

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Tecnología LoRa aplicada en un entorno cacaotero

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Telecomunicaciones**

Presentado por:

Enrique Antonio Lucas Aguilar

Josué Enrique Lucas Aguilar

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## Dedicatoria

---

El presente proyecto lo dedicamos a Dios, a nuestros padres Enrique Lucas y Angela Aguilar, a nuestros tíos Ana Sierra y Luis Vargas, a nuestros hermanos Ricardo Lucas y Johana Lucas, a nuestros cuñados Alexandra Moreira y Manuel Briones, a nuestros sobrinos Ricardo Lucas (Jr.) y Michelle Briones. Este trabajo va dirigido a ellos por todo el apoyo y cariño brindado para que podamos culminar esta etapa profesional.

## Agradecimientos

---

Nuestro más sincero agradecimiento a Dios, a nuestros padres y hermanos, a la Mg. Verónica Ojeda, tutora del proyecto, al Ing. Ronald Reyes, cliente del proyecto, a la PhD. María Antonieta Álvarez, profesora de la materia integradora y a cada una de las personas que de una u otra forma colaboraron para la culminación del proyecto.

## Declaración Expresa

---

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Enrique Antonio Lucas Aguilar y Josué Enrique Lucas Aguilar 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”

Enrique Lucas Aguilar

Enrique Antonio

Lucas Aguilar

Josué Lucas Aguilar

Josué Enrique

Lucas Aguilar

## **Evaluadores**

---

**PhD. María Álvarez Villanueva**

Profesor de Materia

---

**Mg. Verónica Ojeda Carrera**

Tutor de proyecto

## Resumen

En el Ecuador se evidencian trabajos relacionados con la tecnología LoRa, especialmente en áreas urbanas para la transmisión de información de un punto a otro. En el presente proyecto se implementa la tecnología LoRa en un entorno diferente, específicamente en un entorno agrícola con plantaciones de cacao, con la finalidad de estimar la incidencia del Spreading Factor (SF) en enlaces ascendentes dentro de las comunicaciones por radioenlace y de esta forma encontrar el alcance máximo entre los dispositivos que emplean esta tecnología, mejorando la cobertura y la transmisión de datos. La implementación se basó en el uso de un Gateway (Raspberry Pi 4 + RAK2287), un módulo TTGO LoRa32 (dispositivo final), computadoras portátiles para la configuración del módulo e internet para la verificación de datos a través del servidor TTN. Con estos dispositivos se realizaron mediciones de campo a diferentes distancias y con distintos valores de SF. Como resultado se obtuvieron datos del RSSI, SNR, atenuación y tiempo de aire consumido. Finalmente, se evidencia que al emplear el valor más alto de SF se obtiene un alcance de 1.1 [Km] con una menor velocidad de datos en comparación a la velocidad alcanzada al emplear SF más bajos.

**Palabras Clave:** Alcance, factor de propagación, puerta de enlace, radioenlace, servidor de red.

### ***Abstract***

*In Ecuador, works related to LoRa technology are evident, especially in urban areas, for transmitting information from one point to another. In the present project, LoRa technology is implemented in a different environment, specifically in an agricultural setting with cocoa plantations, aiming to estimate the impact of Spreading Factor (SF) on uplink links within radio communication and thus find the maximum range between devices using this technology, enhancing coverage and data transmission. The implementation was based on using a Gateway (Raspberry Pi 4 + RAK2287), a TTGO LoRa32 module (end device), laptops for module configuration, and the internet access for data verification through the TTN server. With these devices, field measurements were taken at different distances and with various SF values. As a result, data on RSSI, SNR, attenuation, and consumed airtime were obtained. Finally, it is evident that employing the highest SF value yields a range of 1.1 [Km] with slower data rates compared to the speeds achieved when using lower SF values.*

***Keywords:*** Range, spreading factor, gateway, radio link, network server.

## Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i> .....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VIII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XI
Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	2
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	5
1.4 Marco teórico.....	5
1.4.1 Tecnología LoRa y arquitectura LoRaWAN.....	6
1.4.2 Canales y tipos de dispositivos LoRaWAN.....	7
1.4.3 Características principales de los SF.....	8
1.4.4 Asignación de SF empleando tres tipos de algoritmo.....	9
Capítulo 2.....	10
2. Diseño de la red LoRaWAN para el monitoreo y control de paquetes en cultivos de cacao	11
2.1 Descripción del terreno – ambiente.....	11
2.1.1 Efectos del follaje.....	11



2.1.2	Modelo de propagación.....	12
2.2	Diseño de la red LoRaWAN .....	12
2.2.1	Arquitectura .....	13
2.2.2	Comparación de topologías.....	14
2.2.3	Topología implementada .....	15
2.2.4	Equipos de red.....	16
2.3	Registro y configuración de equipos .....	19
2.3.1	Registro y configuración de la puerta de enlace .....	19
2.3.2	Registro y configuración de la tarjeta TTGO LoRa32.....	22
Capítulo 3	.....	29
3.	Pruebas y Resultados .....	30
3.1	Escenario .....	30
3.2	Implementación de la puerta de enlace y del nodo .....	31
3.3	Paquetes y datos visualizados en el servidor de red.....	34
3.4	Cálculos de sensibilidad y atenuación con datos adquiridos en las pruebas de campo .	36
3.5	Análisis de las gráficas bajo diferentes factores de propagación .....	41
3.5.1	RSSI vs Distancia .....	41
3.5.2	RSSI vs SNR.....	44
3.5.3	Atenuación vs Distancia .....	47
3.5.4	SF vs Tiempo de aire consumido.....	48
Capítulo 4	.....	50
4.	Conclusiones y recomendaciones .....	51
4.1	Conclusiones .....	51
4.2	Recomendaciones.....	53
Referencias	.....	54

Apéndice A. Crear cuenta en TTN y en balenaCloud .....	58
Apéndice B. Dispositivos, montaje y medición.....	68

## Abreviaturas

ABP	Activation by Personalisation
ACK	Acknowledgement
ADR	Adaptative Data Rate
AES	Advanced Encryption Standard
API	Application Programming Interfaces
BW	Bandwidth
CSS	Chirp Spread Spectrum
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GPS	Global Positioning System
GND	Ground
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IDE	Integrated Development Environment
I2C	Inter Integrated Circuits
ISM	Industrial Scientific and Medical
ITU-R	International Telecommunication Union – Radiocommunication
LMIC	Long Range Wide Area Network Media Access Control in C
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
MAC	Media Access Control
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NF	Noise Figure

NLOS	Non Line of Sight
OLED	Organic Light Emitting Diode
OTAA	Over The Air Activation
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SF	Spreading Factor
SNR	Signal To Noise Ratio
SSID	Service Set Identifier
TOA	Time on Air
TTN	The Things Network
TTS	The Things Stack
USA	United States of America
USB	Universal Serial Bus
VCC	Voltage of Continuous Current

## Simbología

dB	Decibelio
dBi	Ganancia de antena en dB por encima de un radiador isotrópico
dBm	Nivel de potencia referido a un milivatio
GHz	Gigahertz
Kbps	Kilobits por segundo
KHz	Kilohertz
Km	Kilómetro
m	Metro
MHz	Megahertz
s	Segundo
V	Voltio

## Índice de figuras

Figura 2.1 Arquitectura LoRaWAN .....	13
Figura 2.2 Topología en estrella.....	15
Figura 2.3 Puerta de enlace (Raspberry Pi 4 + RAK2287).....	17
Figura 2.4 Tarjeta TTGO LoRa32 .....	17
Figura 2.5 Servidor "The Things Network" .....	18
Figura 2.6 Registro del Gateway .....	19
Figura 2.7 Información del Gateway .....	20
Figura 2.8 Generar clave API .....	21
Figura 2.9 Variables en balenaCloud.....	22
Figura 2.10 Instalación de la librería (MCCI LoRaWAN LMIC Library) .....	23
Figura 2.11 Configuración de los parámetros del TTN al archivo ttn-otaa del arduino.....	24
Figura 2.12 Asignación de pines y modificación del factor de propagación en arduino.....	25
Figura 2.13 Archivo para el envío del dato (Humedad del suelo) al servidor TTN .....	26
Figura 2.14 Parámetros mostrados en el TTGO LoRa32 .....	26
Figura 2.15 Conexión del TTGO LoRa32 y del sensor de humedad del suelo .....	27
Figura 2.16 Prueba del sensor de humedad del suelo junto al TTGO LoRa32 .....	28
Figura 3.1 Finca Bean & Co.....	30
Figura 3.2 Proceso de montaje del dispositivo intermedio.....	31
Figura 3.3 Proceso de montaje del dispositivo final .....	32
Figura 3.4 Implementación de la puerta de enlace .....	33
Figura 3.5 Ubicación del nodo TTGO .....	34
Figura 3.6 Estado del Gateway visualizado a través del servidor TTN.....	35
Figura 3.7 Paquetes recibidos en TTN.....	35
Figura 3.8 RSSI vs Distancia con SF7 y SF8 .....	42
Figura 3.9 RSSI vs Distancia con SF9 y SF10 .....	43
Figura 3.10 RSSI vs Distancia considerando los valores del SF7 al SF10.....	44
Figura 3.11 RSSI vs SNR a 225 metros.....	45
Figura 3.12 RSSI vs SNR a 450 metros.....	46
Figura 3.13 RSSI vs SNR a 675 metros.....	47
Figura 3.14 Atenuación vs Distancia .....	48

Figura 3.15 SF vs Tiempo de aire consumido ..... 49

## Índice de tablas

Tabla 1.1. Consumo de energía y latencia de los dispositivos finales .....	8
Tabla 2.1. Diferencias entre topología en estrella y en malla.....	14
Tabla 3.1. Puntos considerados para las mediciones.....	33
Tabla 3.2. Resultados de las mediciones obtenidas del SF en la finca cacaotera a 225 [m].....	37
Tabla 3.3. Resultados de las mediciones obtenidas del SF en la finca cacaotera a 450 [m].....	38
Tabla 3.4. Resultados de las mediciones obtenidas del SF en la finca cacaotera a 675 [m].....	39
Tabla 3.5. Resultados de las mediciones obtenidas del SF en la finca cacaotera a 1.1 [Km].....	40



# Capítulo 1

## **1. Introducción**

El Spreading Factor (SF) o factor de propagación es considerado como uno de los principales parámetros que influye en la transmisión de los datos de un punto a otro, debido a que el valor que se asigna a los dispositivos que emplean o hacen uso de la tecnología LoRa, incide tanto en la cobertura como en la eficiencia de la comunicación. Un estudio realizado por, Moya (2018), indica que el valor del factor de propagación se relaciona con la cobertura, el rendimiento de la red y la transmisión de los datos. Este estudio evalúa el impacto en la latencia, en el consumo de energía y en la capacidad de la red.

Tanto en Ecuador como en otros países se han evidenciado varios trabajos relacionados con la tecnología LoRa. El procedimiento en el que se enfoca cada una de estas investigaciones se caracteriza por ser variada. Ciertos autores proponen algoritmos para transferir datos adecuadamente de un punto a otro y realizar un monitoreo; por ejemplo, monitoreo para el sector industrial, considerando esta tecnología y estableciendo parámetros tales como: la tasa de datos, la distancia, el escenario, entre otros factores.

La importancia de abarcar este tema radica en las consecuencias que podrían tener ciertos sectores, como el sector agrícola, que maneja información o datos de la siembra relacionada a la humedad, al goteo, a la temperatura y demás datos vinculados a la agricultura que son transmitidos de forma inalámbrica. Al emplear la tecnología LoRa y al no seleccionar un adecuado factor de propagación podría presentar un impacto significativo en el alcance y en la transmisión de los datos en este entorno agrícola. Este capítulo presenta la descripción del problema, la justificación, los objetivos y el marco teórico del presente proyecto.

## **1.1 Descripción del problema**

Los sistemas de comunicación inalámbrica permiten capturar o enviar datos por medio de sensores, sin embargo, en ocasiones el envío de los datos no se genera de manera adecuada, por consiguiente, se pierden paquetes o la información transmitida llega de forma incompleta. La pérdida de datos que contiene información referente a la siembra, como por ejemplo, información de riego, goteo, humedad, niveles de crecimiento y demás procesos en la agricultura, ha generado pérdidas económicas para quienes se dedican a la siembra y cosecha del cacao.

La empresa ECUAPLUS S.A. dispone de una red de sensores (sensores de humedad tipo I2C) que se comunican de manera inalámbrica. Esta red permite transmitir el valor de la humedad del suelo cuyos datos son mostrados de forma hexadecimal. A través de esta red, la empresa puede automatizar el riego en el cultivo del cacao. El cacao es un cultivo agrícola que tiene un follaje abundante. Además, esta red de sensores conectada por Bluetooth proporciona un rango de cobertura corto, razón por la cual, no se reciben paquetes en el enlace de comunicación desde una zona alejada. La empresa maneja un controlador y electroválvulas de precisión, donde los sensores proporcionan datos al controlador para el ajuste del funcionamiento de las electroválvulas, de manera que, al presenciar pérdida de paquetes hace que el controlador no se actualice y no permite abrir las electroválvulas de precisión.

## **1.2 Justificación del problema**

Debido a los inconvenientes que se presentan principalmente con la cobertura alcanzada por la red de sensores, durante la transmisión y recepción de los paquetes, se propone una solución inicial para este problema que afecta a la comunicación y envío de los datos. Aquella solución se basa en el uso de tecnología LoRa y la configuración del factor de propagación. La propuesta se

considera oportuna especialmente para sectores agrícolas como el cacaoero, en donde la información de los datos referente a la siembra se considera importante para la toma de decisiones.

La apropiada asignación del factor de propagación en los dispositivos LoRa pretende finalmente obtener un mayor alcance y así los datos puedan transmitirse de forma eficaz, para que la gestión de la información sea adecuada dentro de un entorno cacaoero. Evidentemente, este trabajo se ha analizado en otro tipo de área o entorno. Bajo esta perspectiva, Augustin et al. (2016), señala que el rendimiento de una red LoRa se determina principalmente a través de pruebas de campo y simulaciones que se realicen. Basándose en las pruebas de campo y análisis lograron evidenciar que LoRa puede proporcionar una cobertura de red con un aproximado de 3 Km, dependiendo del entorno. Además, se enfatiza que las pruebas de campo se llevaron a cabo en un área suburbana que tiene un gran conjunto de viviendas.

Un estudio realizado por, Pereira et al. (2023), utiliza tecnología LoRa enfocándose en sectores productivos como el camaronero, en donde se desarrolla un sistema de control y monitoreo en granjas de camarones basados en Lógica Difusa, LoRa y en el Internet de las cosas (IoT), con el objetivo de comprobar el alcance y el envío de datos para el óptimo desarrollo y crecimiento de los camarones.

En el presente proyecto se propone mejorar la comunicación de los datos mediante la configuración del SF en los dispositivos LoRa, para obtener un mayor alcance y asegurar que la comunicación sea eficiente y no se presenten inconvenientes durante la transmisión de los datos. Por consiguiente, se establecerá la topología que mejor se adecue al medio y se hará uso de tecnología LoRa, empleando una puerta de enlace (Gateway) y un dispositivo final (TTGO LoRa32). Se procede a efectuar la configuración de los equipos (basado en la programación para la mejora del SF) y de acuerdo a las configuraciones se realiza diversas mediciones de campo a

diferentes distancias, para luego analizar los resultados con base en las configuraciones y mediciones realizadas.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

- ❖ Estimar la incidencia del Spreading Factor en dispositivos con tecnología LoRa dentro de las comunicaciones por radioenlace a través de la configuración y mediciones de campo realizadas con los dispositivos para el mejoramiento del rango de cobertura y la transmisión de datos en un entorno cacaotero.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Realizar mediciones de campo con dispositivos LoRa analizando el escenario para la determinación del alcance máximo entre el Gateway y el dispositivo final considerando el entorno establecido.
- Establecer una configuración y topología para la red de sensores LoRa basado en los datos adquiridos en las mediciones para el envío eficaz de datos de agricultura de precisión.
- Analizar las configuraciones y resultados obtenidos con el propósito de que se evidencie la repercusión del SF en la cobertura y en la comunicación de los datos.

### **1.4 Marco teórico**

Actualmente, varios investigadores muestran un mayor interés en la tecnología LoRa, de manera que se encuentran analizando a profundidad temas esenciales como la escalabilidad, el rendimiento y la aplicación que pueden llegar a tener ante diversos escenarios establecidos o propuestos por cada uno de ellos. A continuación, se detallan los enfoques principales de esta tecnología.

### 1.4.1 Tecnología LoRa y arquitectura LoRaWAN

La palabra LoRa proviene de la abreviatura de dos términos en inglés definidos como Long Range, que en español hace referencia al largo alcance. Aquella tecnología de transmisión inalámbrica tiene lugar en las bandas no licenciadas conocidas como ISM (Europa: 868 MHz, USA: 915 MHz) y se caracteriza por tener un bajo consumo de energía. LoRa emplea un esquema de modulación denominado como modulación de espectro ensanchado de chirrido o Chirp Spread Spectrum (CSS) (Rohde & Schwarz, 2019).

Diversos estudios realizados por Semtech (2020), mencionan que la tecnología LoRa provee comunicaciones con un alcance de varios kilómetros, por ejemplo, puede proporcionar un alcance de hasta 5 Km en áreas urbanas mientras que en las áreas rurales puede llegar una cobertura de hasta 15 Km, considerando línea de vista. Otra característica principal de LoRa es la de una relación entre la velocidad de datos (que varía entre 0.3 Kbps a 50 Kbps) y la sensibilidad, al operar en un ancho de banda de canal fijo tanto para canales de enlace ascendente como para canales de enlace descendente.

A diferencia de la capa física de LoRa, LoRaWAN hace alusión a un protocolo de capa MAC. Se conoce que la arquitectura LoRaWAN se fundamenta en una topología en estrella, lo que permite que tenga un costo mínimo y sencillo de administrar. La arquitectura LoRaWAN está formada por los siguientes componentes: Dispositivos finales, gateway y servidor de red (Cuomo et al., 2017).

En general, el proceso de cómo actúan los componentes dentro de la arquitectura LoRaWAN es el siguiente: Los nodos se comunican con la puerta de enlace, luego el gateway se encarga de reenviar los paquetes recibidos de los nodos al servidor de red. Además, antes de reenviar los paquetes al servidor de red, este agrega información referente a la intensidad de la señal recibida (RSSI) y de la relación señal - ruido (SNR). Finalmente, el servidor de red verifica

si existen paquetes duplicados, en caso de existir lo descarta, y termina enviando paquetes de nuevo al extremo donde se encuentran los dispositivos finales (Cuomo et al., 2017).

#### **1.4.2 Canales y tipos de dispositivos LoRaWAN**

Es importante resaltar que dos paquetes pueden ser recibidos de forma correcta y sin existir una interferencia entre los paquetes, cuando estos son enviados por el mismo canal y considerando un mismo tiempo, pero empleando distintos SF. Para comprender de mejor forma lo expuesto en esta sección (1.4.2), se puede señalar que un nodo puede transmitir a cualquier velocidad y por el canal que desee siempre y cuando se cumplan requisitos como: efectuar un cambio de canal en cada transmisión de modo que aquello se lo realice de manera pseudoaleatoria. Otro requisito es que el nodo debe encontrarse por debajo del tiempo y del ciclo máximo de transmisión. Por otro lado, se informa que los módulos LoRaWAN establecen 72 canales para 900 MHz y también 16 canales para 433 MHz – 868 MHz (Moya, 2018).

LoRaWAN utiliza distintas clases de dispositivos o nodos finales, que se clasifican en: dispositivos finales de tipo A, tipo B y de tipo C como se detalla en la tabla 1.1. Los nodos finales de clase A se caracterizan por ser bidireccionales y se encargan de abrir 2 ventanas de recepción, luego de que se ha transmitido un paquete, para admitir un ACK (acuse de recibo) y después poder estar en estado inactivo hasta la próxima transmisión. Los nodos finales de tipo B también son bidireccionales y se caracterizan por abrir ventanas de recepción, pero se ejecutan en horas programadas. Los dispositivos finales de tipo C, al igual que los de tipo A y B, son bidireccionales y se caracterizan por tener ventanas de recepción escuchando de forma continua (Moya, 2018).

**Tabla 1.1***Consumo de energía y latencia de los dispositivos finales*

Dispositivos Finales	Consumo de Energía	Tiempo de Latencia
Tipo A	Menor que B y C	Mayor
Tipo B	Mayor que A	Menor
Tipo C	Mayor que A y B	Menor

*Nota.* Datos tomados del artículo de Michael Moya (2018).

### **1.4.3 Características principales de los SF**

Los SF corresponden al número de bits que se emplea para codificar un símbolo, en otras palabras, representa la cantidad de símbolos enviados por cada bit de información. Por su parte la tecnología LoRa emplea un máximo de 6 factores de propagación, los cuales adoptan valores que van desde el 7 hasta el 12. Además, dentro de las características de los factores de propagación se detalla que con SF más bajo se evidencia una tasa o velocidad de datos más alta, sin embargo, su rango de comunicación o su alcance es más bajo en comparación a cuando se asignan SF mayores, en donde presenta un mayor alcance, pero su velocidad de datos se reduce (Waret et al., 2019).

Por otra parte, la elección de un determinado valor de factor de propagación depende del RSSI promedio con los que arriban los mensajes a las correspondientes puertas de enlace, por lo tanto, el valor del indicador de intensidad de señal recibida se basa en la distancia que existe entre el dispositivo y la puerta de enlace. Cabe señalar que cuando estos dispositivos finales utilizan factores de propagación idénticos y operan en el mismo canal se encuentran sujetos a presentar interferencias, de modo que empiezan las colisiones entre las señales provocando lo que se conoce como ortogonalidad imperfecta (Waret et al., 2019).



#### 1.4.4 Asignación de SF empleando tres tipos de algoritmo

Existe un algoritmo autoorganizado desarrollado por, Perakovic y Knapcikova (2021), en donde se ajusta adecuadamente el factor de propagación considerando la comunicación entre 2 nodos LoRa. En el informe se detalla que la comunicación entre los nodos LoRa inicia con el valor más alto de SF, que en este caso es el  $SF = 12$ , para el correcto envío de los paquetes, dado que si al iniciar se emplea el menor factor de dispersión ( $SF = 7$ ), entonces afecta la transmisión del mensaje al receptor y por lo tanto falla la adaptación del SF. Además, se señala que luego de llegar los paquetes al receptor, se obtienen los valores de la relación señal – ruido.

Los autores Perakovic y Knapcikova (2021) señalan el procedimiento que ejecuta el algoritmo en ambas partes, es decir, tanto en la parte del transmisor como en la parte del receptor. En la parte del transmisor se ajusta en  $SF = 12$  como inicio del proceso de asignación, luego 10 paquetes de datos se envían de forma continua sin la espera de algún reconocimiento. Posteriormente, el transmisor espera un mensaje ACK para que de esta manera pueda realizar una sintonización del SF en función de la información del mensaje. En el lado del receptor, también se ajusta con un valor de factor de dispersión igual a 12. Después el receptor realiza la medición de la relación señal-ruido promedio de los paquetes recibidos y especifica un factor de propagación con base en la medición realizada.

Otro algoritmo que se puede mencionar es el denominado algoritmo de velocidad de datos adaptativa (ADR), se basa en la gestión de la tasa de datos para cada nodo final. En general, se indica que el propósito de ADR es asegurar que los paquetes sean entregados con una óptima velocidad de datos y con una red que sea escalable. El algoritmo ADR habitualmente se lo emplea para puntos finales fijos y una tasa de datos fija (Hanes et al., 2017).

## **Capítulo 2**

## **2. Diseño de la red LoRaWAN para el monitoreo y control de paquetes en cultivos de cacao**

En este capítulo se especifica el proceso empleado para el diseño de la red LoRaWAN, los equipos de red utilizados y las configuraciones efectuadas para un adecuado funcionamiento al interior del entorno cacaotero.

### **2.1 Descripción del terreno – ambiente**

En esta sección se detalla la propagación de la señal en un ambiente de vegetación y los efectos que se generan a causa del follaje presente en plantaciones como la del cacao. Además, se describe el modelo de propagación que se aplica en este entorno.

#### **2.1.1 Efectos del follaje**

Es importante señalar que la tecnología LoRa no solo está encaminada para que se la implemente y opere en ciudades, sino que también está orientada para que se la desarrolle en otros entornos como en el campo. Sin embargo, hay que considerar cómo se propaga la señal en un terreno como por ejemplo, en una hacienda cacaotera, que por lo general se localiza en un ambiente con vegetación densa. Dicho de otro modo, se debe estimar la pérdida de la señal en presencia de follaje, dado que esta tecnología actúa de forma distinta en medio de vegetación.

Es necesario informar que el rendimiento de la tecnología LoRa en estos entornos de vegetación se encuentra asociada con el follaje y la configuración de parámetros LoRa (como el factor de propagación). La presencia de obstrucciones como el follaje existente en plantaciones de cacao genera pérdidas de propagación de la señal, dado que ésta se dispersa (en las hojas y ramas), se difracta (en los bordes de los árboles) o también se refleja (por ejemplo, reflejos de objetos o del suelo). Por tal motivo, para comprender la atenuación de la señal y el rendimiento de LoRa en presencia de follaje se deben emplear modelos de propagación (Anzum, 2021).

### 2.1.2 Modelo de propagación

Existe un modelo denominado como modelo de espacio libre, el cual permite estimar el nivel de potencia recibido en función de la distancia entre el transmisor y el receptor. No obstante, este modelo no se puede emplear para estimar la atenuación del canal cuando se tiene follaje, en vista de las distintas obstrucciones como: hojas, ramas y tronco de árboles, que causan un desvanecimiento de la señal. Para poder estimar la atenuación ocasionada por la vegetación se aplica un modelo empírico denominado ITU-R. Este modelo determina la atenuación en relación a dos parámetros: la profundidad de la vegetación y la frecuencia de la señal. Cabe señalar que es un modelo viable para frecuencias entre 30 MHz a 100 GHz (Ansah et al., 2020).

$$Modelo_{ITU-R}(dB) = 0.2(f^{0.3})(d^{0.6}) \quad (2.1)$$

Con base en la ecuación (2.1) se obtiene un resultado de atenuación dado en decibelios. En la ecuación (2.1) se observa el parámetro “d” que hace referencia a la profundidad de la vegetación expresada en metros, mientras que “f” indica la frecuencia de la señal que se propaga.

## 2.2 Diseño de la red LoRaWAN

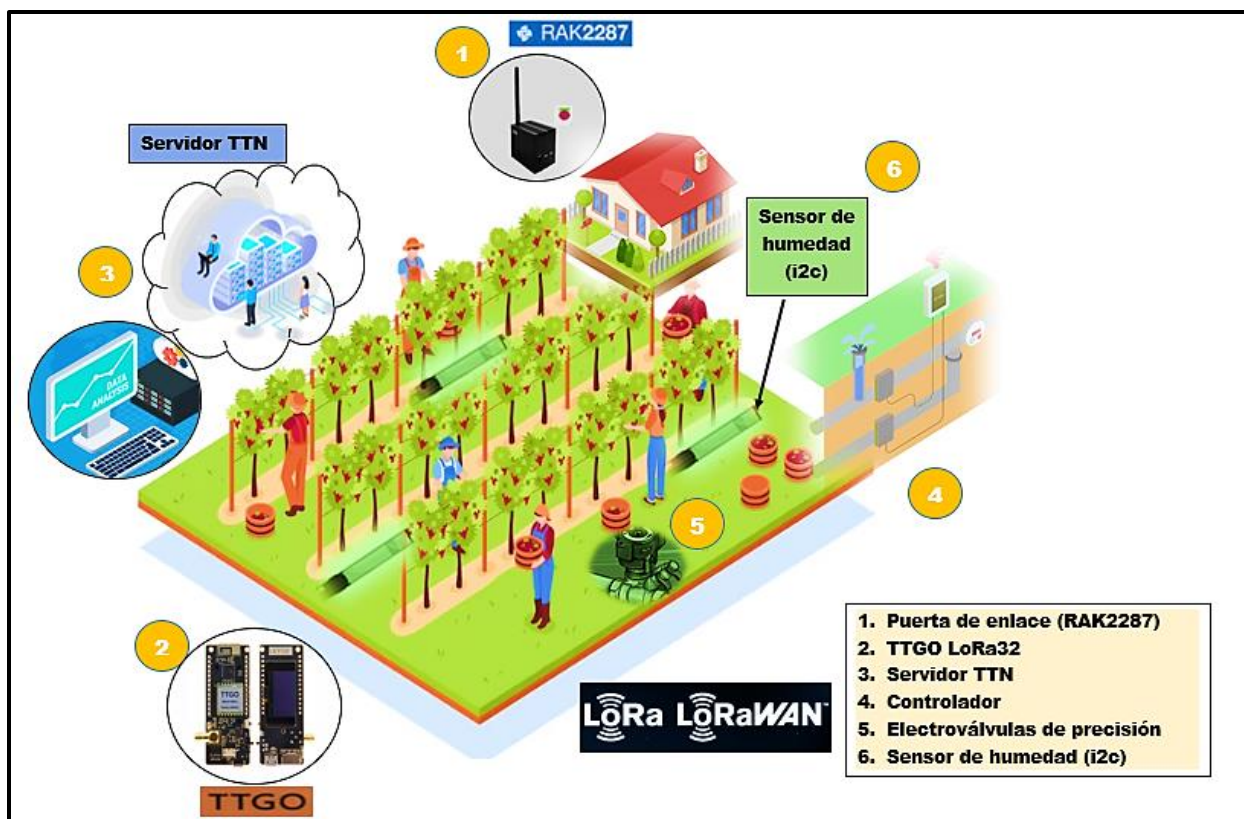
En este apartado se describe la arquitectura, la topología y los equipos/dispositivos de la red LoRaWAN. Además, se indica el servidor empleado para la implementación de la red en el entorno cacaotero.

## 2.2.1 Arquitectura

Se describe la arquitectura del sistema propuesto, en donde se presentan varios dispositivos enumerados e incorporados en el diagrama, como se evidencia en la figura 2.1.

**Figura 2.1**

*Arquitectura LoRaWAN*



*Nota.* La figura muestra la arquitectura de la red LoRaWAN, especificando los dispositivos utilizados e incorporados en una hacienda cacaotera.

Como se observa en la figura 2.1, los dispositivos son incorporados en un entorno cacaotero. Los dispositivos utilizados en este ambiente se especifican a continuación:

**Puerta de enlace.** Se caracteriza por ser un dispositivo intermedio, es decir, un equipo localizado entre el dispositivo final (TTGO LoRa32) y la nube (servidor TTN). Esta puerta de enlace tiene integrada una Raspberry Pi 4 y un módulo concentrador (RAK2287). Aquel módulo presenta detectores de paquetes LoRa (exactamente ocho detectores) de 8 canales.

**Tarjeta TTGO LoRa32.** Este dispositivo puede localizarse a un extremo del cultivo del cacao y se emplea para la transición de datos a través de LoRa, es decir, posibilita transmitir datos en ambos sentidos y a largas distancias.

**Servidor TTN.** En este servidor se procede con el registro de la puerta de enlace y del nodo. Principalmente, se puede monitorear todo el tráfico y realizar un análisis del impacto de los paquetes en el aire, bajo diferentes factores de propagación.

**Controlador y electroválvula de precisión.** La red de sensores de humedad proporciona datos al controlador para el ajuste del funcionamiento de las electroválvulas. Las electroválvulas de precisión y el controlador se encuentran automatizados en relación al porcentaje de humedad.

### 2.2.2 Comparación de topologías

A continuación, se expone un cuadro comparativo en el que se da a conocer las diferencias y ventajas de implementar una u otro tipo de topología. Como se visualiza en la tabla 2.1, las principales características de comparación se basan en los saltos, retrasos, alcance y ahorro de energía.

**Tabla 2.1**

*Diferencias entre topología en estrella y en malla*

Características	Estrella	Malla
Razones topológicas	LoRa larga distancia y con un alcance de red que se obtiene simplemente con un solo salto.	Alcance corto GFSK y con un incremento del alcance de la red al efectuar salto múltiple.
Saltos	Salto único, donde el nodo se comunica sólo con el Gateway.	Salto múltiple, donde el nodo de retransmisión debe reenviarse.
Retrasos	Pequeño retraso por lo que es controlable en tiempo real.	Extenso retraso

Ahorro de energía	Gran ahorro de energía, debido a que el nodo está inactivo después de enviar y recibir.	Ahorro de energía pobre
-------------------	---	-------------------------

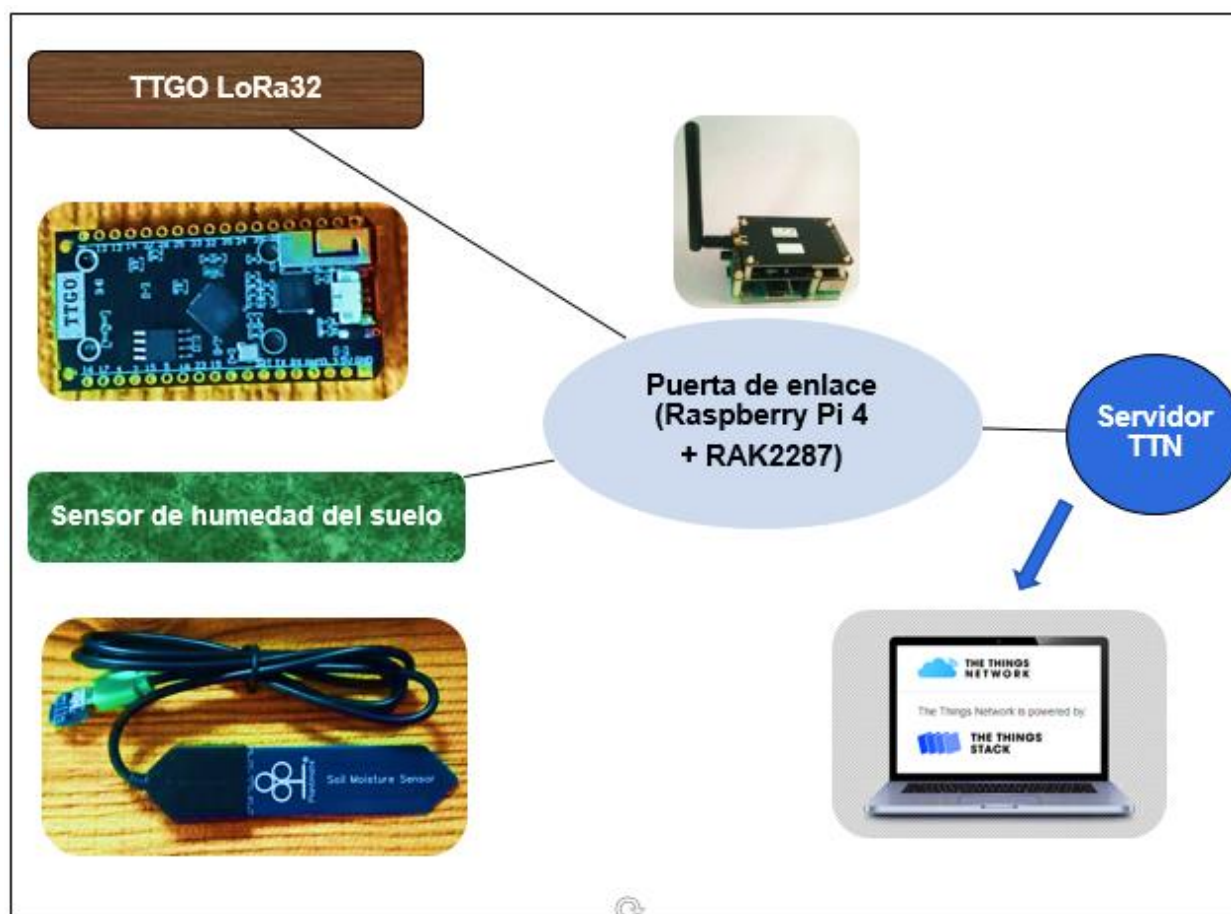
*Nota.* Se señala las diferencias entre ambas topologías. Datos tomados de RAKWireless (2023).

### 2.2.3 Topología implementada

Entre las topologías mencionadas en la tabla 2.1, se optó por implementar la topología en estrella debido a las ventajas de la misma, en comparación a la topología en malla. En la figura 2.2 se visualiza la topología en estrella que se implementa en el sistema.

**Figura 2.2**

*Topología en estrella*



*Nota.* La figura muestra una topología en estrella (dispositivos finales – puerta de enlace-servidor). La arquitectura de red LoRaWAN se fundamenta en esta topología.

Los dispositivos finales o nodos son: la tarjeta TTGO LoRa32 y el sensor de humedad, los cuales recopilan toda la información para poder enviarla a la puerta de enlace. La puerta de enlace (Raspberry Pi 4 + RAK2287) los remite hacia un servidor, en este caso, un servidor desarrollado por TTN (The Things Network). Es importante mencionar que la distancia máxima alcanzada entre el dispositivo final y la puerta de enlace depende de parámetros como el factor de propagación y la altura de los dispositivos LoRa.

#### **2.2.4 Equipos de red**

En esta subsección se indican los equipos y/o dispositivos que se emplean en el proyecto. Se describen dos dispositivos (Gateway y nodo) y un servidor LoRaWAN.

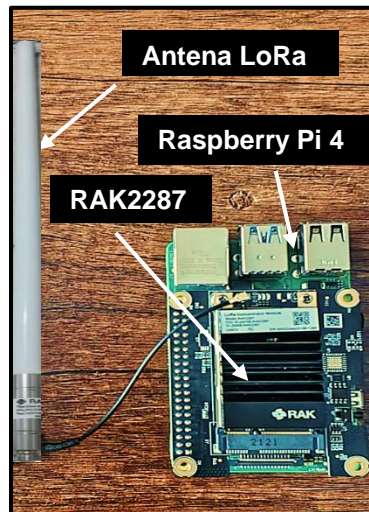
##### **Puerta de enlace (Raspberry Pi 4 + RAK2287)**

La puerta de enlace se caracteriza por ser un dispositivo intermedio capaz de reenviar paquetes recibidos de los dispositivos finales al servidor de red. La puerta de enlace que se muestra en la figura 2.3 está desarrollada para redes de área amplia y de baja potencia, está constituido internamente por un miniordenador Raspberry Pi 4 y un módulo concentrador RAK2287. El miniordenador proporciona un aumento en el rendimiento multimedia, en la velocidad del procesador y en la conectividad. El RAK2287 (basado en Semtech SX1302) se destaca por ser un módulo concentrador LPWAN que proporciona 8 detectores de paquetes LoRa de 8 canales, razón por la cual permite la detección de forma continua de paquetes en 8 factores de propagación distintos y 10 canales con demodulación ininterrumpida de hasta 16 paquetes (RAKwireless Technology Limited, 2023).



**Figura 2.3**

*Puerta de enlace (Raspberry Pi 4 + RAK2287)*



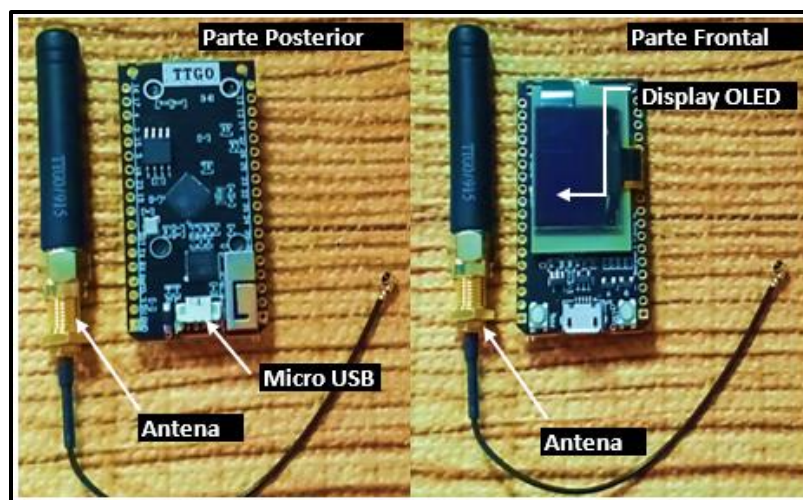
*Nota.* La figura muestra las partes que conforman la puerta de enlace, incluida la antena LoRa.

### **Tarjeta de desarrollo TTGO LoRa32 (915 MHz)**

Se puede describir al TTGO LoRa32 como una tarjeta de desarrollo que se emplea para la transición de datos a través de LoRa, es decir, posibilita transmitir datos en ambos sentidos y a largas distancias, para controlar actuadores y sensores enfocados en la agricultura inteligente e internet de las cosas.

**Figura 2.4**

*Tarjeta TTGO LoRa32*



*Nota.* La figura muestra la tarjeta TTGO LoRa32 con pantalla OLED y antena. Módulo LoRa (915 MHz).

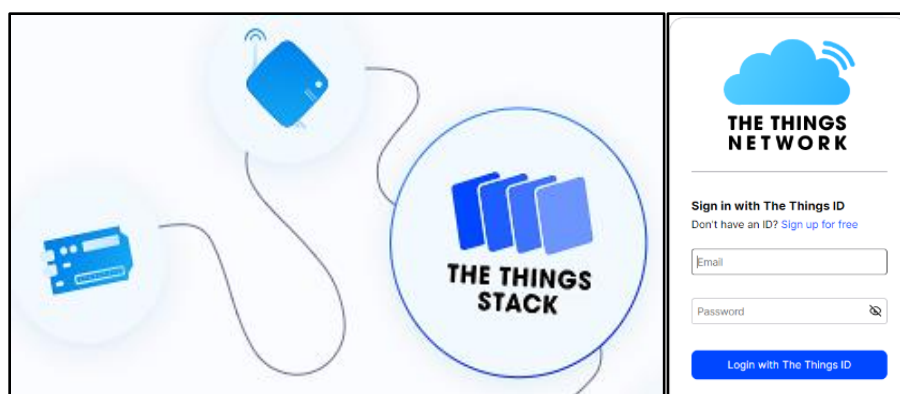
Esta tarjeta integra un módulo Lora (915 MHz), un display OLED de 128x64 píxeles como se visualiza en la figura 2.4 y lo más importante es que cuenta con un conector micro USB que sirve tanto para la programación (IDE Arduino o Micro Python) como para la alimentación de la tarjeta (UNIT ELECTRONICS, 2023).

### Servidor de red LoRaWAN (TTN)

Es importante mencionar que para recoger la información se requiere de un servidor de red que administre toda la información difundida por los nodos y además que logre gestionar los dispositivos que integran la red. Existen varias alternativas de servidores de red LoRaWAN, entre las más comunes esta TTS (The Things Stack) administrada por The Things Network y el servidor ChirpStack. Ambos poseen semejanzas en ciertas características, sin embargo, el TTS integra un servidor de red en donde los clientes o usuarios de alrededor del mundo pueden registrar la o las puertas de enlace (Gateway) con la finalidad de crear una red pública y así poder tener acceso. En comparación con TTN, en el servidor ChirpStack se pueden crear redes privadas, pero su principal problema se basa en la instalación de las puertas de enlace, debido a que, generalmente son muy costosas (Lluva, 2021). Por tal motivo, en este proyecto se emplea el servidor TTS tal como se visualiza en la figura 2.5.

**Figura 2.5**

*Servidor "The Things Network"*



*Nota.* La figura muestra el servidor de red LoRaWAN que se emplea para la gestión de nodos y puertas de enlace. Adaptado de Powered by The Things Stack, de The Things Network, 2023.

## 2.3 Registro y configuración de equipos

A continuación, se explica el proceso que se debe realizar para el registro y configuración de la puerta de enlace y del nodo. El registro es realizado en el servidor TTN versión 3.

### 2.3.1 Registro y configuración de la puerta de enlace

En esta parte se muestra el procedimiento que se lleva a cabo para realizar el registro y la configuración del dispositivo intermedio (Gateway). Para efectuar el proceso se debe realizar:

- Crear una cuenta en TTN y en balenaCloud (Ver Apéndice A).
- Descargar el software balenaEtcher para poder flashear la tarjeta (Ver Apéndice A).

Al obtener la cuenta en balenaCloud, se puede realizar el proceso denominado ‘Crear aplicación e insertar el dispositivo’. Con un solo clic en balenaCloud se implementa de forma automática la aplicación, es decir, ya contiene el código elemental, elaborado por Marc Pous (2021), para la implementación de la puerta de enlace (Ver el procedimiento en el Apéndice A).

**Figura 2.6**

*Registro del Gateway*



*Nota.* La figura muestra el proceso para registrar la puerta de enlace en TTN.

Se debe ir a la página de TTN e ingresar a la cuenta con el usuario y la contraseña creada. Luego se procede a seleccionar “Go to gateways” y después se da clic en “Register gateway” para registrar la puerta de enlace. Como se evidencia en la figura 2.6, aparecerá una ventana con la opción “Gateway EUI” para poder ingresar el “eui” obtenido en balenaCloud.

Después de haber ingresado el “eui” se deben llenar los campos que se muestran en la figura 2.7. Uno de estos es el “Gateway ID”, que hace referencia a un nombre, por ejemplo: gateway-lora (admite solo minúsculas). En el campo “Gateway name” se puede escribir un nombre, sin embargo, no es obligatorio agregar información en este campo. En la frecuencia se debe seleccionar “United States 902-928 MHz” que es usado por TTN. Finalmente, se selecciona “Registrar gateway” para registrar la puerta de enlace.

**Figura 2.7**

*Información del Gateway*

The image shows a screenshot of the TTN Gateway registration form. Three fields are highlighted with orange boxes and labeled with arrows:

- Gateway ID** (required): Labeled "Identificación de la puerta de enlace". The input field contains "my-new-gateway".
- Gateway name**: Labeled "Nombre de la puerta de enlace". The input field contains "My new gateway".
- Frequency plan** (required): Labeled "Banda de Frecuencia". The dropdown menu is set to "United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN)".

Below these fields, there is a checkbox for "Require authenticated connection" (unchecked) with a note: "Choose this option eg. if your gateway is powered by [LoRa Basic Station](#)".

Under the heading "Share gateway information", there is a note: "Select which information can be seen by other network participants, including [Packet Broker](#)".

Two checkboxes are checked: "Share status within network" and "Share location within network".

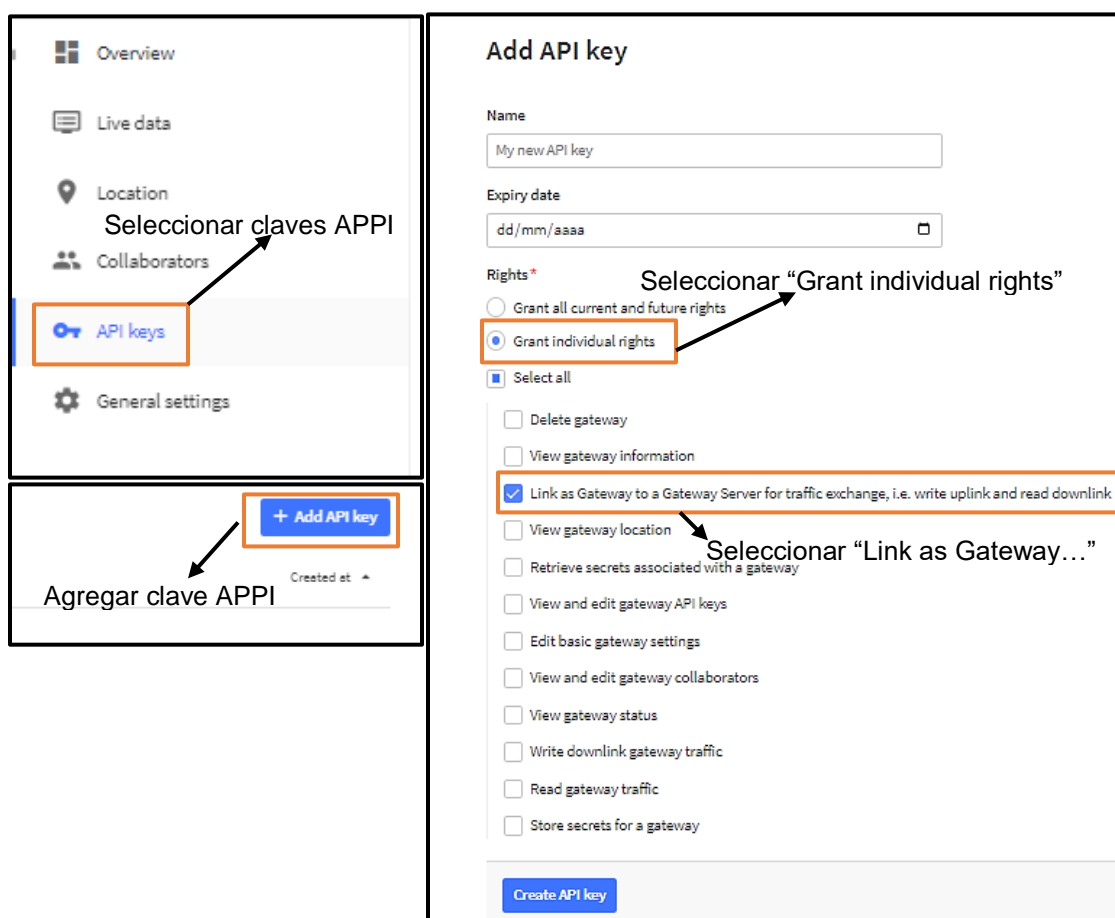
At the bottom, a blue button labeled "Register gateway" is highlighted with an orange box and labeled "Registrar Gateway".

*Nota.* La figura muestra los campos que se deben llenar para registrar la puerta de enlace en TTN. En este caso se trabaja en la banda 902-928 MHz.

**Identificación y clave de la puerta de enlace.** En esta parte se selecciona la opción “API Keys” y luego en “Add API Key” para añadir clave API. Posteriormente, se presenta una ventana en donde se debe escoger la opción “Grant individual rights” para otorgar derechos individuales. Por último, se selecciona la opción “Link as Gateway to a Gateway Server” tal como se observa en la figura 2.8.

**Figura 2.8**

*Generar clave API*



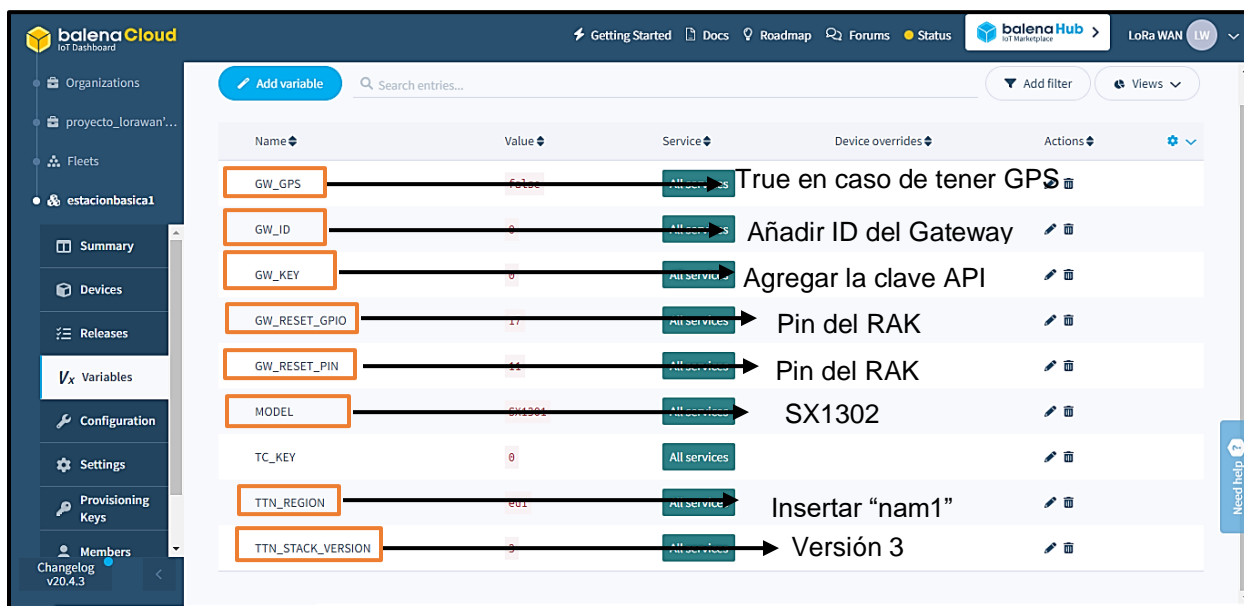
*Nota.* La figura muestra los pasos para generar el API Keys en TTN. En este caso solo se seleccionan las dos opciones que se detallan en la imagen.

**Variables en balenaCloud para la activación del Gateway.** Para la activación de la puerta de enlace se configura el modelo, la versión del TTN, la región, entre otras variables. En

balenaCloud para modificar las variables del dispositivo se debe seleccionar el apartado “Variables” como se detalla en la figura 2.9. Por ejemplo, en la variable “GW\_KEY” se copia el API Key que se creó en el paso anterior y de la misma manera se coloca el Gateway ID en la variable “GW\_ID”. En la opción “MODEL” se debe colocar SX1302, ya que el concentrador LoRa es el RAK2287. En la variable denominada como “TTN\_STACK\_VERSION” se debe colocar la versión del TTN (colocar la versión 3). En la variable “TTN\_REGION” insertar “nam1” y en la variable “GW\_GPS” colocar “true” si se tiene GPS en el RAK2287.

**Figura 2.9**

*Variables en balenaCloud*



*Nota.* La figura muestra las variables que se pueden modificar en balenaCloud. En este caso se debe considerar la región, el modelo y la versión del TTN.

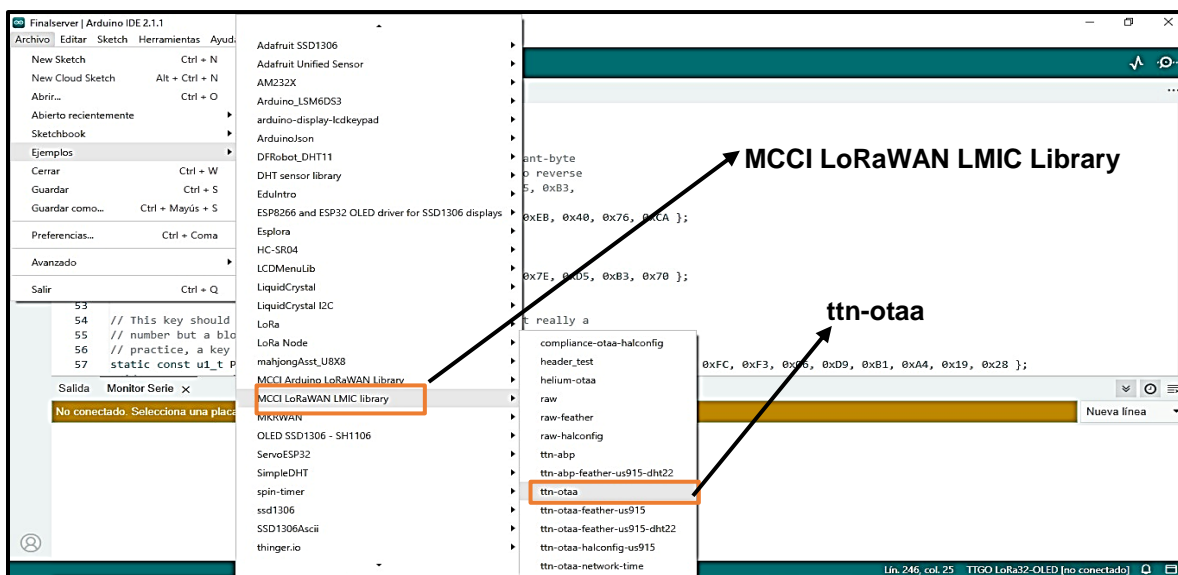
### 2.3.2 Registro y configuración de la tarjeta TTGO LoRa32

En esta subsección se muestra el procedimiento para realizar el registro y la configuración del dispositivo final (TTGO LoRa32). Para efectuar el proceso de registro se deben seguir los pasos detallados en el Apéndice A.

Para la configuración del módulo se hace uso del programa Arduino IDE. Primero, se debe observar la versión que presenta este módulo para poder configurar de manera correcta la librería que se va a utilizar en el programa, en este caso, la versión del TTGO LoRa32 es V1.6.1. Cabe mencionar que el proceso de configuración de la puerta de enlace (Raspberry Pi 4 + RAK2287) debe estar realizado, es decir, debe estar conectado al servidor TTN con los parámetros y la frecuencia, en este caso, una banda en la que se encuentre inmersa la frecuencia de 915 MHz. Para aquello se debe iniciar sesión en la página del servidor TTN y verificar el estado de la puerta de enlace (que detalle que se encuentra conectado). Posteriormente, se registra el nodo al servidor con el objetivo de ir configurando ciertos parámetros, los cuales servirán para poder incluirlos en el programa Arduino IDE. Dentro del programa se instala la/ las librerías, pero para realizar aquello se debe tener en cuenta que la placa esté conectada a la Pc. Se instala la librería (MCCI LoRaWAN LMIC Library) y posteriormente se hace uso del protocolo de activación, que para este proyecto es OTAA. Una vez instalada la librería se procede a seleccionar la opción “ttn-otaa”, como se muestra en la figura 2.10.

**Figura 2.10**

*Instalación de la librería (MCCI LoRaWAN LMIC Library)*



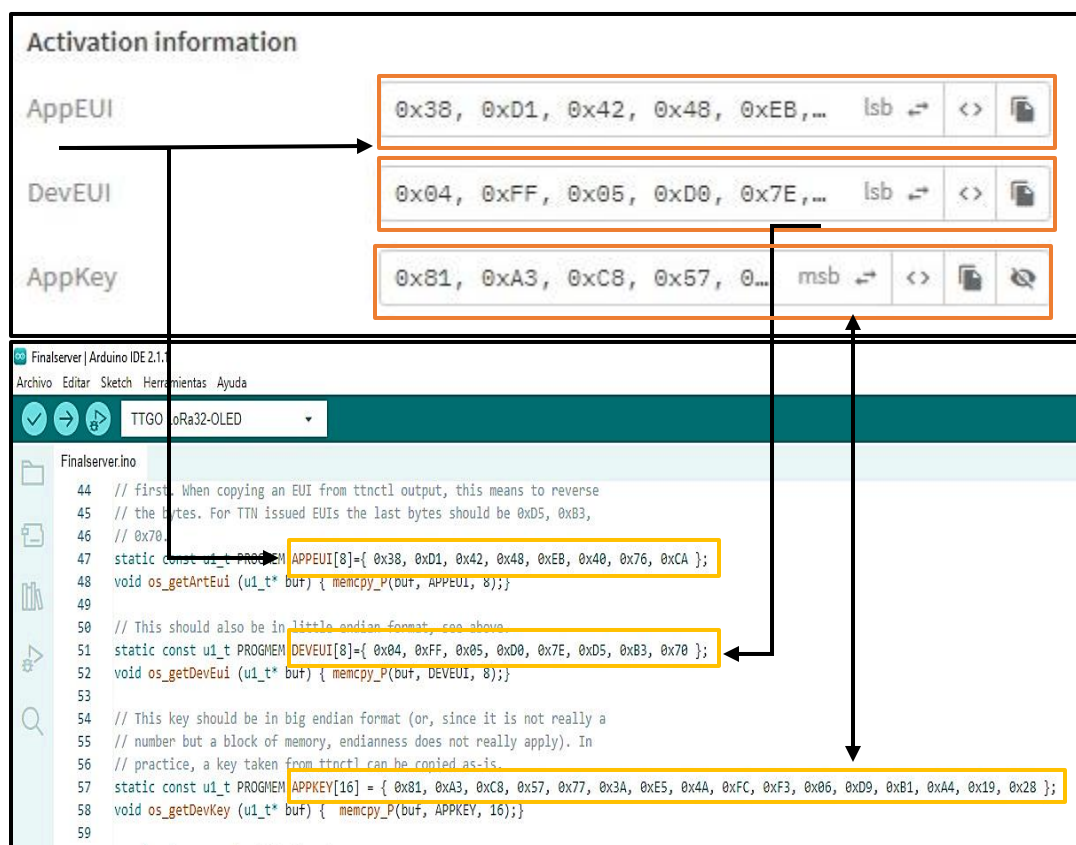
*Nota.* La figura muestra la librería que se debe instalar para poder escoger y emplear el protocolo de activación ttn-otaa.



Posteriormente, en la librería del protocolo de activación se selecciona “TTN OTAA” y se procede a editar cada uno de los parámetros generados en el TTN, para luego ser integrado en el archivo del programa Arduino IDE.

**Figura 2.11**

*Configuración de los parámetros del TTN al archivo ttn-otaa del arduino*



*Nota.* La figura muestra el ingreso de los parámetros del registro del TTGO LoRa32 al archivo arduino ttn-otaa.

En la figura 2.11 se visualizan los parámetros tales como: El AppEUI, el DevEUI y el AppKey que deben ser integrados al archivo arduino. Estos parámetros son incluidos en el archivo ttn-otaa, que corresponde al protocolo de activación, con la finalidad de que al cargar el archivo al TTGO LoRa32(nodo) se establezca la comunicación punto a punto y puedan observarse todos los datos en el servidor de red TTN.



**Figura 2.12**

*Asignación de pines y modificación del factor de propagación en arduino*

```

const unsigned TX_INTERVAL = 20;
// Asignación de pines para TTGO LoRa32 V1:
const lmic_pinmap lmic_pins = {
    .nss = 18,
    .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
    .rst = 14,
    .dio = { /*dio0*/ 26, /*dio1*/ 33, /*dio2*/ 32 }
};

// Establecer la velocidad de datos y la potencia de transmisión para
// para SF7, SF8, SF9 y SF10
// LMIC_setDrTxpow(DR_SF10, 14);
LMIC_setDrTxpow(DR_SF10, 14);
// La siguiente transmisión está programada después del evento TX_COM

```

**Asignación de Pines del TTGO LoRa32** (indicated by an arrow pointing to the pin assignment comment)

**Factor de Propagación** (indicated by an arrow pointing to the `LMIC_setDrTxpow(DR_SF10, 14);` line)

*Nota.* La figura muestra una parte del código arduino referente a los valores de factores de propagación y pines del módulo.

La figura 2.12 detalla una parte del código en el programa arduino cargado en el dispositivo final, donde se observa la asignación de pines del módulo, en este caso, se asignan los pines que son establecidos para el TTGO LoRa32. Además, se muestra el factor de propagación que puede ser modificado a medida que se realizan cada una de las mediciones de campo. Estas mediciones serán tomadas a diferentes distancias con el objetivo de ir variando el factor de propagación y observar cómo este parámetro influye en el envío del paquete hacia el servidor.

La figura 2.13 detalla el código del sensor de humedad para mostrar datos de la humedad del suelo. Además, en el servidor de red se visualizan otros datos como: el factor de propagación, la relación señal-ruido (SNR), la intensidad de la señal recibida (RSSI). Estos parámetros son importantes para la determinación de un radioenlace óptimo.

**Figura 2.13**

Archivo para el envío del dato (Humedad del suelo) al servidor TTN

```

const int value_dry = 3770; //Límite del valor del sensor cuando no estaba en presencia de agua (seco)
const int Value_wet = 1540; //Límite del valor del sensor cuando estaba en agua
int SensorValue = 0;
int MoisturePercent=0;

/ Funcion humedad , para la toma de datos del sensor capacitivo
void humedad(){

float SensorValue = analogRead(A0UT_PIN); // lee el valor de la entrada analogica del sensor
float MoisturePercent=map(SensorValue, Value_dry, Value_wet, 0, 100);// funcion map para colocar rango de 1-100% de humedad
if (MoisturePercent>100){ // evitar mas del 100% de humedad
MoisturePercent=100;
}
if(MoisturePercent<0){ // evitar menos del 0% de humedad
MoisturePercent=0;
}
float humedad = MoisturePercent* 1.0;
mydata[1] = humedad * 2; // envia el valor de humedad en la posicion 1 de la cadena
Serial.print(humedad);
Serial.print(F("%"));
Serial.println("");
delay(250);

```

**Código para el sensor de humedad del suelo**

*Nota.* La figura muestra una parte del código arduino referente al código del sensor de humedad que serán visualizados en el servidor TTN.

En la figura 2.14 se muestra el TTGO LoRa32 en donde se detallan parámetros como el SF, RSSI, SNR, y el porcentaje de humedad. Aquellos valores dependen de cada una de las mediciones que se registren en el entorno cacaotero. En este caso se emplearon como modelo de prueba valores de SF de 7 y 10 correspondientes a enlaces ascendentes. Aquel valor puede modificarse en la parte del código que se detalló anteriormente en la figura 2.12.

**Figura 2.14**

Parámetros mostrados en el TTGO LoRa32

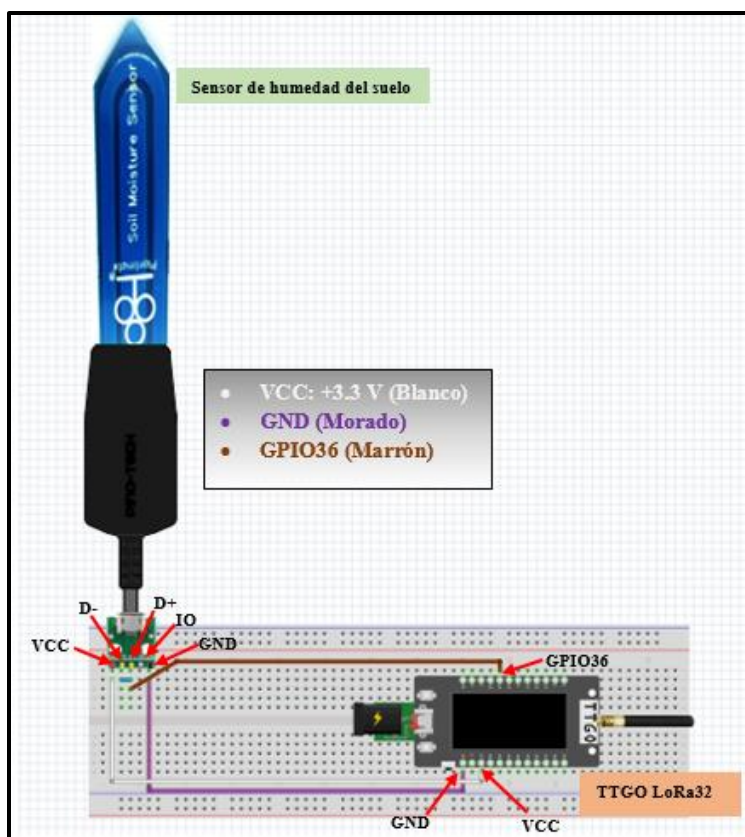


*Nota.* La figura muestra al TTGO LoRa32 con datos del SNR y RSSI obtenidos como prueba.

En la figura 2.15 se detalla cada una de las conexiones que se realizaron con el nodo, luego de haber cargado el código al módulo para la lectura del porcentaje de humedad. La conexión es la siguiente: +VCC con un voltaje de 3.3 [v] correspondiente al cable de color blanco que va enlazado con el pin +VCC del TTGO LoRa32, GND del sensor de humedad cuya conexión representa el cable de color morado deberá situarse al pin GND perteneciente al módulo LoRa32. Finalmente, se debe unir con un cable los puntos D- y D+, para luego tomar uno de los pines correspondientes a la línea (D+) y realizar la conexión con el pin GPIO36 proveniente del TTGO que corresponde a la salida (lectura de la humedad).

**Figura 2.15**

*Conexión del TTGO LoRa32 y del sensor de humedad del suelo*

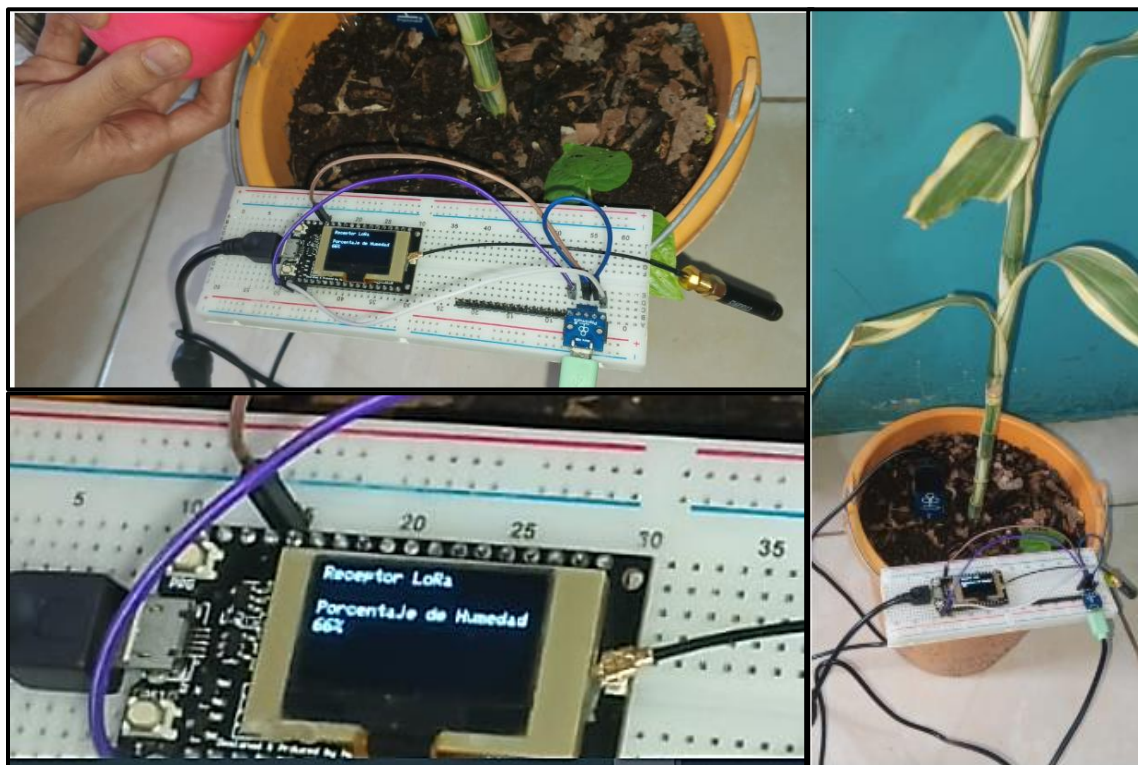


*Nota.* La figura muestra la conexión del TTGO LoRa32 junto al sensor de humedad del suelo.

Se realizó una pequeña prueba para obtener el porcentaje de humedad del suelo como se lo visualiza en la figura 2.16, con el objetivo de comprobar una parte del código correspondiente a uno de los parámetros que estará presente en las mediciones del entorno cacaotero.

**Figura 2.16**

*Prueba del sensor de humedad del suelo junto al TTGO LoRa32*



*Nota.* La figura muestra una pequeña prueba del sensor de humedad con el dispositivo LoRa.

## Capítulo 3



### 3. Pruebas y Resultados

En este capítulo se detallan las pruebas que se llevaron a cabo para conocer cómo se propaga la señal en un ambiente cacaotero usando dispositivos LoRa. Además, se presenta el análisis de los resultados obtenidos con base en las pruebas de campo realizadas.

#### 3.1 Escenario

Las pruebas se desarrollaron en Bean & Co, finca agrícola ubicada vía Cerecita a 60 Km al sur de Guayaquil. La hacienda se caracteriza por el cultivo de plantaciones de cacao y la distribución del producto agrícola con óptimos controles de calidad tal como se visualiza en la figura 3.1. En este entorno se realizaron las mediciones de campo tanto para conocer el alcance máximo que se obtiene al emplear tecnología LoRa como para identificar los valores de RSSI y SNR al modificar los factores de propagación.

**Figura 3.1**

*Finca Bean & Co*



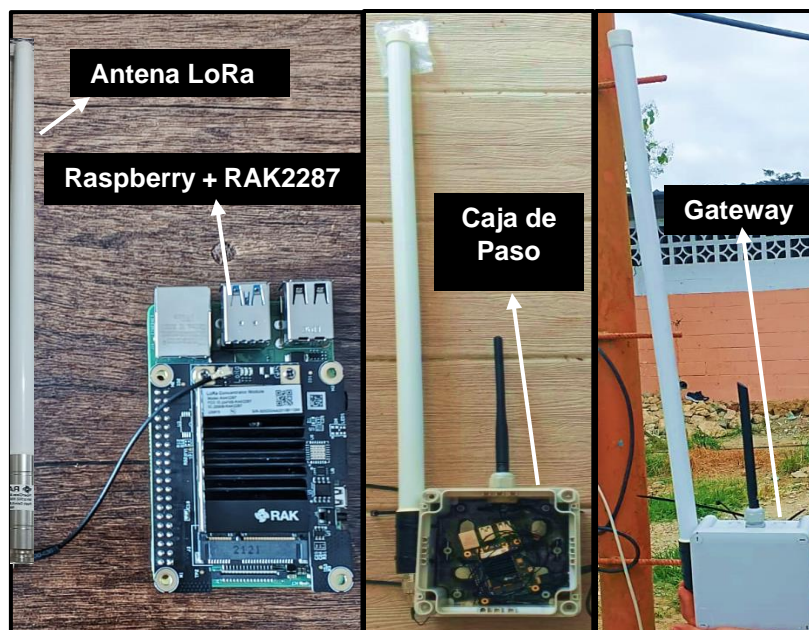
*Nota.* La figura muestra el lugar en donde se efectuaron las múltiples mediciones de campo con dispositivos LoRa.

### 3.2 Implementación de la puerta de enlace y del nodo

Para poder realizar las pruebas se procedió a armar la puerta de enlace tal como se observa en la figura 3.2. Para ello, se le adaptó el módulo RAK2287 a la placa arduino Raspberry Pi 4 y se le conectó la antena LoRa, la cual presenta una ganancia pico de 5.8 dBi. Posteriormente, se lo colocó en una caja de paso de tal manera que permita proteger al módulo y la placa de la intemperie. Finalmente, se le conectó el cable Ethernet y el cable de alimentación para cerrar la caja de paso y tener preparada la puerta de enlace.

**Figura 3.2**

*Proceso de montaje del dispositivo intermedio*



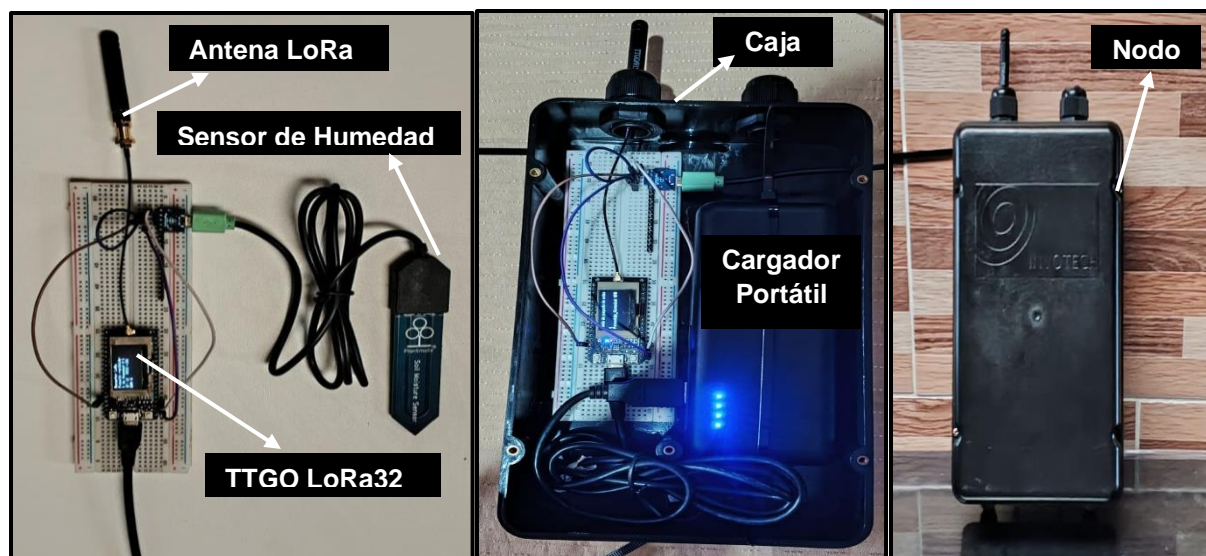
*Nota.* La figura muestra las conexiones para el proceso de armado del dispositivo (Gateway).

De manera similar para realizar las pruebas se realizó el montaje del nodo, tal como se visualiza en la figura 3.3. Se adaptó el TTGO Lora32 al protoboard y se realizaron las conexiones del sensor de humedad y de la antena LoRa. El dispositivo y sus elementos se los colocó en una caja que permita protegerlos de la intemperie o de cualquier otro evento. Se instaló un cargador

portátil para su funcionamiento al interior del entorno cacaotero. Finalmente, se cerró la caja para tener preparado el nodo.

**Figura 3.3**

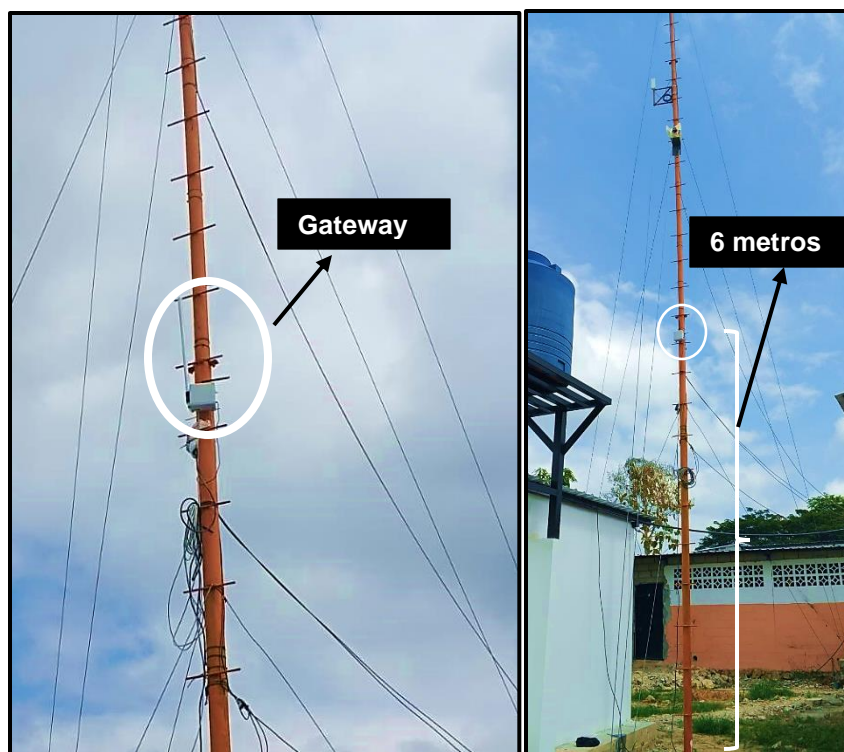
*Proceso de montaje del dispositivo final*



*Nota.* Ilustración de las conexiones correspondientes al ensamblaje del dispositivo final.

La puerta de enlace o Gateway está ubicada en las coordenadas: 2°22'19''S 80°14'28''W, aproximadamente a una altura de 6 metros desde el suelo, como se observa en la figura 3.4. Además, el Gateway se caracteriza por ser un dispositivo intermedio, es decir, un equipo localizado entre el dispositivo final (TTGO LoRa32) y la nube (servidor TTN). Como se mencionó en la sección 2.2.4, la puerta de enlace tiene integrada una Raspberry Pi 4 y un módulo concentrador (RAK2287). El RAK2287 presenta detectores de paquetes LoRa (exactamente ocho detectores) de 8 canales (RAKwireless Technology Limited, 2023).



**Figura 3.4***Implementación de la puerta de enlace*

*Nota.* La figura muestra la ubicación de la puerta de enlace al interior de la hacienda.

El dispositivo final o nodo TTGO se lo ubicó al interior de las plantaciones cacaoteras en cuatro puntos distintos como se observa en la figura 3.5. En la tabla 3.1 se detallan 4 puntos a diferentes distancias considerados para las mediciones.

**Tabla 3.1***Puntos considerados para las mediciones*

Coordenadas	Distancia (m)	Altura del Gateway	Altura del Nodo
	Gateway–TTGO	(m)	(m)
2°22'24.280''S 80°14'22.964''W	225	6	1.5
2°22'28.853''S 80°14'17.215''W	450	6	1.5
2°22'30.015''S 80°14'9.065''W	675	6	1.5
2°22'32''S 80°13'58''W	1000	6	1.5

*Nota.* Posición, altura y distancia entre los equipos LoRa.

Cabe mencionar que para las mediciones realizadas se estableció la condición NLOS (Sin línea de vista) debido a los obstáculos presentes; como el follaje en las plantaciones de cacao.

**Figura 3.5**

*Ubicación del nodo TTGO*



*Nota.* La figura muestra las distancias en las que se ubicaron al dispositivo final o nodo.

### 3.3 Paquetes y datos visualizados en el servidor de red

En esta parte se detallan los paquetes y los datos que se evidenciaron a través del servidor TTN versión 3. Se procedió a ingresar al servidor de red para verificar que la puerta de enlace se encuentre conectada. En la figura 3.6 se puede observar el estado del Gateway (GW RAK2287), en este caso se tiene una puerta de enlace conectada, de tal manera que permita realizar las pruebas de campo sin ningún problema.

**Figura 3.6**

Estado del Gateway visualizado a través del servidor TTN

The screenshot shows the TTN Gateway management interface. The 'Gateways' tab is selected. A search bar and a 'Register gateway' button are visible. Below, a table lists gateway information:

Name	Gateway EUI	Status	Created at
GW RAK2287	D8 3A DD FF FE 00 2A 5A	Connected	5 days ago

*Nota.* La figura muestra el nombre y estado de la puerta de enlace observado desde el servidor.

En la figura 3.7 se puede visualizar los paquetes que llegaban al servidor de red. En este caso se detalla el porcentaje de humedad como paquete recibido. Además, se muestran los datos del enlace como el SNR, RSSI, Factor de Propagación (SF) y Ancho de banda (BW). Se experimentó con valores SF iguales a: 7, 8, 9, 10 correspondientes a enlaces ascendentes para analizar los efectos de la señal recibida.

**Figura 3.7**

Paquetes recibidos en TTN

The screenshot shows the TTN Applications interface with the 'Live data' view selected. It displays a list of received packets with the following columns: Time, Entity ID, Type, Data preview, and link parameters (SF, SNR, RSSI). The packets are filtered by 'Forward uplink data message' and show humidity data ('aje\_Humedad' or 'ntaje\_Humedad').

Time	Entity ID	Type	Data preview	Link Parameters
14:17:38	eui-70b3d57ed005...	Forward uplink data message	aje_Humedad: "8 %" }	SF8BW125 SNR: -2.5 RSSI: -108
14:17:12	eui-70b3d57ed005...	Forward uplink data message	taje_Humedad: "7 %" }	SF7BW125 SNR: 1.5 RSSI: -104
14:30:37	eui-70b3d57ed005...	Forward uplink data message	aje_Humedad: "4 %" }	SF8BW125 SNR: 7.25 RSSI: -97
14:29:44	eui-70b3d57ed005...	Forward uplink data message	aje_Humedad: "5 %" }	SF8BW125 SNR: 1.5 RSSI: -104
14:40:41	eui-70b3d57ed005...	Forward uplink data message	aje_Humedad: "6 %" }	SF9BW125 SNR: 4.75 RSSI: -99
14:40:14	eui-70b3d57ed005...	Forward uplink data message	aje_Humedad: "5 %" }	SF9BW125 SNR: 3.75 RSSI: -100
14:50:19	eui-70b3d57ed005...	Forward uplink data message	ntaje_Humedad: "6 %" }	SF10BW125 SNR: 5 RSSI: -99
14:49:53	eui-70b3d57ed005...	Forward uplink data message	ntaje_Humedad: "6 %" }	SF10BW125 SNR: 6 RSSI: -98

*Nota.* La figura muestra los paquetes en el servidor TTN considerando diferentes SF.

### 3.4 Cálculos de sensibilidad y atenuación con datos adquiridos en las pruebas de campo

En esta parte se muestran los cálculos para la sensibilidad del receptor y la atenuación ocasionada por la vegetación para distancias de: 225 [m], 450 [m] y 675 [m], con factores de propagación de 7, 8, 9 y 10. Cabe mencionar que en las pruebas se consideraron aproximadamente 16 paquetes recibidos por cada factor de propagación y por cada distancia de separación entre los dispositivos LoRa.

El cálculo de la sensibilidad del receptor se lo obtiene conociendo tres valores fundamentales, como se indica en la ecuación (3.1): ancho de banda (**BW**), la figura de ruido (**NF**) que es distinto para cada módulo LoRa, para este caso, la puerta de enlace presenta una figura de ruido de **6 [dB]** y con una potencia de transmisión de **27 [dBm]**. Finalmente, la relación señal-ruido (**SNR**) depende del valor del factor de propagación obtenido en las mediciones.

$$S_{RX} = -174 + 10 \log(BW)[KHz] + NF[dB] + SNR[dB] \quad (3.1)$$

Considerando una distancia de 225 metros entre la puerta de enlace y el dispositivo final con un factor de propagación  $SF = 7$  se tiene:

**Datos:**

BW= 125 KHz

NF= 6 dB

SNR = 1.20 dB

$$S_{RX} = -174 + 10 \log(BW)[KHz] + NF[dB] + SNR[dB]$$

$$S_{RX} = -174 + 10 \log(125)[KHz] + 6[dB] + (1.20)[dB]$$

$$S_{RX} = -145 [dBm]$$

A continuación, se detalla la expresión de atenuación descrita en la ecuación (2.1):

$$\text{Atenuación}_{ITU-R} = 0.2(f^{0.3})(d^{0.6})$$

$$\text{Atenuación}_{ITU-R} = 0.2((905)^{0.3})((225)^{0.6})$$



$$\text{Atenuación}_{\text{ITU-R}} = 39.75 \text{ [dB]}$$

De la misma forma se efectúan los cálculos de sensibilidad del receptor y de atenuación para los demás valores de factor de propagación (SF8, SF9 y SF10) considerando la distancia establecida. De las mediciones de campo realizadas en Bean & Co y de los cálculos llevados a cabo se obtuvo los resultados que se evidencian en la tabla 3.2. Estos resultados corresponden a una distancia de 225 metros entre la puerta de enlace y el nodo.

**Tabla 3.2**

*Resultados de las mediciones obtenidas del SF en la finca cacaotera a 225 [m]*

Spreading Factor (SF)	SF7	SF8	SF9	SF10
RSSI promedio (dBm)	-103.75	-100.12	-102.76	-101.66
SNR promedio (dB)	1.20	4.22	1.29	2.64
Frecuencia (MHz)	905	905	905	905
BW (KHz)	125	125	125	125
S <sub>RX</sub> (dBm)	-145	-142.81	-145.74	-144.39
Atenuación <sub>ITU-R</sub> (dB)	39.75	39.75	39.75	39.75
Tiempo aire consumido (s)	0.046336	0.092672	0.164864	0.329728
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	4/5
Tasa de bits (Kb/s)	5.5	3.1	1.8	0.9

*Nota.* Valores tomados del radioenlace a una distancia de 225 m entre los equipos LoRa.

Considerando una distancia de 450 metros entre la puerta de enlace y el dispositivo final con un factor de propagación SF = 7 se tiene:

**Datos:**

BW= 125 KHz

NF= 6 dB

SNR = -4.45 dB

$$S_{\text{RX}} = -174 + 10 \log(\text{BW})[\text{KHz}] + \text{NF}[\text{dB}] + \text{SNR}[\text{dB}]$$

$$S_{\text{RX}} = -174 + 10 \log(125)[\text{KHz}] + 6[\text{dB}] + (-4.45)[\text{dB}]$$

$$S_{RX} = -151.48 \text{ [dBm]}$$

A continuación, se detalla la expresión de atenuación descrita en la ecuación (2.1):

$$\text{Atenuación}_{ITU-R} = 0.2((905)^{0.3})((450)^{0.6})$$

$$\text{Atenuación}_{ITU-R} = 60.25 \text{ [dB]}$$

Siguiendo el mismo procedimiento se efectúan los cálculos de sensibilidad del receptor y de atenuación para los otros valores de factor de propagación. De las mediciones de campo realizadas se obtuvo los resultados que se evidencian en la tabla 3.3. Estos resultados corresponden a una distancia de 450 metros entre la puerta de enlace y el nodo.

**Tabla 3.3**

*Resultados de las mediciones obtenidas del SF en la finca cacaotera a 450 [m]*

Spreading Factor (SF)	SF7	SF8	SF9	SF10
RSSI promedio (dBm)	-109.63	-105.75	-108.88	-113.81
SNR promedio (dB)	-4.45	-0.68	-3.84	-8.95
Frecuencia (MHz)	905	905	905	905
BW (KHz)	125	125	125	125
$S_{RX}$ (dBm)	-151.48	-147.71	-150.87	-155.98
Atenuación <sub>ITU-R</sub> (dB)	60.25	60.25	60.25	60.25
Tiempo aire consumido (s)	0.046336	0.092672	0.164864	0.329728
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	4/5
Tasa de bits (Kb/s)	5.5	3.1	1.8	0.9

*Nota.* Valores tomados del radioenlace a una distancia de 450 m entre los equipos LoRa.

Considerando una distancia de 675 metros entre la puerta de enlace y el dispositivo final con un factor de propagación  $SF = 7$  se tiene:

**Datos:**

BW= 125 KHz

NF= 6 dB

$$\text{SNR} = -4.94 \text{ dB}$$

$$S_{\text{RX}} = -174 + 10 \log(\text{BW})[\text{KHz}] + \text{NF}[\text{dB}] + \text{SNR}[\text{dB}]$$

$$S_{\text{RX}} = -174 + 10 \log(125)[\text{KHz}] + 6[\text{dB}] + (-4.94)[\text{dB}]$$

$$S_{\text{RX}} = -151.97 \text{ [dBm]}$$

A continuación, se detalla la expresión de atenuación descrita en la ecuación (2.1):

$$\text{Atenuación}_{\text{ITU-R}} = 0.2((905)^{0.3})((675)^{0.6})$$

$$\text{Atenuación}_{\text{ITU-R}} = 76.84 \text{ [dB]}$$

De las mediciones de campo realizadas se obtuvo los resultados que se evidencian en la tabla 3.4. Estos resultados corresponden a una distancia de 675 metros entre la puerta de enlace y el nodo.

**Tabla 3.4**

*Resultados de las mediciones obtenidas del SF en la finca cacaotera a 675 [m]*

Spreading Factor (SF)	SF7	SF8	SF9	SF10
RSSI promedio (dBm)	-110.19	-111.94	-114.5	-113.5
SNR promedio (dB)	-4.94	-6.23	-9.20	-8.56
Frecuencia (MHz)	905	905	905	905
BW (KHz)	125	125	125	125
$S_{\text{RX}}$ (dBm)	-151.97	-153.26	-156.23	-155.59
Atenuación <sub>ITU-R</sub> (dB)	76.84	76.84	76.84	76.84
Tiempo aire consumido (s)	0.046336	0.092672	0.164864	0.329728
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	4/5
Tasa de bits (Kb/s)	5.5	3.1	1.8	0.9

*Nota.* Datos tomados del radioenlace a una distancia de 675 m entre los equipos LoRa.

Considerando una distancia de 1.1 Km con un factor de propagación SF = 10 se tiene:

**Datos:**

BW= 125 KHz

NF= 6 dB

SNR = -15.97 dB

$$S_{RX} = -174 + 10 \log(BW)[KHz] + NF[dB] + SNR[dB]$$

$$S_{RX} = -174 + 10 \log(125)[KHz] + 6[dB] + (-15.97)[dB]$$

$$S_{RX} = -163.00 [dBm]$$

A continuación, se detalla la expresión de atenuación descrita en la ecuación (2.1):

$$\text{Atenuación}_{ITU-R} = 0.2((905)^{0.3})((1000)^{0.6})$$

$$\text{Atenuación}_{ITU-R} = 97.28 [dB]$$

Para obtener una mayor cobertura se configuró en el nodo el factor de propagación igual a 10, ya que con los SF iguales a 7, 8 y 9 no llegaban los paquetes correspondientes al porcentaje de humedad. Esto ocurre debido a que a menor SF menor cobertura y viceversa. De las mediciones de campo realizadas se obtuvo los resultados que se evidencian en la tabla 3.5. Estos resultados corresponden a una distancia de 1.1 Km (puerta de enlace – nodo).

### Tabla 3.5

*Resultados de las mediciones obtenidas del SF en la finca cacaotera a 1.1 [Km]*

Spreading Factor (SF)	SF10
RSSI promedio (dBm)	-123.33
SNR promedio (dB)	-15.97
Frecuencia (MHz)	905
BW (KHz)	125
$S_{RX}$ (dBm)	-163.00
Atenuación <sub>ITU-R</sub> (dB)	97.28
Tiempo aire consumido (s)	0.329728
Tasa de codificación	4/5
Tasa de bits	0.9

*Nota.* Datos tomados del radioenlace a una distancia de 1.1 Km entre los equipos LoRa.



### **3.5 Análisis de las gráficas bajo diferentes factores de propagación**

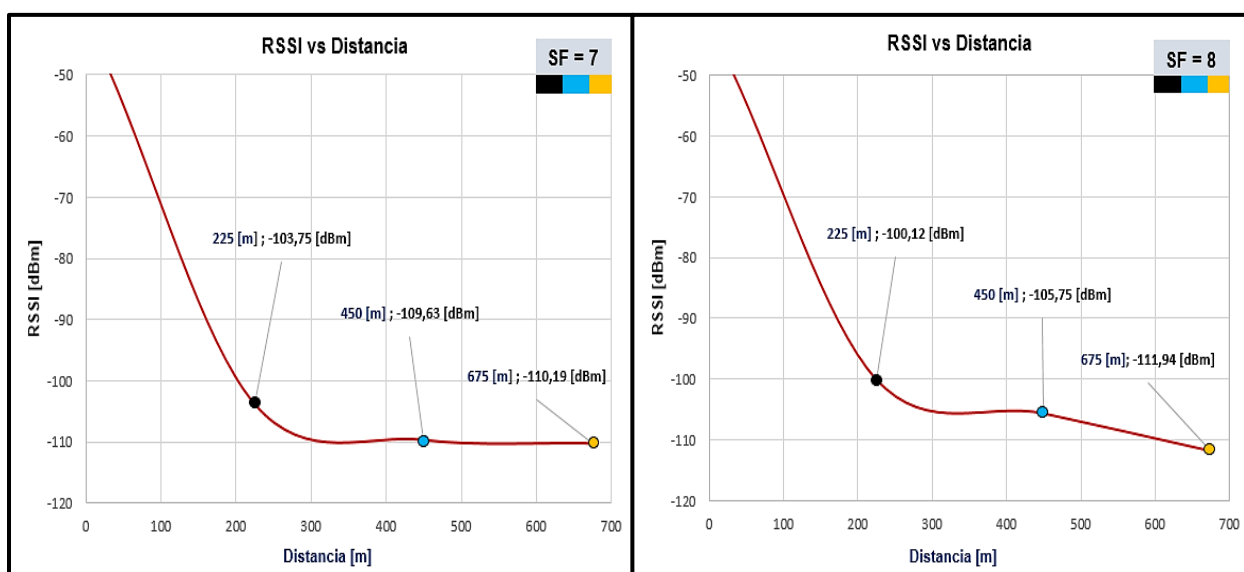
En esta sección se muestran y analizan las gráficas con base en los valores obtenidos en las mediciones de campo. Se evidencia las gráficas de RSSI vs Distancia, RSSI vs SNR, Atenuación vs Distancia, SF vs Tiempo de aire consumido, considerando cada factor de propagación.

#### **3.5.1 RSSI vs Distancia**

En la figura 3.8 se muestra la gráfica con los datos del RSSI y la distancia a la que se encontraban ambos equipos LoRa al instante de la transmisión. La comunicación punto a punto transmitió una carga útil de 2 bytes referente a datos de humedad del suelo. Para este caso, se efectuó la transmisión con un valor de factor de propagación de 7 considerando diferentes distancias.

A 225 metros entre el dispositivo final y la puerta de enlace se registró un nivel de indicador de fuerza de la señal recibida de -103.75 [dBm]. Por otro lado, al aumentar la distancia a un valor de 450 metros se obtuvo un RSSI promedio de -109.63 [dBm] y a 675 m un valor de -110.19 [dBm], registrando una disminución del RSSI a medida que aumenta la distancia.

Con un valor de factor de propagación igual a 8 se visualiza que a 225 metros entre el dispositivo final y la puerta de enlace se registró un RSSI de -100.12 [dBm]. Además, al incrementar las distancias a 450 y 675 metros se obtuvieron valores RSSI promedio de -105.75 [dBm] y -111.94 [dBm], respectivamente.

**Figura 3.8***RSSI vs Distancia con SF7 y SF8*

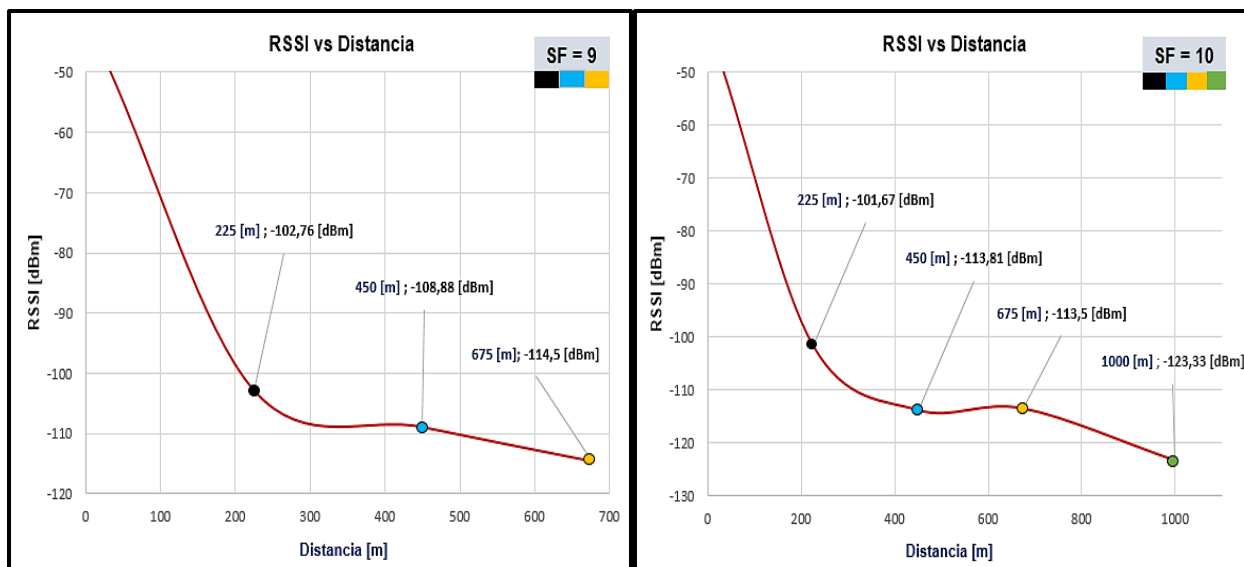
*Nota.* La figura muestra la gráfica de RSSI vs Distancia con un factor de propagación de 7 y 8.

En la figura 3.9 se muestra la gráfica con los datos del RSSI y la distancia a la que se encontraban ambos equipos LoRa al instante de la transmisión y con la misma carga útil referente a datos de humedad del suelo. Sin embargo, para este caso, se efectuó con un valor de factor de propagación de 9. Por otro lado, las pruebas realizadas a 225 metros entre el dispositivo final y la puerta de enlace registraron un nivel RSSI de -102.76 [dBm]. Cuando la distancia se incrementó a 450 metros se obtuvo un RSSI de -108.88 [dBm] y a 675 metros un valor de -114.5 [dBm].

Para un SF de 10 y a 225 metros entre el dispositivo final y la puerta de enlace se registró un nivel de indicador de fuerza de la señal recibida de -101.67 [dBm]. Al incrementar la distancia a un valor de 450 metros se obtuvo un RSSI de -113.81 [dBm] y a 675 metros un valor de -113.5 [dBm].

**Figura 3.9**

RSSI vs Distancia con SF9 y SF10



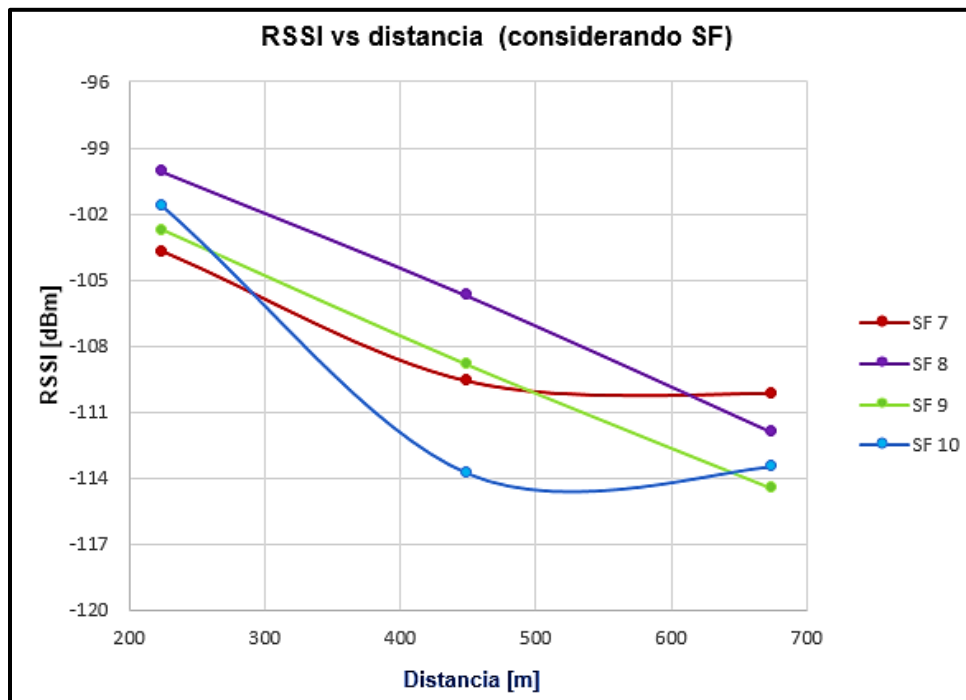
*Nota.* La figura muestra la gráfica de RSSI vs Distancia con un factor de propagación de 9 y 10.

En la figura 3.10 se muestra la gráfica del RSSI vs Distancia con los diferentes factores de propagación para el enlace ascendente manteniendo un ancho de banda de 125 KHz, en donde se colocó el TTGO LoRa32 a diferentes distancias con respecto a la puerta de enlace.

También se aprecia el comportamiento del RSSI en función de la distancia y de los factores de propagación. Además, se determinó que el SF de 7 (color rojo) a una menor distancia el envío de paquetes llegaba de manera más rápida al servidor que el SF8 (color morado), SF9 (color verde) y SF10 (color celeste). Sin embargo, a medida que se aumentaba el valor de SF, el tiempo del envío del dato de humedad del suelo visto en el servidor disminuía.

**Figura 3.10**

*RSSI vs Distancia considerando los valores del SF7 al SF10*



*Nota.* La figura muestra la gráfica de RSSI vs Distancia con todos los factores de propagación.

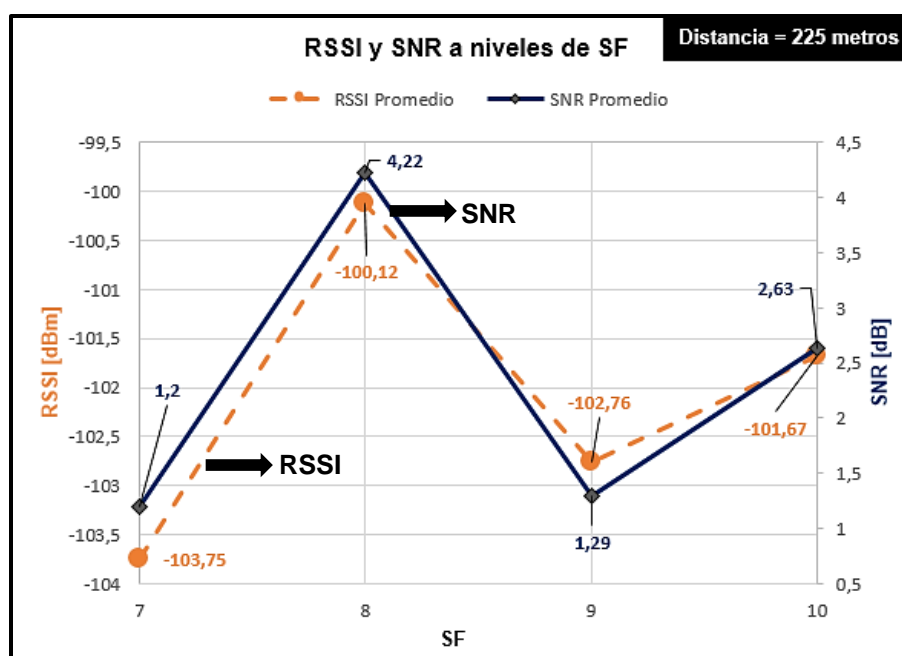
### 3.5.2 RSSI vs SNR

En la gráfica que se detalla en la figura 3.11 se muestran los datos que relacionan al RSSI y al SNR en función de los valores SF o factores de propagación. La representación gráfica está delimitada por una separación de 225 metros entre los dispositivos LoRa. Se tiene que para un valor de SF igual a 7 se produce una relación señal-ruido promedio de 1.20 [dB] y un RSSI promedio con un resultado de -103.75 [dBm]. Al cambiar el valor de Spreading Factor, por ejemplo SF = 8, se constató un SNR promedio de 4.22 [dB] y un RSSI promedio igual a -100.12 [dBm]. Con un factor de propagación de 9 se obtuvo un RSSI y SNR promedio igual a -102.76 [dBm] y 1.29 [dB], respectivamente. Finalmente, para un SF de 10 se registró un SNR promedio de 2.64 [dB] y un indicador de señal recibida de -101.66 [dBm]. Según lo estipulado por, SensingLabs

(2023), un radioenlace para niveles de LoRaWAN se considera satisfactorio cuando el RSSI  $> -115$  [dBm] y el SNR  $> -7$  [dB]. De acuerdo a los resultados evidenciados en la figura 3.11, se puede manifestar que al colocar un nodo a 225 metros de la puerta de enlace, se debe configurar el dispositivo final con un factor de propagación de 8, puesto que con este factor se obtuvo un mayor SNR promedio de tal forma que la capacidad de transmisión de los datos será mayor.

**Figura 3.11**

*RSSI vs SNR a 225 metros*



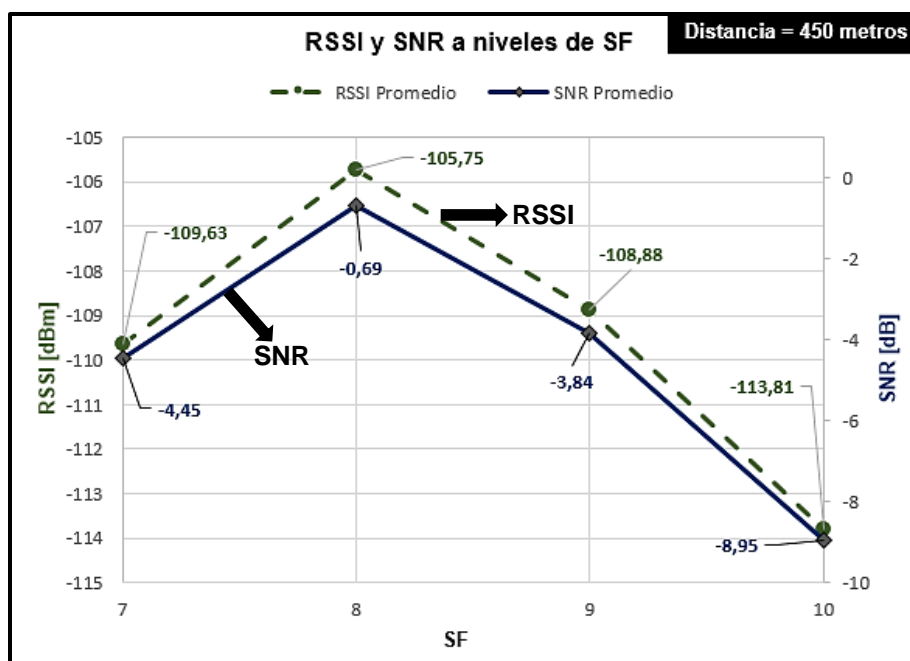
*Nota.* La figura muestra la gráfica de RSSI vs SNR de acuerdo al SF y la distancia de 225 [m].

La figura 3.12 detalla los datos relacionados al RSSI y SNR promedio en función de los factores de propagación, pero con la diferencia de que en este caso la distancia entre los dispositivos es de 450 metros. En el esquema se observa que con un valor de SF igual a 7 se genera un SNR promedio de  $-4.45$  [dB] y un RSSI de  $-109.63$  [dBm]. También se evidencia que con un factor de propagación igual a 8 se obtiene una relación señal-ruido con un valor de  $-0.68$  [dB] y un RSSI de  $-105.75$  [dBm]. Al modificar el SF a un valor de 9 se alcanzó un SNR promedio de  $-3.84$  [dB] y  $-108.88$  [dBm] como dato de RSSI. Finalmente, con el factor de propagación igual a

10 se obtuvo un SNR de  $-8.95$  [dB] con un indicador de fuerza de señal recibida de  $-113.81$  [dBm]. Luego de realizar las mediciones con los diferentes factores de propagación, se puede mencionar que al colocar un nodo a 450 metros de la puerta de enlace, se debe configurar el dispositivo final con un factor de propagación de 8, puesto que con este factor se obtuvo un mayor SNR promedio.

**Figura 3.12**

*RSSI vs SNR a 450 metros*



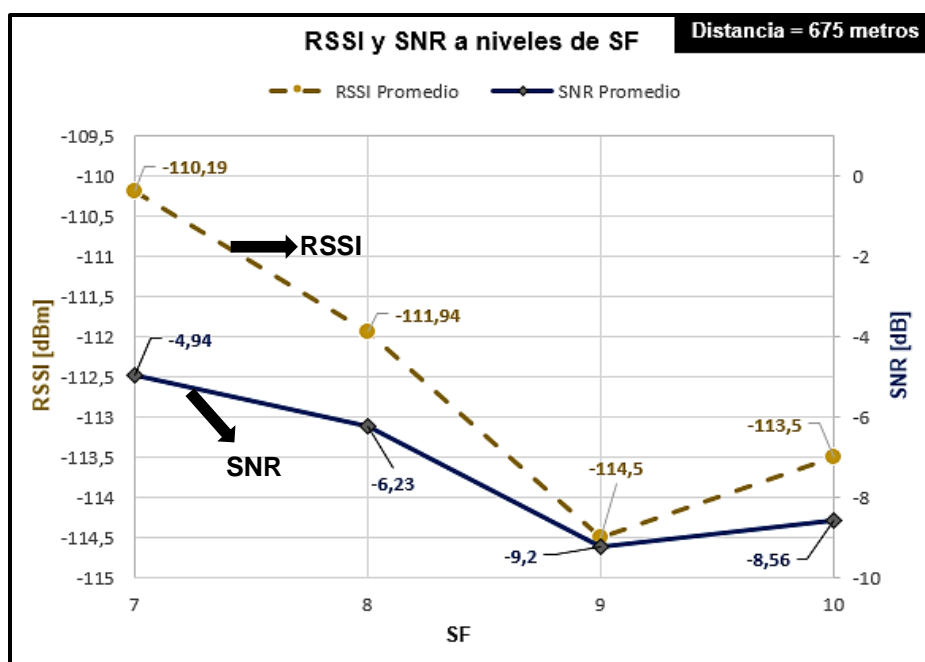
*Nota.* La figura muestra la gráfica de RSSI vs SNR de acuerdo al SF y la distancia de 450 [m].

La figura 3.13 muestra una gráfica para una separación de 675 metros entre los dispositivos LoRa. Se tiene que para un valor de SF 7 se produce una relación señal-ruido promedio de  $-4.94$  [dB] y un RSSI promedio de  $-110.19$  [dBm]. Al cambiar el valor de Spreading Factor, por ejemplo  $SF = 8$ , se constató un SNR promedio de  $-6.23$  [dB] y con un indicador de fuerza de señal recibida igual a  $-111.94$  [dBm]. Para un factor de propagación de 9 se obtuvo un RSSI y SNR promedio igual a  $-114.5$  [dBm] y  $-9.20$  [dB], respectivamente. Para un SF igual a 10 se registró una relación señal-ruido de  $-8.56$  [dB] con un indicador de fuerza de señal recibida de  $-113.5$  [dBm]. De acuerdo a los resultados evidenciados en la figura 3.13, se puede manifestar que al colocar un nodo a 675

metros de la puerta de enlace, se debe configurar el dispositivo final con un factor de propagación de 7, puesto que con este factor se obtuvo un mayor SNR promedio. Al analizar las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 se puede señalar que considerando por ejemplo un SF 8, el SNR promedio disminuyó a medida que aumentó la distancia, debido a la mayor presencia de plantaciones de cacao y a la separación entre los dispositivos.

**Figura 3.13**

*RSSI vs SNR a 675 metros*



*Nota.* La figura muestra la gráfica de RSSI vs SNR de acuerdo al SF y la distancia de 675 [m].

### 3.5.3 Atenuación vs Distancia

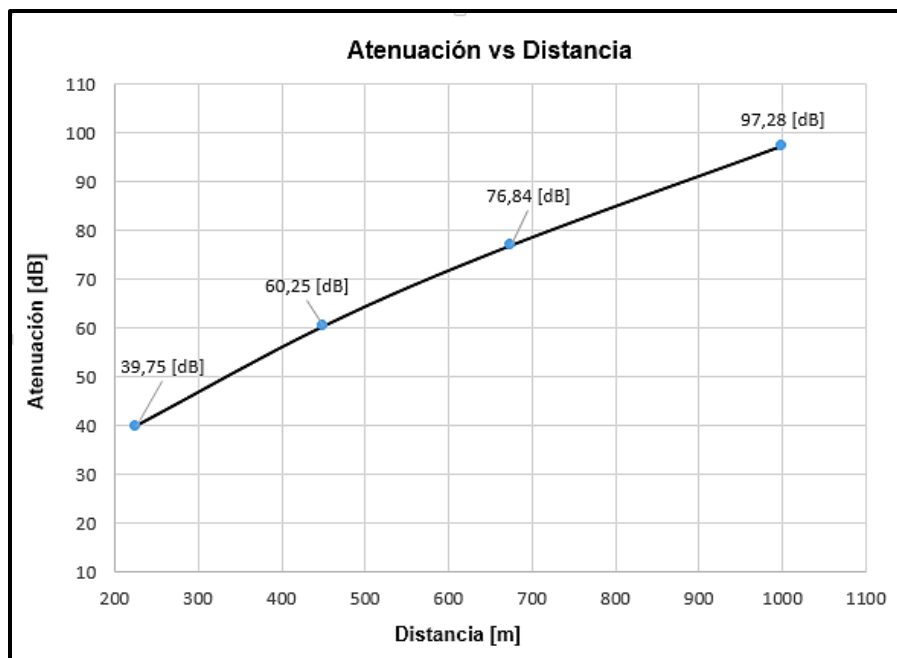
En la figura 3.14 se muestra la gráfica correspondiente a la atenuación versus la distancia de separación entre los dispositivos. Se visualizan los datos referentes a la atenuación que presentó el radioenlace debido al follaje existente en las plantaciones de cacao (NLOS).

Para una distancia de 225 metros y 450 metros se obtuvieron atenuaciones iguales a 39.75 [dB] y 60.25 [dB], respectivamente. A 675 metros se presentó un valor de 76.84 [dB] como

atenuación, de manera que a medida de que se aumentaba la distancia el valor de atenuación incrementa.

**Figura 3.14**

*Atenuación vs Distancia*



*Nota.* La figura muestra la gráfica de Atenuación vs Distancia dentro del entorno cacaotero.

### 3.5.4 SF vs Tiempo de aire consumido

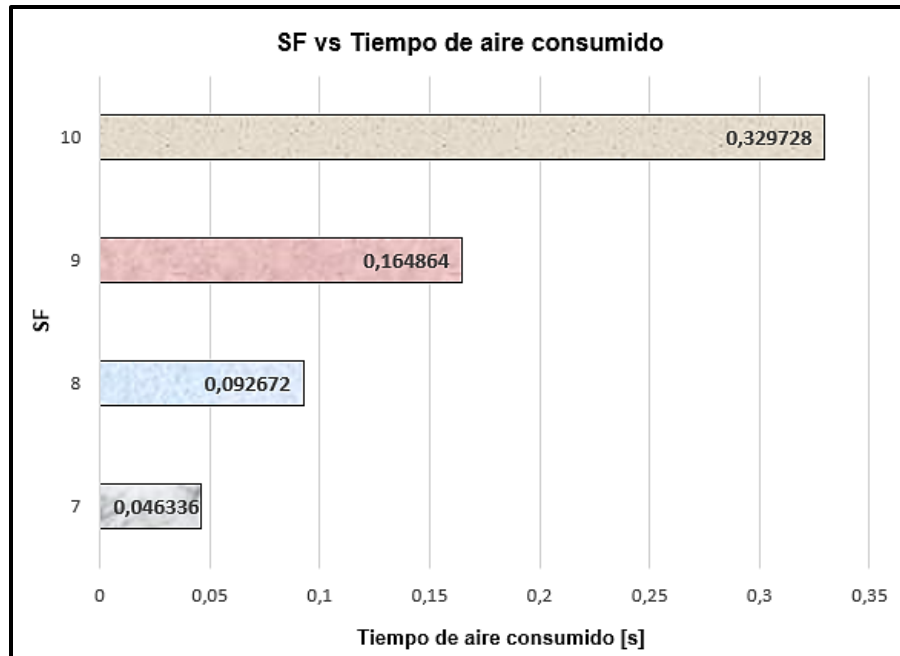
En la gráfica de la figura 3.15 se detallan los valores del tiempo de aire consumido (TOA) que hace referencia al tiempo en que tarda la señal desde que el TTGO LoRa32 la envía hasta que el Gateway la recibe. Con una carga útil de 2 bytes como dato de humedad del suelo y un ancho de banda de 125 KHz, se obtuvo un valor de TOA de 0.046336 [s] para un SF 7. Además, se observa que para un SF de 8 se alcanzó un valor del tiempo de aire igual a 0.092672 [s], mientras que para un SF igual a 9 el valor TOA fue de 0.164864 [s]. Finalmente, para un valor de SF igual a 10 se produjo un tiempo de aire consumido de 0.329728 [s]. Con una cantidad de datos (carga



útil) y un ancho de banda fijo se puede evidenciar que se requiere más tiempo en el aire al emplear un SF mayor.

**Figura 3.15**

*SF vs Tiempo de aire consumido*



*Nota.* La figura muestra la gráfica de los factores de propagación vs TOA.

## Capítulo 4

## 4. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se detallan las conclusiones y recomendaciones finales del proyecto, en donde se describen las interpretaciones generales de los datos obtenidos en las mediciones.

### 4.1 Conclusiones

- ❖ El funcionamiento de la tecnología LoRa fue puesto a prueba en condiciones ambientales características a un espacio destinado al cultivo de productos agrícolas como el cacao. Además, se logró configurar de manera exitosa los dispositivos que forman parte de la red de sensores LoRa. Esto se realizó al establecer una topología estrella con un salto único en donde el nodo se comunica exclusivamente con la puerta de enlace. Esta configuración garantiza la comunicación eficiente de los datos de agricultura (porcentaje de humedad del suelo) al servidor de la red, en este contexto.
- ❖ Se logró constatar la repercusión del factor de propagación en la comunicación de los datos. Específicamente, se determinó que el factor de propagación influyó en el tiempo de aire consumido, puesto que empleando un mayor factor de dispersión se tiene una velocidad de datos menor, lo cual significa que los datos pasan más tiempo en el aire. Es por esta razón, con un SF igual a 10 se produjo un tiempo en el aire de 0.329 [s] mientras que al reducir el SF a un valor de 7 se obtuvo un tiempo de 0.046 [s], es decir, a menor factor de propagación el tiempo de datos en el aire fue menor.
- ❖ Se comprobó con base en los resultados obtenidos que los parámetros RSSI y SNR cambiaban en función del factor de propagación y de las distancias establecidas en las pruebas de campo. Los valores de RSSI promedio con valores de SF iguales a 7, 8, 9 y 10 fueron mayores a -115 [dBm] con los alcances de 225, 450 y 675 metros. Aplicando los factores de propagación del 7 al 10 y considerando una distancia de 225 [m] se constató

que los datos correspondientes al SNR promedio fueron mayores o iguales a 1.2 [dB] mientras que con un alcance de 450 [m], el SNR obtenido fue mayor o igual que -4.45 [dB] a excepción del valor de -8.95 [dB] alcanzado con un factor de propagación de 10. Considerando un alcance de 675 [m] y un SF de 7 y 8 se obtuvo resultados mayores a -7 [dB], a excepción del factor de propagación 9 y 10 donde sus resultados fueron menores. Por lo tanto, para niveles de LoRaWAN se establece que un radioenlace es óptimo cuando el RSSI es mayor que -115 [dBm] y el SNR mayor que -7 [dB]. En general, se alcanzó un óptimo radioenlace a excepción de los SF 9 y SF 10 a una distancia de 675 [m] donde no cumple con lo estipulado.

- ❖ Al realizar una comparación considerando las distancias y factores de dispersión empleados con un ancho de banda de 125 [KHz] se constató que el SF de 8 en las distancias de 225 [m], 450 [m] y el SF de 7 a 675 [m] fueron los que presentaron mejores resultados de RSSI y SNR promedio.
- ❖ Con base en las mediciones de campo realizadas en un entorno cacaotero se constató que al configurar en el dispositivo final un SF de 10 se obtuvo un mayor alcance. Aquel cambio en la configuración se ejecutó debido a que al encontrarse el nodo más alejado del Gateway se presentó una mayor atenuación a causa del follaje, de tal manera que con un factor de dispersión menor no se efectuaba la transmisión a una distancia mayor que 675 [m]. Por lo tanto, con este factor de dispersión se pudo comprobar que el alcance máximo entre los dispositivos fue de 1.1 [Km], sin embargo, el envío de los paquetes al servidor considerando esta distancia fue con una menor velocidad de datos y un mayor TOA.

## 4.2 Recomendaciones

- ❖ Las pruebas se efectuaron en un entorno con plantaciones de cacao empleando dispositivos LoRa, por lo que se recomienda a futuro realizar mediciones con esta misma tecnología pero en entornos bananeros, aplicando diferentes factores de propagación con la finalidad de analizar los efectos que se generan en el enlace, debido a que este tipo de plantación presenta características diferentes a las del cacao.
- ❖ Al momento de armar la puerta de enlace, tener en cuenta que se debe conectar la antena LoRa antes de que se conecte la fuente de alimentación a la toma de corriente, de esta manera evita que se pueda ocasionar algún daño en el dispositivo.
- ❖ En futuros trabajos se podría incrementar la altura del nodo o dispositivo final enviando una mayor carga útil de datos con la finalidad de poder experimentar el comportamiento del radioenlace con respecto a la velocidad de los datos y la latencia durante la transmisión.

## Referencias

- Ansah, M., Sowah, R., Melià-Seguí, J., Katsriku, F., Vilajosana, X., & Owusu, W. (2020). Characterising foliage influence on LoRaWAN pathloss in a tropical vegetative environment. *IET Wireless Sensor Systems*, 10(5), 198-207. <https://doi.org/10.1049/iet-wss.2019.0201>
- Anzum, R. (2021). Factors that affect LoRa Propagation in Foliage Medium. *Procedia Computer Science*, 194, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.10.068>
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, M. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- Cuomo, F., Campo, M., Caponi, A., Bianchi, G., Rossini, G., & Pisani, P. (2017). EXPLoRa: Extending the performance of LoRa by suitable spreading factor allocations. *2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2017.8115779>
- Hanes, D., Salgueiro, G., Grossetete, P., Barton, R., & Henry, J. (2017). *IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things*. Cisco Press. [https://www.google.com.ec/books/edition/IoT\\_Fundamentals/PCcmDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=Lora+algorithm+spreading+factor&pg=PT225&printsec=frontcover](https://www.google.com.ec/books/edition/IoT_Fundamentals/PCcmDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=Lora+algorithm+spreading+factor&pg=PT225&printsec=frontcover)
- Lluva, S. (2021). *Desarrollo de un sistema remoto de adquisición de datos basado en LoRaWAN para aplicaciones IoT* [Tesis de grado Politécnica Universidad de Alcalá].

UAH.

[https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/49540/TFM\\_Lluva\\_%20Plaza\\_2021.pdf](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/49540/TFM_Lluva_%20Plaza_2021.pdf)

Merino, J. (2019). *Despliegue y Evaluación de una Red On-Site LoRaWAN basada en The Things Network Stack versión 3* [Tesis de grado Universidad de Cantabria]. Unican.

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/17087/420136.pdf>

Moya, M. (2018). *Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos* [Tesis de grado Universidad Politécnica de Valencia]. RiuNet.

<https://riUNET.upv.es/bitstream/handle/10251/109791/Moya%20-%20Evaluación%20de%20pasarela%20LoRa/LoRaWAN%20en%20entornos%20urbano.pdf>

Perakovic, D., & Knapcikova, L. (2021). *Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures: 5th EAI International Conference, FABULOUS 2021, Virtual Event, May 6–7, 2021, Proceedings*. Springer Nature.

[https://www.google.com.ec/books/edition/Future\\_Access\\_Enablers\\_for\\_Ubiquitous\\_an/GRg0EAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=Spreading+Factors+Algorithm&pg=PA33&printsec=frontcover](https://www.google.com.ec/books/edition/Future_Access_Enablers_for_Ubiquitous_an/GRg0EAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=Spreading+Factors+Algorithm&pg=PA33&printsec=frontcover)

Pereira, J., Ojeda, V., Asanza, V., Lorente, L., & Peluffo, D. (2023). Design and implementation of an IoT control and monitoring system for the optimization of shrimp pools using LoRa technology. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 14 (no. 8), 263-272.

Pous, M. (2021). *Deploy a LoRa Basics Station gateway with TTN and balena*. balenaBlog.

[https://blog-balena-io.translate.goog/deploy-a-basics-station-lora-gateway-with-ttn-and-balena/?\\_x\\_tr\\_sl=auto&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=op&\\_x\\_tr\\_hist=true](https://blog-balena-io.translate.goog/deploy-a-basics-station-lora-gateway-with-ttn-and-balena/?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=op&_x_tr_hist=true)

RAKWireless. (2023). *Start and Mesh topology of LoRaWAN*. Pi Supply The Maker Emporium.

<https://uk.pi-supply.com/products/rak831-ft2232h-lora-gateway-concentrator-module-kit-sx1301>

RAKwireless Technology Limited. (2023). *RAK2287 Gateway Concentrator Module for LoRaWAN, SX1302 LoRa Core*. RAK IoT Made Easy.

<https://store.rakwireless.com/products/wislink-concentrator-module-sx1302-rak2287-lorawan?variant=41826859385030>

Rohde & Schwarz. (2019). *Characterization of LoRa Devices*. [PDF]. [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma295/1MA295\\_2\\_e\\_LoRa.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma295/1MA295_2_e_LoRa.pdf)

Semtech. (2020). *LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview*. [PDF]. [https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa\\_and\\_LoRaWAN-A\\_Tech\\_Overview-Downloadable.pdf](https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf)

SensingLabs. (2023). *Understand how RSSI and SNR are considered as good radio level*.

SensingLabs. <https://sensing-labs.com/f-a-q/a-good-radio-level/>

UNIT ELECTRONICS. (2023). *LYLYGO TTGO LoRa32 915 MHz V1.6.1*. UNIT

ELECTRONICS. <https://uelectronics.com/producto/lilygo-ttgo-lora32-915mhz-v1-6-1/>



Waret, A., Kaneko, M., Guitton, A., & El Rachkidy, N. (2019). LoRa Throughput Analysis With Imperfect Spreading Factor Orthogonality. *IEEE Wireless Communications Letters*, 8(2), 408-411. <https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2873705>

## Apéndice A. Crear cuenta en TTN y en balenaCloud

### A.1. Proceso para crear la cuenta en el servidor TTN

Se debe crear una cuenta en TTN para poder observar tanto el estado del Gateway como los paquetes recibidos al momento de la transmisión. Para ello, se debe acceder al siguiente enlace: <https://console.cloud.thethings.network/>. Posteriormente, en el campo denominado como “Ubicación del dispositivo o puerta de enlace” se procede a seleccionar “Ecuador”. Entre los clústeres existentes (Europa 1, América del Norte 1, Australia 1) se escoge América del Norte 1 (recomendado) debido a que trabaja a la frecuencia de 915 MHz. Luego aparecerá una ventana para poder iniciar sesión o para registrarse, en este caso, se selecciona la opción “Registrarse gratis”. A continuación, se coloca un nombre de usuario (ProyectoLoRa32), un correo (Proyecto\_LoRaWAN@hotmail.com) y una contraseña. Finalmente, se confirmará la cuenta a través del correo y se podrá iniciar sesión.

Figura A1

Cuenta en TTN

El diagrama ilustra el proceso de creación de una cuenta en TTN en dos etapas:

- Etapa 1: Selección de clúster y datos de usuario.** La pantalla muestra "Choose a network cluster" con el título "Ubicación del dispositivo". Se selecciona "Ecuador" en el campo "Device or gateway location". En la lista de clústeres, "North America 1 (recommended)" es el seleccionado. Se ingresan: "ProyectoLoRa32" en "Nombre de usuario", "Proyecto\_LoRaWAN@hotmail.com" en "Correo", y una contraseña en "Contraseña" y "Confirmar contraseña".
- Etapa 2: Bienvenida y opciones de registro.** La pantalla muestra "Welcome back, proyectolora32!". Se ofrecen opciones para "Para el registro de Gateways" (Go to gateways) y "Para el registro de nodos" (Go to applications).

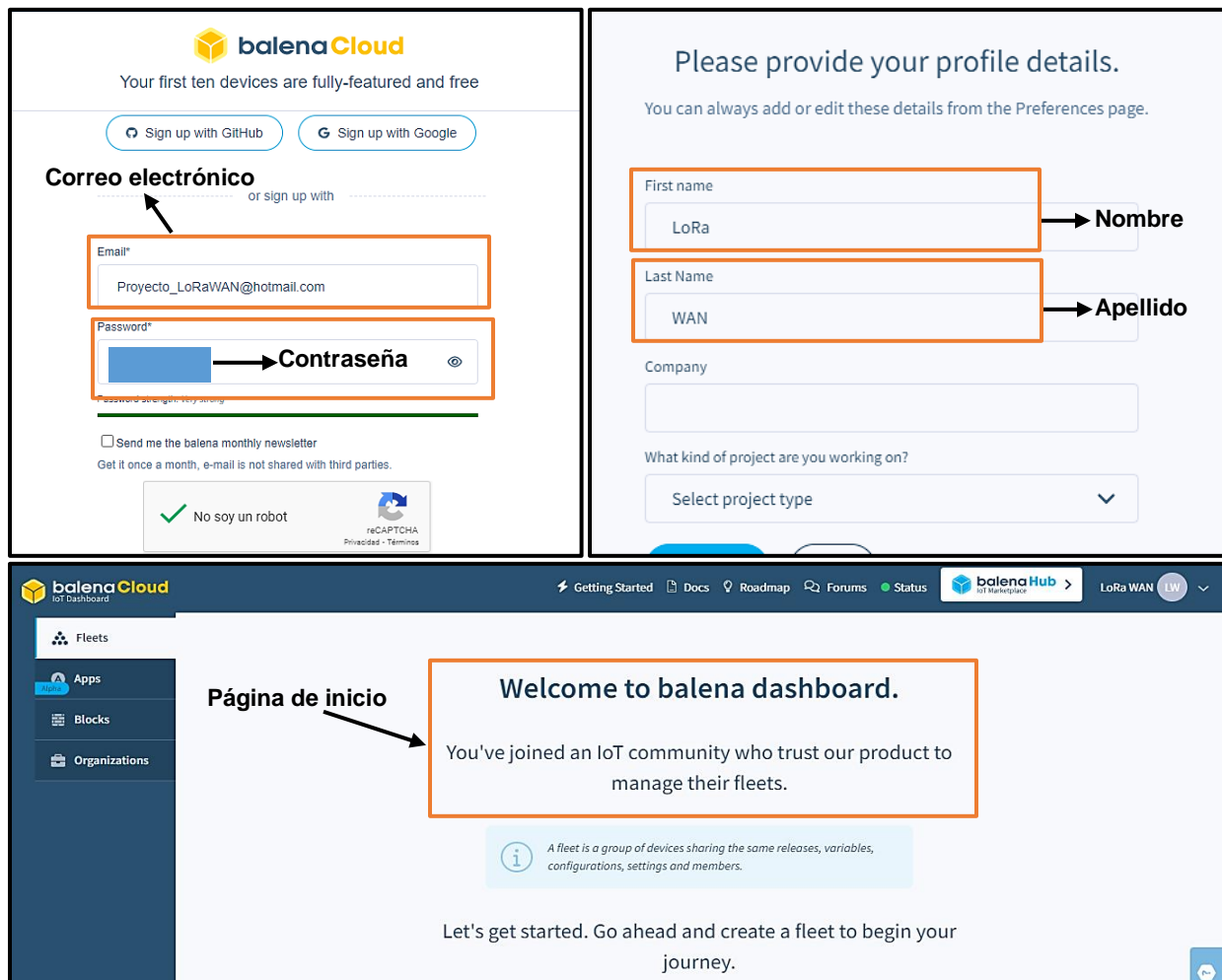
Nota. La figura muestra el proceso para crear una cuenta en TTN.

### A.2. Proceso para crear la cuenta en balenaCloud

Luego de haber creado una cuenta en TTN, se procede de forma similar a crear una cuenta en balenaCloud (Tablero IoT). Para poder crearla se debe acceder al siguiente enlace: <https://dashboard.balena-cloud.com/login>. Aparecerá una ventana para poder registrarse o iniciar sesión, en este caso se selecciona “Registrarse”. Cabe mencionar que también se puede acceder a través de una cuenta Google, sin embargo, para el proyecto se decidió registrarse a través de un correo electrónico y una contraseña. Finalmente, se verificó la cuenta a través de un link que llega al correo y se colocó un nombre y apellido (en este caso LoRa y WAN respectivamente).

**Figura A2**

*Cuenta en balenaCloud*



*Nota.* La figura muestra el proceso para crear una cuenta en balenaCloud.

### A.3. Proceso para crear aplicación y agregar dispositivo

Al obtener la cuenta en balenaCloud, se puede realizar el proceso denominado como ‘Crear aplicación e insertar el dispositivo’. Con un solo clic en balenaCloud se implementa de forma automática la aplicación, es decir, ya contiene el código elemental, elaborado por Marc Pous (2021), para la implementación de la puerta de enlace.

**Figura A3**

*Proceso de crear aplicación*

The screenshot shows the 'Create and deploy to fleet' interface in balenaCloud. The form is titled 'Create and deploy to fleet' and includes a link 'Use an existing fleet instead'. The 'Organization' field is set to 'projecto\_lorawan's Organization'. The 'Fleet' field contains 'estacionbasican1'. The 'Default device type' is set to 'Raspberry Pi 4 (using 64bit OS)'. There is a 'Show discontinued device types' checkbox and an 'Advanced' toggle. The 'Create and deploy' button is highlighted with an orange box and labeled 'Crear e implementar'. The 'Cancel' button is also visible.

*Nota.* La figura muestra el proceso de crear la aplicación en balenaCloud. En este caso la placa o el tipo de dispositivo es la Raspberry Pi 4.

Como se visualiza en la figura A3, para el proceso de crear la aplicación se deben llenar los siguientes campos:

- Nombre de la aplicación (Ejemplo: estacionbasican1 - no usar tildes-)
- Tipo de dispositivo (Seleccionar Raspberry Pi 4 -using 64bit OS-)
- Luego hacer clic en Crear e Implementar (Create and Deploy)

Posteriormente, se debe agregar un dispositivo en la aplicación creada como se detalla en la figura A3.1. Para ello, se selecciona la opción “Agregar nuevo dispositivo” y se llena lo siguiente:

- Tipo de dispositivo (Raspberry Pi 4, el mismo que se colocó al crear la aplicación).
- Versión (Por defecto – recomendada).
- Conexión de red (sólo Ethernet o Wi-Fi + Ethernet). Si el Gateway se conecta a una red inalámbrica se deberá configurar el SSID y la contraseña.
- Dar clic en descargar la imagen de balenaOS.

**Figura A3.1**

*Agregar un nuevo dispositivo*

The screenshot shows the 'Add new device' interface. Key elements include:

- Device Type:** Raspberry Pi 4 (using 64bit OS)
- OS Type:** balenaOS
- Version:** 2.115.18+rev2 (recommended)
- Edition:** Production (selected)
- Network Connection:** Wifi + Ethernet (selected)
- Flash Options:** Download balenaOS (~182 MB) (selected)

Instructions on the right side:

- 1 Use the form on the left to configure and download the balenaOS image for your new device.
- 2 Insert the SD card to the host machine.
- 3 Write the balenaOS file you downloaded to the SD card, we recommend using Etcher.
- 4 Wait for writing of balenaOS to complete.
- 5 Remove the SD card from the host machine.
- 6 Insert the freshly flashed SD card into the Raspberry Pi 4 (using 64bit OS).
- 7 Connect power to the Raspberry Pi 4 (using the power supply).
- 8 Your device should appear in your fleet in a few minutes. Have fun!

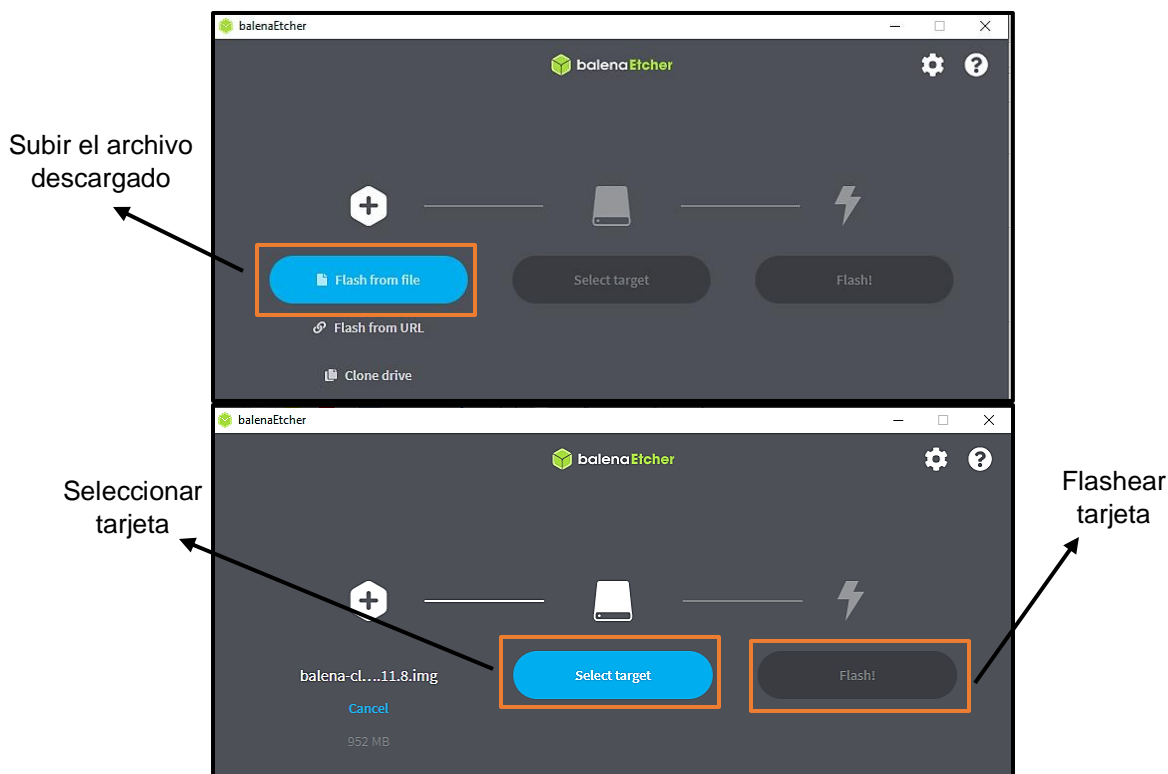
*Nota.* La figura muestra el proceso para agregar un nuevo dispositivo. En este caso la conexión de red se la puede realizar vía Ethernet o Wi-Fi.

**Flashear la tarjeta SD con balenaEtcher.** Cuando finaliza la descarga de la imagen de balenaOS (que básicamente se trata de un archivo con extensión “.zip”), se procede con la

instalación de balenaEtcher accediendo al siguiente enlace: <https://etcher.balena.io/>. Posteriormente, se abre la aplicación tal como se detalla en la figura A3.2 y se selecciona “Flash from file” para escoger la imagen balenaOS (archivo zip). Finalmente, se selecciona la tarjeta y se da clic en la opción “Flash”.

**Figura A3.2**

*Proceso de flashear (tarjeta SD)*



*Nota.* La figura muestra el proceso “flashear” en la tarjeta SD. En este caso la tarjeta SD debe estar ingresada en la computadora para que pueda ser reconocida.

Se extrae la tarjeta SD de la Pc y se la inserta en la Raspberry Pi 4 para poder conectar el dispositivo con la fuente de alimentación. Al encenderse el dispositivo se conectará tanto a la red como a balenaCloud de forma automática, en donde en éste último se podrá visualizar que el dispositivo se encuentra en línea. Al cargarse el dispositivo generará automáticamente en balenaCloud una etiqueta (“eui”) indispensable para el registro del Gateway al TTN. Cabe

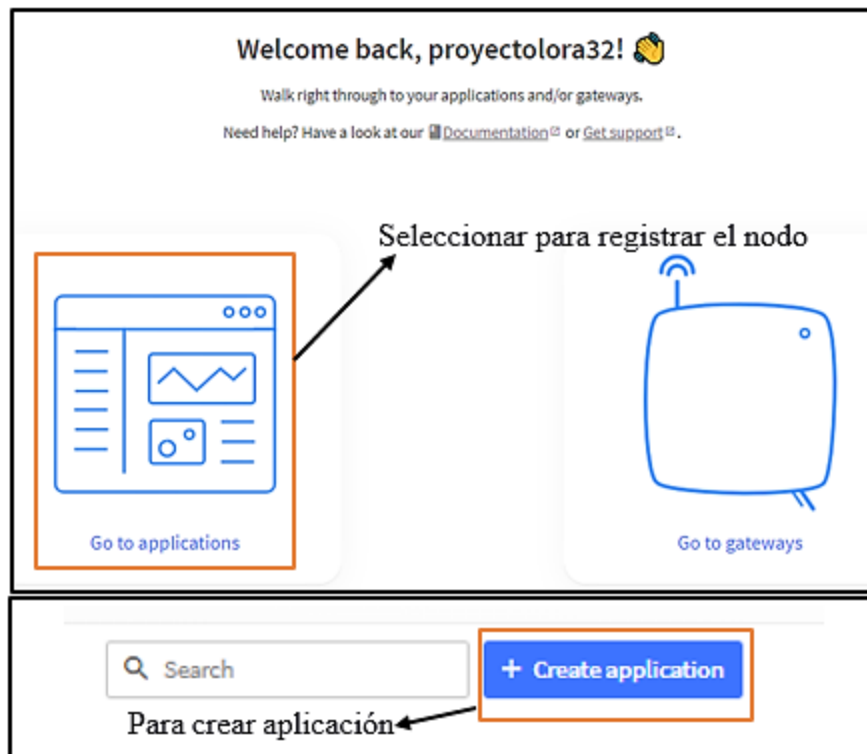
mencionar que para registrar la puerta de enlace a TTN se debe conocer la interfaz de usuario de la puerta de enlace, es por esto que se debe copiar el “eui” obtenido en balenaCloud.

#### A.4. Proceso de registro del TTGO LoRa32

Para efectuar el proceso se debe acceder la cuenta creada en TTN (misma que fue creada para el registro de la puerta de enlace). Posteriormente, se debe seleccionar la opción “Go to applications” y dar clic en “Create application” para realizar el proceso de crear la aplicación como se detalla en la figura A4.

**Figura A4**

*Registro del TTGO LoRa*



*Nota.* La figura muestra los primeros pasos a realizar para el registro del nodo. Se debe tener una cuenta en TTN para ejecutar el proceso.

Al seleccionar crear aplicación aparece una ventana para poder llenar los campos que se detallan en la figura A4.1. El primer campo corresponde a la identificación de la aplicación (Application ID), en este caso se colocó “nodottgo” (no se aceptan mayúsculas). Luego se tiene el

campo “Application name” para poder ingresar un nombre (por ejemplo: “ttgoenddevices”). Finalmente, se puede ingresar una breve descripción del dispositivo.

**Figura A4.1**

*Información correspondiente al nodo*

The image shows a screenshot of a web form titled "Create application". The form contains three input fields: "Application ID\*", "Application name", and "Description". The "Application ID\*" field contains the text "nodottgo", the "Application name" field contains "ttgoenddevices", and the "Description" field contains "Dispositivo Final LoRa". Below the "Description" field is a note: "Optional application description; can also be used to save notes about the application". At the bottom of the form is a blue button labeled "Create application".

Annotations with arrows point from the input fields to labels on the right:

- From "Application ID\*" to "Identificación de la aplicación"
- From "Application name" to "Nombre de la aplicación"
- From "Description" to "Descripción"
- From the "Create application" button to "Crear aplicación"

*Nota.* La figura muestra los campos que se deben llenar para el proceso de crear la aplicación.

Una vez creada la aplicación, se procede a realizar el registro del dispositivo final. Para ello se selecciona “End devices” y se elige la opción “Enter end device specifics manually” para ingresar las especificaciones del dispositivo de forma manual.

A continuación, se selecciona la banda de frecuencia y la versión LoRaWAN como se observa en la figura A4.2. La banda de frecuencia depende de la región, de manera que en este caso para Ecuador se selecciona la banda comprendida entre 902 a 928 MHz.



**Figura A4.2**

*Registro del dispositivo final (TTGO LoRa32)*

Register end device

Does your end device have a LoRaWAN<sup>®</sup> Device Identification QR Code? Scan

Scan end device QR code Device registration help

End device type

Input method

Select the end device in the LoRaWAN Device Repository

Enter end device specifics manually

Frequency plan \*  
United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN)

LoRaWAN version \*  
LoRaWAN Specification 1.0.4

Regional Parameters version \*  
RP002 Regional Parameters 1.0.3

Versión LoraWAN

Frecuencia

*Nota.* La figura muestra el registro del TTGO LoRa32. Campos configurados: La frecuencia y la versión LoRaWAN.

Se selecciona el protocolo de activación que se va a utilizar. Entre los dos modos de activación se eligió la activación por aire (OTAA) tal como se muestra en la figura A4.3.

**Figura A4.3**

*Modo de Activación*

Show advanced activation, LoRaWAN class and cluster settings ^

Activation mode

Over the air activation (OTAA)

Activation by personalization (ABP)

Define multicast group (ABP & Multicast)

Protocolo de activación

Additional LoRaWAN class capabilities

None (class A only)

Network defaults

Use network's default MAC settings

*Nota.* La figura muestra el protocolo de activación empleado (OTAA).

Finalmente, como se observa en la figura A4.4 se detallan los diversos parámetros que son generados de manera hexadecimal, donde los datos de los parámetros tales como: El DevEUI, el AppKey, la ID del dispositivo final servirán para el proceso de configuración del nodo.

**Figura A4.4**

*Parámetros generados en el registro del nodo*

DevEUI \*  
70 B3 D5 7E D0 05 FF 04 → Generate 1/50 used → DevEUI

AppKey \*  
81 A3 C8 57 77 3A E5 4A FC F3 06 D9 B1 A4 19 28 → Generate → AppKey

End device ID \*  
eui-70b3d57ed005ff04 → ID del dispositivo final  
This value is automatically prefilled using the DevEUI

After registration

View registered end device  
 Register another end device of this type

Register end device → Registro del nodo

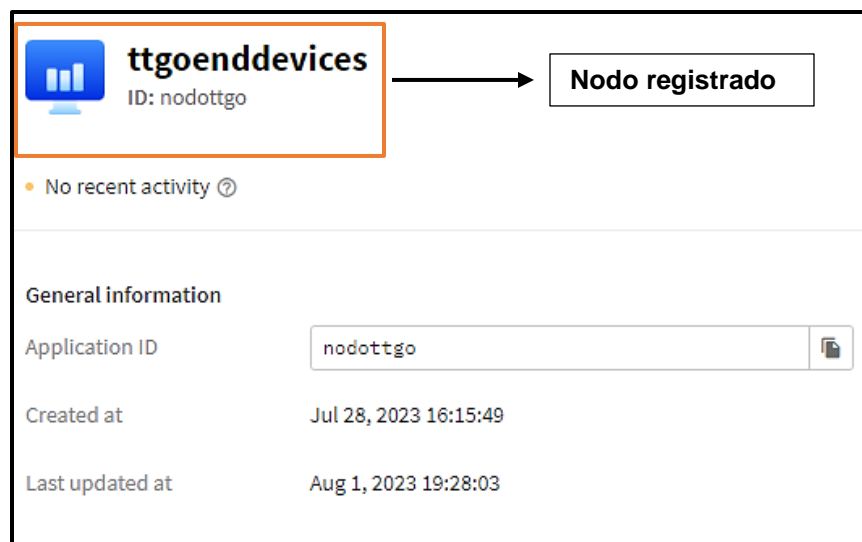
*Nota.* La figura muestra los parámetros a considerarse para el registro del TTGO LoRa32.

**Descripción general del registro final del nodo.** Existen dos métodos de activación. El primer método es por medio de la activación por personalización (ABP), se caracteriza por ser un método simple pero no seguro. El siguiente método que puede emplearse para el registro de los nodos es por activación por aire (OTAA), donde los parámetros que emplea son los siguientes: El AppEUI que se basa en un identificador único de 64 bits, empleado con la finalidad de clasificar los dispositivos por la aplicación a la que integra. Finalmente, el Appkey maneja una clave denominada AES de 128 bits y es usada para establecer la clave de sesión (Merino, 2019).

Empleando cada uno de estos parámetros, el nodo TTGO LoRa32 enviará datos a la puerta de enlace (Raspberry Pi 4 + RAK2287) con la finalidad de validar los datos correspondientes a la sesión. Cada uno de estos parámetros servirán para el proceso de configuración del nodo. Cabe resaltar que para el proyecto se empleó el modo OTAA para su registro. En la figura A4.5 se visualiza el dispositivo final registrado en el servidor de red.

#### Figura A4.5

*Registro final del TTGO LoRa32 (Nodo)*



*Nota.* La figura muestra el TTGO LoRa32 registrado en el servidor de red (TTN) con todos los parámetros generados.

## Apéndice B. Dispositivos, montaje y medición

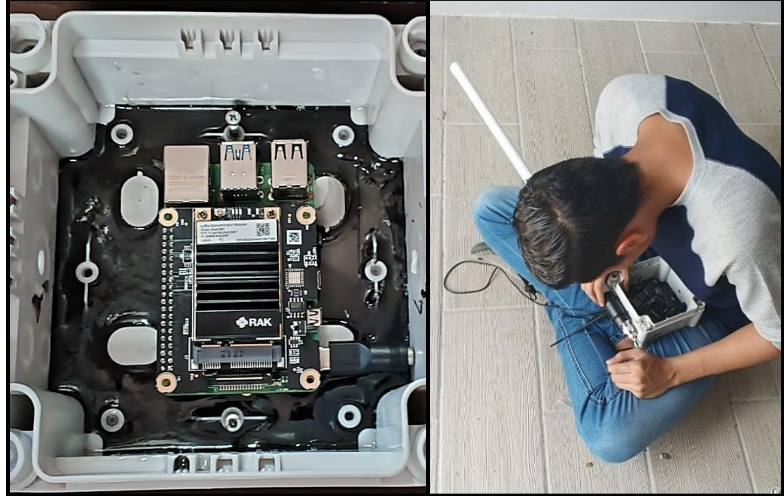
**Figura B1**

*Módulo RAK2287 y Raspberry Pi 4*



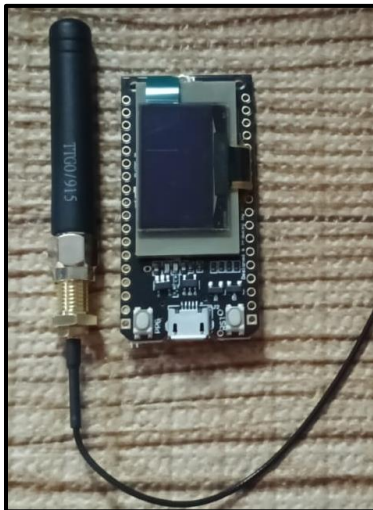
**Figura B2**

*Montaje de la puerta de enlace*



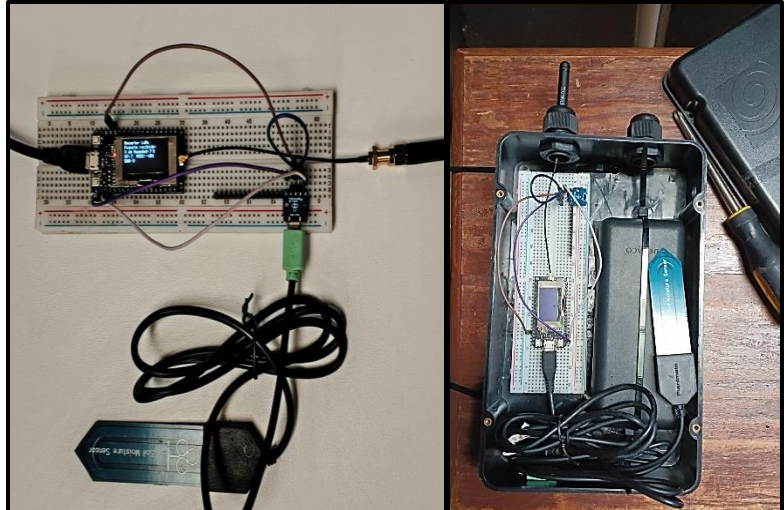
**Figura B3**

*TTGO LoRa32*



**Figura B4**

*Montaje del nodo*





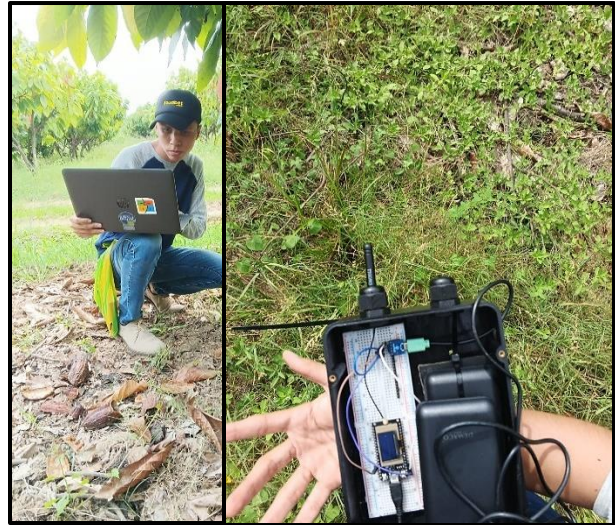
**Figura B5**

*Conexiones e implementación de la puerta de enlace*



**Figura B6**

*Configurando el SF en el nodo*



**Figura B7**

*Mediciones al interior de las plantaciones de cacao*



**Figura B8**

*Verificando los paquetes en el servidor*

