



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y**  
**REDES**

**“DISEÑO DE UNA RED LORA QUE PERMITA LA**  
**INTERCONEXIÓN DE SENSORES INALÁMBRICOS EN LA**  
**CIUDAD DE RIOBAMBA BAJO EL CONCEPTO DE SMART**  
**CITIES”**

**Trabajo de titulación**

**TIPO: PROYECTO TÉCNICO**

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y**  
**REDES**

**AUTOR: ISRAEL ANDRÉS TRUJILLO BURBANO**

**DIRECTOR: LIC. RAÚL MARCELO LOZADA YÁNEZ MG.**

Riobamba – Ecuador

2022

**©2022, Israel Andrés Trujillo Burbano**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Israel Andrés Trujillo Burbano, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 10 de agosto de 2022

**Israel Andrés Trujillo Burbano**

**060357673-7**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE  
INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA INGENIERIA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO DE UNA RED LORA QUE PERMITA LA INTERCONEXIÓN DE SENSORES INALÁMBRICOS EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA BAJO EL CONCEPTO DE SMART CITIES**, realizado por el señor: **ISRAEL ANDRÉS TRUJILLO BURBANO** ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Oswaldo Geovanny Martínez Guashima

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Lic. Raúl Marcelo Lozada Yáñez Mg.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Washington Gilberto Luna Encalada

**ASESOR DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación es dedicado con mi corazón a mis padres Wilson y Germania, gracias a su cariño y apoyo soy quien soy, por enseñarme a nunca rendirme y luchar siempre contra todo y todos, los amo.

Su hijo, Israel

## **AGRADECIMIENTO**

Siempre primero a mis padres, a mi viejita por luchar incansablemente para que mis hermanos y yo salgamos adelante, no habrá paraíso suficiente para agradecerle todo el sacrificio que ha hecho por nosotros, usted es la razón principal por la que día a día me pongo de pie y a mi viejo porque nunca nos faltó nada, gracias a su trabajo siempre hemos tenido el respaldo necesario para poder alcanzar lo que hemos deseado, sin usted todo hubiese sido más difícil, mucho más difícil.

A mi hermano Wilson por enseñarme a vivir la vida y hacerme parte de la suya.

A mi hermana Mónica por ser mi segunda madre y estar ahí para lo que necesitara.

A mi hermana Andrea por haber traído a este mundo a mis mejores amigos, ellos han sido mi alegría.

A Leo y Nato los miro y me veo reflejado en ellos, por eso los entiendo, gracias por mantener vivo el niño que llevo en mí.

A mis abuelos Papá Lucho y Papito Marco porque siempre han sido mis ángeles de la guarda, sé que son ustedes los que están ahí.

A Lisley, una persona muy especial para mí, porque se ha sabido ganar mi corazón, demostrándome siempre su cariño y empujándome cada día a la superación.

A Ska-P, Zona Ganjah e Ilegales por darme la conciencia, la paz y la maldad que todo ser humano necesita en esta vida, que conciertazos.

Y finalmente a Barcelona Sporting Club, por ser mi alegría y mi tristeza cada fin de semana, algún día te voy a ver en lo más alto y será glorioso.

*Israel Andrés Trujillo Burbano*

## TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPITULO I

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA .....	2
1.1. Formulación del problema.....	2
1.2. Sistematización del problema .....	2
1.3. Justificación teórica.....	2
1.4. Justificación práctica.....	3
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. <i>Objetivo general</i> .....	5
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	5

### CAPITULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
2.1. Riobamba .....	6
2.2. Smart city .....	7
2.2.1. <i>Modelo de funcionamiento de una smart city</i> .....	8
2.2.2. <i>Aplicaciones en smart cities</i> .....	9
2.2.3. <i>Sensores para smart cities</i> .....	10
2.3. Redes inalámbricas.....	11
2.3.1. <i>Tipos de redes inalámbricas</i> .....	12

2.3.2.	<i>Softwares</i> .....	13
2.3.2.1.	<i>Xirio</i> .....	13
2.3.2.2.	<i>IDE de Arduino</i> .....	14
2.4.	<b>Low power wide area network (LPWAN)</b> .....	15
2.4.1.	<i>Características de LPWAN</i> .....	15
2.4.2.	<i>Tecnologías LPWAN</i> .....	16
2.4.2.1.	<i>Comparativa en base a parámetros técnicos</i> .....	16
2.4.2.2.	<i>Comparativa en parámetros de IoT</i> .....	17
2.4.3.	<i>IoT y las redes LPWAN</i> .....	18
2.5.	<b>LoRa</b> .....	19
2.5.1.	<i>Banda ISM 902-928</i> .....	20
2.5.2.	<i>Modulación LoRa</i> .....	21
2.5.3.	<i>Spreading Factor (SF)</i> .....	23
2.5.4.	<i>Mecanismo de velocidad de datos adaptativa (ADR)</i> .....	24
2.5.5.	<i>Received signal strength indication (RSSI)</i> .....	25
2.5.6.	<i>Relación señal / ruido (SNR)</i> .....	25
2.5.7.	<i>Sensibilidad</i> .....	26
2.5.8.	<i>Dimensionamiento de cobertura</i> .....	26
2.6.	<b>LoRaWAN</b> .....	28
2.6.1.	<i>Arquitectura y topología de una red LoRaWAN</i> .....	29
2.6.2.	<i>Clases de dispositivos LoRaWAN</i> .....	30
2.6.3.	<i>Seguridad en LoRaWAN</i> .....	31
2.6.3.1.	<i>Métodos de activación</i> .....	32
2.6.3.2.	<i>Integridad y confidencialidad</i> .....	33

### **CAPITULO III**

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	34
3.1.	<b>Equipos de trabajo</b> .....	34
3.1.1.	<i>Equipo de evaluación LoRa</i> .....	34

3.1.1.1.	<i>Especificaciones técnicas ESP32</i> .....	35
3.2.	<b>Sectores de estudio seleccionados</b> .....	37
3.2.1.	<i>Sector industrial</i> .....	39
3.2.2.	<i>Sector comercial</i> .....	39
3.2.3.	<i>Sector residencial</i> .....	40
3.2.4.	<i>Sector de esparcimiento</i> .....	40
3.3.	<b>Descripción del procedimiento</b> .....	42
3.4.	<b>Simulaciones</b> .....	43
3.4.1.	<i>Sector industrial</i> .....	44
3.4.1.1.	<i>Parque Industrial Riobamba</i> .....	44
3.4.2.	<i>Sector comercial</i> .....	45
3.4.2.1.	<i>Centro Histórico</i> .....	45
3.4.3.	<i>Sector residencial</i> .....	47
3.4.3.1.	<i>Barrio Los Álamos</i> .....	47
3.4.3.2.	<i>Barrio La Paz</i> .....	48
3.4.3.3.	<i>Barrio La Didonato</i> .....	49
3.4.3.4.	<i>Barrio La Primavera</i> .....	50
3.4.4.	<i>Sector de esparcimiento</i> .....	50
3.4.4.1.	<i>Parque Sesquicentenario</i> .....	50
3.4.4.2.	<i>Parque Guayaquil</i> .....	51
3.4.4.3.	<i>Parque Ecológico</i> .....	52

#### **CAPITULO IV**

4.	<b>RESULTADOS</b> .....	53
4.1.	<b>Ubicación de equipos y datos de cobertura</b> .....	53
4.1.1.	<i>Sector industrial</i> .....	54
4.1.1.1.	<i>Parque Industrial Riobamba</i> .....	54
4.1.2.	<i>Sector comercial</i> .....	55
4.1.2.1.	<i>Centro Histórico</i> .....	55

<b>4.1.3. Sector residencial.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1.3.1. Barrio Los Álamos.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1.3.2. Barrio La Paz.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.3.3. Barrio La Didonato.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.3.4. Barrio La Primavera.....</b>	<b>61</b>
<b>4.1.4. Sector de esparcimiento.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.4.1. Parque Sesquicentenario.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.4.2. Parque Guayaquil.....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.4.3. Parque Ecológico.....</b>	<b>65</b>
<b>4.2. Viabilidad.....</b>	<b>66</b>
<b>4.2.1. Viabilidad técnica.....</b>	<b>67</b>
<b>4.2.2. Viabilidad económica.....</b>	<b>68</b>

## **CAPITULO V**

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>70</b>
--------------------------	-----------

<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>71</b>
-----------------------------	-----------

## **BIBLIOGRAFIA**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Características de las Tecnologías LPWAN utilizadas en IoT .....	16
<b>Tabla 2-2:</b>	Parámetros de configuración de equipos LoRa.....	24
<b>Tabla 1-3:</b>	Media de RSSI en cada sector de estudio. ....	38
<b>Tabla 2-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Parque Industrial.....	45
<b>Tabla 3-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Centro Histórico. ....	46
<b>Tabla 4-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Centro Histórico. ....	47
<b>Tabla 5-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Centro Histórico. ....	47
<b>Tabla 6-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Barrio los Álamos.....	48
<b>Tabla 7-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Barrio La Paz. ....	48
<b>Tabla 8-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Barrio La Didonato. ....	49
<b>Tabla 9-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Barrio La Primavera. ....	50
<b>Tabla 10-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Parque Sesquicentenario.....	50
<b>Tabla 11-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Parque Guayaquil. ....	51
<b>Tabla 12-3:</b>	Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Parque Ecológico.....	52
<b>Tabla 1-4:</b>	Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Parque Industrial Riobamba .....	55
<b>Tabla 2-4:</b>	Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Centro Histórico .....	56
<b>Tabla 3-4:</b>	Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Barrio Los Álamos .....	58
<b>Tabla 4-4:</b>	Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Barrio La Paz.....	60
<b>Tabla 5-4:</b>	Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Barrio La Didonato.....	61
<b>Tabla 6-4:</b>	Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Barrio La Primavera .....	62
<b>Tabla 7-4:</b>	Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Parque Sesquicentenario .....	63
<b>Tabla 8-4:</b>	Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Parque Guayaquil .....	65
<b>Tabla 9-4:</b>	Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Parque Ecológico.....	66
<b>Tabla 10-4:</b>	Costos de Implementación de la red propuesta.....	69
<b>Tabla 11-4:</b>	Costos del desarrollo de la presente investigación.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2.</b>	Mapa de la Ciudad de Riobamba.....	7
<b>Figura 2-2.</b>	Arquitectura de una Smart City .....	8
<b>Figura 3-2.</b>	Ejes en el funcionamiento de una Smart City .....	8
<b>Figura 4-2.</b>	Red Inalámbrica Típica.....	12
<b>Figura 5-2.</b>	Redes y Tecnologías Inalámbricas.....	12
<b>Figura 6-2.</b>	Mapa de cobertura en XIRIO de la Red LoRaWAN propuesta.....	14
<b>Figura 7-2.</b>	Diagrama de conexión ESP32 con IDE de Arduino .....	14
<b>Figura 8-2.</b>	Regiones del mundo según las frecuencias de espectro utilizadas.....	20
<b>Figura 9-2.</b>	Plan de Canales en la Banda US 902-928.....	20
<b>Figura 10-2.</b>	Onda de frecuencia de un chirp ascendente y descendente.....	21
<b>Figura 11-2.</b>	Modulación LoRa .....	22
<b>Figura 12-2.</b>	Demodulación LoRa .....	22
<b>Figura 13-2.</b>	Relación entre el Spreading Factor y la duración del símbolo.....	23
<b>Figura 14-2.</b>	Modelo de capas de la Tecnología LoRa .....	28
<b>Figura 15-2.</b>	Arquitectura y Topología de la Red LoRaWAN.....	29
<b>Figura 1-3.</b>	Equipos de Evaluación LoRa (ESP32) .....	35
<b>Figura 2-3.</b>	Diagrama de bloques ESP32.....	37
<b>Figura 3-3.</b>	Sectores de estudio en el plano de la Ciudad de Riobamba.....	38
<b>Figura 4-3.</b>	Diseño de la Red LoRa para la Ciudad de Riobamba.....	41
<b>Figura 5-3.</b>	Configuración de Gateways en XIRIO. ....	43
<b>Figura 6-3.</b>	Características de recepción.....	44
<b>Figura 7-3.</b>	Código de colores, mapa de cobertura.....	44
<b>Figura 8-3.</b>	Mapa de cobertura, Sector Industrial.....	45
<b>Figura 9-3.</b>	Mapa de cobertura, Sector Comercial.....	46
<b>Figura 10-3.</b>	Mapa de cobertura, Sector Comercial.....	46
<b>Figura 11-3.</b>	Mapa de cobertura, Sector Comercial.....	47
<b>Figura 12-3.</b>	Mapa de cobertura, Barrio Los Álamos.....	48

<b>Figura 13-3.</b>	Mapa de cobertura, Barrio La Paz. ....	49
<b>Figura 14-3.</b>	Mapa de cobertura, Barrio La Didonato. ....	49
<b>Figura 15-3.</b>	Mapa de cobertura, Barrio La Primavera. ....	50
<b>Figura 16-3.</b>	Mapa de cobertura, P. Sesquicentenario. ....	51
<b>Figura 17-3.</b>	Mapa de cobertura, Parque Guayaquil. ....	51
<b>Figura 18-3.</b>	Mapa de cobertura, Parque Ecológico. ....	52
<b>Figura 1-4.</b>	Vista satelital de los puntos ubicados en cada uno de los sectores de estudio. ....	53
<b>Figura 2-4.</b>	Ubicación de Equipos, Parque Industrial. ....	54
<b>Figura 3-4.</b>	Ubicación de Equipos, Centro Histórico. ....	56
<b>Figura 4-4.</b>	Ubicación de Equipos, Barrio Los Álamos. ....	58
<b>Figura 5-4.</b>	Ubicación de Equipos, Barrio La Paz. ....	59
<b>Figura 6-4.</b>	Ubicación de Equipos, Barrio La Didonato. ....	60
<b>Figura 7-4.</b>	Ubicación de Equipos, Barrio La Primavera. ....	62
<b>Figura 8-4.</b>	Ubicación de Equipos, Parque Sesquicentenario. ....	63
<b>Figura 9-4.</b>	Ubicación de Equipos, Parque Guayaquil. ....	64
<b>Figura 10-4.</b>	Ubicación de Equipos, Parque Ecológico. ....	66

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN – ESP32**

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de titulación fue realizar el diseño de una Red con tecnología LoRa, la cual permita la interconexión de sensores inalámbricos en la Ciudad de Riobamba, especialmente en la zona urbana ya que aquí habita más del 70% de su actual población, todo esto bajo el concepto de Smart Cities o Ciudades Inteligentes, esto se realizó mediante la toma de alrededor de 1500 muestras de los niveles de potencia a través de un transmisor y un receptor basados en el Módulo Wifi LoRa ESP32 en cuatro sectores de la ciudad, Sector Industrial (Parque Industrial Riobamba), Sector Comercial (Centro Histórico), Sector Residencial (Los Álamos, La Paz, La Didonato, La Primavera) y Sector de Esparcimiento (Parque Sesquicentenario, Parque Guayaquil, Parque Ecológico). Primero se determinó el edificio o lugar más alto dentro de cada uno de los sectores de estudio antes mencionados para poder ubicar el Gateway y así mediante la ayuda de un Nodo Móvil, poder desplazarse a través de toda el área de estudio obteniendo cada una de las muestras, este nodo previamente se ha configurado para permitir la visualización del indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI), posteriormente de todas las muestras obtenidas, se decidió optar solo por entre 9 y 13 mismas que bordean el rango de -117 dBm a -125 dBm y diferentes Spreading Factors (7, 9, 10 y 12), dependiendo de la distancia que se encuentre el Nodo LoRa de su Gateway, estos parámetros son considerados óptimos para poder brindar una transmisión y recepción de datos correcta dentro de la ciudad. Con las muestras obtenidas se diseñó una Red LoRa que cubre alrededor de 200 hectáreas dentro de la ciudad, consta de 113 ubicaciones óptimas para los sensores de la red, ubicaciones estratégicas que brindan cobertura a unidades educativas, hospitales, centros comerciales, mercados, parques, plazas, edificaciones gubernamentales, parques, paradas de buses, entre otros, 11 ubicaciones óptimas para Gateways LoRa y tiene disponible 24 Access Points WiFi de la red local con la que cuenta la Ciudad de Riobamba en cada uno de los sectores de estudio.

**Palabras Clave:** < CIUDAD INTELIGENTE>, < INTERNET DE LAS COSAS (IoT)>, < RED DE ÁREA AMPLIA DE BAJA POTENCIA (LPWAN)>, <REDES DE SENSORES INALAMBRICOS (WSN)>, <TECNOLOGÍA LORA>, <TECNOLOGÍA LORAWAN>.

## **ABSTRACT**

The objective of this degree work was to carry out the design of a Network with LoRa technology, which allows the interconnection of wireless sensors in Riobamba city, especially in the urban area since more than 70% of its current population lives here. all this under the concept of Smart Cities or Intelligent Cities, this was done by taking around 1500 samples of the power levels through a transmitter and a receiver based on the LoRa ESP32 Wifi Module in four sectors of the city, Industrial Sector (Riobamba Industrial Park), Commercial Sector (Centro Historical), Residential Sector (Los Álamos, La Paz, La Didonato, La Primavera) and Leisure Sector (Sesquicentenario Park, Guayaquil Park, Ecológico Park). First, the tallest building or place within each of the before mentioned study sectors was determined in order to locate the Gateway and thus, with the help of a Mobile Node, be able to move through the entire study area obtaining each of the samples, this node has previously been configured to allow the display of the Received Signal Strength Indicator (RSSI), subsequently, from all the samples obtained, it was decided to choose only between 9 and 13, which border the range of -117 dBm to -125 dBm and different Spreading Factors (7, 9, 10 and 12), depending on the distance found the LoRa Node of your Gateway, these parameters are considered optimal to be able to provide a correct transmission and reception of data within the city. With the samples obtained, a LoRa Network was designed that covers around 200 hectares within the city, consists of 113 optimal locations for the network sensors, strategic locations that provide Diseño de una Red LoRa que permita la interconexión de sensores inalámbricos en la ciudad de Riobamba bajo el concepto de Smart Cities. coverage to educational units, hospitals, shopping centers, markets, parks, government buildings, parking lots, bus stops, among others, 11 optimal locations for LoRa Gateways and 24 WiFi Access Points available from the local network that the City of Riobamba has in each of the study sectors.

**Keywords:** < SMART CITY>, < INTERNET OF THINGS (IoT)>, < LOW POWER WIDE AREA NETWORK (LPWAN)>, < WIRELESS SENSOR NETWORKS (WSN)>, < LORA TECHNOLOGY>, < LORAWAN TECHNOLOGY>.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico de las ciudades cada vez juega un papel más importante en brindar una mejor calidad de vida a sus habitantes. En ese sentido, para poder establecer soluciones a los problemas que presentan las ciudades, como: contaminación, consumo energético, movilidad, etc., se está haciendo mucho uso de las llamadas redes de sensores inalámbricos para otorgarnos una expansión amplia hacia la Internet de las Cosas (IoT).

En la actualidad existen numerosos desarrollos y estándares sobre redes de sensores inalámbricas como ZigBee, LoRa, SigFox, entre otras, pero aún no han proliferado de forma masiva en aplicaciones que intervengan en la vida cotidiana, de acuerdo con el potencial que estas presentan (VARELA, 2018, p.26).

En el año 2018 y 2015 se realizaron estudios sobre cómo funcionan dos tipos de tecnologías inalámbricas en las ciudades de Valencia y Madrid respectivamente, el Primero denominado “Evaluación de pasarela LoRa en entornos urbanos” (MOYA, 2018, p.15), en el que básicamente se realiza la creación de un Gateway LoRa, se lo pone a prueba en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Valencia y se procede con el análisis de cobertura en todo el campus. El segundo estudio denominado “Una red de sensores para las Smart Cities” (DA PAZ, 2019, p.59), en particular, se implementa una red inalámbrica con tecnología ZigBee como protocolo de comunicación con micrófonos como sensores, para recolectar niveles de ruido.

Para lograr ser una Smart City, cada ciudad debe tener en claro su problemática y así poder encontrar una solución eficiente a la misma, en lo posible tratando de evitar compararse con alguna otra urbe ya que cada una tendrá sus demandas o necesidades.

Por estos motivos resulta interesante investigar el desarrollo de estas tecnologías en el Ecuador, principalmente su funcionamiento en la Ciudad de Riobamba y poder plantear un escenario de futuros trabajos en torno a esta temática.

## CAPITULO I

### 1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Formulación del problema

¿El desarrollar el diseño de una red LoRa permitirá la interconexión de sensores inalámbricos en la ciudad de Riobamba bajo el concepto de Smart Cities?

#### 1.2. Sistematización del problema

- ¿Qué requerimientos se debe cumplir para que la Ciudad de Riobamba sea considerada una Smart City?
- ¿Qué tipo de arquitectura de red LoRa se adapta mejor al entorno de la Ciudad de Riobamba?
- ¿La tecnología LoRa es la más adecuada para lograr la interconexión de sensores inalámbricos en la ciudad de Riobamba?
- ¿Qué costo tendrá la implementación de la red LoRa en la ciudad de Riobamba?

#### 1.3. Justificación teórica

En el año 2015 la Organización de Naciones Unidas (ONU), aprobó 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) los cuales poseen como objetivo combatir la pobreza, la desigualdad y el calentamiento global primordialmente, uno de dichos objetivos es conseguir que las ciudades y comunidades sean sustentables, esto ya que, aunque las urbes ocupan solo el 3% de la extensión de la tierra, son las responsables del 80% de toda clase de contaminación y consumo de energía (ONU, 2015, p.2).

En este contexto nace la pregunta, ¿cómo conseguir la sostenibilidad?, pues, construyendo Smart Cities, ciudades capaces de identificar los inconvenientes que padece el área urbana y poder brindar una solución óptima (Sohravy, 2017, p.48).

El control de calidad del agua y del aire, de inmuebles e infraestructuras, la optimización de recursos en la agricultura y energía eléctrica, mejoras en movilidad, son varios de los beneficios que muestran las Smart Cities, esto debido a la puesta en marcha de una infraestructura que posibilita la conexión de nodos que recolectan datos y los retransmiten, permitiendo el cambio de información con otros dispositivos sin mediación humana (Sosa, 2017, p.102).

El presente trabajo se lo realizo con el propósito de aportar en el desarrollo tecnológico de la ciudad de Riobamba, ya que los resultados obtenidos validan el desempeño de una de las nuevas tecnologías disponibles en comunicación inalámbrica en la ciudad.

#### **1.4. Justificación práctica**

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), la población en la ciudad de Riobamba ha crecido considerablemente al igual que su superficie urbana, llegando a contar con 124 807 habitantes aproximadamente (INEC, 2010, p.3), trayendo consigo un mayor número de contaminación ambiental y mayor requerimiento energético, creando la necesidad de que Riobamba crezca también tecnológicamente mucho más y así poder brindar mejores condiciones de vida a las personas que habitan en ella.

Con este proyecto se da un enfoque claro de cómo se comporta la tecnología LoRa (Long Rate) en la ciudad de Riobamba, analizando su cobertura, arquitectura, seguridad, capacidad de transmisión y los distintos factores que influyen en la misma, determinando las ventajas, alcance y limitaciones que puede ofrecer esta tecnología inalámbrica.

Las pruebas de campo se las realizo ubicando nodos estratégicamente en el área de estudio, un Gateway que es el encargado de recibir los datos y enviarlos al usuario final haciendo uso de la red de internet municipal con la que cuenta la ciudad de Riobamba, teniendo en cuenta varios sectores en los que se considera será útil la implementación inicial de las redes de sensores comunicadas mediante tecnologías inalámbricas, los sectores sujetos al estudio fueron:

- El **Sector Industrial** ubicado en el sur de la ciudad que cuenta con varias fábricas de diferentes productos como, lácteos, muebles, textiles, licores, etc.
- El **Sector Comercial** ubicado en el centro histórico de la ciudad, que es principalmente en donde se concentra la mayor cantidad de locales de venta de productos al público.
- Del **Sector Residencial** se utilizó cuatro barrios ubicados en el Norte, Sur, Este y Oeste de la ciudad, barrios como: Los Álamos, La Paz, La Primavera y La Didonato.
- Por último, los **Sectores de Esparcimiento** fueron tres de los principales parques de la ciudad, el Parque Guayaquil, el Parque Sesquicentenario y el Parque Ecológico, ya que cuentan con gran concurrencia de público.

De esta manera se logró cubrir una parte importante de la ciudad de Riobamba, teniendo en claro cuáles son las mejores ubicaciones dentro de los sectores especificados para colocar los sensores

y los Gateways de la red LoRa y en futuros trabajos comenzar a implementar las diferentes soluciones con las que cuentan las Smart Cities, soluciones en movilidad, comunicación, eficiencia energética e interacción humana, siendo los principales beneficiarios sus habitantes al contar con una mejor calidad de vida.

## **1.5. Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo general***

Desarrollar el diseño de una red LoRa que permita la interconexión de sensores inalámbricos en la ciudad de Riobamba bajo el concepto de Smart Cities.

### ***1.5.2. Objetivos específicos***

- Analizar la tecnología LoRa, sus ventajas, capacidades, limitaciones y seguridades.
- Analizar y determinar los sectores de la ciudad de Riobamba en donde se realizarán los estudios de cobertura.
- Analizar que arquitectura de red LoRa se adapta mejor al entorno de la ciudad de Riobamba.
- Determinar en cada uno de los sectores de estudio, los adecuados puntos de ubicación en donde los nodos y Gateways ofrezcan la mejor cobertura.
- Llevar a cabo el análisis de cobertura de la red LoRa diseñada para la Ciudad de Riobamba y determinar el número de Gateways requeridos por sector de estudio.
- Realizar la evaluación de parámetros técnicos y económicos que definan la viabilidad de la implementación de la red Lora en la ciudad de Riobamba.

## CAPITULO II

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

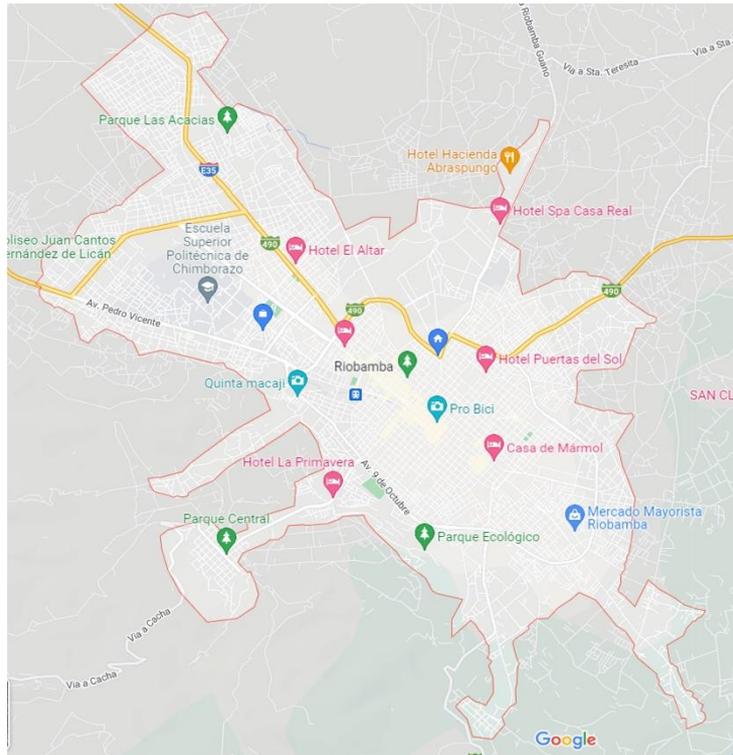
#### 2.1. Riobamba

Riobamba, también conocida como San Pedro de Riobamba, es una ciudad ecuatoriana; capital de la provincia de Chimborazo, así como la urbe más grande y poblada de esta, se localiza al centro de la región Interandina del Ecuador, cerca del centro geográfico del país, rodeada de varios volcanes como el Chimborazo, el Tungurahua, el Altar y el Carihuairazo, la ciudad se encuentra a una altitud de 2750 m s. n. m. lo que hace que el clima en Riobamba sea por lo general frío con dos estaciones, una húmeda y una seca (Alcaldía de Riobamba, 2012, p.9).

Fundada el 9 de julio de 1575 cerca de la laguna de Colta, tras un devastador terremoto en el año de 1797 quedó completamente destruida y se trasladó, en el mismo año, al lugar que ocupa hoy en día, convirtiéndose en la primera ciudad planificada del país, lo que la hace ideal para implementar redes inalámbricas con muy buena cobertura, cabe recalcar que Riobamba es uno de los más importantes centros administrativos, económicos, financieros y comerciales del centro del Ecuador siendo sus actividades principales la agricultura, el comercio, la ganadería y la industria (Alcaldía de Riobamba, 2012, p.8).

Consta de cinco parroquias urbanas: Maldonado, Veloz, Lizarzaburu, Velasco y Yaruquíes; y de once parroquias rurales: San Juan, Licto, Calpi, Quimiag, Cacha, Flores, Punín, Cubijes, San Luis, Pungalá y Licán, este estudio está dirigido especialmente a la zona urbana de la ciudad de Riobamba, ya que cuenta con 124.807 habitantes, es decir el 70.01% de la población se concentra en la cabecera cantonal, Riobamba y el 29.09% en las 11 parroquias rurales, las parroquias rurales tienen una población inferior a los 9.000 habitantes, e incluso por la expulsión constante de población, esta se va reduciendo significativamente año tras año, al punto que el crecimiento demográfico es negativo en parroquias como Cacha con el -2,82%, Flores con el -1,36%, Licto con -0,67%, parroquias como San Juan, Pungalá, Quimiag, Punín, con tasas de crecimiento inferiores al 1% dejando solamente a San Luis y Riobamba que registran tasas de crecimiento demográfico del 3.18% y 2.20% respectivamente (INEC, 2010, p.3).

En la Figura 1-2 se puede observar la zona urbana de la ciudad, de la cual se ha elegido cuatro sectores de estudio, cubriendo gran parte de la ciudad de Riobamba, en especial los barrios o sectores más concurridos de la misma.



**Figura 1-2.** Mapa de la Ciudad de Riobamba.

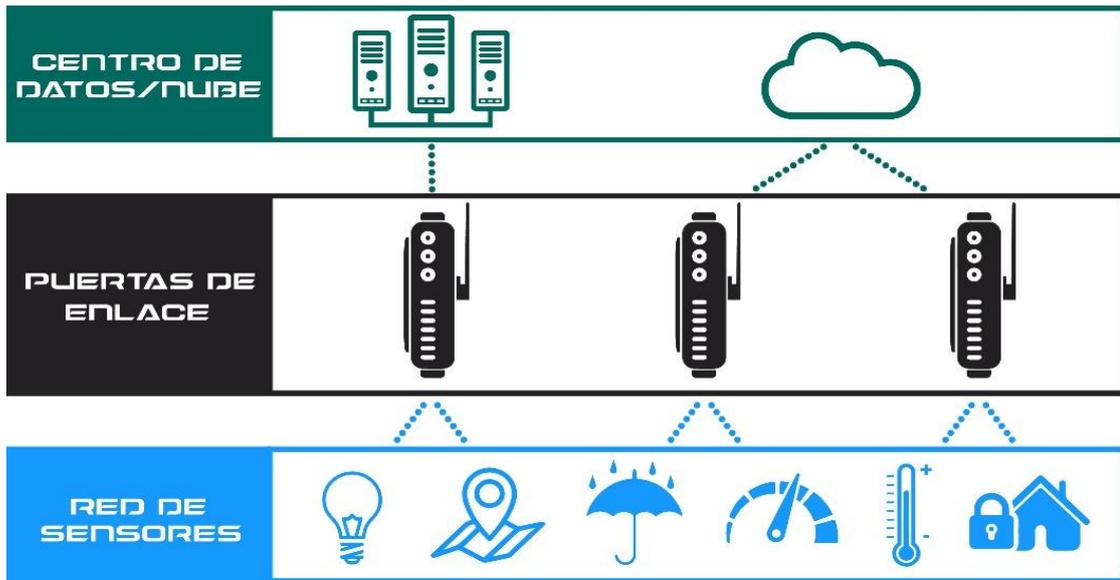
Fuente: Google Maps, 2022

## 2.2. Smart city

Una Smart City es una ciudad que utiliza las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos brindando sostenibilidad e innovación, este tipo de ciudades promueven el desarrollo urbano y satisfacen las necesidades primordiales en el ámbito económico, ecológico y social (Iurban, 2020, p.40).

Algunas de las soluciones que se ofrecen incluyen la mejora en los sistemas de ahorro de energía, la seguridad civil, transporte público, apoyo ambiental, mejoras en el turismo e infraestructura tecnológica, por citar algunas (Fundación Telefónica, 2015, p.11).

En la Figura 2-2 podemos observar la arquitectura de una Smart City, estas ciudades son capaces de recolectar datos en tiempo real, mediante la utilización de Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) e integrarlos en una plataforma informática, permitiendo el intercambio de información entre los distintos servicios urbanos que ofrece la ciudad y sus habitantes (Harrison, 2016, p.125).



**Figura 2-2.** Arquitectura de una Smart City

Fuente: Fundación Telefónica, 2015, p.11

Las Smart Cities son motivo de estudio a nivel mundial, se considera que son espacios urbanos que garantizan la disponibilidad de servicios fundamentales, economía, crecimiento sostenible y competitividad de las ciudades (Anthopoulos, 2016, p.3).

La participación conjunta de autoridades y ciudadanos conlleva a la mejora de la organización y gestión de la ciudad, reduciendo los costos operativos y el consumo de recursos, además de generar oportunidades de negocio (Mitchell, 2017, p.175).

### 2.2.1. Modelo de funcionamiento de una smart city

Para que el modelo urbano de una Smart City funcione, se debe precisar de diversos elementos que permitan, en conjunto, formar un sistema eficiente y sostenible capaz de solventar las necesidades presentes y futuras en la población: Capital Social y Humano, Transporte y TICs, Recursos Naturales, Competitividad, Calidad de Vida y Participación Gubernamental (Manville, 2018, p.97).



**Figura 3-2.** Ejes en el funcionamiento de una Smart City

Fuente: Manville, 2018, p.97

- **Smart Economy:** Centrado en transformar y fortalecer la transmisión y gestión de negocios, mejorando el entorno general de los mismos.
- **Smart Mobility:** Se enfatiza en la mejora de la movilidad de personas y vehículos en el territorio urbano con posibilidad de extenderse hasta lo rural.
- **Smart Environment:** Enfoque basado en la eficiencia del uso energético, del reciclaje y el respeto por el medio ambiente.
- **Smart People:** Ayuda a crear un entorno accesible para el usuario y a mejorar aún más la prosperidad e innovación dentro de las ciudades y comunidades.
- **Smart Living:** El objetivo primordial es mejorar la calidad de vida de los habitantes dentro la ciudad, este eje se encuentra gestionado por múltiples dimensiones como la salud, educación, cultura, seguridad, etc.
- **Smart Governance:** Fortalece las conexiones e interacciones entre el gobierno y todos los interesados (ciudadanos, organizaciones, negocios, etc.).

### *2.2.2. Aplicaciones en smart cities*

Las Smart Cities utilizan el Internet de las Cosas (IoT) para recopilar y analizar datos en tiempo real, además, aprovechan sus características para monitorear, administrar y controlar dispositivos de forma remota, la información obtenida en este proceso permite tanto a gobernantes como a ciudadanos tomar decisiones, rápidamente, que permitan mejorar las condiciones de vida, la infraestructura y los servicios públicos dentro de la ciudad (Diario Sustentable, 2017, p3).

A lo largo del desarrollo de las Smart Cities se han implementado varios proyectos en diferentes ciudades alrededor del mundo, entre las principales aplicaciones podemos nombrar:

- **Smart Parking:** Permite informar la disponibilidad de plazas de aparcamiento.
- **Noise Urban Mas:** Monitoriza el ruido en zonas céntricas en tiempo real.
- **Traffic Congestion:** Monitorización de vehículos y peatones para facilitar la conducción.
- **Waste Management:** Controla niveles de basura en contenedores para optimizar las rutas de recolección.
- **Electromagnetic Field Levels:** Mide los niveles de radiación energética de las estaciones móviles.
- **Smartphone Detection:** Detecta cualquier dispositivo que funciona con WiFi o interfaces de Bluetooth para establecer la comunicación.
- **Structural Health:** Monitoriza el estado de los materiales en construcciones.
- **Sincropool:** Permite a los usuarios compartir un auto y viajar de forma más cómoda.

- **PúbliKo:** Los ciudadanos identifican los casos que requieren una solución como huecos en las calles, vehículos mal estacionados, accidentes de tránsito, etc.
- **Colab:** Aplicación que comunica directamente al ciudadano con las autoridades y así poder resolver de manera más rápida los problemas que los aquejan cotidianamente.
- **SIGACHile:** Entrega servicios e información a personas con discapacidades, logrando una ciudad inclusiva.

### 2.2.3. Sensores para smart cities

Los sensores son el principio de una Smart City y la base de su funcionamiento, en una ciudad inteligente los sensores inteligentes están repartidos por toda la ciudad y proporcionan la información a las administraciones públicas o directamente al ciudadano en tiempo real, por lo tanto, en una Smart City cualquier ciudadano puede consultar el dato que necesite a través de algún dispositivo electrónico, así, toda la ciudad puede estar conectada (Fundación Endesa, 2019, p.4).

**Sensores de aparcamiento:** El sensor de aparcamiento facilita la fluidez del tráfico dentro de las ciudades, evitando así que los automóviles estén dando vueltas en busca de aparcamiento (Fundación Endesa, 2019, p.4).

**Sensores de tráfico:** Los sensores de tráfico informan a los ciudadanos y a las administraciones públicas sobre el estado del tráfico, posibles incidencias y, poder elegir, por tanto, la ruta de menor congestión, además que contribuyen al manejo telemático de los semáforos, las vallas o puentes elevadores (Fundación Endesa, 2019, p.4).

**Sensores de humedad:** Los sensores de humedad contribuyen a la gestión de parques y jardines públicos, haciendo que el regado sea cuando realmente la tierra lo necesite y durante el tiempo justo. Cuando el sensor detecte la humedad adecuada de la tierra, los aspersores dejarán de regar el espacio, estos sensores pueden ajustar el riego y así ahorrar agua y energía (Ibersontel, 2020, p.8).

**Sensores de luz:** El sensor de luz es uno de los más comunes. Este detecta si se hace de noche o amanece o si la ciudad necesita más luz o menos a causa del tiempo. El sensor de luz hace que el alumbrado público se encienda o apague, en función de la luz natural que hay en la ciudad (Ibersontel, 2020, p.8).

**Sensores de paso:** En el alumbrado público de una Smart City también se pueden instalar sensores de paso. Los sensores de paso hacen que el alumbrado público permanezca con una luz tenue hasta que detecte el paso de algún vehículo o peatón. Es en ese momento cuando la luz del

alumbrado por esa zona se intensificará hasta que deje de detectar el paso del vehículo o peatón (Ibersontel, 2020, p.7).

**Sensores meteorológicos y de contaminación:** Con los sensores meteorológicos se monitorizan los parámetros ambientales. Miden la calidad del aire, la calidad del agua, el ruido, la humedad, la temperatura y la concentración de polen, entre otros, por su parte los sensores de contaminación miden otras variables medioambientales, como la concentración de CO<sub>2</sub> y de las partículas en suspensión (Fundación Endesa, 2019, p.5).

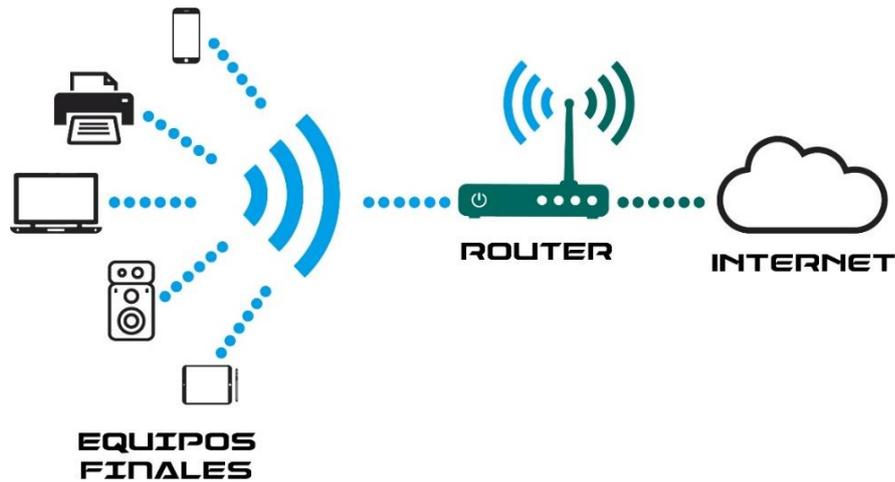
**Sensores de recogida y tratamiento de residuos urbanos:** Estos sensores ayudan a optimizar la recogida de residuos. Sirven para avisar cuando los contenedores están llenos y planificar así la retirada de los residuos según las necesidades reales de la ciudad. Este hecho hace que las rutas de recogida de basura sean más eficaces (Ibersontel, 2020, p.7).

**Sensor de control de consumo de agua y electricidad:** Tienen la función de concienciar al ciudadano sobre el consumo que hace de estos dos recursos para que mejoren sus hábitos hacia el ahorro energético, estos sensores interactúan con algún dispositivo donde se refleja la lectura real (Fundación Endesa, 2019, p.5).

**Sensores de la red eléctrica:** Estos sensores son los que hacen que la red eléctrica de la Smart City sea inteligente, avisando de las incidencias que se producen a lo largo de la red eléctrica, de los datos de consumo o de la meteorología (Fundación Endesa, 2019, p.4).

### **2.3. Redes inalámbricas**

La Figura 4-2 muestra la arquitectura de una red inalámbrica típica, estas redes utilizan ondas electromagnéticas para intercomunicar los dispositivos sin la necesidad de utilizar cables, debiendo adecuar las señales de información para su transmisión a través del aire, la infraestructura inalámbrica no requiere de demasiada inversión en comparación con las redes cableadas, además, existen muchas tecnologías que difieren en la frecuencia de transmisión utilizada, la velocidad y el alcance de sus transmisiones (Salazar, 2018, p.38).



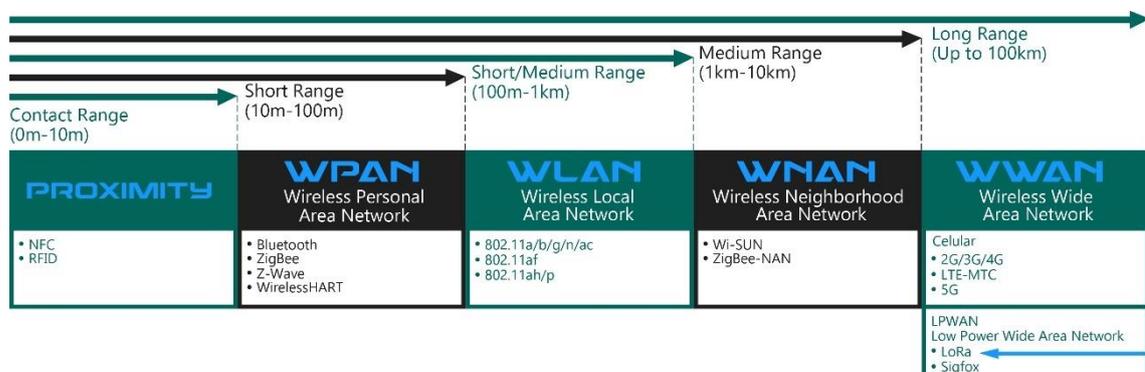
**Figura 4-2.** Red Inalámbrica Típica

Fuente: Salazar, 2018, p.38

### 2.3.1. Tipos de redes inalámbricas

Las redes inalámbricas se pueden clasificar en cinco grupos específicos según el área de alcance de la señal (Figura 5-2), dentro de cada uno de estos grupos existen varias tecnologías en donde su uso dependerá de los requerimientos de la red (Salazar, 2018, p.39).

- Redes de Proximidad
- Redes Inalámbricas de Área Personal (**WPAN**, Wireless Personal Area Networks)
- Redes Inalámbricas de Área Local (**WLAN**, Wireless Local Area Networks)
- Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (**WMAN**, Wireless Metropolitan Area Networks)
- Redes Inalámbricas de Área Amplia (**WWAN**, Wireless Wide Area Networks)



**Figura 5-2.** Redes y Tecnologías Inalámbricas

Fuente: Salazar, 2018, p.39

Esta vez nos centramos en las Redes Inalámbricas de Área Amplia y de Baja Potencia (LPWAN), específicamente en el análisis de la tecnología LoRa, ya que nos brinda una comunicación de largo alcance, bajo consumo energético y transmisión segura de datos, características fundamentales en la red de una Smart City (Salazar, 2018, p.41).

### **2.3.2. Softwares**

#### *2.3.2.1. Xirio*

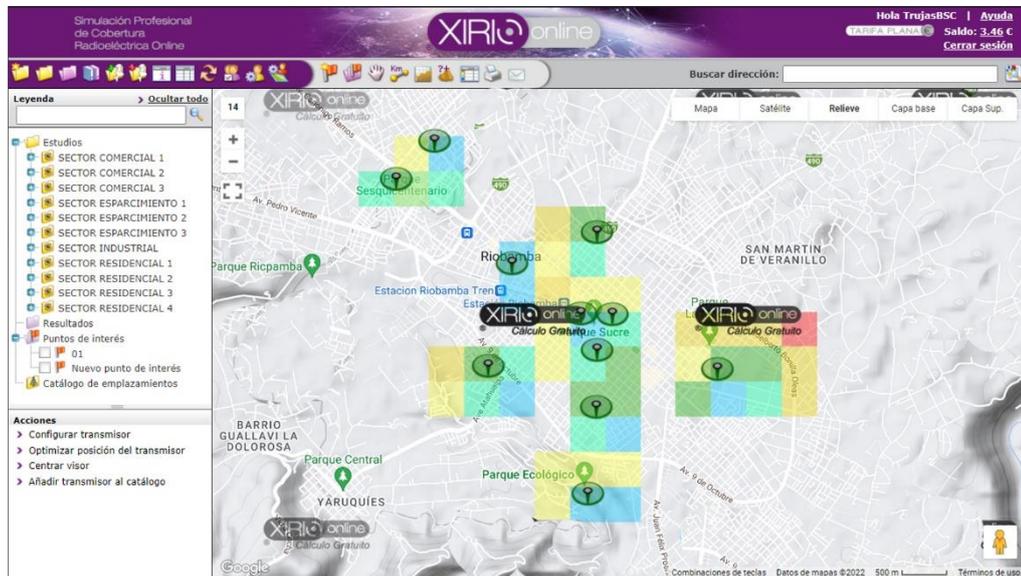
Para la realización de las simulaciones de la variable RSSI en la cobertura de los Gateways en cada sector de estudio se decidió utilizar el software Xirio (Figura 6-2), una herramienta con versión gratuita y de pago que permite la simulación profesional de cobertura radioeléctrica en un entorno web siguiendo el modelo SaaS (Software as a Service), lo que permite ofrecer a los usuarios la posibilidad de conectarse a aplicaciones alojadas en la nube y operar remotamente toda la infraestructura de alguna organización, todo a través de internet (Manual Xirio, 2015, p.5).

Xirio presenta dos módulos de trabajo independientes: PLANNINGTOOL, como herramienta de planificación radioeléctrica y SHAREPLACE como aplicación de consulta e intercambio de resultados, la primera es una herramienta que permite el diseño redes inalámbricas: comunicaciones móviles (GSM, DCS, UMTS, LTE,...), radiodifusión (TV, DVB-T, FM, DAB, DVB-H,...), radioenlaces (PDH, SDH,...), acceso a banda ancha (LMDS, WIMAX, Wifi,...), en especial dispone un apartado único para el Internet de las Cosas en donde se encuentra disponible todas las configuraciones para establecer una red inalámbrica con tecnología LoRaWAN, razón principal por la que se ha preferido a Xirio por encima de las demás aplicaciones de simulación de señales de radiofrecuencia, las posibles aplicaciones son ilimitadas siempre y cuando se disponga de los parámetros específicos de cada tecnología (potencia, sensibilidad del receptor, características de las antenas, pérdidas,...), los algoritmos y métodos de cálculo apropiados de aplicación en cada una de ellas (Manual Xirio, 2015, p.4).

El software incluye los métodos de cálculo más habituales y reconocidos a nivel internacional, especialmente para entorno urbano y los parámetros por defecto más adecuados en cada caso, para que la simulación de redes de cualquier tecnología resulte extremadamente sencilla y precisa (Manual Xirio, 2015, p.5).

En lo referente a cartografía, la aplicación utiliza el visor Google Maps lo que hace posible trabajar en todo el mundo, incorporando, por otro lado, modelos del terreno 3D, que simulan la

orografía del escenario donde se desplegarán las redes, también con cobertura mundial y para entornos tanto rurales como urbanos (Manual Xirio, 2015, p.9)



**Figura 6-2.** Mapa de cobertura en XIRIO de la Red LoRaWAN propuesta.

Realizado por: Trujillo, 2022

### 2.3.2.2. IDE de Arduino

Para programar los equipos de evaluación es necesario descargar un IDE (Integrated Development Environment), el IDE es un conjunto de herramientas de software que permiten a los programadores desarrollar y grabar todo el código necesario para hacer que los equipos funcionen de acuerdo a sus requerimientos, el IDE de Arduino nos permite escribir, depurar, editar y grabar el programa (sketches) de manera sencilla (Arduino, 2022, p.12).

Se debe instalar en el computador el IDE que nos proporciona el proyecto Arduino, simplemente entramos en su página oficial y en la sección de descargas, seleccionamos el archivo de Arduino IDE correspondiente a nuestro tipo y versión de sistema operativo (Windows, Mac OS, Linux) y seguimos los pasos estándar de instalación, una vez instalado al iniciarlo nos encontraremos con una ventana similar a la Figura 7-2.



**Figura 7-2.** Diagrama de conexión ESP32 con IDE de Arduino

Realizado por: Trujillo, 2022

## 2.4. Low power wide area network (LPWAN)

Son redes que permiten cubrir áreas amplias de terreno funcionando de manera más rentable y proporcionando una mejora en la eficiencia energética que las redes convencionales, aunque se cuenta con la existencia de tecnologías inalámbricas altamente utilizadas en la actualidad como Wi-Fi y Bluetooth, estas no son aplicables en situaciones en las que se requiere realizar la comunicación de dispositivos de largo alcance, de la misma manera existen tecnologías LTE en las que se logra tener una cobertura de áreas extensas a cambio del consumo de energía en exceso de los equipos que intervienen en la comunicación (Mekki, 2017, p.73).

Las diferentes tecnologías que se utilizan LPWAN permiten la conexión de distintos dispositivos los cuales pueden lograr un tiempo aproximado de hasta 10 años de funcionando con una sola carga de batería, esta característica es ideal para la creación de redes de sensores y otras aplicaciones que no requieren una gran transmisión de datos, incluyendo localizaciones bajo tierra o en interiores, hay que tener en cuenta que en condiciones ideales, un solo Gateway puede ser utilizado para proporcionar cobertura en un área extensa, obteniendo resultados comprendidos entre los 5 y 20 kilómetros en zonas urbanas y rurales respectivamente. (Mekki, 2017, p.73)

### 2.4.1. Características de LPWAN

Las LPWAN cuentan con cuatro características principales, mismas que las hacen ideales para ser implementadas en soluciones de IoT.

**Baja potencia:** Los dispositivos de la red presentan optimizaciones en el consumo de energía pudiendo llegar a tener hasta 10 años de vida útil en sus baterías, reduciendo en una gran cantidad el gasto económico que conllevaría realizar cambios o mantenimientos en los equipos (BehrTech, 2020, p.66).

**Largo alcance:** Estas redes proporcionan un alcance de cobertura entre 5 y 10 kilómetros en la zona urbana hasta más de 20 kilómetros en la zona rural (BehrTech, 2020, p.66).

**Baja tasa de datos:** Manejan tasas de transferencia pequeñas comprendidas entre los 10 y 10.000 bytes a una velocidad de hasta 1 Mbps, convirtiéndolas en redes ideales para la utilización de sensores inalámbricos y demás aplicaciones con demandas mínimas de datos (BehrTech, 2020, p.66).

**Bajo costo:** Las LPWAN manejan un diseño de red no muy complejo, el largo alcance de cobertura de estas redes junto con la topología en estrella, permiten obtener una reducción de

costos en la implementación de infraestructura y dispositivos que forman parte de la red (BehrTech, 2020, p.66).

Las características mencionadas anteriormente convierten a las LPWAN en redes adecuadas para ser utilizadas en la implementación de Smart Cities, cubriendo varias de las necesidades presentes a diario en los ciudadanos (BehrTech, 2020, p.66).

#### 2.4.2. Tecnologías LPWAN

##### 2.4.2.1. Comparativa en base a parámetros técnicos

En el mercado existe una serie de tecnologías disponibles las cuales operan tanto en partes del espectro con licencia como sin licencia, estas tecnologías nacen a partir de la necesidad de brindar una solución a los diferentes inconvenientes que padece cierto sector o nicho de mercado, los parámetros que distinguen a estas tecnologías vienen establecidos por las necesidades que cubren, las tecnologías LPWAN van orientadas a redes celulares ofreciendo una cobertura por celda de varios kilómetros permitiendo además contar con dispositivos móviles en la red (Beutel, 2016, p.57).

**Tabla 1-2:** Características de las Tecnologías LPWAN utilizadas en IoT

TECNOLOGÍA	LoRa	Sigfox	NB-IoT
<b>SERVICIOS</b>	Banda Libre ISM	Banda Libre ISM	Bandas LTE con Licencia
<b>FRECUENCIA</b>	AS 433 MHz EU 868 MHz US 915 MHz	EU 868 MHz US 915 MHz	LTE, >1 GHz
<b>MODULACIÓN</b>	CSS	UL: DBPSK DL: GFSK	UL: OFDMA DL: SC-FDMA
<b>ANCHO DE BANDA</b>	125 kHz	100 Hz	200 kHz
<b>TASA DE TRANSMICIÓN</b>	50 kbps	EU: 100 bps US: 600 bps	UL: 200 kbps DL: 250 kbps
<b>COMUNICACIÓN</b>	Half duplex	Half duplex	Half duplex
<b>MENSAJES-DIA</b>	Ilimitado	UL: 140 DL: 4	Ilimitado
<b>CARGA ÚTIL MAX.</b>	243 bytes	UL: 12 bytes DL: 8 bytes	1600 bytes
<b>LATENCIA</b>	1 – 10 ms	1 – 30 ms	1.6 – 10 s
<b>RANGO DE COBERTURA</b>	Urbano: 5 km Rural: 20 km	Urbano: 10 km Rural: 40 km	Urbano: 1 km Rural: 10 km
<b>INMUNIDAD A INTERF.</b>	Muy alta	Muy alta	Baja
<b>ENCRIPCIÓN</b>	AES 128b	No soportada	LTE

Fuente: Beutel, 2016, p.57

Definir los parámetros comparativos entre las tecnologías permite definir cuándo, dónde, cómo y por qué usar una u otra, en la Tabla 1-2 podemos observar las características más importantes de las tecnologías LPWAN (Beutel, 2016, p.57).

#### 2.4.2.2. *Comparativa en parámetros de IoT*

**Calidad de servicio (QoS):** Tanto la tecnología LoRa como Sigfox pueden manejar de buena manera la interferencia, el desvanecimiento y el multicamino, pero no pueden ofrecer la misma QoS que puede proporcionar NB-IoT, el uso del espectro en esta tecnología es de pago, llegando a superar los 500 millones de euros por MHz (Machado, 2019, p.29).

**Duración de la batería:** En Sigfox y LoRa, se reduce al mínimo el consumo existente de energía al estar los dispositivos finales en modo de espera casi todo el tiempo, otorgando un rango de vida útil aproximado de los dispositivos de 10 años, mas no así en NB-IoT ya que, debido a su QoS, al tipo de comunicación que se maneja y sus modos de acceso, demandan un consumo extra de energía reduciendo la vida útil del dispositivo (Machado, 2019, p.29).

**Latencia:** LoRa y Sigfox manejan tasas bajas de transferencia de datos y no tienen mucho requerimiento en cuanto a la latencia en la transmisión, LoRa mantiene una tecnología abierta lo que permite que cualquier persona o empresa pueda implementar su propia red, Sigfox en cambio posee la patente de su sistema de conectividad (Machado, 2019, p.29).

Para aplicaciones que no realizan el envío de grandes cantidades de datos y no necesitan altas prestaciones en latencia, LoRa y Sigfox se adaptan perfectamente, mientras que para aplicaciones que requieren baja latencia, lo correcto sería utilizar NB-IoT (Sinha, 2017, p.15).

**Escalabilidad y Carga Útil:** Una de las principales características de estas tecnologías es soportar la conexión de una gran cantidad de dispositivos, considerando varias técnicas para lograr dar paso a una correcta escalabilidad, NB-IoT maneja una capacidad de 100 000 dispositivos por celda y una tasa de transmisión de hasta 1.6 kB, mientras que LoRa y Sigfox soportan 50.000 dispositivos en red con tasas de transmisión de 243 y 12 bytes respectivamente (Sinha, 2017, p.15).

**Cobertura de Red:** En cuanto a cobertura la tecnología que nos brinda las mejores prestaciones es Sigfox, ya que con la implementación de una sola estación base se puede cubrir una ciudad entera con un rango mayor a 40 km, por su parte LoRa tiene un rango más bajo, aproximadamente 20 km, siendo necesarias para cubrir una ciudad como Barcelona, tres estaciones base, dejando

para el último a NB-IoT que nos proporciona el rango de cobertura más bajo de las tres tecnologías (LoRa Alliance, 2019, p.7).

### **2.4.3. IoT y las redes LPWAN**

En general el término Internet de las Cosas (IoT) se utiliza para definir la conexión de todo tipo de dispositivos a la Red de Internet, desde aparatos simples de uso cotidiano hasta sistemas complejos, las infinitas posibilidades que ofrece la conexión de todo tipo de dispositivos a Internet, han hecho que esta idea vaya tomando fuerza en los últimos años (Woelfflé, 2017, p.22).

En la actualidad no están definidos de forma rigurosa los requisitos que deben cumplir los dispositivos y las redes de comunicación para la implementación del IoT, más allá de eso, se puede definir aquellos que son esenciales (Woelfflé, 2017, p.22).

- **Bajo consumo de energía:** Dispositivos diseñados para ser muy eficientes energéticamente, de forma que puedan operar mediante baterías y que la autonomía de las mismas sea, al menos, de varios años.
- **Reducido tamaño:** Dispositivos de un tamaño adecuado para ser utilizables en cualquier tipo de objeto o circunstancia.
- **Movilidad:** Diseño de red adecuado para poder asegurar la movilidad total de los dispositivos.
- **Localización:** Las redes de soporte IoT, deben contar con sistemas de localización de los dispositivos, requerimiento indispensable en varias aplicaciones industriales o domésticas.
- **Comunicaciones seguras:** Confidencialidad e integridad de los datos utilizados en la transmisión.
- **Amplio alcance:** Redes fiables y robustas con la capacidad de manejar altos números de dispositivos.
- **Economía:** Debido a su arquitectura los costos de implementación de estas redes son relativamente bajo, mucho más si tenemos en cuenta la relación costo/beneficio.

Si bien hay varias redes LPWAN que cumplen los requisitos iniciales para el IoT, sólo son dos las que disponen ya de una estructura e infraestructura para brindar soluciones completas en el mercado: SigFox y LoRa, estas tecnologías disponen ya de grandes redes armadas que conectan cientos de dispositivos a Internet, la principal diferencia entre estas es que SigFox ofrece absolutamente todos los servicios del IoT, como, venta de dispositivos, red de conexión y servicios mientras que en la red LoRa, la empresa propietaria Semtech lo es sólo de la capa física,

la capa de acceso al medio se desarrolla de forma abierta por una entidad sin ánimo de lucro denominada LoRa Alliance, Semtech sólo comercializa dispositivos, esto hace que cualquier empresa pueda utilizar esta tecnología para poner en marcha su propia red LPWAN y así ofrecer servicios e infraestructura de red a sus clientes, por lo tanto LoRa se presenta como una solución mucho más atractiva desde el punto de vista de negocio que SigFox, razón principal por la que este trabajo de investigación se basa en la tecnología LoRa (Nolan, 2019, p.19).

## **2.5. LoRa**

LoRa es una tecnología de modulación de radiofrecuencia para redes de área amplia y de baja potencia (LPWAN), el nombre LoRa, es una referencia a los enlaces de datos de largo alcance que permite esta tecnología, proporcionando distancias de hasta tres millas (cinco kilómetros) en áreas urbanas y hasta 10 millas (15 kilómetros) o más en áreas rurales según su línea de visión (Nolan, 2019, p.22).

Una característica clave de las soluciones basadas en LoRa son los requisitos de energía ultra bajos, lo que permite la creación de dispositivos que funcionan con baterías que pueden durar hasta 10 años, por lo general es implementada en una topología en estrella y basada en el protocolo LoRaWAN, perfecto para aplicaciones que requieren una comunicación de largo alcance o profunda entre una gran cantidad de dispositivos que recopilan pequeñas cantidades de datos (Semtech Corporation, 2019, p.4).

Cuando se trata de capacidad, una red LoRa puede admitir millones de mensajes, sin embargo, la cantidad de mensajes admitidos en una implementación determinada depende de la cantidad de puertas de enlace instaladas en la red, una única puerta de enlace de ocho canales puede admitir hasta 1,5 millones de mensajes en el transcurso de un período de 24 horas, si cada dispositivo final envía un mensaje cada hora, dicha puerta de enlace puede admitir hasta 60.000 dispositivos, si la red incluye 10 de estas puertas de enlace, la red puede admitir aproximadamente 100.000 dispositivos y un millón de mensajes, por lo tanto, si se requiere más capacidad, todo lo que se necesita es agregar puertas de enlace adicionales a la red, dadas las capacidades de los nodos finales y las puertas de enlace basados en LoRa, solo unas pocas puertas de enlace, configuradas en una red en estrella, son necesarias para dar servicio a una multitud de nodos finales, esto significa que los gastos de capital y operativos pueden mantenerse relativamente bajos (Semtech Corporation, 2019, p.6).

### 2.5.1. Banda ISM 902-928

LoRa opera en la banda libre ISM, que es utilizada en aplicaciones Industriales, Científicas y Medicas utilizando frecuencias por debajo de 1Ghz, en sí: 433 MHz en Asia, 868 MHz en Europa y 915 MHz en América, utilizando tres rangos de ancho de banda: 125 KHz, 250 KHz y 500 KHz, el uso de estos rangos depende de la región o del plan de frecuencia que se aplique en cada país (LoRa-Alliance, 2019, p.12).

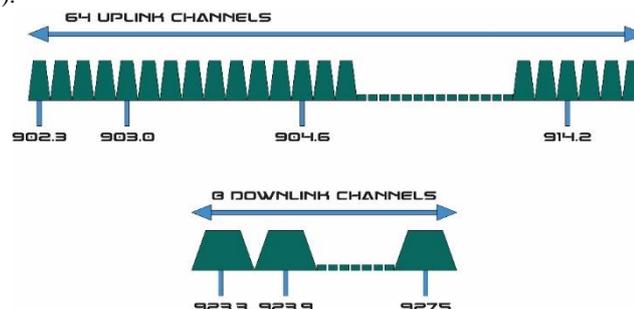


**Figura 8-2.** Regiones del mundo según las frecuencias de espectro utilizadas

Fuente: Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2017, p.14

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), divide al mundo en tres Regiones para atribuir las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico, tal como se muestra en la Figura 8-2, según este organismo los países de América pertenecen a la Región 2, por tal razón, en Ecuador se hace uso de la banda ISM de 902-928 MHz (con frecuencia central de 915 MHz) (LoRa-Alliance, 2019, p.13).

De acuerdo con el documento de Parámetros Regionales emitido por LoRa Alliance, los dispositivos LoRa que trabajan en la banda ISM US902-928 deben usar un canal de ancho de banda fijo de 125 KHz o 500 KHz en enlaces ascendentes, y de 500 KHz en enlaces descendentes (LoRa-Alliance, 2019, p.13).



**Figura 9-2.** Plan de Canales en la Banda US 902-928

Fuente: LoRa-Alliance, 2019, p.13

En la Figura 9-2 podemos observar que la banda ISM de 915 MHz para el continente americano presenta el siguiente plan de canales:

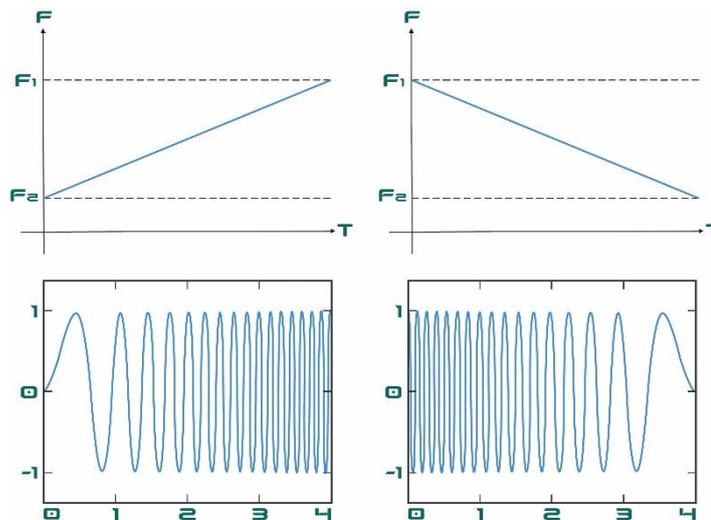
**Uplink 125 KHz:** 64 canales (0 al 63), utilizando un ancho de banda de 125 KHz, comenzando en 902.3 MHz (canal 0) e incrementándose en 200 KHz hasta llegar a 914.9 MHz (canal 63).

**Uplink 500 KHz:** 8 canales (64 al 71), utilizando un ancho de banda de 500 KHz, comenzando en 903.0 MHz (canal 64) e incrementándose en 1.6 MHz hasta llegar a 914.2 MHz (canal 71).

**Downlink 500 KHz:** 8 canales (0 al 7), utilizando un ancho de banda de 500 KHz, comenzando en 923.3 MHz (canal 0) e incrementándose en 600 MHz hasta llegar a 927.5 MHz (canal 7).

### 2.5.2. Modulación LoRa

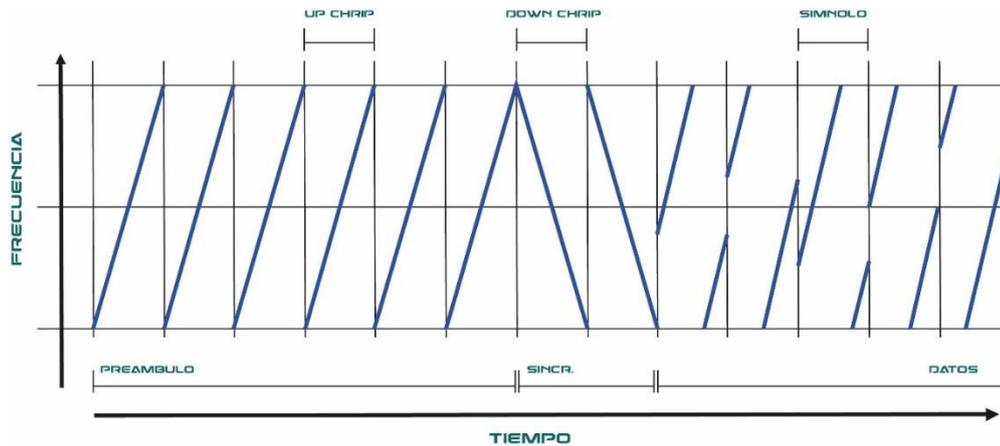
Chirp Spread Spectrum (CSS) es una tecnología ampliamente utilizada para el sonar en la industria marítima y el radar en la aviación, LoRa adopta la técnica CSS, basada en pulsos de chirp modulados en frecuencia lineal, para codificar la información, un chirp, a menudo llamado señal de barrido, es una onda sinusoidal que aumenta o disminuye linealmente en frecuencia a lo largo del tiempo (Lie, 2019, p.82).



**Figura 10-2.** Onda de frecuencia de un chirp ascendente y descendente

Fuente: Lie, 2019, p.82

LoRa utiliza los chirps como señales portadoras para codificar el mensaje, estos pulsos de chirps se envían como símbolos, que aumentan o disminuyen la frecuencia de LoRa de forma continua como podemos observar en la Figura 10-2, a continuación, la transmisión de datos se realiza al multiplicar la señal del transmisor por un código o secuencia de chirps, esta secuencia se encuentra a una tasa mayor que la secuencia de datos, por lo tanto, tendremos como resultado una señal con mayor ancho de banda que la señal original (Lie, 2019, p.83).

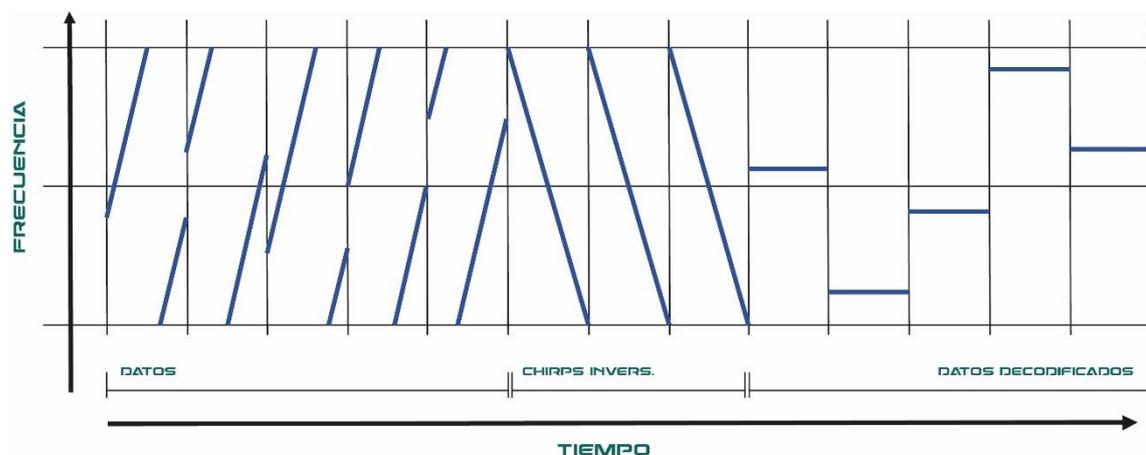


**Figura 11-2.** Modulación LoRa

Fuente: Ruano, 2020, p.145

Cuando se procesa un mensaje LoRa, primero se transmite un preámbulo largo de chirps constante para lograr la detección de la señal LoRa, en la Figura 11-2 tenemos un ejemplo de seis chirps ascendentes enviados como símbolos de preámbulo, seguido por dos chirps inversos descendentes para la sincronización de tiempo, solo entonces comienza la transmisión de datos, con una serie de señales moduladas variantes en frecuencia que representa los datos o cargas útiles (Ruano, 2020, p.145).

Para la demodulación (Figura 12-2), el dispositivo receptor se encarga de generar un chirp inverso para multiplicarlo con la señal modulada recibida y de esta manera obtener los símbolos decodificados, cada desplazamiento existente en la señal entrante es la manera de identificar que se ha transmitido un símbolo diferente (Ruano, 2020, p.145).

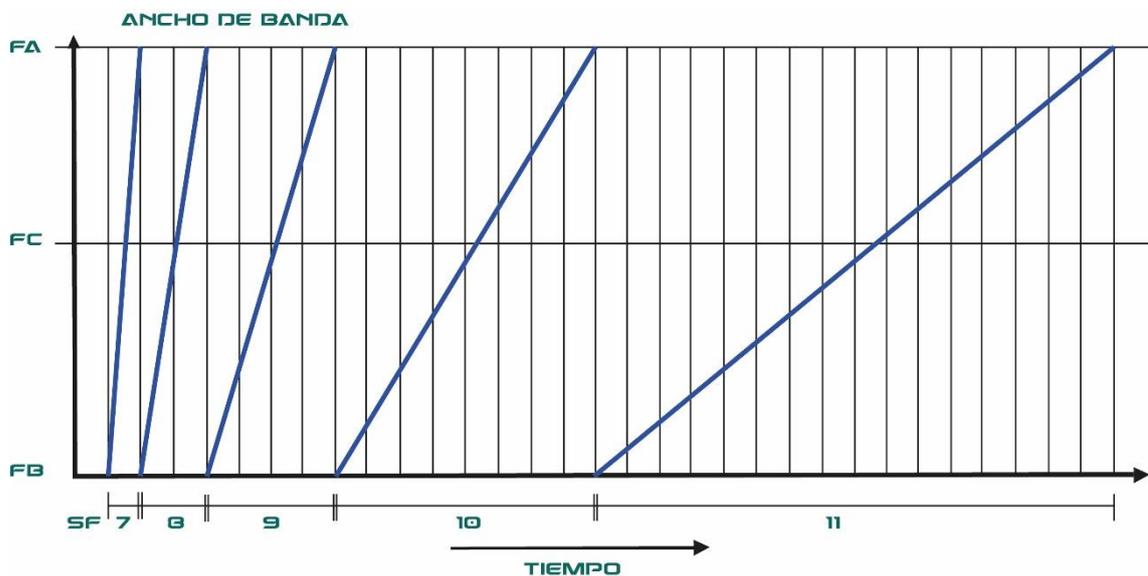


**Figura 12-2.** Demodulación LoRa

Fuente: Ruano, 2020, p.146

### 2.5.3. Spreading Factor (SF)

El Spreading Factor o Factor de Dispersión es la cantidad de código de ensanchamiento que se aplica a la señal de datos original, la modulación LoRa tiene un total de seis factores de dispersión ortogonales de SF7 a SF12, esto permite controlar la tasa de bits, mejorar el rango de comunicación y disminuir el consumo de batería, por ejemplo, un dispositivo final ubicado cerca de una puerta de enlace en teoría debería transmitir datos con un Spreading Factor bajo, ya que se necesita muy poco recursos del enlace, por el contrario, un dispositivo final ubicado a varias millas de una puerta de enlace deberá transmitir con un factor de dispersión mucho más alto, proporcionando una mayor ganancia de procesamiento y una mayor sensibilidad de recepción, aunque la tasa de datos será, necesariamente menor (Semtech Corporation, 2019, p.25).



**Figura 13-2.** Relación entre el Spreading Factor y la duración del símbolo

Fuente: Ruano, 2020, p.148

El Spreading Factor, por decirlo de alguna manera, ayuda a que las señales transmitidas al mismo tiempo y espacio, sean invisibles entre sí, simplemente aparecen como ruido entre ellas, por lo tanto, dos paquetes que lleguen al mismo tiempo en el mismo canal de recepción pero con diferentes Spreading Factor, no colisionarán y ambos serán demodulados correctamente en la puerta de enlace, por el contrario, si dos paquetes con el mismo Spreading Factor llegan al mismo tiempo en el mismo canal pueden resultar en una colisión (Semtech Corporation, 2019, p.25).

Para determinar la tasa de bits ( $R_b$ ) se hace uso de la siguiente fórmula:

$$Rb_{(bps)} = (SF) \left( \frac{BW_{(Hz)}}{2^{SF}} \right) \left( \frac{4}{4 + CR} \right) \quad (1)$$

**Tabla 2-2:** Parámetros de configuración de equipos LoRa.

DR	SF	Chirps	BW(kHz)	CR	Rb(bps)	Payload máx.(bytes)	ToA(ms)	SNR(lím)	Sensibilidad (dBm)
0	12	4096	125	4/5	305	51	2138.11	-20	-137
1	11	2048	125	4/5	560	51	1150.97	-17.5	-134
2	10	1024	125	4/5	1017	51	616.44	-15	-132
3	9	512	125	4/5	1831	115	615.42	-12.5	-129
4	8	256	125	4/5	3255	255	614.91	-10	-127
5	7	128	125	4/5	5696	255	348.41	-7.5	-124

Fuente: 2CIGroup, 2019, p.79

En la Tabla 2-2 podemos observar los parámetros para la configuración de los equipos LoRa que posteriormente serán utilizados, seis factores de dispersión diferentes de SF7 a SF12 que se pueden usar para mensajes de enlace ascendente en un ancho de banda de 125 kHz, muestra la tasa de bits equivalente (Rb), hay que tener en cuenta que el alcance depende mucho del terreno, tanto en zonas urbanas como rurales, lográndose la distancia más larga en áreas abiertas, también se proporciona el tiempo en el aire (ToA) para enviar la máxima carga útil soportada por cada SF, es importante considerar que a mayor distancia entre el nodo y el Gateway, el SF y sensibilidad será mayor, disminuyendo de esta manera la velocidad de transmisión, la tasa de codificación es la tasa de error hacia delante que protege la transmisión contra ráfagas de interferencia, mientras más alto sea el CR, existe mayor protección a costa de un mayor tiempo en el aire, se lo puede configurar en 4/5, 4/6, 4/7 o 4/8, aunque el requisito del protocolo LoRaWAN es 4/5 recomendado, tenemos la relación señal/ruido (SNR) en donde, si el SF aumenta en 1, el límite de SNR cambia en -2,5 dB y la sensibilidad que es el mínimo nivel de señal requerida a la entrada del receptor para una correcta demodulación (2CIGroup, 2019, p.79).

#### **2.5.4. Mecanismo de velocidad de datos adaptativa (ADR)**

El ADR nos permite aprovechar las ventajas de la capa física LoRa, para maximizar la vida útil de la batería de los dispositivos finales y la capacidad general de la red, el servidor de red LoRaWAN administra la configuración de la velocidad de datos y la potencia de transmisión para cada dispositivo final individualmente mediante un esquema de velocidad de datos adaptativa (ADR) (Carrión, 2018, p.183).

Al tener los nodos finales más cercanos a una puerta de enlace un factor de dispersión más bajo, se minimiza su tiempo en el aire, lo que prolonga la vida útil de la batería, los sensores a una

distancia extrema transmiten a un factor de dispersión más alto, principalmente la función del ADR es permitirle al servidor de red cambiar dinámicamente los parámetros de los dispositivos finales, como la potencia de transmisión, la lista de frecuencias, el factor de dispersión y la tasa de repetición del enlace ascendente, teniendo en cuenta que es el dispositivo final el que decide si se debe usar ADR o no, mas no la aplicación o el servidor de red (Carrión, 2018, p.183).

### **2.5.5. Received signal strength indication (RSSI)**

El RSSI es un indicador que nos muestra la potencia de la señal en el receptor, este valor se puede utilizar como una medida de qué tan bien un receptor puede “escuchar” una señal de un remitente, el RSSI se mide en dBm y es un valor negativo, cuanto más cerca de 0, mejor será la señal (Lie, 2019, p.102).

Los valores típicos de RSSI en LoRa son:

- RSSI mínimo = -140dBm.
- RSSI = -110dBm: Buena calidad de señal recibida.
- RSSI = -140dBm: Calidad defectuosa en la señal.

### **2.5.6. Relación señal / ruido (SNR)**

SNR (relación señal / ruido) se define como la proporción o diferencia existente entre la potencia de la señal transmitida y la potencia del ruido que la corrompe, si SNR es mayor que 0, la señal recibida opera por encima del umbral de ruido, por el contrario si es menor que 0, la señal recibida se encontrara por debajo del umbral del ruido, normalmente, el umbral de ruido es el límite físico de sensibilidad, sin embargo, LoRa trabaja por debajo del nivel de ruido lo que le permite demodular señales que están entre -7,5 dB y -20 dB por debajo del umbral, los valores típicos de SNR están entre 10dB y -20dB significando que un valor más cercano a 10dB significa que la señal recibida está menos dañada, para cada factor de propagación, existe un límite de SNR, si se alcanza este límite, el receptor no podrá demodular la señal (Lie, 2019, p.103)

Para poder garantizar la calidad de los radioenlaces, estos deben cumplir con ciertos rangos de valores en RSSI como en SNR. (Lie, 2019, p.103)

- $RSSI > -115dB$  y  $SNR > -7dB$ : Buena calidad de enlace
- $RSSI \leq -120 dB$  o  $SNR \leq -13dB$ : Calidad de enlace defectuosa
- Cuando se tiene un RSSI bueno pero una mala SNR, significa que el entorno es muy ruidoso, pero si ocurre el caso contrario, significaría que el dispositivo final está demasiado lejos de su Gateway.

### 2.5.7. Sensibilidad

La sensibilidad del receptor (Ecuación 2) indica el nivel de potencia más bajo o débil al que el receptor puede recibir y demodular una señal con éxito, para el cálculo de la sensibilidad del receptor, requerimos el valor mínimo de SNR para que la información se pueda decodificar correctamente (Hewitson, 2020, p.107).

$$Sensibilidad_{Rx(dBm)} = -174 + 10 \log(BW) + SNR_{lim(dB)} + NF_{(dB)} \quad (2)$$

- -174: Ruido térmico en 1 Hz de ancho de banda a temperatura ambiente
- BW: Ancho de banda del canal en Hz
- SNR: Su límite depende del factor de propagación
- NF: Es el factor de ruido, una medida de la degradación SNR causada por la implementación del hardware del receptor, por lo general es de 6dB.

Si la distancia entre el nodo y la puerta de enlace aumenta, la señal se debilita y, por lo tanto, se necesita un factor de dispersión mayor para que una sensibilidad del receptor más baja pueda demodular la señal recibida, el factor de propagación varía, es de 7 cuando está cerca de un Gateway y 12 cuando está lejos de él (Hewitson, 2020, p.107).

### 2.5.8. Dimensionamiento de cobertura

En esta sección se pretende tener una noción del alcance máximo que se debería esperar por cada Gateway LoRa en relación al nodo y para ello es necesario determinar el presupuesto del enlace que no es más que el valor de todas las ganancias y pérdidas de todo el enlace (Semtech Corporation, 2019, p.49).

Se cuenta con una frecuencia de 915 MHz, una Potencia de Transmisión de 14 dBm y una Sensibilidad del Receptor de -137 dBm para un Spreading Factor de 12, con esto:

$$PathLoss_{(dB)} = P_{Tx(dBm)} - Sensibilidad_{Rx(dBm)} \quad (3)$$

$$PathLoss_{(dB)} = 14_{dBm} + 137_{dBm} = 151_{dB} \quad (4)$$

El resultado que nos arroja la ecuación 4, nos indica que se perderán aproximadamente 151 (dB) en la transmisión y si sería factible demodular dicha señal, por ejemplo, si se toma la fórmula de Pérdida de Trayecto en el Espacio Libre (FSPL) (Guzmán, 2018, p.64).

$$FSPL_{(dB)} = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32.44 \quad (5)$$

En donde  $d$  es la distancia existente entre el Gateway y el Nodo, mientras que  $f$  es la frecuencia de la señal en MHz, al realizar el cálculo optemos que la señal podría recorrer 800 (Km) y el receptor sería capaz de demodular, pero en la realidad al no existir una línea de vista directa en una ciudad urbana, hay que considerar las pérdidas por multitrayecto, desvanecimiento, zonas de Fresnel, etc., estos son provocados por obstáculos como árboles o edificios que se observa en la ciudad pero en LoRa se destaca la alta robustez a este tipo de interferencias (Semtech Corporation, 2019, p.53).

Para este caso solo se considerarán las pérdidas provocadas por los edificios que ronda los 20(dB), para estructuras de concreto, teniendo como resultado un máximo de pérdidas de trayecto de:

$$PathLoss_{(dB)} = 14_{dBm} + 137_{dBm} - 20_{dB} = \mathbf{131_{dB}} \quad (6)$$

El modelo Okumura-Hata Cost 231, es un modelo de propagación de radio, dentro del rango de frecuencia de 800 MHz a 2000 MHz, que proporciona los valores de pérdidas, para este caso entre el Gateway y los diferentes Nodos (Singh, 2017, p.31).

La fórmula está dada por:

$$L_{(dB)} = (46.3 + 33.9 \log(f)) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_b))(\log(d)) \quad (7)$$

En donde  $f$  es la frecuencia de transmisión en MHz,  $h_b$  es la altura de la antena del Gateway en metros al igual que  $h_m$  que es la altura del Nodo,  $d$  la distancia existente entre el Gateway y el Nodo en Km y  $a(h_m)$  es el factor de corrección de la altura de la antena, para una ciudad mediana como Riobamba, este factor esta formulado de la siguiente manera (Singh, 2017, p.31).

$$a(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7)(h_m) - 1.56 \log(f) + 0.8 \quad (8)$$

Para la implementación de esta red LoRa se tienen valores ya definidos como:

$$h_b = 30m, h_m = 1.5m, f = 915 \text{ MHz}$$

$$a(h_m) = (1.1 \log(915) - 0.7)(1.5) - 1.56 \log(915) - 0.8 = \mathbf{0.01652} \quad (9)$$

$$L_{(dB)} = 126.26 + 35.22(\log(d)) \quad (10)$$

$$131_{dB} = 126.26 + 35.22(\log(d)) \quad (11)$$

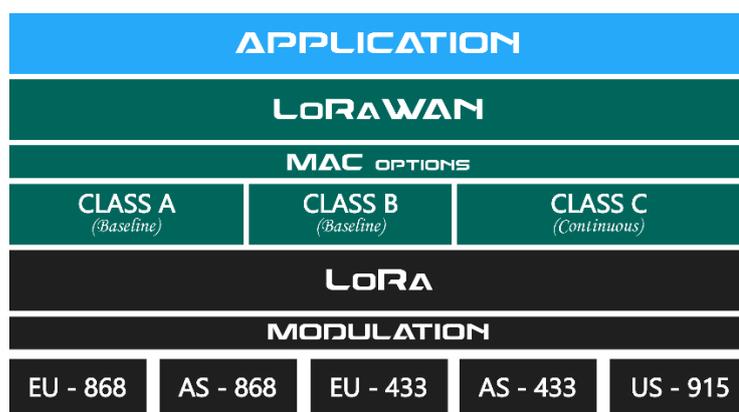
$$d_{(m)} = 1.36 \text{ km} \quad (12)$$

Con este resultado teóricamente se esperará alcanzar un radio de cobertura de 1,36 km para el Gateway LoRaWAN que se utilice, los datos calculados en este apartado se emplearán para el despliegue de cobertura en la ciudad de Riobamba.

## 2.6. LoRaWAN

Dentro del modelo de capas, como se puede observar en la Figura 14-2, LoRa es la capa física, es decir, la modulación inalámbrica utilizada para crear el enlace de comunicación de largo alcance, utilizando el aire como medio para llevar las ondas de radio desde el Nodo hacia el Gateway (Uplink) y viceversa (Downlink), mientras que LoRaWAN es el protocolo de acceso al medio que utiliza la tecnología LoRa para conectar dispositivos de forma inalámbrica, dicho protocolo nos permite brindar servicios de localización, movilidad y comunicación bidireccional seguros y estandarizados a los dispositivos finales en la red (Somin, 2019, p.127).

Para la implementación de estas funcionalidades, el protocolo LoRaWAN cuenta con un conjunto de órdenes MAC que se intercambian entre los dispositivos finales y los servidores de red, de esta forma desde los servidores de red se puede, de manera centralizada, configurar los parámetros esenciales de conexión de los dispositivos lo que permite un ajuste dinámico de la red, teniendo en cuenta que estas redes, en teoría, deben soportar cientos de miles de dispositivos y que estos pueden estar funcionando durante años, resulta absolutamente esencial el poder contar con el ajuste dinámico de la red antes mencionado (Somin, 2019, p.27).

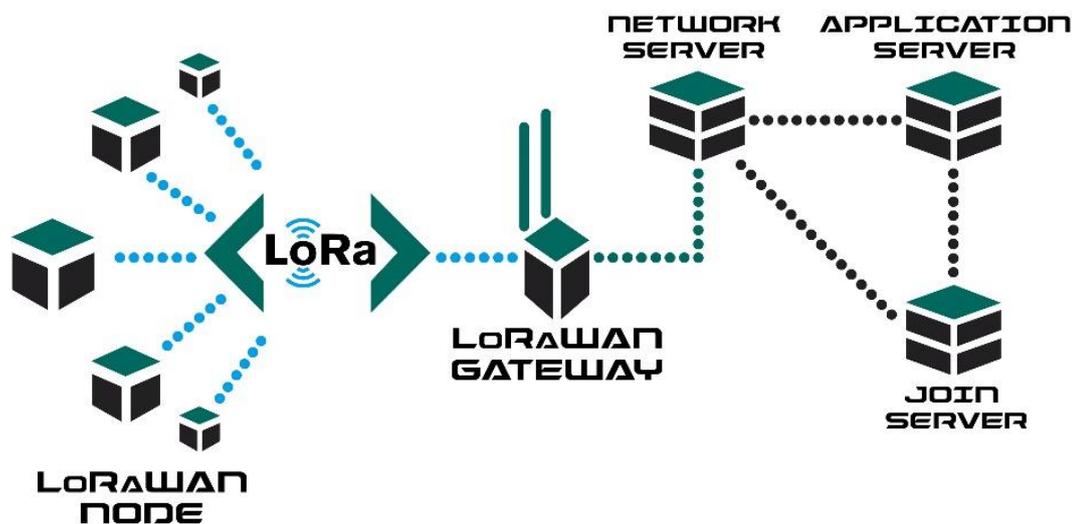


**Figura 14-2.** Modelo de capas de la Tecnología LoRa

Fuente: Somin, 2019, p.28

### 2.6.1. Arquitectura y topología de una red LoRaWAN

La Arquitectura de la red está definida por cinco elementos fundamentales, Nodos, Gateways y Servidores (Figura 15-2), en la actualidad, gran parte de las redes desplegadas son de tipo malla, en las que los nodos finales reenvían información de otros nodos para incrementar el rango de las comunicaciones y el tamaño de la célula de la red, esta operación añade complejidad a la misma, las redes LoRaWAN utilizan una topología tipo estrella, mediante la cual obtienen menor consumo de baterías y logran una conectividad de largo alcance, con dicha topología, los nodos no quedan asociados a un Gateway determinado, por lo que los datos transmitidos por cada nodo pueden ser recibidos por varios Gateways los cuales reenviarán los paquetes recibidos a la nube, en donde, el servidor gestionará la red y filtrará los paquetes redundantes, realizará comprobaciones de seguridad, programará los acuses de recibo a través de la puerta de enlace óptima y gestionará la velocidad de datos adaptativa (Semtech Corporation, 2019, p.62).



**Figura 15-2.** Arquitectura y Topología de la Red LoRaWAN

Fuente: Semtech Corporation, 2019, p.62

**LoRaWAN Node (Nodo):** Son los dispositivos finales en la red LoRa, son sensores o actuadores a menudo operados por baterías que están conectados de forma inalámbrica a la red, estos dispositivos digitalizan las condiciones físicas y los eventos ambientales para posteriormente enviar estos datos hacia los Gateways, cada nodo puede establecer comunicación con diferentes Gateways al mismo tiempo, cada mensaje uplink enviado será recibido por todas las puertas de enlace al alcance, reduciendo significativamente la tasa de error de paquetes (ya que las posibilidades de que al menos una puerta de enlace reciba el mensaje son muy altas), reduce significativamente la sobrecarga de la batería en los nodos y permite una geolocalización de bajo costo (LoRa-Alliance, 2019, p.36).

**LoRaWAN Gateway (Puerta de Enlace):** El Gateway es el encargado de recibir los mensajes desde cualquier Nodo y reenviar estos datos al Servidor de Red LoRa (LNS), que está conectado a través de una red IP, este tráfico IP puede ser enviado a través de una Red Wi-Fi, Ethernet cableada o mediante una conexión celular (LoRa-Alliance, 2019, p.37).

Dado que varios Gateways pueden recibir el mismo mensaje desde un solo nodo, el LNS realiza la deduplicación de datos eliminando así todas las copias, esto según los niveles de RSSI de los mensajes idénticos, el servidor de red normalmente selecciona la puerta de enlace que recibió el mensaje con el mejor RSSI cuando transmite un mensaje de enlace descendente porque esa puerta de enlace es la más cercana al dispositivo final en cuestión (Semtech Corporation, 2019, p.63).

**Network Server (Servidor de Red):** El servidor de red LoRaWAN (LNS) administra toda la red, controla dinámicamente los parámetros de la red para adaptar el sistema a las condiciones cambiantes y establece conexiones AES seguras de 128 bits para el transporte de datos de un extremo a otro, así como para el control del tráfico que fluye desde el nodo hasta el LNS y viceversa, el servidor de red asegura la autenticidad de cada sensor en la red y la integridad de cada mensaje, al mismo tiempo, el servidor no puede ver ni acceder a los datos de la aplicación (Semtech Corporation, 2019, p.63).

**Application Server (Servidor de Aplicación):** Los servidores de aplicaciones gestionan e interpretan de forma segura los datos de las aplicaciones del sensor, también generan todas las cargas útiles downlink de la capa de aplicación a los dispositivos finales conectados (Somin, 2019, p.133).

**Join Server (Servidor de Unión):** Este servidor es el encargado de la seguridad, administra el proceso de activación para que los dispositivos finales se incorporen a la red, conteniendo la información necesaria para procesar las tramas uplink join-request (mensaje de solicitud) y generar tramas downlink join-accept (mensaje de aceptación), señala al LNS qué servidor de aplicaciones debe conectarse al dispositivo final comunicando la clave de sesión de red del dispositivo, al servidor de red y la clave de sesión de la aplicación, al servidor de aplicaciones correspondiente (Somin, 2019, p.133)

### ***2.6.2. Clases de dispositivos LoRaWAN***

En la red LoRaWAN los dispositivos se dividen en tres modos de operación (A, B y C) según las funcionalidades que soportan, todos los dispositivos deben admitir el funcionamiento de clase A, los dispositivos de clase B deben admitir los modos de clase A y clase B, y los dispositivos de

clase C deben admitir los tres modos de operación, estos modos de funcionamiento tienen que ver con la forma en que los dispositivos se comunican con la red (TTNetworks, 2020, p.32).

**Clase A:** El dispositivo final pasa la mayor parte del tiempo en un modo reposo, cuando hay un cambio en el entorno relacionado con lo que sea que el dispositivo esté programado para monitorear, se despierta y envía un mensaje uplink, transmitiendo los datos recolectados, luego, el dispositivo escucha una respuesta de la red, por lo general un segundo, si no recibe un mensaje downlink durante este lapso de tiempo, vuelve al modo reposo brevemente, se activa un momento después y vuelve a escuchar una respuesta, si no se recibe respuesta durante este segundo lapso, el dispositivo vuelve a reposo hasta la próxima vez que tenga datos para informar (TTNetworks, 2020, p.32).

**Clase B:** Esta clase proporciona intervalos de tiempo fijo programados regularmente para que un dispositivo final reciba mensajes downlink de la red, lo que hace que los dispositivos finales de clase B sean adecuados tanto para sensores de monitoreo como para actuadores, los dispositivos finales de clase B presentan un consumo energético mucho mayor que en la clase A (TTNetworks, 2020, p.32).

**Clase C:** Los dispositivos de clase C siempre están “encendidos”; es decir, no dependen de la energía de una batería, estos dispositivos son utilizados en cosas como alumbrado público, medidores eléctricos, etc. Estos dispositivos siempre están escuchando mensajes downlink, a menos que estén transmitiendo un mensaje uplink, esta clase ofrece la latencia más baja para la comunicación desde el servidor hacia el nodo (LoRa-Alliance, 2019, p.25).

Las clases representan un balance entre el consumo energético y capacidad de recepción, de esta manera se puede identificar los dispositivos de acuerdo a la función que desempeñen: los que prácticamente no necesitan enviar datos constantemente, los que tienen una demanda media y los que presentan una gran demanda de envío de datos (LoRa-Alliance, 2019, p.25).

### ***2.6.3. Seguridad en LoRaWAN***

Cualquier tecnología de comunicación que se albergue gran cantidad de nodos conectados necesita una sólida seguridad de extremo a extremo, dicho esto LoRaWAN basa su seguridad en tres propiedades fundamentales: autenticación mutua, protección de la integridad y confidencialidad (2CIGroup, 2019, p.95).

La autenticación mutua se establece entre los nodos y la red LoRaWAN como parte del procedimiento de unión que permite autenticarse al nodo en la red LoRaWAN, la protección de la integridad se da durante la transmisión para que los datos no puedan ser modificados o manipulados de manera no autorizada y para la confidencialidad se implementa el cifrado de extremo a extremo para las cargas útiles transmitidas, de esta manera se puede garantizar que el tráfico de la red no se haya alterado, que provenga de un dispositivo legítimo, que sea encriptado y que no haya sido capturado por agentes externos a la red (2CIGroup, 2019, p.95).

LoRaWAN establece dos factores claves para la seguridad de su red, por un lado, está el procedimiento de unión, que garantiza que únicamente los nodos autorizados puedan unirse a ella y por otro lado tenemos la autenticación de mensajes de aplicación y MAC, estos mensajes se autentican y encriptan en el nodo (origen) hacia el servidor de aplicaciones LoRaWAN, y viceversa (Gemalto, 2017, p.45).

Adicional a esto, LoRaWAN utiliza contadores de trama para detectar y bloquear ataques de repetición. Al activarse un dispositivo en la red, se establecen a cero los contadores de trama de enlace ascendente y descendente, el contador correspondiente a estos enlaces se va incrementando conforme se acepten los mensajes, en el caso de que el nodo o la red recibieran un mensaje con un contador de tramas inferior al último aceptado, este sería ignorado (TTNetworks, 2020, p.33).

#### *2.6.3.1. Métodos de activación*

En LoRaWAN se establece dos métodos para activar un dispositivo en la red, ABP (ActivationBy Personalization) y OTAA (Over The Air Activation), la principal diferencia entre los métodos mencionados es que ABP descarta el procedimiento de unión, vinculando directamente al nodo con la red, esto permite una conexión rápida, pero debilita la seguridad ya que las claves de cifrado se encuentran preconfiguradas en el dispositivo final (TTNetworks, 2020, p.34).

Por otro lado, los nodos que utilizan el método de activación OTAA obligatoriamente siguen el procedimiento de unión para intercambiar datos con el servidor de red LoRaWAN, para esto previamente se debe configurar en el dispositivo un ID de 64 bits denominado DevEUI, que identifica de manera única al nodo, y una clave de aplicación AES-128, conocida como AppKey, asignada de forma específica al nodo por el dueño de la aplicación (Michaslki, 2020, p.128).

El procedimiento de unión consiste en lo siguiente: Un nodo envía al Join Server un mensaje MAC de solicitud de unión para autenticarse dentro de la red, si se autentica al nodo en la red, el Join Server responderá al dispositivo con un mensaje MAC de aceptación, con los parámetros

enviados en el mensaje de aceptación y los ya configurados en el dispositivo, el nodo generará dos claves de sesión localmente, de igual manera el Join Server derivará las claves de sesión a partir de los parámetros configurado y los presentes en los mensajes de solicitud y aceptación de unión, finalmente, el Join Server compartirá las claves de sesión a los servidores de red y de aplicación LoRaWAN correspondientes (Semtech Corporation, 2019, p.84).

#### *2.6.3.2. Integridad y confidencialidad*

Se necesita dos claves de sesión para proteger el tráfico de control y de datos entre los nodos y los servidores LoRaWAN, la primera es la clave de sesión de red AES-128 o denominada NwkSKey que permite calcular y verificar el código de integridad del mensaje (MIC), comprobando que la integridad del paquete no haya sido comprometida, esta clave es compartida tanto el nodo como el servidor de red, además de esta también se dispone de la clave de sesión de aplicación AES-128 o denominada AppSKey que permite cifrar y descifrar la carga útil de cada mensaje, asegurando que ni la puerta de enlace ni el servidor de red lean el paquete transmitido, de igual manera el nodo final y el servidor de aplicaciones comparten una misma AppSKey (Michaslki, 2020, p.129).

## CAPITULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta la metodología utilizada, la configuración y los aspectos técnicos de los equipos LoRa, se realizó el estudio en cuatro sectores de la Ciudad de Riobamba que cuentan con diferentes topologías de terreno, para así, poder describir el comportamiento de la tecnología LoRa dentro de la misma, previo a las pruebas de campo, los dispositivos fueron configurados con los diferentes parámetros que son necesarios para establecer una comunicación LoRa como, Frecuencia, Ancho de Banda, Spreading Factor, entre otros, una vez realizada dicha configuración, se procedió en cada sector de estudio a localizar el lugar más alto, por lo general casas y edificios, para en ellos colocar nuestro equipo LoRa que actuará como Gateway y así poder cubrir la mayor parte de terreno, posteriormente con el nodo móvil se obtuvo alrededor de 150 mediciones por sector, cada medición con una distancia de separación recomendada de  $\pm 15$  metros, de las cuales para el estudio de la tecnología solo se tomó entre diez y quince de los mejores puntos o ubicaciones en las que existía una recepción de señal adecuada, tratando de cubrir las principales zonas en las que se podría colocar sensores en posteriores investigaciones, lugares como, paradas de buses, ingresos de escuelas, hospitales, edificios gubernamentales, parques, etc., además se consideró tomar dos puntos por sector, el más lejano y el más cercano, para realizar las simulaciones respectivas y poder así obtener datos más certeros, por último en este capítulo se muestra un análisis de viabilidad con los datos obtenidos en las mediciones de este estudio y considerar así a LoRa, una tecnología capaz en operar en la Ciudad de Riobamba.

#### 3.1. Equipos de trabajo

Para el desarrollo del presente trabajo se optó principalmente por la utilización de un kit de evaluación LoRa que consta de un transmisor (Nodo) y un receptor (Gateway), equipos bastante completos y accesibles que nos proporcionan una gran calidad en los trabajos realizados con ellos, la utilización de los equipos y software para la configuración y simulación serán descritos a continuación.

##### 3.1.1. Equipo de evaluación LoRa

El Kit consta de dos tarjetas de evaluación LoRa, una actúa como nodo y otra realiza la función de Gateway, estas tarjetas de desarrollo ESP32 (Figura 1-3), dicho equipo ofrece conectividad Wifi y Bluetooth, con frecuencia 2,4 GHz, potencia computacional (CPU + memorias), I/Os,

soporte para la operación de diversas comunicaciones, soporte para la operación de bajas potencias y bloques de hardware dedicados a la seguridad en un solo chip.

El ESP32 dispone del chip de radio LoRa SX1276 para permitir la conectividad en la frecuencia utilizada en el Continente Americano para LoRa de 915Mhz, tiene alta sensibilidad -148dBm, potencia de salida + 20 dBm, alta fiabilidad y largo alcance de transmisión.



**Figura 1-3.** Equipos de Evaluación LoRa (ESP32)

Fuente: LoRa-Alliance, 2019, p.7

Según el datasheet oficial del ESP32, utilizando el chip junto con aproximadamente 20 componentes externos, es posible disfrutar plenamente de las funcionalidades del ESP32, con el beneficio de ocupar un área muy pequeña en una placa circuito impreso, de esta manera, se puede utilizar este módulo como el componente principal en los proyectos desarrollados en Smarts Cities.

Cada tarjeta posee una pantalla de 0,96” pulgadas, un circuito de carga de batería de litio de 3.7V o 5V, una antena de 2 dBi con rosca SMA y conectividad USB para que pueda ser programada, en este caso con el entorno de desarrollo de Arduino del Kit LoRa.

#### *3.1.1.1. Especificaciones técnicas ESP32*

Las principales especificaciones técnicas del ESP32 en relación con conectividad, seguridad, CPU y memoria y otras funcionalidades son las siguientes:

Procesador

- CPU: microprocesador de 32-bit de doble núcleo, operando a 160 o 240 MHz y rindiendo hasta 600 DMIPS
- Coprocesador de ultra baja energía (ULP)

#### Conectividad inalámbrica:

- Wi-Fi: 802.11 b/g/n
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR y BLE

#### Memoria

- ROM: 448 KB
- SRAM: 520 KB
- SRAM del RTC: 16 KB

#### Interfaces periféricas

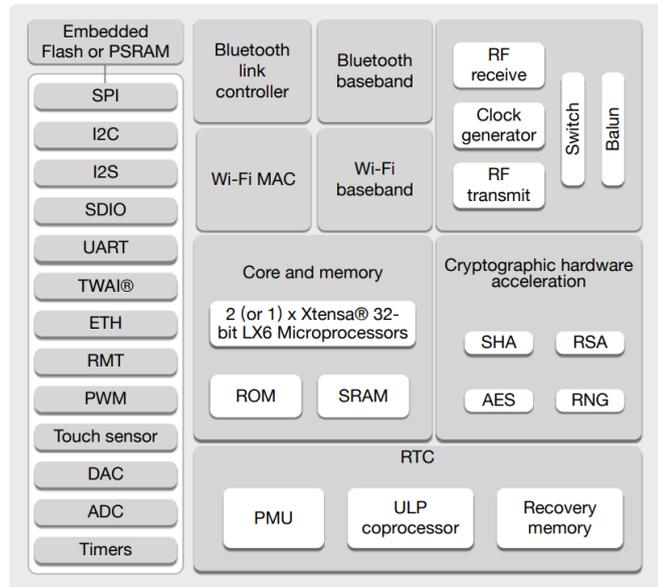
- 12-bit SAR ADC de hasta 18 canales
- 2 × 8-bit DACs
- 10 × sensores de tacto (sensores capacitivos GPIOs)
- 4 × SPI
- 2 × interfaces I<sup>2</sup>S
- 2 × interfaces I<sup>2</sup>C
- 3 × UART
- Controlador host SD/SDIO/CE-ATA/MMC/eMMC
- Controlador esclavo SDIO/SPI
- Interfaz Ethernet MAC con DMA dedicado y soporte para el protocolo IEEE 1588 Precision Time Protocol
- Bus CAN 2.0
- Controlador remoto infrarrojo (TX/RX, hasta 8 canales)
- Motor PWM
- LED PWM (hasta 16 canales)
- Sensor de efecto Hall
- Pre-amplificador analógico de ultra baja potencia

#### Seguridad

- Soporta todas las características de seguridad estándar de IEEE 802.11, incluyendo WPA, WPA/WPA2 y WAPI
- Arranque seguro
- Cifrado flash
- 1024-bit OTP, hasta 768-bit para clientes
- Criptografía acelerada por hardware: AES, SHA-2, RSA, criptografía de curva elíptica (ECC), generador de números aleatorios (RNG)

## Administración de energía

- Regulador interno de baja caída
- Dominio de poder individual para RTC
- Corriente de 5µA en modo de suspensión profundo
- Despierta por interrupción de GPIO, temporizador, medidas de ADC, interrupción por sensor de tacto capacitivo



**Figura 2-3.** Diagrama de bloques ESP32

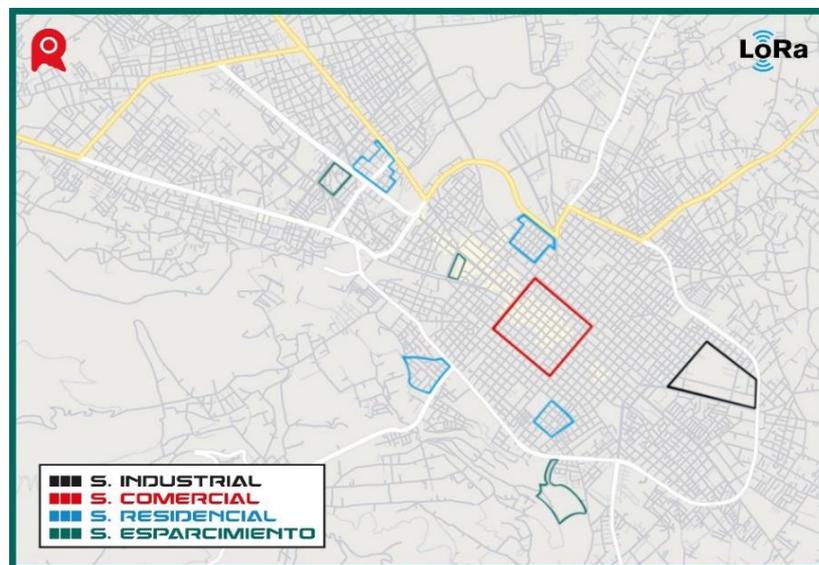
Fuente: LoRa-Alliance, 2019, p.9

Según el datasheet oficial de ESP32, utilizando el chip junto con aproximadamente 20 componentes externos, es posible disfrutar plenamente de las funcionalidades del ESP32, con el beneficio de ocupar un área muy pequeña en una placa circuito impreso, comercialmente, la forma más común de encontrar el ESP32 es en forma de un módulo, que ya contiene todos los componentes necesarios, shield metálico y ubicación para soldar los terminales, de esta manera, puede utilizar este módulo como un "súper componente" (CPU + memoria + conectividad) de un proyecto, en la Figura 2-3 podemos observar su diagrama de bloques.

### 3.2. Sectores de estudio seleccionados

Para elegir los sectores de estudio se dividió a la ciudad en cuatro sectores, el Industrial, el Comercial, el Residencial y el de Esparcimiento, se procedió a colocar el Transmisor LoRa en el centro de cada sector y se obtuvo alrededor de él, 7 muestras, las cuales sirvieron para obtener la media de los niveles de potencia (Tabla 1-3) en varios sectores de la ciudad como barrios, parques, mercados, plazas, zonas céntricas, etc., y se obtuvo que los niveles en ciertos lugares específicos

eran los adecuados para poder brindar una buena transmisión y recepción de señal, ya que los mismos rondan entre los -117 dBm y -120 dBm, dicho esto, se determinó que los lugares más óptimos para crear redes de sensores inalámbricos dentro de la ciudad son los marcados en la Figura 3-3, el Sector Industrial al sur de la ciudad más conocido como Parque Industrial, rodeado de fábricas, bodegas y domicilios, cuenta con un área aproximada de 402 792 m<sup>2</sup> y delimitado en color negro, el Sector Comercial ubicado en el centro histórico de la ciudad uno de los sectores más transcurridos a diario por sus habitantes, con un área aproximada de 494 901 m<sup>2</sup> y delimitada en color rojo, el Sector Residencial dividido en cuatro zonas o barrios representativos de la ciudad, Los Álamos, La Paz, La Didonato y La Primavera, delimitados en color celeste y cubriendo un área aproximada de 564 208 m<sup>2</sup>, por último el Sector de Esparcimiento conformado por tres de los principales parques de la ciudad, Parque Sesquicentenario, Parque Guayaquil y el Parque Ecológico, abarcando un área aproximada de 194 005 m<sup>2</sup> y delimitados en color verde.



**Figura 3-3.** Sectores de estudio en el plano de la Ciudad de Riobamba

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 1-3:** Media de RSSI en cada sector de estudio.

Sector	Muestras tomadas por sector	Media de RSSI (dBm)
SECTOR INDUSTRIAL	7	
Parque Industrial		-120.61
SECTOR COMECIAL	7	
Centro Histórico		-120.72
SECTOR RESIDENCIAL	7	
Barrio Los Álamos		-119
Barrio La Didonato		-117.84
Barrio La Paz		-117

Barrio La Primavera		-117.42
SECTOR DE ESPARCIMIENTO	7	
Parque Sesquicentenario		-116.46
Parque Guayaquil		-115.92
Parque Ecológico		-118.16

Realizado por: Trujillo, 2022

### 3.2.1. Sector industrial

El primer sector en el que se realizó el estudio fue en el Industrial, al sur de la ciudad, el **Parque Industrial Riobamba** hoy por hoy es un sitio de almacenaje en el que decenas de empresas e instituciones del país como Agripac, Secretaría de Gestión de Riesgos, Pronaca, Tesalia, Tubasec, Ile, Agip Gas, La Universal, UCEM, Mendogas, entre otras, poseen sus bodegas, debido a la infraestructura existente y a la ubicación estratégica que representa, siendo un punto de conexión en la distribución de los productos a nivel nacional.

El Parque Industrial comprende alrededor de 50 hectáreas en donde se pudo establecer 12 puntos en los que los nodos de prueba brindan una buena cobertura, además de establecer la ubicación del Gateway para la comunicación LoRa y un AP-WiFi que forma parte de la red inalámbrica con la que cuenta la ciudad.

### 3.2.2. Sector comercial

Ubicado en el centro de la ciudad, comprende el **Centro Histórico** de la misma, en este sector se cuenta con los principales mercados, plazas, parques, unidades educativas, instituciones gubernamentales y una gran variedad de almacenes dedicados a la comercialización de diferentes tipos de productos, es un sector en el que se tiene una gran concurrencia de peatones y vehículos a diario convirtiéndolo en una de las principales zonas a tener en cuenta en la implementación de proyectos que pudieran convertir a la ciudad de Riobamba en una Smart City.

El Centro Histórico comprende alrededor de 63 hectáreas, estableciendo 23 puntos en los que los nodos de prueba brindan una buena cobertura, se consideró importante utilizar 3 Gateways para cubrir este sector debido a la cantidad de habitantes que transitan por él, además de contar en esta zona con 13 AP-WiFi de la red inalámbrica local.

### ***3.2.3. Sector residencial***

Para el Sector Residencial se pudo realizar el estudio en cuatro de los principales barrios de la ciudad, en el Norte el **Barrio Los Álamos** con un área aproximada de 15 hectáreas, se determinó 9 puntos en los que se obtiene la mayor cobertura en el envío de paquetes, un Gateway para la comunicación LoRa y un AP-WiFi de la red inalámbrica local.

En el Sur se eligió el **Barrio La Paz** para el estudio, otro sector tradicional de la ciudad que cuenta con un área de 10 hectáreas en las que se pudo ubicar 9 puntos para los nodos de la red LoRa, un Gateway y dos AP-WiFi que se encuentran disponibles para el barrio.

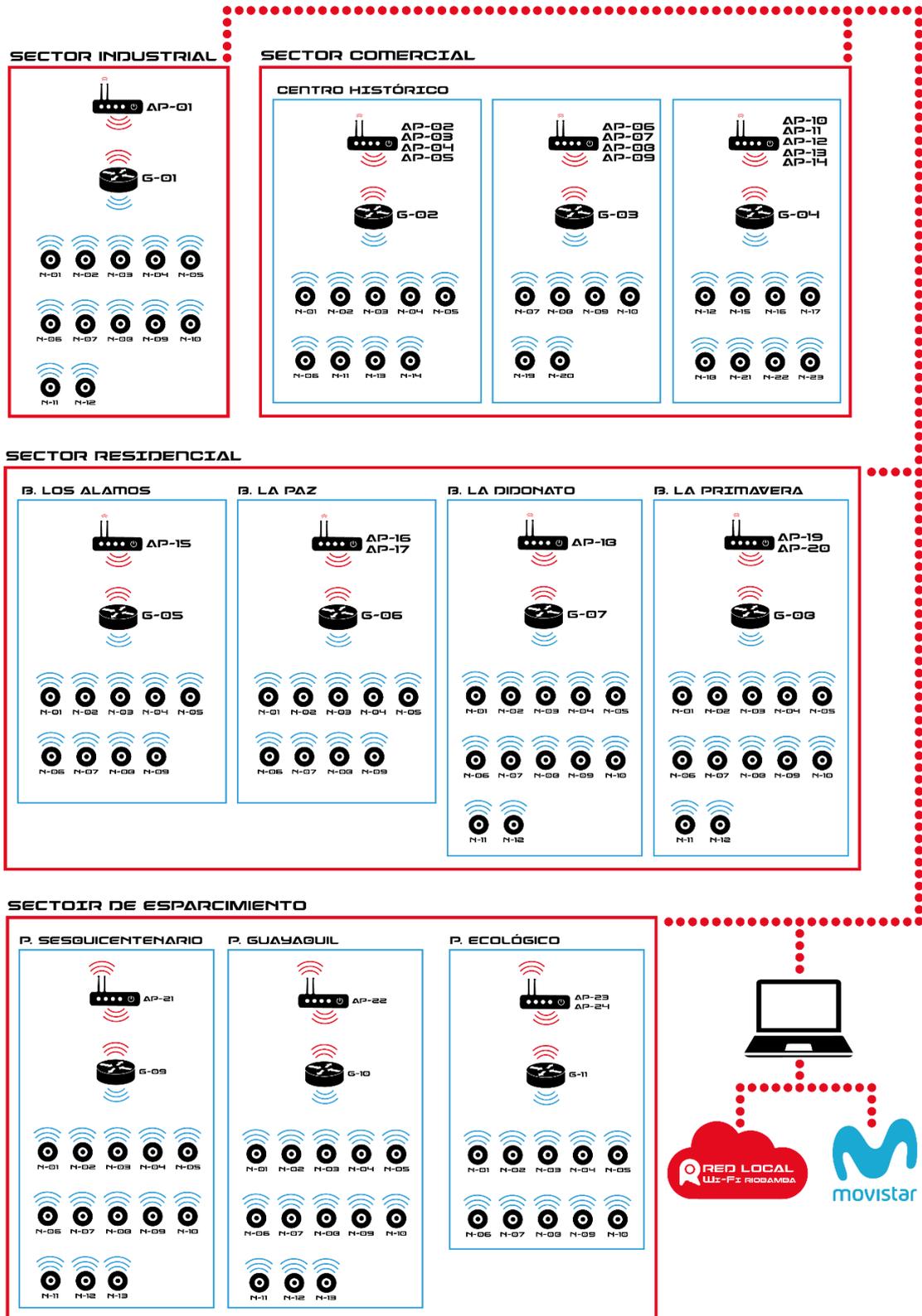
En el lado Este de la ciudad se encuentra el **Barrio La Didonato**, uno de los barrios más transitados por lo habitantes debido a su ubicación, rodeado de unidades educativas, mercados, locales comerciales, terminales intercantonales, etc., tiene de un área aproximada de 17 hectáreas en las que se identificaron 12 puntos estratégicos para ser utilizados en futuros trabajos, su respectivo Gateway LoRa y un AP-WiFi para la comunicación con la red inalámbrica de la ciudad.

Por ultimo en el lado Oeste se ubica el **Barrio La Primavera**, un barrio netamente residencial que en los últimos años ha venido creciendo con la construcción de canchas deportivas, graderíos, juegos infantiles, espacios ornamentales, zonas WiFi e iluminación, rescatándolo de cierta manera ya que se encontraba abandonado por parte de las autoridades locales, su área es aproximadamente 15 hectáreas en las que se determinó 12 puntos que servirían para la colocación de sensores inalámbricos, un Gateway LoRa y dos AP-Wifi de la red inalámbrica a los que el barrio tiene acceso.

### ***3.2.4. Sector de esparcimiento***

Como sectores de esparcimiento se tomaron tres de los principales parques de la ciudad, los mismos que se encuentran distribuidos en el norte, centro y sur de la ciudad y que además son de gran concurrencia por parte de la ciudadanía, al norte el **Parque Sesquicentenario** con un área aproximada de 4 hectáreas en las que se ubicó 13 puntos, en estos se considera que se podrían ubicar sensores con una buena cobertura, un Gateway para la comunicación LoRa y un AP-Wifi ya existente, el **Parque Guayaquil** con un área aproximada de 3 hectáreas en las que se ubicó 13 puntos que brindan una buena cobertura, un Gateway para la comunicación LoRa y un AP-Wifi de la red local y por último en el sur de la ciudad el **Parque Ecológico** con un área aproximada

de 13 hectáreas en las que se logró ubicar 10 puntos que ofrecen línea de vista directa con el Gateway para la comunicación LoRa y dos AP-Wifi de la red local.



**Figura 4-3.** Diseño de la Red LoRa para la Ciudad de Riobamba  
Realizado por: Trujillo, 2022

En la Figura 4-3 podemos observar el diseño de la Red LoRa que se propone en esta investigación la cual cuenta con: 24 ubicaciones de los Access Point Wifi de la Red local con la que cuenta la ciudad, 11 ubicaciones de Gateways, suficientes para cubrir una gran parte de la urbe y 113 ubicaciones consideradas las mejores para colocar y establecer una red de sensores inalámbricos a través de tecnología LoRa

### 3.3. Descripción del procedimiento

**Paso 1:** Se ubico el lugar más alto en cada sector para poder colocar el dispositivo LoRa que intervendrá en la red como Gateway, estos lugares por lo general fueron edificios de hoteles, empresas y casas, en este estudio se ubicaron 11 Gateways para poder cubrir los cuatro sectores elegidos de la ciudad, hay que tener en cuenta que según la arquitectura de una red LoRa, estos Gateways deben ser capaces de conectarse a internet a través de cualquier tecnología, en este caso para realizar las pruebas de campo se ha decidido que cada Gateway se conecte a una red inalámbrica wifi creada a través de un computador (R-1) que actuara como router (Figura 4-3), la misma que tendrá dos proveedores de internet, la primera es la Operadora Telefónica Movistar a través de un plan de datos y la segunda es la Red Local WiFi de la Ciudad de Riobamba, cabe recalcar que esta decisión es tomada ya que en la segunda red mencionada existen intermitencias de conectividad, esto hacía que los equipos perdieran conexión y no se podía obtener datos lo suficientemente constantes y reales.

**Paso 2:** Se realizo la configuración de los equipos según la Tabla 2-2, empezando con DR0 hasta DR5 con el fin de tener una lectura de datos lo suficientemente certera y poder determinar cómo se comporta la tecnología LoRa en cada uno de los sectores de estudio.

**Paso 3:** La toma de datos se la realiza con nuestro nodo móvil, este dispositivo nos mostrara en su pantalla la RSSI en cada uno de los puntos por los cuales nos desplazamos, la distancia entre estos puntos se da por el llamado *promedio espacial*, el cual consiste en moverse una distancia entre  $20\lambda$  y  $40\lambda$  en una frecuencia específica, en este caso sería de 915MHz.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{915 * 10^6} = 0.327m \quad (13)$$

$$20\lambda = 20 * 0.327 = 6.54m \quad (14)$$

$$40\lambda = 40 * 0.327 = 13.08m \quad (15)$$

Con estos resultados obtenemos que la distancia entre cada una de las mediciones debe permanecer entre los 6.54m y 13.08m, por lo tanto, se ha elegido 10 metros por operatividad.

**Paso 4:** Finalmente con el Gateway transmitiendo, ubicado en el punto más alto del sector y con los equipos configurados, se procede a tomar las mediciones de RSSI, con el nodo móvil nos desplazamos por cada uno de los sectores obteniendo alrededor de 150 muestras o mediciones de las cuales solo se eligió entre 9 y 13 ubicaciones de las más óptimas.

### 3.4. Simulaciones

Para la realización de las simulaciones de la variable RSSI en la cobertura de los Gateways LoRa se utilizó el software de medición de RF Xirio Online, que permite de manera concreta y económica realizar simulaciones profesionales de cobertura radioeléctrica en cualquier parte del mundo en entornos rurales y urbanos utilizando cartografía de alta resolución.

Los Gateways van a tener las mismas características para los cuatro sectores de estudio utilizados: Industrial, Comercial, Residencial y de Esparcimiento, estos se configuran de la misma manera como se puede ver en la Figura 5-3 y los nodos de igual forma (Figura 6-3).

Cabe destacar que se usó el método de propagación Okumura-Hata Modificado el cual es un método híbrido basado en Okumura-Hata, corregido por la difracción en obstáculos, válido en la gama de 150 MHz a 2 GHz, dicho método es recomendado por XIRIO para servicios móviles y de acceso de banda ancha en entornos urbanos cuando se disponga de cartografía de alta resolución.

Propiedades del transmisor	
<b>Transmisor</b>	
Nombre:	G-01/Parque Industrial
<b>Emplazamiento</b>	
Coordenadas	
Latitud:	01°40'39.07"S
Longitud:	078°38'16.40"W
<b>Parámetros de radio</b>	
Referencia de alturas de antenas	
Alturas respecto a:	Nivel de azotea
Usar altura de edificio:	Definida por el usuario
Altura edificio:	15 m
Frecuencias de transmisión	
Frecuencias:	915.000 MHz
Canal:	1
Polarización:	Vertical
Feeder:	
Longitud del feeder:	0 m
Pérdidas del feeder:	0 dB
Pérdidas pasivos:	20 dB
Potencia:	14 dBm

**Figura 5-3.** Configuración de Gateways en XIRIO.

Realizado por: Trujillo, 2022

Al tratarse de una aplicación de pago, XIRIO brinda alta confianza en que los datos arrojados son lo más cercanos a la realidad, por esta razón se decidió plasmar el nodo más cercano y el nodo más lejano al Gateway en cada sector de estudio.

**Parámetros de radio**

**Parámetros de radio**

**Antena:**  📄 ✖ 🔄 🎧

**Altura antena:**  m

---

**Polarización:**

---

**Feeder:**  + 🎧

**Longitud del feeder:**  m

**Pérdidas del feeder:**  dB 📄

**Pérdidas pasivos:**  dB

---

**Umbral recepción:**  Campo  Potencia

dBm dBm ▼

**Figura 6-3.** Características de recepción.

Realizado por: (Israel Trujillo, 2022)

En la Figura 7-3 podemos observar el código de colores para los rangos de la señal en el mapa de cobertura, el rango típico de RSSI en LoRa es de -110 dBm y -140 dBm, esto significa que mientras el valor de RSSI se acerque más a cero la señal será mejor transmitida.

**Rangos**

Rango de Señal 📄 ✖ 🔄 🎧

Color	Rango	Descripción
■	[-140.00 , -135.00) dBm	📄 ✖
■	[-135.00 , -130.00) dBm	📄 ✖
■	[-130.00 , -125.00) dBm	📄 ✖
■	[-125.00 , -120.00) dBm	📄 ✖
■	[-120.00 , -115.00) dBm	📄 ✖
■	[-115.00 , -110.00) dBm	📄 ✖
■	[-110.00 , Infinity) dBm	📄 ✖

**Figura 7-3.** Código de colores, mapa de cobertura.

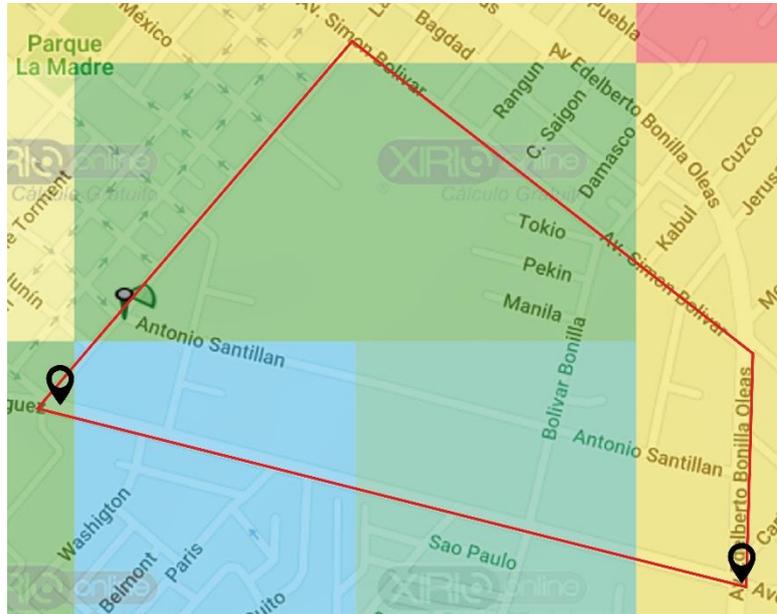
Realizado por: Trujillo, 2022

### 3.4.1. Sector industrial

#### 3.4.1.1. Parque Industrial Riobamba

En la Figura 8-3 se puede observar el mapa de cobertura del Sector Industrial, con los parámetros configurados anteriormente se obtienen mediciones de RSSI entre -118.99 dBm y -128.40 dBm desde el Gateway al nodo más cercano y más lejano respectivamente (marcadores negros), lo cual

representa que en este sector se tendrá buena cobertura en todos los puntos elegidos para colocar los nodos o sensores, hay que tener en cuenta que la distancia más lejana es de casi 1 Km (Tabla 2-3) en este sector.



**Figura 8-3.** Mapa de cobertura, Sector Industrial.

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 2-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Parque Industrial.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-01	-1,6785717, -78,6377693	-118.99	137 metros	Nodo más cercano
N-10	-1,6809214, -78,6305181	-128.40	937 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022

### 3.4.2. Sector comercial

#### 3.4.2.1. Centro Histórico

En la Figura 9-3 se puede observar el primer mapa de cobertura del Sector Comercial, con los parámetros configurados anteriormente se obtienen desde el Gateway mediciones de RSSI de -104.10 dBm para el nodo más cercano y -112.41 dBm el más lejano (marcadores negros), en este sector se decidió establecer la ubicación para tres Gateways que dependiendo de las características de cualquier proyecto a implementarse en lo posterior, se puede hacer uso de ellos ya que cada uno manejan diferentes coberturas como se muestra a continuación:

**Tabla 3-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Centro Histórico.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-04	-1,6712256, -78,6529893	-104.10	55 metros	Nodo más cercano
N-14	-1,6745685, -78,6522947	-112.41	378 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022



**Figura 9-3.** Mapa de cobertura, Sector Comercial.

Realizado por: Trujillo, 2022

En la Figura 10-3 tenemos el segundo mapa de cobertura del Sector Comercial, con mediciones de RSSI desde el Gateway de -102.05 dBm para el nodo más cercano y -125.08 dBm el más lejano (marcadores negros).



**Figura 10-3.** Mapa de cobertura, Sector Comercial.

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 4-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Centro Histórico.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-19	-1,6724949, -78,6482198	-102.05	54 metros	Nodo más cercano
N-07	-1,6696725, -78,6509842	-125.08	365 metros	Nodo más lejano

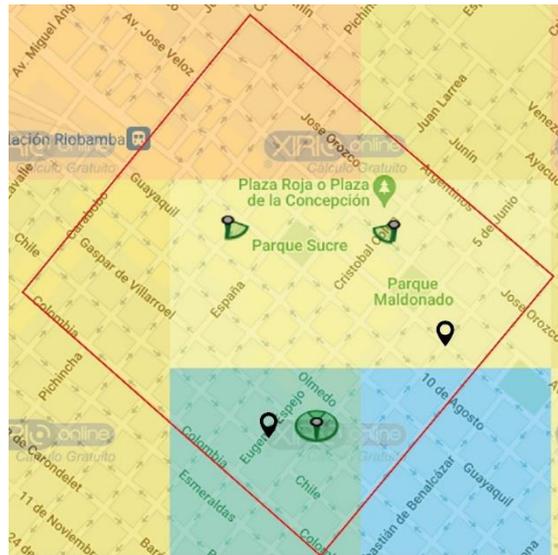
Realizado por: Trujillo, 2022

Por último, tenemos el tercer mapa de cobertura del Sector Comercial en la Figura 11-3, con mediciones de RSSI desde el Gateway de -114.09 dBm para el nodo más cercano y -121.35 dBm el más lejano (Tabla 5-3).

**Tabla 5-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Centro Histórico.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-15	-1,6754929, -78,6512052	-114.09	115 metros	Nodo más cercano
N-21	-1,6742854, -78,6471447	-121.35	367 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022



**Figura 11-3.** Mapa de cobertura, Sector Comercial.

Realizado por: Trujillo, 2022

### 3.4.3. Sector residencial

#### 3.4.3.1. Barrio Los Álamos

En la Figura 12-3 tenemos el mapa de cobertura del Barrio Los Álamos, con los parámetros establecidos se obtienen desde el Gateway mediciones de RSSI hacia los dos puntos, de -104.71 dBm para el nodo más cercano y -110.46 dBm el más lejano.



**Figura 12-3.** Mapa de cobertura, Barrio Los Álamos.

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 6-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Barrio los Álamos.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-01	-1,654659, -78,6664773	-104.71	108 metros	Nodo más cercano
N-09	-1,6590901, -78,6657668	-110.46	615 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022

#### 3.4.3.2. Barrio La Paz

En la Figura 13-3 tenemos el mapa de cobertura del Barrio La Paz, en donde se ha podido obtener desde el Gateway mediciones de RSSI, de -119.52 dBm para el nodo más cercano y -110.13 dBm para el nodo más lejano (Tabla 7-3).

**Tabla 7-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Barrio La Paz.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-02	-1,6817816, -78,6505932	-104.71	67 metros	Nodo más cercano
N-09	-1,6826158, -78,6483732	-110.46	240 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022



**Figura 13-3.** Mapa de cobertura, Barrio La Paz.

Realizado por: Trujillo, 2022

### 3.4.3.3. Barrio La Didonato

En la Figura 14-3 tenemos el mapa de cobertura del Barrio La Didonato, en donde las mediciones de RSSI, van desde -119.65 dBm para el nodo más cercano y -124.94 dBm para el nodo más lejano (Tabla 8-3).

**Tabla 8-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Barrio La Didonato.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-10	-1,6632186, -78,6500367	-119.65	40 metros	Nodo más cercano
N-01	-1,6640913, -78,6538166	-124.94	450 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022



**Figura 14-3.** Mapa de cobertura, Barrio La Didonato.

Realizado por: Trujillo, 2022

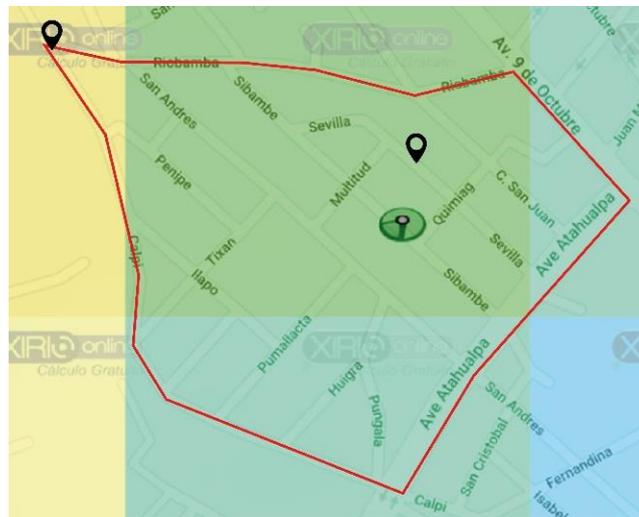
### 3.4.3.4. Barrio La Primavera

En la Figura 15-3 tenemos el mapa de cobertura del Barrio La Primavera, en donde las mediciones de RSSI, van desde -117.26 dBm para el nodo más cercano y -125.88 dBm para el nodo más lejano (Tabla 9-3).

**Tabla 9-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Barrio La Primavera.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-07	-1,6766927, -78,6604242	-117.26	75 metros	Nodo más cercano
N-01	-1,6759413, -78,6633321	-125.88	382 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022



**Figura 15-3.** Mapa de cobertura, Barrio La Primavera.

Realizado por: Trujillo, 2022

### 3.4.4. Sector de esparcimiento

#### 3.4.4.1. Parque Sesquicentenario

En la Figura 16-3 tenemos el mapa de cobertura del Parque Sesquicentenario, proporcionándonos mediciones de RSSI, que están entre -111.72 y -116.36 dBm (Tabla 10-3).

**Tabla 10-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Parque Sesquicentenario.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-02	-1.658333, -78.671004	-111.72	53 metros	Nodo más cercano
N-13	-1.657158, -78.669460	-116.36	154 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022



**Figura 16-3.** Mapa de cobertura, P. Sesquicentenario.

Realizado por: Trujillo, 2022

#### 3.4.4.2. Parque Guayaquil

En la Figura 17-3 tenemos el mapa de cobertura del Parque Guayaquil, proporcionándonos mediciones de RSSI, que van desde -109.12 dBm para el nodo más cercano y -110.1 dBm para el nodo más lejano (Tabla 11-3).

**Tabla 11-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Parque Guayaquil.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-06	-1,6665605, -78,6591101	-109.25	36 metros	Nodo más cercano
N-01	-1,6674415, -78,6593173	-111.46	179 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022



**Figura 17-3.** Mapa de cobertura, Parque Guayaquil

Realizado por: Trujillo, 2022

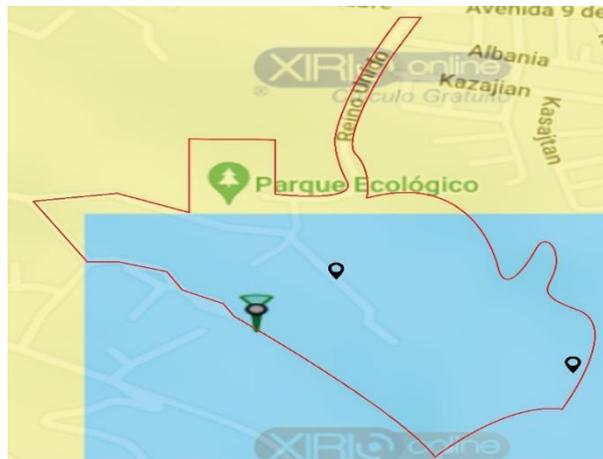
### 3.4.4.3. Parque Ecológico

En la Figura 18-3 tenemos el mapa de cobertura del Parque Ecológico, proporcionándonos mediciones de RSSI, que van desde -108.36 dBm para el nodo más cercano y -110.25 dBm para el nodo más lejano (Tabla 12-3).

**Tabla 12-3:** Mediciones obtenidas mediante simulaciones, Parque Ecológico.

Nodo	Coordenadas	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción
N-05	-1,6895365, -78,6508446	-109.72	144 metros	Nodo más cercano
N-10	-1,6906305, -78,6485183	-110.36	428 metros	Nodo más lejano

Realizado por: Trujillo, 2022



**Figura 18-3.** Mapa de cobertura, Parque Ecológico.

Realizado por: Trujillo, 2022

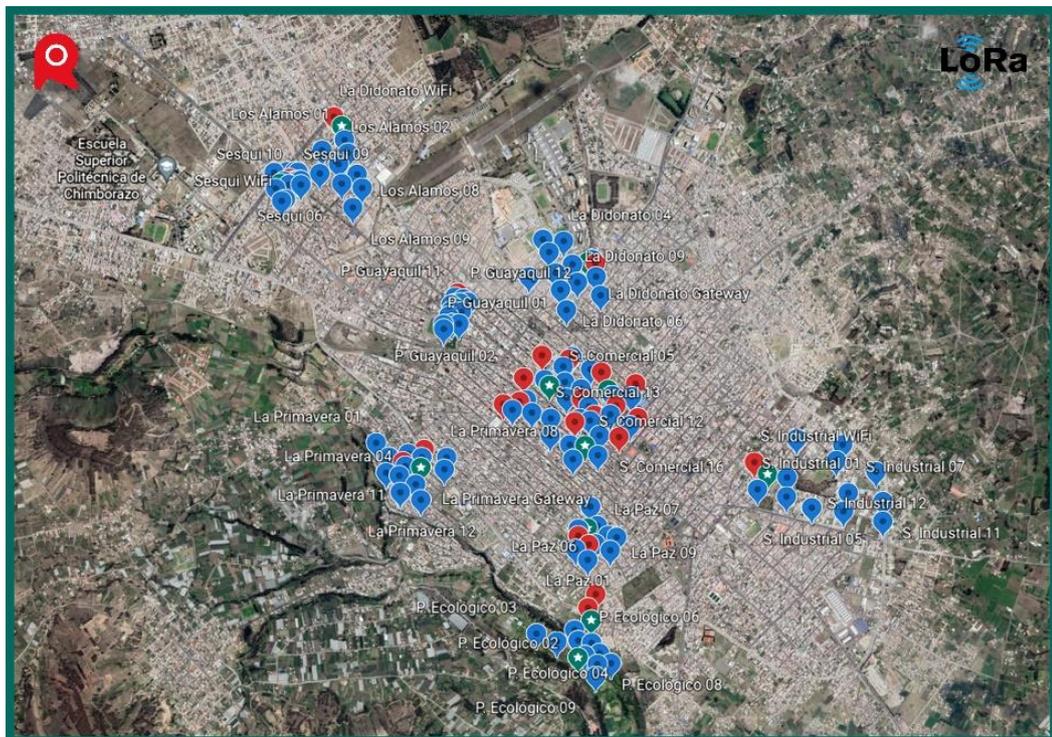
## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Ubicación de equipos y datos de cobertura

En la Figura 1-4 podemos apreciar en un mapa satelital la ubicación de los dispositivos LoRa a lo largo de la Ciudad de Riobamba, en cada sector de estudio el Gateway (marcador verde) fue colocado en varias de las posiciones más elevadas del terreno, valiéndonos de casas, edificios y estructuras disponibles, para posteriormente realizar las comparaciones de cobertura y determinar la mejor ubicación para el dispositivo en el sector.

De la misma manera el nodo (marcador celeste) fue colocado en varios puntos, realizando alrededor de 150 mediciones por sector y obteniendo los principales puntos que podrán ser utilizados para colocar los diferentes tipos de sensores existentes y tener una buena comunicación con su Gateway, adicional se muestra la ubicación de cada uno de los Access Point WiFi (marcador rojo) de la Red Inalámbrica con la que cuenta la Ciudad de Riobamba



**Figura 1-4.** Vista satelital de los puntos ubicados en cada uno de los sectores de estudio.

Realizado por: Trujillo, 2022

### 4.1.1. Sector industrial

#### 4.1.1.1. Parque Industrial Riobamba

En el parque Industrial se han obtenido 12 ubicaciones óptimas (Figura 2-4) que pueden ser utilizadas en la implementación de redes de sensores inalámbricos y por ende en la transformación de la ciudad en una Smart City, absolutamente todas las ubicaciones obtenidas en esta investigación cubren ciertos lugares estratégicos de la ciudad, por ejemplo en este sector se cubre, paradas de autobuses, unidades educativas, clínicas, fábricas y entidades gubernamentales, en la Tabla 1-4 se puede obtener una descripción detallada de esta información, por su parte el Gateway fue ubicado en la parte alta de los baños de la Gasolinera Primax, un lugar en el que se puede obtener casi una línea de vista directa con algunos de los nodos del sector ya que no presentan demasiados obstáculos como edificaciones de gran altitud como en el Sector Comercial por citar un ejemplo, además de encontrarse cerca de un Access Point de la Red Wifi de la ciudad, en concreto a 133 metros de distancia, los valores de RSSI en este sector oscilan entre los -120 dBm y -125 dBm niveles considerados óptimos dentro de la transmisión LoRa.



**Figura 2-4.** Ubicación de Equipos, Parque Industrial

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 1-4:** Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Parque Industrial Riobamba

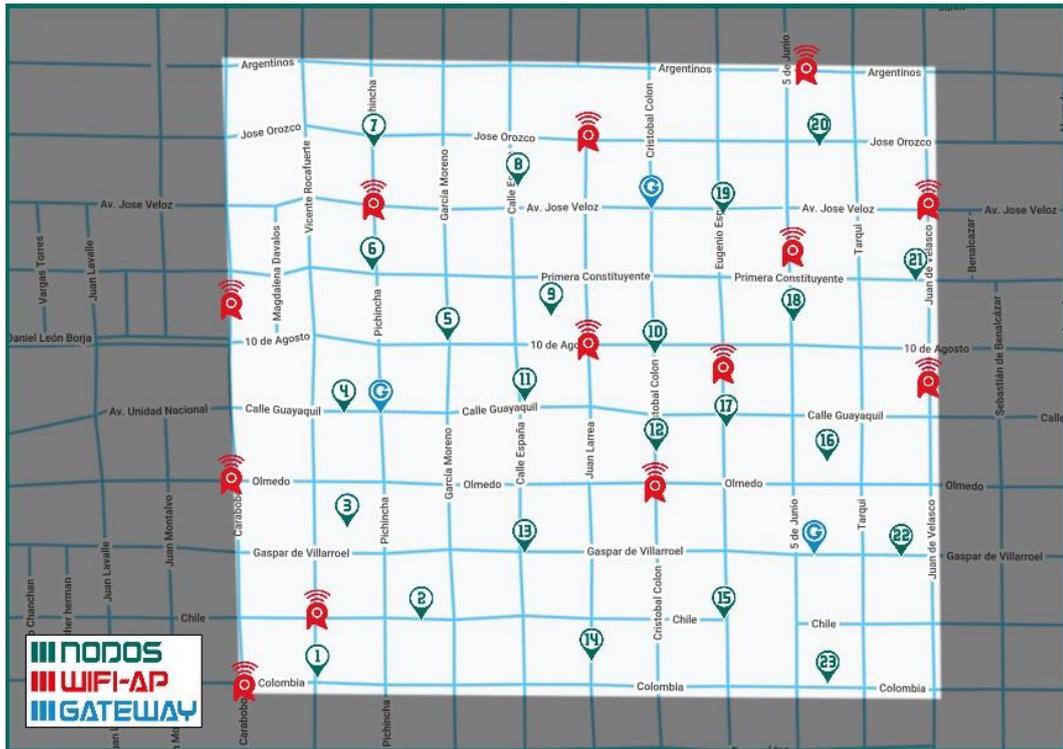
Nodo	Coordenadas	SF	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción de Cobertura
G-01	-1,6779039, -78,637835			3 m. de altura	Gateway P. Industrial
AP-01	-1,6779039, -78,637835		-117	133 metros	Wifi Parque Industrial
N-01	-1,6785717, -78,6377693	7	-117	137 metros	Parada de Bus
N-02	-1,6779242, -78,6367962	7	-117	151 metros	I.T.S. Carlos Cisneros
N-03	-1,6752283, -78,6356951	7	-119	342 metros	U.E. Carlos Cisneros
N-04	-1,6789058, -78,6365488	7	-118	223 metros	IESS Subcentro
N-05	-1,6796128, -78,6347225	7	-120	416 metros	U. Policía Comunitaria
N-06	-1,6801577, -78,6326603	9	-122	637 metros	Fábricas
N-07	-1,679263, -78,6327529	9	-122	622 metros	Fábricas
N-08	-1,6769668, -78,6331748	9	-121	527 metros	Secretaria de Riesgos
N-09	-1,6758703, -78,6329395	9	-122	604 metros	Laboratorios U.E. C. Cisneros
N-10	-1,6809214, -78,6305181	12	-125	937 metros	Agencia Nacional de Transito
N-11	-1,6796528, -78,630411	12	-124	891 metros	Clínica Mosquera, Fábricas
N-12	-1,6776993, -78,6306421	12	-124	815 metros	Feria de Carros, Fábricas

Realizado por: Trujillo, 2022

#### 4.1.2. Sector comercial

##### 4.1.2.1. Centro Histórico

Con la adquisición de vehículos y taxis como medio de transporte público, la situación del tránsito urbano ha empeorado a medida que la ciudad crece, cada día se construyen nuevas áreas residenciales, centros educativos que crean nuevas demandas o impactos en el tránsito, el centro histórico es conocido como una de las áreas más congestionadas de la ciudad, sobre todo en horas pico y días laborables, por lo expuesto anteriormente se ha considerado optar por tres Gateways para cubrir esta zona (Figura 3-4), el primero está ubicado en las calles Guayaquil y Pichincha (Esq.) en los altos de la Librería Primicias, el segundo se encuentra ubicado en las calles Colon y Veloz en los altos de la Librería Chimborazo y el tercer Gateway en las calles Villarroel y 5 de Junio, para este punto tuvimos acceso a la terraza de una casa ubicada en dicha dirección perteneciente a la familia Altamirano, además se dispone de 23 ubicaciones para los sensores o dispositivos finales los mismos que enviarán sus datos al Gateway más cercano, dichas ubicaciones de igual manera que en todos los sectores, cubren lugares estratégicos, en este caso, almacenes comerciales, supermercados, clínicas, unidades educativas, entre otros (Tabla 2-4), el objetivo principal en este sector es evitar la congestión en la red especialmente en horas pico, adicional se ha obtenido la ubicación de 13 Access Point de la Red local Wifi de la ciudad.



**Figura 3-4.** Ubicación de Equipos, Centro Histórico

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 2-4:** Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Centro Histórico

Nodo	Coordenadas	SF	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción de Cobertura
G-02	-1,671462, -78,652572			15 m. de altura	Gateway Centro Histórico
AP-02	-1,6729355, -78,6554852		-122	372 metros	Wifi Centro Histórico
AP-03	-1,6710254, -78,6541672		-121	202 metros	Wifi Centro Histórico
AP-04	-1,6696813, -78,6530498		-121	232 metros	Wifi Centro Histórico
AP-05	-1,6729727, -78,6552379		-121	256 metros	Wifi Centro Histórico
Nodo 01	-1,6731674, -78,6551209	7	-122	335 metros	TIA, Convento Carmelitas
Nodo 02	-1,6728356, -78,6547122	7	-121	245 metros	Bomberos, Buen Hogar
Nodo 03	-1,6727756, -78,6541706	7	-121	204 metros	Mercado Santa Rosa
Nodo 04	-1,6712256, -78,6529893	7	-119	55 metros	Clínica Santa Cecilia
Nodo 05	-1,6713897, -78,6516658	7	-120	116 metros	Bancos
Nodo 06	-1,6705816, -78,6515095	7	-120	173 metros	Cruz Roja, Corte de Justicia
Nodo 11	-1,6720871, -78,6504717	7	-120	159 metros	Almacenes Comerciales
Nodo 13	-1,6730165, -78,6513342	7	-121	250 metros	U.E. 11 de Noviembre

Nodo 14	-1,6745685, -78,6522947	7	-122	378 metros	Parqueos
G-03	-1,6717997, -78,6486685			13 m. de altura	Gateway Centro Histórico
AP-06	-1,6700241, -78,6511936		-122	370 metros	Wifi Centro Histórico
AP-07	-1,6725709, -78,6504357		-121	207 metros	Wifi Centro Histórico
AP-08	-1,6709729, -78,6490027		-120	140 metros	Wifi Centro Histórico
AP-09	-1,6713694, -78,6470588		-121	210 metros	Wifi Centro Histórico
Nodo 07	-1,6696725, -78,6509842	7	-122	365 metros	Coliseo Teodoro Gallegos
Nodo 08	-1,6705107, -78,6498121	7	-120	198 metros	Hospital de Niños
Nodo 09	-1,6716726, -78,6504367	7	-121	200 metros	EERSA, Parque Sucre
Nodo 10	-1,6724675, -78,6499111	7	-120	188 metros	TIA, Coop. Riobamba
Nodo 19	-1,6724949, -78,6482198	7	-119	54 metros	La Catedral, P. Maldonado
Nodo 20	-1,6725856, -78,6470353	7	-120	184 metros	Mercado San Alfonso
G-04	-1,6755618, -78,6501421			9 m de altura	Gateway Centro Histórico
AP-10	-1,6738354, -78,6509914		-120	190 metros	Wifi Centro Histórico
AP-11	-1,673021, -78,6497886		-121	237 metros	Wifi Centro Histórico
AP-12	-1,6727661, -78,6482557		-122	378 metros	Wifi Centro Histórico
AP-13	-1,6735361, -78,6503939		-123	448 metros	Wifi Centro Histórico
AP-14	-1,6747189, -78,6488416		-121	263 metros	Wifi Centro Histórico
Nodo 12	-1,6735361, -78,6503939	7	-121	204 metros	Mercado La Merced
Nodo 15	-1,6754929, -78,6512052	7	-120	115 metros	U.E. San Vicente de Paul
Nodo 16	-1,6745968, -78,64923	7	-120	133 metros	U.E. María Auxiliadora
Nodo 17	-1,6740906, -78,6494474	7	-120	188 metros	Correos del Ecuador
Nodo 18	-1,6732579, -78,6486936	7	-122	300 metros	Gobernación, BanEcuador
Nodo 21	-1,6742854, -78,6471447	7	-122	367 metros	Mercado San Francisco
Nodo 22	-1,6761043, -78,6492811	7	-120	121 metros	Hoteles y Residencias
Nodo 23	-1,6764899, -78,6509304	7	-120	139 metros	U.E. Simón Bolívar

Realizado por: Trujillo, 2022

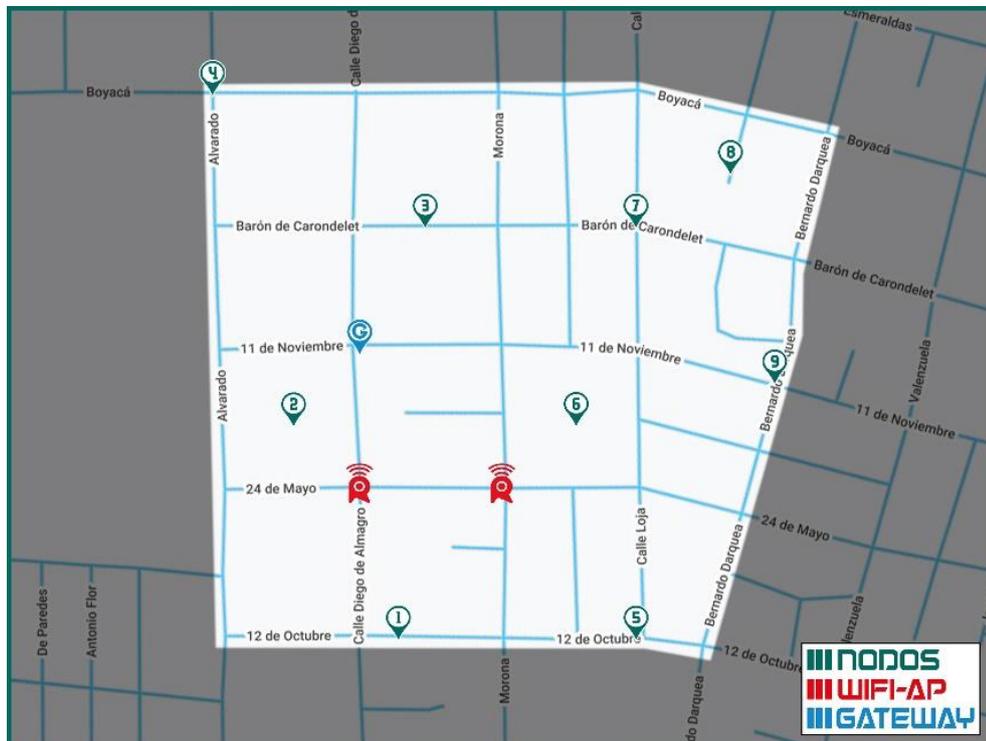


Nodo 05	-1,6574286, -78,6679349	7	-119	393 metros	Domicilios
Nodo 06	-1,6570296, -78,6658412	7	-119	380 metros	Domicilios
Nodo 07	-1,6575791, -78,6665333	9	-120	430 metros	Parada de Buses
Nodo 08	-1,65818, -78,665299	9	-120	488 metros	Domicilios
Nodo 09	-1,6590901, -78,6657668	9	-122	615 metros	Domicilios

Realizado por: Trujillo, 2022

#### 4.1.3.2. Barrio La Paz

El Barrio La Paz cuenta con 9 ubicaciones (Figura 5-4) en las que la recepción de la señal es óptima, estas ubicaciones en su mayoría cubren lugares residenciales, el parque del barrio, la Unidad de Policía Comunitaria y una Unidad Educativa (Tabla 4-4), esta zona cuenta también con un Gateway ubicado en las calles 11 de Noviembre y Diego de Almagro, dicho dispositivo fue ubicado en una casa de dos pisos a la cual se tuvo acceso gracias a la propietaria de la misma, la Sra. Bertha Paredes, además se estableció la ubicación de dos Access Points de la Red Local Wifi que se encuentran en el barrio, el más cercano a 90 metros y el otro a 123 metros del Gateway, esto servirá para que en posteriores investigaciones se puedan usar esos puntos para establecer una comunicación con Internet.



**Figura 5-4.** Ubicación de Equipos, Barrio La Paz

Realizado por: Trujillo, 2022

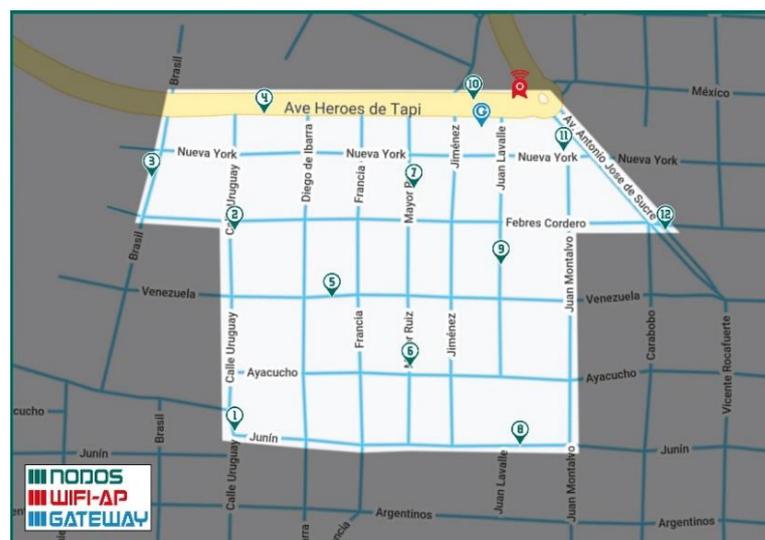
**Tabla 4-4:** Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Barrio La Paz

Nodo	Coordenadas	SF	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción de Cobertura
G-06	-1,6813896, -78,6503159			10 m de altura	Gateway Barrio La Paz
AP-16	-1,6818089, -78,6502652		-116	90 metros	Wifi Barrio La Paz
AP-17	-1,6818089, -78,6502652		-117	123 metros	Wifi Barrio La Paz
N-01	-1,68243, -78,6506605	7	-117	180 metros	Domicilios
N-02	-1,6817816, -78,6505932	7	-116	67 metros	Parque
N-03	-1,6811772, -78,6493663	7	-116	80 metros	Domicilios
N-04	-1,6803608, -78,6498147	7	-117	160 metros	U.E. Isabel de Godín
N-05	-1,6828067, -78,6504496	7	-118	238 metros	Domicilios
N-06	-1,6825445, -78,6499632	7	-117	131 metros	U. Policía Comunitaria
N-07	-1,682017, -78,6490561	7	-117	160 metros	Domicilios
N-08	-1,6819478, -78,6481447	7	-118	230 metros	Domicilios
N-09	-1,6826158, -78,6483732	7	-118	240 metros	Domicilios

Realizado por: Trujillo, 2022

#### 4.1.3.3. Barrio La Didonato

En el Barrio La Didonato se establecieron 12 ubicaciones que representan una buena recepción de señal (Figura 6-4), aunque este es un barrio residencial, este se encuentra en una zona muy transcurrida ya que se encuentra cerca de mercados, terminales intercantonales, algunos almacenes comerciales, también podemos encontrar un hospital, un parque, unidades educativas, bancos, gasolineras, entre otros (Tabla 5-4).



**Figura 6-4.** Ubicación de Equipos, Barrio La Didonato

Realizado por: Trujillo, 2022

Esta zona cuenta con un Gateway ubicado en la Av. De los Héroes y Cmte. Jiménez en la terraza de una casa de cuatro pisos perteneciente a la Familia Flores y a una distancia de 58 metros de nuestro Gateway se encuentra el Access Point de la Red Wifi con la que cuenta la ciudad en este sector.

**Tabla 5-4:** Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Barrio La Didonato

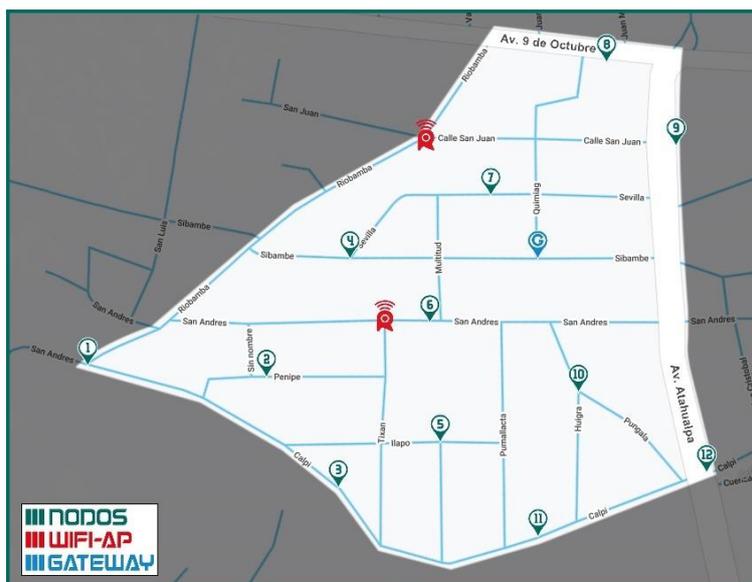
Nodo	Coordenadas	SF	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción de Cobertura
G-07	-1,6633803, -78,6501818			16 m de altura	Gateway Barrio La Didonato
AP-18	-1,6633599, -78,649864		-116	58 metros	Wifi Barrio La Didonato
N-01	-1,6640913, -78,6538166	9	-120	450 metros	Almacenes Comerciales
N-02	-1,6627135, -78,6526754	7	-119	300 metros	Semáforos
N-03	-1,661734, -78,6531151	9	-119	375 metros	U.E. José María Román
N-04	-1,6622022, -78,6520082	7	-118	238 metros	Domicilios, Velocímetro
N-05	-1,6636916, -78,6523547	7	-118	253 metros	Coop. Nueva Esperanza
N-06	-1,6646623, -78,6521616	7	-118	292 metros	Domicilios
N-07	-1,6634907, -78,651356	7	-117	114 metros	Domicilios
N-08	-1,6668052, -78,6510602	9	-119	390 metros	Domicilios
N-09	-1,664472, -78,6516966	7	-117	169 metros	Condominios, Cl. Dental
N-10	-1,6632186, -78,6500367	7	-116	40 metros	U.E. Combatientes de Tapi
N-11	-1,6638969, -78,6499123	7	-117	126 metros	Almacenes Comerciales
N-12	-1,6652932, -78,6492599	7	-118	267 metros	Gasolinera, M. Dávalos

Realizado por: Trujillo, 2022

#### 4.1.3.4. Barrio La Primavera

En el Barrio La Primavera de igual manera se establecieron 12 ubicaciones con buena recepción de señal (Figura 7-4), este es un barrio netamente residencial, con casas que no cuentan con una gran altitud además de que el barrio se encuentra en un terreno inclinado lo que facilita de alguna manera que las señales transmitidas no tengan muchos obstáculos, estas ubicaciones cubren domicilios, un hospital, una unidad educativa, paradas de buses, entre otros (Tabla 6-4).

Se cuenta con un Gateway ubicado en las calles Quimiag y Sibambe en la terraza de una casa de dos pisos perteneciente a la Familia Vizcarra, en este sector se tiene dos Access Points de la Red Wifi de la ciudad el primero ubicado a 136 metros y otro a 141 metros de nuestro Gateway.



**Figura 7-4.** Ubicación de Equipos, Barrio La Primavera

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 6-4:** Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Barrio La Primavera

Nodo	Coordenadas	SF	RSSI	Distancia	Descripción de Cobertura
G-08	-1,6771031, -78,6612337			15 m de altura	Gateway B. La Primavera
AP-19	-1,6760327, -78,661444		-117	136 metros	Wifi B. La Primavera
AP-20	-1,6765433, -78,6620224		-117	141 metros	Wifi B. La Primavera
N-01	-1,6759413, -78,6633321	9	-119	382 metros	Domicilios
N-02	-1,6765116, -78,6634113	7	-118	250 metros	Domicilios
N-03	-1,6771027, -78,6636147	7	-118	262 metros	Sub Centro de Salud
N-04	-1,6762418, -78,6625437	7	-117	139 metros	Domicilios
N-05	-1,6776164, -78,6626329	7	-117	173 metros	U.E. La Primavera
N-06	-1,6776164, -78,6626329	7	-117	116 metros	U. Policía Comunitaria
N-07	-1,6766927, -78,6604242	7	-116	75 metros	Domicilios
N-08	-1,6766927, -78,6604242	7	-118	207 metros	Parada de Bus, Semáforos
N-09	-1,6766927, -78,6604242	7	-117	175 metros	Parada de Bus
N-10	-1,6779734, -78,6615948	7	-117	134 metros	Iglesia La Primavera
N-11	-1,6784702, -78,6621842	7	-118	240 metros	Domicilios
N-12	-1,6784702, -78,6621842	7	-118	243 metros	Parada de Bus, Semáforos

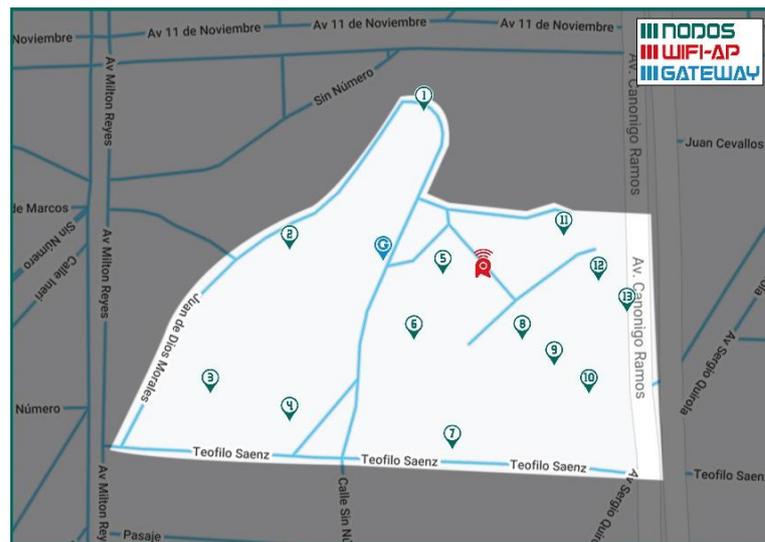
Realizado por: Trujillo, 2022

#### 4.1.4. Sector de esparcimiento

##### 4.1.4.1. Parque Sesquicentenario

El Parque Sesquicentenario es uno de los parques más concurridos por la juventud riobambeña por eso se han establecido 13 de las ubicaciones más estratégicas, cubriendo casi todos los atractivos del parque (Tabla 7-4) como canchas, pistas, ingresos, parqueaderos, etc. Hay que tener en cuenta que, al ser un parque, este no tiene obstáculos de gran magnitud a diferencia de los sectores que contaban con edificios como obstáculos, lo que facilita la transmisión de datos casi sin pérdidas en estos sectores.

El Gateway (Figura 8-4) fue ubicado en el inicio de la meta de la pista de BMX ya que se consideró uno de los puntos más altos dentro del parque, por último, el Access Points de la Red Wifi se encuentra ubicado a 76 metros de nuestro Gateway.



**Figura 8-4.** Ubicación de Equipos, Parque Sesquicentenario

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 7-4:** Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Parque Sesquicentenario

Nodo	Coordenadas	SF	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción de Cobertura
G-09	-1.657931, -78.670625			6 m de altura	Gateway Parque Sesquicentenario
AP-21	-1.657513, -78.670267			76 metros	Wifi Parque Sesquicentenario
N-01	-1.657186, -78.671078	7	-116	94 metros	Límites del parque

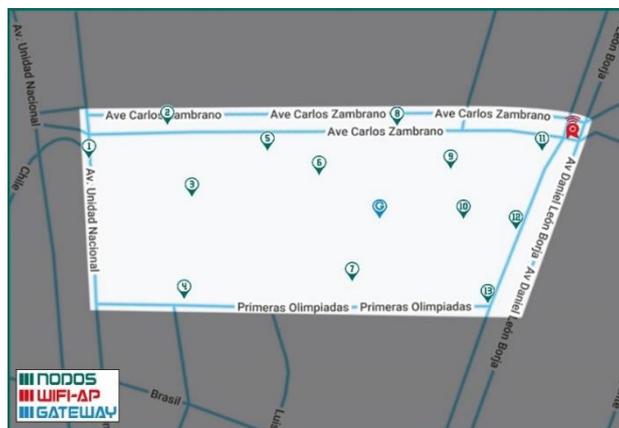
N-02	-1.658333, -78.671004	7	-116	53 metros	Pista de BMX
N-03	-1.659052, -78.670724	7	-117	131 metros	Pista de BMX
N-04	-1.658870, -78.670434	7	-117	124 metros	Pista de BMX
N-05	-1.657653, -78.670396	7	-115	32 metros	Cancha de Futbol
N-06	-1.657932, -78.670149	7	-116	63 metros	Pista Atlética
N-07	-1.658293, -78.669560	7	-117	152 metros	Parqueadero
N-08	-1.657719, -78.669642	7	-116	108 metros	Cancha de Basketball
N-09	-1.657714, -78.669438	7	-117	131 metros	Cancha de Basketball
N-10	-1.657703, -78.669288	7	-117	153 metros	Cancha de Basketball
N-11	-1.657153, -78.670184	7	-116	102 metros	Cancha de Futbol
N-12	-1.657142, -78.669672	7	-117	140 metros	Cancha de Futbol
N-13	-1.657158, -78.669460	7	-117	154 metros	Cancha de Indor

Realizado por: Trujillo, 2022

#### 4.1.4.2. Parque Guayaquil

Se puede decir que el Parque Guayaquil es uno de los más representativos para la ciudadanía riobambeña ya que aquí se alberga diferentes espectáculos musicales y deportivos, celebraciones de fechas tradicionales como el carnaval o las fiestas de la ciudad, por esto se ha obtenido 13 ubicaciones (Figura 9-4) con una buena calidad de recepción de señal, las mismas que cubren la mayoría de atracciones dentro del parque como juegos, canchas, la laguna, parqueaderos, paradas de buses, entre otras (Tabla 8-4).

El Gateway fue ubicado en la concha acústica del parque, un lugar ubicado en el centro del parque, el cual nos permite brindar cobertura a todos los nodos, en este sector el Access Point de la Red Wifi se encuentra ubicado a 115 metros de nuestro Gateway.



**Figura 9-4.** Ubicación de Equipos, Parque Guayaquil

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 8-4:** Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Parque Guayaquil

Nodo	Coordenadas	SF	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción de Cobertura
G-10	-1,6665667, -78,6588729			6 m de altura	Gateway Parque Guayaquil
AP-22	-1,6661506, -78,6590312			115 metros	Wifi Parque Guayaquil
N-01	-1,6674415, -78,6593173	7	-117	179 metros	Parada de Bus
N-02	-1,6674415, -78,6593173	7	-117	152 metros	Parqueadero
N-03	-1,667239, -78,6591476	7	-116	118 metros	Laguna
N-04	-1,6671105, -78,6589796	7	-116	117 metros	Juegos Infantiles
N-05	-1,6669526, -78,6591452	7	-116	80 metros	Zona Verde
N-06	-1,6665605, -78,6591101	7	-115	36 metros	Canchas de Indor
N-07	-1,6666263, -78,6586352	7	-115	48 metros	Zona Verde
N-08	-1,6662377, -78,6591355	7	-115	45 metros	Parqueadero
N-09	-1,6660905, -78,6588638	7	-115	37 metros	Zona Verde
N-10	-1,665963, -78,6586046	7	-116	50 metros	Explanada Concha Acústica
N-11	-1,6657134, -78,6586915	7	-115	84 metros	Monumento Daniel León B.
N-12	-1,6657336, -78,6583692	7	-117	90 metros	Parqueadero
N-13	-1,6660857, -78,6581401	7	-117	101 metros	Entrada Almacenes TIA

Realizado por: Trujillo, 2022

#### 4.1.4.3. Parque Ecológico

Por último, tenemos al Parque Ecológico, un parque ubicado al sur de la ciudad y en el que las familias van a pasar un momento de tranquilidad en las extensas áreas verdes con las que cuenta, se ha decidido obtener dos ubicaciones (Figura 10-4) para colocar nuestro Gateway, la primera ubicación se encuentra en el ingreso al parque, a este punto se lo considera el punto más alto en este sector y se encuentra cercano a los dos Access Points de la Red Local Wifi ubicados en este parque, el inconveniente que presenta es que se encuentra lejos de los nodos generando un poco más de pérdidas.

Por lo expuesto anteriormente se decidió mover el Gateway a una segunda ubicación, esta vez dentro del parque en una montaña desde la cual se tiene una vista panorámica del mismo, de esta manera se logró brindar cobertura a los 10 nodos que se han colocado en el parque, dichos nodos cubren canchas, juegos, áreas verdes, entre otros (Tabla 9-4).



**Figura 10-4.** Ubicación de Equipos, Parque Ecológico

Realizado por: Trujillo, 2022

**Tabla 9-4:** Ubicaciones sugeridas para Nodos en el Parque Ecológico

Nodo	Coordenadas	SF	RSSI (dBm)	Distancia	Descripción de Cobertura
G-11				1.5 m de altura	Gateway P. Ecológico
G-12	-1,6851354, -78,75312			30 m de altura	Gateway P. Ecológico
AP-23	-1,6881176, -78,64896		-118	200 metros	Wifi Parque Ecológico
AP-24	-1,6881176, -78,64896		-116	95 metros	Wifi Parque Ecológico
N-01	-1,6883034, -78,6503307	7	-118	275 metros	Parqueadero
N-02	-1,6883034, -78,6503307	7	-117	190 metros	Ingreso al Parque
N-03	-1,6885005, -78,6528122	9	-120	424 metros	Área Verde
N-04	-1,6889422, -78,6524126	7	-119	307 metros	Juegos Infantiles
N-05	-1,6895365, -78,6508446	7	-117	144 metros	Canchas
N-06	-1,6896154, -78,6502603	7	-117	179 metros	Laguna
N-07	-1,6900221, -78,6496111	9	-119	341 metros	Pileta, Monumentos
N-08	-1,6899443, -78,6493575	7	-118	264 metros	Área Verde
N-09	-1,6916816, -78,64915	9	-119	365 metros	Área Verde
N-10	-1,6906305, -78,6485183	9	-120	428 metros	Área Verde

Realizado por: Trujillo, 2022

## 4.2. Viabilidad

Se toma en consideración para el análisis de viabilidad, dos factores importantes, la parte técnica del proyecto, en la que se ha precisado todos los medios y recursos tecnológicos que intervienen para una adecuada y exacta implementación de futuros proyectos con el fin de convertir a la

Ciudad de Riobamba en una Smart City y por otro lado la parte económica, detalle esencial para lograr tener en claro cuánto costaría en términos generales implementar una red como la que se ha propuesto en este trabajo de investigación.

#### ***4.2.1. Viabilidad técnica***

La propuesta del proyecto (Figura 5-3), se compone de una infraestructura de gran escalabilidad, adaptable al constante crecimiento de la Ciudad de Riobamba, es decir, se pueden aumentar cualquier cantidad de dispositivos a la red sin ningún inconveniente, ya sean nodos o Gateways, dispone de hardware y software de programación libre, con tendencias tecnológicas, haciendo factible la creación de cualquier prototipo que disponga de las características para satisfacer ciertas necesidades de los habitantes.

De esta manera se posibilita la elaboración e implementación de redes de sensores inalámbricos en la ciudad que permitan capturar y monitorear los diferentes datos o parámetros que la ciudad otorga a diario, parámetros de monitoreos meteorológicos, monitoreo de suelos, monitoreo hidrológico, monitoreo acústico, monitoreo estadístico, etc., las posibilidades al establecer una Red Inalámbrica LoRa en la Ciudad de Riobamba son infinitas, ya que la tecnología, los dispositivos y los costos que abarcan la creación de estas redes son parte de lo mejor que puede haber en el mercado con relación al beneficio que supondría para la ciudad y sus habitantes.

En el apartado 2.1.2 se ha mencionado algunas de las aplicaciones que ya se encuentran en marcha alrededor del mundo como solución a varias problemáticas existentes, pero es importante mencionar que, en 2016, Samsung hizo público su acuerdo con la empresa SK Telecom para lanzar al mercado la primera red comercial en el mundo para "Smart Cities", del tipo LoRaWAN.

La implantación de este tipo de red comenzó en la ciudad de Daegu en Corea del Sur y se extendió a lo largo del todo el país con la idea de crear una red nacional que posibilite la conexión de los diferentes dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) en la banda de los 900 MHz.

La red LoRa es una red de comunicaciones inalámbrica especialmente diseñada para el IoT, tiene como objeto enviar pocas cantidades de datos en la banda antes mencionada a través de pequeños dispositivos IoT de manera bidireccional, dando muy alta cobertura (2 – 5 km en entorno urbano), estas pequeñas cantidades de datos se transmiten a muy bajas velocidades (por debajo de 5 Kbps) aunque puede trabajar entre 0.3 kbps y 50 kbps, a su vez, da lugar a un menor consumo de energía y por tanto, da un mayor tiempo de vida a las baterías (autonomía de 10 años con dos pilas AAA

aprox.), la idea principal de utilizar el protocolo LoRaWAN es ir en busca de eficiencia, mas no de la velocidad.

“LoRa Alliance” es una organización sin ánimo de lucro que tiene como objetivo extender la red LoRaWAN a lo largo del mundo y es quien certifica a todo fabricante de hardware que desee trabajar con esta tecnología, con este tipo de redes se emplea la técnica Listen Before Talk, (LBT) mediante la cual los dispositivos pueden analizar la red y buscar los canales de frecuencia menos saturados.

Hoy en día existen redes LoRa abiertas al usuario final de IoT en Francia, Bélgica, Suiza, Países Bajos y Sudáfrica y se encuentran en plena expansión gracias a grandes operadores de telecomunicaciones, como Orange o Bouygues Telecom en el caso de Francia.

Con la red LoRaWAN, ciudades o países enteros pueden ser cubiertos con algunas estaciones base, ya que no requiere de un gran despliegue ni del mantenimiento de miles de nodos, lo que supone una mínima inversión en la infraestructura

El desarrollo de esta infraestructura está pensado no sólo para soluciones de eficiencia energética mediante energías renovables, sino también para soportar plataformas en la nube, análisis de salud y servicios médicos mediante el uso de Big Data.

Por lo mencionado anteriormente se considera viable la implementación de este estudio y de esta tecnología para futuras implementaciones dentro de la Ciudad de Riobamba que la lleven a ser una Smart City

#### ***4.2.2. Viabilidad económica***

Al ser un proyecto experimental y académico, fue necesario el uso de herramientas y equipos que tengan a su disposición versiones de experimentación académico que no involucren gastos de licenciamiento para su uso, del mismo modo, se utilizó tecnología de programación libre, disponible en el mercado local y de bajo costo que no involucren mayor inversión, considerando así una viabilidad económica asequible para su desarrollo.

A continuación, se detallan los costos que tendría la implementación de la Red LoRa propuesta en este trabajo de investigación:

**Tabla 10-4:** Costos de Implementación de la red propuesta.

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Total</b>
11	Gateway LoRa/LoRaWAN LG308	250 \$	2 750 \$
11	Antena de fibra de vidrio (915 MHz)	80 \$	880 \$
113	Nodos - Sensores	25 \$	2 825 \$
24	Access Point - WiFi (ya existentes)	0 \$	0 \$
1	Servicios de Internet (ya existentes)	0 \$	0 \$
1	Infraestructura	1 500 \$	1 500 \$
1	Ingeniería	4 000 \$	4 000 \$
			<b>11 955 \$</b>

Realizado por: Trujillo, 2022

En la Tabla 10-4 se puede apreciar el costo de cada uno de los equipos mínimos necesarios para una correcta implementación de la red propuesta, estos dispositivos son equipos de alta gama los cuales brindan mejores prestaciones a la hora de realizar la recolección y transmisión de datos a través de la red, el presupuesto estimado se encuentra alrededor de los 12 000\$ dólares, teniendo en cuenta la relación costo/beneficio, se considera un proyecto viable a tener en cuenta por parte de las autoridades de la Ciudad de Riobamba y contribuir al desarrollo sustentable de la misma.

**Tabla 11-4:** Costos del desarrollo de la presente investigación.

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Total</b>
1	Gateway LoRa/LoRaWAN ESP32	45 \$	45 \$
1	Antena (915 MHz) - Ganancia 2 dBi	10 \$	10 \$
1	Nodos LoRa/LoRaWAN ESP32	45 \$	45 \$
1	PC-HP Pavilion	1 800 \$	1 800 \$
1	Software de Simulación	40\$	40\$
1	Servicios de Internet (LTE)	20 \$	20 \$
2	Baterías de Litio Recargables	10 \$	20 \$
			<b>1 980 \$</b>

Realizado por: Trujillo, 2022

Por último, en la Tabla 11-4 se presenta el presupuesto utilizado en el desarrollo de esta investigación, el mismo que bordea los 2 000\$ dólares.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

El presente trabajo, basándose en los principios de LPWAN y de ciudades inteligentes ha logrado demostrar que la tecnología LoRa y su protocolo LoRaWAN son útiles para implementar redes de sensores inalámbricos en la ciudad de Riobamba, concretamente en los cuatro sectores de estudio definidos, el Sector Industrial, Comercial, Residencial y de Esparcimiento ya que son sectores considerados de los más importantes dentro de la urbe Riobambeña, llegando a cubrir alrededor de 200 hectáreas dentro de la ciudad, pues con los equipos adquiridos se obtuvo en cada sector de estudio niveles óptimos de potencia de transmisión, los mismos que están entre los -117 dBm y -125 dBm y diferentes Spreading Factors (7, 9, 10 y 12), estos valores son considerados óptimos en una transmisión LoRa, cabe mencionar que según estos datos, cada 100 metros se obtenía un incremento en la pérdida de señal de -1dBm, con esto se establecieron 113 ubicaciones para los sensores de la red, las distancias desde estos nodos hacia su respectivo Gateway bordean los 50m y 900m, además se obtuvo 11 ubicaciones para Gateways LoRa y se determinó la existencia de 24 Access Points WiFi de la red local con la que cuenta la Ciudad de Riobamba en estos sectores, con esto se llegó a cubrir alrededor de 200 hectáreas en donde podemos encontrar unidades educativas, hospitales, comerciales, mercados, parques, plazas, edificaciones gubernamentales, parqueos, paradas de buses, etc.

Riobamba es la primer ciudad en ser planificada en su construcción, debido a esto la ciudad está ubicada en una llanura, en un terreno totalmente plano y todas sus calles son gran longitud, siempre en sentido Norte-Sur y Este-Oeste, esto hace que las edificaciones no interfieran en la transmisión ya que los dispositivos pueden llegar a tener una línea de vista directa entre ellos al enviar o recibir datos de información, cabe recalcar que en este estudio se ha determinado que un Gateway es capaz de cubrir alrededor de 3Km en la ciudad pero presentando ya problemas en los niveles de potencia en la recepción llegando casi ya a los -140 dBm, por esta razón se ha decidido implementar para cada sector un Gateway distinto y de esta manera brindar una muy buena cobertura de la zona.

## **RECOMENDACIONES**

El implementar un proceso de pruebas y un entorno en condiciones aptas permite que la calidad de los resultados obtenidos en un entorno productivo sea elevada, constituyendo un avance significativo a la investigación de redes inalámbricas de IoT sobre protocolo LoRA y el porcentaje de error pueda ser reducido a su mínima expresión.

Los resultados obtenidos durante la primera fase demuestran que al tener edificaciones de la misma altura o incluso unos poco más altos la cobertura es mucho más baja y consigue menos alcance, se pueden mejorar los resultados obtenidos situando la antena a una mayor altura o situándola fuera del edificio ya que las paredes, cristales y demás obstáculos reducen notablemente la cobertura.

Al hacer un paralelo entre los datos arrojados en la simulación de los tres entornos, podemos evidenciar un aumento en la distancia de cobertura según la cantidad de obstáculos entre el receptor y el transmisor; adicionalmente esto nos proporciona un punto de comparación con algunas características ideales, al hacer un análisis y comparación de los resultados obtenidos en campo contra los resultados arrojados por la simulación, se podía esperar una variación en la cobertura de la señal debido a que en la simulación no se tienen en cuenta factores como vehículos y personas que pueden llegar a debilitar la señal.

## **BIBLIOGRAFIA**

**ANTHOPOULOS, L.** *Defining Smart City Architecture for Sustainability*, vol. 22. California, USA: Electronic Government and Electronic Participation, 2016. pp. 140-147.

**BEHRTECH, R.** *LoRa, NB-IoT, Sigfox*. New York, USA: Lpwan Mythings, 2020. pp. 5-175.

**BEUTEL, K.** *Power Utility Remote Device Communications using a Low Power Wide Area Network (LPWAN) Based on the LoRA Communications Standard*. Victoria, Canada: Barker&Jules, 2016. pp. 5-168.

**DA PAZ, E.** *LoRa-LoRaWAN, uma solução*. Sao Paulo, Brazil: Planeta, 2019. pp. 3-166.

**DIARIO SUSTENTABLE.** *Smart City*. Madrid, España: Proyectos, 2017. pp. 2-162.

**FUNDACIÓN TELEFÓNICA.** *Smart Cities: El gran paso hacia el internet de las cosas*. Madrid, España: Fundación Telefónica, 2011. pp. 1-114.

**GADMRIOBAMBA.** *Historia, Primicias de Riobamba*. Riobamba, Ecuador: Editorial Pedagógica Freire, 2012. pp. 1-46.

**GEMALTO, H.** *LoRaWAN Security, full end-to-end encryption for IoT application providers*. California, USA: Lora-Alliance, 2017. pp. 1-145.

**HARRISON, C.** *Foundations for Smarter Cities*. vol. 54. New York, USA: IBM Journal of Research and Development, 2016. pp. 1-161.

**HEWITSON, E.** *¿What is the difference between LoRa and LoRaWAN?*. New York, USA: Wyld Networks, 2020. pp. 3-128.

**INEC.** *Censo Nacional 2010 – Ecuador en cifras*. Quito, Ecuador: INEC, 2010. pp. 1-191.

**LIE, W.** *Low Power Area Network Analysis: ¿Can LoRa Scale?*. Vol.12. New York, USA: IEEE Wireless Communications Letters, 2019. pp. 3-203.

**LORA ALLIANCE.** *A technical overview of LoRa and LoRaWAN.* California, USA: LoRa Alliance Technical committee, 2019. pp. 2-142.

**MEKKI, K.** *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment.* Vandoeuvre, France: ICT Express, 2017. pp. 2-196.

**MICHASLKI, T.** *Explaining LoRa and LoRaWAN.* New York, USA: Ubidots, 2020. pp. 1-157.

**MITCHELL, W.** *Ciudades Inteligentes.* Cauca, Colombia: Revista sobre la sociedad del conocimiento, 2017. pp. 3-111.

**MOYA, J.** *LoRa en entornos urbanos.* Valencia, España: Jungi, 2018. pp. 1-112.

**NOLAN, M.** *An Evaluation Of Low Power Wide Area Network Technologies For The Internet Of Things.* Paphos, Chipre: Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2019. pp. 3-125.

**ONU.** *Sustainable Development Goals (SDGs).* New York, USA: UN Sustainable Development Summit, 2015. pp. 2-121.

**RUANO, R.** *Avaluació de LoRa/LoRaWAN per a escenaris de smart city.* Catalunya, España: Oceà, 2020. pp. 1-189.

**SALAZAR, J.** *Redes Inalámbricas.* Bogotá, Colombia: Erasmus, 2018. pp. 3-140.

**SEMTECH CORPORATION.** *What is LoRa Radio Network, IoT Technology, Examples.* California, USA: Developer portal - Semtech Corporation, 2019. pp. 1-146.

**SOHRAVY, U.** *A Study of LoRa: Long Range & Low-Power Networks for the Internet of Things.* vol. 16. California, USA: Sensors, pp. 5-198.

**SORNIN, N.** *LoRaWAN Specifications 1.0.2.* Austin, USA: Austin Editorial, 2019. pp. 1-132.

**TTNETWORKS.** *Security, Addressing & Activation.* New York, USA: The Things Network, 2020. pp. 3-184.

**VARELA, L.** *Protocolo de análisis GPS y Arduino.* Guayaquil, Ecuador: Santillana, 2018. pp. 3-130.

## ANEXO A: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN – ESP32

### EQUIPO TRANSMISOR

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <U8g2lib.h>
#define OFF 0
#define ON 1
const int blueLED = LED_BUILTIN;
int counter = 0;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);
  Serial.println("LoRa Sender");
  Display.begin();
  Display.enableUTF8Print();
  Display.setFont(u8g2_font_ncenB10_tr);
  SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS);
  LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ);
  pinMode(blueLED, OUTPUT);
  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
  LoRa.setSpreadingFactor(12);
  LoRa.setTxPower(20, PA_OUTPUT_RFO_PIN);
}
void loop() {
  Serial.print("Sending packet: ");
  Serial.println(counter);
  digitalWrite(blueLED, ON);
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print("FIE Trama #");
  LoRa.print(counter);
  LoRa.endPacket();
  digitalWrite(blueLED, OFF);
}
```

```

Display.clearBuffer();
Display.setCursor(0,12); Display.print("  RIOBAMBA");
Display.setCursor(0,26); Display.print("  TX LoRa");
Display.setCursor(0,42); Display.print("Transmitiendo");
Display.setCursor(0,58); Display.print("Trama #" + (String)counter);
Display.sendBuffer();
counter++;
delay(5000);
}

```

## **EQUIPO RECEPTOR**

```

#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <U8g2lib.h>
const int blueLED = LED_BUILTIN;
String rssi = "";
String packet = "";
void setup() {
Serial.begin(115200);
WiFi.begin(ssid, password);
Serial.print("Conectando");
while (WiFi.status() !=WL_CONNECTED){
Serial.print(".");
delay(500);
}
Serial.println("\nConectado");
Serial.print("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
while (!Serial);
Serial.println("LoRa Receiver");
Display.begin();
Display.enableUTF8Print();
Display.setFont(u8g2_font_ncenB10_tr);
SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS);
LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ);
pinMode(blueLED, OUTPUT); // For LED feedback

```

```

if (!LoRa.begin(915E6)) {
Serial.println("Starting LoRa failed!");
while (1);
}
LoRa.setSpreadingFactor(12);
}
void loop() {
int packetSize = LoRa.parsePacket();
if (packetSize) {
Serial.print("Received packet ");
digitalWrite(blueLED, ON);
packet = "";
while (LoRa.available()) {
packet += (char)LoRa.read(); // Assemble new packet
}
rssi = LoRa.packetRssi();
Display.clearBuffer();
Display.setCursor(0,12); Display.print("  RIOBAMBA");
Display.setCursor(0,26); Display.print("  RX LoRa");
Display.setCursor(0,42); Display.print(""" + packet +""");
Display.setCursor(0,58); Display.print("RSSI " + rssi);
Display.sendBuffer();
digitalWrite(blueLED, OFF);
Serial.println(packet + " with RSSI " + rssi);
}
}

```



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL  
APRENDIZAJE**



**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS**  
**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 20 / 10 / 2022

<b>INFORMACIÓN DE LOS AUTORES</b>	
<b>Nombres – Apellidos:</b> Israel Andrés Trujillo Burbano	
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>	
<b>Facultad:</b> INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA	
<b>Carrera:</b> INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES.	
<b>Título a optar:</b> INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES.	
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b>	Ing. Fernanda Arévalo M.

