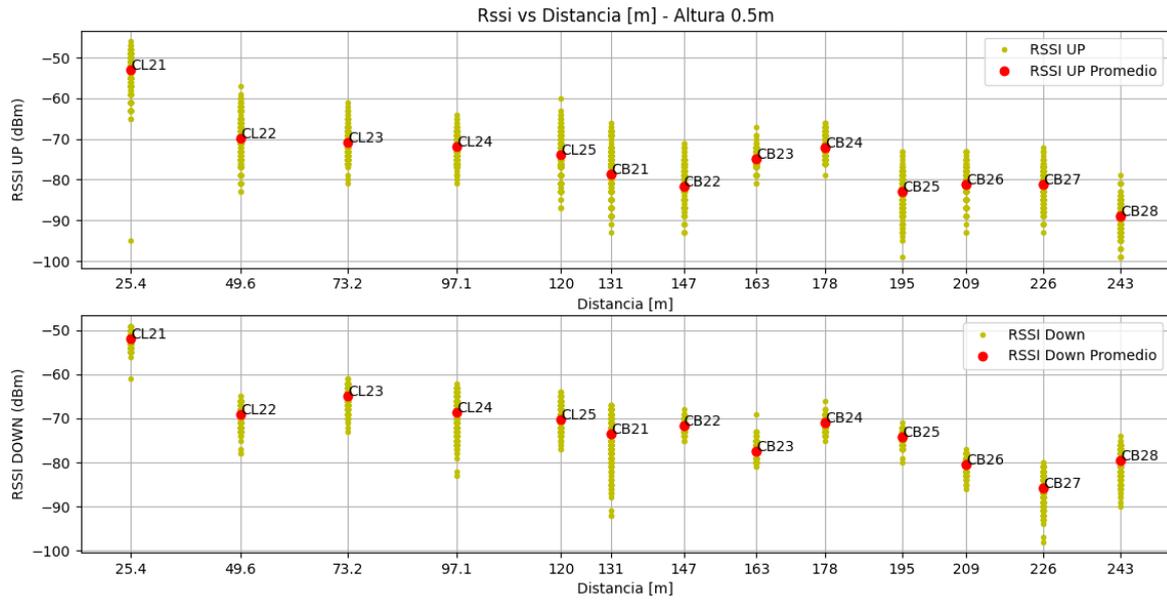


Figura 3.7 – RSSI vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 0.5m

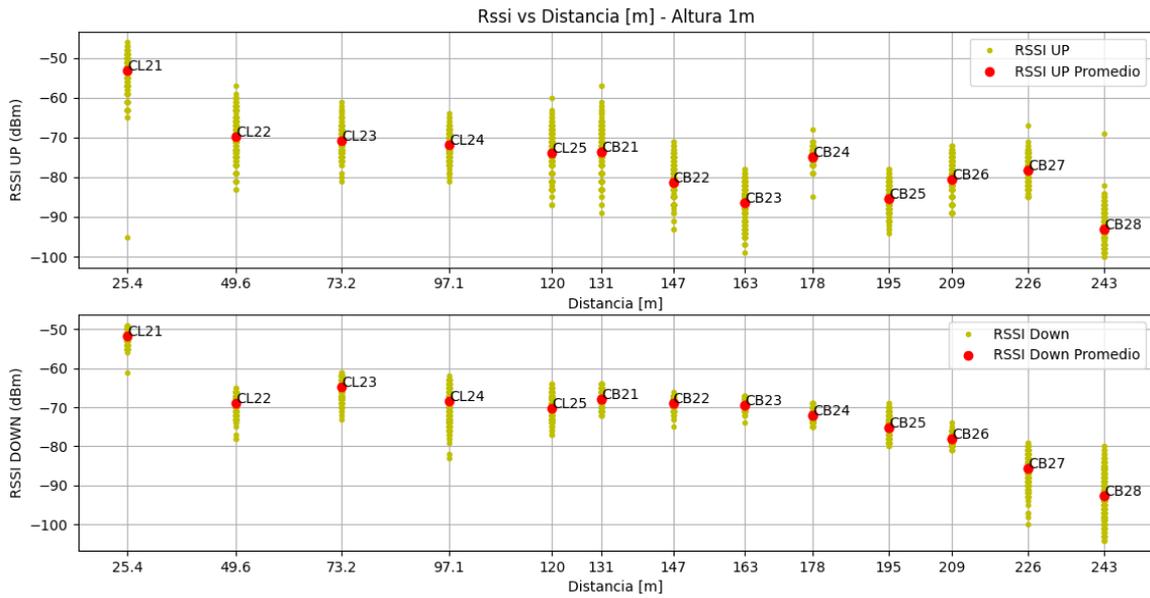
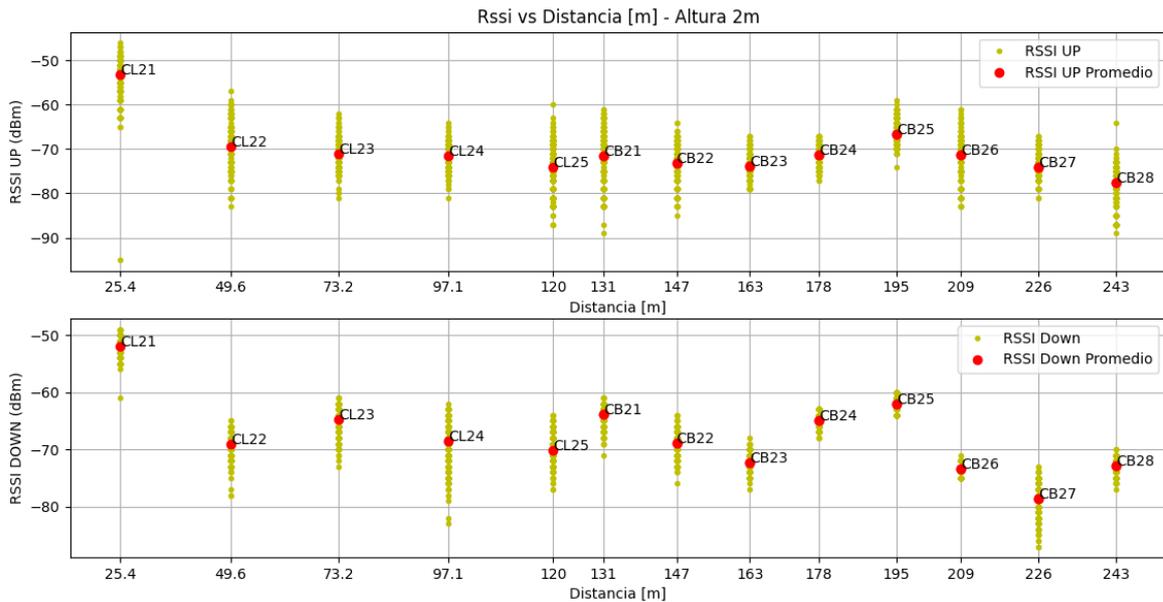


Figura 3.8 – RSSI vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 1m



**Figura 3.9 – RSSI vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m**

Para los datos RSSI recolectados del rayo B en la Figuras 3.7, 3.8 y 3.9, se observa que con valores de altura de 0.5m presentan una gran variabilidad de las mediciones. Sin embargo, a medida que se incrementa la altura, esa variabilidad comienza a disminuir, tal como se observa en la Tabla 3.4:

**Tabla 3.4 – Resumen de mediciones del Rayo B**

RAYO B							
Altura:		0.5m		1m		2m	
Nodo	Distancia desde el nodo [m]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]
CB21	131	-78.530	-73.586	-73.72	-68.012	-71.555	-63.891
CB22	147	-81.578	-71.590	-81.242	-69.044	-73.075	-68.940
CB23	163	-74.828	-77.554	-86.502	-69.550	-73.898	-72.278
CB24	178	-72.130	-70.990	-74.788	-71.978	-71.400	-64.929
CB25	195	-82.816	-74.172	-85.288	-75.090	-66.603	-62.133
CB26	209	-81.158	-80.522	-80.404	-78.024	-71.118	-73.371
CB27	226	-81.210	-85.748	-78.346	-85.640	-74.198	-78.671
CB28	243	-89.014	-79.580	-93.058	-92.556	-77.678	-72.944

Para este rayo B ya se comienza a evidenciar que el terreno comienza a afectar a los nodos colocados a lo largo de la zona con cultivo. En base a la Figura 3.10 se

observa que los dos últimos presentan una obstrucción del terreno para alturas por debajo de 1m.

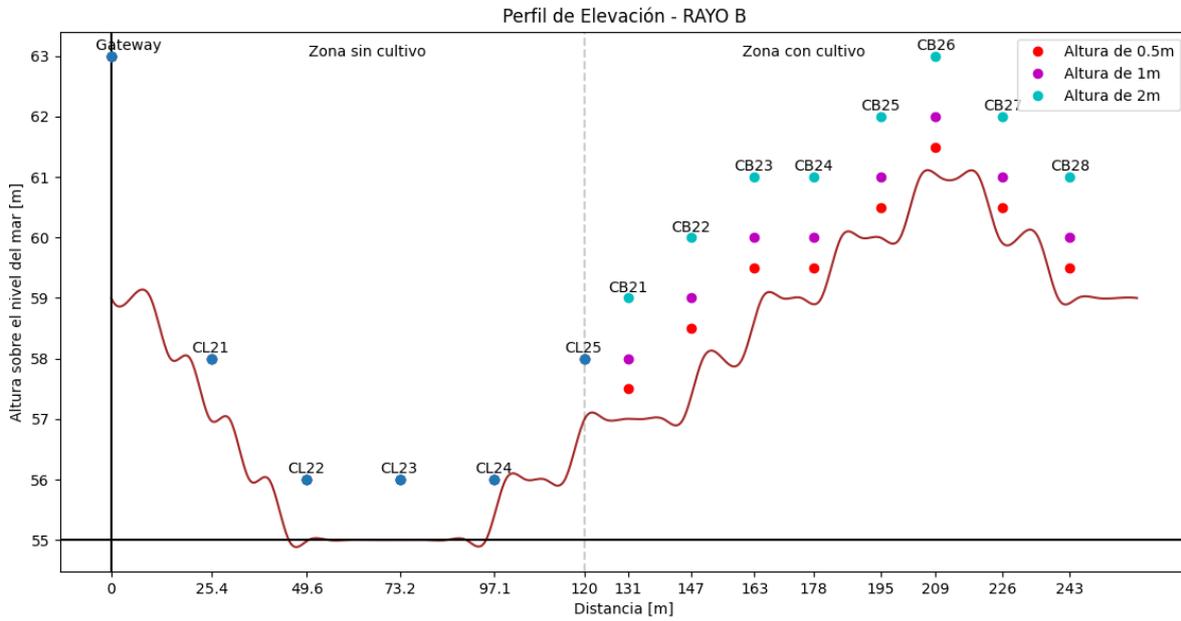


Figura 3.10 – Perfil de elevación para el rayo B

### 3.1.1.4 Lecturas RSSI del Rayo C

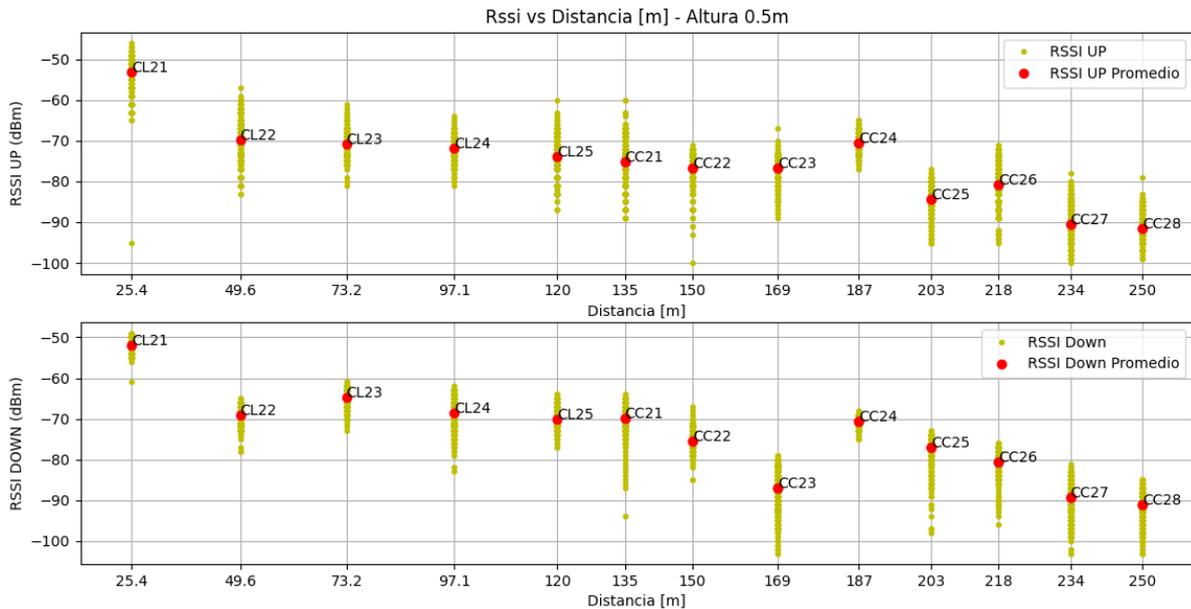
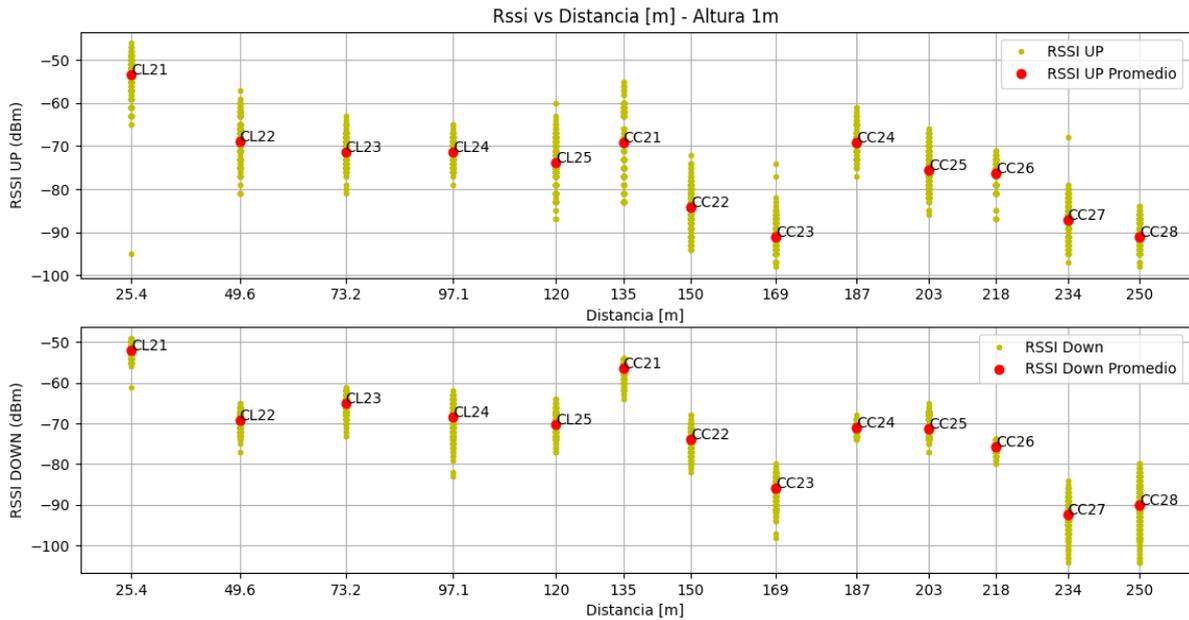
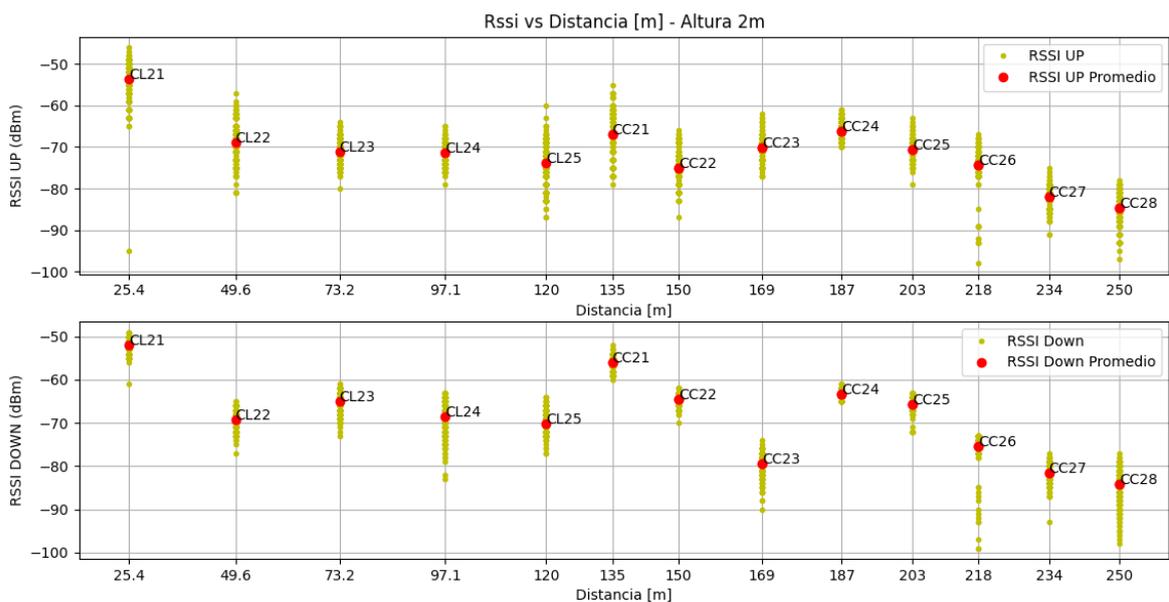


Figura 3.11 – RSSI vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 0.5m



**Figura 3.12 – RSSI vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 1m**



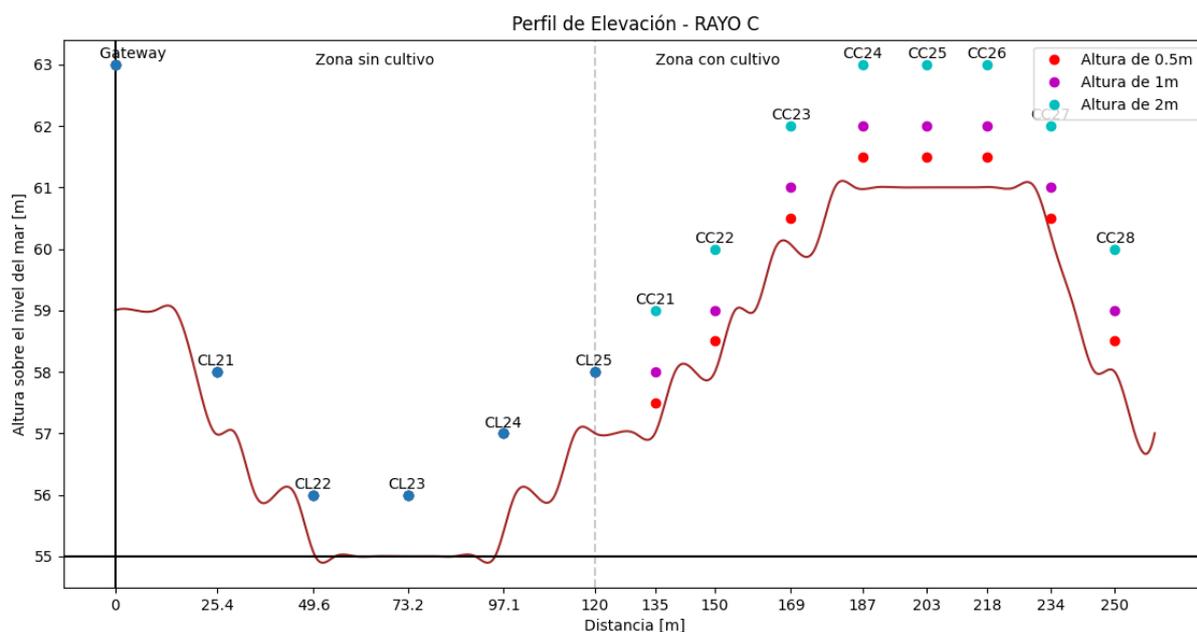
**Figura 3.13 – RSSI vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m**

Para los datos RSSI recolectados del rayo C en las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13, se observa el mismo comportamiento del rayo B, donde valores con altura de 0.5m presentan una gran variabilidad de las mediciones. Sin embargo, al incrementar la altura, esa variabilidad comienza a disminuir y se la puede evidenciar en la Tabla 3.5, donde al bajar la desviación estándar, la potencia comienza a aumentar. En este rayo se puede

notar una singularidad muy especial y es que al aumentar la altura a 2m se hace evidente que casi todas las mediciones de potencia son similares.

**Tabla 3.5 – Resumen de mediciones del Rayo C**

RAYO C							
Altura:		0.5m		1m		2m	
Nodo	Distancia desde el nodo [m]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]	RSSI UP AV [dBm]	RSSI DOWN AV [dBm]
CC21	135	-75.210	-69.780	-69.106	-56.442	-66.924	-55.972
CC22	150	-76.740	-75.410	-84.064	-73.897	-75.124	-64.593
CC23	169	-76.622	-87.022	-91.019	-85.875	-70.183	-79.372
CC24	187	-70.612	-70.632	-69.183	-70.8944	-66.214	-63.576
CC25	203	-84.376	-77.134	-75.606	-71.325	-70.545	-65.578
CC26	218	-80.896	-80.698	-76.217	-75.745	-74.352	-75.438
CC27	234	-90.560	-89.334	-87.097	-92.397	-82.062	-81.6103
CC28	250	-91.604	-91.164	-91.194	-90.153	-84.783	-84.120



**Figura 3.14 – Perfil de elevación para el rayo C**

Para este último rayo es la que presenta una mayor obstrucción en el perfil de nivelación tal como se observa en la Figura 3.14, sobre todo para los últimos nodos. E incluso para una altura de 2 metros no basta para superar la obstrucción.

### 3.1.2 Graficas comparativas de RSSI por altura

En la siguiente sección se comparan las gráficas de RSSI vs Distancia a diferentes alturas, donde se analiza el comportamiento de cada uno de los rayos.

#### 3.1.2.1 Altura de los nodos a 0.5m

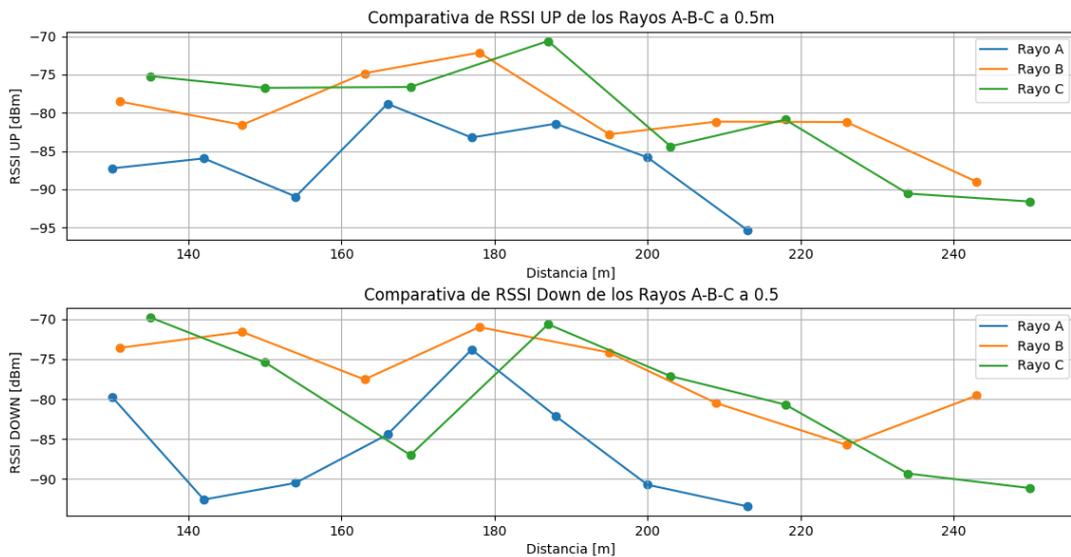


Figura 3.15 – RSSI vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 0.5m

Para la primera altura de los nodos correspondiente a 0.5m de la Figura 3.15, se observa que los rayos B y C evidencian un comportamiento casi igual en su RSSI de subida, a medida que aumenta la distancia. Sin embargo, el rayo A está por debajo de los 2 rayos anteriormente mencionados. Para el RSSI de bajada, los valores del rayo A decaen en potencia, presentándose un único pico a la largo del rayo. Cabe recordar que cada rayo presenta su propio nivel de perfil de terreno, por lo que algunos nodos presentarán mejores resultados de RSSI en un rayo en comparación a otros.

### 3.1.2.2 Altura de los nodos a 1m

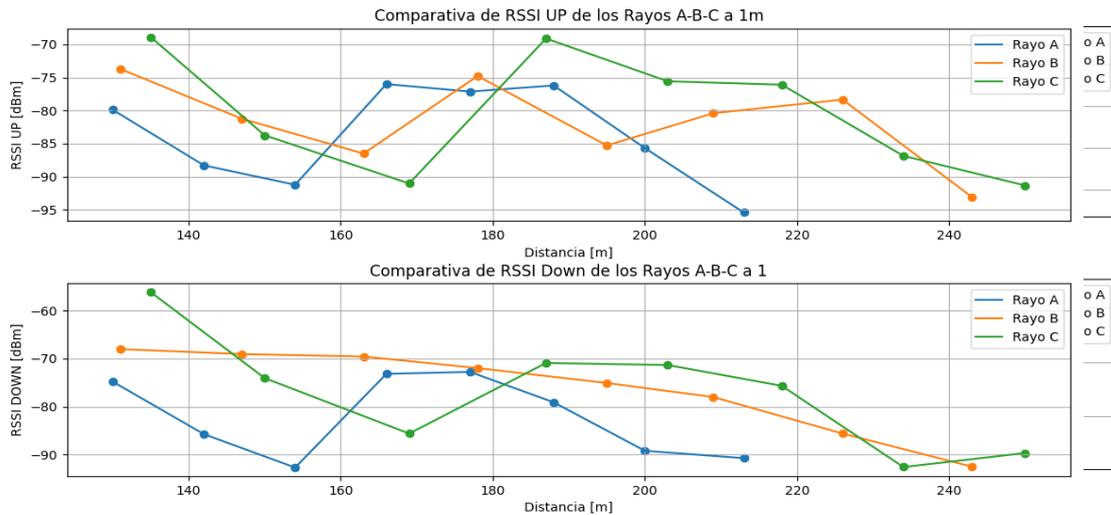


Figura 3.16 – RSSI vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 1m

Para la segunda altura de los nodos correspondiente a 1m de la Figura 3.16, ya se evidencia que el RSSI de subida del rayo A comienza a tener un comportamiento semejante a los otros dos rayos. También se observa que la potencia ha aumentado al incrementar la altura de los nodos. Sin embargo, los nodos que se encuentran al final de cada rayo poseen niveles de potencia muy bajos, pero por encima del nivel de sensibilidad de cada módulo LoRa.

### 3.1.2.3 Altura de los nodos a 2m

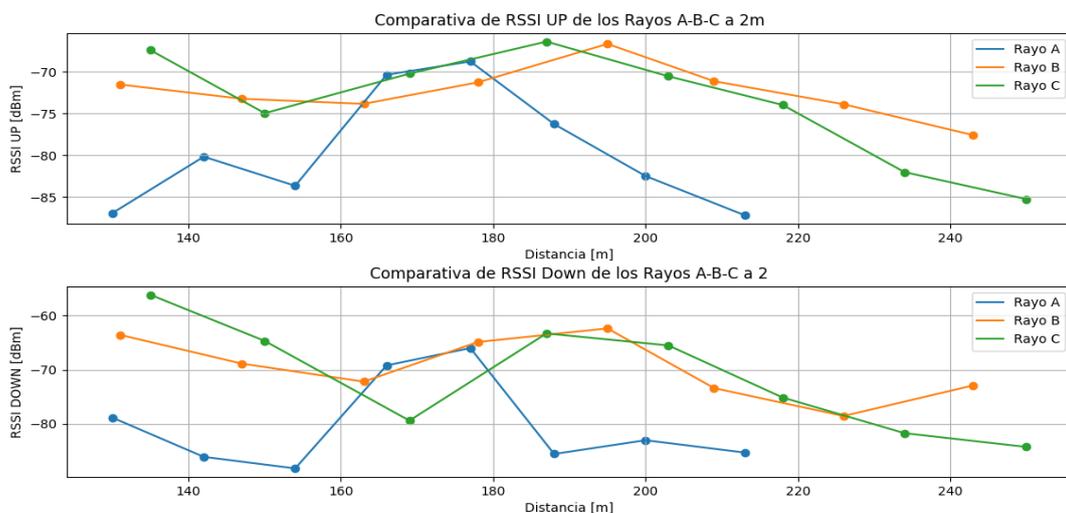


Figura 3.17 – RSSI vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 2m

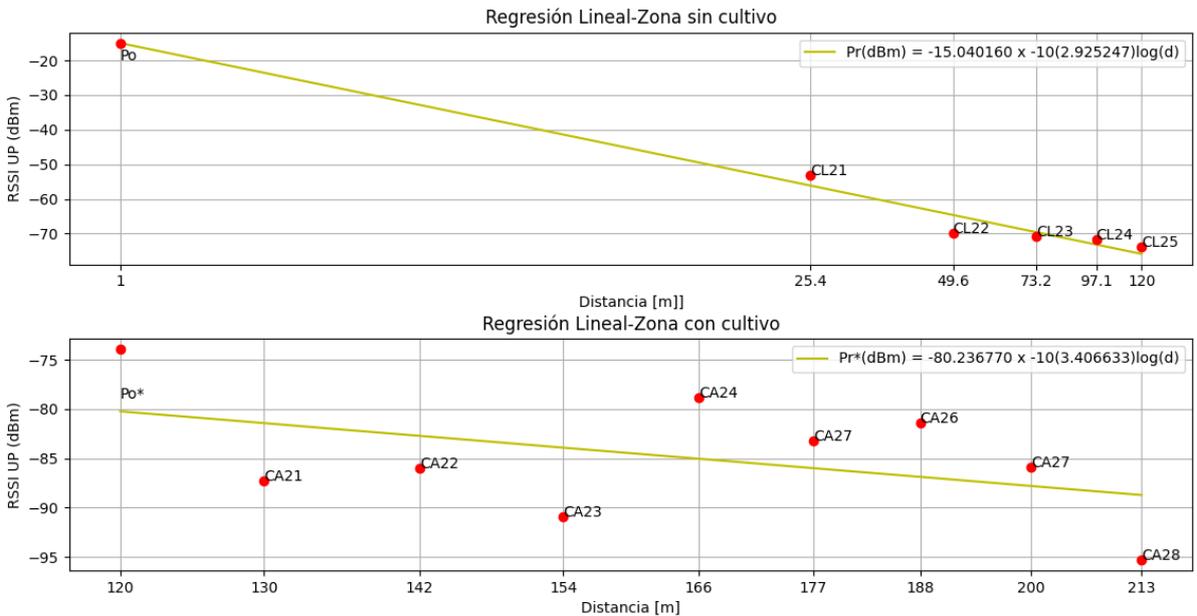
Para la última altura de los nodos correspondiente a 2m de la Figura 3.17, se evidencia que el rayo A ya no sigue el mismo comportamiento de los rayos B y C, presentando niveles de potencia por debajo de estos dos. Por otro lado, los rayos B y C presentan un comportamiento similar, e incluso los niveles de potencia de los últimos nodos ya no son tan bajos en comparación a la altura de 1m, esto se debe a que al aumentar la altura se tiene una mejor recepción de la potencia, y como el rayo A se encuentra en un terreno que presenta menos desniveles en comparación con los otros dos, la tendencia en su curva es más regular en cuanto a variaciones.

### 3.1.3 Gradientes parciales por altura

Una vez que se ha recopilado toda la información de la data de RSSI tanto de bajada como de subida, se procede a obtener los gradientes parciales por cada rayo y por cada altura. Para encontrar los gradientes, se ha usado la regresión lineal, tomando en cuenta que la distancia debe encontrarse en escala logarítmica para establecer el modelo matemático de propagación.

#### 3.1.3.1 Rayo A

##### 3.1.3.1.1 Altura de 0.5 m



**Figura 3.18 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 0.5m**

Para la primera regresión de RSSI de subida del rayo A con nodos a 0.5m de altura de la Figura 3.18, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 0.5m:  $\alpha_2=3.406$

Por lo tanto, la ecuación RSSI vs Distancia para múltiples gradientes sigue la ecuación 3.1:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} P_o - 10\alpha_1 \log(d) & 0 < d < d_1 \\ P_o' - +10\alpha_2 \log\left(\frac{d}{d_1}\right) & d_1 < d < d_2 \end{cases} \quad (3.1)$$

Donde  $P_o$  es la potencia de transmisión a un metro de la antena de LoRaWAN, cuyo valor es de -15 dBm, y de la distancia en metros. Además, para la variable  $d_1$  con un valor de 120 m, corresponde a la distancia en donde comienza la zona de cultivo de cacao, mientras que  $d_2$  con un valor de 250 m, es la distancia en donde termina el cultivo.

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.2:

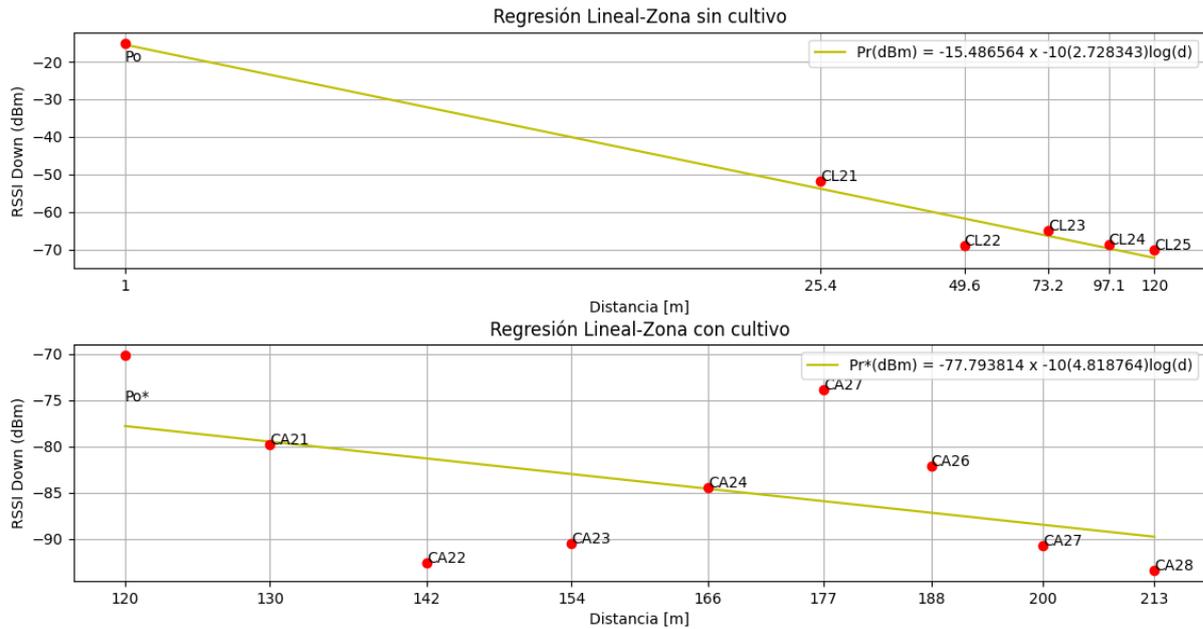
$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -80.24 \text{ dBm} + 10(3.406) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.2)$$

Finalmente, para encontrar la pérdida de paso o Loss Path, se sigue la ecuación 3.3:

$$L_p(dB) = L_o + \begin{cases} 10\alpha_1 \log(d) & 0 < d < d_1 \\ 10\alpha_1 \log(d) + 10\alpha_2 \log\left(\frac{d}{d_1}\right) & d_1 < d < d_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

Donde  $L_o$  es la potencia de transmisión a un metro de la antena de LoRaWAN, cuyo valor es de 35 dB. Por lo que la ecuación de pérdida de paso es igual a la ecuación 3.4:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.406) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.4)$$



**Figura 3.19 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 0.5m**

Para la regresión de RSSI de bajada del rayo A con nodos a 0.5m de altura de la Figura 3.19, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 0.5m:  $\alpha_2=4.819$

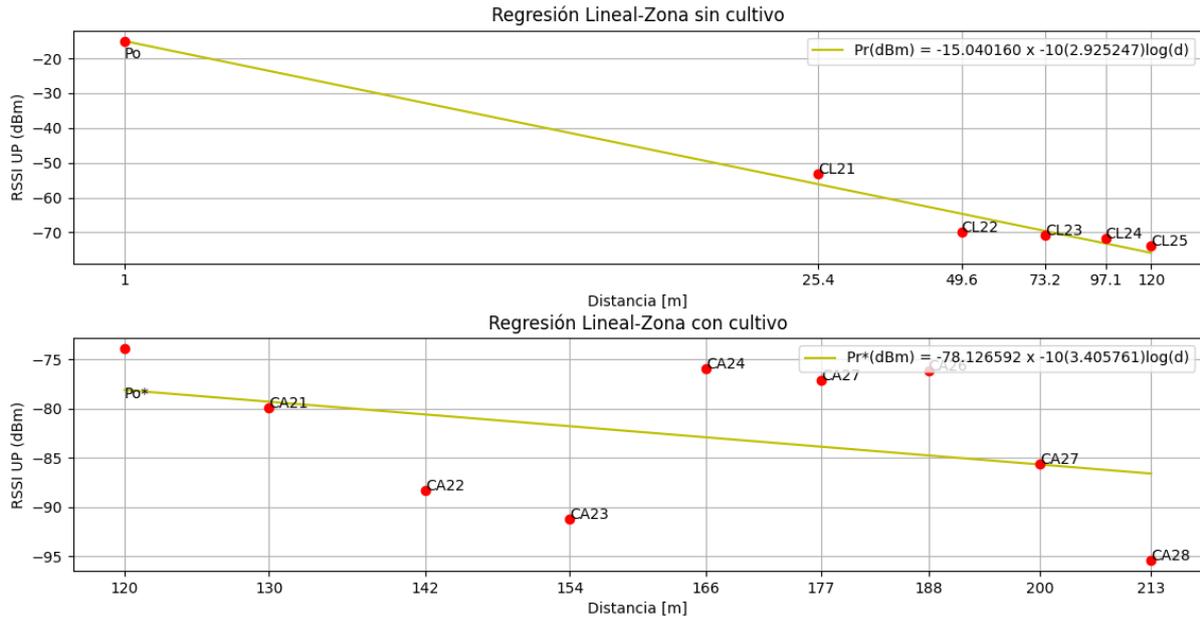
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.5:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 dBm - 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ -77.79 dBm + 10(4.819) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.5)$$

Por lo tanto, la ecuación de pérdida de paso es igual a la ecuación 3.6:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(4.819) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.6)$$

### 3.1.3.1.2 Altura de 1m



**Figura 3.20 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 1m**

Para la regresión con RSSI de subida del rayo A con nodos a 1m de altura de la Figura 3.20, se obtiene los siguientes gradientes:

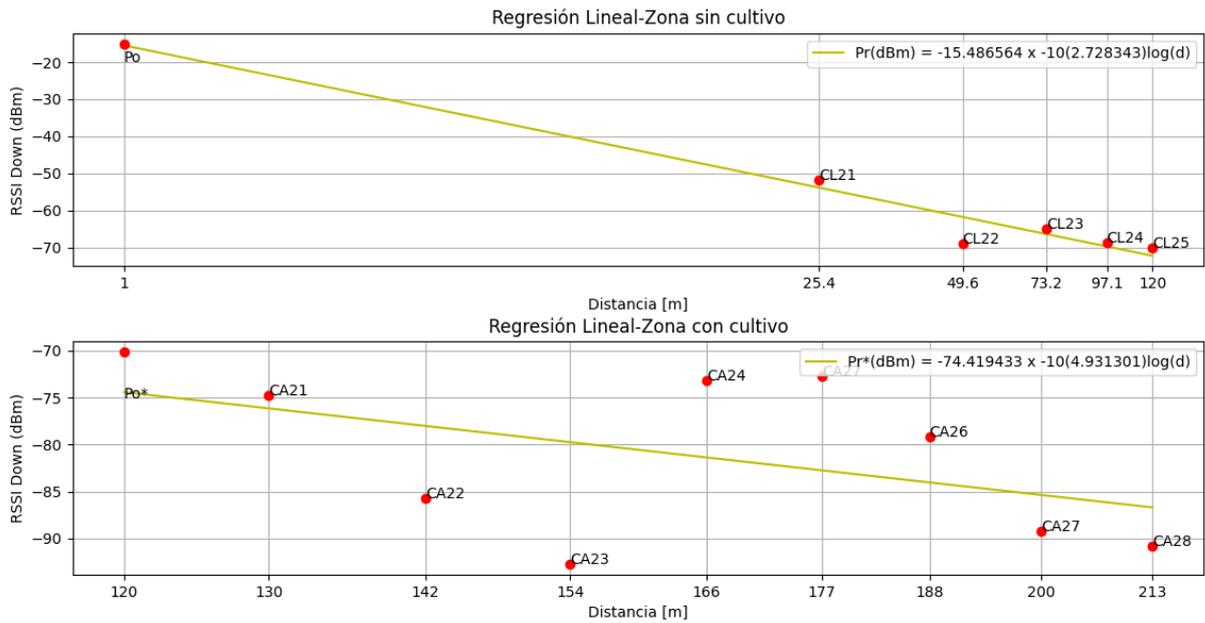
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 1m:  $\alpha_2=3.4056$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.7:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -78.13 \text{ dBm} - 10(3.4056) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.7)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.8:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.4056) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.8)$$



**Figura 3.21 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 1m**

Para la regresión con RSSI de bajada del rayo A con nodos a 1m de altura de la Figura 3.21, se obtiene los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 1m:  $\alpha_2=4.931$

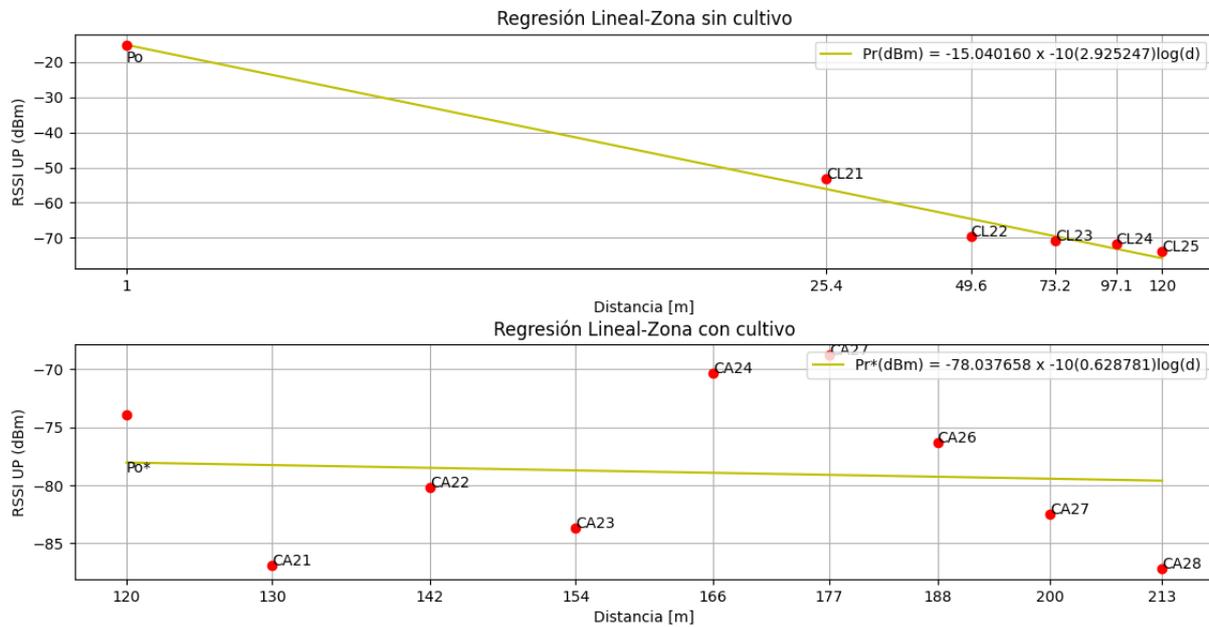
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.9:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 dBm - 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ -74.42 dBm - 10(4.931) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.9)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.10:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(4.931) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.10)$$

### 3.1.3.1.3 Altura de 2m



**Figura 3.22 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m**

Para la regresión con RSSI de subida del rayo A con nodos a 2m de altura de la Figura 3.22, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=0.6287$

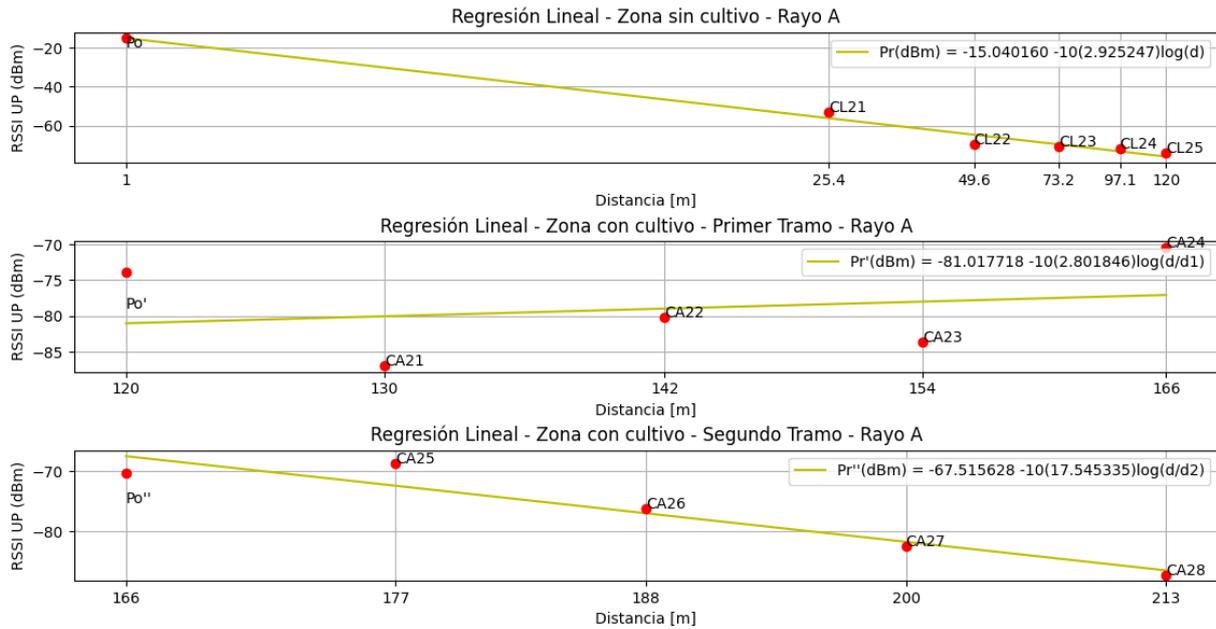
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.11:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -78.04 \text{ dBm} - 10(0.6287) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.11)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.12:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.925) \log(d) + 10(0.6287) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.12)$$

Dado que se ha obtenido un valor de gradiente  $\alpha_2=0.6287 < 2$  proveniente del canal Up con altura de 2m, se ha optado por establecer un tercer gradiente, de tal forma que todos los gradientes sean mayores a 2.



**Figura 3.23 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes**

Para la regresión con RSSI de subida del rayo A con nodos a 2m de altura de la Figura 3.23, se obtienen los siguientes gradientes:

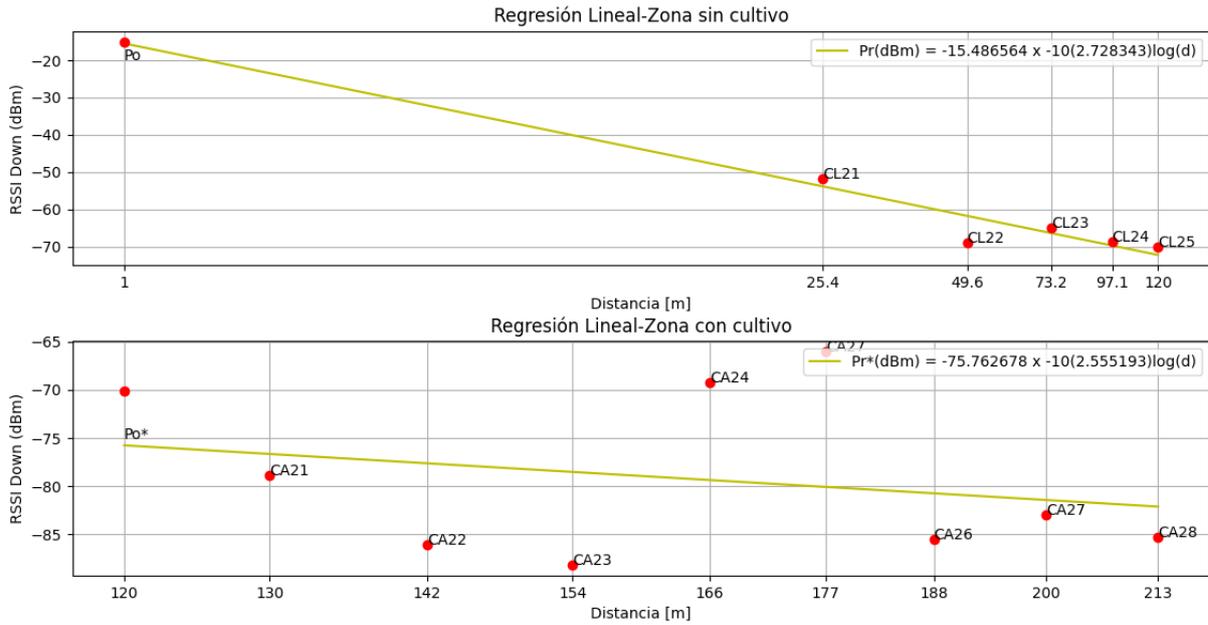
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=2.802$
- El tercer gradiente correspondiente al segundo tramo del cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_3=17.545$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.13:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -81.017 \text{ dBm} - 10(2.802) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 166 \text{ m} \\ -67.515 \text{ dBm} - 10(17.545) \log\left(\frac{d}{166 \text{ m}}\right) & ; \quad 166 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.13)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.14:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.925) \log(d) + 10(2.802) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 166 \text{ m} \\ 10(2.925) \log(d) + 10(2.802) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) + 10(17.545) \log\left(\frac{d}{166 \text{ m}}\right) & ; \quad 166 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.14)$$



**Figura 3.24 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m**

Para la regresión con RSSI de bajada del rayo A con nodos a 2m de altura de la Figura 3.24, se obtiene los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=2.55$

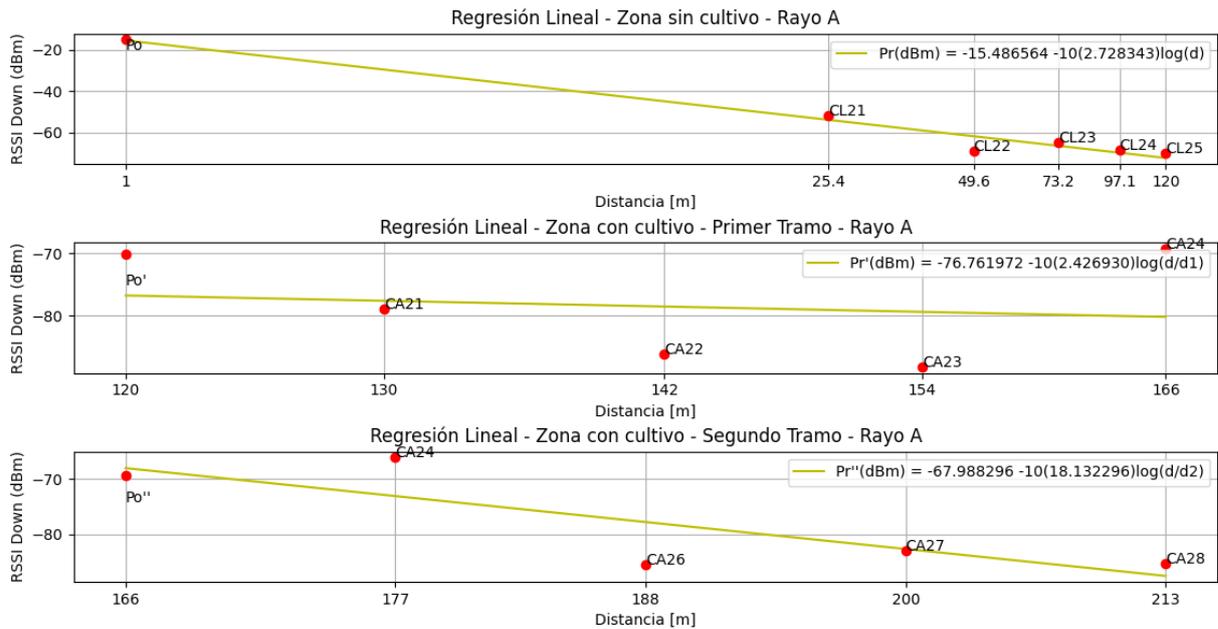
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.15:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -75.76 \text{ dBm} - 10(2.55) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.15)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.16:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.728) \log(d) + 10(2.55) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.16)$$

Dado que se ha aplicado un tercer gradiente para el canal Up, también se puede emplear un tercer gradiente para el canal Down.



**Figura 3.25 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo A con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes**

Para la regresión con RSSI de subida del rayo A con nodos a 2m de altura de la Figura 3.25, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=2.427$
- El tercer gradiente correspondiente al segundo tramo del cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_3=18.132$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.17:

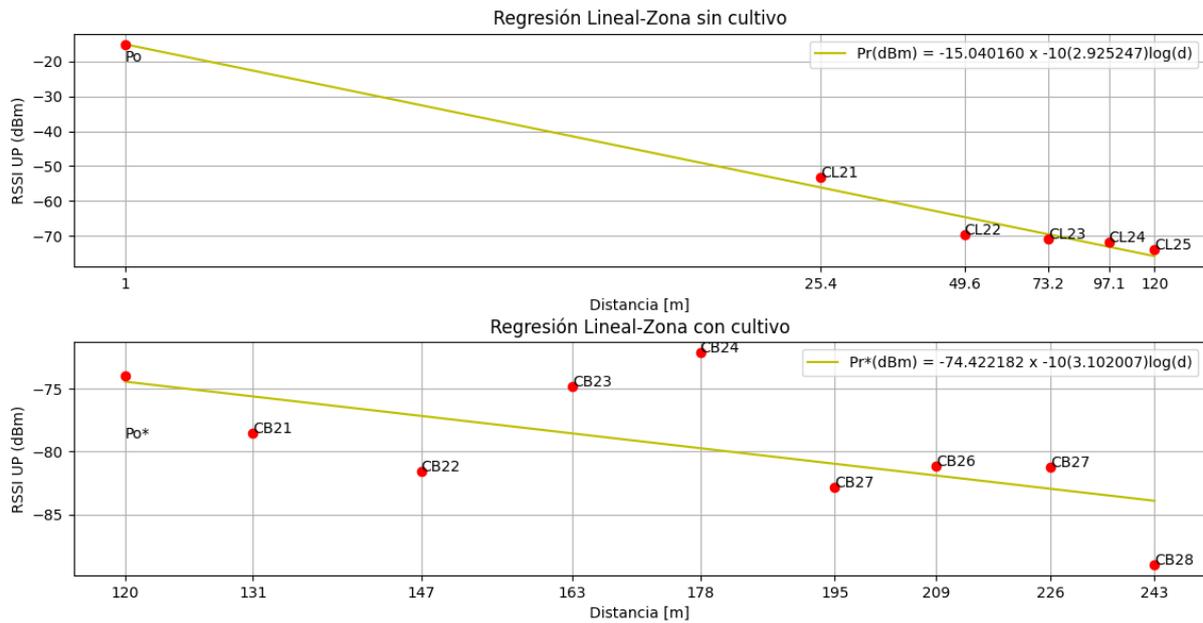
$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -76.762 \text{ dBm} - 10(2.427) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 166 \text{ m} \\ -67.988 \text{ dBm} - 10(18.132) \log\left(\frac{d}{166 \text{ m}}\right) & ; \quad 166 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.17)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.18:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.925) \log(d) + 10(2.427) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 166 \text{ m} \\ 10(2.925) \log(d) + 10(2.427) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) + 10(18.132) \log\left(\frac{d}{166 \text{ m}}\right) & ; \quad 166 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.18)$$

### 3.1.3.2 Rayo B

#### 3.1.3.2.1 Altura de 0.5m



**Figura 3.26 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 0.5m**

Para la regresión de RSSI de subida del rayo B con nodos a 0.5m de altura de la Figura 3.26, se obtienen los siguientes gradientes:

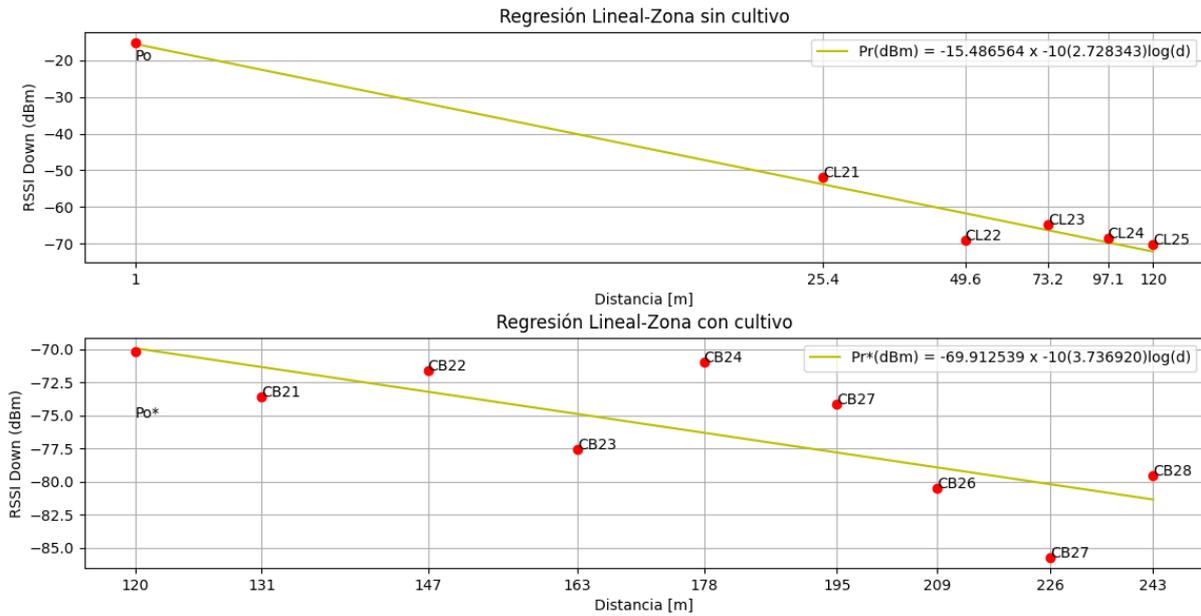
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 0.5m:  $\alpha_2=3.10$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.19:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.102) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.19)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.20:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.102) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.20)$$



**Figura 3.27 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 0.5m**

Para la regresión de RSSI de bajada del rayo B con nodos a 0.5m de altura de la Figura 3.27, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 0.5m:  $\alpha_2=3.737$

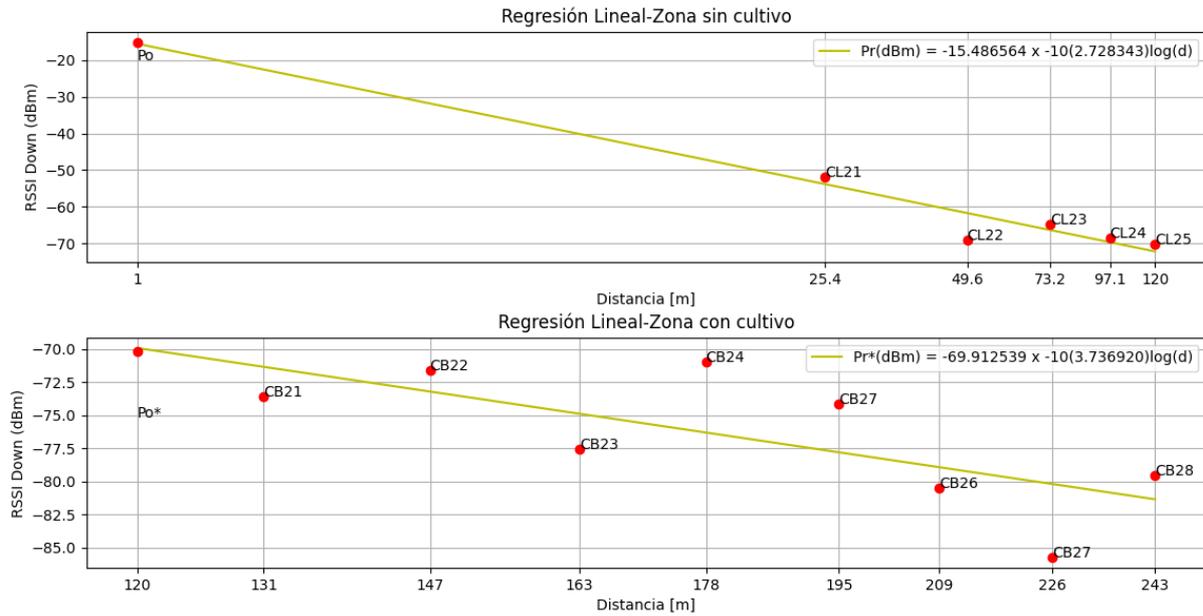
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.21:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(3.737) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.21)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.22:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(3.737) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.22)$$

### 3.1.3.2.2 Altura de 1m



**Figura 3.28 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 1m**

Para la regresión de RSSI de subida del rayo B con nodos a 1m de altura de la Figura 3.28, se obtienen los siguientes gradientes:

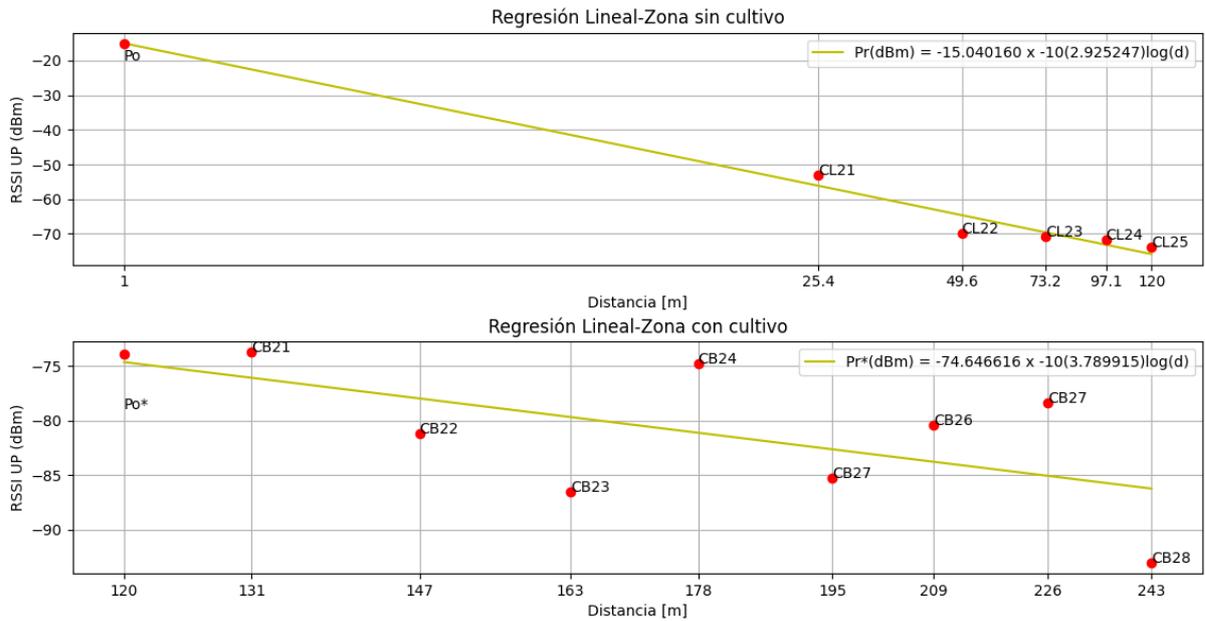
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 1m:  $\alpha_2=3.789$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.23:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.789) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.23)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.24:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.789) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.24)$$



**Figura 3.29 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 1m**

Figura 3.29, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 1m:  $\alpha_2=6.872$

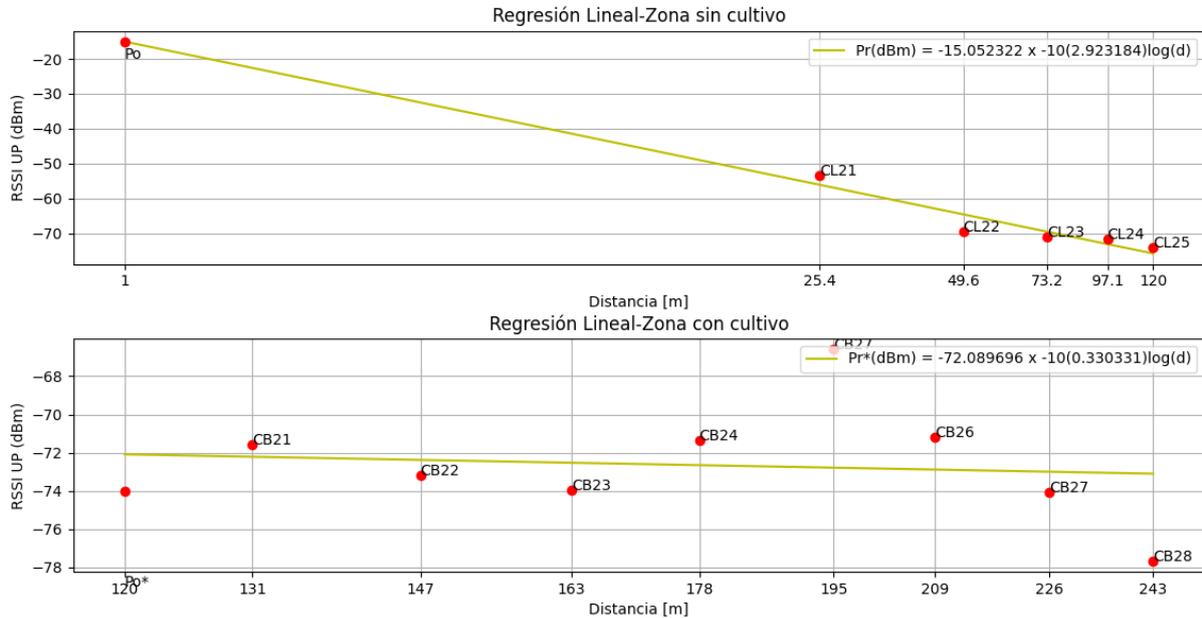
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.25:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(6.872) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.25)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.26:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(6.872) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.26)$$

### 3.1.3.2.3 Altura de 2m



**Figura 3.30 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m**

Para la regresión con RSSI de subida del rayo B con nodos a 2m de altura de la Figura 3.30, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=0.330$

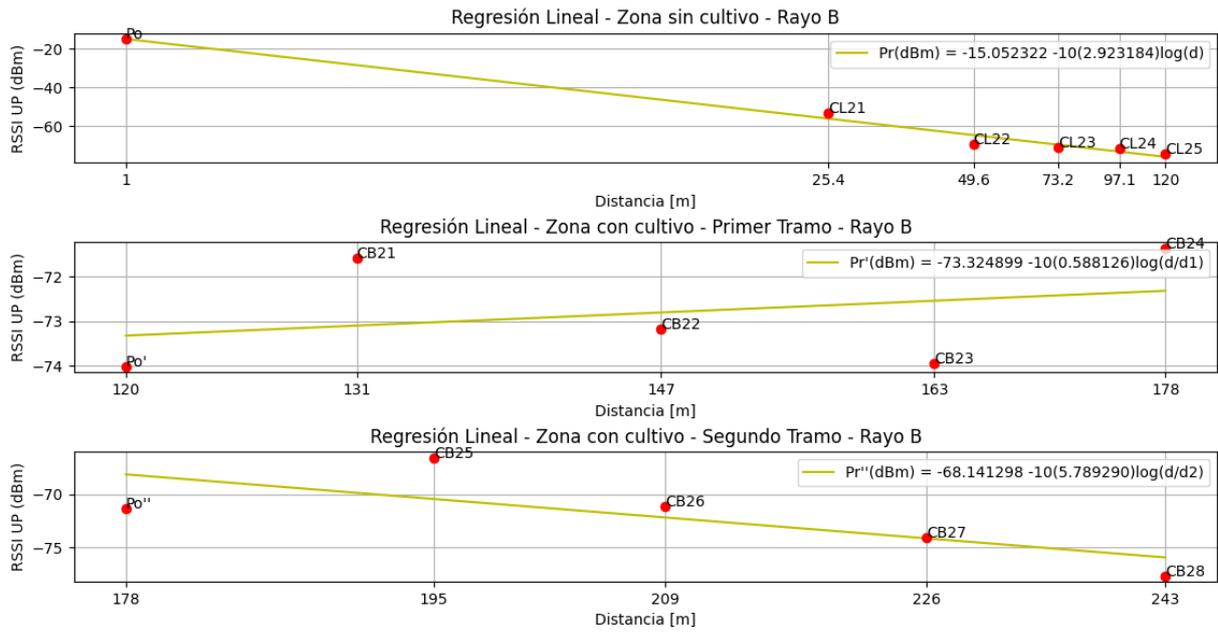
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.27:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(0.330) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.27)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.28:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(0.330) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.28)$$

Al presentarse otro caso donde el valor del gradiente es menor a 2, se procede a aplicar un tercer gradiente.



**Figura 3.31 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes**

Para la regresión con RSSI de subida del rayo B con nodos a 2m de altura de la Figura 3.31, se obtienen los siguientes gradientes:

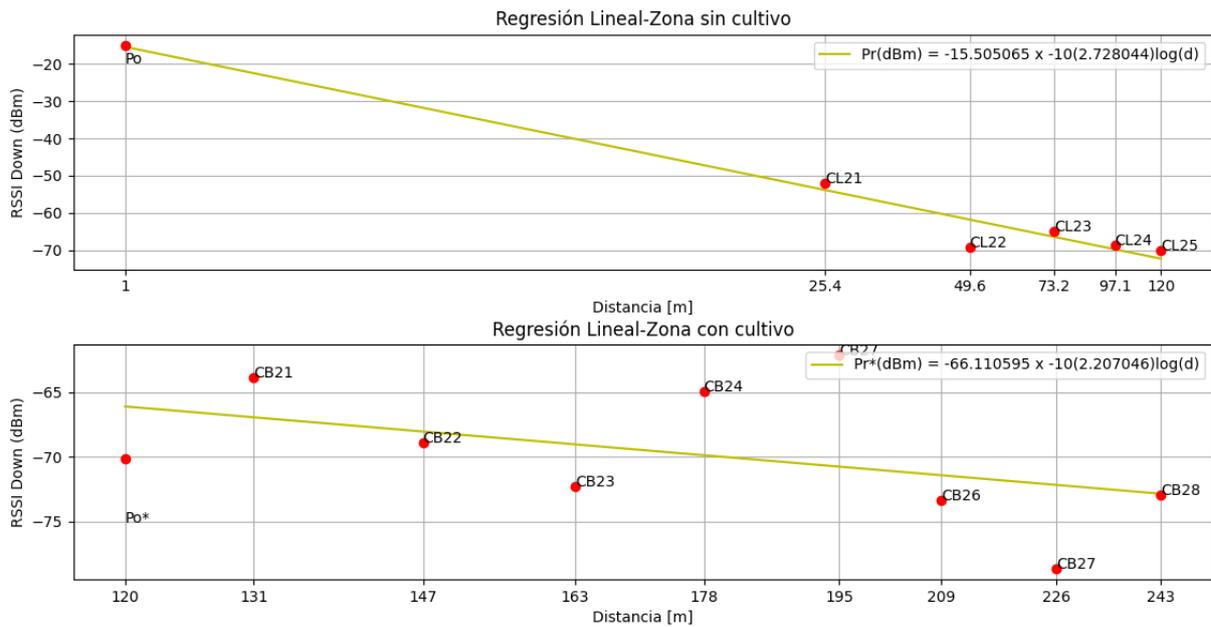
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.923$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=0.588$
- El tercer gradiente correspondiente al segundo tramo del cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_3=5.789$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.29:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.923) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -73.324 \text{ dBm} - 10(0.588) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 178 \text{ m} \\ -68.141 \text{ dBm} - 10(5.789) \log\left(\frac{d}{178 \text{ m}}\right) & ; \quad 178 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.29)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.30:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.923) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.923) \log(d) + 10(0.588) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 178 \text{ m} \\ 10(2.923) \log(d) + 10(0.588) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) + 10(5.789) \log\left(\frac{d}{178 \text{ m}}\right) & ; \quad 178 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.30)$$



**Figura 3.32 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m**

Figura 3.32, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=2.20$

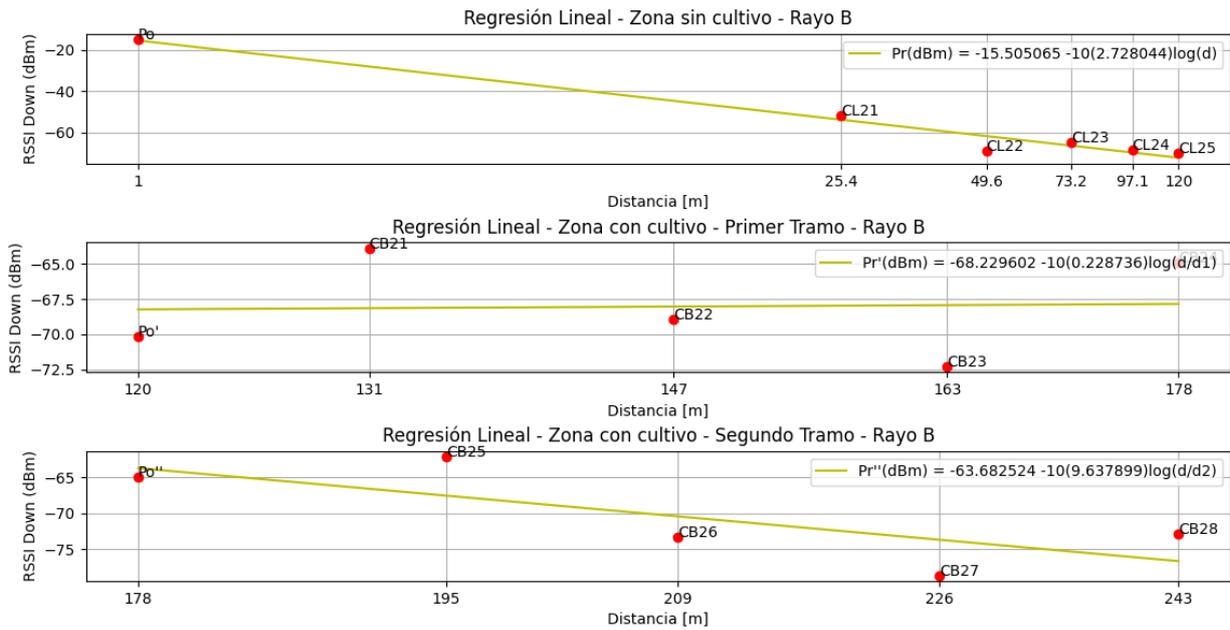
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.31:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(2.20) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.31)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.32:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(2.20) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.32)$$

También se procede a aplicar un tercer gradiente en el canal Down para el rayo B con altura de nodos a 2m.



**Figura 3.33 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo B con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes**

Para la regresión con RSSI de bajada del rayo B con nodos a 2m de altura de la Figura 3.33, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=0.229$
- El tercer gradiente correspondiente al segundo tramo del cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_3=9.637$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.33:

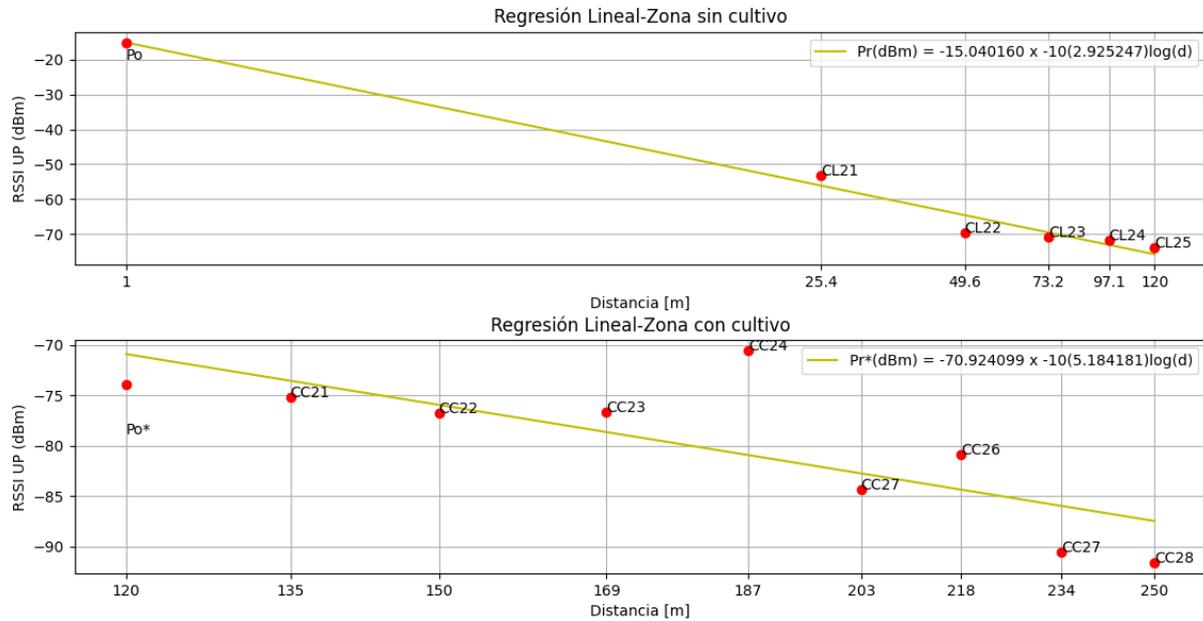
$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -68.229 \text{ dBm} - 10(0.229) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 178 \text{ m} \\ -63.682 \text{ dBm} - 10(9.637) \log\left(\frac{d}{178 \text{ m}}\right) & ; \quad 178 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.33)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.34:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.728) \log(d) + 10(0.229) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 178 \text{ m} \\ 10(2.728) \log(d) + 10(0.229) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) + 10(9.637) \log\left(\frac{d}{178 \text{ m}}\right) & ; \quad 178 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.34)$$

### 3.1.3.3 Rayo C

#### 3.1.3.3.1 Altura de 0.5m



**Figura 3.34 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia Logarítmica del Rayo C con nodos a una altura de 0.5m**

Para la regresión lineal con RSSI de subida del rayo C con nodos a 0.5m de altura de la Figura 3.34, se obtienen los siguientes gradientes:

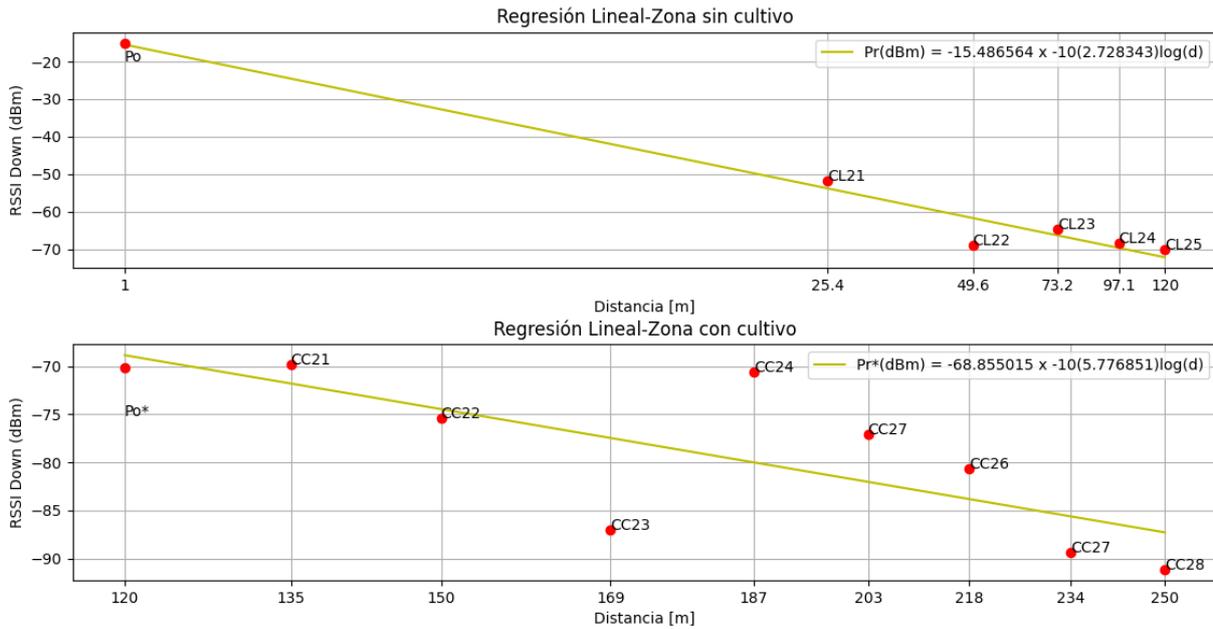
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 0.5m:  $\alpha_2=5.184$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.35:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(0.330) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.35)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.36:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(0.330) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.36)$$



**Figura 3.35 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 0.5m**

Para la regresión lineal con RSSI de bajada del rayo C con nodos a 0.5m de altura de la Figura 3.35, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 0.5m:  $\alpha_2=5.776$

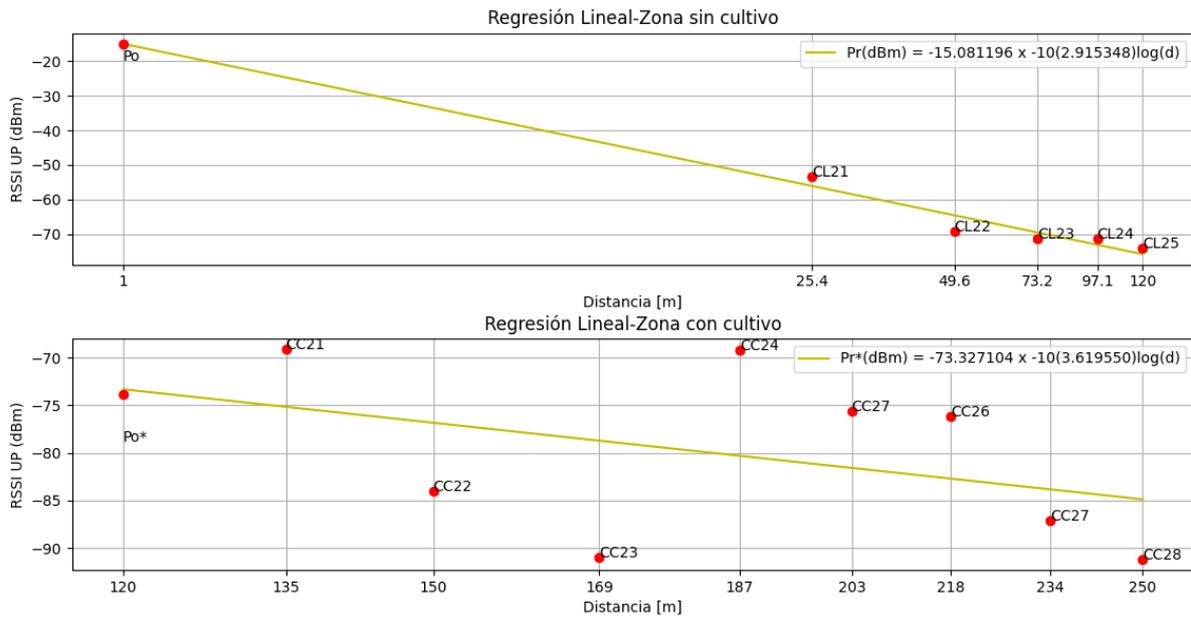
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.37:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(5.776) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.37)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.38:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(5.776) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.38)$$

### 3.1.3.3.2 Altura de 1m



**Figura 3.36 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 1m**

Para la regresión lineal con RSSI de subida del rayo C con nodos a 1m de altura de la Figura 3.36, se obtienen los siguientes gradientes:

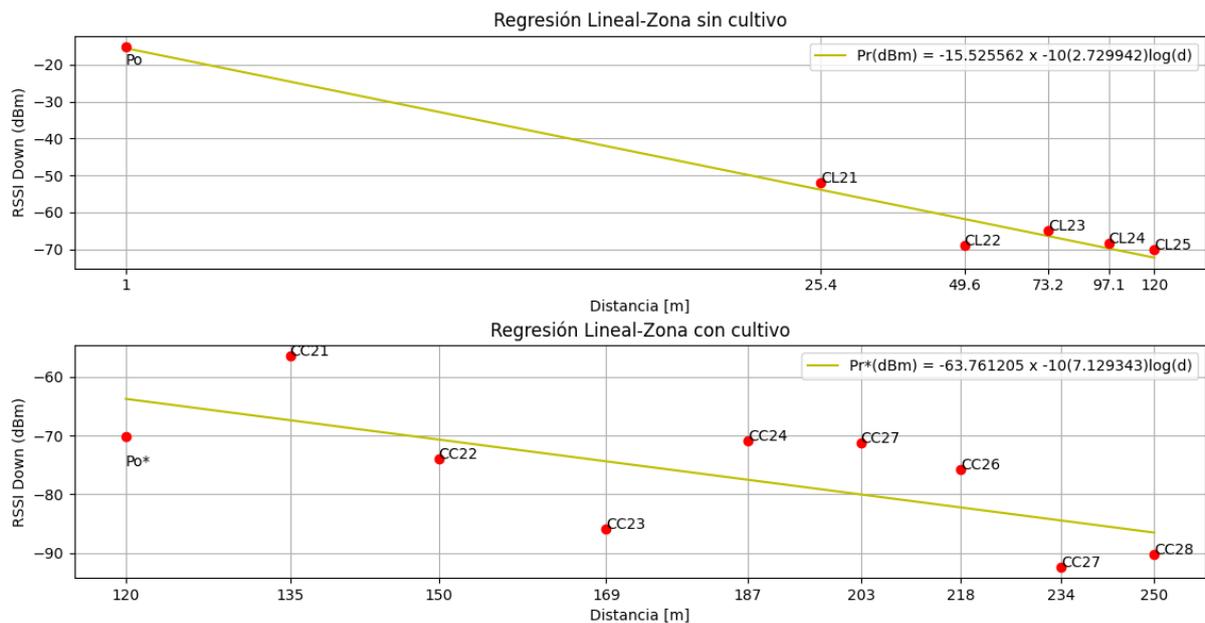
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 1m:  $\alpha_2=3.619$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.39:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.619) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.39)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.40:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.619) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.40)$$



**Figura 3.37 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 1m**

Para la regresión lineal con RSSI de subida del rayo C con nodos a 1m de altura de la Figura 3.37, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 1m:  $\alpha_2=7.129$

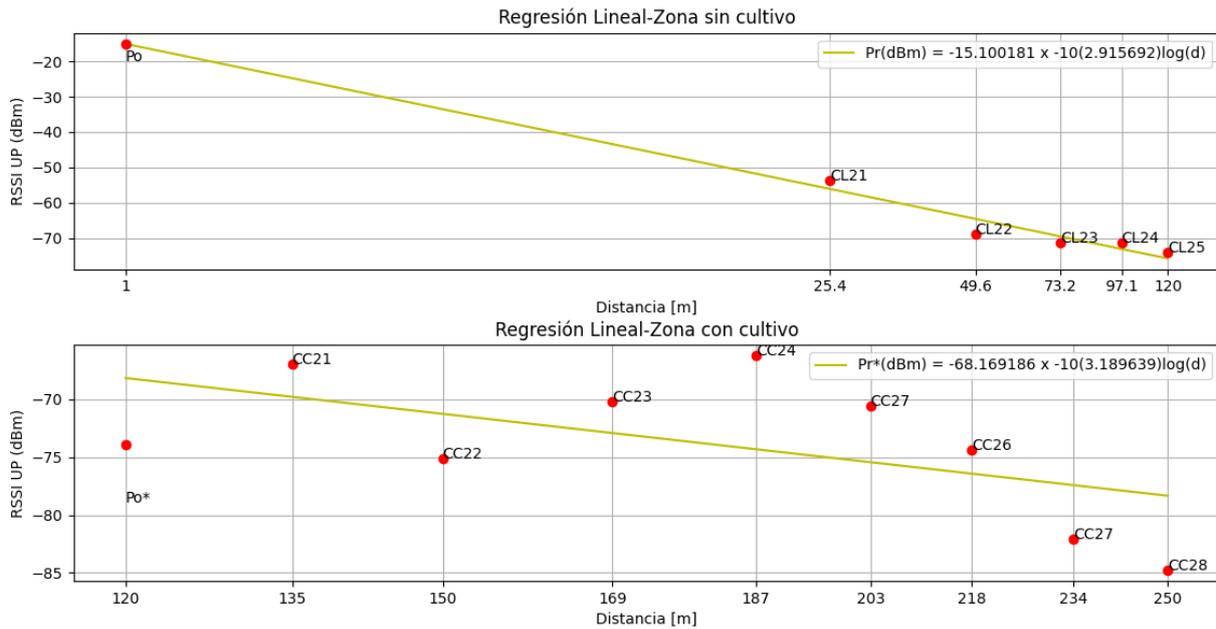
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.41:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(7.129) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.41)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.42:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(7.129) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.42)$$

### 3.1.3.3.3 Altura de 2m



**Figura 3.38 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m**

Para la regresión lineal con RSSI de subida del rayo C con nodos a 2m de altura de la Figura 3.38, se obtienen los siguientes gradientes:

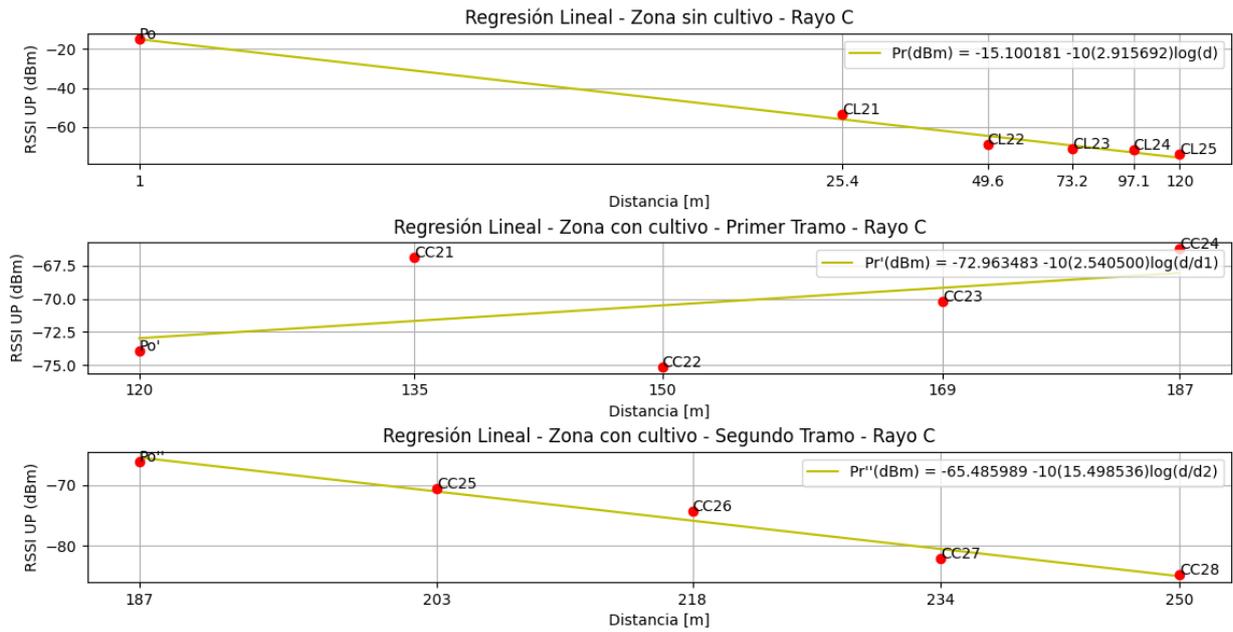
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=3.189$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.43:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.619) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.43)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.44:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.619) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.44)$$



**Figura 3.39 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes**

Para la regresión con RSSI de subida del rayo C con nodos a 2m de altura de la Figura 3.39, se obtienen los siguientes gradientes:

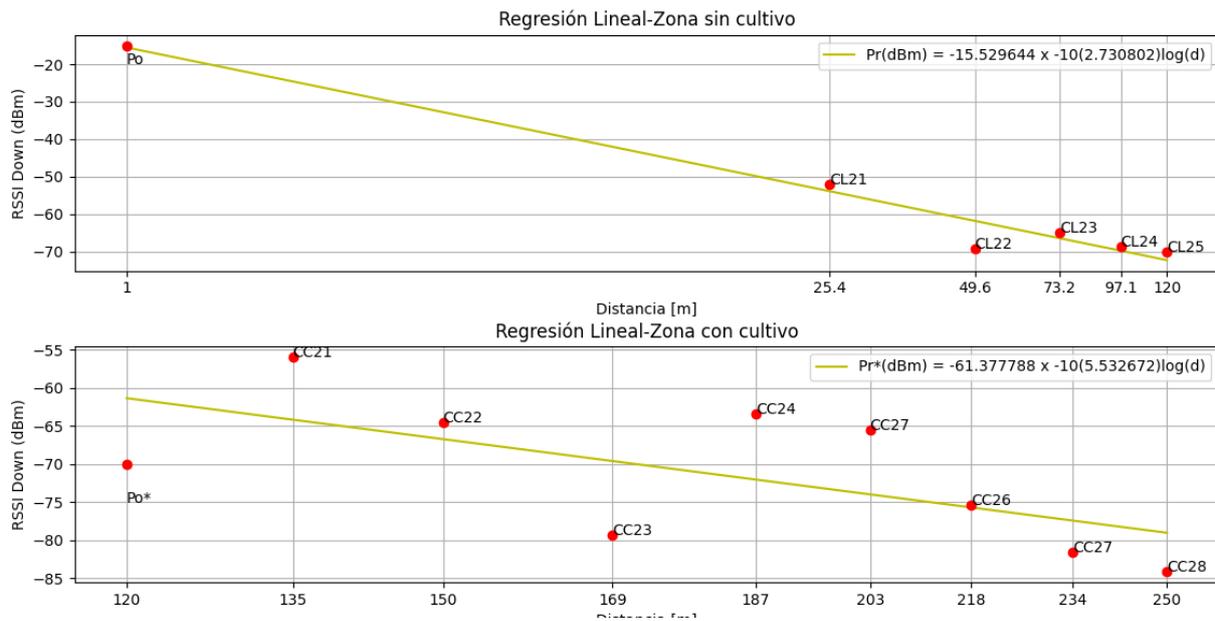
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.913$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=2.540$
- El tercer gradiente correspondiente al segundo tramo del cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_3=15.499$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.45:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.913) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -72.963 \text{ dBm} - 10(2.540) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 187 \text{ m} \\ -65.486 \text{ dBm} - 10(15.499) \log\left(\frac{d}{187 \text{ m}}\right) & ; \quad 187 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.45)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.46:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.913) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.913) \log(d) + 10(2.540) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 187 \text{ m} \\ 10(2.913) \log(d) + 10(2.540) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) + 10(15.499) \log\left(\frac{d}{187 \text{ m}}\right) & ; \quad 187 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.46)$$



**Figura 3.40 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m**

Para la regresión lineal con RSSI de bajada del rayo C con nodos a 2m de altura de la Figura 3.40, se obtienen los siguientes gradientes:

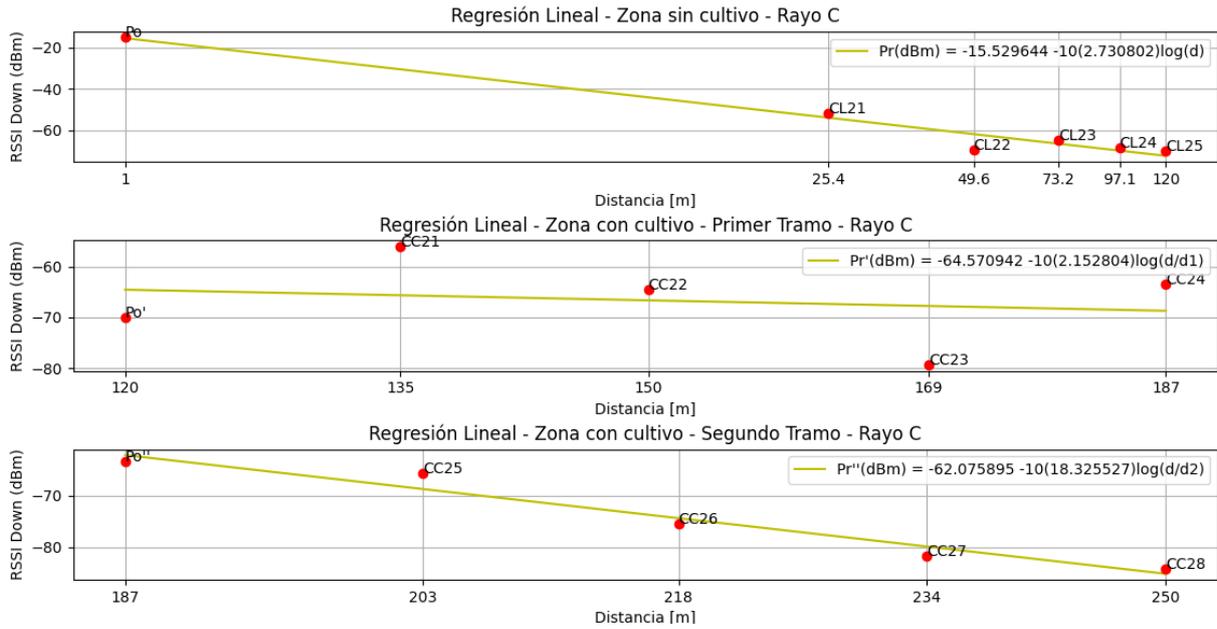
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=5.533$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.47:

$$P_r(dBm) = -15 dBm - \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(5.533) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.47)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.484:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(5.533) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.48)$$



**Figura 3.41 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia del Rayo C con nodos a una altura de 2m – 3 gradientes**

Para la regresión con RSSI de bajada del rayo C con nodos a 2m de altura de la Figura 3.41, se obtienen los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.731$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_2=2.152$
- El tercer gradiente correspondiente al segundo tramo del cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2m:  $\alpha_3=18.326$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.49:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.731) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -64.571 \text{ dBm} - 10(2.152) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 187 \text{ m} \\ -62.076 \text{ dBm} - 10(18.326) \log\left(\frac{d}{187 \text{ m}}\right) & ; \quad 187 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.49)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.50:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.731) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.152) \log(d) + 10(2.152) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 187 \text{ m} \\ 10(2.152) \log(d) + 10(2.152) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) + 10(18.326) \log\left(\frac{d}{187 \text{ m}}\right) & ; \quad 187 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.50)$$

**Tabla 3.6 – Resumen de gradientes parciales**

	CANAL UP						CANAL DOWN					
	Gradiente			Desviación estándar			Gradiente			Desviación estándar		
	0.5m	1m	2m	0.5m	1m	2m	0.5m	1m	2m	0.5m	1m	2m
<b>Altura</b>	0.5m	1m	2m	0.5m	1m	2m	0.5m	1m	2m	0.5m	1m	2m
<b>Sin cultivo de cacao (<math>\alpha_1</math>)</b>	2.925			3.7346			2.728			2.106		
<b>Rayo A (<math>\alpha_2</math>)</b>	3.407	3.406	0.629	2.927	2.821	3.084	4.818	4.931	2.555	2.917	2.704	2.951
<b>Rayo B (<math>\alpha_2</math>)</b>	3.102	3.789	0.33	3.218	3.482	3.332	3.737	6.872	2.207	1.891	2.014	1.374
<b>Rayo C (<math>\alpha_2</math>)</b>	5.184	3.619	3.189	3.496	3.800	3.267	5.77	7.129	5.532	3.057	2.477	2.029

**Tabla 3.7 – Resumen de 3 gradientes parciales a 2m**

GRADIENTES PARCIALES A 2m						
Rayos	CANAL UP			CANAL DOWN		
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
A		2.801	17.545		2.427	18.132
B	2.925	0.558	5.789	2.728	0.229	9.638
C		2.541	15.499		2.153	18.326

El valor  $\alpha$  también denominado gradiente de pérdida de paso, relaciona la potencia recibida y la pérdida de paso en relación con la distancia entre el transmisor y el receptor. De forma ideal, es decir, un espacio libre sin obstrucciones, el valor de  $\alpha$  tiene un valor de 2, por lo que un valor por debajo de este se considera erróneo o presenta alguna singularidad, como en los casos de los gradientes de cada rayo a la altura de 2 m, en los que resultaban con valores menores a 1.

En la Tabla 3.6 considerando los valores obtenidos de los gradientes de los 3 rayos definidos a 3 diferentes alturas, se pueden observar que los valores son superiores a 2, a excepción de los gradientes obtenidos para los rayos A y B a la altura de 2m, esto es debido a que a medida que se aumenta la altura en los nodos, el gradiente disminuye, es decir, que existe menos obstrucciones en el rayo definido, que, para el presente proyecto, la obstrucción es debido a la vegetación y al perfil de elevación del terreno. Sin Embargo, el gradiente obtenido en el rayo C a la altura de 2m vuelve a ser superior a 2, debido a que en este rayo se presenta una mayor irregularidad en el terreno, afectando las mediciones RSSI de los nodos CC-27 y CC-28. Además, se puede decir que la variación del gradiente que existe entre el canal de subida y el canal de bajada se debe

a que la recepción de la señal transmitida es mejor en la antena del Gateway, ya que está equipada con materiales de mejores características que logran que la ganancia de la antena del Gateway sea de 8 dBi, por ende, se receptaron mejores niveles de RSSI a pesar de la menor sensibilidad en la antena de los nodos terminales, que poseen una ganancia de 3 dBi. El operar bajo un ancho de banda específico en la red LoRaWAN, permite identificar si la transmisión se da sobre un canal de banda angosta o de banda ancha. Por lo general, LoRaWAN opera con un ancho de banda de 125 KHz para el canal UPLINK mientras que para el canal DOWNLINK opera a 500KHz. Al tenerse un ancho de banda reducido (banda estrecha) para el canal UPLINK implica que se produzcan mayor variabilidad en la potencia recibida, dado que poseen poco espectro para la transmisión de datos. La desigualdad en cuanto a ganancias de las antenas, y el hecho que los nodos operaron como transmisor y se situaron en medio del cacao (obstrucciones cercanas), mientras que, en el Gateway, las primeras obstrucciones se encontraron más alejadas, provocaba que se receptaran mejores niveles de RSSI en el canal de subida, mientras que en el canal de bajada se perdía mayor señal. Esto permite al Gateway lograr una mayor apertura al momento de la recepción de la señal y por tanto registra mayor variabilidad en las mediciones de RSSI del canal de subida (UPLINK) comparado con el canal de bajada (DOWNLINK).

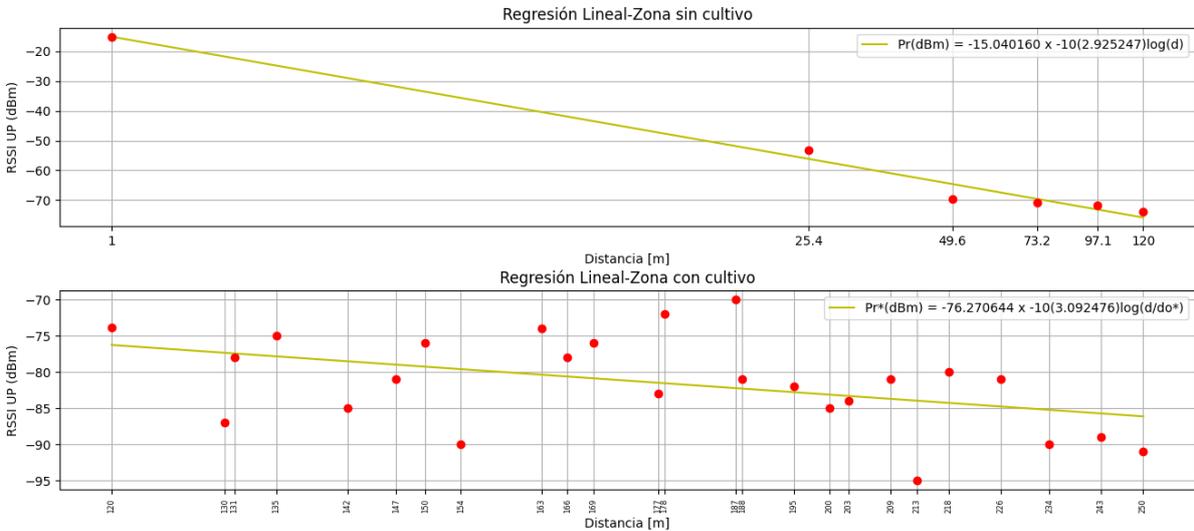
Este hecho se puede evidenciar en la Tabla 3.6 donde se tiene que el canal de subida presenta una menor desviación en comparación al canal de bajada, recordando que una desviación estándar baja indica menos variabilidad, ya que la mayor parte de los datos de la muestra tienden a estar agrupados cerca de su media.

Al existir una mayor precisión en cuanto a las medidas de potencia recibida en el UPLINK se puede decir que los gradientes obtenidos en la Tabla 3.6 para el canal de subida son  $\alpha > 2$  y menores a los gradientes obtenidos en el DOWNLINK (con excepciones que dependen del perfil de terreno), debido a que se tiene menor desviación estándar, lo que indica que las mediciones en cada rayo, presentan menor variabilidad en consecuencia de una menor pérdida de señal en el Gateway y también dependiendo del caso, debido a una menor cantidad de obstrucciones por vegetación o del perfil de terreno en el camino. En el DOWNLINK se obtuvieron gradientes mayores, ya que una mayor desviación estándar se asocia con una pérdida de paso mayor, lo que no ayuda en su relación con la potencia recibida.

Para solucionar problemas en donde el gradiente es menor 2, se ha establecido el uso de 3 gradientes para casos en donde se obtiene valores menores a 2, que ocurren en el canal de subida con altura de 2m. En la Tabla 3.7 se puede encontrar el resumen de los gradientes para los rayos A, B y C tomando la altura de 2m. Se puede observar que para el caso del rayo A ya no se observa valores inferiores a 2, tal como se mostraba en la Tabla 3.16. Sin embargo, para el caso del rayo B, a pesar de aumentar el número de gradientes, aun se obtienen un valor menor a 2 en el canal de subida. Esto se produce dado que todos los nodos de la zona de cultivo presentan cercanía en las potencias RSSI, por lo que el aplicar una regresión lineal dará una pendiente muy pequeña. Finalmente, el rayo C también indica que sus 3 gradientes son mayores a 2, cuyos valores se acercan a los valores del rayo A.

### 3.1.4 Gradientes Totales por altura

#### 3.1.4.1 Modelo para altura de 0.5m



**Figura 3.42 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 0.5m**

Para el cálculo de gradientes totales, se toma los 3 rayos y son graficados por alturas. Para el primer gradiente total, se toma los datos de RSSI UP de los rayos A, B y C con los nodos a una altura de 0.5m y mediante la regresión lineal tal como se muestra en la Figura 3.42, se han obtenido los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$

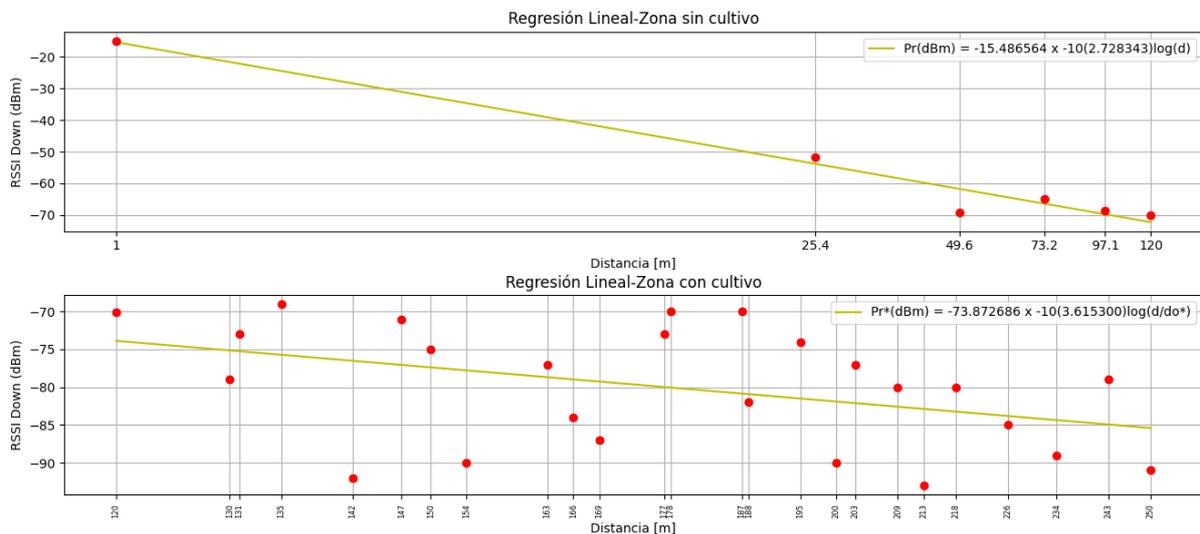
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 0.5m:  $\alpha_2=3.092$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.51:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -76.271 \text{ dBm} - 10(3.092) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.51)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.52:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.925) \log(d) + 10(3.092) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.52)$$



**Figura 3.43 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 0.5m**

Para el RSSI de bajada se toma los datos de los rayos A, B y C con los nodos a una altura de 0.5m y mediante la regresión lineal tal como se muestra en la Figura 3.43, se han obtenido los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 0.5m:  $\alpha_2=3.615$

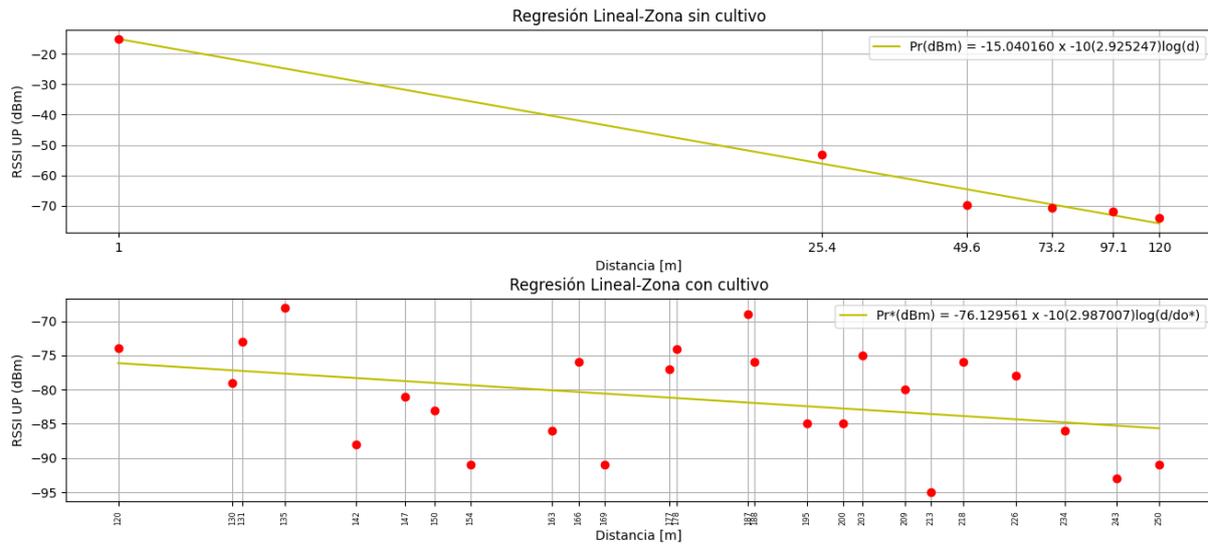
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.53:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -73.87 \text{ dBm} - 10(3.615) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.53)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.54:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.728) \log(d) + 10(3.615) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.54)$$

### 3.1.4.2 Modelo para altura de 1m



**Figura 3.44 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 1m**

Para el segundo gradiente total, se toma los datos de RSSI UP de los rayos A, B y C con los nodos a una altura de 1m y mediante la regresión lineal tal como se muestra en la Figura 3.44, se han obtenido los siguientes gradientes:

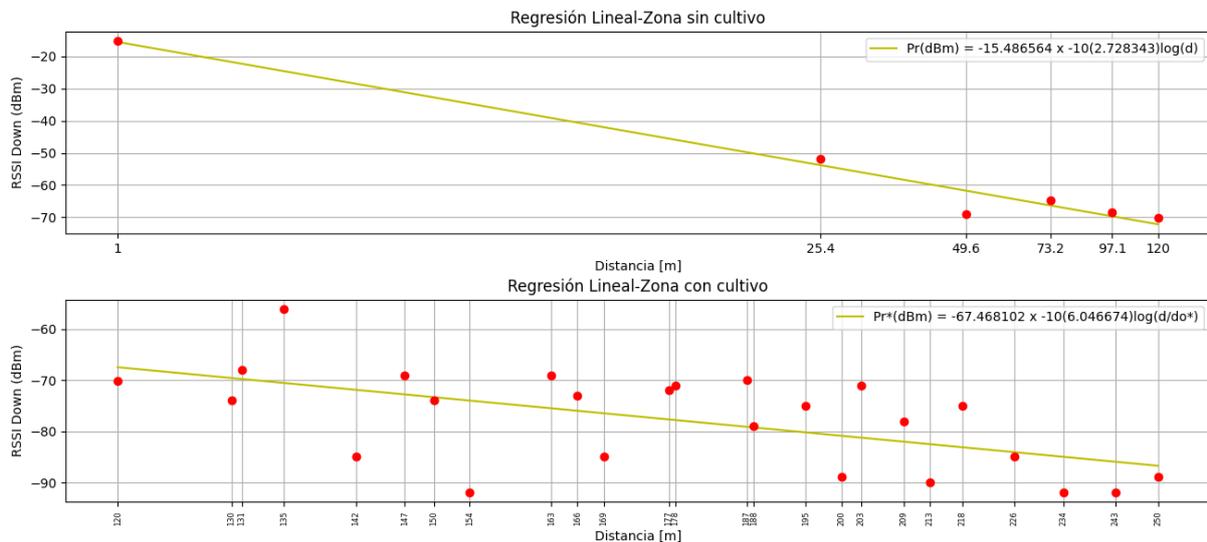
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 1 m:  $\alpha_2=2.987$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.55:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -76.129 \text{ dBm} - 10(2.987) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.55)$$

Y la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.56:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.925) \log(d) + 10(2.987) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.56)$$



**Figura 3.45 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 1m**

Para RSSI de bajada, se toma los rayos A, B y C con los nodos a una altura de 1m y mediante la regresión lineal tal como se muestra en la Figura 3.45, se han obtenido los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 1 m:  $\alpha_2=6.047$

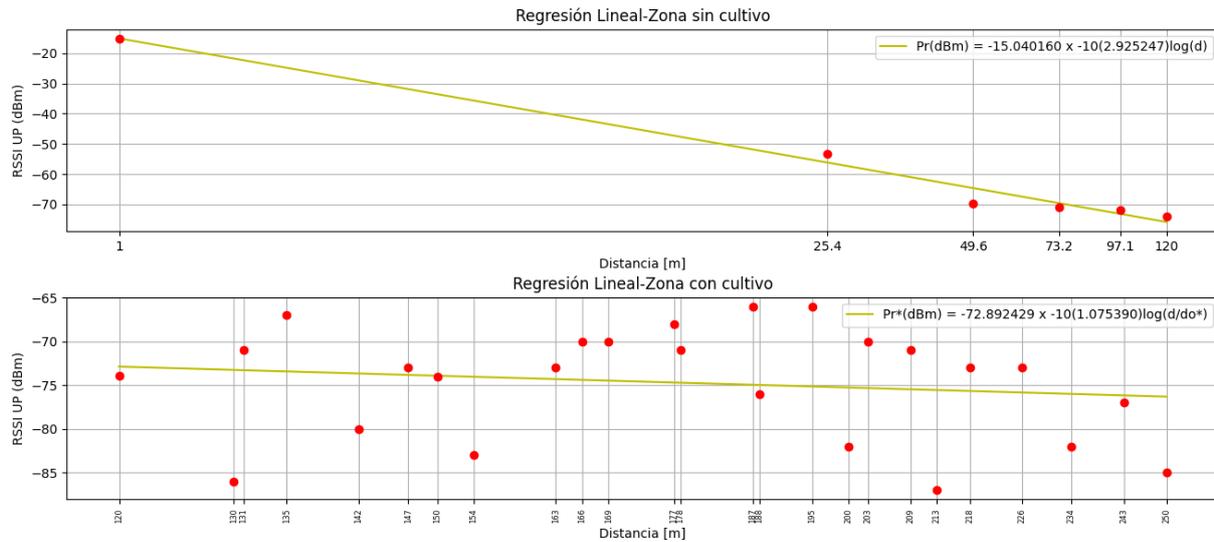
Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.57:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 dBm - 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ -67.468 dBm - 10(6.047) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.57)$$

Y la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.58:

$$L_p(dB) = 35 dB + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 m \\ 10(2.728) \log(d) + 10(6.047) \log\left(\frac{d}{120 m}\right) & ; \quad 120 m < d < 250 m \end{cases} \quad (3.58)$$

### 3.1.4.3 Modelo para una altura de 2m



**Figura 3.46 – Regresión Lineal de RSSI UP vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 2m**

Para el último gradiente total, se toma los datos de RSSI de subida de los rayos A, B y C con los nodos a una altura de 2m y mediante la regresión lineal tal como se muestra en la Figura 3.46, se han obtenido los siguientes gradientes:

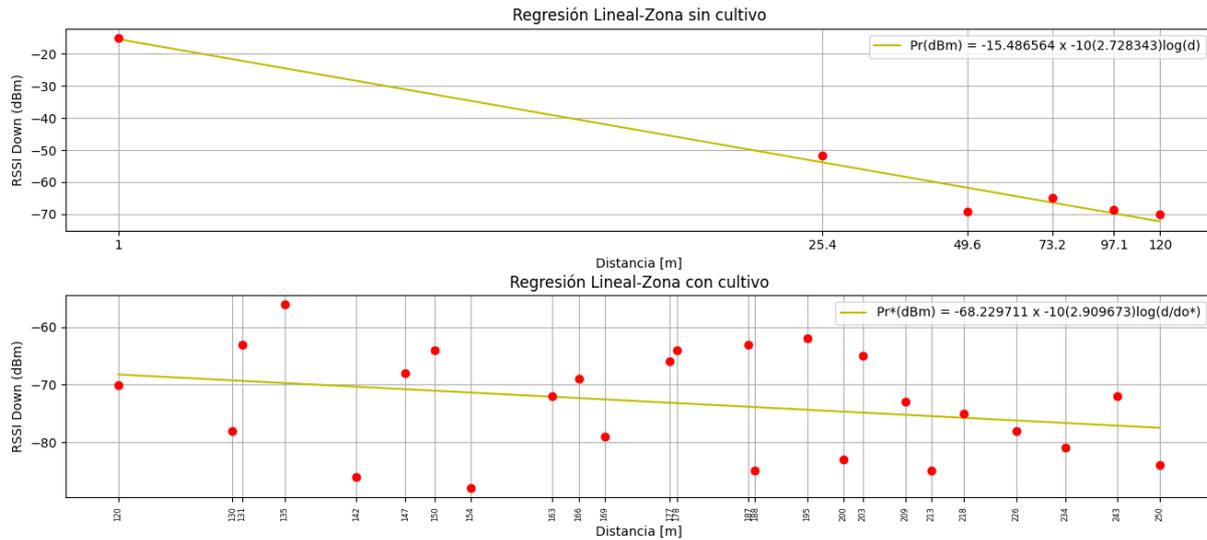
- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.925$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2 m:  $\alpha_2=1.075$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.59:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -72.89 \text{ dBm} - 10(1.075) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.59)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.60:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.925) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.925) \log(d) + 10(1.075) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.60)$$



**Figura 3.47 – Regresión Lineal de RSSI DOWN vs Distancia de los 3 rayos con nodos a una altura de 2m**

Se toma los datos de RSSI de bajada de los rayos A, B y C con los nodos a una altura de 2m y mediante la regresión lineal tal como se muestra en la Figura 3.47, se han obtenido los siguientes gradientes:

- El primer gradiente correspondiente a la zona sin cultivo:  $\alpha_1=2.728$
- El segundo gradiente corresponde al cultivo de cacao con una altura en los nodos de 2 m:  $\alpha_2=2.910$

Por lo que la ecuación de potencia recibida sería igual a la ecuación 3.61:

$$P_r(dBm) = \begin{cases} -15 \text{ dBm} - 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ -68.229 \text{ dBm} - 10(2.910) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.61)$$

Y la ecuación de pérdida de paso sería igual a la ecuación 3.62:

$$L_p(dB) = 35 \text{ dB} + \begin{cases} 10(2.728) \log(d) & ; \quad 0 < d < 120 \text{ m} \\ 10(2.728) \log(d) + 10(2.910) \log\left(\frac{d}{120 \text{ m}}\right) & ; \quad 120 \text{ m} < d < 250 \text{ m} \end{cases} \quad (3.62)$$

**Tabla 3.8 – Resumen de gradientes totales**

		RSSI UP			RSSI DOWN		
Altura:		0.5m	1m	2m	0.5m	1m	2m
Gradientes:	$\alpha_1$	2.93			2.728		
	$\alpha_2$	3.092	2.987	1.075	3.615	6.046	2.90
Desviación estándar:	$\sigma$	3.214	3.368	3.228	2.622	2.398	2.118

Tal como se evidencia en la Tabla 3.8, donde en su mayoría los valores de los gradientes son superiores a 2, además que cuando la altura de los nodos se encuentra en su punto más alto, el gradiente disminuye, es decir, que existe menos obstrucciones en el rayo definido, que, para el presente proyecto, la obstrucción es debido a la vegetación y a la diferencia de nivel en el terreno de cultivo. En la Tabla 3.8 también se puede apreciar las desviaciones estándares por cada modelo de propagación a las 3 diferentes alturas. Se observa que los valores de desviación estándar rondan entre 2 y 4. También se puede constatar que la desviación para el canal de bajada presenta una menor desviación en comparación al canal de subida.

### 3.1.5 Comparación del modelo de propagación con modelos empíricos y semi-empíricos

En la presente sección, se mostrarán las comparaciones del modelo de propagación experimental con modelos empíricos y semi-empíricos que se han diseñado en otras investigaciones.

El modelo semi-empírico a emplear se basa en un modelo de ambientes exteriores, donde se toma en consideración la altura de la antena transmisora, la distancia entre el transmisor-receptor y la frecuencia de operación. Este modelo se basa en la ecuación de potencia 3.63 y 3.64:

$$P_R(dBm) = A + B \log(d) + C \log(f) \quad (3.63)$$

$$P_R(dBm) = (A_1 + A_2 * h_{Tx}) + (B_1 + B_2 * h_{Tx}) \log(d) + C \log(f) \quad (3.64)$$

Donde “ $h_{Tx}$ ” es la altura en metro del transmisor, “ $d$ ” la distancia en el transmisor y el receptor en metros y “ $f$ ” está en GHz. Para este modelo, la altura  $h_{Tx}$  que representa al transmisor, tiene un valor de 4 metros, el cual corresponde a la altura de la antena del gateway de la red LoRaWAN en la granja ESPOL.

Para la obtención de las constantes se hace uso del software JMP el cual permite realizar cálculos estadísticos. Para el tratamiento de datos se procede a ingresar las distancias y los valores de RSSI, tal como se indica en la Figura 3.48:

Coeficientes Altura 1m - JMP Trial

Archivo Editar Tablas Filas Cols Diseño de experimentos Análisis Gráficos Herramientas Vista Ventana Ayuda

	Distancia [m]	log d	log (D)	RSSI UP [dBm]	RSSI DOWN [dBm]
1	24.4	1.404833717	-1.595166283	-53	-52
2	49.6	1.695481676	-1.304518324	-69	-69
3	73.2	1.864511081	-1.135488919	-71	-65
4	97.1	1.98721923	-1.01278077	-72	-69
5	120	2.079181246	-0.920818754	-74	-70
6	130	2.113943352	-0.886056648	-79	-74
7	131	2.117271296	-0.882728704	-73	-68
8	135	2.130333768	-0.869666232	-68	-56
9	142	2.152288344	-0.847711656	-88	-85
10	147	2.167317335	-0.832682665	-81	-69
11	150	2.176091259	-0.823908741	-83	-74
12	154	2.187520721	-0.812479279	-91	-92
13	163	2.212187604	-0.787812396	-86	-69
14	166	2.220108088	-0.779891912	-76	-73
15	169	2.227886705	-0.772113295	-91	-85
16	177	2.247973266	-0.752026734	-77	-72
17	178	2.250420002	-0.749579998	-74	-71
18	187	2.271841607	-0.728158393	-69	-70
19	188	2.274157849	-0.725842151	-76	-79
20	195	2.290034611	-0.709965389	-85	-75
21	200	2.301029996	-0.698970004	-85	-89
22	203	2.307496038	-0.692503962	-75	-71
23	209	2.320146286	-0.679853714	-80	-78
24	213	2.328379603	-0.671620397	-95	-90
25	218	2.338456494	-0.661543506	-76	-75
26	226	2.354108439	-0.645891561	-78	-85
27	234	2.369215857	-0.630784143	-86	-92
28	243	2.385606274	-0.614393726	-93	-92
29	250	2.397940009	-0.602059991	-91	-89

Figura 3.48 – Tabla de valores en el programa JMP

Para el modelo semi-empírico se hace uso de curvas de correlación de variables de RSSI y el logaritmo de la distancia mediante una regresión no lineal.

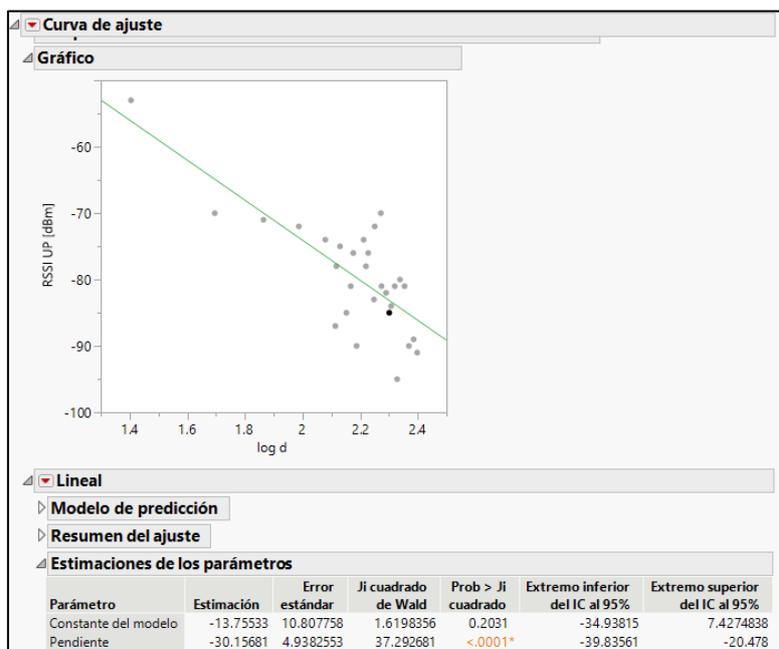
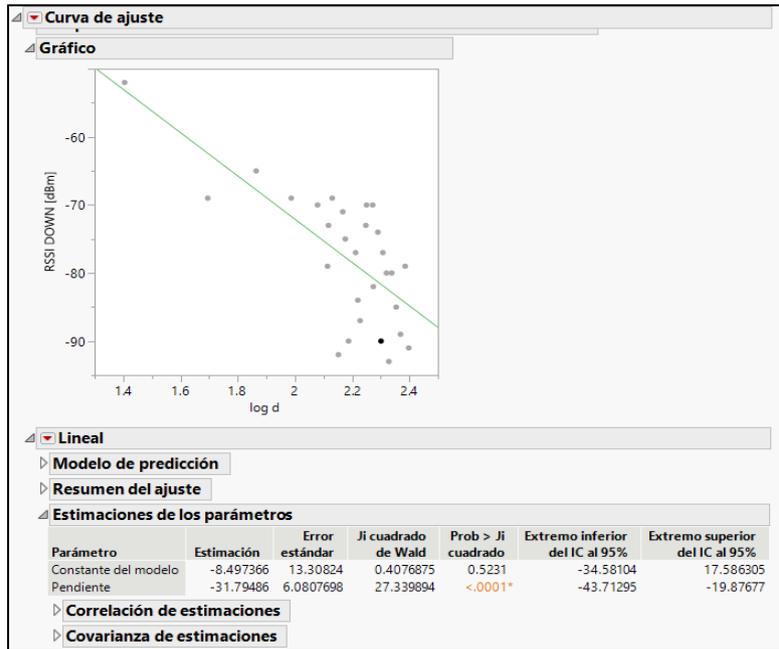


Figura 3.49 – Correlación de RSSI UP y logaritmo de la distancia – Modelo semi-empírico



**Figura 3.50 – Correlación de RSSI DOWN y logaritmo de la distancia – Modelo semi-empírico**

En las Figuras 3.49 y 3.50 se puede apreciar la correlación de la potencia recibida en ambos canales versus el logaritmo de la distancia. Mediante el programa se pueden observar las constantes para la ecuación 3.63.

Repitiendo el mismo procedimiento para todas las alturas, se obtienen las siguientes constantes para cada altura:

**Tabla 3.9 – Constantes del modelo semi-empírico**

Constantes del modelo semi-empírico						
	CANAL UP			CANAL DOWN		
Constantes	0.5 m	1m	2m	0.5 m	1m	2m
A	-13.755	-13.945	-34.085	-8.497	-5.06	-24.746
B	-30.1568	-29.927	-18.117	-31.79	-32.469	-21.613
C	-47.95					

Teniendo los valores de cada constante de la Tabla 3.9, se procede a expandir los valores de A y B en base a la ecuación 3.64 con la finalidad de incluir la altura de la antena transmisora:

$$A = A_1 + A_2 * h_{Tx}$$

$$B = B_1 + B_2 * h_{Tx}$$

De modo que se tiene los siguientes parámetros de ajuste para cada altura en la Tabla 3.10:

**Tabla 3.10 – Parámetros de ajuste del modelo semi-empírico**

Parámetros de ajuste modelo semi-empírico								
	CANAL UP				CANAL DOWN			
Alturas	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
0.5 m		0.898		-1.678		-0.415		-1.27
1 m	10.16	0.89	36.87	-1.71	10.16	-0.42	36.87	-1.3
2 m		5.98		-4.688		3.647		-3.81

Para el modelo empírico, corresponde a un modelo de propagación para la conectividad exterior en donde se toma en consideración la altura que posee el nodo (receptor) y la distancia medida en kilómetros. Este modelo se representa en base a la ecuación 3.65 y 3.66:

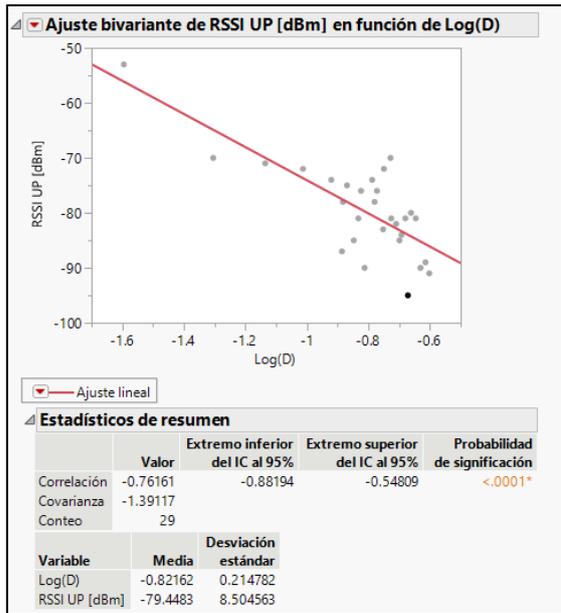
$$P_r(dBm) = A + B \log(D) \quad (3.65)$$

$$P_r(dBm) = (A_1 + A_2 * h_{Rx}) + (B_1 + B_2 * h_{Rx}) \log(D) \quad (3.66)$$

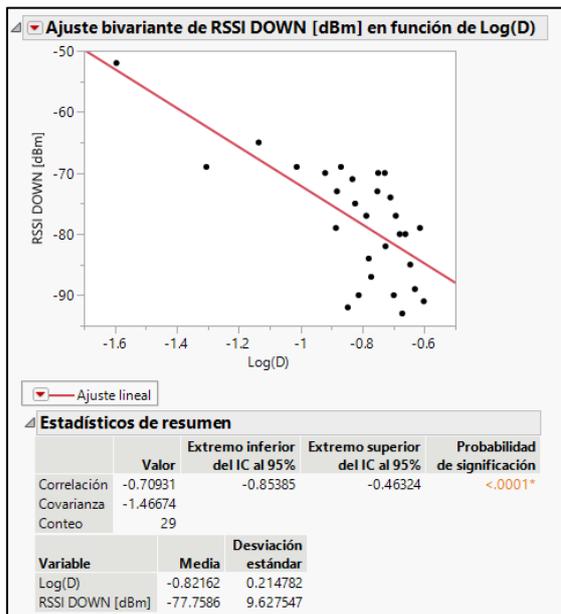
Donde se tiene que:

- $A_1$ (dB) y  $A_2$ (dB): Constantes aditivas de pérdida por recorrido.
- $B_1$ (dB) y  $B_2$ (dB): Constante multiplicativa de pérdida por recorrido.
- $D$  (Km): Distancia entre antena emisora y antena receptora.
- $h_{Rx}$ (m): Altura de la antena receptora. Este este caso, el valor de la altura tomará 3 valores de alturas: 0.5m, 1m y 2m, mismas alturas que fueran empleadas para la determinación de los modelos de multi-gradientes.

Para el modelo empírico se hace uso de curvas de correlación de variables de RSSI y el logaritmo de la distancia mediante una regresión lineal.



**Figura 3.51 – Correlación de RSSI UP y logaritmo de la distancia – Modelo empírico**



**Figura 3.52 – Correlación de RSSI DOWN y logaritmo de la distancia – Modelo empírico**

Realizando el procedimiento de correlación para cada altura se tienen las siguientes constantes de la Tabla 3.11:

**Tabla 3.11 – Constantes del modelo empírico**

Constantes del modelo empírico						
	CANAL UP			CANAL DOWN		
Constantes	0.5 m	1m	2m	0.5 m	1m	2m
A	-104.226	-103.727	-88.437	-103.882	-102.4711	-89.585
B	-30.157	-29.927	-18.117	-31.79	-32.469	-21.61

Teniendo los valores de cada constante de la Tabla 3.11, se procede a expandir los valores de A y B en base a la ecuación 3.66 con la finalidad de incluir la altura de la antena receptora:

$$A = A_1 + A_2 * h_{Rx}$$

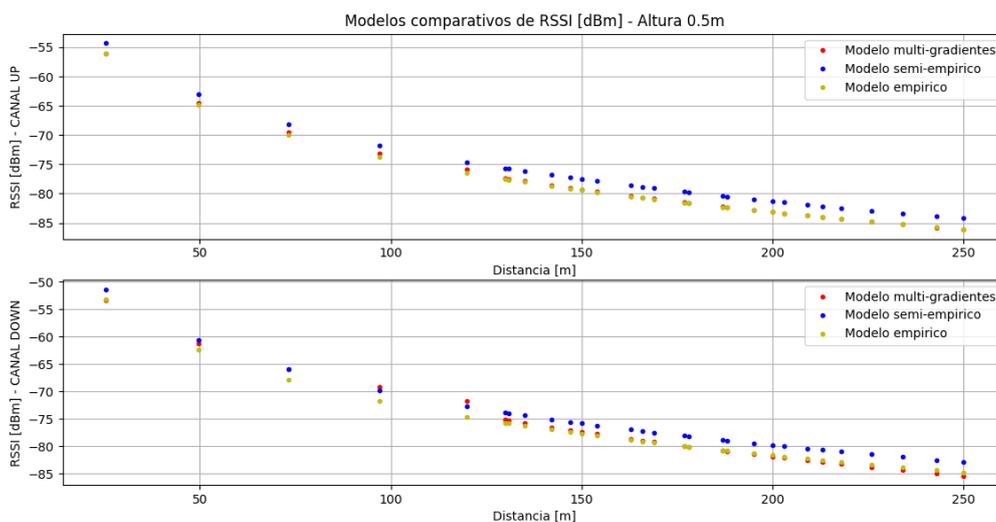
$$B = B_1 + B_2 * h_{Rx}$$

De modo que se tiene los siguientes parámetros de ajuste para cada altura en la Tabla 3.12:

**Tabla 3.12 – Parámetros de ajuste del modelo empírico**

Parámetros de ajuste del modelo empírico								
	CANAL UP				CANAL DOWN			
Alturas	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
0.5 m		-1.468		34.234		-2.156		37.48
1 m	104.96	-1.233	13.04	16.887	104.96	-1.078	13.04	19.429
2 m		-7.895		2.5385		-7.32		4.285

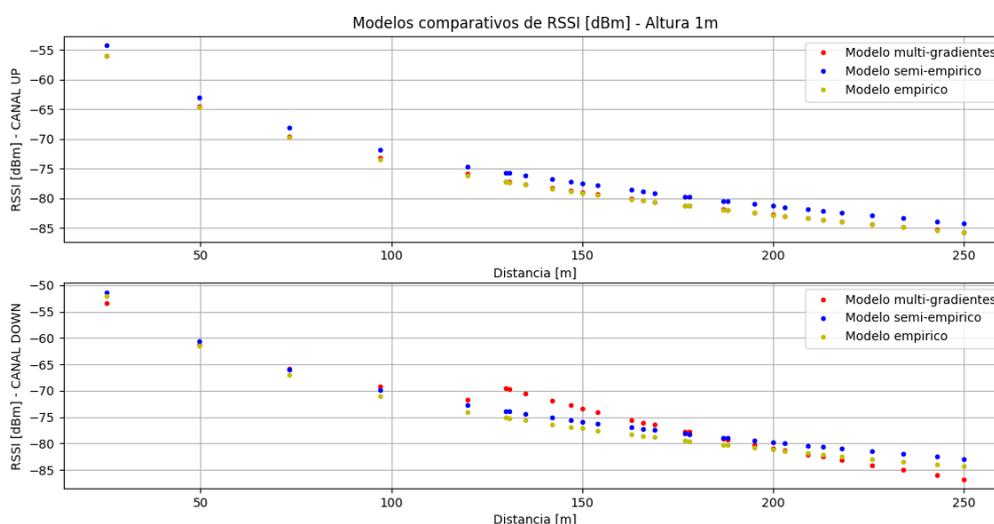
### 3.1.5.1 Comparación del modelo multi-gradiente a 0.5m de altura



**Figura 3.53 – Modelo multi-gradiente a 0.5m de altura vs modelo empírico y semi-empírico**

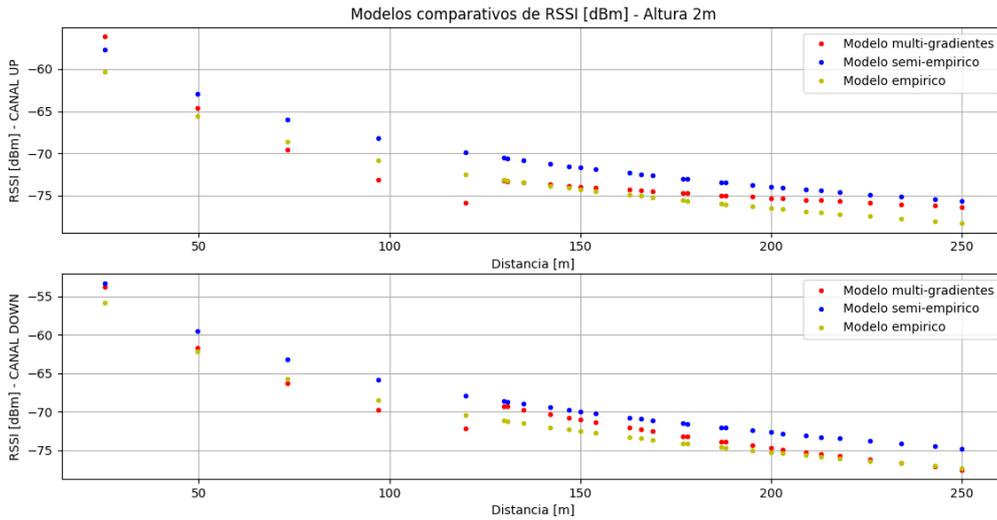
En la Figura 3.53 se muestra a la potencia recibida del modelo multi-gradiente obtenido con una altura de 0.5m en los nodos, comparado con el modelo empírico y un modelo semi-empírico, cada uno con sus respectivas constantes encontradas en la sección anterior. Para esta primera altura se observa una buena aproximación del modelo semi-empirico y del modelo empirico, siendo este ultimo que tiene una aproximación más exacta en ambos canales.

### 3.1.5.2 Comparación del modelo multi-gradiente a 1m de altura



**Figura 3.54 – Modelo multi-gradiente a 1m de altura vs modelo empírico y semi-empírico**

En la Figura 3.54 se muestra la potencia recibida del modelo multi-gradiente obtenido a 1m de altura en los nodos, comparado con el modelo empírico y un modelo semi-empírico. Se han graficado el modelo empirico y semi-empirico en base a sus coeficientes respectivos. Para el canal UP se observa que existe buena aproximación de los modelos, sin embargo, para el canal DOWN se observa que existe una desviación a mitad de las distancias por parte del modelo multi-gradiente, pero a medida que se aumenta la distancia, los valores de RSSI se aproximan a los dos modelos comparativos.



**Figura 3.55 – Modelo multi-gradiente a 2m de altura vs modelo empírico y semi-empírico**

En la Figura 3.55 se muestra a potencia recibida del modelo multi-gradiente obtenido con 2m de altura en los nodos, comparado con el modelo empírico y un modelo semi-empírico. En este caso se muestra que los modelos comparten el mismo comportamiento a medida que se aumenta la distancia. Sin embargo son pocos los tramos en donde se aproximan los modelos. Para el canal UP se observa como el modelo multi-gradiente primero se aproxima al modelo empírico y al ir aumentando la distancia se va aproximando al modelo semi-empírico. Mientras que para el canal DOWN ocurre lo contrario, el modelo multi-gradiente primero se aproxima al modelo semi-empírico y luego se aproxima al modelo empírico.

### 3.1.5.3 Comparación y determinación del menor error presente en los modelos de propagación.

En esta sección se compararán los modelos multi-gradientes (2 gradientes y 3 gradientes) en conjunto con el modelo empírico y semi-empírico determinados en la sección anterior, con la finalidad de determinar el modelo más exacto, es decir, el que tiene menor error. Para esto se tendrá como referencia al valor promedio de RSSI recolectados por lo nodos sensores ubicados a lo largo de la hectárea de cacao, de modo que se siga la ecuación 3.67 del error porcentual:

$$e\% = \left| \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Experimental}}{\text{Valor Teórico}} \right| * 100 \quad (3.67)$$

En donde el valor teórico hace referencia al valor promedio de RSSI de cada nodo sensor colocado en el cultivo de caca, mientras que el valor experimental será el valor determinado en base a las ecuaciones de los modelos de propagación diseñados.

Cabe recalcar que existen diferencias en cuanto a las consideraciones de cada modelo. Por un lado, mientras que el modelo semi-empírico se basa en un modelo de ambientes exteriores, donde se toma en consideración variables como la altura de la antena transmisora, la distancia entre el transmisor-receptor y la frecuencia de operación. El modelo empírico corresponde a un modelo de conectividad para exteriores que solo considera la altura que posee el nodo receptor y la distancia entre transmisor y receptor medida en Km. Finalmente el modelo experimental de multi-gradientes que se ha desarrollado en el presente proyecto considera la potencia recibida (RSSI) y la distancia logarítmica en base a la regresión lineal. En base a esto podemos aclarar que el modelo empírico es prácticamente un modelo de aplicación directa, es decir que no necesita más datos que permitan la adaptación al entorno en que se desplegaron los nodos. Mientras que el modelo semi-empírico requiere de otras consideraciones necesarias que permitan cierta adaptación al entorno, como el modelo de Lee.

Se comienza con una altura de 0.5m en los nodos en la hectárea de cacao, en la cual se presentarán las tablas de error tanto para canal de subida como para el canal de bajada. Para la altura de 0.5m se tienen las Tablas 3.13 y 3.14:

**Tabla 3.13 – Comparación de valores RSSI UP y error porcentual de cada modelo –  
Altura 0.5m**

	RSSI UP (dBm)						Porcentaje de error (%)				
	Teórico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico
1	-53.13	-56.77	-56.09	-56.02	-54.27	-56.12	6.84	5.57	5.44	2.14	5.62
2	-69.76	-65.41	-64.59	-64.51	-63.03	-64.89	6.24	7.41	7.53	9.64	6.99
3	-70.84	-70.43	-69.54	-69.44	-68.13	-69.98	0.57	1.84	1.97	3.82	1.21
4	-71.77	-74.08	-73.13	-73.03	-71.83	-73.68	3.22	1.89	1.75	0.09	2.67
5	-73.92	-76.81	-75.82	-75.71	-74.61	-76.46	3.92	2.57	2.43	0.93	3.43
6	-87.00	-77.85	-77.35	-76.67	-75.65	-77.51	10.52	11.10	11.88	13.04	10.91
7	-78.00	-77.95	-77.45	-76.76	-75.75	-77.61	0.07	0.71	1.60	2.88	0.51
8	-75.00	-78.33	-77.85	-77.10	-76.15	-78.00	4.45	3.80	2.81	1.53	4.00
9	-85.00	-78.99	-78.53	-77.69	-76.81	-78.66	7.07	7.61	8.60	9.63	7.46
10	-81.00	-79.43	-79.00	-78.09	-77.26	-79.11	1.93	2.47	3.59	4.61	2.33
11	-76.00	-79.70	-79.27	-78.33	-77.53	-79.38	4.86	4.30	3.06	2.01	4.45
12	-90.00	-80.03	-79.62	-78.63	-77.87	-79.72	11.07	11.53	12.63	13.47	11.42

13	-74.00	-80.77	-80.38	-79.29	-78.62	-80.47	9.15	8.63	7.15	6.24	8.74
14	-78.00	-81.00	-80.63	-79.50	-78.86	-80.71	3.85	3.37	1.92	1.10	3.47
15	-76.00	-81.24	-80.87	-79.71	-79.09	-80.94	6.89	6.41	4.88	4.07	6.50
16	-83.00	-81.83	-81.49	-79.70	-79.70	-81.55	1.41	1.82	3.98	3.98	1.75
17	-72.00	-81.90	-81.57	-79.97	-79.77	-81.62	13.76	13.29	11.07	10.79	13.36
18	-70.00	-82.54	-82.23	-82.34	-80.42	-82.27	17.92	17.47	17.63	14.88	17.52
19	-81.00	-82.61	-82.30	-82.60	-80.49	-82.34	1.99	1.60	1.97	0.63	1.65
20	-82.00	-83.08	-82.79	-84.36	-80.97	-82.82	1.32	0.96	2.87	1.26	0.99
21	-85.00	-83.41	-83.13	-85.57	-81.30	-83.15	1.87	2.20	0.67	4.36	2.18
22	-84.00	-83.60	-83.33	-86.29	-81.49	-83.34	0.47	0.80	2.73	2.99	0.78
23	-81.00	-83.98	-83.72	-87.69	-81.87	-83.72	3.68	3.36	8.26	1.08	3.36
24	-96.00	-84.22	-83.98	-88.60	-82.12	-83.97	12.27	12.52	7.71	14.46	12.53
25	-80.00	-84.52	-84.29	-89.72	-82.43	-84.28	5.65	5.36	12.15	3.03	5.34
26	-81.00	-84.99	-84.77	-91.45	-82.90	-84.75	4.92	4.66	12.90	2.34	4.63
27	-90.00	-85.44	-85.24	-93.12	-83.35	-85.20	5.07	5.29	3.47	7.39	5.33
28	-89.00	-85.92	-85.75	-94.94	-83.85	-85.70	3.46	3.66	6.67	5.79	3.71
29	-91.00	-86.29	-86.13	-96.30	-84.22	-86.07	5.17	5.35	5.83	7.45	5.42

**Tabla 3.14 – Comparación de valores RSSI DOWN y error porcentual de cada modelo  
– Altura 0.5m**

	RSSI DOWN (dBm)						Porcentaje de error (%)				
	Teórico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico
1	-51.82	-56.44	-53.32	-53.34	-51.31	-53.19	8.92	2.90	2.93	0.99	2.64
2	-69.04	-65.02	-61.25	-61.27	-60.55	-62.42	5.82	11.28	11.25	12.30	9.58
3	-64.78	-70.00	-65.86	-65.88	-65.92	-67.80	8.06	1.67	1.70	1.76	4.66
4	-68.53	-73.62	-69.21	-69.23	-69.82	-71.70	7.43	0.99	1.02	1.88	4.61
5	-70.14	-76.34	-71.72	-71.74	-72.75	-74.62	8.83	2.25	2.28	3.71	6.38
6	-79.00	-77.36	-75.13	-72.65	-73.85	-75.72	2.07	4.90	8.04	6.52	4.15
7	-73.00	-77.46	-75.25	-72.72	-73.96	-75.83	6.11	3.08	0.38	1.31	3.88
8	-69.00	-77.84	-75.72	-73.02	-74.37	-76.24	12.82	9.74	5.83	7.79	10.50
9	-92.00	-78.49	-76.51	-73.52	-75.07	-76.94	14.68	16.83	20.08	18.40	16.37
10	-71.00	-78.94	-77.06	-73.87	-75.55	-77.42	11.18	8.53	4.04	6.41	9.04
11	-75.00	-79.19	-77.37	-74.07	-75.83	-77.70	5.59	3.16	1.24	1.10	3.60
12	-90.00	-79.53	-77.79	-74.33	-76.19	-78.06	11.63	13.57	17.41	15.34	13.27
13	-77.00	-80.26	-78.68	-74.90	-76.98	-78.85	4.23	2.18	2.73	0.03	2.40
14	-84.00	-80.49	-78.96	-75.08	-77.23	-79.10	4.17	5.99	10.62	8.06	5.84
15	-87.00	-80.72	-79.25	-75.25	-77.47	-79.34	7.22	8.91	13.50	10.95	8.80
16	-73.00	-81.32	-79.97	-78.58	-78.11	-79.98	11.39	9.55	7.65	7.00	9.57
17	-70.00	-81.39	-80.06	-78.96	-78.19	-80.06	16.27	14.37	12.80	11.70	14.37
18	-70.00	-82.02	-80.83	-82.25	-78.87	-80.74	17.17	15.48	17.50	12.67	15.34
19	-82.00	-82.09	-80.92	-82.61	-78.95	-80.81	0.11	1.32	0.74	3.72	1.45
20	-74.00	-82.56	-81.49	-85.04	-79.45	-81.32	11.56	10.12	14.93	7.37	9.89

21	-90.00	-82.88	-81.89	-86.73	-79.80	-81.67	7.91	9.01	3.63	11.33	9.26
22	-77.00	-83.07	-82.12	-87.73	-80.01	-81.87	7.88	6.65	13.93	3.90	6.33
23	-80.00	-83.44	-82.58	-89.67	-80.41	-82.28	4.31	3.23	12.09	0.51	2.85
24	-93.00	-83.69	-82.88	-90.94	-80.67	-82.54	10.01	10.88	2.22	13.26	11.25
25	-80.00	-83.98	-83.24	-92.48	-80.99	-82.86	4.98	4.05	15.61	1.24	3.57
26	-85.00	-84.45	-83.81	-94.89	-81.49	-83.36	0.65	1.40	11.63	4.13	1.93
27	-89.00	-84.89	-84.35	-97.21	-81.97	-83.84	4.62	5.22	9.23	7.90	5.80
28	-79.00	-85.38	-84.95	-99.73	-82.49	-84.36	8.07	7.53	26.24	4.42	6.78
29	-91.00	-85.74	-85.39	-101.62	-82.88	-84.75	5.78	6.16	11.68	8.92	6.87

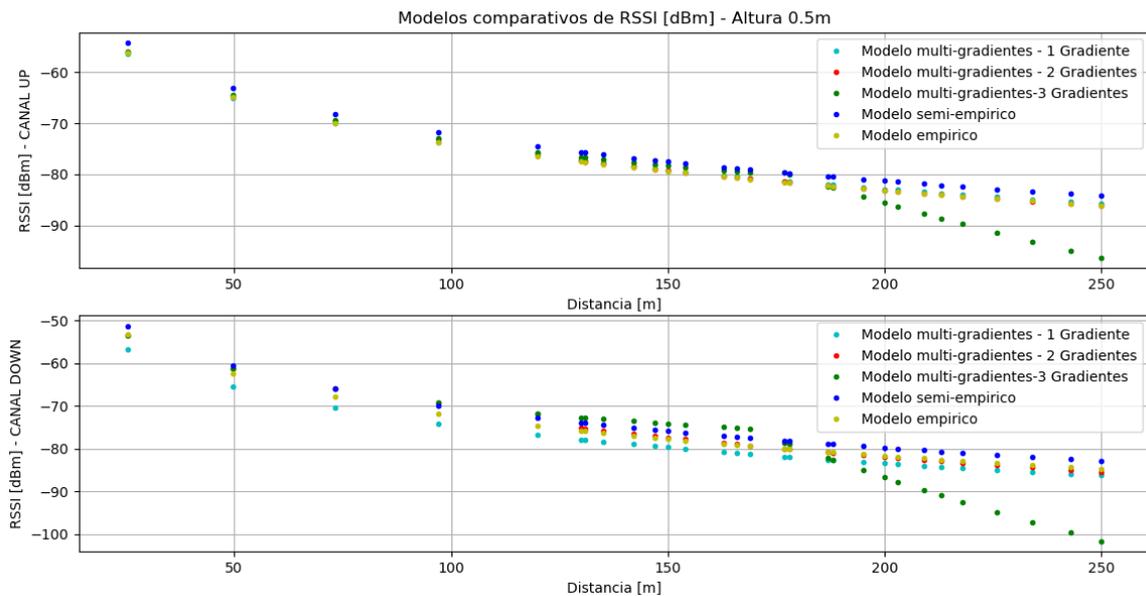
Para esta primera altura se ha determinado los siguientes errores promedios en base al algoritmo implementado en Python, mostrados en la Figura 3.56:

```

Canal UP
-El error promedio del modelo con 1 gradiente es del 5.47%
-El error promedio del modelo con 2 gradientes es del 5.4%
-El error promedio del modelo con 3 gradientes es del 6.01%
-El error promedio del modelo semi-empírico es del 5.34%
-El error promedio del modelo empírico es del 5.43%
Canal DOWN
-El error promedio del modelo con 1 gradiente es del 5.42%
-El error promedio del modelo con 2 gradientes es del 6.93%
-El error promedio del modelo con 3 gradientes es del 9.07%
-El error promedio del modelo semi-empírico es del 6.71%
-El error promedio del modelo empírico es del 7.27%

```

**Figura 3.56 – Errores porcentuales promedios con modelos de propagación a 0.5m de altura**



**Figura 3.57 – Comparación de RSSI en los modelos de propagación a 0.5m de altura**

La Figura 3.56 indica los porcentajes de error provenientes de cada modelo de propagación para los canales UPLINK y DOWNLINK. Estos porcentajes representan el total de error que existe entre el valor real de RSSI y el valor obtenido mediante un modelo matemático. Para el canal UPLINK, el modelo semi-empírico es el que representa un menor error porcentual con un valor de 5.34%, indicando una mejor aproximación al valor real de RSSI, mientras que en el canal DOWNLINK, el que represente un menor error es el modelo de 1 solo gradiente, con un error porcentual del 5.42%. Todo los modelos de propagación determinado han sido representados en la Figura 3.57, donde se puede apreciar que la mayoría tiene una buena aproximación los unos con los otros, sin embargo, el modelo de 3 gradientes comienza a poseer menores potencias a partir de 170m, límite donde se comienza a tomar en cuenta el tercer gradiente, indicando que para estos casos una mejor aproximación de datos sería suficiente con dos gradientes, a menos que se consideren más muestras o se aumente la distancia de cobertura de la zona.

La segunda altura a considerar de 1m, cuyos valores de RSSI y del error porcentual se detallan en la Tabla 3.15 y 3.16:

**Tabla 3.15 – Comparación de valores RSSI UP y error porcentual de cada modelo –  
Altura 1m**

	RSSI UP (dBm)						Porcentaje de error (%)				
	Teórico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico
1	-53.13	-56.44	-56.09	-56.02	-54.27	-55.99	6.22	5.57	5.44	2.14	5.38
2	-69.76	-65.01	-64.59	-64.51	-63.03	-64.69	6.81	7.41	7.53	9.64	7.28
3	-70.84	-70.00	-69.54	-69.44	-68.13	-69.75	1.19	1.84	1.97	3.82	1.54
4	-71.77	-73.62	-73.13	-73.03	-71.83	-73.42	2.57	1.89	1.75	0.09	2.30
5	-73.92	-76.33	-75.82	-75.71	-74.61	-76.17	3.26	2.57	2.43	0.93	3.05
6	-79.00	-77.35	-77.17	-76.67	-75.65	-77.21	2.08	2.32	2.95	4.23	2.27
7	-73.00	-77.45	-77.27	-76.76	-75.75	-77.31	6.10	5.84	5.14	3.77	5.90
8	-68.00	-77.84	-77.66	-77.10	-76.15	-77.70	14.47	14.20	13.39	11.98	14.27
9	-88.00	-78.48	-78.31	-77.69	-76.81	-78.36	10.81	11.01	11.72	12.71	10.96
10	-81.00	-78.93	-78.76	-78.09	-77.26	-78.81	2.56	2.76	3.59	4.61	2.71
11	-83.00	-79.19	-79.02	-78.33	-77.53	-79.07	4.60	4.79	5.63	6.59	4.74
12	-91.00	-79.52	-79.37	-78.63	-77.87	-79.41	12.61	12.79	13.59	14.42	12.73
13	-86.00	-80.25	-80.10	-79.29	-78.62	-80.15	6.69	6.86	7.80	8.58	6.80
14	-76.00	-80.48	-80.34	-79.50	-78.86	-80.39	5.90	5.71	4.61	3.76	5.77
15	-91.00	-80.71	-80.57	-79.71	-79.09	-80.62	11.30	11.46	12.41	13.09	11.41

16	-77.00	-81.31	-81.17	-79.70	-79.70	-81.22	5.59	5.42	3.51	3.50	5.48
17	-74.00	-81.38	-81.24	-79.97	-79.77	-81.29	9.97	9.79	8.07	7.80	9.86
18	-69.00	-82.01	-81.88	-82.34	-80.42	-81.94	18.86	18.67	19.34	16.55	18.75
19	-76.00	-82.08	-81.95	-82.60	-80.49	-82.00	8.00	7.83	8.68	5.90	7.90
20	-85.00	-82.55	-82.43	-84.36	-80.97	-82.48	2.89	3.03	0.76	4.75	2.96
21	-85.00	-82.87	-82.76	-85.57	-81.30	-82.81	2.50	2.64	0.67	4.36	2.58
22	-75.00	-83.06	-82.95	-86.29	-81.49	-83.00	10.75	10.60	15.05	8.66	10.67
23	-80.00	-83.44	-83.33	-87.69	-81.87	-83.38	4.29	4.16	9.61	2.34	4.23
24	-95.00	-83.68	-83.57	-88.60	-82.12	-83.63	11.92	12.03	6.74	13.56	11.97
25	-76.00	-83.98	-83.87	-89.72	-82.43	-83.93	10.49	10.36	18.05	8.45	10.43
26	-78.00	-84.44	-84.34	-91.45	-82.90	-84.40	8.25	8.13	17.24	6.28	8.20
27	-86.00	-84.88	-84.79	-93.12	-83.35	-84.85	1.30	1.40	8.28	3.08	1.34
28	-93.00	-85.37	-85.28	-94.94	-83.85	-85.34	8.21	8.30	2.08	9.84	8.24
29	-91.00	-85.73	-85.65	-96.30	-84.22	-85.71	5.79	5.88	5.83	7.45	5.81

**Tabla 3.16 – Comparación de valores RSSI DOWN y error porcentual de cada modelo  
– Altura 1m**

	RSSI DOWN (dBm)						Porcentaje de error (%)				
	Teórico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico
1	-51.82	-55.67	-53.32	-53.34	-51.31	-52.09	7.43	2.90	2.93	0.99	0.51
2	-69.04	-64.09	-61.25	-61.27	-60.55	-61.53	7.17	11.28	11.25	12.30	10.88
3	-64.78	-68.98	-65.86	-65.88	-65.92	-67.01	6.49	1.67	1.70	1.76	3.45
4	-68.53	-72.53	-69.21	-69.23	-69.82	-71.00	5.84	0.99	1.02	1.88	3.60
5	-70.14	-75.20	-71.72	-71.74	-72.75	-73.98	7.21	2.25	2.28	3.71	5.48
6	-74.00	-76.20	-69.57	-72.65	-73.85	-75.11	2.98	5.99	1.83	0.20	1.50
7	-68.00	-76.30	-69.77	-72.72	-73.96	-75.22	12.20	2.60	6.94	8.76	10.62
8	-56.00	-76.68	-70.56	-73.02	-74.37	-75.64	36.92	26.00	30.39	32.81	35.08
9	-85.00	-77.31	-71.89	-73.52	-75.07	-76.36	9.04	15.42	13.50	11.68	10.17
10	-69.00	-77.75	-72.80	-73.87	-75.55	-76.85	12.68	5.50	7.05	9.49	11.37
11	-74.00	-78.00	-73.33	-74.07	-75.83	-77.13	5.41	0.91	0.09	2.47	4.23
12	-92.00	-78.33	-74.02	-74.33	-76.19	-77.50	14.86	19.54	19.21	17.18	15.76
13	-69.00	-79.05	-75.51	-74.90	-76.98	-78.30	14.56	9.44	8.54	11.56	13.48
14	-73.00	-79.28	-75.99	-75.08	-77.23	-78.56	8.60	4.10	2.84	5.79	7.62
15	-85.00	-79.50	-76.46	-75.25	-77.47	-78.81	6.47	10.05	11.47	8.85	7.28
16	-72.00	-80.08	-77.67	-78.58	-78.11	-79.46	11.23	7.88	9.14	8.49	10.37
17	-71.00	-80.15	-77.82	-78.96	-78.19	-79.54	12.89	9.61	11.21	10.13	12.03
18	-70.00	-80.77	-79.12	-82.25	-78.87	-80.24	15.39	13.03	17.50	12.67	14.63
19	-79.00	-80.84	-79.26	-82.61	-78.95	-80.31	2.33	0.33	4.56	0.07	1.66
20	-75.00	-81.30	-80.22	-85.04	-79.45	-80.83	8.40	6.96	13.39	5.93	7.77
21	-89.00	-81.62	-80.88	-86.73	-79.80	-81.19	8.29	9.12	2.55	10.34	8.78
22	-71.00	-81.81	-81.27	-87.73	-80.01	-81.40	15.22	14.47	23.56	12.68	14.64

23	-78.00	-82.17	-82.04	-89.67	-80.41	-81.81	5.35	5.18	14.96	3.09	4.88
24	-90.00	-82.41	-82.54	-90.94	-80.67	-82.08	8.43	8.29	1.04	10.37	8.81
25	-75.00	-82.70	-83.15	-92.48	-80.99	-82.40	10.27	10.86	23.31	7.99	9.87
26	-85.00	-83.16	-84.09	-94.89	-81.49	-82.91	2.17	1.07	11.63	4.13	2.46
27	-92.00	-83.59	-85.01	-97.21	-81.97	-83.40	9.14	7.60	5.66	10.90	9.35
28	-92.00	-84.07	-86.00	-99.73	-82.49	-83.93	8.62	6.52	8.40	10.34	8.77
29	-89.00	-84.43	-86.74	-101.62	-82.88	-84.33	5.14	2.54	14.18	6.88	5.24

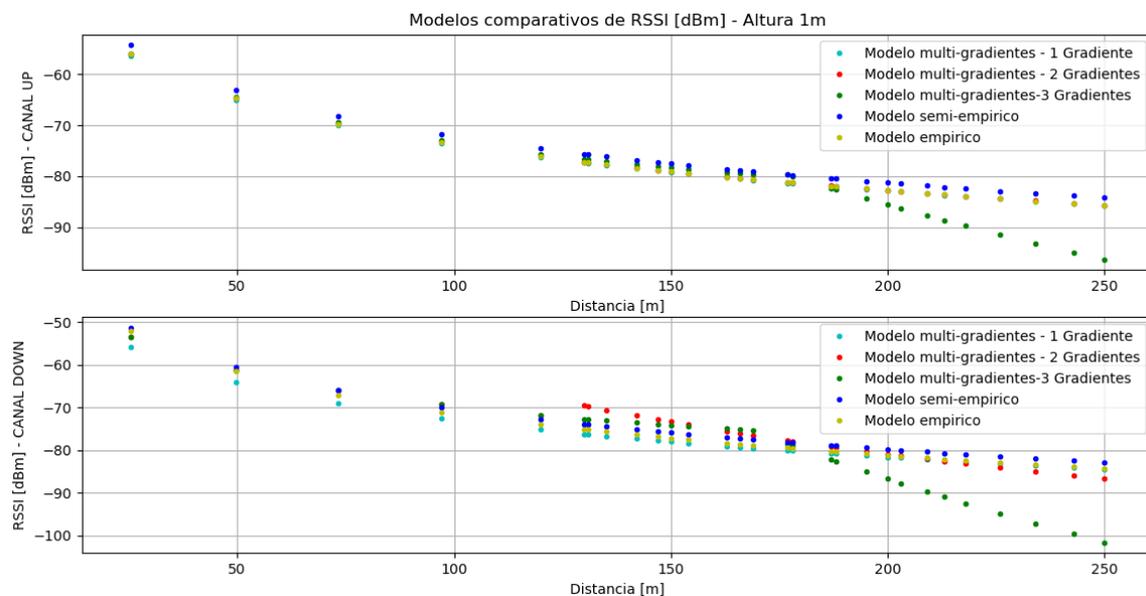
Para esta segunda altura se ha determinado los siguientes errores promedios en base al algoritmo implementado en Python, mostrados en la Figura 3.58:

```

Canal UP
-El error promedio del modelo con 1 gradiente es del 7.1%
-El error promedio del modelo con 2 gradientes es del 7.08%
-El error promedio del modelo con 3 gradientes es del 7.72%
-El error promedio del modelo semi-empírico es del 7.0%
-El error promedio del modelo empírico es del 7.09%
Canal DOWN
-El error promedio del modelo con 1 gradiente es del 7.05%
-El error promedio del modelo con 2 gradientes es del 7.66%
-El error promedio del modelo con 3 gradientes es del 9.73%
-El error promedio del modelo semi-empírico es del 8.39%
-El error promedio del modelo empírico es del 8.98%

```

**Figura 3.58 – Errores porcentuales promedios con modelos de propagación a 1m de altura**



**Figura 3.59 – Comparación de RSSI en los modelos de propagación a 1m de altura**

Para una altura de 1m en los nodos, se tiene que en el canal UPLINK, el modelo semi-empírico se mantiene como el modelo con un menor error porcentual, con un valor de 7.0%, mientras que en el canal DOWNLINK, el que represente un menor error es el modelo de 1 solo gradiente, con un error porcentual del 7.05%, siendo el modelo de 2 gradiente el segundo con menor error porcentual con un valor de 7.66%. De igual manera, todos los modelos de propagación han sido representados en la Figura 3.59, donde se puede apreciar que la mayoría tiene una buena aproximación los unos con los otros, sin embargo, a esta altura de 1m, se puede apreciar que el modelo de 2 gradientes se toma valores un poco altos en comparación al resto de los modelos a partir de los 125m, pero luego se estabiliza. Para el modelo de 3 gradientes se observa que mantiene el comportamiento de poseer valores inferiores a partir de 170m.

La tercera altura a considerar de 2m, cuyos valores de RSSI y del error porcentual se detallan en la Tabla 3.17 y 3.18:

**Tabla 3.17 – Comparación de valores RSSI UP y error porcentual de cada modelo –  
Altura 2m**

	RSSI UP (dBm)						Porcentaje de error (%)				
	Teórico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico
1	-53.13	-49.98	-56.13	-56.02	-57.68	-60.27	5.94	5.65	5.44	8.57	13.44
2	-69.76	-57.21	-64.63	-64.51	-62.95	-65.54	17.99	7.35	7.53	9.77	6.06
3	-70.84	-61.42	-69.58	-69.44	-66.01	-68.60	13.29	1.78	1.97	6.81	3.16
4	-71.77	-64.48	-73.17	-73.03	-68.23	-70.82	10.16	1.95	1.75	4.93	1.32
5	-73.92	-66.77	-75.86	-75.71	-69.90	-72.49	9.67	2.62	2.43	5.43	1.93
6	-86.00	-67.63	-73.26	-76.67	-70.53	-73.12	21.36	14.81	10.85	17.99	14.98
7	-71.00	-67.72	-73.30	-76.76	-70.59	-73.18	4.63	3.24	8.11	0.58	3.07
8	-67.00	-68.04	-73.44	-77.10	-70.83	-73.42	1.55	9.61	15.08	5.71	9.58
9	-80.00	-68.59	-73.68	-77.69	-71.23	-73.81	14.27	7.91	2.89	10.97	7.73
10	-73.00	-68.96	-73.84	-78.09	-71.50	-74.09	5.53	1.15	6.97	2.06	1.49
11	-74.00	-69.18	-73.93	-78.33	-71.66	-74.24	6.51	0.09	5.85	3.17	0.33
12	-83.00	-69.46	-74.05	-78.63	-71.86	-74.45	16.31	10.78	5.26	13.42	10.30
13	-73.00	-70.08	-74.32	-79.29	-72.31	-74.90	4.00	1.81	8.62	0.94	2.60
14	-70.00	-70.28	-74.40	-79.50	-72.45	-75.04	0.39	6.29	13.57	3.51	7.20
15	-70.00	-70.47	-74.49	-79.71	-72.59	-75.18	0.67	6.41	13.87	3.71	7.40
16	-68.00	-70.97	-74.70	-79.70	-72.96	-75.55	4.37	9.86	17.21	7.29	11.10
17	-71.00	-71.03	-74.73	-79.97	-73.00	-75.59	0.04	5.25	12.64	2.82	6.47
18	-66.00	-71.56	-74.96	-82.34	-73.39	-75.98	8.43	13.58	24.76	11.20	15.12
19	-76.00	-71.62	-74.99	-82.60	-73.43	-76.02	5.76	1.33	8.68	3.38	0.03

20	-66.00	-72.02	-75.16	-84.36	-73.72	-76.31	9.12	13.87	27.81	11.70	15.62
21	-82.00	-72.29	-75.27	-85.57	-73.92	-76.51	11.84	8.20	4.36	9.85	6.70
22	-70.00	-72.45	-75.34	-86.29	-74.04	-76.62	3.50	7.63	23.27	5.77	9.46
23	-71.00	-72.77	-75.48	-87.69	-74.27	-76.85	2.49	6.31	23.51	4.60	8.25
24	-87.00	-72.97	-75.57	-88.60	-74.42	-77.00	16.12	13.14	1.84	14.46	11.49
25	-73.00	-73.22	-75.68	-89.72	-74.60	-77.19	0.31	3.67	22.90	2.19	5.73
26	-73.00	-73.61	-75.85	-91.45	-74.88	-77.47	0.84	3.90	25.27	2.58	6.12
27	-82.00	-73.99	-76.01	-93.12	-75.16	-77.74	9.77	7.31	13.56	8.35	5.19
28	-77.00	-74.40	-76.18	-94.94	-75.45	-78.04	3.38	1.06	23.29	2.01	1.35
29	-85.00	-74.70	-76.32	-96.30	-75.68	-78.26	12.11	10.22	13.30	10.97	7.93

**Tabla 3.18 – Comparación de valores RSSI DOWN y error porcentual de cada modelo  
– Altura 2m**

	RSSI DOWN (dBm)						Porcentaje de error (%)				
	Teórico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico	1 Gradiente	2 Gradientes	3 Gradientes	Semi-Empírico	Empírico
1	-51.82	-50.26	-53.81	-53.34	-53.28	-55.85	3.01	3.84	2.93	2.82	7.77
2	-69.04	-57.56	-61.74	-61.27	-59.57	-62.13	16.63	10.57	11.25	13.71	10.01
3	-64.78	-61.80	-66.35	-65.88	-63.23	-65.78	4.60	2.42	1.70	2.40	1.55
4	-68.53	-64.88	-69.70	-69.23	-65.88	-68.43	5.33	1.70	1.02	3.87	0.15
5	-70.14	-67.19	-72.21	-71.74	-67.87	-70.42	4.21	2.94	2.28	3.24	0.40
6	-78.00	-68.06	-69.24	-72.65	-68.62	-71.17	12.74	11.23	6.86	12.02	8.75
7	-63.00	-68.14	-69.34	-72.72	-68.69	-71.24	8.16	10.06	15.43	9.04	13.09
8	-56.00	-68.47	-69.72	-73.02	-68.98	-71.53	22.27	24.50	30.39	23.17	27.73
9	-86.00	-69.02	-70.36	-73.52	-69.45	-72.00	19.74	18.19	14.51	19.24	16.28
10	-68.00	-69.40	-70.79	-73.87	-69.78	-72.33	2.06	4.11	8.63	2.61	6.36
11	-64.00	-69.62	-71.05	-74.07	-69.97	-72.52	8.78	11.01	15.73	9.32	13.31
12	-88.00	-69.91	-71.38	-74.33	-70.21	-72.76	20.56	18.88	15.53	20.21	17.32
13	-72.00	-70.53	-72.10	-74.90	-70.75	-73.30	2.05	0.14	4.02	1.74	1.80
14	-69.00	-70.72	-72.33	-75.08	-70.92	-73.47	2.50	4.83	8.81	2.78	6.47
15	-79.00	-70.92	-72.56	-75.25	-71.09	-73.63	10.23	8.16	4.74	10.02	6.79
16	-66.00	-71.42	-73.14	-78.58	-71.52	-74.07	8.22	10.82	19.06	8.37	12.23
17	-64.00	-71.49	-73.21	-78.96	-71.57	-74.12	11.70	14.39	23.37	11.84	15.81
18	-63.00	-72.02	-73.84	-82.25	-72.04	-74.58	14.32	17.20	30.55	14.35	18.39
19	-85.00	-72.08	-73.90	-82.61	-72.09	-74.63	15.20	13.06	2.82	15.19	12.19
20	-62.00	-72.48	-74.36	-85.04	-72.43	-74.98	16.90	19.94	37.17	16.83	20.93
21	-83.00	-72.76	-74.68	-86.73	-72.67	-75.22	12.34	10.02	4.50	12.45	9.38
22	-65.00	-72.92	-74.87	-87.73	-72.81	-75.35	12.18	15.19	34.97	12.01	15.93
23	-73.00	-73.24	-75.24	-89.67	-73.08	-75.63	0.32	3.07	22.84	0.11	3.60
24	-85.00	-73.44	-75.48	-90.94	-73.26	-75.81	13.60	11.20	6.98	13.81	10.82
25	-75.00	-73.70	-75.77	-92.48	-73.48	-76.02	1.74	1.03	23.31	2.03	1.37

26	-78.00	-74.09	-76.23	-94.89	-73.82	-76.36	5.02	2.27	21.65	5.36	2.10
27	-81.00	-74.47	-76.67	-97.21	-74.14	-76.69	8.07	5.35	20.01	8.46	5.32
28	-72.00	-74.88	-77.15	-99.73	-74.50	-77.04	4.00	7.15	38.51	3.47	7.00
29	-84.00	-75.19	-77.50	-101.62	-74.77	-77.31	10.49	7.73	20.98	10.99	7.96

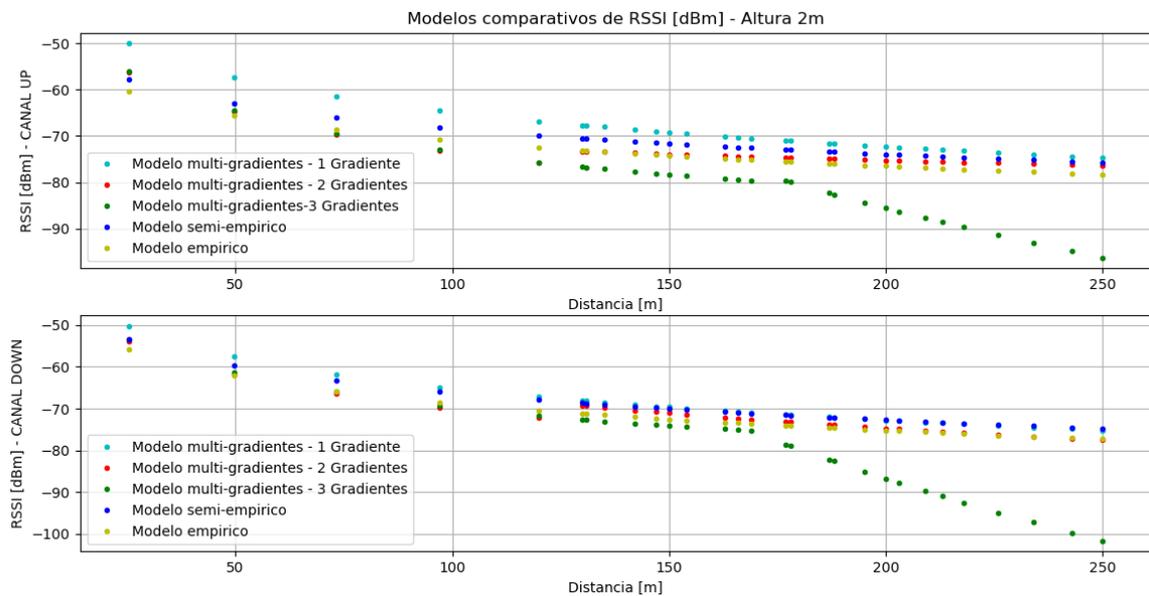
Para esta tercera altura se ha determinado los siguientes errores promedios en base al algoritmo implementado en Python, mostrados en la Figura 3.60:

```

Canal UP
-El error promedio del modelo con 1 gradiente es del 7.6%
-El error promedio del modelo con 2 gradientes es del 6.44%
-El error promedio del modelo con 3 gradientes es del 12.16%
-El error promedio del modelo semi-empírico es del 6.71%
-El error promedio del modelo empírico es del 6.94%
Canal DOWN
-El error promedio del modelo con 1 gradiente es del 7.5%
-El error promedio del modelo con 2 gradientes es del 9.34%
-El error promedio del modelo con 3 gradientes es del 15.54%
-El error promedio del modelo semi-empírico es del 9.36%
-El error promedio del modelo empírico es del 9.68%

```

**Figura 3.60 – Errores porcentuales promedios con modelos de propagación a 2m de altura**



**Figura 3.61 – Comparación de RSSI en los modelos de propagación a 2m de altura**

Finalmente, para una altura de 2m en los nodos, se tiene que en el canal UPLINK, el modelo de dos gradientes presenta un menor error porcentual, con un valor de 6.44%, mientras que en el canal DOWNLINK, el que represente un menor error es el modelo de 1 solo gradiente, con un error porcentual del 7.5%. De igual manera, todos los modelos de propagación han sido representados en la Figura 3.61, donde se puede apreciar que se disminuye la aproximación, pero se mantiene el mismo comportamiento descendiente.

De todos los modelos de propagación expuestos a diferentes alturas, para los canales UPLINK se puede optar un modelo del tipo semi-empírico en base a sus pequeños errores porcentuales que presenta, mientras que para el canal de DOWNLINK, a pesar de que el modelo de 1 gradiente es el que menor error porcentual presenta, no describe de forma exacta la zona desea, es por eso que se opta mejor por emplear el modelo de 2 gradientes, el cual otro de los modelos que mejor aproximación tiene a los valores teóricos. Por lo tanto, la red de LoRaWAN que opera con dos canales (UPLINK y DOWNLINK) puede optar un modelo de propagación de 1 gradiente, dado que es el modelo que presenta un menor porcentaje de error para ambos canales. Por otro lado, si quiere tener una mejor interpretación de la cobertura del terreno, se puede optar por el modelo de propagación de 2 gradientes que también posee un menor porcentaje de error.

## 3.2 Resultados de la implementación del prototipo

### 3.2.1 Sensores de humedad de suelo



Figura 3.62 – Nodos de humedad

En la Figura 3.62 se observan los dos tipos de sensores de humedad de suelo, uno del tipo capacitivo y otro del tipo conductivo. Ambos sensores fueron colocados en una misma planta de cacao, para comparar los valores de humedad que arroja cada sensor y poder establecer cuál es el óptimo para este tipo de medición.



**Figura 3.63 – Zona radicular del cacao**

Para la colocación de los electrodos de los nodos, fueron colocados en un radio de 50cm de la planta tal como se indica en la Figura 3.63, esto con el fin de no alterar la zona radicular del cacao. Además, los electrodos fueron colocados a 20 cm de profundidad.

### 3.2.2 Lecturas de humedad del suelo en laboratorio

**Tabla 3.19 – Resumen de valores de humedad de los nodos**

Humedad				
Tipo de sensor:	Capacitivo	Capacitivo (%)	Conductivo	Conductivo (%)
Sensor en el aire (Referencia)	3990	0%	4093	0%
Suelo sin humedad	3400	14.79%	3500	14.49%
Suelo con Humedad promedio	1386	66.14%	2860	28.32%
Suelo con demasiada Humedad	1100	73.12%	2340	41.35%

En la parte de laboratorio, se obtuvieron los siguientes valores que arrojaban los sensores a diversos tipos de ambientes descritos en la Tabla 3.19, los cuales servirán de referencia para la comparación con los datos de humedad recolectados en el campo. Cabe recalcar que los valores son del tipo analógico, y dado que se está operando a 3.3V, por lo tanto, todo valor analógico intermedio es expresado con un valor entre 0 y 4093 para el sensor conductivo, mientras que para el sensor capacitivo posee valores entre 0 y 3990.

Para una mejor interpretación de los valores de humedad, los valores analógicos han sido convertidos en porcentajes para un mejor análisis del estado y humedad que presenta el suelo de cacao.

### 3.2.3 Resultados de humedad

Para los resultados de humedad que se mostrarán a continuación, fueron tomados desde el martes 2 hasta el viernes 6 de agosto del 2022. Además, se muestran los datos de humedad recolectados por los dos tipos de sensores colocados.

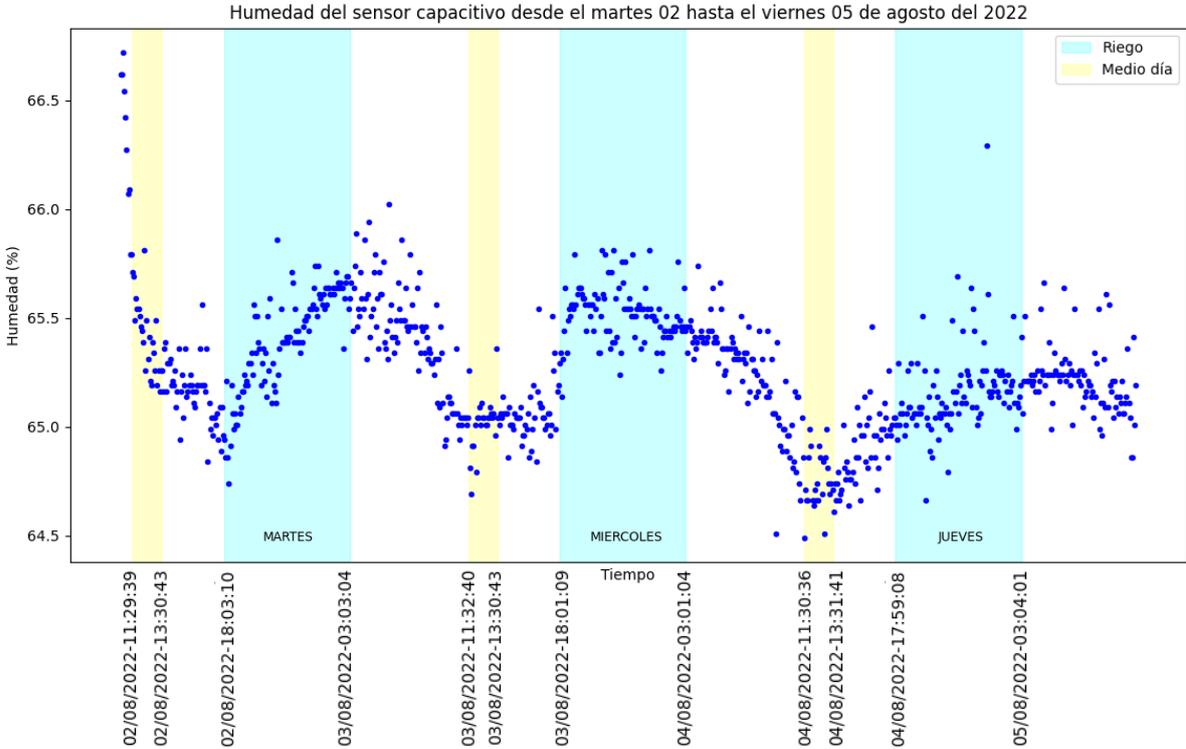
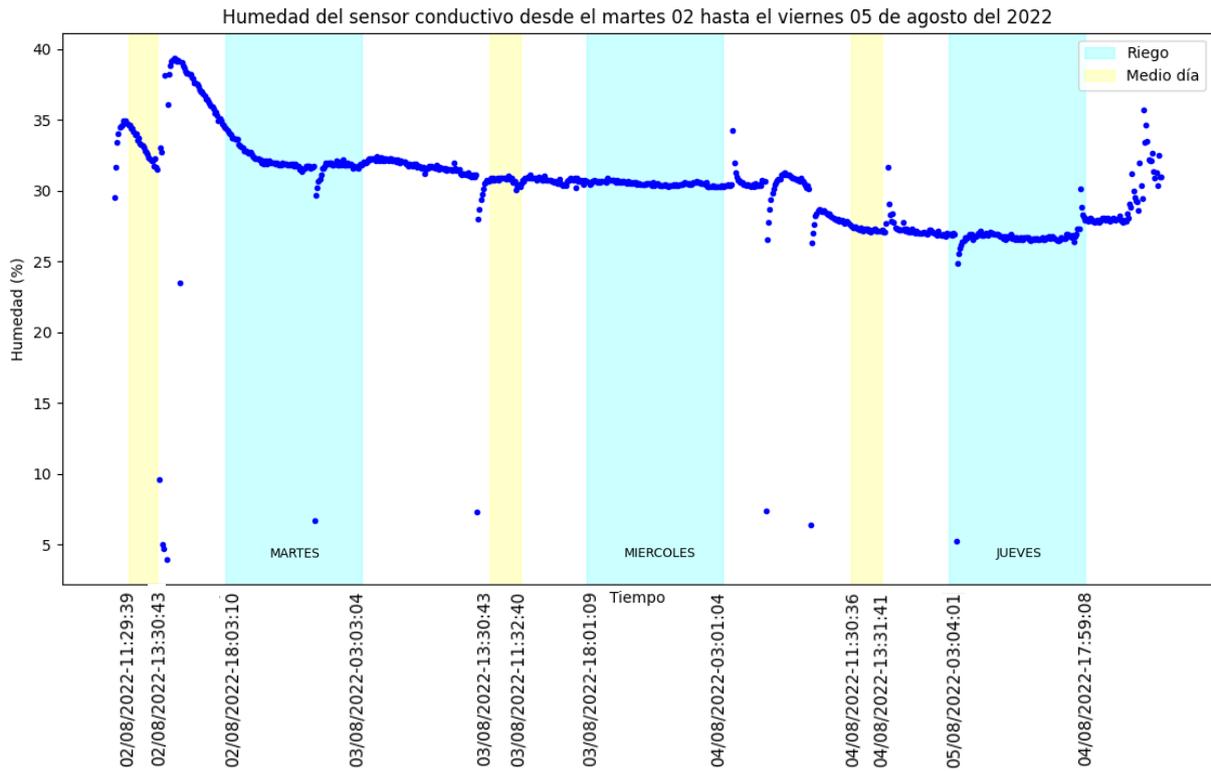


Figura 3.64 – Humedad recolectada por el sensor capacitivo



**Figura 3.65 – Humedad recolectada por el sensor conductivo**

Tal como se puede apreciar en la Figura 3.64, las lecturas de humedad recolectadas por un sensor del tipo capacitivo presentan una mejor visualización en comparación a los datos recolectados por un sensor del tipo conductivo. En cada una de las figuras se han marcado las horas de riego, que corresponden desde las 18:00 hasta las 03:00 am. Las lecturas de humedad recolectadas por el sensor capacitivo variaron durante estos horarios de riego marcados por las franjas celestes, en las cuales se puede observar cómo el porcentaje aumenta con respecto al tiempo que se mantienen activadas las electroválvulas, y una vez que finaliza el periodo de riego temporizado el porcentaje vuelve a decaer hasta el próximo encendido, especialmente al medio día (franja amarilla) en donde debido a las altas temperaturas provocadas por el sol se obtienen los porcentajes más bajos de humedad. Mientras que el sensor conductivo de la Figura 3.65 no presenta estos cambios de humedad y solo se mantiene un valor casi constante, debido a la poca sensibilidad de este tipo de sensores de mala calidad y baja precisión que hacen uso de materiales ineficientes.

### 3.2.4 Resultados del funcionamiento del actuador

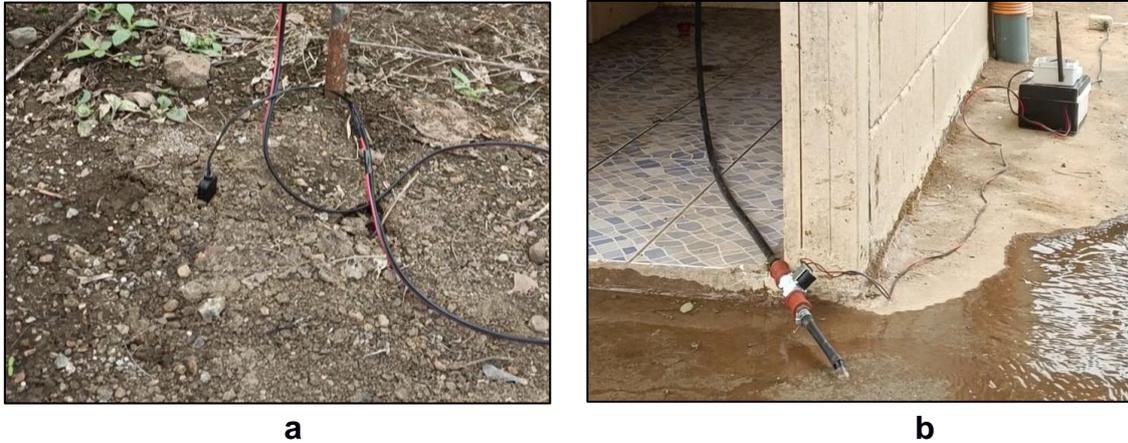


**Figura 3.66 – Sensor de humedad colocado a 50cm de una planta de cacao**

Para la activación del sistema riego, el actuador fue configurado de tal forma que opere en base a las lecturas de humedad que envíe un nodo sensor. En este caso, fue colocado un nodo cerca de una de las plantas de cacao tal como se lo observa en la Figura 3.66. Las condiciones para que opere el actuador se basaba en condicionales, en donde se establecía un rango de operación en base a las mediciones que se recolectaron en la sección 3.2.3. Las variables de humedad son receptadas por el Gateway de la red LoRaWAN en donde el Home Assistant es el encargado de mandar la acción al actuador en base a las siguientes condiciones:

- **Por encima de:** Esta condición representa que, si la variable de humedad posee un valor por encima del establecido, la electroválvula se activará y permitirá el paso de agua. Para este primer condicional se toma el valor de 3500 o 14.49% de humedad para el sensor capacitivo y 3400 o 14.79% de humedad para el sensor conductivo, tal como se indica en la Tabla 3.19.
- **Por debajo de:** Esta condición representa el límite de agua permitida en la planta, donde si el valor está por debajo del establecido, la electroválvula se cerrará impidiendo el paso de agua. Para este segundo condicional se toma el valor de

1100 o 73.12% de humedad para el sensor capacitivo y 2340 o 41.35% de humedad para el sensor conductivo, tal como se indica en la Tabla 3.19.



**Figura 3.67 – Electroválvula desactivado con suelo seco**

En la Figura 3.67a se aprecia que el suelo de la planta de cacao está completamente seco, por lo que la variable de humedad está por encima del límite establecido. Esta variable es procesada en el Home Assistant y envía la orden de activación al nodo actuador, haciendo que la electroválvula permita el flujo de agua tal como se puede apreciar en la Figura 3.67b.



**Figura 3.68 – Electroválvula activada con suelo con demasiada humedad**

En la Figura 3.68a se muestra que el suelo está completamente húmedo, por lo que el Home Assistant procesa esos datos y envía la orden al nodo actuador para que se

desactive la electroválvula para impedir el flujo de agua, tal como se observa en la Figura 3.68b.

### 3.3 Análisis de costos

Ya que el presente proyecto está diseñado para trabajar con un sistema de riego que abarca un área de aproximadamente una hectárea dentro de la Granja Espol en un cultivo ya existente de cacao, se han considerado los siguientes valores asociados al costo de los elementos que se han utilizado en la implementación de una red de sensores que se comunican mediante tecnología LoRaWAN en la Tabla 3.20:

**Tabla 3.20 – Costos de los elementos adquiridos para una red LoRaWAN**

COMPONENTE	CANTIDAD	P. UNITARIO	VALOR TOTAL
Panel solar	3	\$6.00	\$18.00
Cable micro USB	1	\$3.00	\$3.00
Jumpers (Fajo)	2	\$3.50	\$7.00
Módulo relé	1	\$3.50	\$3.50
Diodo 1N4007	5	\$0.10	\$0.50
Porta pila	2	\$0.75	\$1.50
Heltec CubeCell AB-01	2	\$ 25.00	\$50.00
Sensor Digital (4 en 1) +envío	1	\$26.88	\$26.88
Módulo de carga TP4056	4	\$3.00	\$12.00
Sensor humedad conductivo+envío	2	\$10.25	\$20.50
Sensor humedad capacitivo	2	\$4.25	\$8.50
Protoboards pequeñas	2	\$2.50	\$5.00
Cable en metros	2	\$0.35	\$0.70
Caja de paso	2	\$8.00	\$16.00
Batería Li-Ion	2	\$3.64	\$7.28
Electroválvula pequeña	1	\$10.00	\$10.00
Antenas LoRa	2	\$15.00	\$30.00
<b>TOTAL</b>			<b>\$220.36</b>

Cabe recalcar que para la obtención del modelo de propagación adecuado para ese ambiente se han considerado el uso de 3 rayos dentro de los cuales existen 8 nodos, en cada uno. Lo que equivaldría a tener 24 nodos en su totalidad que se comunican directamente con el Gateway, que después del respectivo procesamiento de datos realiza la toma de decisiones con respecto a la activación de los micro aspersores. Estos 8 nodos en conjunto con el Gateway fueron proporcionados por el grupo de investigación

de la Espol "GIRNI" para su uso inmediato en el presente proyecto, suponiéndonos una ventaja con respecto al uso de recursos económicos. Dentro del área en la que se ha trabajado se cuenta actualmente con la disponibilidad de 2 electroválvulas las cuales suplen la necesidad hídrica de las plantas de cacao, debido a que estas electroválvulas en conjunto con el sistema de riego ya se encontraban previamente instaladas, se procedió a realizar la estimación del valor necesario para la implementación de este mismo, teniendo un valor aproximado de \$12000 por hectárea, incluyendo dentro de este valor los cargos con respecto al sistema de propulsión de agua en conjunto con las tuberías que se usaron para llegar hasta la zona del cultivo, las electroválvulas y los micro aspersores conectados en serie en cada surco por una red de mangueras de media pulgada.

Además, como es de suponer tanto los predios del cliente, como el cultivo de cacao en la granja Espol donde se ha llevado a cabo el desarrollo del presente proyecto, cuentan con tipos de sistema de riego diferentes, siendo el del cliente controlado mediante válvulas manualmente, lo que conlleva a tener 2 sistemas de riego con diferente presupuesto de instalación. Teniendo el del cliente como el más económico y menos eficiente, ya que no cuenta con un control preciso del tiempo y la cantidad de riego de las plantas. Sin embargo, se cree que en los predios el cliente se puede lograr una mejor implementación ya que el actuador controlaría directamente las electroválvulas que se accionan de acuerdo con las lecturas de los nodos sensores y no dependerían también del temporizador programado para cada electroválvula en el caso de la Granja Espol.

De la misma manera se hace contraste con otras alternativas de diseño e implementación de sistemas de riego en las cuales se pretende automatizar y controlar de manera remota el mismo, usando tecnologías como Zigbee y otros elementos electrónicos. Los resultados de la comparativa en cuanto a costos de implementación son notablemente más económicos los costos del presente proyecto que ascienden a un total de \$238, que el mencionado anteriormente que suma un total de \$1246, recalcando que ambas son cifras que no consideran el costo debido a la mano de obra, ni a la implementación del sistema de riego sin la red de sensores.

También es importante considerar que este proyecto es tecnológicamente factible debido a que cada elemento que forma parte de la red de sensores se encuentra

disponible en el mercado ecuatoriano y los precios son considerablemente accesibles, además que en ambos predios en los que se pretende implementar el presente proyecto cuentan con una infraestructura apropiada para lograr con éxito el funcionamiento del mismo. Como se mencionó previamente los costos finales para la elaboración del proyecto se han reducido notablemente debido al apoyo recibido por parte de la comunidad politécnica, quienes han brindado acceso al uso de equipos para la transmisión y lectura de datos RSSI, los cuales sirvieron para el modelado de propagación. Sin embargo, los costos de los componentes definidos en la Tabla 3.20 representan los gastos para elaboración de solo dos nodos sensores y un nodo actuador, lo que implica que se debe multiplicar este valor por 3 para poder cubrir el área total donde se pretende trabajar dentro de la granja.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

En base al despliegue de una WSN colocada en una hectárea de cacao, se pudo recolectar muestras de RSSI para cada rayo y para cada altura, estos resultados permitieron establecer los modelos de propagación experimental de la zona estudiada. Se consideraron factores como la vegetación silvestre existente y las irregularidades del terreno, los cuales afectaban las mediciones de RSSI. Estos factores repercuten en los gradientes del modelo, por lo que se considera que cada rayo y cada altura tienen su propio modelado de propagación.

La regresión lineal ha permitido la obtención de los gradientes, ya sea para cada rayo y/o para cada altura. Los resultados indican que cada gradiente es único en base a las condiciones que se estén empleando. Para alturas menores e iguales 1m, se obtienen gradientes mayores al valor referente al gradiente de línea de vista ( $\alpha_1 > 2$ ) tanto para la zona sin cultivo y para la zona con cultivo de cacao. Sin embargo, para alturas de 2m, se dan casos en donde el gradiente perteneciente a la zona con cacao es menor al valor referente ( $\alpha_2 < 2$ ); esto está relacionado a factores del perfil de nivelación, en donde al colocar los nodos a una altura en la cual se superen la mayor parte de las obstrucciones, se tenga una mejor respuesta al RSSI. Esto implica que la mayoría de los nodos posean el mismo RSSI desde el inicio hasta el final del cultivo para un determinado rayo, provocando que en la regresión lineal de RSSI vs Distancia se obtengan gradientes (o también denominados pendientes en valor absoluto) con valores entre 0 y 2. Por tanto, para gradientes menores al referencial, solo se toma en consideración al gradiente proveniente de la zona sin cultivo, ocasionando que todo el modelo de propagación solo considere al primer gradiente.

En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que, la variación del gradiente que existe entre el canal de subida y el canal de bajada se debe a que la recepción de la señal se da mejor en la antena del Gateway, ya que está equipada con materiales de

mejores características y con una ganancia mayor que las antenas de los nodos terminales en cada rayo. Esto permite que el Gateway logre una mayor apertura al momento de la recepción de la señal y por tanto registrar menor variabilidad en las mediciones de RSSI del canal de subida o RSSI\_UP, hecho que se pudo observar en la Tabla 3.6 donde las desviaciones estándar en el canal de subida presenta una mayor desviación en comparación al canal de bajada por cada uno de los 3 rayos e incluyendo el rayo sin cultivo de cacao, recordando que una desviación estándar baja indica que la mayor parte de los datos de una muestra tienden a estar agrupados cerca de su media, es decir que hay menos variabilidad.

Para la implementación del proyecto se procedió a comparar los dos tipos de sensores de humedad para el suelo: el capacitivo y el conductivo. En base a las lecturas provenientes de estos dos sensores, se puede evidenciar que el sensor capacitivo presenta una mejor respuesta ante los estados de humedad del suelo, hecho que no pasa con el sensor conductivo, el cual no es estable al momento de recolectar la humedad. Esto se puede comprobar en base a la comparación de ambas gráficas que muestran la cantidad de humedad durante un mismo periodo de tiempo y colocadas en la misma planta. Se evidencia que la gráfica proveniente del sensor capacitivo presenta curvas en donde se han producido ciertos eventos como lo sería el flujo de agua en el suelo. Sin embargo, para la gráfica del sensor conductivo se muestra una curva en la cual no se evidencia cambios significativos, manteniéndose constante a lo largo del tiempo, concluyendo así que para investigaciones de humedades de suelo se puede optar por los sensores del tipo capacitivo.

Al realizar el análisis de costos y hacer la comparativa con sistemas de riego automatizados ya existentes en la industria agrícola latinoamericana, se pudo concluir que el presente proyecto supone una alternativa confiable y que abarata costos de implementación, dado a que se recurre al uso de la tecnología LoRa, la cual, a pesar de tener un bajo consumo energético, tiene una excelente área de cobertura. Además, el uso de herramientas como paneles solares en los nodos sensores para la alimentación eléctrica de los mismos, ayudan a la movilidad de cada uno para posibles cambios en las zonas de lectura de humedad. El abaratamiento de costos es un factor importante ya que uno de los puntos clave del proyecto es lograr el correcto funcionamiento del mismo

haciendo uso de infraestructura ya existente dentro del área de implementación, (sistema de riego granja Espol). Se debe recalcar que en los predios del cliente también se cuenta con el mismo tipo de infraestructura.

## **4.2 Recomendaciones**

Los resultados de RSSI obtenidos incluyendo a los modelos de propagación fueron obtenidos en base a un ambiente y estación climática en específico, por lo que se sugiere repetir el mismo procedimiento, pero tomando en consideración otras variables climáticas, como por ejemplo las estaciones de invierno. Además, de incrementar el número de rayos de mediciones RSSI para la obtención de un modelo de propagación lo más exacto posible. Para esto se debe tener en cuenta todas las irregularidades del terreno, por lo que se podría considerar otras alturas diferentes a las planteadas en el proyecto.

Los resultados correspondientes a la humedad del suelo demostraron que los sensores del tipo capacitivo ofrecen una mejor respuesta en comparación a los sensores del tipo conductivo, por lo que para futuras mediciones se propone el uso de varios sensores del tipo capacitivo los cuales pueden ser colocados a diferentes profundidades.

A pesar de que el sistema funciona en base a las lecturas de humedad proveniente de un solo sensor, se recomienda implementar un algoritmo que permita recolectar toda la información de humedad de todos los nodos, con la finalidad de generar un promedio general de humedad que condicione este parámetro, para así activar el sistema de riego oportunamente de acuerdo a la necesidad hídrica de las plantas de cacao que se estén censando.

Ya que actualmente el sistema de riego no se encuentra sectorizado para el área de riego que corresponde a cada electroválvula, se recomienda asignar mediante la gestión del Gateway una electroválvula para que trabaje solo con ciertos nodos asignados, así las lecturas que se toman en cada tramo del cultivo no van a afectar a la totalidad del mismo, sino solo al de la zona en donde se están tomando las lecturas.

Actualmente la infraestructura de la antena del Gateway LoRaWAN se encuentra en lo alto de un árbol, por lo que se recomienda que se mejore la infraestructura de tal modelo que se alcance una altura más alta para la antena, de modo que puede abarcar más rango de cobertura para futuras mediciones. Además, si se va a adquirir dispositivos que operen con la red LoRaWAN, se sugiere revisar e investigar qué tipo de modelos son recomendados para la red implementada, con la finalidad de evitar problemas de compatibilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Bluch, «SISTEMAS DE RIEGO ¿CÓMO FUNCIONAN? ¿CUÁLES EXISTEN?,» AQUA SISTEMAS, 01 03 2017. [En línea]. Available: <https://aquasistemas.com.gt/bombas-de-agua/sistemas-de-riego-como-funcionan-cuales-existen>. [Último acceso: 12 06 2022].
- [2] INTAGRI, «Sistema de Riego por Goteo,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/sistema-de-riego-por-goteo>. [Último acceso: 12 06 2022].
- [3] F. Salcedo, Distribución de agua en un sistema de microaspersión sobre un ultisol cultivado con Lima Tahití en el estado de Monagas, Caracas: UDO Agrícola, 2005.
- [4] Feredación de Enseñanza de CC.OO de Andalucía, «La conectividad Inalámbrica: un enfoque para el alumno,» ISSN:1989-4023, Andalucía, 2010.
- [5] Manuel Fernandez Barcell, «WSN,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>. [Último acceso: 12 07 2022].
- [6] J. C. Pimienta Gomez, J. P. Méndez Perdomo, S. Dávila Saravia y G. Gómez Corredor , «IEE 802.15.4, Redes de Sensores Inalámbricas - WSN y Smart campus,» Bogotá, 2021.
- [7] CAT SENSORS, «TECNOLOGÍA LORA Y LORAWAN,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan>. [Último acceso: 12 07 2022].
- [8] S. D. J. Dignani, «Interconectando sistemas de domótica,» WICC, 2008.
- [9] CISCO, «¿Qué es Wi-Fi?,» CISCO, 2021. [En línea]. Available: [https://www.cisco.com/c/es\\_mx/products/wireless/what-is-wifi.html](https://www.cisco.com/c/es_mx/products/wireless/what-is-wifi.html). [Último acceso: 2022].
- [10] S. Vidal Beltrán, E. A. Degollado Rea y J. L. López Bonilla, «Modelo de propagación simplificado para LTE en la frecuencia de 2.1GHz,» Nova Scientia, CDMX, 2017.
- [11] D. A. Flores Ayala, «DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN WEB PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE RIEGO DE CULTIVOS MEDIANTE EL USO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS,» 2020. [En línea]. Available: [https://rraae.cedia.edu.ec/Record/UPEC\\_262846ef6c0217c3d07b7a9426e434e9](https://rraae.cedia.edu.ec/Record/UPEC_262846ef6c0217c3d07b7a9426e434e9). [Último acceso: 2022 05 29].
- [12] «“IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE RIEGO MEDIANTE RED INALÁMBRICA DE SENSORES DE HUMEDAD”,» Quevedo, 2014.

- [13] S. J. Pineda Fajardo y C. F. Jaimes Gonzales, «DESARROLLO, IMPLEMENTACIÓN Y SOCIALIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES ENFOCADO AL SECTOR AGRÍCOLA COLOMBIANO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS Y CONTROL DE RIESGOS AGROAMBIENTALES Y AGROCLIMÁTICOS,» 10 05 2016. [En línea]. Available: [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/1304/2016\\_Tesis\\_Pineda\\_Fajardo\\_Silvia\\_Juliana.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/1304/2016_Tesis_Pineda_Fajardo_Silvia_Juliana.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 30 05 2022].
- [14] M. Castro Popoca, F. M. Águila Marín , A. Q. Nolasco, S. Kleisinger, L. Tijerina Chavez y E. Mejía Sáenz , «SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO EN TIEMPO REAL CON BALANCE HÍDRICO, MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO Y LISÍMETRO\*,» CDMX, 2008.
- [15] HELTEC, «CubeCell – Dev-Board,» HELTEC, 2019. [En línea]. Available: <https://heltec.org/project/htcc-ab01/>. [Último acceso: 08 07 2022].
- [16] FERRETRONICA, «Modulo Sensor Humedad del suelo Resistente a Corrosion,» 2022. [En línea]. Available: <https://ferretronica.com/products/modulo-sensor-humedad-del-suelo-resistente-a-corrosion>. [Último acceso: 08 07 2022].
- [17] L. Llamas , «SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO CAPACITIVO Y ARDUINO,» 28 04 2021. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/sensor-de-humedad-del-suelo-capacitivo-y-arduino/#:~:text=Un%20higrómetro%20capacitivo%20es%20un,peores%20características%20que%20los%20capacitivos..> [Último acceso: 10 07 2022].
- [18] NAYLAMP MECATRONICS, «MÓDULO CARGADOR DE BATERÍA LITIO TP4056 MICRO-USB,» 2020. [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/baterias/194-cargador-de-bateria-litio-tp4056-micro-usb.html>. [Último acceso: 09 07 2022].
- [19] DEXCEN ENERGY, «QUE SON LAS CELDAS SOLARES?,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.dexen.mx/celdas-solares/>. [Último acceso: 09 07 2022].
- [20] NOVATronic, «Batería Recargable Ultrafire 18650 3.7V 6800mAh Li-Ion,» 2022. [En línea]. Available: <https://novatronic.com/index.php/product/bateria-recargable-ultrafire-18650-3-7v-6800mah-li-ion/>. [Último acceso: 09 07 2022].
- [21] SanDoRobotics, «Módulo de 1 Canal Relay – 5V,» 2022. [En línea]. Available: <https://sandorobotics.com/producto/hr0002/>. [Último acceso: 09 07 2022].
- [22] UNIT ELECTRONICS, «Diodo Rectificador 1N4007,» 2022. [En línea]. Available: <https://uelectronics.com/producto/diodo-rectificador-1n4007-4007/>. [Último acceso: 09 07 2022].

- [23] DISTRITEC, «¿Qué es una electroválvula y para qué sirve?,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.distritec.com.ar/que-es-una-electrovalvula-y-para-que-sirve/>. [Último acceso: 10 07 2022].
- [24] LoRaWAN Alliance, «Frequency Plans by Country,» LoRaWAN, Estados Unidos, 2021.
- [25] G. Portillo, «¿Qué tipos de sistemas de riego por goteo existen?,» Jardineria On, 2019. [En línea]. Available: <https://www.jardineriaon.com/tipos-de-sistemas-de-riego-por-goteo.html>. [Último acceso: 2022].
- [26] IRRICROP, «Encuentre la solución de riego por micro-aspersión que funcione para usted,» IRRICROP, 2018. [En línea]. Available: <https://irricrop.com/microaspersion/>. [Último acceso: 2022].
- [27] DAO, «Estándares de redes inalámbricas,» 2015. [En línea]. Available: <https://aprendizajedao.jimdofree.com/redes-inalambricas/estandares/>. [Último acceso: 2022].
- [28] Redes Inalambricas, «WLAN Wireless LAN,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.redesinalambricas.es/wirelesslan/>. [Último acceso: 2022].
- [29] SINC, «Nuevo sistema inalámbrico para la agricultura inteligente,» 02 02 2018. [En línea]. Available: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Nuevo-sistema-inalambrico-para-la-agricultura-inteligente>. [Último acceso: 12 06 2022].
- [30] ARDUINO, «Redes LPWAN/LoRa,» 2018. [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/gateway/>. [Último acceso: 2022].
- [31] G. T. Palma Alcivar y Y. D. Palma Mora , «SISTEMATIZACIÓN DEL RIEGO POR ASPERSIÓN PARA EL CULTIVO DE CACAO (Theobroma cacao L) EN EL ÁREA DE AGRÍCOLA DE LA ESPAM MFL,» Calceta-Ecuador, 2013.
- [32] J. D. Borrero , G. Fernandez y C. Rodriguez, «Aplicación de la tecnología LoRaWAN en la agricultura,» DOI: 10.13140/RG.2.2.24492.77443, Huelva-España, 2018.
- [33] C. Serrano, «CONSEJOS CUANDO CONECTE VARIOS DISPOSITIVOS A UNA MISMA RED WIFI,» 18 04 2020. [En línea]. Available: <https://www.antena2.com/mas-alla-del-deporte/consejos-cuando-conecte-varios-dispositivos-a-una-misma-red-wifi>. [Último acceso: 15 06 2022].
- [34] F. Campos, «Gateway LoRaWAN: el elemento clave de la red,» LOGITEK, 10 07 2020. [En línea]. Available: <https://www.m2mlogitek.com/gateway-lorawan-el-elemento-clave-de-la->



# APÉNDICES



**Apéndice 1 – Cultivo de cacao**



**Apéndice 2 – Instalación de la red LoRaWAN**



**Apéndice 3 – Sensor para la medición de RSSI**



**Apéndice 4 – Cultivo de cacao**



**Apéndice 5 – Nodos de humedad**