



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Diseño de una red LPWAN basada en tecnología LoRa para las  
estaciones hidrometeorológicas”

**INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO/A EN TELECOMUNICACIONES**

LOURDES ALEXANDRA VERA MEDINA

BYRON EDUARDO ZAVALA SOLEDISPA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

## DEDICATORIA

El presente proyecto va dedicado a nuestros padres, quienes han sido un digno ejemplo de superación y entrega, a través de sus enseñanzas hemos podido ver realizada nuestra meta.

A nuestros amigos quienes se han formado profesionalmente junto a nosotros y nos han brindado su amistad y ayuda desinteresadamente, por hacer de este viaje una experiencia inolvidable.

A todas aquellas personas que aportaron con su conocimiento e ideologías durante el desarrollo de este arduo trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más sincero agradecimiento va dirigido a Dios, quien nos guiado en cada paso de nuestras vidas, gracias a Él hemos obtenido la fuerza e inteligencia necesaria para superar cada dificultad que se nos ha presentado a lo largo de nuestra carrera. A nuestros padres, quienes han sido un pilar fundamental, brindándonos su confianza y apoyo incondicional, con su amor, esfuerzo y dedicación, hemos logrado culminar con nuestros estudios.

Un agradecimiento especial a nuestro tutor Msc. Juan Manuel Romero Arguello, quien con su conocimiento y experiencia nos ha ayudado a que este proyecto tenga un contenido de excelencia.

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y 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"

---

Lourdes Vera  
Medina

---

Byron Zavala  
Soledispa

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de una red LPWAN que establezca una comunicación entre estaciones meteorológicas, el cual marca un precedente para el Instituto Meteorológico e Hidrológico del Ecuador, ya que no todas sus estaciones tienen un sistema de transmisión de datos eficiente. La base de esta investigación está dirigida hacia la tecnología LoRa debido al impacto económico y social que tiene en países de tercer mundo.

Para el desarrollo de este diseño, se realizó un estudio de las zonas geográficas de las diferentes estaciones automáticas del INAMHI en el Ecuador, se identificó la ubicación y las limitaciones del terreno, a su vez este factor nos ayudó a la correcta elección de los módulos LoRa a implementarse en esta solución. Las pruebas fueron desarrolladas en un ambiente urbano en zonas elevadas de la provincia del Guayas, donde los datos receptados por los sensores se pueden visualizar a través del servidor Things of Networks y la plataforma Cayenne. Este trabajo está orientado al crecimiento de una red de bajo costo y consumo, lo que hace factible usarlo para diferentes operaciones genéricas de monitoreo y control.

*Palabras Claves: LPWAN, LoRa, Things of Networks, Cayenne.*

## **ABSTRACT**

*The present project has as objective the design of an LPWAN network that establish a communication between meteorological stations, which marks a precedent for the Meteorological and Hydrological Institute of Ecuador, being that not all its stations to have an efficient data transmission system. The basis of this research is directed toward LoRa Technology due the economic and social impact that it has in third world countries.*

*For the development of this design, it was made a study of the geographical zones of different automatic stations of the INAMHI in Ecuador, it was identified the location and limitations of the ground, in turn this factor helped us to the correct choice of the modules LoRa to be implemented in this solution. The tests were developed in an urban ambience in an elevated zone of the province of Guayas, where the data received by the sensors is visualized through the Things of Networks server and the Cayenne platform. This work is oriented to the growth of a low cost and consume network, which makes workable to use it for different generic monitoring and control operations.*

*Keywords: LPWAN, LoRa, Things of Networks, Cayenne.*

# ÍNDICE GENERAL

|   |      |
|---|------|
| RESUMEN.....  | I    |
| ABSTRACT.....   | II   |
| ABREVIATURAS.....                                     | V    |
| SIMBOLOGÍA.....                                       | VII  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                 | X    |
| CAPÍTULO 1.....                                       | 11   |
| 1. Introducción.....                                  | 11   |
| 1.1 Descripción del problema.....                     | 12   |
| 1.2 Justificación del estudio.....                    | 13   |
| 1.3 Objetivos.....                                    | 14   |
| 1.3.1 Objetivo General.....                           | 14   |
| 1.3.2 Objetivos Específicos.....                      | 14   |
| 1.4 Marco Teórico.....                                | 15   |
| 1.4.1 Redes LPWAN.....                                | 15   |
| 1.4.2 Tecnología LoRa.....                            | 15   |
| 1.4.3 Protocolo LoRaWan.....                          | 17   |
| CAPÍTULO 2.....                                       | 24   |
| 2. Diseño de la red lorawan.....                      | 24   |
| 2.1 Geografía de las estaciones meteorológicas.....   | 24   |
| 2.2 Diseño del nodo.....                              | 26   |
| 2.3 Diseño del gateway.....                           | 28   |
| 2.4 Estructura del servidor.....                      | 29   |
| 2.5 Diseño del radioenlace.....                       | 31   |
| 2.5.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas..... | 36   |

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| 2.5.2             | Diseño de red Guayas .....               | 38 |
| 2.5.3             | Diseño de red Cañar-Guayas .....         | 40 |
| 2.5.4             | Diseño de red Imbabura .....             | 42 |
| 2.5.5             | Diseño de red El Oro .....               | 44 |
| 2.5.6             | Diseño de red Loja-El Oro .....          | 46 |
| 2.5.7             | Diseño de red Pichincha .....            | 48 |
| CAPÍTULO 3.....   |  | 50 |
| 3.                | Recolección y Análisis de Datos.....     | 50 |
| 3.1               | Configuraciones iniciales.....           | 50 |
| 3.2               | Desarrollo de pruebas de cobertura ..... | 52 |
| 3.2.1             | Análisis de cobertura nodo 1.....        | 54 |
| 3.2.2             | Análisis de cobertura nodo 1a.....       | 55 |
| 3.2.3             | Análisis de cobertura nodo 2.....        | 57 |
| 3.3               | Detalle de costos.....                   | 58 |
| CAPÍTULO 4.....   |  | 61 |
| 4.                | Conclusiones y recomendaciones .....     | 61 |
| BIBLIOGRAFÍA..... |  | 63 |
| ANEXOS.....       |  | 65 |



## ABREVIATURAS

|         |   |
|---------|---|
| ABP     | Activación por personalización                        |
| ADR     | Velocidad de datos adaptativa                         |
| BW      | Ancho de banda  |
| CRC     | Verificación por redundancia cíclica                  |
| Devaddr | Dirección del dispositivo                             |
| ESPOL   | Escuela Superior Politécnica del Litoral              |
| INAMHI  | Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología       |
| FCnt    | Contador de marco                                     |
| FCtrl   | Control de marco                                      |
| FHDR    | Encabezado de marco                                   |
| FOpts   | Opciones de marco                                     |
| FSK     | Modulación por desplazamiento de frecuencia           |
| GFSK    | Modulación por desplazamiento de frecuencia Gaussiana |
| GMSK    | Modulación por desplazamiento mínimo Gaussiano        |
| GPU     | Unidad de procesamiento gráfico                       |
| HDMI    | Interfaz multimedia de alta definición                |
| IOT     | Internet de las cosas                                 |
| ICSP    | Programación serial en circuito                       |
| IP      | Protocolo de internet                                 |
| ISM     | Industrial, científica y médica                       |
| ISP     | Programación en el sistema                            |
| LPWAN   | Redes de baja potencia y área amplia                  |
| MAC     | Control de acceso a medios                            |
| MHDR    | Cabecera MAC  |
| MIC     | Código de integridad del mensaje                      |
| MSK     | Modulación por desplazamiento mínimo                  |
| M2M     | Máquina a máquina                                     |
| OTAA    | Activación por aire                                   |
| PHDR    | Encabezado físico                                     |
| PWM     | Modulación por ancho de pulsos                        |
| RAM     | Memoria de acceso aleatorio                           |

|      |                                  |
|------|----------------------------------|
| RSSI | Fuerza de la señal recibida      |
| SNR  | Relación señal a ruido           |
| SSM  | Modulación de espectro expandido |
| TTN  | Redes de las cosas               |
| UHF  | Frecuencia ultra alta            |
| VHF  | Frecuencia muy alta              |
| VPN  | Red virtual privada              |
| USB  | Bus Universal en Serie           |

## SIMBOLOGÍA

|      |                      |
|------|----------------------|
| A    | Amperio              |
| dB   | Decibelios           |
| dBm  | Decibelio-milivatio  |
| Hz   | Hertz                |
| Kbps | Kilobits por segundo |
| Km   | Kilometro            |
| m    | Metro                |
| mA   | Miliamperio          |
| mm   | Milímetro            |
| mV   | Milivoltio           |
| mW   | Milivatio            |
| MHz  | Mega Hertz           |
| V    | Voltio               |
| W    | Vatios               |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 Sistema de espectro ensanchado .....                     | 16 |
| Figura 1.2 Clase de dispositivos LoRaWan .....                      | 18 |
| Figura 1.3 Arquitectura de red LoRaWan .....                        | 19 |
| Figura 1.4 Uplink PHY .....   | 20 |
| Figura 1.5 Downlink PHY.....  | 20 |
| Figura 1.6 Estructura PHY Payload.....                              | 21 |
| Figura 1.7 Estructura MAC Payload .....                             | 21 |
| Figura 1.8 Estructura del encabezado.....                           | 21 |
| Figura 2.1 Estaciones automáticas meteorológicas del Ecuador .....  | 25 |
| Figura 2.2 Esquema de transmisión con Dragino LoRa Shield .....     | 27 |
| Figura 2.3 Esquema de recepción LoRa gateway .....                  | 28 |
| Figura 2.4 LoRa gateway en Raspberry Pi 3B.....                     | 28 |
| Figura 2.5 Registro del nodo en TTN .....                           | 30 |
| Figura 2.6 Claves de acceso para los nodos.....                     | 31 |
| Figura 2.7 Zonas de Fresnel [10].....                               | 34 |
| Figura 2.8 Ubicación de las estaciones meteorológicas.....          | 36 |
| Figura 2.9 Red Guayas .....   | 38 |
| Figura 2.10 Perfil topográfico red Guayas .....                     | 39 |
| Figura 2.11 Red Cañar-Guayas.....                                   | 40 |
| Figura 2.12 Perfil topográfico red Cañar-Guayas .....               | 41 |
| Figura 2.13 Red Imbabura.....                                       | 42 |
| Figura 2.14 Perfil topográfico red Imbabura .....                   | 43 |
| Figura 2.15 Red El Oro.....   | 44 |
| Figura 2.16 Perfil topográfico red El Oro .....                     | 45 |
| Figura 2.17 Red Loja-El Oro.....                                    | 46 |
| Figura 2.18 Perfil topográfico red El Oro -Loja .....               | 47 |
| Figura 2.19 Red Pichincha .....                                     | 48 |
| Figura 2.20 Perfil topográfico Pichincha .....                      | 49 |
| Figura 3.1 Configuración del Putty .....                            | 51 |
| Figura 3.2 Verificación de conexión gateway .....                   | 51 |
| Figura 3.3 Verificación de comunicación entre gateway y nodos ..... | 52 |

Figura 3.4 Mapa de cobertura en la provincia del Guayas .....53

Figura 3.5 Datos de temperatura y humedad nodo 1 .....54

Figura 3.6 Datos de RSSI y SNR del nodo 1 .....55

Figura 3.7 Datos de temperatura y humedad nodo 1a .....56

Figura 3.8 Datos de RSSI y SNR del nodo 1a.....56

Figura 3.9 Datos de temperatura y humedad nodo 2 .....57

Figura 3.10 Datos de RSSI y SNR del nodo 2.....58

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1 Canales y rangos de frecuencia .....                           | 17 |
| Tabla 1.2 Mensajes LoRaWan .....   | 22 |
| Tabla 2.1 Distribución de estaciones meteorológicas.....                 | 25 |
| Tabla 2.2 Coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas ..... | 37 |
| Tabla 2.3 Cálculos de enlace Guayas .....                                | 39 |
| Tabla 2.4 Cálculos de enlace Cañar-Guayas .....                          | 42 |
| Tabla 2.5 Cálculos de enlace Imbabura .....                              | 43 |
| Tabla 2.6 Cálculos de enlace El Oro .....                                | 45 |
| Tabla 2.7 Cálculos de enlace Loja-El Oro .....                           | 47 |
| Tabla 2.8 Cálculos de enlace Pichincha .....                             | 49 |
| Tabla 3.1 Ubicación de la red de prueba .....                            | 52 |
| Tabla 3.2 Presupuesto de la solución.....                                | 58 |
| Tabla 3.3 Resumen Diseño de enlaces .....                                | 59 |
| Tabla 3.4 Presupuesto Total.....   | 59 |

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Ecuador es uno de los países con mayor biodiversidad en el mundo, sus diversos paisajes abarcan costa, las zonas altas andinas, la selva de las amazonas y las islas Galápagos. Tiene las más altas concentraciones de ríos por km<sup>2</sup>, con 22 montañas de más de 3.500 metros de altitud que están todas en los Andes, 9 de ellas son volcanes potencialmente activos, lo que exaltó la necesidad de que un ente técnico-científico se encargue de la difusión de información sobre humedad, temperatura, precipitación, dirección del viento entre otros. Actualmente estos parámetros son analizados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador, que consta de 65 estaciones automáticas desplegadas por todo el país, de las cuales existe un grupo de estaciones meteorológicas que presentan inconvenientes de transmisión en su sistema de comunicación, como el retraso en la obtención de datos, debido a la baja velocidad de la red GPRS, así como por la recolección manual de información en ciertas estaciones, por lo que la utilización de nuevas tecnologías se hace evidente para el desarrollo social y también económico, ya que el país en los últimos años ha incursionado en el campo de las energías renovables, dando paso al uso de la energía limpia mediante la explotación de sus recursos en proyectos hidroeléctricos, eólicos y fotovoltaicos [1].

La mayoría de estas estaciones están alejadas entre sí, lo que trae como resultado que no sea fácil obtener esta información en tiempo real desde cualquier ubicación. Nuestro trabajo está enfocado en el despliegue de una red LPWAN (redes de baja potencia y área amplia) con tecnología LoRa, conocida como LoRaWAN, la cual ofrece un sistema de comunicación inalámbrico de largo alcance y bajo costo, esta red es usada particularmente para monitoreo de sensores. Además, una de las características más relevante es la utilización del espectro en bandas ISM (Industrial, científica y médica) y larga duración de los dispositivos conectados a la red a través de baterías.

El presente proyecto integrador está estructurado de la siguiente manera:

*Capítulo 1 Preliminares*, corresponde a la introducción sobre el proyecto, planteamiento del problema, justificación de este estudio y un breve marco teórico, en donde encontrarán definiciones y características principales, así como lo necesario para comprender el desarrollo de los siguientes capítulos.

*Capítulo 2 Diseño del prototipo* corresponde a la distribución geográfica de las estaciones meteorológicas, descripción de los componentes inmersos en el desarrollo de la red, y los cálculos teóricos necesarios para la comunicación establecida.

*Capítulo 3 Recolección y Análisis de Datos* presenta los resultados de las pruebas de cobertura realizadas en un ambiente urbano, así como el proceso desarrollado en cada etapa para establecer la comunicación, acompañado de un análisis de costos de esta solución.

Luego de todo el desarrollo del proyecto, finalmente se encontrarán las conclusiones y recomendaciones sobre todo lo expuesto en esta investigación, a su vez los anexos pertinentes con guías y configuración de los componentes que conforman la red.

## **1.1 Descripción del problema**

El INAMHI proporciona el servicio Meteorológico e Hidrológico Nacional del Ecuador y está encargado de vigilar y predecir el comportamiento de la atmósfera y las aguas interiores [2], uno de sus deberes más importantes es salvaguardar la vida en todos sus aspectos, evitar daños materiales y cuidar el medio ambiente, generando información sobre el clima, agua y tiempo de manera casi inmediata con el fin de difundir certeramente alertas tempranas en caso de posibles catástrofes [3]. Sin embargo, existen factores de conectividad en los cuales se puede identificar el retraso en la obtención de



información adquirida por los sensores ubicados en las estaciones automáticas meteorológicas, ya que las estaciones transmiten con tecnología GPRS, la cual es manejada por una operadora celular, generando costos mensuales para la institución que actualmente tiene limitaciones presupuestarias, además de ello esta tecnología ya está por discontinuarse.

No obstante, más allá del problema monetario, existen estaciones meteorológicas que aún no transmiten, lo que conlleva que cada vez que se necesiten los datos en aquellas estaciones se envíe al personal especializado a lugares de difícil acceso, ocasionando costos y retraso en la generación de reportes de pronósticos o alertas.

## **1.2 Justificación del estudio**

Las estaciones meteorológicas automáticas están conectadas por medios de comunicaciones satelital (INMARSAT y HISPASAT -Compañías que proveen soluciones de Servicios Satelitales), vía GPRS (Claro y Movistar) y otras estaciones no operativas, las cuales están denominadas de esta manera ya que no transmiten de forma inalámbrica, en la que los datos se recolectan en sitio mediante una tarjeta SD [3], debido a que estas estaciones se encuentran sin transmisión alguna, provocando un decremento en la confiabilidad de predicciones por los retrasos en los reportes de pronósticos o alertas.

Teniendo en cuenta que el INAMHI, debe mejorar la conectividad de sus estaciones, se evidencia la necesidad de realizar nuestro estudio con una nueva tecnología inalámbrica de RF basada en redes LPWAN, esta tecnología utiliza la modulación por espectro ensanchado, la cual se ha convertido en uno de los componentes fundamentales de los sistemas inalámbricos actuales y de próxima generación, debido al uso múltiple de la misma banda de frecuencia y la resistencia a la interferencia. Los dispositivos LoRa presentan una superioridad con respecto a las demás tecnologías por su gran alcance y bajo consumo energético, características que impulsaron a países de América

del Norte y Europa implementar el despliegue de la red LoRaWAN con acceso público [4]. Estudios realizados en diversos proyectos, confirman las características de largo alcance y menor consumo energético resultando adecuado para la transmisión de datos de sensores.

Es por ello, que se evidencia el uso de este tipo de tecnología para ampliar la cobertura de red de las estaciones meteorológicas, lo que nos faculta continuar con nuestro trabajo de fin de grado.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar una red LPWAN con protocolo de comunicación LoRaWAN, para transmisión inalámbrica y almacenamiento de datos en la nube.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Comprender la tecnología LoRa, con sus especificaciones y limitaciones, para su incorporación en las estaciones meteorológicas.
- Seleccionar las estaciones meteorológicas de acuerdo a la ubicación geográfica y densidad de puntos en el área de cobertura que tiene disponible la tecnología LoRa.
- Analizar perfil del terreno para establecer parámetros de conectividad y diseñar radioenlaces en las diferentes zonas geográficas de las estaciones.
- Definir qué dispositivos LoRa son factibles, mediante pruebas en una red prototipo para extender la cobertura de la señal RF.
- Desarrollar una interfaz gráfica alojada en una plataforma de almacenamiento en la nube para la visualización de datos.

## **1.4 Marco Teórico**

### **1.4.1 Redes LPWAN**

Las redes LPWAN, están diseñadas para manejar sistemas inalámbricos de área amplia. Se caracterizan por usar menos potencia que las redes WAN existentes y soportar gran cantidad de nodos para una sola estación base. Cabe recalcar que pueden ser manejadas con diferentes tecnologías, de las más notables se mencionan: Sigfox, LoRa/LoRaWan, NB-IoT, LTE Cat M, entre otras.

La velocidad de datos que ofrece esta red se encuentra entre 0.3 Kbps y 50 Kbps por canal y tiene un fuerte impacto en aplicaciones de IoT y M2M (máquina a máquina). Es por ello, que se cree que estas redes serán competencia para las compañías celulares, ya que ofrece mayores beneficios de conectividad por un mínimo costo de inversión.

### **1.4.2 Tecnología LoRa**

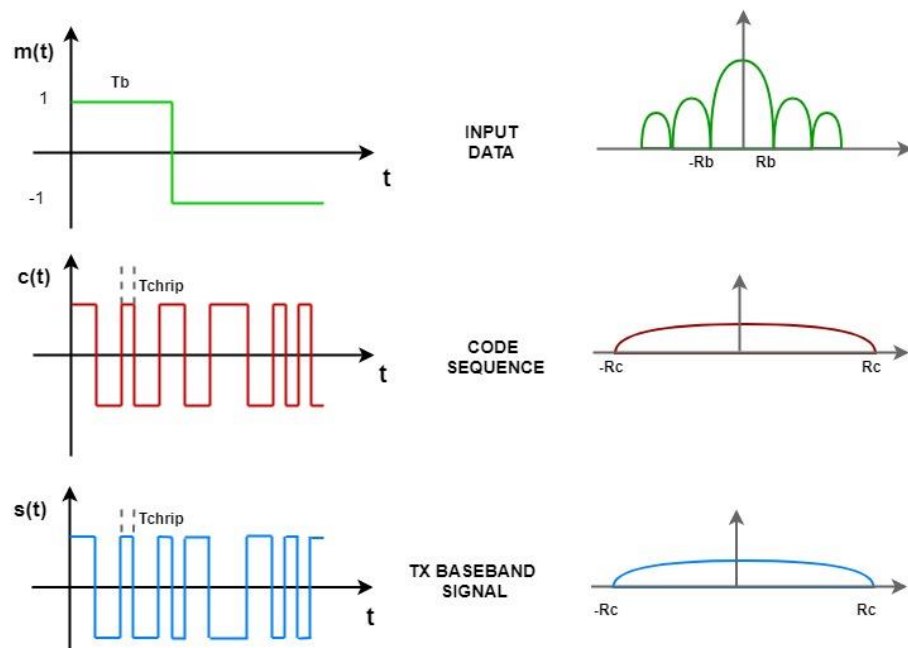
LoRa fue desarrollada por Semtech que define la especificación LoRaMAC (tecnología de capa física), cuyo protocolo es capaz de enviar pequeños paquetes de datos a largas distancias con un mínimo consumo de energía (LPWAN), lo que influyo fuertemente al desarrollo en aplicaciones IoT.

Dentro de las características que posee LoRa podemos mencionar:

- Topología estrella.
- Alcance de la red es de 15 a 20 km en línea de vista.
- Capacidad hasta un millón de nodos.
- Tasa de datos de 50 Kbps.
- Sensibilidad -168 dBm.
- Tolerancia alta a interferencias.
- Bajo consumo de energía (duración de baterías hasta 10 años).

La capa física de LoRa se basa en una modulación de espectro ensanchado (SSM), la cual permite que una señal sea transmitida en una banda de frecuencia más amplia que la mínima requerida para transmitir la información. LoRa dentro de su esquema utiliza una variante del espectro ensanchado llamada frecuencia por saltos moduladas o chirping, que está definida por un pulso llamado chirp, el cual al inicio de la transmisión tiene como objetivo barrer todas las frecuencias para ampliar el ancho del espectro, de este modo se evita concentrar toda la energía sobre la banda estrecha original.

Esta técnica consiste en multiplicar la señal de entrada por una secuencia de códigos mucho más rápida que propaga la señal base en un mayor ancho de banda como se ilustra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1 Sistema de espectro ensanchado**

LoRaWan puede transmitir en cualquier canal dentro de la banda ISM (Industrial, científica y médica). Esta tecnología ya ha sido implementada en dos regiones: Europa, en donde las bandas predominantes son 868 MHz

y 433 MHz, y América del Norte en donde se utiliza la banda de 915 MHz tal como se muestra en la Tabla 1.1.

Los nodos están restringidos por el ciclo de trabajo, es decir la relación que existe entre el tiempo que la señal se encuentra activa y el periodo de la misma, el cual está relacionado a la utilización de cada sub-banda en la modulación por espectro ensanchado, este factor es empleado para establecer el tiempo de emisión de cada sub-banda que no puede ser reutilizada durante un intervalo de tiempo, lo que hace que el sistema de comunicación sea menos propenso a interferencias.

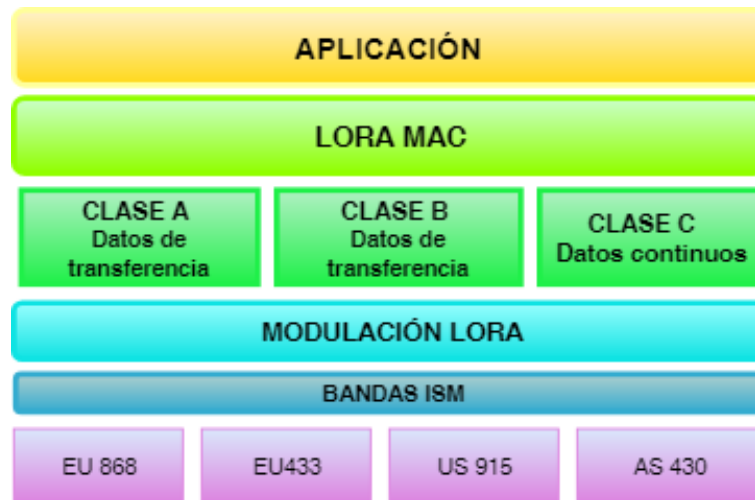
**Tabla 1.1 Canales y rangos de frecuencia**

| Parámetros          | Europa      | América del Norte |
|---------------------|-------------|-------------------|
| Banda de frecuencia | 867-869 MHz | 902-928 MHz       |
| Canales             | 16          | 72                |
| Canal Up            | 125/250 kHz | 125/500 kHz       |
| Canal Down          | 125 kHz     | 500 kHz           |
| Ciclo de trabajo    | 0.33%       | 0.33%             |

### 1.4.3 Protocolo LoRaWan

LoRaWan es un protocolo de comunicación MAC (control de acceso a medios), que posee una arquitectura basada en redes LPWAN, esta comunicación es totalmente bidireccional, lo cual permite a los concentradores o gateways recibir varios mensajes a la vez por sus diversos canales. Este protocolo de red puede emplear la modulación LoRa o FSK (modulación por desplazamiento de frecuencia) a nivel físico, con lo que los nodos no se comunican entre sí.

LoRaWAN en su especificación definen tres tipos de dispositivos, como se ilustra en la Figura 1.2. Todos los dispositivos LoRaWan poseen por defecto las funcionalidades de Clase A [5].



**Figura 1.2 Clase de dispositivos LoRaWan**

*Clase A:* En esta clase se establece una comunicación bidireccional, con la limitación de que solo pueden recibir datos siempre que se haya levantado una comunicación de manera anticipada. Tras cada transmisión de datos se abren dos ventanas de recepción, las cuales se abren de manera consecutiva. La primera ventana se presenta un segundo después de la transmisión y luego de ello se abre la segunda ventana, que está a la espera del mensaje de retorno.

*Clase B:* A diferencia de la Clase A, en esta clase si puede recibir mensajes sin necesidad de una conexión previa, ya que se puede configurar tiempos para abrir ventanas de recepción. Estos dispositivos tienen un consumo de energía superior debido a la recepción consecutiva a través de beacons, que envían un mensaje de broadcast lo cual permite la sincronización con el gateway.

*Clase C:* Tiempo de recepción continuo, siempre están disponibles para recibir mensajes, con la particularidad que las ventanas de recepción están cerradas cuando se encuentran transmitiendo.

## Arquitectura de Red

La topología de red es generalmente de estrella, en la que consta de dispositivos finales o nodos, concentradores o gateways, servidores en la nube y un servidor de aplicaciones, como muestra la Figura 1.3. Los nodos son el punto de recolección de datos, mediante estos se conectan los sensores, para luego dar paso a una comunican inalámbrica de un solo salto a uno o varios gateways, a través de diferentes frecuencias y tasas de datos.

El gateway se encarga primero de convertir el protocolo inalámbrico de capa física LoRa en protocolos de red IP (protocolo de internet) estándar, para luego retransmitir el paquete a un servidor de red central.

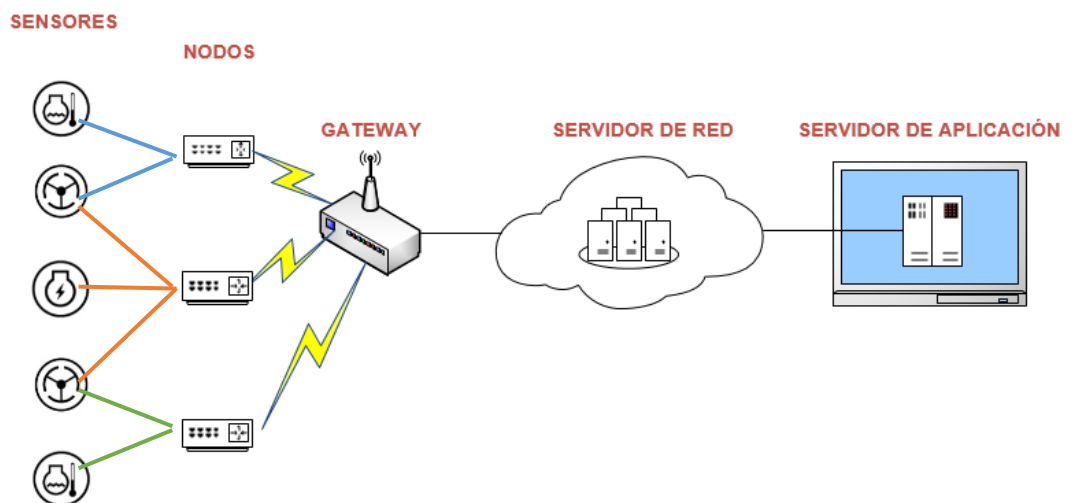


Figura 1.3 Arquitectura de red LoRaWan

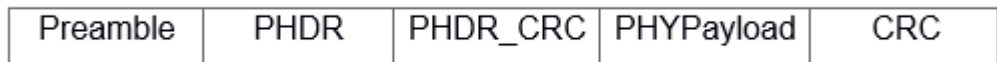
El servidor de red se encarga de los protocolos de capa superior, aplica filtros y políticas de seguridad, administra parámetros como velocidad de datos y la salida de RF (radiofrecuencia) para cada nodo. Finalmente, El servidor de aplicaciones se encarga de procesar los datos recolectados y mostrarlos gráficamente al usuario.

Para hacer factible una red en estrella de largo alcance, el gateway debe tener una capacidad muy alta para recibir mensajes desde un gran número

de nodos, esto se logra mediante el uso del SSM y el ADR (velocidad de datos adaptativa), la unión de esto crea varios canales de frecuencia a distintas velocidades, teniendo presente el intervalo de tiempo que conlleva transmitir el mensaje y el tamaño del mensaje.

### **Estructura de los mensajes**

LoRa establece una comunicación con dos tipos de mensajes de downlink y uplink. Los mensajes de uplink los envían los nodos al servidor de red atravesando uno o varios gateways, Los mensajes uplink constan con una cabecera de 8 bytes de longitud, acompañado del paquete de radio LoRa en el encabezado físico (PHDR y PHDR\_CRC) y el payload, que está protegida por un código de detección de errores CRC, tal como se muestra en la Figura 1.4.



**Figura 1.4 Uplink PHY**

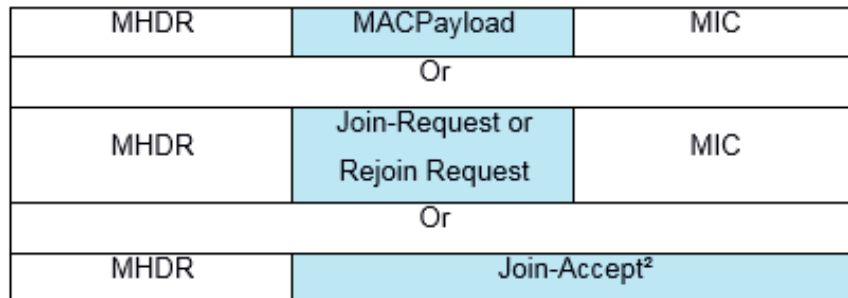
Los mensajes downlink se envían por el servidor de red a solo un nodo y es retransmitido por una única vía al gateway. El paquete es similar a la estructura uplink como se muestra en la Figura 1.5, con la diferencia de que la parte de datos reales transmitidos encontrados en el payload no consta del código CRC [6].



**Figura 1.5 Downlink PHY**

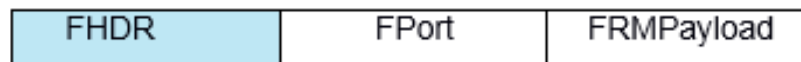
Todos los mensajes uplink y downlink llevan en la capa física del Payload (PHYPayload), un encabezado MAC que se compone de (MHDR), MACPayload y un código de integridad del mensaje (MIC), esta estructura esta descrita en la Figura 1.6. EL código MIC está representado por cuatro bytes que se calcula a partir de la Network Session key (NwkSKey).





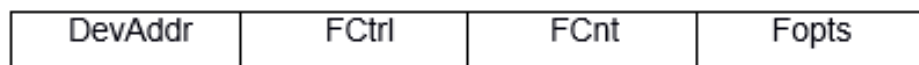
**Figura 1.6 Estructura PHY Payload**

La MACPayload lleva encabezamiento (FHDR), esta es la dirección de identificación del dispositivo, un puerto (FPort) que sirve para determinar si el payload (FRMPayload) contiene comandos MAC o de aplicación descritos en la Figura 1.7.



**Figura 1.7 Estructura MAC Payload**

El encabezamiento de la trama (FHDR) se muestra en la Figura 1.8, este contiene la dirección del dispositivo (DevAddr), bits de control FCtrl, este habilita el ADR, otro bit de cuenta FCnt que es un contador de tramas y campo de opciones (FOpts), para cuando se desee transmitir comandos MAC.



**Figura 1.8 Estructura del encabezado**

La cabecera MAC está definida por ocho tipos de mensajes de la capa LoRaWan que han sido codificados mediante tres bits de dígitos binarios, como se muestra en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2 Mensajes LoRaWan**

| Type | Description           |
|------|-----------------------|
| 000  | Join-request          |
| 001  | Join-accept           |
| 010  | Unconfirmed Data Up   |
| 011  | Unconfirmed Data Down |
| 100  | Confirmed Data Up     |
| 101  | Confirmed Data Down   |
| 110  | Rejoin-request        |
| 111  | Proprietary           |

Los dos primeros mensajes son de activación Join Request y Join Accept, se usan para habilitación de nodos por aire. Luego se encuentran los mensajes de confirmación (Confirmed Data Up/Down) o no (Unconfirmed Data Up/Down), usados en el transporte de comandos MAC. Finalmente están los mensajes propietarios, aquellos que son usados para especificaciones fuera de lo común. Adicional a estos, LoRaWan ha establecido un tipo de mensajes para futuros usos (Rejoin-request).

### **Seguridad del protocolo LoRaWAN**

La seguridad es esencial en todas las comunicaciones, con el fin de proteger los datos e información. LoRaWAN incluye dos niveles de seguridad, uno para la red y otro para la aplicación. Con esta forma se logra que la comunicación se realice de dispositivos autorizados y que éste no sea intervenido por elementos externos.

La autenticación mutua garantiza la seguridad del nodo en la red, el cual puede activarse mediante; activación por aire (OTAA) y activación por personalización (ABP), tanto el nodo como el servidor de red deben conocer la AppKey cuya clave es de 128 bits (AES 128) y el DevEUI que es un identificador EUI-64 [7].

La capa de seguridad de la aplicación protege los datos de la aplicación del usuario final, lo que evita que el operador de red no tenga acceso a la información, esto se logra con las soluciones habituales de seguridad como el protocolo HTTPS o conexiones VPN (redes virtuales privadas).

AES128 es un estándar avanzado de encriptación por bloques, el cual está basado en protocolo LoRaWan establece dos tipos de claves detalladas a continuación:

Network Session Key: clave que es enviada al servidor de red, protegiendo el contenido de los mensajes MAC que están al interior del paquete.

Application Session Key: esta clave asegura extremo a extremo, es decir una vez que llega al servidor, se escuda en los aplicativos.

# CAPÍTULO 2

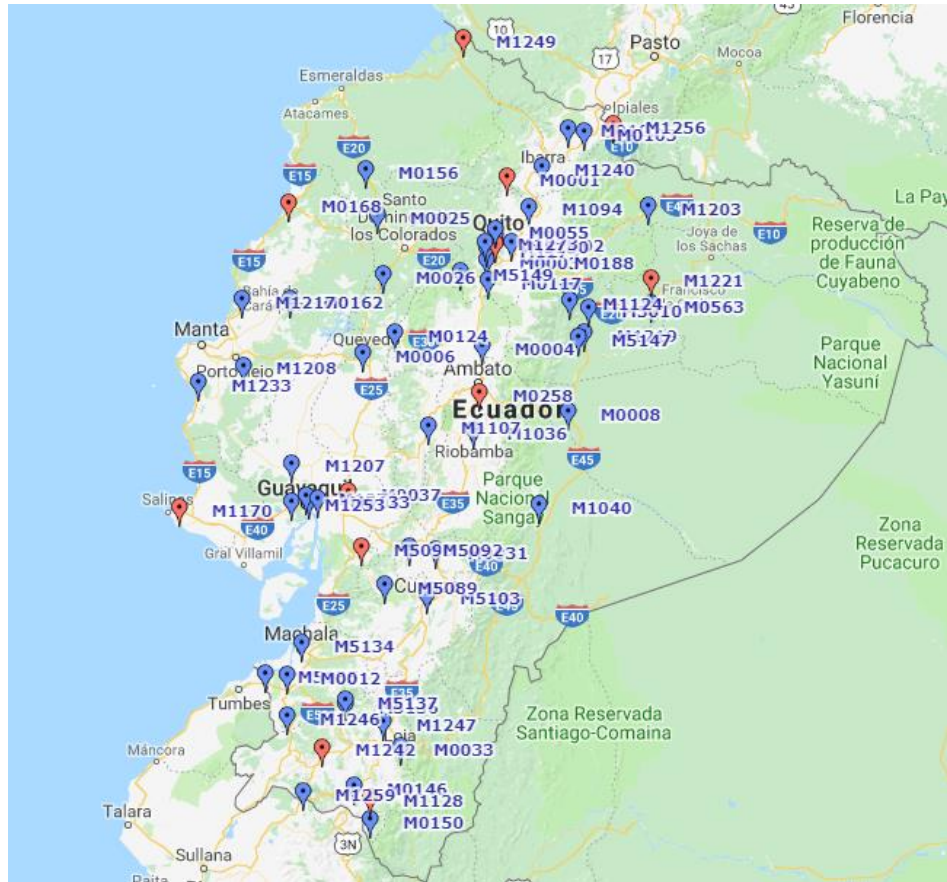
## 2. DISEÑO DE LA RED LORAWAN

En un sistema de comunicación, un enlace puede desarrollarse en varios entornos, ya sea en ambientes interiores como edificios o exteriores inmersos en medios rurales, urbanos o en zonas de vegetación. Para el desarrollo de los enlaces, se analizará la ubicación geográfica de tal manera que se identifique cuáles son las estaciones meteorológicas ideales para una solución con LoRaWan. Mediante el software Radio Mobile se analizará el perfil del terreno, así como las ubicaciones estratégicas para que los gateways se posicionen en las diferentes zonas donde exista mayor densidad de nodos, con la finalidad de optimizar recursos. Para este diseño se usó antenas con ganancia de 9 dBi, en donde la altura de las torres para ambientes urbanos es de 10m y en ambientes rurales 15m.

Los equipos utilizados para el desarrollo de los enlaces son propios de la tecnología LoRa, estos trabajan a una frecuencia de operación de 915 MHz. La información receptada se almacena en un servidor provisto por la organización TTN (redes de las cosas), que tiene como objetivo crear una red exclusiva para IoT de uso libre, a través de la inscripción de gateways y nodos en el servidor, de tal manera que se crea una comunidad en la nube en donde se pueda administrar los datos receptados desde cualquier sitio.

### 2.1 Geografía de las estaciones meteorológicas

En Ecuador existen 65 estaciones automáticas meteorológicas ubicadas en diferentes puntos del país, tal como se muestra en la Figura 2.1. Los puntos azules representan las estaciones operativas hasta la actualidad, y los puntos rojos aquellas estaciones que no transmiten de manera inalámbrica. Para el desarrollo de la solución analizaremos la densidad, así como el perfil del terreno de los nodos para establecer cada red.



**Figura 2.1 Estaciones automáticas meteorológicas del Ecuador**

Para este análisis se ha realizado una distribución de las estaciones de acuerdo con las provincias tal como se indica en la Tabla 2.1, para establecer si estas son aplicables con la tecnología LoRa según la ubicación y densidad de los nodos.

**Tabla 2.1 Distribución de estaciones meteorológicas**

| Provincias | Cantidad de estaciones | Estado    |
|------------|------------------------|-----------|
| Azuay      | 2                      | Operativa |
| Bolívar    | 1                      | Operativa |
| Cañar      | 2                      | Operativa |
| Chimborazo | 1                      | Operativa |
| Carchi     | 3                      | Operativa |
| Cotopaxi   | 2                      | Operativa |

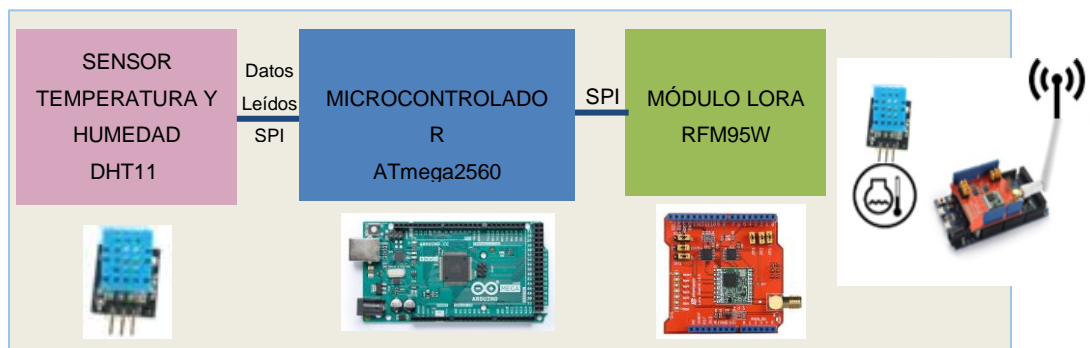
|                 |   |              |
|-----------------|---|--------------|
| El Oro          | 5 | Operativa    |
| Esmeraldas      | 2 | Operativa    |
|                 | 1 | No Operativa |
| Guayas          | 8 | Operativa    |
| Imbabura        | 2 | Operativa    |
| Loja            | 6 | Operativa    |
|                 | 2 | No Operativa |
| Los Ríos        | 1 | Operativa    |
| Manabí          | 5 | Operativa    |
| Morona Santiago | 1 | Operativa    |
| Napo            | 5 | Operativa    |
| Pastaza         | 1 | Operativa    |
| Pichincha       | 8 | Operativa    |
|                 | 1 | No Operativa |
| Orellana        | 1 | Operativa    |
|                 | 1 | No Operativa |
| Santa Elena     | 1 | Operativa    |
| Santo Domingo   | 1 | Operativa    |
| Sucumbíos       | 1 | Operativa    |
| Tungurahua      | 1 | Operativa    |

## 2.2 Diseño del nodo

La construcción de los nodos LoRa consta de sensado y transmisión, para esto se utilizó el módulo de humedad y temperatura DHT11, cuyas especificaciones se detallan en el Anexo C, dicho módulo tiene salida digital que se adapta a una tarjeta de desarrollo arduino y el dragino LoRa shield para la transmisión inalámbrica.

El sensor que utilizamos es el DHT11 de temperatura y humedad que nos suministra una salida digital calibrada, siendo su principal utilidad el registro de datos de temperatura y humedad. Este sensor opera con un voltaje de operación de 3,5V a 5V proporcionando un bajo consumo de energía, y es compatible con Arduino lo que lo hace ideal para el campo de la meteorología.

El Dragino LoRa Shield integra el módulo RFM95W que utiliza los transceptores de Semtech SX1276 y SX1278, como muestra la Figura 2.2. Tienen la capacidad de enviar paquetes a larga distancia a baja tasa de datos, mediante una técnica de modulación LoRa de espectro ensanchado que posee una alta protección a interferencias y bajo consumo de corriente, proporcionando robustez al diseño. Además, se utilizó este módulo ya que posee una biblioteca de código abierto, compatible con el Arduino Mega2560 utilizado en este proyecto.



**Figura 2.2 Esquema de transmisión con Dragino LoRa Shield**

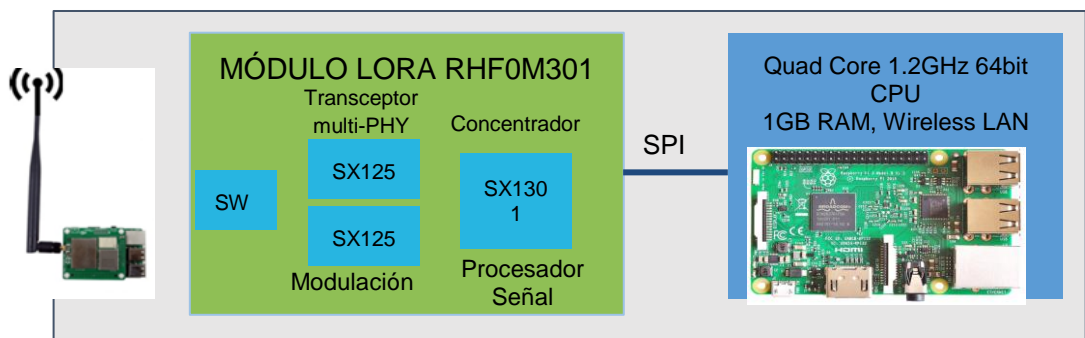
Para comenzar a transmitir datos hacia el gateway, se empezó con la instalación del hardware, esto es conectando el Dragino shield en el Arduino Mega2560, y para realizar las actividades de programación, se utilizó Arduino IDE, en el cual se agregó las bibliotecas necesarias previamente modificadas, ver anexos F, de esta manera las dos marcas: Dragino y Cytron sean compatibles para el desarrollo de esta solución. Para activar los nodos y establecer una comunicación con el gateway, es necesario adquirir 3 parámetros proporcionados por el servidor, para ello, los nodos deben ser previamente registrados y configurados. Estos parámetros son los siguientes: clave de sesión de red (NWKSKEY), clave de sesión de la aplicación (APPSKEY) y la dirección del dispositivo (DEVADDR).

Finalmente se cargan estas claves en el código del Arduino IDE. En el cual adicionalmente consta de la programación para la captura y transmisión de

datos de los sensores. El nodo está listo para la transmisión y monitoreo en el panel de información general de nuestro servidor de red TTN.

### 2.3 Diseño del gateway

El LoRa gateway hat, es un dispositivo que integra el módulo RHF0M301 donde se utiliza los chips de Semtech SX1301 y 2 transceptores Sx1257, como nos muestra el diagrama de bloques de la Figura 2.3.



**Figura 2.3 Esquema de recepción LoRa gateway**

Este módulo es ideal para capacidades de macrogateways ya que procesa señales digitales masivamente, es decir que tiene la capacidad de recibir datos desde diferentes nodos en bandas de ISM hasta 8 canales a la vez. Se alimenta a 5V y 2.5A, para acceder a los registros el dispositivo LoRa gateway debe ser insertado en la Raspberry Pi 3 modelo B+, tal como se muestra en la Figura 2.4, la configuración se lo realiza a través de la interfaz SPI (Interfaz Periférica Serial), de esta manera se logra la comunicación de manera efectiva.



**Figura 2.4 LoRa gateway en Raspberry Pi 3B**



Para el proceso de configuración se debe cargar el sistema operativo, para el cual se utilizó una tarjeta SD en blanco y se procedió a grabar la imagen modificada de Raspbian Jessie Lite que contiene el software LoRa gateway, mediante el proceso de grabación del programa Etcher. Una vez configurada la parte interna de la Raspberry Pi, se debe establecer la comunicación, mediante las acciones de recibir y transferir paquetes de datos desde los nodos hacia al servidor de la nube, es necesario recalcar que el dispositivo requiere de una antena y conexión a internet por lo que se utilizó una antena de 9 dBi a 915mhz y un punto como enrutador WiFi / Internet.

Para verificar que el LoRa gateway esté funcionando se accedió a la Raspberry Pi desde una PC en la cual se instaló el controlador de UART CH340G y el programa Putty, con un tipo de conexión en serie y una velocidad de 115200 baudios. Luego de que se inició sesión de manera exitosa en el terminal Putty mediante usuario root y una contraseña que viene por defecto en el gateway, se realizó las siguientes verificaciones:

- El estableciendo de una conexión de internet, donde se logró ver la IP y el ping a github.com.
- La recepción de datos a través de paquetes LoRa enviados por el nodo, en donde se puede observar los datos encriptados, la frecuencia, el ancho de banda (BW), el indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI) y la relación señal/ruido (SNR).

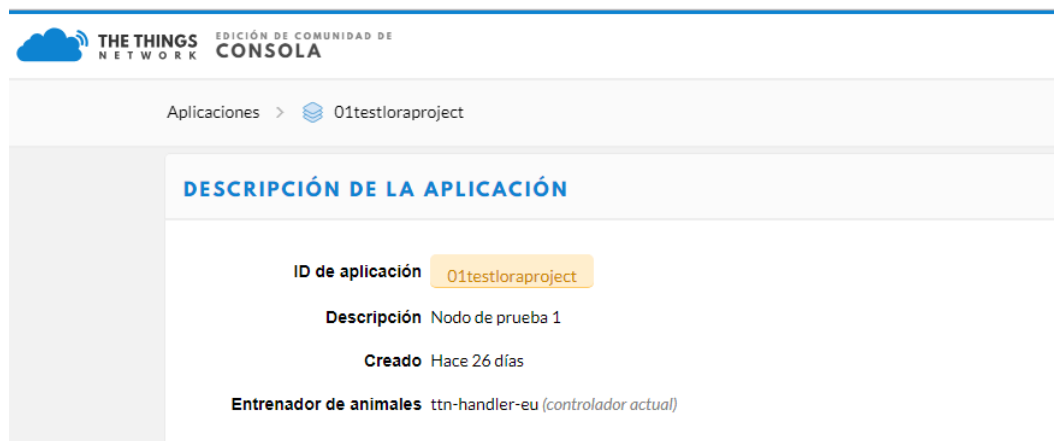
Finalmente, al establecer una conexión exitosa entre el nodo y gateway, se procedió a la configuración para la comunicación entre el gateway y servidor de red TTN como lo veremos en la siguiente sección.

## **2.4 Estructura del servidor**

El servidor de red es el que recibe los datos encriptados, por lo cual utilizamos la red TTN. La red TTN ofrece recursos como características de configuración,

opciones de implementación y es gratuito, lo cual permite visualizar y monitorear los datos registrados por los nodos LoRa. Primero se creó una cuenta TTN en donde se registraron y activaron los nodos y el LoRa Gateway.

Para registrar los nodos, se lo realizó en la sección “aplicaciones”, en la cual se indicó el parámetro ID, una pequeña descripción, el parámetro handler tal como se observa en la Figura 2.5. Los parámetros dispositivos EUI, APP KEY, APP EUI se dejaron en blanco para que se generen de manera automática.



**Figura 2.5 Registro del nodo en TTN**

Finalmente, para activar el nodo en LoRaWAN se usa las "claves de sesión" proporcionadas por el servidor de red para encriptar los paquetes enviados, de este modo se identifica el propietario del nodo LoRa. Existen 2 maneras de activación, por aire (OTAA) y por personalización (ABP). Para nuestro proyecto utilizamos la activación ABP, como se muestra en la Figura 2.6 las cuales se usaron en el código del Arduino.

**DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DISPOSITIVO**

ID de aplicación 01testloraproject

ID del dispositivo testnode\_1

Método de activación ABP

Dispositivo EUI <> CD AF DE CB 12 BA FE 18 EUI

Aplicación EUI <> 70 B3 D5 7E D0 01 0F 7B EUI

Dirección del dispositivo <> 26 01 1D E2 EUI

Clave de sesión de red <> . . . . . EUI

Clave de sesión de la aplicación <> . . . . . EUI

**Figura 2.6 Claves de acceso para los nodos**

## 2.5 Diseño del radioenlace

Para el diseño del radioenlace se consideran 16 estaciones meteorológicas automáticas que tienen línea de vista directa con los gateways, estos están ubicados en instalaciones con acceso a internet, debido a que este equipo recepta los datos y estos son almacena en el servidor libre TTN. Los gateways están ubicados en diferentes escuelas que han sido beneficiadas por el proyecto de dotación y equipamiento impulsado por el Ministerio de Telecomunicaciones [8].

Existen algunas estaciones que no han sido consideradas para el diseño de los radioenlaces, ya que están ubicadas en zonas volcánicas y de alto relieve en las cuales no hay poblaciones cercanas, por lo cual no se puede realizar una conexión a internet y no es posible establecer una comunicación inalámbrica debido a que no están dentro del radio de cobertura de 20 km que posee la tecnología LoRa. Para el desarrollo de los enlaces, se analizan ganancias, potencias de transmisión y recepción, así como las pérdidas

basadas en el modelo de propagación Okumura-Hata dirigido a zonas rurales y urbanas, según la posición geográfica en la que se despliega cada red.

### **Modelo de propagación Okumura-Hata**

Este modelo de propagación es una mejora del modelo propuesto por Okumura, que consiste en un análisis gráfico de curvas evaluadas en distintos ambientes de tierra casi plana, en función de la distancia entre el transmisor-receptor. Las curvas fueron descritas matemáticamente por Hata para reemplazar al método gráfico, proporcionando simplicidad en su aplicación.

Las bandas de frecuencia son VHF y UHF de 150 a 1500MHz y es válido para distancias de 1 a 20Km. La ecuación general de este modelo para entornos urbanos es [9]:

$$L_{50 (URBANO)}_{dB} = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) \quad (2.1) \\ + [44.9 - 6.55 \log(h_t)] \log(d)$$

Dónde:

$f_c$ : Frecuencia en MHz.

$h_t$ : Altura efectiva de la antena transmisora en m.

$h_r$ : Altura efectiva de la antena receptora en m.

$d$ : Distancia en Km.

En este modelo se inserta una nueva variable que es el factor de corrección por altura efectiva en el receptor  $a(h_r)$ , cuyo valor depende del tipo de entorno en el que está envuelto el enlace. Para pequeñas y medianas ciudades el factor de corrección es:

$$a(h_r) = (1.1 \log(f_c) - 0.7)h_r - (1.56 \log(f_c) - 0.8) ; 1m \leq h_r \leq 10m \quad (2.2)$$

Para ciudades grandes, están determinadas dos ecuaciones que dependen de la frecuencia de operación.

$$a(h_r) = (8.29 \log(1.54h_r))^2 - 1.1; \quad 150 \text{ MHz} \leq f_c \leq 200 \text{ MHz} \quad (2.3)$$

$$a(h_r) = (3.2 \log(11.75h_r))^2 - 4.97; \quad 200 \text{ MHz} \leq f_c \leq 1500 \text{ MHz} \quad (2.4)$$

Otra particularidad del modelo Okumura-Hata es que se desarrolló en ambientes suburbanos y rurales, lo cual es aplicable en el desarrollo de este proyecto ya que la mayoría de las estaciones se encuentran en pequeñas poblaciones, estas expresiones están descritas matemáticamente como:

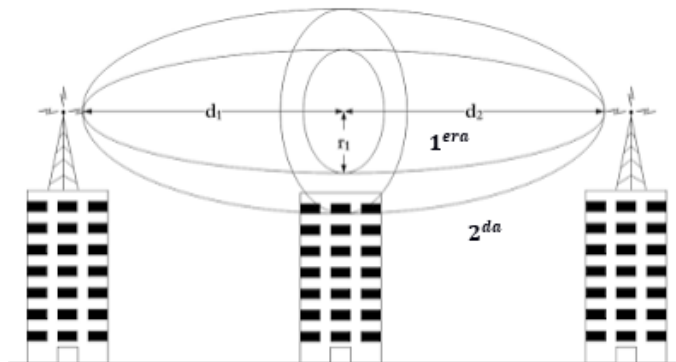
$$L_{50 (SUBURBANO)_{dB}} = L_{50 (URBANO)_{dB}} - 2 \log\left(\frac{f_c}{28}\right)^2 - 5.4 \quad (2.5)$$

$$L_{50 (RURAL)_{dB}} = L_{50 (URBANO)_{dB}} - 4.78 \log(f_c)^2 - 18.33 \log(f_c) - 40.49 \quad (2.6)$$

### **Zona de Fresnel**

Cuando se diseña un radioenlace a una distancia muy amplia es necesario realizar un análisis del perfil del terreno, determinar si existen montañas, colinas o cerros, que pudieran ocasionar que la comunicación no se establezca. Si entre el transmisor y receptor no existen dichos obstáculos se dice que hay línea de vista entre ellos, pero si por el contrario la zona posee obstáculos, las zonas de Fresnel permiten determinar si estos son influyentes en el sistema de comunicación.

Las zonas de Fresnel son elipsoides concéntricos que se forman alrededor de un rayo directo entre el transmisor y receptor, tal como se muestra en la Figura 2.7. Estas se forman de acuerdo con la posición de las antenas, si la onda incide sobre algún medio u obstáculo esto provocará un desfaseamiento por consecuencia recibirá un retardo en la transmisión o en casos extremos la pérdida total de la información.



**Figura 2.7 Zonas de Fresnel [10]**

En el diseño, el parámetro principal para determinar la efectividad de transmisión es el radio de las zonas de Fresnel. Se considera que, si el 60% del radio de la primera zona de Fresnel está libre de obstáculos, la onda será transmitida sin problema.

$$r_n = \sqrt{\frac{\lambda \times n \times d_1 \times d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.7)$$

Dónde:

$\lambda$ : Longitud de onda

$d_1$ : Distancia a la antena transmisora

$d_2$ : Distancia a la antena receptora

$n$ : Ene-sima zona de Fresnel ( $n=1, 2, 3, \dots$ )

### **Pérdidas en el espacio libre**

El medio por el cual se transmite en un sistema inalámbrico es el aire, a pesar de que este elemento no es un medio físico, también genera pérdidas ya que las ondas electromagnéticas se dispersan de la fuente principal atravesando un medio a otro con densidad distinta o al pasar por pequeñas masas de electrones, por lo cual la densidad de potencia de esta señal disminuye, a este efecto se le denomina atenuación. Es por ello que en cualquier modelo de

propagación debe ser considerada está perdida a pesar de que el medio sea vacío, cabe recalcar que al realizar el cálculo de esta pérdida no se consideran obstáculos, ni factores como lluvia o niebla estos genera pérdidas adicionales al sistema del espacio libre.

Las pérdidas de espacio libre se calculan mediante:

$$L_{db} = 20 \log \left( \frac{4\pi f d}{c} \right) \quad (2.8)$$

Dónde:

$f$ : Frecuencia de operación

$d$ : Distancia entre Tx y Rx

$c$ : Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 m/s$ )

### **Potencia de Recepción**

La potencia de recepción, de manera general, se determina mediante la diferencia entre la potencia de transmisión y las perdidas encontrada dentro del sistema. Las ganancias de las antenas son un factor que se adiciona, ya que aporta a la amplificación de la señal.

$$P_r = P_t - L + G_t + G_r \quad (2.9)$$

Dónde:

$P_t$ : Potencia de transmisión

$L$ : Pérdidas del sistema

$G_t$ : Ganancia de antena transmisora

$G_r$ : Ganancia de antena receptora

Un punto importante que destacar sobre los equipos es que técnicamente tiene una potencia de recepción mínima de señal para alcanzar cierta calidad de señal en la recepción de datos, a esto se le llama sensibilidad. Al usar este valor como resultado podemos hallar la cobertura del sistema.

Los criterios establecidos en esta sección serán indispensables para el análisis del perfil del terreno de las estaciones, así como para los cálculos de los presupuestos de enlaces provistos a continuación.

### 2.5.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas

Para el diseño de las redes LoRaWan, se han escogido 16 estaciones meteorológicas automáticas tal como se muestra en la Figura 2.8. Han sido seleccionadas de acuerdo a un análisis del perfil topográfico de las estaciones y a la densidad de nodos considerando la distancia que los separa, sin olvidar que la ubicación del Gateway, para cada red, debe tener acceso a internet.

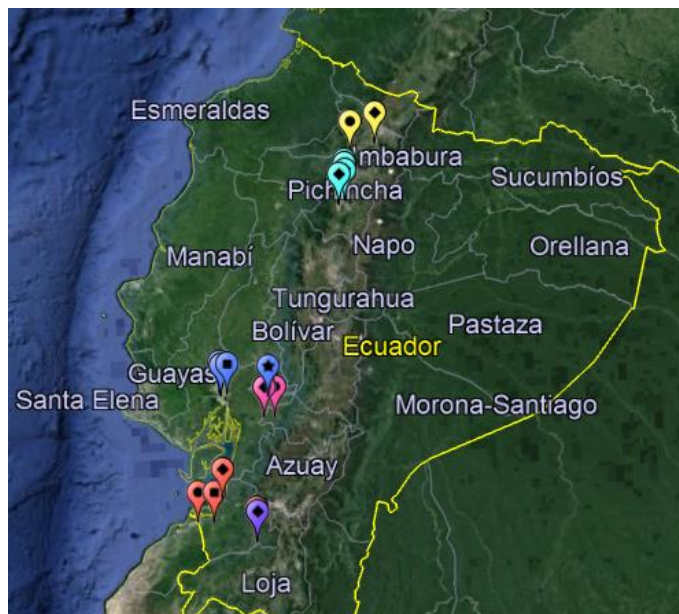


Figura 2.8 Ubicación de las estaciones meteorológicas

Las estaciones están divididas por color de acuerdo con la provincia en donde se encuentran de la siguiente manera:







Cañar



Loja



El Oro



Pichincha

La distribución geográfica de las estaciones meteorológicas automáticas se detalla en la Tabla 2.2. Se muestra su ubicación en coordenadas decimales de latitud y longitud en las diferentes provincias del Ecuador.

**Tabla 2.2 Coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas**

| PROVINCIA | ESTACIÓN                             | LATITUD   | LONGITUD    |
|-----------|--------------------------------------|-----------|-------------|
| GUAYAS    | Guayaquil (Facultad CCNN)            | -2.146500 | -79.917300  |
|           | Guayaquil U. Estatal                 | -2.180556 | -79.899722  |
|           | Cuerpo de bomberos Divino Niño-Duran | -2.169500 | -79.833400  |
|           | Milagro (Ingenio Valdez)             | -2.220496 | -79.40827   |
| CAÑAR     | La Pampada                           | -2.528689 | -79.502636  |
|           | La Troncal                           | -2.437389 | -79.352306  |
| IMBABURA  | Ibarra – 1                           | 0.333889  | -78.139722  |
|           | Inguincho                            | 0.258333  | -78.400833  |
| EI ORO    | Ministerio de Salud Machala-SNEM     | -3.259303 | -79.954136  |
|           | Hospital Público-Huaquillas          | -3.482050 | -80.227500  |
|           | La Cuca                              | -3.492222 | -80.056944  |
|           | Extensión Universidad de Loja-Zaruma | -3.681169 | -79.625381  |
| LOJA      | Colegio 13 de Mayo-Portovelo         | -3.720014 | -79.619097  |
| PICHINCHA | Peaje Autopista Gral. Rumiñahui      | -0.243600 | -78,485900  |
|           | Politécnica Salesiana-Campus Sur     | -0.281900 | -78.550.000 |
|           | Iñaquito                             | -0.175000 | -78.485278  |

## 2.5.2 Diseño de red Guayas

En esta red el gateway está ubicado en la provincia del Guayas, en la escuela León Febres Cordero y tres nodos, donde dos de ellos están distribuidos al norte de Guayaquil en las instalaciones de la Universidad Estatal y la Facultad de Ciencias Naturales y un nodo alejado de la ciudad, ubicado en el Cuerpo de Bomberos del cantón Duran, tal como se muestra en la Figura 2.9.

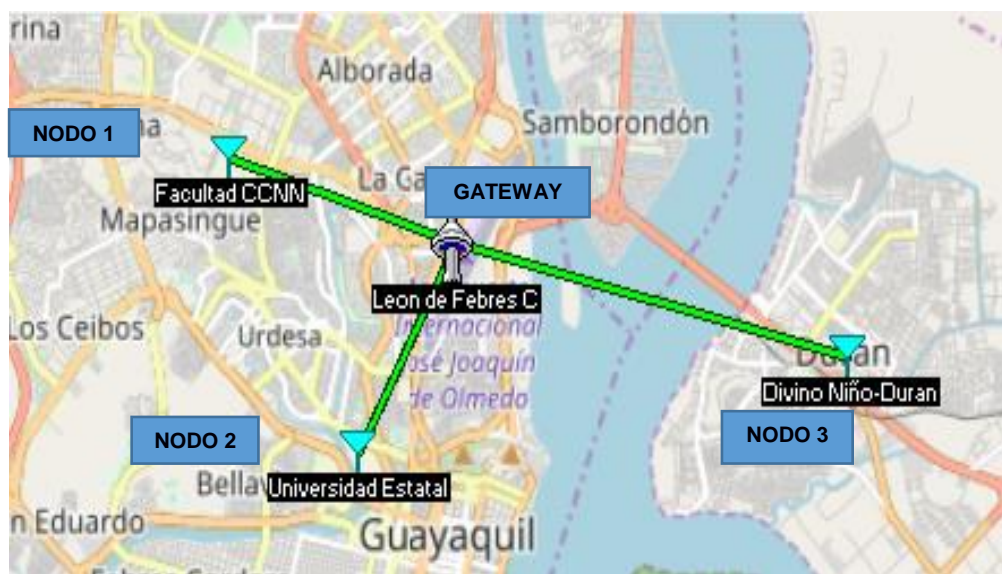


Figura 2.9 Red Guayas

El análisis del perfil topográfico de la red se muestra en la Figura 2.10, se puede observar que existe línea de vista entre los nodos y el Gateway. A pesar de que la red está inmersa en la ciudad, el perfil del terreno tiene mínimas elevaciones, la estación con mayor distancia está en Duran a 6,08 Km de la ubicación del gateway.



**Figura 2.10 Perfil topográfico red Guayas**

Los cálculos efectuados para el enlace del Guayas se detallan en la Tabla 2.3, enfocándose en el modelo de propagación Okumura-Hata para ambientes urbanos.

**Tabla 2.3 Cálculos de enlace Guayas**

| Parámetros              | Facultad CCNN | Universidad Estatal | Divino niño-Duran |
|-------------------------|---------------|---------------------|-------------------|
| Distancia [Km]          | 3.55          | 3.05                | 6.08              |
| Perdidas de camino[dBm] | 132.67        | 131.36              | 137.35            |
| Perdida Okumura [dBm]   | 162.54        | 160.01              | 171.50            |
| Pérdida Total[dBm]      | 295.21        | 291.37              | 308.85            |
| Potencia Rx[dBm]        | -231.71       | -227.87             | -245.35           |

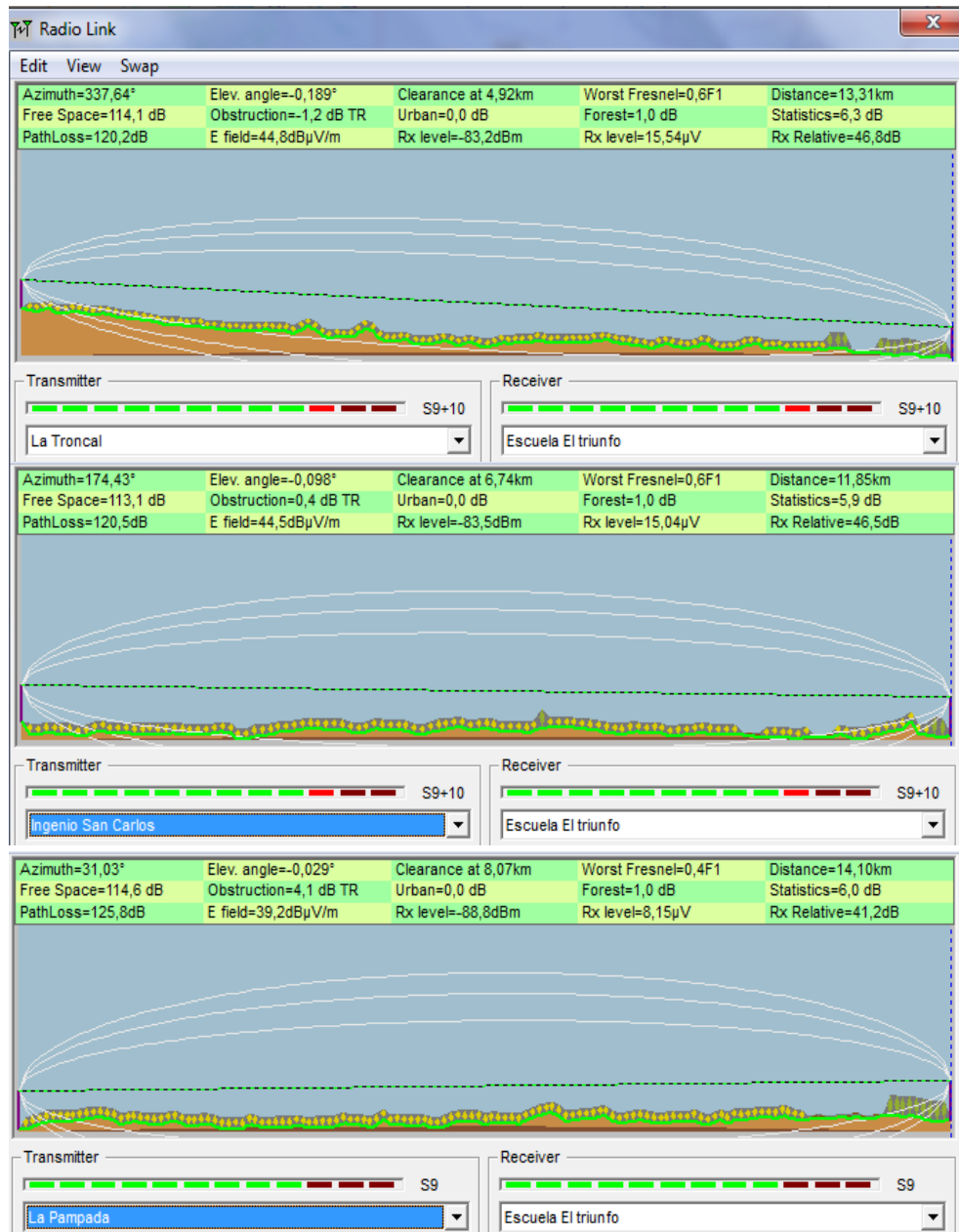
### 2.5.3 Diseño de red Cañar-Guayas

Para el diseño de este enlace se ha colocado el gateway en la provincia del Guayas, en el cantón El Triunfo en las instalaciones de la escuela El Triunfo. Dentro de la infraestructura de esta institución se encuentra una torre de 15 metros provista por el Ministerio de Telecomunicaciones [11]. Esta red está estructurada por 2 estaciones ubicadas en las provincias de Cañar y 2 estaciones en Guayas cuya ubicación se muestra en la Figura 2.11.



Figura 2.11 Red Cañar-Guayas

El análisis del perfil topográfico de la red se muestra en la Figura 2.12, en donde se puede visualizar que existe línea de vista directa entre los nodos y el Gateway. El perfil del terreno es plano, ya que los cantones son pequeñas poblaciones separadas por carreteras y la estación con mayor distancia está a 14,10 Km del gateway.



**Figura 2.12 Perfil topográfico red Cañar-Guayas**

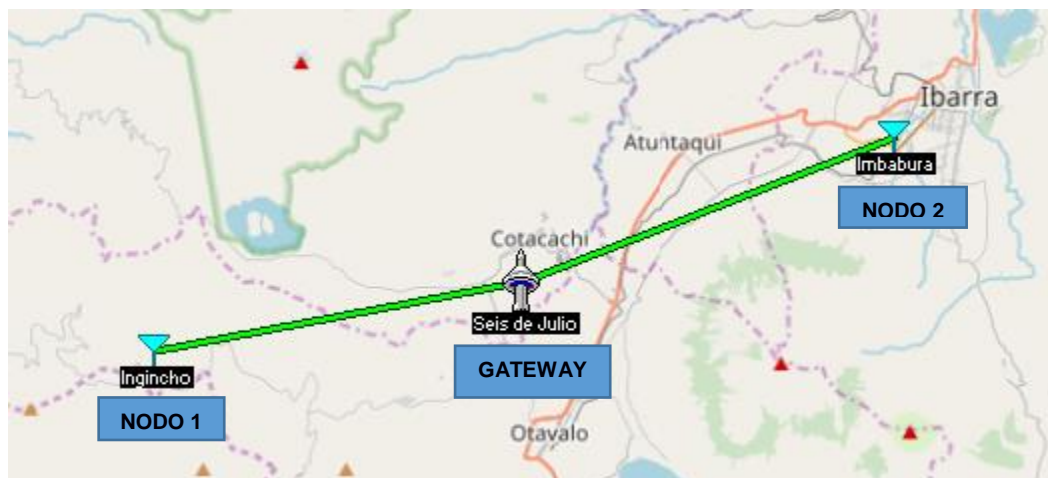
Los cálculos efectuados para el enlace El Triunfo se detallan en la Tabla 2.4, en base a las ecuaciones (2.1-10), enfocándose en el modelo de propagación Okumura-Hata para ambientes rurales.

**Tabla 2.4 Cálculos de enlace Cañar-Guayas**

| Parámetros              | Ingenio San Carlos | La Troncal | La Pampada |
|-------------------------|--------------------|------------|------------|
| Distancia [Km]          | 11.85              | 13.31      | 14.10      |
| Perdidas de camino[dBm] | 143.14             | 144.1      | 144.65     |
| Perdida Okumura[dBm]    | 47.86              | 47.86      | 48.82      |
| Pérdida Total[dBm]      | 191                | 191.96     | 193.47     |
| Potencia Rx[dBm]        | -127.5             | -128.46    | -129.97    |

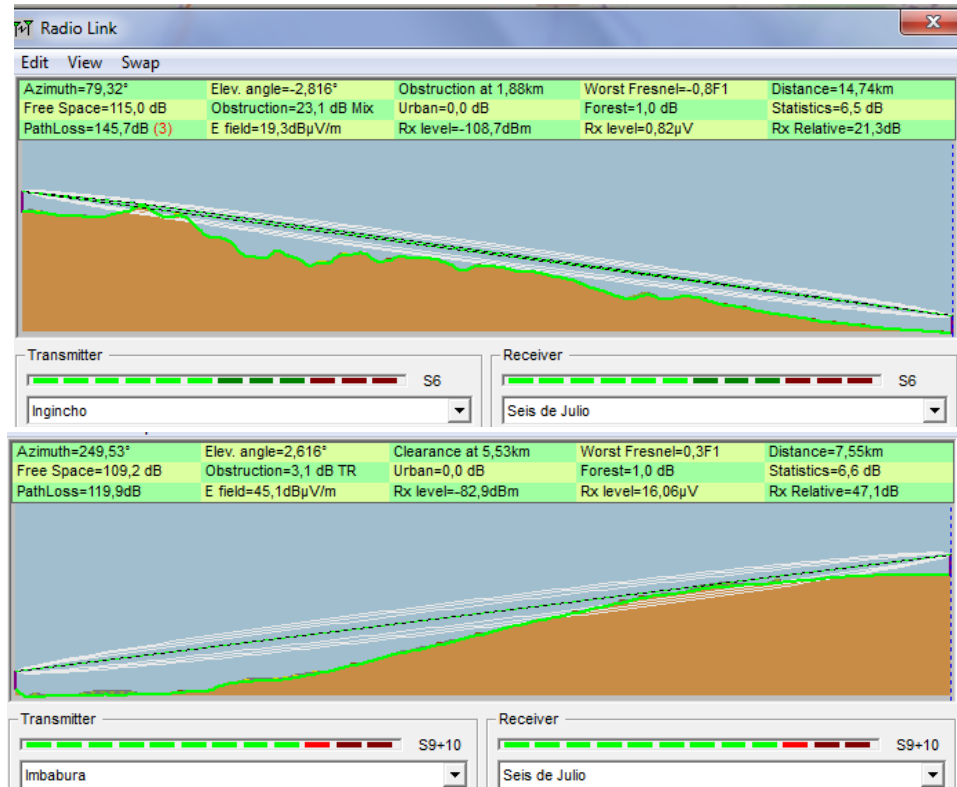
### 2.5.4 Diseño de red Imbabura

La red está desplegada en la provincia de Imbabura está compuesta por un gateway ubicado en Cotacachi en la escuela Seis de Julio, y dos nodos ubicados en Ibarra e Inguincho, tal como se muestra en la Figura 2.13.



**Figura 2.13 Red Imbabura**

El análisis del perfil topográfico de la red se muestra en la Figura 2.14. La red está ubicada en zonas montañosas de considerable elevación, sin embargo, la ubicación del gateway permite que ambos nodos se encuentren en línea de vista y puedan estar dentro del rango de cobertura LoRa de 20 Km.



**Figura 2.14 Perfil topográfico red Imbabura**

Los cálculos efectuados para el enlace de Imbabura se detallan en la Tabla 2.5, enfocándose en el modelo de propagación Okumura-Hata para ambientes rurales.

**Tabla 2.5 Cálculos de enlace Imbabura**

| Parámetros              | Inguincho | Imbabura |
|-------------------------|-----------|----------|
| Distancia [Km]          | 14.54     | 7.55     |
| Perdidas de camino[dBm] | 144.92    | 139.22   |
| Perdida Okumura[dBm]    | 49.33     | 38.42    |
| Pérdida Total[dBm]      | 194.25    | 177.64   |
| Potencia Rx[dBm]        | -130.75   | -114.14  |



### 2.5.5 Diseño de red El Oro

En este enlace se encuentran 3 estaciones pertenecientes a la provincia El Oro ubicados en Machala, Huaquillas y La Cuca. El gateway está ubicado en la escuela Provincia de Imbabura en el cantón Santa Rosa, tal como se muestra en la Figura 2.15.

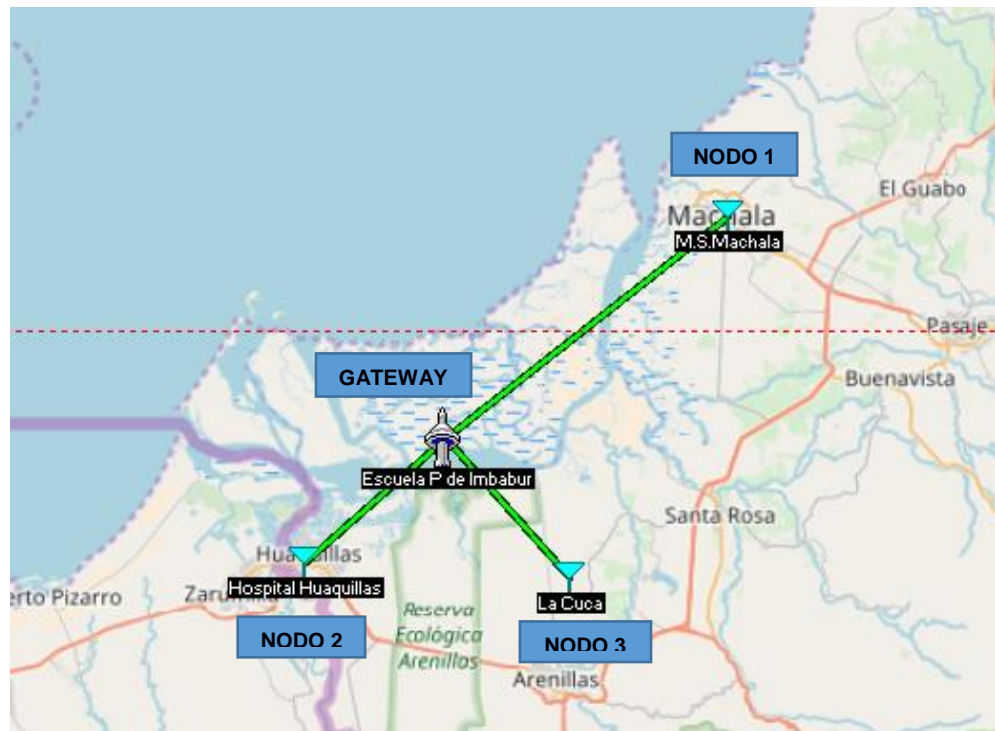
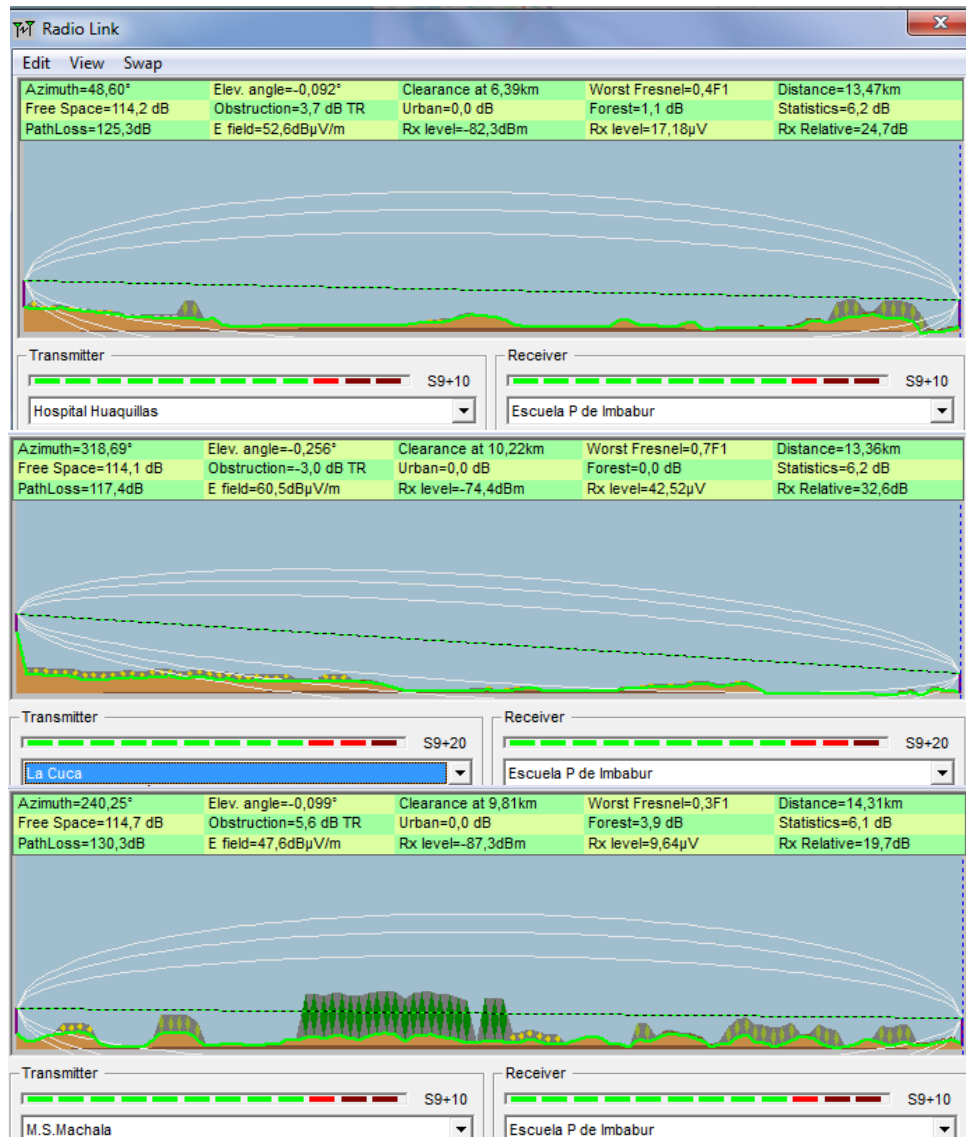


Figura 2.15 Red El Oro

El análisis del perfil topográfico de la red se muestra en la Figura 2.16, en donde se observa que existe línea de vista entre el gateway y los nodos, debido al perfil del terreno casi plano en el que se encuentra desplegada la red. Las estaciones están dentro del rango de cobertura LoRa de 20 Km.





**Figura 2.16 Perfil topográfico red El Oro**

Los cálculos efectuados para el enlace del Oro se detallan en la Tabla 2.6, enfocándose en el modelo de propagación Okumura-Hata para ambientes rurales.

**Tabla 2.6 Cálculos de enlace El Oro**

| Parámetros              | La Cuca | Hospital Huaquillas | M.S.Machala |
|-------------------------|---------|---------------------|-------------|
| Distancia [Km]          | 13.36   | 13.47               | 14.31       |
| Perdidas de camino[dBm] | 144.19  | 134.26              | 134.78      |
| Perdida Okumura [dBm]   | 47.92   | 48.06               | 49.07       |

|                    |         |         |         |
|--------------------|---------|---------|---------|
| Pérdida Total[dBm] | 192.11  | 182.32  | 183.85  |
| Potencia Rx[dBm]   | -128.61 | -118.82 | -120.35 |

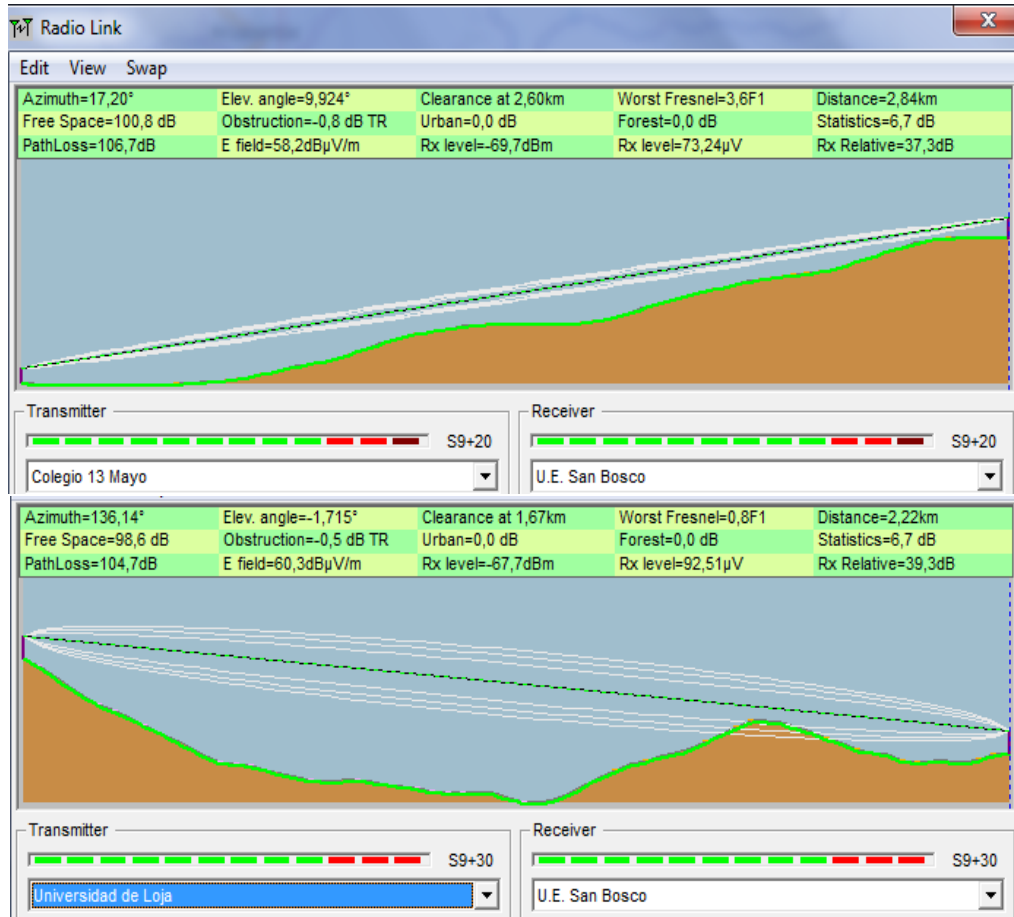
### 2.5.6 Diseño de red Loja-El Oro

Esta red está compuesta por un gateway que se encuentra en la Unidad Educativa San Bosco en el cantón Zaruma y dos nodos distribuidos en dos provincias El Oro y Loja, tal como se muestra en la Figura 2.17.



Figura 2.17 Red Loja-El Oro

El análisis del perfil topográfico de la red se muestra en la Figura 2.18. Se observa que existen elevaciones del terreno, sin embargo, la ubicación del gateway permite que tengan línea de vista con los nodos. Esta red está desplegada en la ciudad, en donde el gateway está ubicado a pocos kilómetros de los nodos.



**Figura 2.18 Perfil topográfico red El Oro -Loja**

Los cálculos efectuados para el enlace entre las dos provincias se detallan en la Tabla 2.7, enfocándose en el modelo de propagación Okumura-Hata para ambientes urbanos.

**Tabla 2.7 Cálculos de enlace Loja-El Oro**

| Parámetros              | Colegio 13 de Mayo | Extensión Universidad de Loja |
|-------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Distancia [Km]          | 2.84               | 2.22                          |
| Perdidas de camino[dBm] | 130.74             | 128.59                        |
| Perdida Okumura [dBm]   | 155.86             | 151.89                        |
| Pérdida Total[dBm]      | 152.87             | 146.47                        |
| Potencia Rx[dBm]        | -223.1             | -216.98                       |

### 2.5.7 Diseño de red Pichincha

Esta red está compuesta por la mayor densidad de nodos, ya que las estaciones se encuentran desplegadas en la ciudad de Quito. El gateway está ubicado en el Colegio 13 de abril, mientras que la estación de Ñaquito se encuentra al sur de la ciudad y las estaciones Salesiana y Rumiñahui están ubicadas al norte, tal como se muestra en la Figura 2.19.

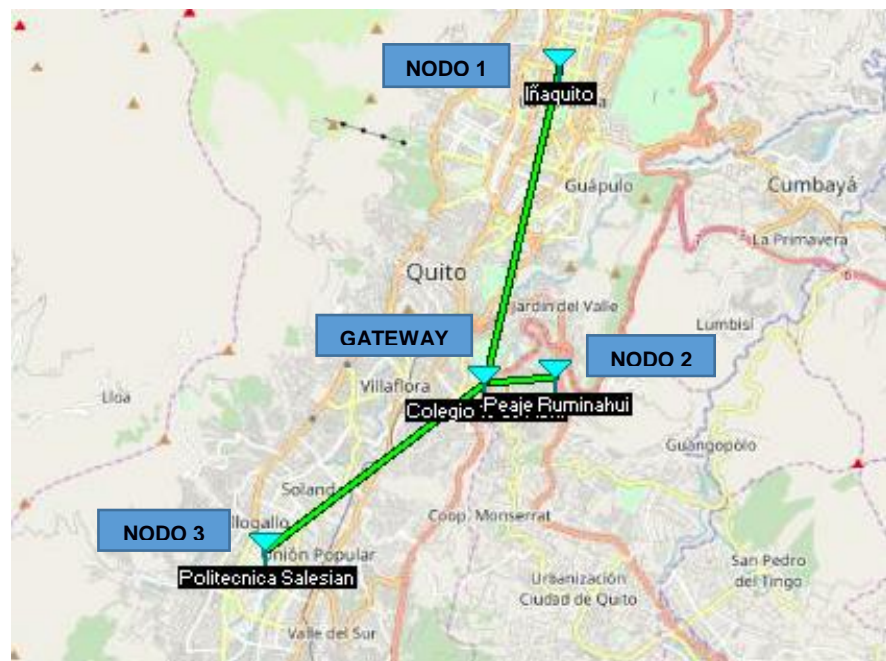
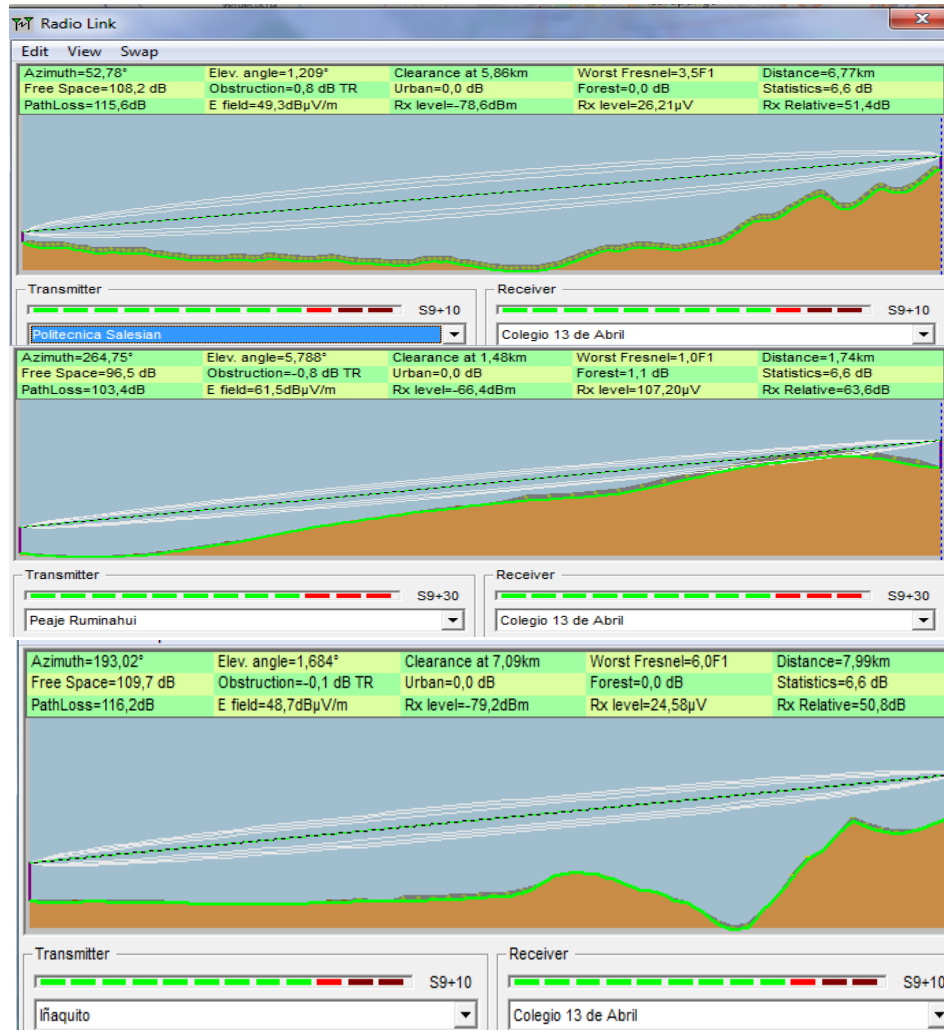


Figura 2.19 Red Pichincha

El análisis del perfil topográfico de la red con los nodos ubicados al norte y sur de Quito se muestra en la Figura 2.20. Se puede visualizar que el terreno tiene elevaciones considerables ya que esta ciudad está caracterizada por terrenos de gran altitud, sin embargo, existe línea de vista entre el gateway y los nodos.



**Figura 2.20 Perfil topográfico Pichincha**

Los cálculos efectuados para este enlace se detallan en la Tabla 2.8, enfocándose en el modelo de propagación Okumura-Hata para ambientes urbanos.

**Tabla 2.8 Cálculos de enlace Pichincha**

| Parámetros               | Politécnica Salesiana | Rumiñahui | Iñaquito |
|--------------------------|-----------------------|-----------|----------|
| Distancia [Km]           | 6.77                  | 1.74      | 7.99     |
| Perdidas de camino [dBm] | 138.28                | 126.48    | 139.72   |
| Perdida Okumura [dBm]    | 139.90                | 147.95    | 172.58   |
| Pérdida Total [dBm]      | 278.18                | 274.43    | 312.30   |
| Potencia Rx [dBm]        | -214.68               | -210.93   | -248-80  |

# CAPÍTULO 3

## 3. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

En este capítulo analizaremos las pruebas prácticas del diseño de una red LoRaWan, para esto se implementó un enlace conformado por un gateway y dos nodos, ubicados a diferentes distancias en donde los elementos de la red tienen línea de vista entre ellos.

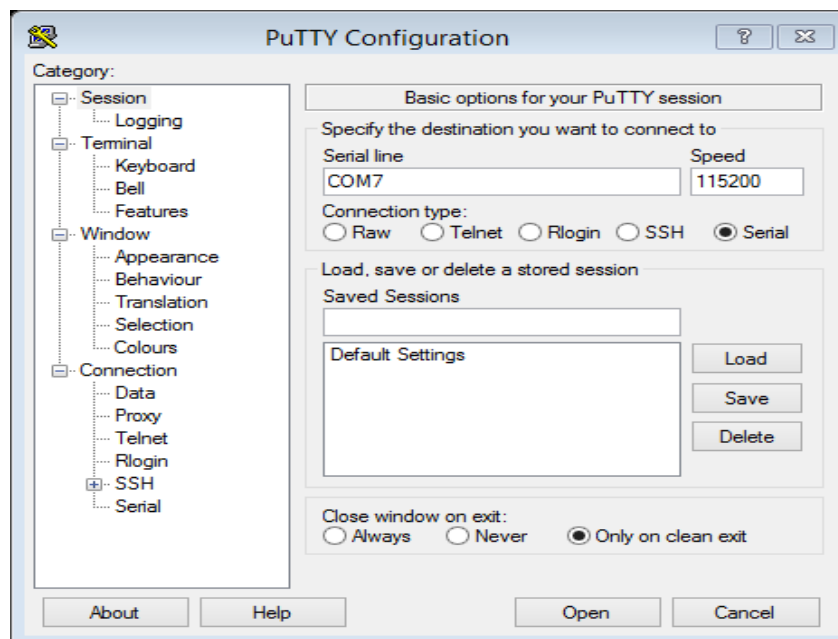
El objetivo de realizar las pruebas es evaluar la transmisión de información generada por dos nodos a larga distancia analizando datos de humedad y temperatura, y parámetros de conectividad como la potencia recibida y SNR, mediante gráficas generadas por la plataforma Cayenne, que está dirigido para el monitoreo en aplicaciones de IoT.

La estimación de los costos juega un papel importante, ya que esta entidad paga un presupuesto anual elevado a operadoras celulares por los diferentes enlaces en todo el país, dentro del detalle de costos de nuestra solución se han considerado los valores de implementación de equipos e infraestructura.

### 3.1 Configuraciones iniciales

Como se mencionó en el Capítulo 2 sección 1-3, la red está compuesta de un LoRa gateway proporcionado por Cytron, que es controlado por una Raspberry Pi y nodos Dragino que son configurados mediante un Arduino Mega, el cual realiza la adquisición de datos de los sensores de temperatura y humedad.

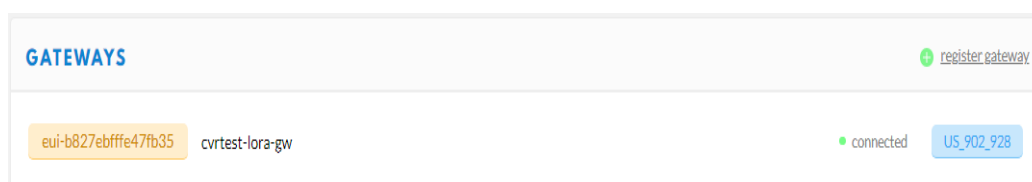
Para realizar las pruebas, inicialmente es necesario establecer una conexión a internet, en donde se procede a conectar el gateway a un puerto de la PC, luego a través del Putty se configura la velocidad en 115200 baudios, tal como se indica en la Figura 3.1.



**Figura 3.1 Configuración del Putty**

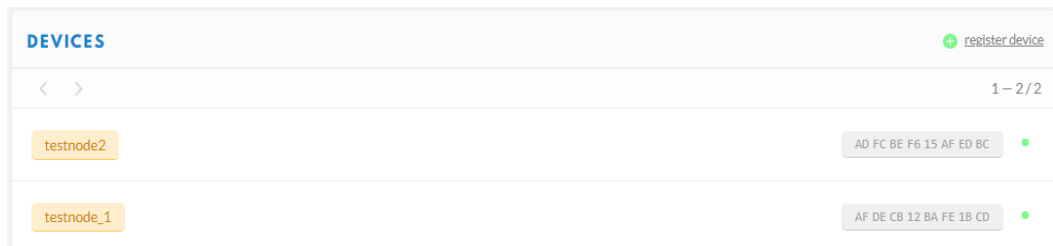
Para visualizar los datos receptados por el gateway de manera interactiva usamos una plataforma grafica llamado Cayenne, donde todos los datos que se encuentren en el servidor podrán ser visualizados a través de un dashboard, en el cual se pueden observar los valores al mismo tiempo que los recibe el gateway, así como la ubicación de los nodos y parámetros como RSSI y SNR.

Esta conexión a internet es fundamental ya que el gateway debe comunicarse con el servidor TTN, que indica el estado de conectado cuando logre establecer dicha conexión, tal como se muestra en la Figura 3.2.



**Figura 3.2 Verificación de conexión gateway**

Para la activación de los nodos se procede a energizarlos con una batería, dichos nodos deben contener los sensores de temperatura y humedad, para verificar la comunicación entre el gateway dentro del servidor se podrá visualizar el estado de conectado en cada nodo, tal como se muestra en la Figura 3.3.



**Figura 3.3 Verificación de comunicación entre gateway y nodos**

### 3.2 Desarrollo de pruebas de cobertura

Para la evaluación de la red se han tomados dos nodos distribuidos en tres distancias distintas y un gateway, todos ellos ubicados en la provincia del Guayas, las coordenadas de estos puntos se detallan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Ubicación de la red de prueba**

| Componente | Longitud   | Latitud   |
|------------|------------|-----------|
| Gateway    | -79.875481 | -2.180942 |
| Nodo 1     | -79.877243 | -2.187889 |
| Nodo 1a    | -79.879503 | -2.193907 |
| Nodo 2     | -79.879503 | -2.193907 |

La red LoRaWan desplegada en la provincia del Guayas cumple con los siguientes parámetros de conectividad:

- Potencia de transmisión de los nodos 14 dBm.
- Tasa de datos 5.47Kbps y factor de propagación 7



- Los canales de frecuencia designados fueron: temperatura canal 1, humedad canal 2, RSSI canal 100 y SNR canal 101, todos ellos trabajando en la banda de 915 MHz.
- Mensajes con un payload de 20 bytes.

La distribución de la red se muestra en la Figura 3.4. El gateway está ubicado en el faro del cerro Santa Ana, que es una de las zonas más altas de la provincia del Guayas.



**Figura 3.4 Mapa de cobertura en la provincia del Guayas**

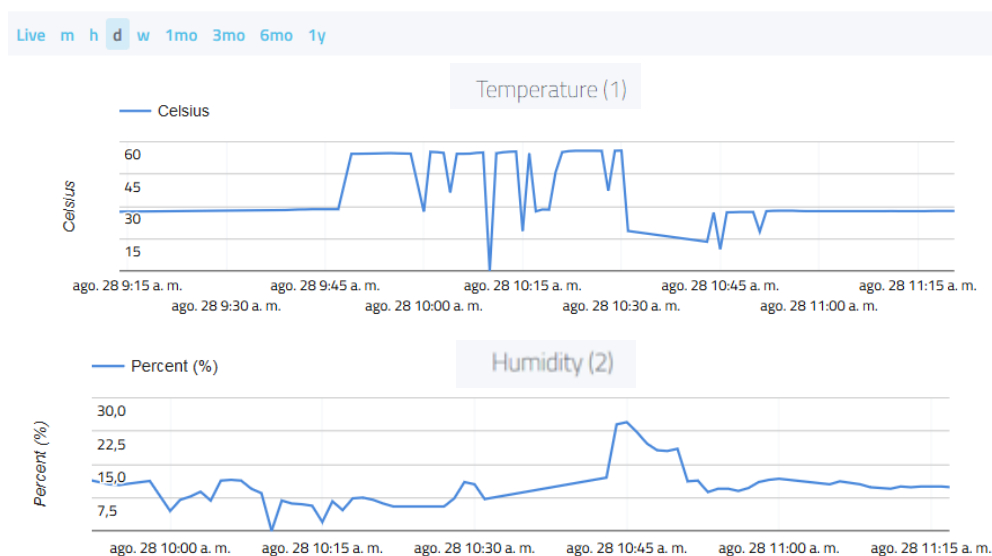
El punto 1 representa un nodo que se encuentra en la misma zona del gateway, este nodo está ubicado en el malecón Simón Bolívar en la Plaza Neoclásica y tiene una distancia de 781.77m con respecto al faro.

El punto 1a es el mismo nodo utilizado en el punto 1, con la particularidad de que los datos han sido transmitidos desde una zona de mayor altura, dicho nodo está ubicado en unos de los miradores al interior del Malecón 2000, junto al monumento Elemento Tierra. La distancia que separa al gateway del nodo 1a es de 1.5 Km.

El punto 2 corresponde a un nodo ubicado en la ciudad Duran atravesando el rio Guayas, se encuentra ubicado en el mirador del Malecón Robert Gilbert a una distancia de 2.25 Km, con respecto al gateway.

### 3.2.1 Análisis de cobertura nodo 1

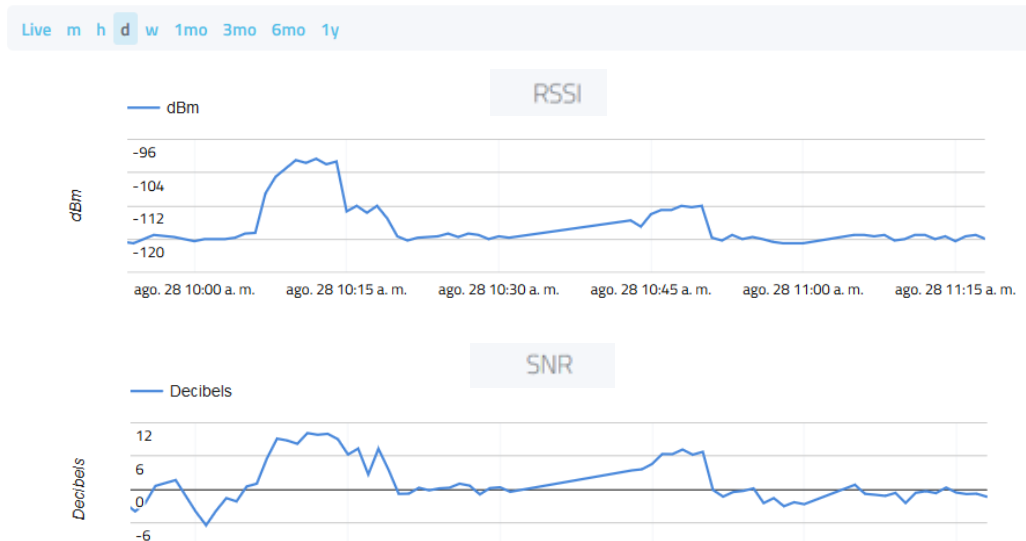
Para el análisis del enlace gateway-nodo 1, inicialmente se colocó el nodo en un espacio abierto del Malecón Simón Bolívar, en donde se evidenció perdidas de paquetes. Las mediciones tomadas en este sitio muestran datos erróneos de temperatura y humedad relativa, y en ciertos lapsos de tiempo no existía comunicación alguna, tal como se indica en la Figura 3.5. A pesar de que el área es amplia, existen factores como vegetación y edificaciones que obstaculizan la trayectoria del enlace.



**Figura 3.5 Datos de temperatura y humedad nodo 1**

Otros de los parámetros que podemos visualizar en esta plataforma es el RSSI, que indica la fuerza de la señal recibida por el gateway y el SNR valor que mide la relación señal a ruido. En la Figura 3.6, se observa que la propagación del RSSI capturado oscila entre -120dBm a -96dBm para

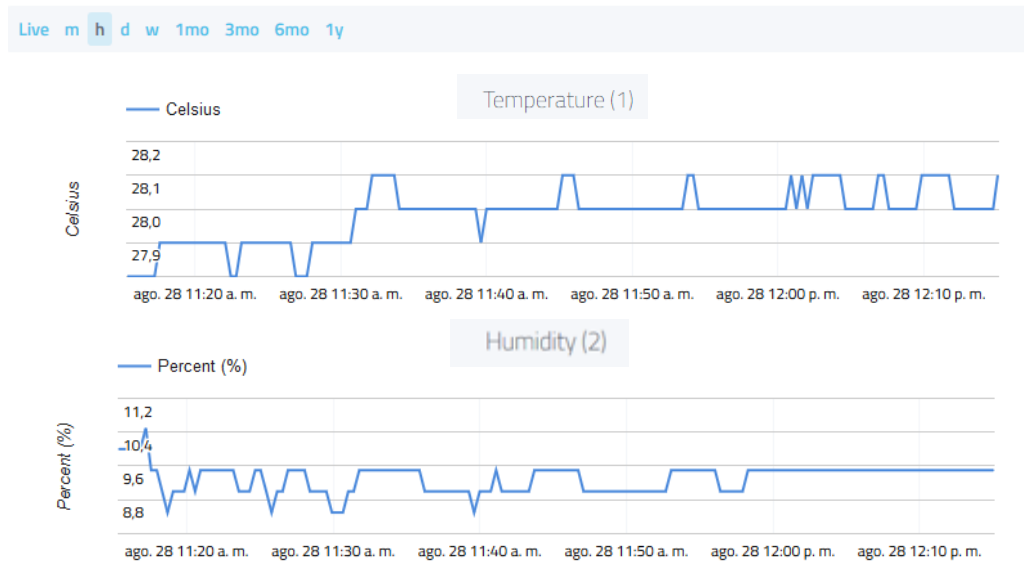
rangos de SNR de -6dB a 12dB. Cuando cae la SNR a valores por debajo de 0dB el RSSI cae a los valores entre -120dBm.



**Figura 3.6 Datos de RSSI y SNR del nodo 1**

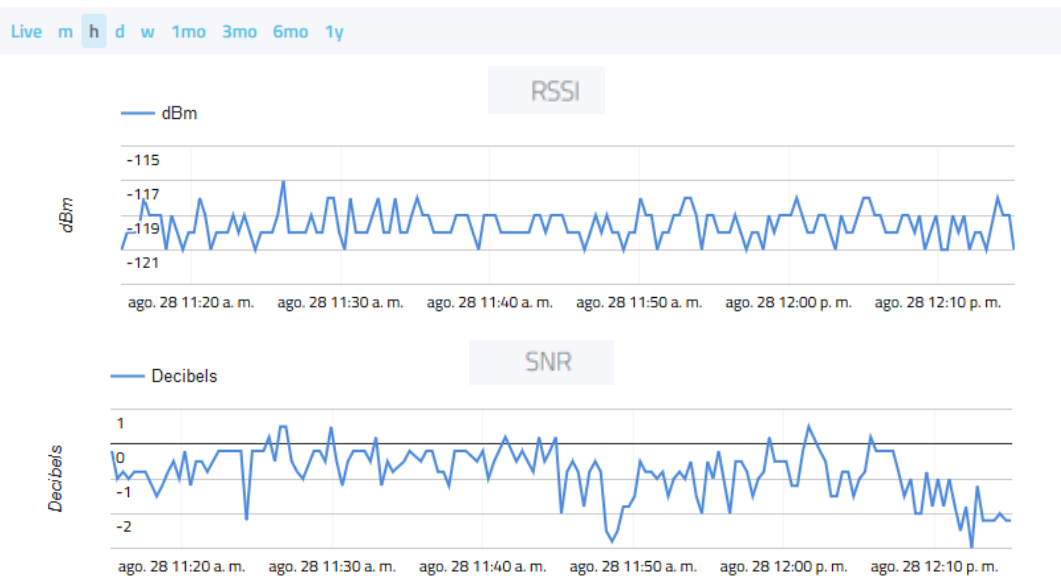
### 3.2.2 Análisis de cobertura nodo 1a

La ubicación de este nodo tuvo como precedente las primeras mediciones tomadas por el nodo 1. Debido a la defectuosa transmisión encontrada este sitio, se procedió a ubicar el nodo en uno de los miradores del Malecón Simón Bolívar, para incrementar la altura y que el nodo esté en línea de vista directa con el gateway, y así garantizar el 100% de paquetes entregados de manera ininterrumpida, tal como se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7 Datos de temperatura y humedad nodo 1a**

En la Figura 3.8, podemos observar que los valores informados de SNR son negativos entre 0dB a -3dB para rangos de RSSI de -117dBm a -121dBm, lo que indica que existe más potencia de ruido que la señal que recibe el gateway.

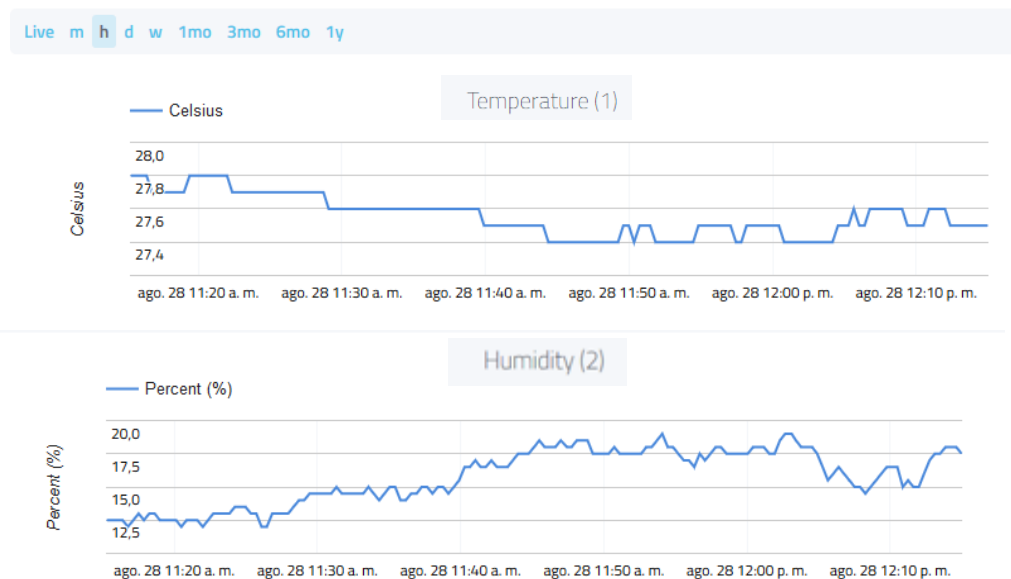


**Figura 3.8 Datos de RSSI y SNR del nodo 1a**

### 3.2.3 Análisis de cobertura nodo 2

En este enlace no se presentaron inconvenientes, ya que el nodo estaba ubicado en el mirador Robert Gilbert, dicho punto se encuentra frente al río Guayas por lo que se encontraba en línea de vista con el gateway ubicado en el faro del cerro Santa Ana, por lo cual no existe obstáculos en el medio en el que se despliega este enlace.

Los paquetes fueron entregados al 100%, tal como se muestra en la Figura 3.9, con la diferencia de que en este caso el retraso era mayor que el proporcionado por el nodo 1a, debido a que el nodo 2 se encuentra a mayor distancia del gateway.



**Figura 3.9 Datos de temperatura y humedad nodo 2**

En la Figura 3.10 se puede observar que los valores capturados de SNR son positivos a diferencia del nodo 1a que fueron negativos y varían entre 6dB a 9dB para rangos de RSSI de -112dBm a -108dBm, valores informados en la literatura para condiciones libres de atenuación.



**Figura 3.10 Datos de RSSI y SNR del nodo 2**

### 3.3 Detalle de costos

Para el despliegue de la red LoRaWAN propuesto en este trabajo de titulación, se utilizó el presupuesto de la Tabla 3.2, en el que se muestra el cálculo de los gastos para la obtención de los equipos y materiales necesarios para la implementación de la red, cabe recalcar que dentro de estos valores no se incluyen costos por ingeniería ni mano de obra directa.

**Tabla 3.2 Presupuesto de la solución**

| Equipo o Material                            | Precio unitario | Cantidad | Total        |
|--|-----------------|----------|--------------|
| Canakit Raspberry Pi 3 B+ con fuente de 2.5A | \$ 50           | 1        | \$ 50        |
| Tarjeta SD 8GB                               | \$8             | 1        | \$8          |
| Cytron 915MHz 8 Channel LoRa Gateway HAT     | \$310           | 1        | \$310        |
| <b>Total de Gateway</b>                      | <b>\$368</b>    |          | <b>\$368</b> |
| Dragino Lora Shield 915MHz                   | \$20            | 2        | \$40         |
| Arduino Mega 2560 Microcontroller Rev3       | \$38            | 2        | \$76         |

|                          |             |   |              |
|--------------------------|-------------|---|--------------|
| Antena 915MHz            | \$8         | 2 | \$16         |
| <b>Total de Nodo</b>     | <b>\$66</b> |   | <b>\$132</b> |
| <b>Gateway + Nodo</b>    |             |   | <b>\$500</b> |
| Sensor DHT11             | \$2,50      | 2 | \$5          |
| <b>Total de Sensores</b> |             |   | <b>\$5</b>   |

Para el cálculo del presupuesto del diseño de red para las estaciones referidas en este estudio lo único que no se utiliza es el sensor DHT11, debido a que esos sensores se usaron en reemplazo de las estaciones y la cantidad de nodos varían de acuerdo a los diseños de enlaces mostrados en la Sección 2.5, se muestra un resumen en la Tabla 3.3, nuestro presupuesto total enlazando las 16 estaciones consideradas en nuestro estudio es de \$3264 dólares como se detalla en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.3 Resumen Diseño de enlaces**

| No. | Enlaces           | # Estaciones |
|-----|-------------------|--------------|
| 1   | Red Guayas        | 3            |
| 2   | Red Cañar-Guayas  | 3            |
| 3   | Red Imbabura      | 2            |
| 4   | Red El Oro        | 3            |
| 5   | Red Loja – El Oro | 2            |
| 6   | Red Pichincha     | 3            |
|     | <b>Total</b>      | <b>16</b>    |

**Tabla 3.4 Presupuesto Total**

| <b>Total de enlaces</b>      | <b>Costo por gateway</b> | <b>Costo total</b> |
|------------------------------|--------------------------|--------------------|
| 6                            | \$368                    | \$2208             |
| <b>Total de estaciones</b>   | <b>Costo por nodo</b>    |                    |
| 16                           | \$66                     | \$1056             |
| <b>Costo Total Propuesto</b> |                          | <b>\$3264</b>      |

Una vez creada nuestra red propia, ajustada a nuestros requerimientos con tecnología LoRa, además del costo de enlaces debemos encargarnos del mantenimiento de la misma, el cual puede realizarse cada 5 años, para ello los voltajes proporcionados por la batería deberán ser de forma periódica, alargando de esta manera la vida de los equipos y mantenimiento preventivo.



# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de este proyecto deja como resultado una red de largo alcance, en donde se efectuó un estudio sobre la topografía de las estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en todo el país, realizando diseño de redes en las diferentes zonas y evaluando mediante pruebas en un ambiente urbano la cobertura de las redes LPWAN.

### **Conclusiones**

LoRa es una gran alternativa para el desarrollo de enlaces a larga distancia, lo cual denota un elemento diferenciador sobre otras tecnologías usadas en IoT tecnologías como lo son Sigfox, Zigbee, Wimax, que compiten por el rango de cobertura amplio y la cantidad de datos contenidos en los paquetes LoRa que pueden ser manipulados periódicamente.

Al realizar el análisis del perfil del terreno de las estaciones meteorológicas automáticas del Ecuador, se nos presentaron inconvenientes para definir las posiciones en las que estarían ubicados los gateways, ya que la mayoría de las estaciones están muy alejadas o por el contrario se encontraban sin acceso a internet. Sin embargo, se logró realizar 16 enlaces, cuyos gateways están dotados de infraestructura y conectividad, lo cual implica un ahorro monetario significativo para esta entidad.

Durante el desarrollo de las pruebas prácticas, se pudo determinar que la distancia no es la causa de la pérdida de información o caída del enlace, por el contrario, cuando los nodos se encuentran en línea de vista con el gateway, la tecnología LoRa posee un gran alcance, siendo así el entorno con densa construcción u obstáculos sumado a la altura de las torres factores determinantes para esta tecnología, que influyen en la cobertura o la efectividad de los paquetes entregados.

Unas mejoras más importantes para esta solución es la creación de un servidor propio en lugar del servidor usado The Things of Network junto a la plataforma Cayenne, de esta manera se tendría el control absoluto de la información y a su vez daría paso a nuevos proyectos enfocados en sectores tecnológicos.

### **Recomendaciones**

El dispositivo LoRa gateway no permite estar conectado a una red abierta por cuestiones de seguridad, así como tampoco se conecta a todas las compañías de internet, ya que algunas de estas operadoras tienen bloqueado el puerto por el cual realiza la recepción de datos.

Los dispositivos que actúan como controladores tanto la Raspberry como el Arduino Mega, deben contener dentro de sus archivos las librerías que proporcionadas por la marca Cytron, a pesar de que los nodos sean de marca Dragino estas librerías son compatibles e indispensable para establecer la comunicación.

Para la utilización de la plataforma Cayenne, es necesario cambiar el payload ya que este aplicativo solo administra paquetes con un payload determinado, este procedimiento se lo puede configurar dentro del servidor o a su vez mediante línea de códigos.

Para la protección de los dispositivos de las estaciones meteorológicas, se puede implementar opciones de calibración automática con la finalidad de preservar los equipos y no ejecutar mantenimientos consecutivos, así como también desarrollar una carcasa de acuerdo a las características del ambiente donde se colocarían cada nodo en las estaciones.

Para la implementación de la red LoRaWan, es importante contar con torres cuya altura va a depender de la ubicación tanto del nodo como del gateway, estos dos dispositivos deben tener línea de vista para obtener la máxima cobertura.

# BIBLIOGRAFÍA

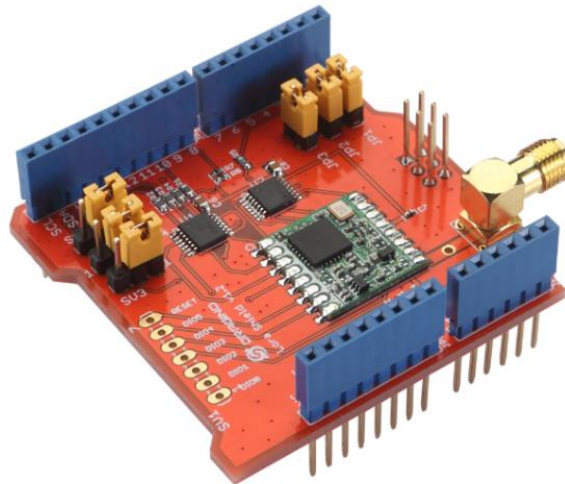
- [1] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 24 Octubre 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.energia.gob.ec/ecuador-un-ejemplo-para-el-mundo-en-energia-limpia-y-desarrollo/>.
- [2] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, [En línea]. Disponible: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/la-institucion/>.
- [3] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, [En línea]. Disponible: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/valores/>.
- [4] F. G. Cordero, «Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología,» 12 Febrero 2015. [En línea]. Disponible: [http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/ForosClimaticos/Foros%20Nacionales/2015/II%20Foro/SISTEMAS%20DE%20OBSERVACION%20E%20INF.%20HIDROLOGICA%20\(INAMHI\).pdf](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/ForosClimaticos/Foros%20Nacionales/2015/II%20Foro/SISTEMAS%20DE%20OBSERVACION%20E%20INF.%20HIDROLOGICA%20(INAMHI).pdf). [Último acceso: 15 Mayo 2018].
- [5] LoRa Alliance, «WHAT IS LoRa@?,» LoRaWan, vol. 1, p. 20, 2015.
- [6] G. M. Carrión, «Desarrollo De Una Pasarela LORA y evaluación de prestaciones,» Valencia, Departamento de Comunicaciones, 2017, p. 10.
- [7] G. G. Ortiz, «Diseño y fabricación de capa de comunicaciones basada en LoRa para plataforma modular de redes de sensores inalámbricos,» Madrid, Industriales ETSII, 2017, pp. 30-32.
- [8] Ministerio de Telecomunicaciones, «Proyecto Dotación,» 3 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/03/Proyecto-Dotacion-2016.pdf>.
- [9] J. I. Morales, «Cálculo de Radio Enlace en la banda GSM-850 utilizando Modelo de Propagación Okumura-Hata,» Argentina.
- [10] L. Vargas, «Zona de Fresnel en Comunicaciones Inalámbricas,» 11 Junio 2015. [En línea]. Disponible: <http://telecomunicaciones-levt.blogspot.com/2015/06/para-un-enlace-de-punto-punto-modoad.html>.

[11] Ministerio de Telecomunicaciones, «Listado de Equipamiento,» 3 2018. [En línea].  
Disponible: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/03/LISTADO-DE-EQUIPAMIENTO.pdf>.

# ANEXOS

# ANEXO A

## Lora Dragino Shield 915MHz



### Información de la versión de hardware

La fuente de hardware está en: [Fuente de hardware de LoRa Shield](#) .

- LoRa Shield v1.0: la primera versión de hardware para LoRa Shield.
- LoRa Shield v1.2: conecte los DIO a Arduino IO. Cambie el conector i-pex al conector SMA.
- LoRa Shield v1.3: elimine 5v a 3.3v LDO, use 3.3 directamente desde el pin Arduino + 3.3v.
- LoRa Shield v1.4: Agregue 3 resistencias R9 / R10 / R11. El propósito es proporcionar la posibilidad de cambiar el pin de Arduino para conectarlo al pin LoRa CS, por lo que Arduino puede conectarse más fácilmente a múltiples dispositivos SPI. de forma predeterminada, R9 se llena y R10 / R11 no se llena. Entonces LoRa CS está conectado a Arduino D10.

### **Características:**

- Compatible con 3.3v o 5v I / O Arduino Board.
- Banda de frecuencia: 915MHz / 868 MHz / 433 MHz (Preconfiguración en fábrica)
- Bajo consumo de energía
- Compatible con **Arduino Leonardo, Uno, Mega, DUE**
- Antena externa a través del conector I-Pex

### **Especificaciones inalámbricas de RFM95W**

- Presupuesto de enlace máximo de 168 dB.
- +20 dBm - 100 mW de salida de RF constante vs.
- +14 dBm de alta eficiencia PA.
- Velocidad de bits programable de hasta 300 kbps.
- Alta sensibilidad: hasta -148 dBm.
- Parte delantera a prueba de balas: IIP3 = -12.5 dBm.
- Excelente inmunidad de bloqueo.
- Corriente RX baja de 10,3 mA, 200 nA de retención de registro.
- Sintetizador totalmente integrado con una resolución de 61 Hz.
- Modulación FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM y OOK.
- Sincronizador de bits incorporado para la recuperación del reloj.
- Detección de preámbulo.
- 127 dB Dynamic Range RSSI.
- Sensores de RF automáticos y CAD con AFC ultrarrápido.
- Paquete de motor de hasta 256 bytes con CRC.
- Sensor de temperatura incorporado e indicador de batería baja.

## Esquemático



## Mapeo de pines

LoRa Chip RESET <-> Arduino D9

LoRa Chip DIO0 <-> Arduino D2

LoRa Chip DIO5 <-> Arduino D8

LoRa Chip DIO2 <-> Arduino D7

LoRa Chip DIO1 <-> Arduino D6

| Resistor from left to right |                           |                                    |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| R9                          | 0 ohm, Loaded by default  | If loaded, LoRa CS <-> Arduino D10 |
| R10                         | 0 ohm, No Load by default | If loaded, LoRa CS <-> Arduino D5  |
| R11                         | 0 ohm, No Load by default | If loaded, LoRa CS <-> Arduino D4  |

| Jumper On Right (default) | Jumper On Left        |                          |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| SV2                       | LoRa CLK <-> ICSP CLK | LoRa CLK <-> Arduino D13 |
| SV3                       | LoRa DI <-> ICSP MOSI | LoRa CLK <-> Arduino D11 |
| SV4                       | LoRa DO <-> ICSP MISO | LoRa CLK <-> Arduino D12 |

Unused pins are in blue rectangle



## ANEXO B

### Arduino Mega ATmega2560

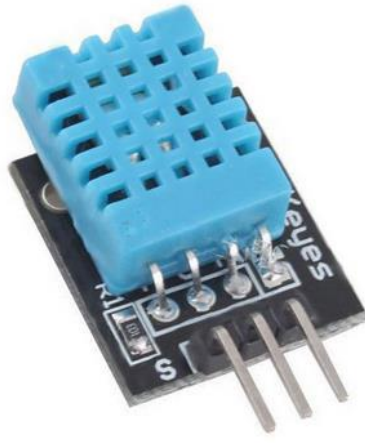


#### Especificaciones técnicas

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Microcontrolador                    | <a href="#">ATmega2560</a>                          |
| Tensión de funcionamiento           | 5V  |
| Voltaje de entrada<br>(recomendado) | 7-12V   |
| Voltaje de entrada (límite)         | 6-20V   |
| Pines de E / S digitales            | 54 (de los cuales 15 proporcionan salida de PWM)    |
| Clavijas de entrada analógica       | dieciséis   |
| Corriente DC por Pin E / S          | 20 mA   |
| Corriente DC para 3.3V Pin          | 50 mA   |
| Memoria flash                       | 256 KB de los cuales 8 KB usa el gestor de arranque |
| SRAM                                | 8 KB  |
| EEPROM                              | 4 KB  |
| Velocidad de reloj                  | 16 MHz  |
| LED_BUILTIN                         | 13  |
| Longitud                            | 101.52 mm   |
| Anchura                             | 53.3 mm   |
| Peso                                | 37 g  |

## ANEXO C

### Sensor de humedad y temperatura DHT 11



#### Especificaciones técnicas:

|                    |                              |
|--------------------|------------------------------|
| <b>Modelo</b>      | <b>DHT11</b>                 |
| Alimentación       | de 3,5 V a 5 V               |
| Consumo            | 2,5 mA                       |
| Señal de salida    | Digital                      |
| <b>Temperatura</b> |                              |
| Rango              | de 0°C a 50°C                |
| Precisión          | a 25°C $\pm$ 2°C             |
| Resolución         | 1°C (8-bit)                  |
| <b>Humedad</b>     |                              |
| Rango              | de 20% RH a 90% RH           |
| Precisión          | entre 0°C y 50°C $\pm$ 5% RH |
| Resolución         | 1% RH                        |

## ANEXO D

### Raspberry Pi 3 Modelo B

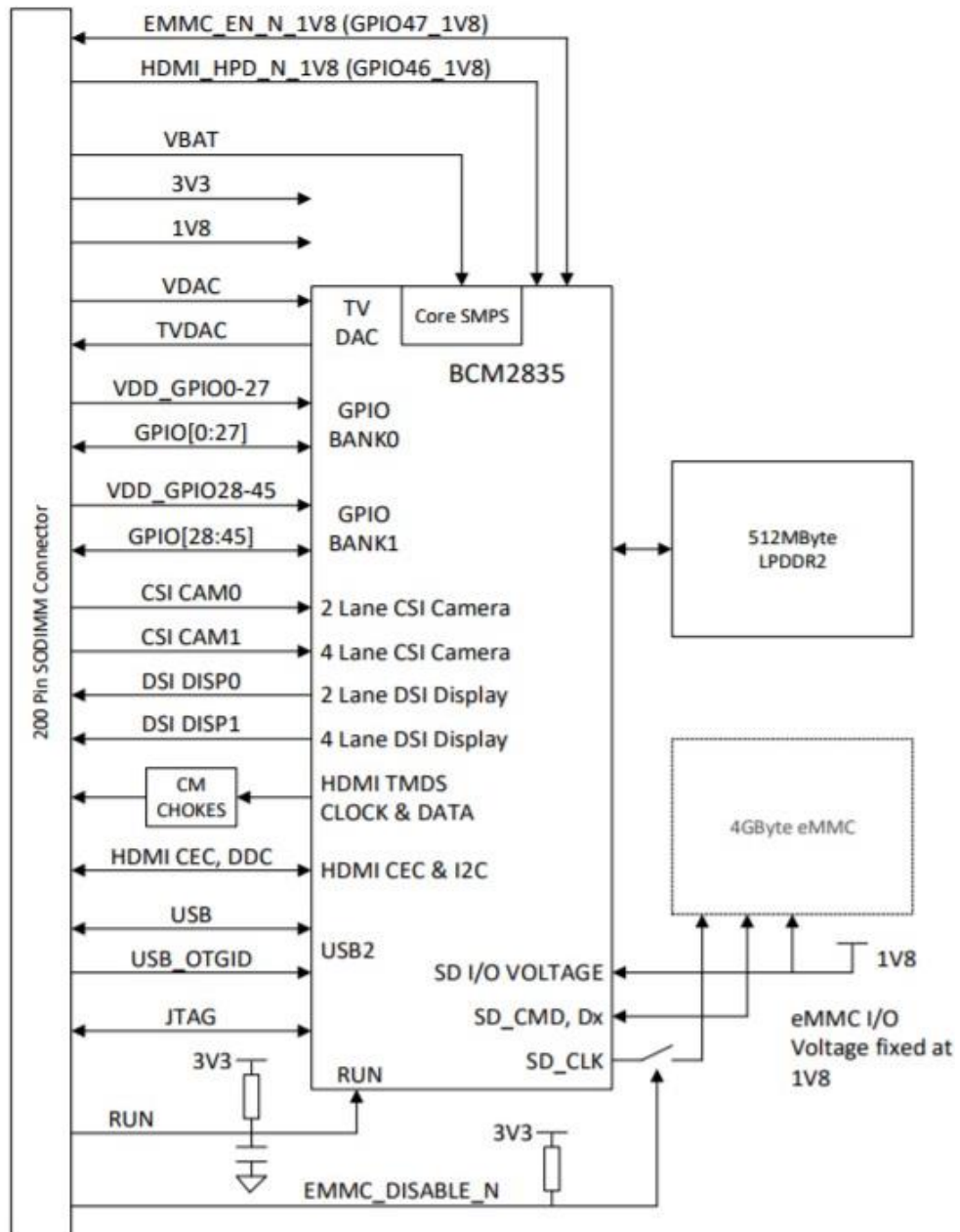


#### Características

El modelo B de Raspberry Pi 3 es el primer modelo de la Raspberry Pi de tercera generación. Reemplazó el Raspberry Pi 2 Model B en febrero de 2016.

- CPU Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 de 64 bits
- 1GB de RAM
- BCM43438 LAN inalámbrica y Bluetooth de baja energía (BLE) a bordo
- 100 base Ethernet
- GPIO extendido de 40 pines
- 4 puertos USB 2
- Salida estéreo de 4 polos y puerto de video compuesto
- HDMI de tamaño completo
- Puerto de cámara CSI para conectar una cámara Raspberry Pi
- Puerto de pantalla DSI para conectar una pantalla táctil Raspberry Pi
- Puerto Micro SD para cargar su sistema operativo y almacenar datos
- Fuente de alimentación micro USB conmutada actualizada de hasta 2.5 A

## Diagrama de Bloque



## Funciones de pines

| Pin Name   | DIR | Voltage Ref      | PDN <sup>a</sup> State    | If Unused  | Description/Notes              |
|--|-----|------------------|---------------------------|------------|--------------------------------|
| <b>RUN and Boot Control (see text for usage guide)</b> |     |                  |                           |            |                                |
| RUN  | I   | 3V3 <sup>b</sup> | Pull High                 | Leave open | Has internal 10k pull up       |
| EMMC_DISABLE_N   | I   | 3V3 <sup>b</sup> | Pull High                 | Leave open | Has internal 10k pull up       |
| EMMC_EN_N_1V8  | O   | 1V8              | Pull High                 | Leave open | Has internal 2k2 pull up       |
| <b>GPIO</b>  |     |                  |                           |            |                                |
| GPIO[27:0]   | I/O | GPIO0-27.VDD     | Pull or Hi-Z <sup>c</sup> | Leave open | GPIO Bank 0                    |
| GPIO[45:28]  | I/O | GPIO28-45.VDD    | Pull or Hi-Z <sup>c</sup> | Leave open | GPIO Bank 1                    |
| <b>Primary SD Interface<sup>d,e</sup></b>              |     |                  |                           |            |                                |
| SDX_CLK  | O   | SDX_VDD          | Pull High                 | Leave open | Primary SD interface CLK       |
| SDX_CMD  | I/O | SDX_VDD          | Pull High                 | Leave open | Primary SD interface CMD       |
| SDX_Dx   | I/O | SDX_VDD          | Pull High                 | Leave open | Primary SD interface DATA      |
| <b>USB Interface</b>                                   |     |                  |                           |            |                                |
| USB_Dx   | I/O | -                | Z                         | Leave open | Serial interface               |
| USB_OTGID  | I   | 3V3              |                           | Tie to GND | OTG pin detect                 |
| <b>HDMI Interface</b>                                  |     |                  |                           |            |                                |
| HDMI_SCL   | I/O | 3V3 <sup>b</sup> | Z <sup>f</sup>            | Leave open | DDC Clock (5.5V tolerant)      |
| HDMI_SDA   | I/O | 3V3 <sup>b</sup> | Z <sup>f</sup>            | Leave open | DDC Data (5.5V tolerant)       |
| HDMI_CEC   | I/O | 3V3              | Z                         | Leave open | CEC (has internal 27k pull up) |
| HDMI_CLKx  | O   | -                | Z                         | Leave open | HDMI serial clock              |
| HDMI_Dx  | O   | -                | Z                         | Leave open | HDMI serial data               |
| HDMI_HPD_N_1V8   | I   | 1V8              | Pull High                 | Leave open | HDMI hotplug detect            |
| <b>CAM0 (CSI0) 2-lane Interface</b>                    |     |                  |                           |            |                                |
| CAM0_Cx  | I   | -                | Z                         | Leave open | Serial clock                   |
| CAM0_Dx  | I   | -                | Z                         | Leave open | Serial data                    |
| <b>CAM1 (CSI1) 4-lane Interface</b>                    |     |                  |                           |            |                                |
| CAM1_Cx  | I   | -                | Z                         | Leave open | Serial clock                   |
| CAM1_Dx  | I   | -                | Z                         | Leave open | Serial data                    |
| <b>DSI0 (Display 0) 2-lane Interface</b>               |     |                  |                           |            |                                |
| DSI0_Cx  | O   | -                | Z                         | Leave open | Serial clock                   |
| DSI0_Dx  | O   | -                | Z                         | Leave open | Serial data                    |
| <b>DSI1 (Display 1) 4-lane Interface</b>               |     |                  |                           |            |                                |
| DSI1_Cx  | O   | -                | Z                         | Leave open | Serial clock                   |
| DSI1_Dx  | O   | -                | Z                         | Leave open | Serial data                    |
| <b>TV Out</b>  |     |                  |                           |            |                                |
| TVDAC  | O   | -                | Z                         | Leave open | Composite video DAC output     |
| <b>JTAG Interface</b>                                  |     |                  |                           |            |                                |
| TMS  | I   | 3V3              | Z                         | Leave open | Has internal 50k pull up       |
| TRST_N   | I   | 3V3              | Z                         | Leave open | Has internal 50k pull up       |
| TCK  | I   | 3V3              | Z                         | Leave open | Has internal 50k pull up       |
| TDI  | I   | 3V3              | Z                         | Leave open | Has internal 50k pull up       |
| TDO  | O   | 3V3              | O                         | Leave open | Has internal 50k pull up       |

<sup>a</sup> The PDN column indicates power-down state (when RUN pin LOW)

<sup>b</sup> Must be driven by an open-collector driver

<sup>c</sup> GPIO have software enabled pulls which keep state over power-down

<sup>d</sup> Only available on Lite variants

<sup>e</sup> The CM will always try to boot from this interface first

<sup>f</sup> Requires external pull-up resistor to 5V as per HDMI spec

## Especificaciones Eléctricas

| Symbol        | Parameter                      | Minimum | Maximum | Unit |
|---------------|--------------------------------|---------|---------|------|
| VBAT          | Core SMPS Supply               | -0.5    | 6.0     | V    |
| 3V3           | 3V3 Supply Voltage             | -0.5    | 4.10    | V    |
| 1V8           | 1V8 Supply Voltage             | -0.5    | 2.10    | V    |
| VDAC          | TV DAC Supply                  | -0.5    | 4.10    | V    |
| GPIO0-27_VDD  | GPIO0-27 I/O Supply Voltage    | -0.5    | 4.10    | V    |
| GPIO28-45_VDD | GPIO28-27 I/O Supply Voltage   | -0.5    | 4.10    | V    |
| SDX_VDD       | Primary SD/eMMC Supply Voltage | -0.5    | 4.10    | V    |

| Symbol   | Parameter                        | Conditions                | Minimum | Typical | Maximum | Unit |
|----------|----------------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|------|
| $V_{IL}$ | Input low voltage <sup>a</sup>   | VDD_IO = 1.8V             | -       | -       | 0.6     | V    |
|          |                                  | VDD_IO = 2.7V             | -       | -       | 0.8     | V    |
| $V_{IH}$ | Input high voltage <sup>a</sup>  | VDD_IO = 1.8V             | 1.0     | -       | -       | V    |
|          |                                  | VDD_IO = 2.7V             | 1.3     | -       | -       | V    |
| $I_{IL}$ | Input leakage current            | TA = +85°C                | -       | -       | 5       | μA   |
| $C_{IN}$ | Input capacitance                | -                         | -       | 5       | -       | pF   |
| $V_{OL}$ | Output low voltage <sup>b</sup>  | VDD_IO = 1.8V, IOL = -2mA | -       | -       | 0.2     | V    |
|          |                                  | VDD_IO = 2.7V, IOL = -2mA | -       | -       | 0.15    | V    |
| $V_{OH}$ | Output high voltage <sup>b</sup> | VDD_IO = 1.8V, IOH = 2mA  | 1.6     | -       | -       | V    |
|          |                                  | VDD_IO = 2.7V, IOH = 2mA  | 2.5     | -       | -       | V    |
| $I_{OL}$ | Output low current <sup>c</sup>  | VDD_IO = 1.8V, VO = 0.4V  | 12      | -       | -       | mA   |
|          |                                  | VDD_IO = 2.7V, VO = 0.4V  | 17      | -       | -       | mA   |
| $I_{OH}$ | Output high current <sup>c</sup> | VDD_IO = 1.8V, VO = 1.4V  | 10      | -       | -       | mA   |
|          |                                  | VDD_IO = 2.7V, VO = 2.3V  | 16      | -       | -       | mA   |
| $R_{PU}$ | Pullup resistor                  | -                         | 50      | -       | 65      | kΩ   |
| $R_{PD}$ | Pulldown resistor                | -                         | 50      | -       | 65      | kΩ   |

<sup>a</sup> Hysteresis enabled

<sup>b</sup> Default drive strength (8mA)

<sup>c</sup> Maximum drive strength (16mA)

| Supply        | Description                    | Minimum  | Typical | Maximum  | Unit |
|---------------|--------------------------------|----------|---------|----------|------|
| VBAT          | Core SMPS Supply               | 2.5      | -       | 5.0 + 5% | V    |
| 3V3           | 3V3 Supply Voltage             | 3.3 - 5% | 3.3     | 3.3 + 5% | V    |
| 1V8           | 1V8 Supply Voltage             | 1.8 - 5% | 1.8     | 1.8 + 5% | V    |
| VDAC          | TV DAC Supply <sup>a</sup>     | 2.5 - 5% | 2.8     | 3.3 + 5% | V    |
| GPIO0-27_VDD  | GPIO0-27 I/O Supply Voltage    | 1.8 - 5% | -       | 3.3 + 5% | V    |
| GPIO28-45_VDD | GPIO28-27 I/O Supply Voltage   | 1.8 - 5% | -       | 3.3 + 5% | V    |
| SDX_VDD       | Primary SD/eMMC Supply Voltage | 1.8 - 5% | -       | 3.3 + 5% | V    |

<sup>a</sup> Requires a clean 2.5-2.8V supply if TV DAC is used, else connect to 3V3

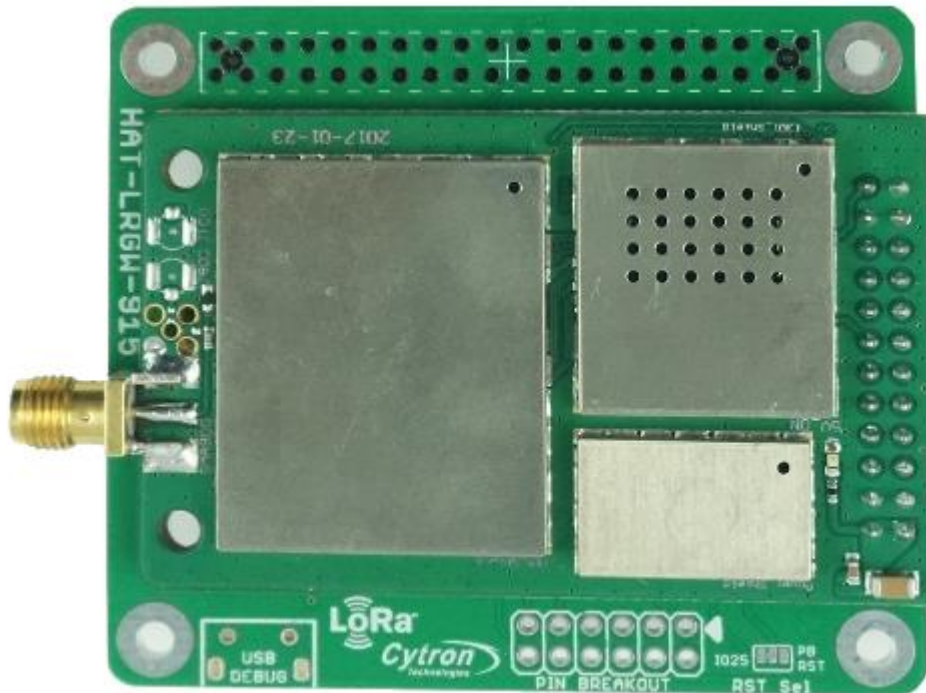


## Funciones alternativas de los pines GPIO

| GPIO | Default |            |       |           |          |            |          |
|------|---------|------------|-------|-----------|----------|------------|----------|
|      | Pull    | ALT0       | ALT1  | ALT2      | ALT3     | ALT4       | ALT5     |
| 0    | High    | SDA0       | SA5   | PCLK      | -        | -          | -        |
| 1    | High    | SCL0       | SA4   | DE        | -        | -          | -        |
| 2    | High    | SDA1       | SA3   | LCD_VSYNC | -        | -          | -        |
| 3    | High    | SCL1       | SA2   | LCD_HSYNC | -        | -          | -        |
| 4    | High    | GPCLK0     | SA1   | DPI_D0    | -        | -          | ARM_TDI  |
| 5    | High    | GPCLK1     | SA0   | DPI_D1    | -        | -          | ARM_TDO  |
| 6    | High    | GPCLK2     | SOE.N | DPI_D2    | -        | -          | ARM_RTCK |
| 7    | High    | SPI0_CE1_N | SWE.N | DPI_D3    | -        | -          | -        |
| 8    | High    | SPI0_CE0_N | SD0   | DPI_D4    | -        | -          | -        |
| 9    | Low     | SPI0_MISO  | SD1   | DPI_D5    | -        | -          | -        |
| 10   | Low     | SPI0_MOSI  | SD2   | DPI_D6    | -        | -          | -        |
| 11   | Low     | SPI0_SCLK  | SD3   | DPI_D7    | -        | -          | -        |
| 12   | Low     | PWM0       | SD4   | DPI_D8    | -        | -          | ARM_TMS  |
| 13   | Low     | PWM1       | SD5   | DPI_D9    | -        | -          | ARM_TCK  |
| 14   | Low     | TXD0       | SD6   | DPI_D10   | -        | -          | TXD1     |
| 15   | Low     | RXD0       | SD7   | DPI_D11   | -        | -          | RXD1     |
| 16   | Low     | FL0        | SD8   | DPI_D12   | CTS0     | SPI1_CE2_N | CTS1     |
| 17   | Low     | FL1        | SD9   | DPI_D13   | RTS0     | SPI1_CE1_N | RTS1     |
| 18   | Low     | PCM_CLK    | SD10  | DPI_D14   | -        | SPI1_CE0_N | PWM0     |
| 19   | Low     | PCM_FS     | SD11  | DPI_D15   | -        | SPI1_MISO  | PWM1     |
| 20   | Low     | PCM_DIN    | SD12  | DPI_D16   | -        | SPI1_MOSI  | GPCLK0   |
| 21   | Low     | PCM_DOUT   | SD13  | DPI_D17   | -        | SPI1_SCLK  | GPCLK1   |
| 22   | Low     | SD0_CLK    | SD14  | DPI_D18   | SD1_CLK  | ARM_TRST   | -        |
| 23   | Low     | SD0_CMD    | SD15  | DPI_D19   | SD1_CMD  | ARM_RTCK   | -        |
| 24   | Low     | SD0_DAT0   | SD16  | DPI_D20   | SD1_DAT0 | ARM_TDO    | -        |
| 25   | Low     | SD0_DAT1   | SD17  | DPI_D21   | SD1_DAT1 | ARM_TCK    | -        |
| 26   | Low     | SD0_DAT2   | TE0   | DPI_D22   | SD1_DAT2 | ARM_TDI    | -        |
| 27   | Low     | SD0_DAT3   | TE1   | DPI_D23   | SD1_DAT3 | ARM_TMS    | -        |

## ANEXO E

### Cytron Gateway 915MHz



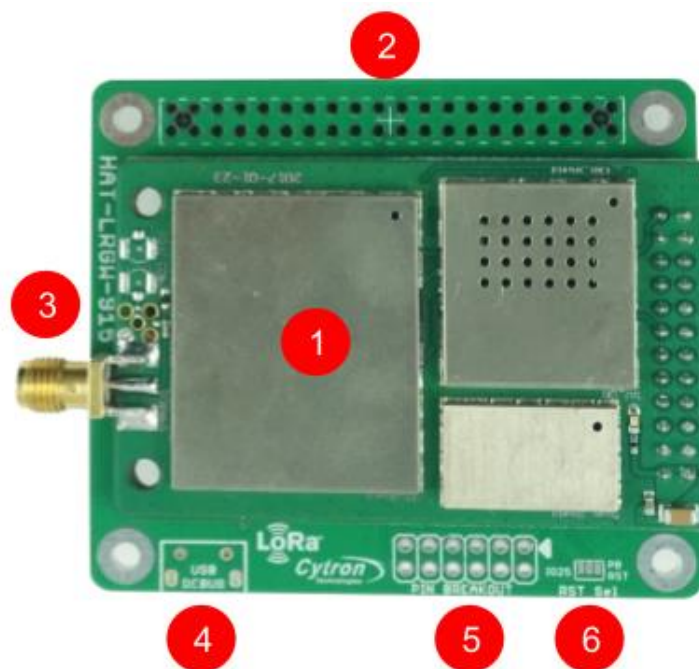
#### Características:

- Fácil integración con Raspberry Pi o posiblemente con otra plataforma para convertirse en una puerta de enlace LoRa
- Canales múltiples con factor de dispersión múltiple, capaces de recibir señales de LoRa desde dispositivos / nodos de LoRa hasta 8 canales diferentes con diferentes factores de dispersión simultáneamente a la vez
- Admite un rango de frecuencia de 900MHz ~ 930MHz
- Viene con un conector de antena SMA, en el cual el usuario puede montarlo con su antena favorita o personalizada (900-930MHz)
- Desbloqueo de pines del módulo de puerta de enlace / concentrador incorporado para la integración de este sombrero con otra plataforma
- Puerto de depuración USB listo para depuración (se usa con la placa Raspberry Pi solamente)



- Interfaz a través de SPI con Raspberry Pi
- Adecuado para aplicaciones de red de sensores inalámbricos de baja potencia, como sistemas de riego, medición inteligente, ciudades inteligentes, detección de teléfonos inteligentes, automatización de edificios, etc.

### Diseño del Producto:



1. **Módulo Concentrador Lora Gateway:** Fabricado a partir de RisingHF, este módulo es multicanal con factor de dispersión múltiple, es capaz de recibir señales de LoRa hasta 8 canales diferentes con diferentes factores de dispersión simultáneamente. Admite un rango de frecuencia de 900 ~ 930MHz.

2. **Encabezado de Raspberry Pi:** Este pin de encabezado es un pin de encabezado GPIO de 2 x 20 para el tablero Raspberry Pi. Este sombrero se puede montar directamente en Raspberry Pi 2 o 3. El montaje de encabezado no es compatible con Raspberry Pi 1.

**3. Conector de antena SMA:** Conector para que los usuarios monten la antena SMA (900 ~ 930MHz).

**4. Puerto de depuración USB:** Se usa para la supervisión y depuración de Raspberry Pi.

**5. Break del Pin:** Desbloqueo de pines directamente desde pinouts del módulo concentrador de pasarela LoRa. Este desbloqueo es adecuado para la integración de este HAT con otra plataforma. Esto también es adecuado para Raspberry Pi 1 que tiene un montaje de cabezal incompatible.

**6. Restablecer la selección de pin:** El concentrador de puerta de enlace LoRa integrado restaura la selección del pin. Por defecto se usa GPIO25 de Raspberry Pi. Otra opción es el pin RST físico desde el pin breakout, donde el usuario puede seleccionar otro pin GPIO desde Raspberry Pi, conectarse al pin RST ruptura pin por cableado manual.

## ANEXO F

### Pruebas Realizadas en campo



Gateway colocado en el Faro las peñas con vista hacia el malecón 2000 en Guayaquil y el malecón Robert Gilbert en Duran.



Nodo 1a colocado en el mirador Elemento Tierra del Malecón 2000 en Guayaquil, con una altura de 10 metros apuntando hacia el faro Las Peñas, lugar donde se encuentra el Gateway.



Nodo 1 ubicado en la plaza Neoclásica en el Malecón 2000 colocado al nivel del suelo, apuntando hacia el Gateway.



Nodo 2. Ubicado en el mirador del Malecón Robert Gilbert de Durán, con una altura de 10 metros, apuntando hacia el Gateway.

# ANEXO G

## Configuración de la Raspberry

### Conexión la Raspberry Pi a Ethernet o WiFi

```
$ sudo raspi-config
```

### Configuración zona local y horaria

```
$ sudo dpkg-reconfigure locales
```

```
$ sudo dpkg-reconfigure tzdata
```

### Instalación actualizada e instalar git

```
$ sudo apt-get update
```

```
$ sudo apt-get upgrade
```

```
$ sudo apt-get install git
```

### Configuración de las credenciales del wifi

```
$ sudo nano /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf
```

### Conexión de red

```
network={  
    ssid="The_SSID_of_your_wifi"  
    psk="Your_wifi_password"}
```

# ANEXO H

## Código del Gateway

### Resetear iC880a PIN

```
SX1301_RESET_BCM_PIN=25
echo "$SX1301_RESET_BCM_PIN" > /sys/class/gpio/export
echo "out" > /sys/class/gpio/gpio$SX1301_RESET_BCM_PIN/direction
echo "0" > /sys/class/gpio/gpio$SX1301_RESET_BCM_PIN/value
sleep 0.1
echo "1" > /sys/class/gpio/gpio$SX1301_RESET_BCM_PIN/value
sleep 0.1
echo "0" > /sys/class/gpio/gpio$SX1301_RESET_BCM_PIN/value
sleep 0.1
echo "$SX1301_RESET_BCM_PIN"> /sys/class/gpio/unexport
```

### Prueba de conexión a internet

```
while [[ $(ping -c1 google.com 2>&1 | grep " 0% packet loss") == "" ]]; do
  echo "[TTN Gateway]: Waiting for internet connection..."
  sleep 30
done
```

### Comunicación con TTN

```
INSTALL_DIR="/opt/ttn-gateway"
LOCAL_CONFIG_FILE=$INSTALL_DIR/bin/local_conf.json
GLOBAL_CONFIG_FILE=$INSTALL_DIR/bin/global_conf.json
if [ ! -e $GLOBAL_CONFIG_FILE ]; then
  echo "ERROR: No global_conf.json found."
  exit 1
if [ ! -e $LOCAL_CONFIG_FILE ]; then
  echo "ERROR: No local_conf.json found."
  exit 1
if
GATEWAY_EUI_NIC="eth0"
if [[ `grep "$GATEWAY_EUI_NIC" /proc/net/dev` == "" ]]; then
GATEWAY_EUI_NIC="wlan0"
if [[ `grep "$GATEWAY_EUI_NIC" /proc/net/dev` == "" ]]; then
  echo "ERROR: No network interface found. Cannot set gateway ID."
  exit 1
if
GATEWAY_EUI=$(ip link show $GATEWAY_EUI_NIC | awk '/ether/ {print $2}' | awk -F: '{print $1$2$3"FFFE"$4$5$6}')
GATEWAY_EUI=${GATEWAY_EUI^^} # toupper
echo "[TTN Gateway]: Use Gateway EUI $GATEWAY_EUI based on $GATEWAY_EUI_NIC"
```

## Configuración remota

```
if [ -d ../gateway-remote-config ]; then
  # First pull from the repo
  pushd ../gateway-remote-config/
  git pull
  git reset --hard
  popd
  # And then try to refresh the gateway EUI and re-link local_conf.json
  if [ -e $LOCAL_CONFIG_FILE ]; then rm $LOCAL_CONFIG_FILE; fi;
  ln -s$INSTALL_DIR/gateway-remote-config/$GATEWAY_EUI.json $LOCAL_CONFIG_FILE
else
```

## Identificación del gateway en la banda de frecuencia de operación

```
GATEWAY_EUI_JSON=$(cat $LOCAL_CONFIG_FILE | grep "\"gateway_ID\":" | cut -d '"' -f4) if [[ $GATEWAY_EUI_JSON == "" ]]; then
  echo "ERROR: Cannot parse Gateway ID in local_conf.json, make sure it is not empty"
  exit 1
if
  echo "Gateway ID found from local_conf.json: $GATEWAY_EUI_JSON"
if [[ $GATEWAY_EUI_JSON != $GATEWAY_EUI ]]; then
  echo "Gateway ID not equal, replacing Gateway ID in local_conf.json with actual Gateway EUI"
  sed -i "s/$GATEWAY_EUI_JSON/$GATEWAY_EUI/" $LOCAL_CONFIG_FILE
if
# Fire up the forwarder. ./connect.sh & ./poly_pkt_fwd
```

# ANEXO I

## Código del nodo

```
#include <lmic.h>
#include <hal/hal.h>
#include <SPI.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>

#define DHTPIN 20 // Pin donde está conectado el sensor
#define DHTTYPE DHT11

static uint8_t mydata[7] = {0x01,0x67,0x00,0x00,0x02,0x68,0x00}; // Cayenne Low Power Payload: CANAL(1BYTE)-TIPO(2BYTE)-
DATA(nBYTE)
//HABILITANDO SENSOR DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

```

// LoRaWAN NwkSKey, network session key // This is the default Semtech key, which is used by the early prototype TTN // network.
static const PROGMEM u1_t NWKSKEY[16] = { 0xBB, 0x9F, 0x28, 0xAA, 0x4A, 0x23, 0xA7, 0xB8, 0x5D, 0x84, 0x7A, 0x48, 0xAE, 0x02,
0x6E, 0x2C };

// LoRaWAN AppSKey, application session key
// This is the default Semtech key, which is used by the early prototype TTN
static const u1_t PROGMEM APPSKEY[16] = { 0xCE, 0xAB, 0x09, 0xB5, 0x8A, 0xBE, 0xD6, 0x25, 0x62, 0xD8, 0x9A, 0x6D, 0x93, 0xA3,
0x66, 0xEC };

// LoRaWAN end-device address (DevAddr)
static const u4_t DEVADDR = 0x260117DF ; // <-- Cambiar para cada nodo!

// These callbacks are only used in over-the-air activation, so they are left empty here (we cannot leave them out completely unless
// DISABLE_JOIN is set in config.h, otherwise the linker will complain).
void os_getArtEui (u1_t* buf) { }
void os_getDevEui (u1_t* buf) { }
void os_getDevKey (u1_t* buf) { }

//static uint8_t mydata[] = "Hi,Lora World!";
static osjob_t sendjob;

// Schedule TX every this many seconds (might become longer due to duty
// cycle limitations).
const unsigned TX_INTERVAL = 20; // Segundos para sensor

// Pin mapping
// This configuration is according to Cytron LoRa RFM shield
/*
 * Shield - Arduino
 * NSS -> D10
 * RST -> D7
 * DIO0 -> D2
 * DIO1 -> D5
 * DIO2 -> D6
 */
const lmic_pinmap lmic_pins = {
  .nss = 10,
  .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
  .rst = 9,
  .dio = {2, 6, 7},
};

void onEvent (ev_t ev) {
  Serial.print(os_getTime());
  Serial.print(" ");
  switch(ev) {
    case EV_SCAN_TIMEOUT:
      Serial.println(F("EV_SCAN_TIMEOUT"));

```



```

        break;
case EV_BEACON_FOUND:
    Serial.println(F("EV_BEACON_FOUND"));
    break;
case EV_BEACON_MISSED:
    Serial.println(F("EV_BEACON_MISSED"));
    break;
case EV_BEACON_TRACKED:
    Serial.println(F("EV_BEACON_TRACKED"));
    break;
case EV_JOINING:
    Serial.println(F("EV_JOINING"));
    break;
case EV_JOINED:
    Serial.println(F("EV_JOINED"));
    break;
case EV_RFU1:
    Serial.println(F("EV_RFU1"));
    break;
case EV_JOIN_FAILED:
    Serial.println(F("EV_JOIN_FAILED"));
    break;
case EV_REJOIN_FAILED:
    Serial.println(F("EV_REJOIN_FAILED"));
    break;
case EV_TXCOMPLETE:
    Serial.println(F("EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)"));
    if (LMIC.txrFlags & TXRX_ACK)
        Serial.println(F("Received ack"));
    if (LMIC.dataLen) {
        Serial.println(F("Received "));
        Serial.println(LMIC.dataLen);
        Serial.println(F(" bytes of payload"));
    }
    // Schedule next transmission
    os_setTimedCallback(&sendjob, os_getTime()+sec2osticks(TX_INTERVAL), do_send);
    break;
case EV_LOST_TSYNC:
    Serial.println(F("EV_LOST_TSYNC"));
    break;
case EV_RESET:
    Serial.println(F("EV_RESET"));
    break;
case EV_RXCOMPLETE:
    // data received in ping slot
    Serial.println(F("EV_RXCOMPLETE"));
    break;
case EV_LINK_DEAD:

```

```

        Serial.println(F("EV_LINK_DEAD"));
        break;
    case EV_LINK_ALIVE:
        Serial.println(F("EV_LINK_ALIVE"));
        break;
    default:
        Serial.println(F("Unknown event"));
        break;
    }
}

void do_send(osjob_t* j){
    // Check if there is not a current TX/RX job running
    if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND) {
        Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not sending"));
    } else {
        float humedad = dht.readHumidity(); //Leemos la Humedad
        float temperatura = dht.readTemperature(); //Leemos la temperatura en grados Celsius

        int16_t tem1;
        tem1= (temperatura/2);
        mydata[2] = tem1>>4;
        mydata[3] = tem1;
        mydata[6] = humedad;
        LMIC_setTxData2(1, mydata, sizeof(mydata), 0);
        Serial.println("Packet queued");
    }
    // Next TX is scheduled after TX_COMPLETE event.
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Serial.println(F("Starting"));

    #ifdef VCC_ENABLE
    // For Pinoccio Scout boards
    pinMode(VCC_ENABLE, OUTPUT);
    digitalWrite(VCC_ENABLE, HIGH);
    delay(1000);
    #endif

    // LMIC init
    os_init();
    // Reset the MAC state. Session and pending data transfers will be discarded.
    LMIC_reset();

    // Set static session parameters. Instead of dynamically establishing a session
    // by joining the network, precomputed session parameters are be provided.

```

```

#ifdef PROGMEM
// On AVR, these values are stored in flash and only copied to RAM
// once. Copy them to a temporary buffer here, LMIC_setSession will
// copy them into a buffer of its own again.
uint8_t appskey[sizeof(APPSKEY)];
uint8_t nwkskey[sizeof(NWKSKEY)];
memcpy_P(appskey, APPSKEY, sizeof(APPSKEY));
memcpy_P(nwkskey, NWKSKEY, sizeof(NWKSKEY));
LMIC_setSession (0x1, DEVADDR, nwkskey, appskey);
#else
// If not running an AVR with PROGMEM, just use the arrays directly
LMIC_setSession (0x1, DEVADDR, NWKSKEY, APPSKEY);
#endif

#ifdef CFG_eu868
// Set up the channels used by the Things Network, which corresponds
// to the defaults of most gateways. Without this, only three base
// channels from the LoRaWAN specification are used, which certainly
// works, so it is good for debugging, but can overload those
// frequencies, so be sure to configure the full frequency range of
// your network here (unless your network autoconfigures them).
// Setting up channels should happen after LMIC_setSession, as that
// configures the minimal channel set.
// NA-US channels 0-71 are configured automatically
LMIC_setupChannel(0, 868100000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-band
LMIC_setupChannel(1, 868300000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7B), BAND_CENTI); // g-band
LMIC_setupChannel(2, 868500000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-band
LMIC_setupChannel(3, 867100000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-band
LMIC_setupChannel(4, 867300000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-band
LMIC_setupChannel(5, 867500000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-band
LMIC_setupChannel(6, 867700000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-band
LMIC_setupChannel(7, 867900000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI); // g-band
LMIC_setupChannel(8, 868800000, DR_RANGE_MAP(DR_FSK, DR_FSK), BAND_MILLI); // g2-band
// TTN defines an additional channel at 869.525Mhz using SF9 for class B
// devices' ping slots. LMIC does not have an easy way to define set this
// frequency and support for class B is spotty and untested, so this
// frequency is not configured here.
#elif defined(CFG_us915)
// NA-US channels 0-71 are configured automatically
// but only one group of 8 should (a subband) should be active
// TTN recommends the second sub band, 1 in a zero based count.
// https://github.com/TheThingsNetwork/gateway-conf/blob/master/US-global_conf.json
LMIC_selectSubBand(1);
#elif defined(CFG_au915)
LMIC_selectSubBand(3);
#endif

// Disable link check validation

```

```
LMIC_setLinkCheckMode(0);

// Disable ADR
LMIC_setAdrMode(false);

// TTN uses SF9 for its RX2 window.
LMIC.dn2Dr = DR_SF9;

// Set data rate and transmit power for uplink (note: txpow seems to be ignored by the library)
LMIC_setDrTxpow(DR_SF7,14);

// Start job
do_send(&sendjob);

//CONFIGURACION DE DHT11
dht.begin();
}

void loop() {
  os_runloop_once();
}
```