

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Tesis de Grado Maestría Internet de la Cosas y Control.
2. **TÍTULO:** Desarrollo de un Gateway LoRaWAN para conectividad IoT en la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá.
3. **AUTOR (ES):** Daniel Fernando Castañeda Jácome
4. **LUGAR:** Bogotá D.C., Colombia
5. **FECHA:** 09 agosto 2022
6. **PALABRAS CLAVES:** Internet de las Cosas, LoRa, LoRaWAN, Cobertura de red
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** En respuesta al crecimiento del Internet de las Cosas (IoT) y la necesidad de conectividad requerida por este campo, en el presente proyecto se desarrolla e implementa un Gateway LoRa/LoRaWAN, para el campus de la Universidad de San Buenaventura. Actualmente la Facultad de Ingeniería impulsa desde sus programas de formación la investigación en el IoT. Sin embargo, carece de infraestructuras de redes que permitan la interconectividad de dispositivos LoRa dentro del campus.
8. **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Línea de Investigación de la USB: Tecnologías actuales y Sociedad. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Sistemas de información y comunicación. Campo Temático del Programa: Internet de la Cosas y Control.
9. **METODOLOGÍA:** El presente proyecto se ajusta a un enfoque de investigación aplicada. Se desarrolla dentro del contexto de los conocimientos registrados en investigaciones previas de la tecnología LoRa/LoRaWAN, dentro del contexto del Internet de las Cosas (IoT), que conduce al desarrollo de un Gateway LoRa/LoRaWAN para la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá.
10. **CONCLUSIONES:** A partir del modelamiento matemático se realizó la simulación del radio enlace de tecnología LoRa/LoRaWAN para complementar el dimensionamiento teórico de la cobertura una red de este tipo. Para el análisis empírico se desarrollaron un Gateway que incorpora chip Semtech SX1308, un nodo que usa el integrado SX1276/SX1278 y antenas TX915-JKS-20. Con estos equipos se realizaron las mediciones en ubicaciones definidas dentro del perímetro de la Universidad, con las cuales se tuvieron los datos necesarios para realizar el estudio de cobertura de la red LoRa, dentro del campus universitario.

Desarrollo de un Gateway LoRaWAN para conectividad IoT en la Universidad de San
Buenaventura, sede Bogotá

Daniel Fernando Castañeda Jácome, ✉ dfcastaneda@academia.usbbog.edu.co

Tesis de Maestría presentada para optar al título de Magíster en Internet de las cosas y control

Asesores: Marcelo Herrera Martínez, Doctor (PhD) en Tecnología de la Información y
Comunicaciones.

Camilo Andrés Mendivelso Fajardo (MG) Ingeniería Electrónica.



Universidad de San Buenaventura
Facultad de Ingeniería
Maestría en Internet de las cosas y control
Bogotá D.C., Colombia
2021

Citar/How to cite	[1]
Referencia/Reference	[1] D. Castañeda, “Desarrollo de un Gateway LoRaWAN para conectividad IoT en la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá”, Tesis Maestría en Internet de las Cosas y Control, Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería, Bogotá, 2021.
Estilo/Style: IEEE (2014)	



Maestría en Internet de las Cosas y Control. Cohorte I.

Bibliotecas Universidad de San Buenaventura



Biblioteca Digital (Repositorio)
<http://bibliotecadigital.usb.edu.co>

- Biblioteca Fray Alberto Montealegre OFM - Bogotá.
- Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo OFM - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.
- Departamento de Biblioteca - Cali.
- Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

Universidad de San Buenaventura Colombia

Universidad de San Buenaventura Colombia - <http://www.usb.edu.co/>

Bogotá - <http://www.usbbog.edu.co>

Medellín - <http://www.usbmed.edu.co>

Cali - <http://www.usbcali.edu.co>

Cartagena - <http://www.usbctg.edu.co>

Editorial Bonaventuriana - <http://www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co/>

Revistas - <http://revistas.usb.edu.co/>

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico a Dios y a mi familia de sangre y de rutas, a todos ellos agradezco su apoyo para ser mejor cada día, porque sin su amor y cariño nada de esto sería posible.

A mi mamá por su dedicación paciencia y tenacidad para luchar por los objetivos.

A mi papá por sus consejos y discusiones.

A mi hermano por su amistad mi confianza.

A mi tía Nere por siempre saber cuándo tender una mano.

A Yully Alexandra, por tú amor y paciencia, por ser mi motor y mi freno cuando se necesita.

A la familia Hordas HFFH.

Este es el resultado de tanto tiempo distante de todos ustedes agradezco la paciencia y su apoyo en los momentos de estrés y dudas.

Agradecimientos

Especial agradecimiento a los ingenieros que construyeron y mostraron el horizonte de este proyecto en los momentos más difíciles.

Ingeniero Wilder Eduardo Castellanos, gracias por sus enseñanzas apoyo e ideas para la construcción de este trabajo, espero sea de su agrado. Hice mi mayor esfuerzo para desarrollar la labor que me encargo.

Ingeniero Camilo André Mendivelso gracias por hacer parte de este proceso y brindarme su experiencia y conocimiento en los momentos precisos.

Ingeniero Christian Camilo Rodríguez, agradezco su amistad y brindarme su mano, porque gracias a ella siempre pude tener a un hermano impulsando este proyecto cuando toco navegar por aguas desconocidas.

Mi total admiración y agradecimiento a estos ingenieros tres ingenieros con quienes pude cimentar este proyecto.

CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	13
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
A. Antecedentes	16
III. JUSTIFICACIÓN.....	19
IV. OBJETIVOS	21
A. Objetivo general	21
B. Objetivos específicos.....	21
V. METODOLOGÍA	21
ALCANCES Y LIMITACIONES	24
VI. MARCO TEÓRICO.....	26
RESULTADOS.....	33
Cálculos Matemáticos y Simulación.....	34
Diseño Del Experimento	39
ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
CONCLUSIONES	45
ANEXOS.....	Error! Bookmark not defined.
Anexo 1. Toma de datos empíricos.....	Error! Bookmark not defined.
Anexo 2. Tablas de cálculos Matemáticos.....	Error! Bookmark not defined.
Anexo 3. Prueba de envío de datos desde un sensor.....	Error! Bookmark not defined.
Anexo 4. Servidor Chirp Stack.....	Error! Bookmark not defined.
Anexo 5. Data Sheets de los equipos utilizados.....	Error! Bookmark not defined.
ANTENA [49].....	Error! Bookmark not defined.

TX915-JKS-20	Error! Bookmark not defined.
MECHANICAL DRAWING	Error! Bookmark not defined.
EFFICIENCY/GAIN TEST	Error! Bookmark not defined.
RADIATION PATTERN	Error! Bookmark not defined.
DISCLAIMER	Error! Bookmark not defined.
CONTACT US	Error! Bookmark not defined.
NODO [48]	Error! Bookmark not defined.
GATEWAY [72]	Error! Bookmark not defined.
Overview	Error! Bookmark not defined.
Description	Error! Bookmark not defined.
Features	Error! Bookmark not defined.
Specifications	Error! Bookmark not defined.
Overview	Error! Bookmark not defined.
Board Overview Module Overview	Error! Bookmark not defined.
Board Dimensions	Error! Bookmark not defined.
Block Diagram	Error! Bookmark not defined.
Hardware	Error! Bookmark not defined.
Interfaces	Error! Bookmark not defined.
Pin Definition	Error! Bookmark not defined.
Main Specifications	Error! Bookmark not defined.
RF Characteristics	Error! Bookmark not defined.
Software	Error! Bookmark not defined.
Firmware	Error! Bookmark not defined.
Software Specifications	Error! Bookmark not defined.
LoRaWAN Systems, Network Approach	Error! Bookmark not defined.

Models / Bundles.....**Error! Bookmark not defined.**

REFERENCIAS47

LISTA DE TABLAS

Tabla I Comparativo tecnologías LPWAN [32]28

Tabla II Características Comunicación LoRa/LoRaWAN32

Tabla III Presupuesto de Enlace37

Tabla IV Resultados Simulación Radio Mobile.....38

Tabla V Comparativo Gateway41

Tabla VI Resultados prácticos.....42

Tabla VII Comparativo resultados44

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Número de dispositivos en Colombia desde 2018 a 2023. Fuente: [6].....	15
Fig. 2. Crecimiento tecnologías de IoT. Fuente: [3].....	20
Fig. 3. Fases del proyecto.....	24
Fig. 4. Campos de aplicación del IoT Fuente: [31]	26
Fig. 5. Comparación tecnologías inalámbricas usadas IoT Fuente: [4]	27
Fig. 6 Espectrograma Señal LoRa [35]	29
Fig. 7 Factor de dispersión [35]	29
Fig. 8. Diferencia entre LoRa y LoRaWAN Fuente: [19].....	30
Fig. 9 Representación RSSI [39].....	31
Fig. 10 Arquitectura y seguridad Lora [38].....	31
Fig. 11. Arquitectura redes LoRa/LoRaWAN, Fuente: [4].....	32
Fig. 12 Clases de Nodos Lora [38].....	33
Fig. 13 Proceso Metodológico	34
Fig. 14 Descripción Link Budget [41].....	35
Fig. 15 Distribución ubicaciones para análisis radial.....	36
Fig. 16 Mapa de calor cobertura de la red LoRa.....	39
Fig. 17 Acercamiento mapa de calor.....	39
Fig. 18 Gateway RAK 7246G	40
Fig. 19 Nodo Heltec ESP32 Wifi LoRaV2	41
Fig. 20 Instrumentos de Medición GPS y medidor de distancia.....	41
Fig. 21 Lectura Cancha Centro	Error! Bookmark not defined.
Fig. 22 Lectura Tronquitos.....	Error! Bookmark not defined.
Fig. 23 Lectura Costado Sur Lago	Error! Bookmark not defined.
Fig. 24 Lectura Costado Norte Bodega SG.....	Error! Bookmark not defined.
Fig. 25 Lectura Atrás de Lago.....	Error! Bookmark not defined.
Fig. 26 Lectura Laboratorios.....	Error! Bookmark not defined.
Fig. 27 Lectura Capilla.....	Error! Bookmark not defined.
Fig. 28 Carga de datos Sensor Temperatura	Error! Bookmark not defined.

Fig. 29 Nodo con sensor de Temperatura**Error! Bookmark not defined.**
Fig. 30 Instancia en AWS**Error! Bookmark not defined.**

RESUMEN

En respuesta al crecimiento del Internet de las Cosas (IoT) y la necesidad de conectividad requerida por este campo, en el presente proyecto se desarrolla e implementa un Gateway LoRa/LoRaWAN, para el campus de la Universidad de San Buenaventura. Actualmente la Facultad de Ingeniería impulsa desde sus programas de formación la investigación en el IoT. Sin embargo, carece de infraestructuras de redes que permitan la interconectividad de dispositivos LoRa dentro del campus.

Entre las tecnologías de interconexión aplicadas al Internet de las Cosas, LoRa/LoRaWAN es la de mayor crecimiento por permitir la cobertura de la señal en grandes áreas, ser de bajo consumo energético y contar con una arquitectura flexible y sencilla.

El presente proyecto implica el desarrollo de un Gateway LoRa/LoRaWAN lo cual involucra inicialmente el modelamiento matemático del enlace inalámbrico, la simulación con software especializado y finalmente la implementación y mediciones sobre el terreno con el fin de evaluar la cobertura lograda con el Gateway

Palabras clave: Internet de las Cosas, LoRa, LoRaWAN, Cobertura de red.

ABSTRACT

In response to the growth of the Internet of Things (IoT) and the need for connectivity required by this field, this project develops and implements a LoRa/LoRaWAN Gateway for the Campus of the University of San Buenaventura, currently, the training programs of the Faculty of Engineering promotes the research on IoT. However, it lacks network infrastructures that allow interconnectivity of LoRa devices on campus.

Among the interconnection technologies applied to the Internet of Things, LoRa/LoRaWAN is the fastest growing protocol because it allows signal coverage of large areas, has low energy consumption and a flexible and simple architecture.

This project involves the development of a LoRa/LoRaWAN Gateway which involves initially the mathematical modeling of the wireless link, the simulation with specialized software and finally measurements in the field to evaluate the coverage achieved with the Gateway.

Keywords: Internet of Things, LoRa, LoRaWAN, Network coverage.

I. INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento en interconectividad que se ha gestado en busca de mejorar la calidad de vida a través de la incorporación de la tecnología a todas las actividades humanas, aparece el concepto del Internet de las cosas (IoT, Internet of Things). De acuerdo con la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (ITU,), el IoT es “Una infraestructura global para la sociedad de la información, que permite servicios avanzados mediante la interconexión (física y virtual) de cosas basadas en tecnologías interoperables de la información y la comunicación existentes y en evolución” [1].

Desde este escenario la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, es reconocida como una institución que busca estar a la vanguardia en avances tecnológicos. Una muestra de esto, son proyectos como: PIICO, “Plataforma de Monitoreo IoT basado en LoRa para la supervisión de un sistema Fotovoltaico”, el semillero de investigación Convergencia Tecnológica; la participación en el 8° encuentro institucional y 7° distrital de semilleros de investigación. UNIMINUTO. 27-29 de agosto 2020,

Para ser competitivos en el ambiente globalizado es importante para la universidad contar con tecnología que permita la realización de investigaciones en IoT, ya que este es un momento de gran desarrollo tecnológico y es uno de los ecosistemas de mayor crecimiento, tal como se presenta en [2].

A nivel mundial las tecnologías para la interconexión de dispositivos, conocidas como LPWAN (Low Power Wide Area Network), se convierten en un factor importante para el desarrollo del IoT. En este sentido se estima que para el 2026 las redes LoRa/LoRaWAN representarán más de una cuarta parte del mercado de las tecnologías LPWAN y sería la solución utilizada para la conexión de 1.3 billones de dispositivos [3]. Sin embargo, en Colombia el despliegue de esta tecnología se ha desarrollado de forma privada, es decir, no hay un proveedor “público” de servicios de interconexión que utilice dicha tecnología. Esto, a pesar de las ventajas que tiene este protocolo para solventar el problema de conectividad en zonas remotas y de poca conectividad como las rurales. La implementación de redes LoRa/LoRaWAN ha sido escasa en la mayoría de las

universidades del país. Por tanto, esta es una propuesta pertinente y relevante para afianzar el desarrollo de este tipo de redes, en pro de los procesos de investigación y el desarrollo de soluciones IoT innovadoras, mediante la implementación de este tipo de tecnologías.

En este escenario, para la Universidad de San Buenaventura contar con conectividad LoRa/LoRaWAN es importante, no solo por ser uno de los protocolos de mayor crecimiento a nivel mundial, sino porque se convierte en una herramienta útil y necesaria en el proceso de formación y desarrollo de proyectos relacionados con el Internet de las Cosas.

Por esta razón, el presente proyecto, propone desarrollar un estudio sobre la implementación de un Gateway LoRaWAN, que permita proveer conectividad LoRa en el campus de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá.

Dentro del marco del proyecto se realiza un estudio matemático, que apoya la simulación realizada en software especializado, que permita analizar la cobertura que tendría un Gateway LoRaWAN, dentro del campus de la Universidad de San Buenaventura Sede Bogotá. Por otra parte, se implementará un Gateway físico integrando el software y hardware necesarios para brindar conectividad LoRaWAN.

Finalmente, se evaluará el alcance del Gateway utilizando un nodo IoT LoRa, cuya construcción también hace parte del proyecto, que permitirá tomar medidas de la calidad de la conexión en diferentes puntos del campus universitario.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el Internet de la Cosas (IoT, Internet of Things) plantea la interconexión de millones de dispositivos inteligentes a Internet [4]. Según el estudio de [5], se proyecta que en Colombia para el 2024 el número de dispositivos conectados a Internet crecerá de 53.3 millones en 2021 a 86.4 millones, ver Fig. 1. Estos dispositivos pueden ser sensores inalámbricos, electrodomésticos, sistemas de cómputo y en general cualquier objeto electrónico. Muchos de estos dispositivos estarán ubicados en sitios remotos donde no existe una red de comunicación. Esto plantea un reto muy importante ya que la mayoría de los dispositivos del IoT tienen limitaciones en términos de energía y capacidad de procesamiento. Una de las tecnologías inalámbricas más adecuadas para muchas aplicaciones del IoT es LoRa/LoRaWAN. Por la amplia cobertura y bajo consumo energético, simplicidad en su arquitectura y bajo costo de mantenimiento y servicio.

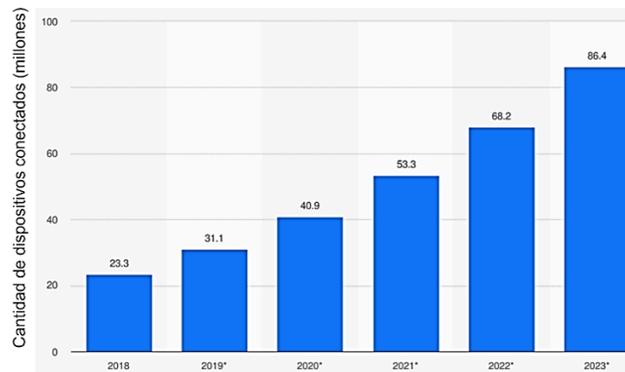


Fig. 1. Número de dispositivos en Colombia desde 2018 a 2023. Fuente: [6]

A nivel mundial el crecimiento de la tecnología LoRa/LoRaWAN se estima que para el 2026 representará más de una cuarta parte del mercado de las tecnologías LPWAN y sería la solución para la conexión de 1.3 billones de dispositivos [3]. Sin embargo, en Colombia el despliegue de esta tecnología se ha desarrollado de forma privada, no hay un proveedor “público” de dicha red, a pesar de que las bondades que tiene este protocolo ayudarían a solventar el problema de conectividad en las zonas rurales. La implementación de redes LoRa/LoRaWAN también ha sido

escasa en la mayoría de las universidades del país, las cuales tampoco tienen implementaciones de este tipo de redes, retrasando la investigación y el desarrollo de soluciones IoT innovadoras.

En este escenario de crecimiento para el Internet de las Cosas es indiscutible que para un centro educativo que busca el desarrollo e investigación en el campo del IoT no puede dejar de lado a la tecnología LoRa/LoRaWAN.

Por esto el presente proyecto, propone el análisis de cobertura de una red LoRa/LoRaWAN a partir de la implementación de un Gateway que permita la interconexión de dispositivos de esta tecnología, dentro del campus de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, en razón a que dentro de los programas de formación que se desarrollan dentro de la Facultad de Ingeniería se fomentan los proyectos que se vinculen al crecimiento del Internet de las Cosas. El despliegue de una red LoRaWAN como la propuesta en este proyecto, solucionaría el escenario de conectividad para las implementaciones que usen la tecnología de mayor crecimiento dentro del ecosistema IoT.

Esto conduce al cuestionamiento de ¿Cómo proveer un Gateway LoRa/LoRaWAN al campus de la universidad de San Buenaventura para nodos IoT?

A. Antecedentes

Las telecomunicaciones siempre han tenido el reto de lograr coberturas fiables y de calidad. Para conseguir esto se han diseñado sistemas que, al aplicar las leyes de Maxwell, crean el ambiente necesario para que exista comunicación con los dispositivos. Este proyecto inicia con la revisión bibliográfica de varios proyectos realizados en los últimos 4 años, alrededor del planeta, donde se a partir de la implementación de la tecnología LoRa/LoRaWAN en redes IoT se busca establecer conectividad en gran cantidad de dispositivos creando ecosistemas interconectados en entornos rurales y urbanos.[7] Estos estudios aportan información relevante frente al conocimiento de la

tecnología, el modelamiento matemático y herramientas para la simulación de la cobertura; en este orden se referencian estos documentos.

En la actualidad el Internet de las cosas [8] crece exponencialmente interconectando millones de dispositivos [3] solucionando problemas áreas como: ciudades y hogares inteligentes, transporte y logística, industrias, el área de E-salud, sin embargo hay desafíos pendientes por superar para la adopción del IoT [9].

En la interconexión de dispositivos para el Internet de las Cosas (IoT) en entornos remotos puede utilizarse tecnologías LPWAN [10]. Dentro de estas tecnologías LoRa/LoRaWAN resalta por sus bondades de cobertura y simplicidad en su arquitectura y bajo consumo energético [11], [12]. Esta tecnología sobresale principalmente en soluciones del IoT en entornos rurales. Un ejemplo de este tipo de desarrollo se describe en [13], donde se realiza un estudio de las redes LoRa/LoRaWAN como solución de cobertura para los proyectos de IoT en granjas. También plantean el modelo matemático para el análisis de las pérdidas de paquetes y cantidad de nodos que puede soportar la red. Otro trabajo en la misma línea, es el presentado en [14]. En dicha referencia se describe el desarrollo de un sistema para monitoreo automatizado de una planta de tratamiento de agua para el consumo humano en pequeños municipios.

Otro campo donde tiene aplicación la tecnología LoRa/LoRaWAN es en los entornos urbanos. Por ejemplo [15] evalúa la cobertura de una LoRa/LoRaWAN en las ciudades de Córdoba y Buenos Aires, Argentina, mediante simulaciones y pruebas empíricas. En esta misma línea está el proyecto [16] que presenta la tecnología LoRa/LoRaWAN como solución de conectividad para las implementaciones del Internet de las Cosas, para ciudades sin conexión como las del África Subsahariana y Sur de Asia.

La tecnología LoRa/LoRaWAN también incursiona en la industria como se presenta en la referencia [17], con el desarrollo de un sistema alternativo para el acueducto de Bogotá. En este proyecto se describe la realización de los levantamientos topográficos en la ciudad y alrededores, utilizando LoRa/LoRaWAN y Sigfox con el objetivo de permitir conectividad de precisión y bajo costo. Otro ejemplo de la inclusión en la industria es el trabajo presentado en [18].

Un tema que ha sido de interés es la evaluación de la cobertura de las redes LoRa/LoRaWAN. En este sentido trabajos como el presentado en [19] presentan el análisis del alcance de cobertura de una red LoRa/LoRaWAN en un sector urbano de la ciudad de Valencia, España y se comprobó que en una zona con mucha densidad urbanística y a una altura de 10 metros se alcanzó cobertura de aproximadamente 875m.

Otro estudio relacionado con la cobertura de las redes LoRa/LoRaWAN es [20], donde se realizó el análisis en la ciudad de Cuenca, Ecuador. En dicho estudio se analizaron distintos entornos urbanísticos (y) EN donde se obtuvieron coberturas efectivas entre 200 y 500 metros, considerando como efectivas las señales que se encuentran por encima de -110dbm.

En la referencia [21] se describe la mejora de la señal mediante la optimización del algoritmo LoRaWAN Adaptive Data Rate. Con esto se consigue mayor estabilidad en los paquetes que son transmitidos por la red LoRa/LoRaWAN, mejorando el índice de cobertura y precisión.

Por otra parte, en el crecimiento de redes LoRa/LoRaWAN en gran parte se ha soportado en simulaciones de cobertura. Por ejemplo, el estudio presentado en [15], donde muestra que con el apoyo del software de simulación Cloud RF se pudo establecer una aproximación a la cobertura que se obtuvo en la ciudad de Córdoba y esto permitió agilizar el análisis de la cobertura en la ciudad de Buenos Aires, donde había mayor densidad urbanística. En la referencia [22] se presenta una descripción de simuladores que permiten desarrollar análisis de redes LoRaWAN y finalmente se presentan los resultados de un estudio de cobertura utilizando la plataforma Xirio.

Teniendo en cuenta los resultados de las investigaciones anteriormente mencionadas, para lograr la mejor cobertura en la red LoRa/LoRaWAN es fundamental el diseño e implementación de un Gateway, porque este dispositivo hace las funciones de puente que permite comunicación de los

nodos inalámbricos con los servidores de las plataformas IoT en la nube. En las referencias [23], [24] se presentan los desarrollos de Gateway para campus universitarios junto con, estudios empíricos de la cobertura de la redes implementadas. Dichas referencias pueden servir de ejemplo de cómo el desarrollo de una red LoRaWAN puede contribuir en el desarrollo de iniciativas “Smart campus” dentro de las instalaciones de una Universidad.

III. JUSTIFICACIÓN

La Universidad de San Buenaventura es una institución de alta calidad con la visión de “En el año 2027, la Universidad de San Buenaventura será reconocida por la formación humanística y científica, los procesos de investigación, el emprendimiento, la pertinencia de los programas, las buenas prácticas de gestión y su contribución a la transformación social.” [25]. Para materializar este objetivo, el programa de la Maestría en Internet de las Cosas y Control de la Facultad de Ingeniería se convierte en plataforma de desarrollo de proyectos enmarcados en las nuevas tendencias tecnológicas. Por esta razón es necesario mejorar la conectividad usando tecnologías del IoT. Las tecnologías de conectividad IoT que se proyectan con mayor crecimiento son NB-IoT [26], LoRa/LoRaWAN y SIGFOX [27]–[29], tal como se presenta en la Fig. 2, donde se muestra la proyección a 2024 del número de conexiones por tecnología. En dicha figura se puede observar un crecimiento significativo, que responde a la tendencia que se ha tenido en los últimos 3 años.

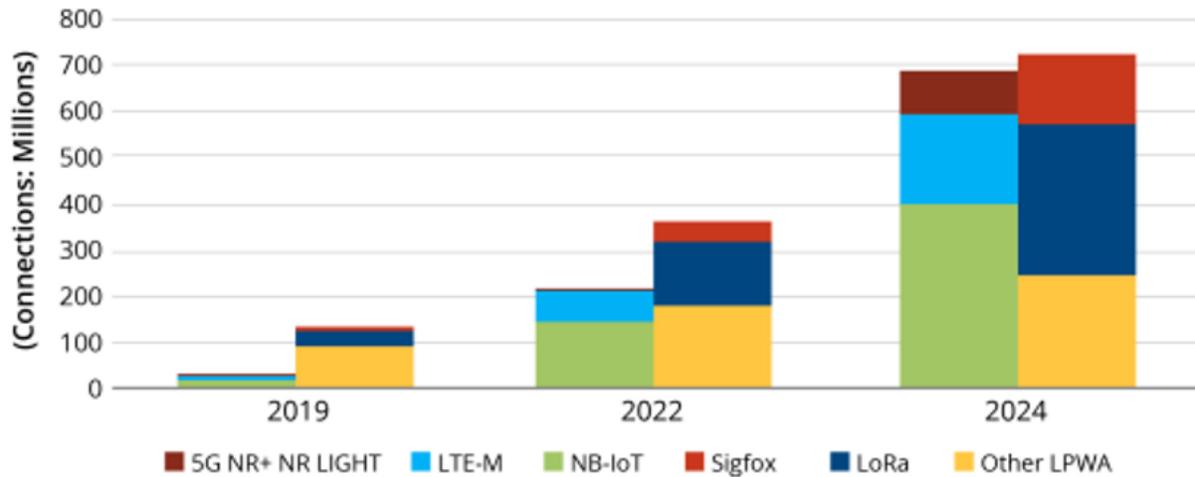


Fig. 2. Crecimiento tecnologías de IoT. Fuente: [3]

Por ello, la relevancia de LoRa/LoRaWAN dentro del ecosistema IoT, ya que es una tecnología LPWAN que permite la cobertura de grandes áreas, usando baja potencia de transmisión. Además, los requisitos de infraestructura y mantenimiento del servicio son mínimos con respecto a otras arquitecturas que pueden permitir este tipo de coberturas y se especializan en el Internet de las Cosas, por ejemplo, las redes Sigfox y NB-IoT.

Por esta razón para la Universidad de San Buenaventura en la Facultad de Ingeniería, es necesario contar con conectividad LoRa/LoRaWAN, porque en el proceso de formación científica y técnica en el Internet de las cosas se requiere de esta tecnología por la creciente representación que tiene en el mercado mundial [3].

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Proveer un Gateway LoRaWAN para conectividad LoRa/LoRaWAN en la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, necesaria para nodos IoT (Internet de las Cosas), que apliquen esta tecnología.

B. Objetivos específicos.

- Realizar el análisis matemático y simulación de la cobertura de un Gateway LoRa/LoRaWAN, para identificar los parámetros de la potencia de transmisión y las pérdidas de señal en los laboratorios de electrónica.
- Implementar un Gateway y un nodo LoRa/LoRaWAN mediante la integración de los módulos hardware y software necesarios en una red de esta tecnología. Para realizar mediciones de la cobertura de la red LoRa dentro del campus de la Universidad de San Buenaventura.
- Evaluar de modo empírico la cobertura del Gateway implementado, dentro del entorno del campus de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, a partir del registro de la información del nodo LoRa en un servidor en internet.

V. METODOLOGÍA

El presente proyecto se ajusta a un enfoque de investigación aplicada. Se desarrolla dentro del contexto de los conocimientos registrados en investigaciones previas de la tecnología LoRa/LoRaWAN, dentro del contexto del Internet de las Cosas (IoT), que conduce al desarrollo de un Gateway LoRa/LoRaWAN para la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá.

Se espera abarcar un nivel de conocimiento de tipo experimental, apoyado en cálculos matemáticos y procesos de simulación en busca de un nivel de desarrollo para la tecnología LoRa/LoRaWAN en el contexto educativo.

El desarrollo del proyecto se ha planteado en 4 fases, la cuales se describen a continuación:

Fase 0. Inicio del proyecto: Estudio tecnología LoRa/LoRaWAN, análisis del problema y estudio de antecedentes.

Fase 1. La primera fase del proyecto es la fase de **análisis matemático fundamentado en la revisión bibliográfica y simulación** de la proyección de cobertura de la red LoRa/LoRaWAN con el fin de entender el dimensionamiento teórico de la red LoRa dentro del campus universitario. Las actividades planteadas para esta etapa son:

Fase 1.1. Tratamiento matemático fundamentado en la revisión bibliográfica de la tecnología LoRa y selección de ecuaciones necesarias para el análisis de cobertura.

Fase 1.2 La simulación de la cobertura en el programa Radio Mobile.

Fase 2. La Segunda fase es la **implementación** donde se procederá a realizar la instalación del Gateway LoRa/LoRaWAN.

Fase 2.1. Implementar el Gateway LoRa/LoRaWAN. Se procederá a desarrollar conjunto de sistema Embebido, antena y comunicación LoRa/LoraWAN, que permitan la interconexión de nodos LoRa dentro del campus.

Fase 2.2. Implementar el nodo LoRa: el nodo IoT inalámbrico que transmitirá datos hacia el Gateway al momento de hacer las pruebas de cobertura.

Fase 3. En la tercera fase del proyecto se realizará la **evaluación y puesta en marcha** del Gateway LoRa/LoRaWAN. Para el desarrollo de esta fase se diseñó el siguiente protocolo para la evaluación de la operatividad, cobertura del sistema implementado.

Fase 3.1. Simulación de cobertura: En este proceso usando un Software especializado (Radio Mobile) se realiza la estimación virtual del alcance y calidad de la señal del Gateway.

Fase 3.2. Pruebas de campo: Con el uso de un nodo LoRa se realiza el análisis de calidad e intensidad de la señal que puede recibir el Gateway desde diferentes ubicaciones del campus universitario. Este proceso se realizará emitiendo datos con el nodo LoRa y estos datos deben ser visualizados en una plataforma Web.

Fase 3.3. Evaluación: este proceso evaluará los parámetros simulados frente a la medición de la señal recibida por el Gateway.

Nota: Es importante anotar que para el desarrollo de esta etapa se contará con un nodo LoRa para establecer conectividad con el Gateway.

Dicho nodo LoRa debe realizar las siguientes tareas:

- Enviar mensajes al Gateway
- Permitir medir la potencia
- Permitir comprobar la cobertura del Gateway
- Subir los datos obtenidos a la Nube, mediante conexión a Internet.

Fase 4. Documentación en esta fase del proyecto se compilará toda la documentación relacionada con el proyecto y se realizará la entrega final para su Evaluación y sustentación.

Fase 4.1. Elaboración de documento: esta fase se desarrollará de manera transversal al proyecto porque durante todo el desarrollo se realizará la documentación de los procesos, avances y hallazgos del proyecto.

Fase 4.2. En esta etapa se realiza la entrega del proyecto atendiendo las correcciones finales

Fase 4.3. Sustentación. Se realiza la presentación formal del proyecto ante los evaluadores.

En la Fig. 3 se presenta el diagrama de las fases del proyecto.



Fig. 3. Fases del proyecto

ALCANCES Y LIMITACIONES

- El Gateway que se implementará permitirá la conexión de nodos IoT.
- El Gateway estará en la capacidad de brindar cobertura LoRa/LoRaWAN dentro de la Universidad de San Buenaventura.
- El Gateway contará únicamente con polarización vertical.
- Debido a la reglamentación de la tecnología LoRa/LoRaWAN, el Gateway implementado operará únicamente en la frecuencia de los 902-928 MHz. Esta frecuencia es la permitida para el continente americano.
- El diseño del Gateway contempla la adquisición de los sistemas necesarios para desarrollar un Gateway LoRa/LoRaWAN de ocho canales.
- Para las pruebas de cobertura de la señal radiada, se realizarán pruebas reubicando el Gateway máximo dos (2) ubicaciones en las que se pueda contar con la misma altura para ubicar el dispositivo.

- El nodo entrega información a partir de una función preprogramada, no de un sensor.
- El sistema está integrado en plataforma TTN, por esta razón los parámetros de utilización de canal y ancho de banda se ajustan a las condiciones de uso y buenas prácticas requeridas por la comunidad.
- En las pruebas de enlace se trabajará con antenas parametrizadas, por esta razón no se realizarán cambios a las antenas.
- Los análisis matemáticos no incluyen las pérdidas por dispersión.
- La cobertura de la señal se puede ver afectada por pérdidas de dispersión de las estructuras, las cuales no serán analizadas en este proyecto.
- La señal recibida puede ser resultado de una señal reflejada.
- Las alteraciones de la señal por causas meteorológicas no hacen parte del análisis.
- El lugar de instalación del Gateway requiere de permisos administrativos, de acuerdo con esas directrices se puede ver afectada la cobertura.
- En el rango de operación para América de la tecnología LoRa/LoRaWAN es de 902 a 928MHz, el Gateway operará en una frecuencia fija dentro de este rango, no será variable.
- El diseño del Gateway estará sujeto a los sistemas comerciales que cumplan con lo necesario para el desarrollo de un Gateway que se pueda registrar permanentemente en la plataforma de TTN (The Things Network).
- La conexión de internet del Gateway no puede tener autenticación de “Portal Cautivo”.
- Para la configuración remota del Gateway es necesario garantizar la conexión por SSH.
- El Gateway requiere de red eléctrica de 110V.
- El Gateway no puede ser instalado al aire libre.
- La aplicación del Nodo y Gateway no están integradas a ninguna aplicación externa o filial a TTN.
- El Gateway requiere conexión permanente a internet porque no está en la capacidad de almacenar datos cuando se presenta desconexión del servidor remoto.
- Los datos generados por el nodo son visibles en internet, pero no son almacenados.

VI. MARCO TEÓRICO

El desarrollo teórico del presente proyecto se fundamenta en la tecnología LoRa/LoRaWAN, en el contexto del Internet de las Cosas (IoT) y las redes inalámbricas que se especializan en permitir que objetos comunes se interconecten y puedan intercambiar datos en Internet. De acuerdo con el IERC (Clúster Europeo de Investigación de Internet de las cosas), el IoT se define como "una infraestructura de red global dinámica con capacidad de autoconfiguración, fundamentadas en protocolos de comunicación estándar e interoperables donde las 'cosas' físicas y virtuales tienen identidades, atributos físicos y personalidades virtuales y utilizan interfaces inteligentes, y se integran perfectamente en la red de información" [30].

De acuerdo con la definición del IERC, el Internet de las cosas está diseñado para integrarse a la vida cotidiana, la industria y la investigación [31] como herramienta que captura e integra los datos generados por "cosas" de uso común y las entrega a Internet, donde se transforman en información que puede ser analizada para tomar decisiones. En la Fig. 4 se muestran algunas de las aplicaciones del Internet de las Cosas.

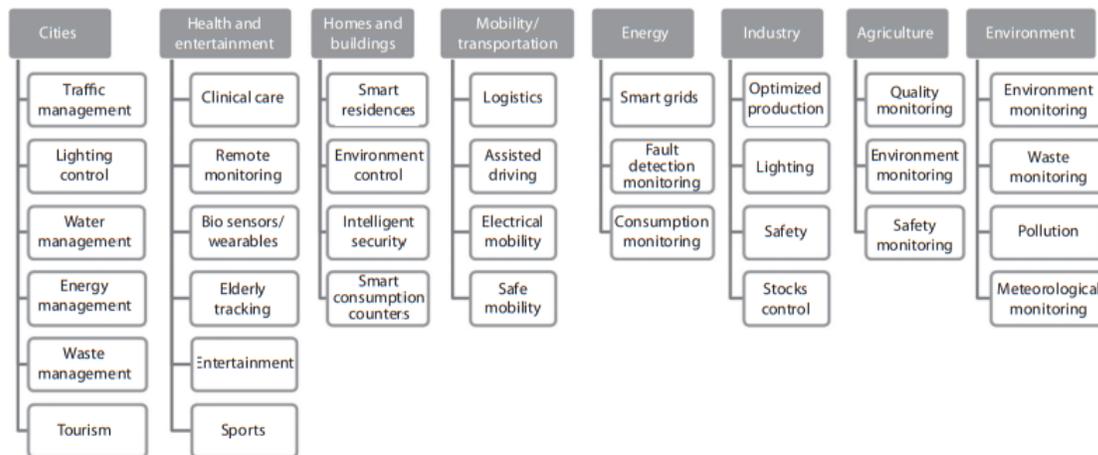


Fig. 4. Campos de aplicación del IoT Fuente: [31]

En este sentido las “Cosas” se convierten en sensores y esto obliga a desarrollar protocolos de comunicación inalámbrica, especializados en realizar la interconexión de Máquina a Máquina (M2M) para permitir cumplir con los requerimientos del Internet de las cosas. Estas tecnologías se explican con detalle en [4] de donde se toma la Fig. 5 que presenta el comparativo del alcance de cobertura y las tasas de transferencia de las diferentes tecnologías inalámbricas para comunicación IoT, donde se pueden diferenciar los grupos de corto y mediano alcance, donde se agrupan tecnologías como NFC, RFID, RFID UHF, Bluetooth, Zigbee, Wifi entre otras.

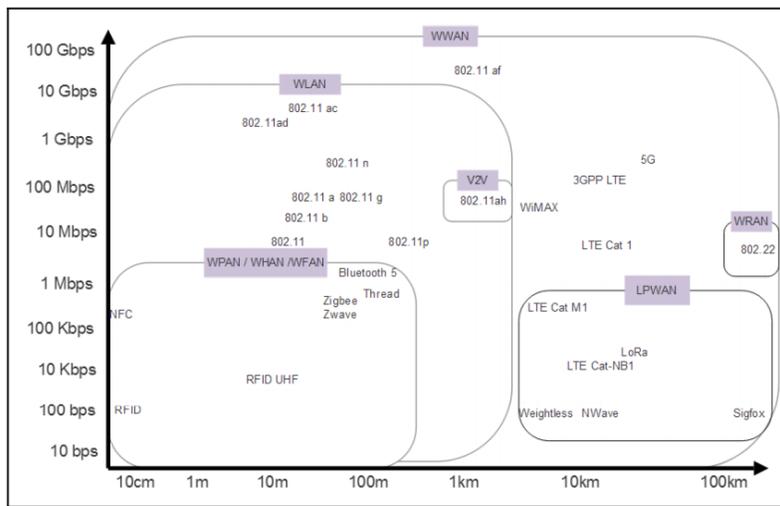


Fig. 5. Comparación tecnologías inalámbricas usadas IoT Fuente: [4]

De acuerdo con el análisis de la Fig. 5, el grupo de las tecnologías que se utilizan para lograr mayor cobertura de red son las tecnologías del grupo LPWAN, entre estas se encuentran Sigfox, NB-IoT y LoRa. De acuerdo a [4], las redes NarrowBand IoT son redes diseñadas para trabajar en la infraestructura de las redes celulares pero su reducido ancho de banda se adapta a la M2M, la tecnología cuenta con la velocidad de transmisión, pero al depender de las redes celulares el precio del mantenimiento del servicio se eleva. Similar al escenario que ocurre con la tecnología Sigfox,

pero esta tecnología requiere de su propia infraestructura. En la Tabla I se presenta un comparativo entre las características de las tecnologías LPWAN.

Tabla I Comparativo tecnologías LPWAN [32]

Característica	NB-IoT	LoRa/LoRaWAN	Sigfox
Bandas ISM (Industrial Científica Medica)	No	Si	No
Capacidad de carga de datos	200 Kbps	500Kbps	600bps
Pérdidas máximas en enlace	164 dB	165 dB	168 dB
Antena (MIMO)	1	1	1
Tipo de Enlace	Half Duplex	Half Duplex	Half Duplex
Latencia	1.6 a 10 s	500 ms a 2 s	Mayor a 60 segundos
Potencia de transmisión	23dB	14 dB	14 dB
Complejidad del diseño	10% Cat-1	Baja	Baja
Movilidad	Limitada	Movible	Limitada

La tecnología LoRa es un sistema de modulación para enlaces de Radio Frecuencia patentado por Semtech [33], este protocolo permite enlaces a largas distancias, que pueden alcanzar los 15 Km en campo abierto y 5 Km en áreas Urbanas. Bajo consumo energético con baterías que pueden durar hasta 10 años dependiendo de la frecuencia de envío de datos. Esto se consigue gracias a la modificación en la modulación de la señal. La cual se basa en la técnica de espectro ensanchado (Frequency Shifting Keying - FSK) [34] donde adicionalmente se realiza una variación del espectro extendido que se identifica como “Chirp” (Chirp Spread Spectrum-CSS) con el fin de poder realizar el varias transmisiones en el mismo canal [35] en la Fig. 6 se presenta el espectrograma de la señal y en relación frecuencia tiempo para el envío de datos. De acuerdo con el diseño la velocidad de transmisión de los datos (símbolos) puede variar cambiando el factor de dispersión (SF - Spreading

Factor) [34], esta variación afecta la distancia de cobertura como lo explica la Fig. 7. De acuerdo con el teorema de Shannon Hartley Ecuación 1 la señal LoRa a pesar de las interferencias en un limitado ancho de banda estará libre de ruido[36], [37] . Por otro lado, LoRaWAN el protocolo de especificación de red es la capa MAC propuesta por LoRa Alliance [38]. En resumen, LoRa define la capa física, mientras LoRaWAN define los métodos de capa MAC, tal como se ilustra en la Fig. 8.

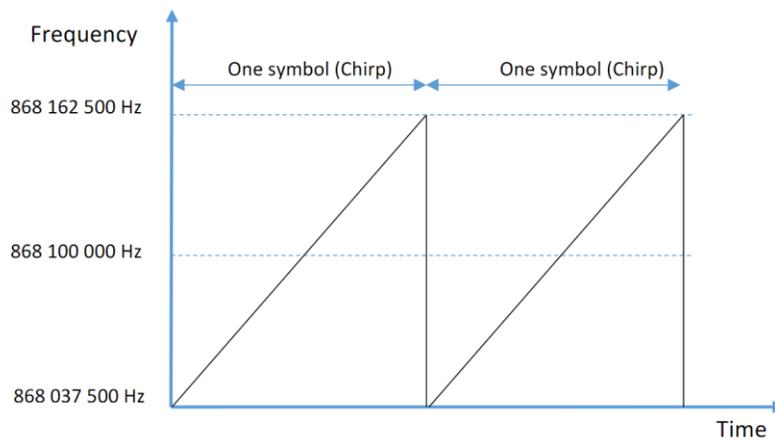


Fig. 6 Espectrograma Señal LoRa [35]

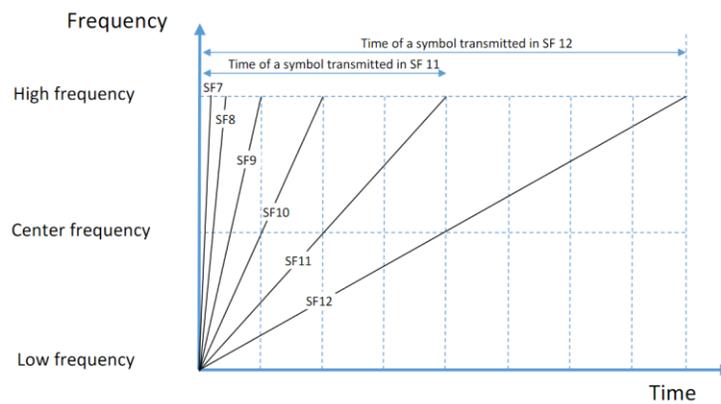


Fig. 7 Factor de dispersión [35]

Ecuación 1 Teorema Shannon Hartley

$$C = B * \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

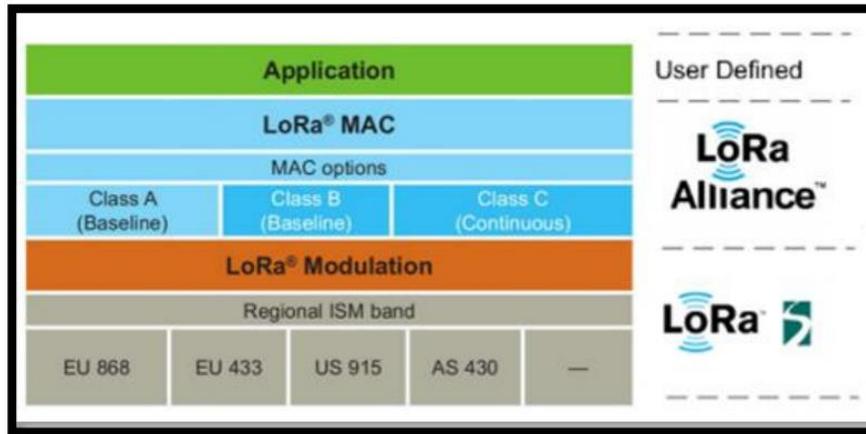


Fig. 8. Diferencia entre LoRa y LoRaWAN Fuente: [19]

La arquitectura de las redes LoRa/LoRaWAN se caracteriza por su simplicidad, esta se divide en dos partes una capa física conformada por Nodos LoRa que establecen enlace de largo alcance que se integran a los sensores para capturar los datos o enviar señales a los actuadores esta se construye en estrella para la interacción de los nodos con los Gateway, estos últimos se adaptan a cualquier diseño de red Ethernet como se presenta en Fig. 10 y Fig. 11.

La seguridad de la información en el protocolo LoRa depende de la autenticación de llaves registradas en el transmisor y el receptor que están ligadas directamente a la MAC de cada circuito integrado elaborado exclusivamente por **Semtech** dichas llaves se registran en la aplicación en configuraciones OTTA o ABP con encriptado AES con intercambio de claves con identificador IEEE-EUI64[38].

La fuerza de la señal recibida en un Gateway desde nodo se puede representar en RSSI que son unidades relativas que representan los milivoltios que puede interpretar el receptor y sus unidades son dBm, en LoRa esta señal es negativa y el entre mas cercano a cero el resultado mejor señal.

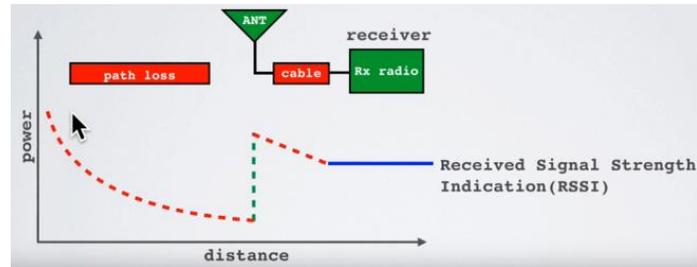


Fig. 9 Representación RSSI [39]

La tecnología LoRa, trabaja con señales en el rango de los sub-giga Hercios, en la banda ICM limitada al ancho de banda 863 – 928MHz por debajo del piso de ruido, bajo la regulación de la ANE (Agencia Nacional del Espectro), esto conduce a reducir al máximo las interferencias con otras señales de radio[35].

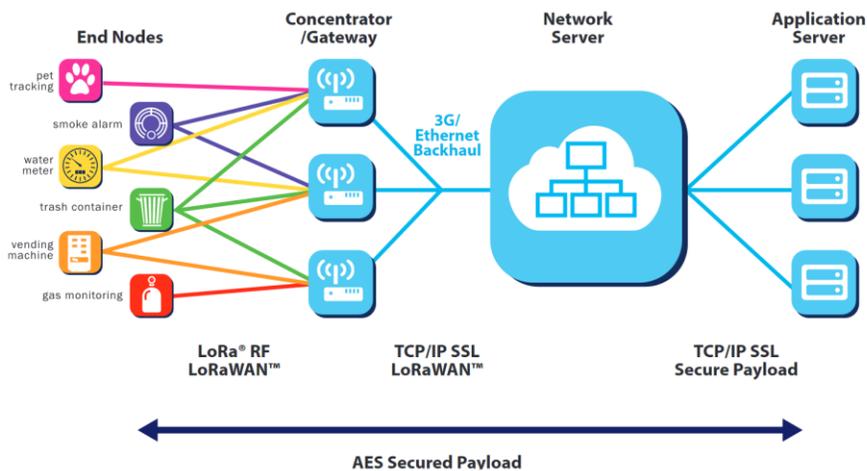


Fig. 10 Arquitectura y seguridad Lora [38]

Las características necesarias para la comunicación y el correcto funcionamiento requeridos para las implementaciones de las redes LoRa/LoRaWAN se muestran en la Tabla II.

Tabla II Características Comunicación LoRa/LoRaWAN

Característica	Carga	Descarga
Modulación	CSS	CSS
Tasa de transferencia (Adaptativa)	0.3 a 5 Kbps	0.3 a 5 Kbps
Carga útil del mensaje	0 a 250 bytes	0 a 250 bytes
Duración del Mensaje	40 ms a 1.2 s	20 a 160 ms

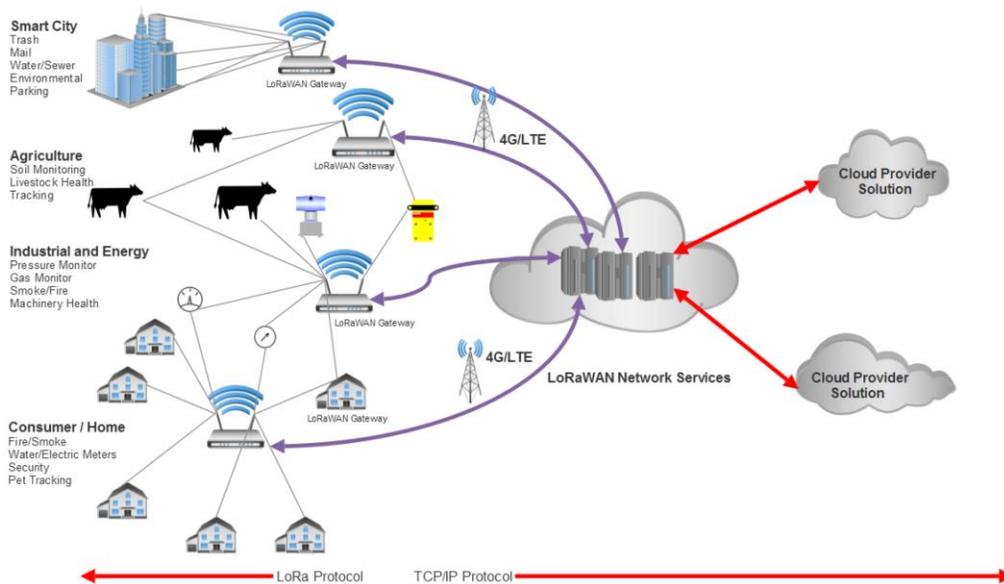


Fig. 11. Arquitectura redes LoRa/LoRaWAN, Fuente: [4]

Para las integraciones en los servidores de la red LoRaWAN como The Things Network (TTN) o Chirp Stack es necesario que el Gateway cuente con mínimo 8 canales con los cuales se tiene la capacidad de interconectar hasta 10000 nodos.

Los nodos se pueden se de tres clases A, B o C la diferencia entre configuraciones es la cantidad de datos que envían y el tiempo de actividad y latencia que pueden generar en la transmisión, los nodos A permiten el envío de un dato de subida y dos de bajada y después de la transmisión pueden entrar en modo reposo. Esto causa mayores latencias, pero menor consumo energético. Los

dispositivos B permiten la programación de las ventanas de conexión, pero esto requiere que el dispositivo mantenga permanente escucha de los datos que envía el Gateway y por eso su consumo energético es mayor con latencias altas. En clase C mantienen la comunicación de recepción permanentemente y esto conduce a un mayor consumo energético que las clases anteriores, pero con menor la latencia. [19] [38].

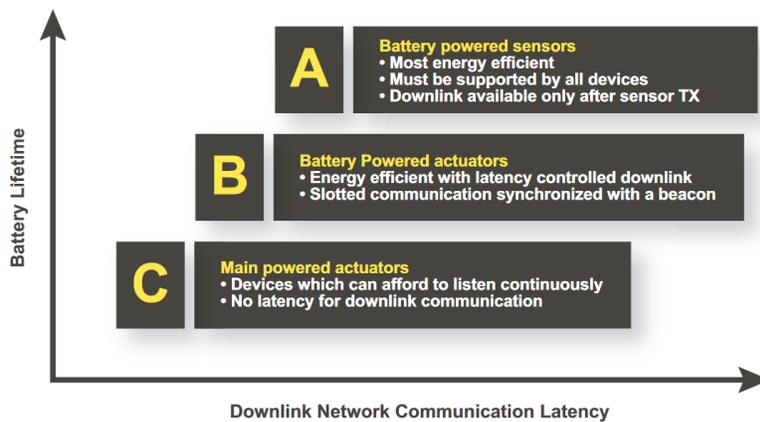


Fig. 12 Clases de Nodos Lora [38]

RESULTADOS

Los resultados de este proyecto responden al desarrollo de este, donde a partir de los cálculos matemáticos y simulación de la cobertura se realiza un proceso de medición empírica con los equipos seleccionados.



Fig. 13 Proceso Metodológico

Cálculos Matemáticos y Simulación

Para realizar el dimensionamiento teórico de la cobertura de la red, este proyecto se apoya en el análisis teórico de la cobertura en el método “presupuesto de enlace” (Link Budget), donde se analiza el canal de transmisión a partir de la medición de todas las ganancias y pérdidas que tiene la señal desde el transmisor hasta el receptor Fig. 14 y se calcula a partir de la siguiente Ecuación 2[34].

Ecuación 2

$$P_{RX}(dBm) = P_{TX}(dBm) + G_{SystemTX}(dB) - L_{System}(dB) - l_{Channel}(dB) - M(dB)$$

Donde:

- $P_{RX}(dBm)$ = Potencia incidente esperada en el receptor
- $P_{TX}(dBm)$ = Potencia transmitida
- $G_{SystemTX}(dB)$ = Ganancias del sistema (antenas).
- $L_{System}(dB)$ = Pérdidas del sistema (Cable, guías de onda).
- $l_{Channel}(dB)$ = Pérdidas en el Canal de propagación (se calcula a partir de modelos o datos empíricos).
- $M(dB)$ = Margen de desvanecimiento

$$M = Rx Power - Rx Sensitivity \quad \text{Ecuación 3 [40].}$$

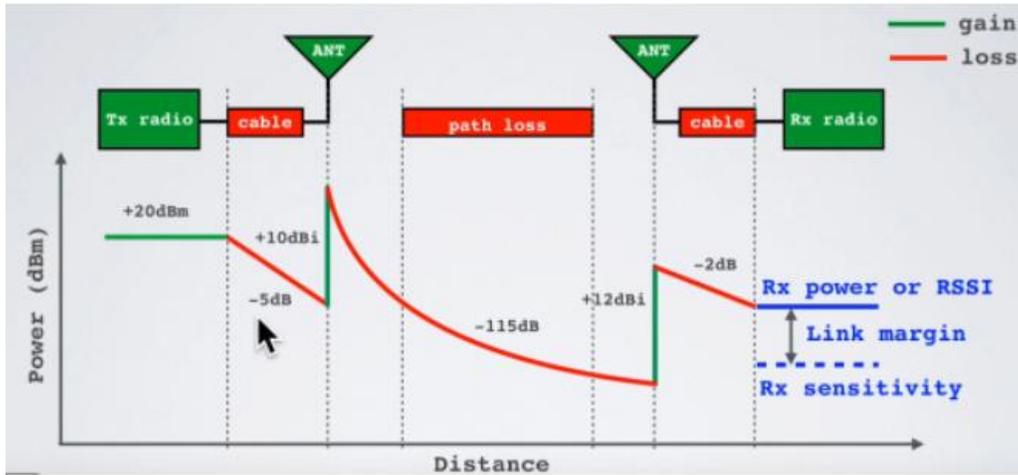


Fig. 14 Descripción Link Budget [41]

En nuestro caso el canal es el espacio libre por lo tanto las pérdidas en el canal en dB ($l_{channel}$) se calcula aplicando la siguiente fórmula[42].

$$l(f_s) = 32.45 + 20 \log(D) + 20 \log(f) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde

- D = distancia en Kilómetros.
- f = Frecuencia en Megahercios
- 32.45 es un valor constante cuando la distancia “D” está en Kilómetros y “f” Frecuencia en Megahercios [43].

Para conocer $Rx\ Sensitivity$ que se menciona en $M = Rx\ Power - Rx\ Sensitivity$ Ecuación

3 se aplica la fórmula del piso de ruido “Noise Floor” [34]

$$Noise\ Floor = 10 * \log_{10}(k * T * B * 1000)(dBm) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde

- k= Constante de Boltzmann ($\sim 1.38 * 10^{-23}$)
- T= 293° kelvin (Temperatura)
- B= Ancho de Banda del Canal (Hz)
- 1000= Factor de conversión de Watts a mili-Watts

Para el cálculo de cobertura de la red LoRa/LoRaWAN en la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá se estableció el estudio radial de 18 ubicaciones distribuidas dentro del perímetro del campus para analizar la red. Los puntos se definieron con las siguientes condiciones:

- Son 8 radios procurando mantener separación aproximada de 45° y distancia máxima son los linderos del campus.
- Las ubicaciones deben ser en campo abierto con y sin línea de vista entre los dispositivos.
- Cada uno de los 8 radios será analizado en mínimo 2 y máximo 3 puntos diferentes.
- Se registran lecturas alrededor del espejo de agua causado por el lago que está dentro del campus.
- Las ubicaciones permiten el análisis de la señal cuando la señal debe pasar por construcciones de ladrillo y vidrio, pero siempre al aire libre y línea de vista en campo abierto.

Los lugares definidos se muestran en Fig. 15.



Fig. 15 Distribución ubicaciones para análisis radial.

Al aplicar la fórmula de Link Budget definiendo el SF (Spread Factor) de 8, ancho de banda de 500KHz, ganancia de las antenas de 4.3dBi y conociendo la distancia desde el laboratorio 405 y cada una de las ubicaciones definidas se obtienen los resultados que se muestran en Tabla III.

Tabla III Presupuesto de Enlace

UBICACIÓN	COORDENADAS GRADOS MINUTOS SEGUNDOS	DISTANCIA (m) Desde Lab 405	LINK BUDGET
TRONQUITOS	N4.75147 W74.02965	25.64	-112.7580605
OFICINA LABORATORIOS ELECTRONICA	N4.75136 W74.02961	31	-112.7569339
COSTADO ORIENTAL GO	N4.75112 W74.02942	32	-112.7626996
COSTADO SUR LAGO	N4.75130 W74.02938	34	-112.7592784
FRENTE LAGO	N4.75145 W74.02944	35.5	-112.7642671
CAFETERIA PPAL	N4.75133 W74.03001	38	-112.765372
COSTADO SUR BODEGA SG	N4.75094 W74.02934	50	-112.7591001
COSTADO NORTE CAFETERIA	N4.75155 W74.03001	50.9	-112.7640557
COSTADO NORTE BODEGA SG	N4.75132 W74.02921	53.3	-112.7642442
PLAZOLETA PRINCIPAL	N4.75103 W74.03018	60	-112.7627251
RESPALDO GO	N4.75066 W74.02971	62	-112.7575338
RESPALDO LAGO	N4.75173 W74.02912	80	-112.7614998
PARQUEADERO	N4.75174 W74.03018	80	-112.7614998
CENTRO CANCHA	N4.75208 W74.02951	100	-112.7597
PARQUEADERO MOTOS	N4.75128 W74.03048	101	-112.7661275
CAPILLA	N4.75042 W74.03050	128	-112.7638994
PARQUEADERO PORTERIA VEHICULAR	N4.75199 W74.03050	130	-112.7585671
COSTADO NORTE CANCHA	N4.75270 W74.02955	154	-112.7601145

Para los cálculos presentados en la tabla los siguientes datos fueron constantes, Frecuencia 915MHz, Spread Factor 8 y Ancho de banda de 500KHz, ganancia de las Antenas 2.6dBi, perdidas en el cable 1.5dBi.

Teniendo en cuenta el modelamiento matemático y se realizó el análisis de cobertura con ayuda del simulador “Radio Mobile” con el cual se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla IV Resultados Simulación Radio Mobile

UBICACIÓN	COORDENADAS GRADOS MINUTOS SEGUNDOS	ALTURA	DISTANCIA (m) Desde Lab 405	Tx Power MAX NODO (dBm)	RX SIMULADO (dBm)	Perdidas en el canal Path Loss (dBm) SIMULACIÓN
TRONQUITOS	N4.75147 W74.02965	2581 m	25.64	20	-44.6	59.84855
OFICINA LABORATORIOS ELECTRONICA	N4.75136 W74.02961	2581 m	31	20	N/A	N/A
COSTADO ORIENTAL GO	N4.75112 W74.02942	2571 m	32	20	-45.8	61.77319
COSTADO SUR LAGO	N4.75130 W74.02938	2580 m	34	20	-45.9	62.29977
FRENTE LAGO	N4.75145 W74.02944	2585 m	35.5	20	-46.4	62.67476
CAFETERIA PPAL	N4.75133 W74.03001	2567 m	38	20	-46.7	63.26587
COSTADO SUR BODEGA SG	N4.75094 W74.02934	2574 m	50	20	-48.7	65.64959
COSTADO NORTE CAFETERIA	N4.75155 W74.03001	2580 m	50.9	20	-48.6	65.80455
COSTADO NORTE BODEGA SG	N4.75132 W74.02921	2589 m	53.3	20	-48.7	65.70155
PLAZOLETA PRINCIPAL	N4.75103 W74.03018	2579 m	60	20	-49.9	67.23322
RESPALDO GO	N4.75066 W74.02971	2563 m	62	20	-50.7	67.51803
RESPALDO LAGO	N4.75173 W74.02912	2570 m	80	20	-52.1	69.73199
PARQUEADERO	N4.75174 W74.03018	2583 m	80	20	-51.9	69.73199
CENTRO CANCHA	N4.75208 W74.02951	2575 m	100	20	-53.2	71.67019
PARQUEADERO MOTOS	N4.75128 W74.03048	2562 m	101	20	-52.9	71.75662
CAPILLA	N4.75042 W74.03050	2556 m	128	20	-56	73.81439
PARQUEADERO PORTERIA VEHICULAR	N4.75199 W74.03050	2579 m	130	20	-55.6	73.94906
COSTADO NORTE CANCHA	N4.75270 W74.02955	2566 m	154	20	-57.7	75.42061

Para los cálculos presentados en la tabla los siguientes datos fueron constantes, Frecuencia 915MHz, Spread Factor 8 y Ancho de banda de 500KHz, ganancia de las Antenas 2.6dBi, pérdidas en el cable 1.5dBi.

La simulación de la red muestra el mapa de calor que se puede ver en Fig. 16, donde se puede apreciar en color rojo el área de mayor intensidad de la señal radiada. Dicha área cubre la totalidad de la Universidad de San Buenaventura Fig. 17

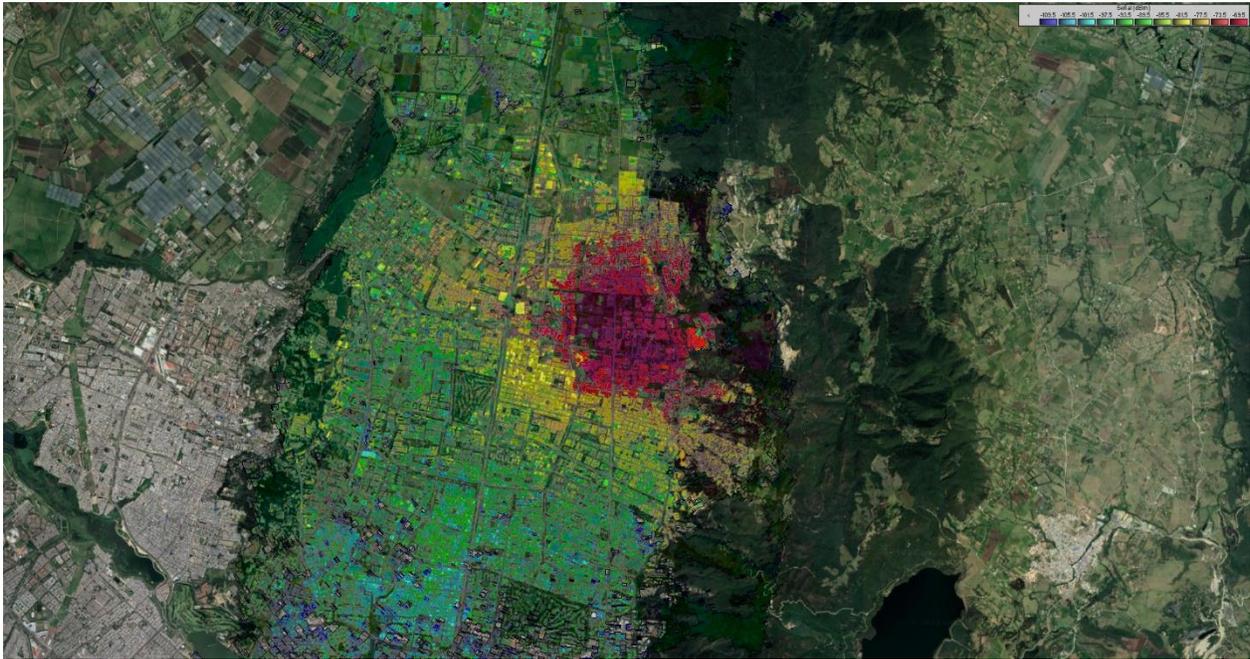


Fig. 16 Mapa de calor cobertura de la red LoRa



Fig. 17 Acercamiento mapa de calor

Diseño Del Experimento

Para realizar el análisis de cobertura de una red LoRa/LoRaWAN se definen dos escenarios uno el de la comunicación LoRa la cual requiere dos dispositivos uno que funcionara como Gateway y otro como Nodo, estos deben tener la capacidad de modular (nodo) y demodular (Gateway) radio señales de este tipo. El Gateway al recibir la información del nodo la entrega en un servidor en internet, donde estos datos podrán integrarse con aplicaciones de IoT. El diseño de estos servidores depende de cada desarrollador y proyecto. Existe la plataforma, The Things Network [44] la cual ofrece a la comunidad una base para la integración de aplicaciones LoRa.

En este proyecto se realiza con un Gateway RAK-7246G [45] el cual fue seleccionado por la diferencia de precio y la posibilidad de integración que permite el núcleo de la Raspberry pi Cero con que cuenta este dispositivo Fig. 18.

Después de analizar las características del Gateway LPS8N de Dragino [46] y STM32 de ST [47] la

Tabla V presenta la el comparativo de algunas de las características evaluadas. Esto responde al objetivo 2.

Los equipos utilizados en el experimento realizado se muestran a continuación.



Fig. 18 Gateway RAK 7246G



Fig. 19 Nodo Heltec ESP32 Wifi LoRaV2



Fig. 20 Instrumentos de Medición GPS y medidor de distancia

Tabla V Comparativo Gateway

MARCA	RAK	DRAGINO	ST
MODELO	7246G	LPS8N	STM32
NÚMERO DE CANALES	8	8	8
OPERA EN 915 MHz	SI	SI	SI
GPS	SI SATELITAL	SI GPSRS	SI MODULO ADICIONAL
POSIBILIDAD DE AMPLIAR MEMORIA DE ALMACENAMIENTO INTERNO	SI	NO	NO
Sistema S.O.	Linux	Linux	Linux
DISEÑO INDOOR	SI	SI	SI
VALOR	\$114 US	\$165 US	\$297 US
TIEMPO DE ENTREGA Aproximado	15 días	15 días	15 días
Chip Semtech para comunicación LoRa	SX1308	SX1302	SX1301

El dispositivo por el que se optó para realizar en envío de señal fue un nodo HELTEC WiFi LoRa 32V2 [48] Fig. 19, al cual igual que al Gateway se les instalaron antenas caracterizadas para comunicación LoRa, modelo 915MHz ROB ANTENNA [49] de la marca ZIISOR con el fin de

unificar la ganancia que pueden entregar estos elementos y volverlos una constante de las variables que pueden afectar la calidad del enlace.

Con el apoyo de un GPS satelital y un medidor de distancia laser, se realizó la medición de la señal en los 19 lugares dentro del campus que se definieron al realizar el análisis teórico. Con los elementos anteriormente descritos se realizó la medición empírica de la cobertura ubicando el Gateway en el laboratorio 405 del Guillermo de Ockham, los datos recibidos por el Gateway fueron registrados en la plataforma The Things Network TTN y se obtuvieron los siguientes resultados ver. Tabla VI

Tabla VI Resultados prácticos

UBICACIÓN	COORDENADAS GRADOS MINUTOS SEGUNDOS	ALTURA	PORCENTAJE DE HUMEDAD	TEMPERATURA EN GRADOS CELCIUS	DISTANCIA (m) Desde Lab 405	RSSI (dBm)	SNR
TRONQUITOS	N4.75147 W74.02965	2581 m	76	14	25.64	-62	10.5
OFICINA LABORATORIOS ELECTRONICA	N4.75136 W74.02961	2607 m	95	12.5	31	-75	11
COSTADO ORIENTAL GO	N4.75112 W74.02942	2571 m	95	12.5	32	-71	10.8
COSTADO SUR LAGO	N4.75130 W74.02938	2580 m	79	14	34	-72	10.5
FRENTE LAGO	N4.75145 W74.02944	2585 m	79	14	35.5	-54	10.5
CAFETERIA PPAL	N4.75133 W74.03001	2567 m	82	13.2	38	-86	10.8
COSTADO SUR BODEGA SG	N4.75094 W74.02934	2574 m	95	12.5	50	-70	10.2
COSTADO NORTE CAFETERIA	N4.75155 W74.03001	2580 m	79	14	50.9	-71	10.8
COSTADO NORTE BODEGA SG	N4.75132 W74.02921	2589 m	79	14	53.3	-71	10.8
PLAZOLETA PRINCIPAL	N4.75103 W74.03018	2579 m	86	13.2	60	-74	10.2
RESPALDO GO	N4.75066 W74.02971	2563 m	88.5	12.5	62	-94	10.2
RESPALDO LAGO	N4.75173 W74.02912	2570 m	79	14	80	-66	11
PARQUEADERO	N4.75174 W74.03018	2583 m	82	14	80	-86	10.8
CENTRO CANCHA	N4.75208 W74.02951	2575 m	82	13.2	100	-86	11.2
PARQUEADERO MOTOS	N4.75128 W74.03048	2562 m	82	13.2	101	-106	1.2
CAPILLA	N4.75042 W74.03050	2556 m	82	13.2	128	-103	3
PARQUEADERO PORTERIA VEHICULAR	N4.75199 W74.03050	2579 m	82	13.2	130	-77	10.5
COSTADO NORTE CANCHA	N4.75270 W74.02955	2566 m	82	13.2	154	-88	11

Para los cálculos presentados en la tabla los siguientes datos fueron constantes, Frecuencia 915MHz, Spread Factor 8 y Ancho de banda de 500KHz.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizó la evaluación de la cobertura dentro del campus universitario, tomando lecturas de enlace en los lugares que se definieron al momento de realizar el modelamiento teórico del proyecto, en los cuales se evidenciaron diferencias entre los resultados, teóricos y prácticos a causa de varios factores que se analizan a continuación, la **Error! Reference source not found.** hace un paralelo de los resultados obtenidos.

Toda medición de radiocomunicación con un equipo especializado que vaya hasta -60 dB (como es el caso de la comunicación LoRa), es comparable. Es decir, valores menores que -60 dB son mediciones muy precisas que dependen de la capacidad del Gateway y de los nodos. En este sentido, otros factores que pueden levemente alterar las mediciones son:

- La humedad en el ambiente.
- La temperatura a la cual estaba el Gateway.
- El nivel de piso de ruido.

Tabla VII Comparativo resultados

UBICACIÓN	COORDENADAS GRADOS MINUTOS SEGUNDOS	ALTURA	DISTANCIA (m) Desde Lab 405	RSSI (dBm) PRACTICOS	RSSI CALCULADO	RSSI SIMULADO	RSSI DIFERENCIA REAL TEORICO
TRONQUITOS	N4.75147 W74.02965	2581 m	25.64	-62	-76.39855	-83.34855	14.39855
OFICINA LABORATORIOS ELECTRONICA	N4.75136 W74.02961	2581 m	31	-75	-79.69743	N/A	4.69743
COSTADO ORIENTAL GO	N4.75112 W74.02942	2571 m	32	-71	-80.24319	-86.47319	9.24319
COSTADO SUR LAGO	N4.75130 W74.02938	2580 m	34	-72	-81.29977	-87.09977	9.29977
FRENTE LAGO	N4.75145 W74.02944	2585 m	35.5	-54	-82.04476	-87.97476	28.04476
CAFETERIA PPAL	N4.75133 W74.03001	2567 m	38	-86	-83.022587	-88.86587	-2.97741
COSTADO SUR BODEGA SG	N4.75094 W74.02934	2574 m	50	-70	-87.99959	-93.24959	17.99959
COSTADO NORTE CAFETERIA	N4.75155 W74.03001	2580 m	50.9	-71	-88.30455	-93.30455	17.30455
COSTADO NORTE BODEGA SG	N4.75132 W74.02921	2589 m	53.3	-71	-89.10474	-93.30155	18.10474
PLAZOLETA PRINCIPAL	N4.75103 W74.03018	2579 m	60	-74	-91.16322	-96.03322	17.16322
RESPALDO GO	N4.75066 W74.02971	2563 m	62	-94	-91.73803	-97.11803	-2.26197
RESPALDO LAGO	N4.75173 W74.02912	2570 m	80	-66	-96.16199	-100.73199	30.16199
PARQUEADERO	N4.75174 W74.03018	2583 m	80	-86	-96.16199	-100.53199	10.16199
CENTRO CANCHA	N4.75208 W74.02951	2575 m	100	-86	-100.04019	-103.77019	14.04019
PARQUEADERO MOTOS	N4.75128 W74.03048	2562 m	101	-106	-100.20662	-103.55662	-5.79338
CAPILLA	N4.75042 W74.03050	2556 m	128	-103	-104.32439	-108.71439	1.32439
PARQUEADERO PORTERIA VEHICULAR	N4.75199 W74.03050	2579 m	130	-77	-104.59906	-108.44906	27.59906
COSTADO NORTE CANCHA	N4.75270 W74.02955	2566 m	154	-88	-107.54061	-112.02061	19.54061

Para los cálculos presentados en la tabla los siguientes datos fueron constantes, Frecuencia 915MHz, Spread Factor 8 y Ancho de banda de 500KHz.

Esto evidencia diferencias entre resultados teóricos y prácticos en: los enlaces llamados “Respaldo Lago” y “Parqueadero” que estaban a 80 metros de distancia entre nodo y Gateway, en los cuales los resultados prácticos muestran valores muy distantes esto se debe a la influencia del espejo de agua causado por el lago, el cual insidia directamente en uno de los enlaces debido a la ubicación escogida.

Por todo esto, cuando los valores son tan pequeños, como los reportados en el estudio, los valores son comparables [50], esto permite afirmar que el Gateway y el nodo seleccionado están en la capacidad de proveer conectividad LoRa a todo del campus universitario, incluso acuerdo con los resultados de las simulaciones se prevé cobertura en las zonas aledañas a la universidad.

CONCLUSIONES

- Se realizó el modelamiento matemático requerido para dimensionar el alcance teórico de la cobertura de la red LoRa/LoRaWAN dentro del campus de la universidad de San Buenaventura con el cual se obtuvieron los datos teóricos de la cobertura que tendría la señal dentro del campus, los cuales al ser incluidos en el simulador Radio Mobile mostraron la cobertura en total del campus Universitario con la señal LoRa.
- El simulador utilizado no tuvo la capacidad de simular enlaces que están a la misma altura a una distancia inferior a 50 metros en el mismo un espacio cerrado. Esto se observó con la simulación desde la recepción de los laboratorios hasta el laboratorio 405 la cual en el software no arrojo resultados.
- El proyecto implementó el Gateway RAK 7246G, el cual cuenta con una Raspberry pi Cero, un concentrador RAK2246 Pi-HAT Versión A y trabaja con el Chip Semtech SX1308. el cual se registró en las plataformas Chip Stack y TTN siendo esta última en la que se desarrolló el análisis de cobertura por permitir el análisis de los datos sin depender de aplicaciones adicionales, las cuales se podrían causar alteraciones en la lectura de la señal analizada.
- Se implementó un nodo HELTE WiFi LoRa 32 Versión 2. El cual integra los chips Semtech SX1276/SX1278 para la comunicación LoRa sin embargo en el Gateway y en el nodo se optó por instalar antenas caracterizadas modelo TX915-JKS-20 de la marca ZIISOR esto permitió descartar perdidas o lecturas erróneas en el enlace causadas por estos elementos.
- La plataforma TTN cuenta con facilidades de integración, pero debido al crecimiento exponencial de la tecnología LoRa, han realizado modificaciones significativas al uso de la plataforma, por lo tanto, si se desea realizar un desarrollo sin las restricciones establecidas por en The Things Network, se puede optar por implementaciones en servidores propios y/o realizar la integración en Chip Stack.
- Con el Gateway y el nodo implementado se realizaron mediciones de cobertura dentro del campus universitario que corroboraron que la cobertura de la señal LoRa abarca todo el campus con calidad de señal buena en razón que durante las pruebas se alcanzó el mayor

ancho de banda disponible 500KHz con un Spread Factor de 8 y RSSI por debajo de -115dBm.

- El Gateway LoRaWAN provee conectividad LoRa al campus de la Universidad de San Buenaventura y está en la capacidad de soportar redes de Nodos fijos y móviles LoRa y entregar los datos en plataformas de Internet para aplicaciones de control o monitoreo remoto de procesos de agricultura, industria, E-salud entre otras.

REFERENCIAS

- [1] International Telecommunication Union ITU, “Series Y: Global Information Infrastructure, Internet Protocol Aspects And Next-Generation Networks Recommendation Itu-T Y.2060”, Y.2060, jun. 2012. Consultado: el 5 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=y.2060>
- [2] Biggs Phillippa, Anna Polomska, John Garrity, y Connie LaSalle, “Harnessing the Internet of Things for Global Development”, ITU - International Teecommunication Union., 2016. Consultado: el 5 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/en/action/broadband/Documents/Harnessing-IoT-Global-Development.pdf>
- [3] A. Krishnan, “LoRaWAN® and Multi-RAN Architecture Connecting the Next Billion IoT Devices”, ABI Research, dic. 2020. Consultado: el 16 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.abiresearch.com/>
- [4] P. Lea, *Internet of things: archititecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security*. Burmingham: Packt publishing Ltd., 2018.
- [5] Rafael Pérez, Sergio Navajas, y Elizabeth Terry, “IoT IN LAC 2019: Taking the Pulse of the Internet of Things in Latin America and the Caribbean | Publications”, IDB Group, jun. 2019. Consultado: el 4 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://rb.gy/87w9we>
- [6] Statista, “Number of IoT devices Colombia 2023”, 2021. <https://www.statista.com/statistics/1179780/colombia-number-iot-devices/> (consultado el 22 de mayo de 2021).
- [7] “Lea - 2018 - Internet of things archititecting IoT solutions by.pdf”.
- [8] Pelino Michele, Miller Paul, Kindness Andre, Mu Danny, Ask Julie, y Trzcinski Arielle, “Predictions 2021: Internet Of Things (IoT) - ForresterNow”, *FORRESTER NOW*, octubre de 2020. <https://www.forrester.com/fn/9udCr6XF0Y0UyBI8F0KI>
- [9] M. Umair, M. A. Cheema, O. Cheema, H. Li, y H. Lu, “Impact of COVID-19 on IoT Adoption in Healthcare, Smart Homes, Smart Buildings, Smart Cities, Transportation and Industrial IoT”, *Computers and Society*, p. 21, abr. 2021.
- [10] A. Ikpehai *et al.*, “Low-power wide area network technologies for internet-of-things: A comparative review”, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, núm. 2, pp. 2225–2240, abr. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2883728.
- [11] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, y T. Watteyne, “Understanding the Limits of LoRaWAN”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, núm. 9, pp. 34–40, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
- [12] M. A. Ertürk, M. A. Aydın, M. T. Büyükakkaşlar, y H. Evirgen, “A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies”, *Future Internet*, vol. 11, núm. 10, p. 216, oct. 2019, doi: 10.3390/fi11100216.

- [13] B. Miles, E.-B. Bourennane, S. Boucherkha, y S. Chikhi, “A study of LoRaWAN protocol performance for IoT applications in smart agriculture”, *Computer Communications*, vol. 164, pp. 148–157, dic. 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2020.10.009.
- [14] R. Cámara, “Diseño sistema de monitorización remota de un deposito de agua mediante LoRa.”, Universitat Oberta de Catalunya, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/97127/8/radriandTFM0619memoria.pdf>
- [15] F. J. Grion, G. O. Petracca, D. F. Lipuma, y E. R. Amigo, “LoRa network coverage evaluation in urban and densely urban environment simulation and validation tests in Autonomous City of Buenos Aires”, en *2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, Mar del Plata, sep. 2017, pp. 1–5. doi: 10.23919/RPIC.2017.8214345.
- [16] P. A. Barro, M. Zennaro, J. Degila, y E. Pietrosevoli, “A smart cities LoRaWAN network based on autonomous base stations (BS) for some countries with limited internet access”, *Future Internet*, vol. 11, núm. 4, p. 12, 2019, doi: 10.3390/FI11040093.
- [17] A. Toro, “Análisis de tecnologías de comunicaciones inalámbricas para determinar la mejor opción a implementar para los servicios que presta la DITG-EAAB”, Universidad Santo Tomás de Aquino, Bogotá, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11634/20741>
- [18] Z. Ali, S. Henna, A. Akhuzada, M. Raza, y S. W. Kim, “Performance Evaluation of LoRaWAN for Green Internet of Things”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 164102–164112, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2943720.
- [19] M. Moya, “Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos”, Master Universitario, Universidad Politécnica de Valencia España, Valencia, 2018.
- [20] C. Sarmiento y C. Liseth, “Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en ambientes urbanos”, oct. 2018, Consultado: el 25 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31513>
- [21] U. Coutaud, M. Heusse, y B. Tourancheau, “LoRa Channel Characterization for Flexible and High Reliability Adaptive Data Rate in Multiple Gateways Networks”, *Computers*, vol. 10, núm. 4, p. 44, abr. 2021, doi: 10.3390/computers10040044.
- [22] R. Fujdiak, P. Mlynek, J. Misurec, y M. Strajt, “Simulated Coverage Estimation of Single Gateway LoRaWAN Network”, en *2018 25th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, jun. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/IWSSIP.2018.8439232.
- [23] P. Kulkarni, Q. O. A. Hakim, y A. Lakas, “Experimental Evaluation of a Campus-Deployed IoT Network Using LoRa”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, núm. 5, pp. 2803–2811, mar. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2019.2953572.
- [24] S. Mnguni, P. Mudali, N. Sibeko, y M. O. Adigun, “LoRa Gateway Placement at the University of Zululand: A Case Study”, en *2019 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets)*, dic. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/SmartNets48225.2019.9069762.
- [25] “Misión y Visión – Universidad de San Buenaventura”. <https://www.usbbog.edu.co/universidad/mision-vision/> (consultado el 18 de mayo de 2022).

- [26] A. D. Zayas y P. Merino, “The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things”, en *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, may 2017, pp. 277–282. doi: 10.1109/ICCW.2017.7962670.
- [27] A. Lavric, A. I. Petrariu, y V. Popa, “Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis Under Large-Scale, High-Density Conditions”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35816–35825, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903157.
- [28] SIGFOX, “SIGFOX”, 2021. <https://www.sigfox.com/en> (consultado el 31 de mayo de 2021).
- [29] B. Vejlgard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, y M. Sorensen, “Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT”, en *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, jun. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCSpring.2017.8108666.
- [30] “Hassan - Internet of Things.pdf”.
- [31] Qusay F Hassan, Atta ur Rehman Khan, y Sajjad Madani, *Internet of Things Challenges, Advances and Applications*, Second. Taylor & Francis Group, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://lccn.loc.gov/2017055385>
- [32] “Ikpehai et al. - 2019 - Low-Power Wide Area Network Technologies for Inter.pdf”.
- [33] SEMTECH, “Semtech LoRa Technology Overview”, *SEMTECH*, 2021. <https://www.semtech.com/lora> (consultado el 21 de junio de 2021).
- [34] “an1200.22 LoRa Modulation Basics.pdf”.
- [35] O. Seller, D. G. Rascon, y J. Knapp, “Université Savoie Mont Blanc : Florent Lorne, Antoine Augagneur, Marie-Line Fournier”, p. 140.
- [36] M. A. M. Latorre, L. M. B. Márquez, y J. Hernández-Gutiérrez, “Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT.”, p. 32.
- [37] L. E. Bullian y C. Urbina, “Implementación de una red LoRa en el ámbito de la Universidad Nacional de San Martín.”, p. 64.
- [38] LoRa Alliance, “What is LoRaWAN® Specification”, LoRa Alliance, nov. 2015. Consultado: el 21 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
- [39] “LoRa — LoRa documentation”. <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#range-vs-power> (consultado el 11 de mayo de 2022).
- [40] “lora_part8.pdf”. Consultado: el 19 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.mobilefish.com/download/lora/lora_part8.pdf
- [41] “LoRa — LoRa documentation”. <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#decrypt-raw-lorawan-packets> (consultado el 19 de mayo de 2022).
- [43] W. Gosling, *Radio antennas and propagation*. Oxford ; Boston: Newnes, 1998.
- [44] “Snapshot”. Consultado: el 7 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/>
- [45] “RAK7246G WisGate Developer D0 Gateway Datasheet | RAKwireless Documentation Center”. Consultado: el 20 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7246G/Datasheet/#hardware>
- [46] “Snapshot”. Consultado: el 4 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.dropbox.com/sh/215vovi4b34wpnu/AAACejaLEj6UJI4Ugpmtx_Daa?dl=0&preview=LPS8N_LoRaWAN_Gateway_User_Manual_v1.0.pdf

- [47] “Snapshot”. Consultado: el 4 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://estore.st.com/en/stm32g0c1e-ev-cpn.html>
- [48] Info, “WIFI LoRa 32 (V2)”, *Heltec Automation*. <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/> (consultado el 4 de junio de 2022).
- [49] “1912141446_ZIISOR-TX915-JKD-20_C468328.pdf”. Consultado: el 2 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1912141446_ZIISOR-TX915-JKD-20_C468328.pdf
- [50] “FSW-K160R_ac_en_3606-8708-92_v0100.pdf”. Consultado: el 7 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/pdfs/FSW-K160R_ac_en_3606-8708-92_v0100.pdf
- [51] José Macias, Harold Pinilla, Wilder Castellanos, José David Alvarado, y Andrés Sanchez, “Diseño e Implementación de un gateway IoT Multiprotocolo”, Bogotá, Colombia, nov. 2019, vol. 13. [En línea]. Disponible en: <http://comunidad.udistrital.edu.co/ciect14/files/2019/11/Memorias-CIECT-XIV.pdf>
- [52] Alfa IoT, “NBIOT vs LoRaWAN vs Sigfox - AlfaIoT”, *Alfa IoT*, 2021. <https://alfaiot.com/vs/nbiot-lorawan-sigfox/> (consultado el 18 de mayo de 2021).
- [53] GOLD JOHN, “2021: el año del despegue de IoT, según Forrester | Tecnología | Computerworld University”, *COMPUTERWORLD UNIVERSITY*, nov. 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.computerworlduniversity.es/tecnologia/2021-el-ano-del-despegue-de-iot-segun-forrester>
- [54] D. Loukatos, I. Manolopoulos, E.-S. Arvaniti, K. G. Arvanitis, y N. A. Sigrimis, “Experimental Testbed for Monitoring the Energy Requirements of LPWAN Equipped Sensor Nodes”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, núm. 17, pp. 309–313, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.196.
- [55] J. Dias y A. Grilo, “LoRaWAN multi-hop uplink extension”, *Procedia Computer Science*, vol. 130, pp. 424–431, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.04.063.
- [56] L. Bao *et al.*, “Coverage Analysis on NB-IoT and LoRa in Power Wireless Private Network”, *Procedia Computer Science*, vol. 131, pp. 1032–1038, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.04.252.
- [57] M. El-Aasser, P. Edward, M. Mandour, M. Ashour, y T. Elshabrawy, “A comprehensive hybrid bit-level and packet-level LoRa-LPWAN simulation model”, *Internet of Things*, vol. 14, p. 100386, jun. 2021, doi: 10.1016/j.iot.2021.100386.
- [58] Accent Systems, “NB-IoT, la nueva revolución del mundo conectado”, *Accent Systems*, 2021. <https://accent-systems.com/es/nb-iot/> (consultado el 31 de mayo de 2021).
- [59] LoRa Alliance, “About LoRa Alliance®”, *LoRa Alliance®*. <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/> (consultado el 21 de junio de 2021).
- [60] “RP_2-1.0.2.pdf”. Consultado: el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/RP_2-1.0.2.pdf
- [61] “RP-2-1.0.3.pdf”. Consultado: el 4 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2021/05/RP-2-1.0.3.pdf>

- [62] “Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance”, *Digi-Key Electronics*. <https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications> (consultado el 4 de mayo de 2022).
- [63] “How can I set spreading factor (SF) to SF12BW125”, *The Things Network*, el 27 de octubre de 2020. <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/how-can-i-set-spreading-factor-sf-to-sf12bw125/40898> (consultado el 7 de mayo de 2022).
- [64] J. Bardwell, “Converting Signal Strength Percentage to dBm Values”, p. 12.
- [65] The Things Network, *LoRa crash course by Thomas Telkamp*, (el 10 de noviembre de 2016). Consultado: el 11 de mayo de 2022. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=T3dGLqZrjIQ>
- [66] *LoRa crash course by Thomas Telkamp*. Consultado: el 11 de mayo de 2022. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=T3dGLqZrjIQ>
- [67] The Things Network, *LoRa crash course by Thomas Telkamp*, (el 10 de noviembre de 2016). Consultado: el 11 de mayo de 2022. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=T3dGLqZrjIQ>
- [68] “(29) LoRa crash course by Thomas Telkamp - YouTube”. <https://www.youtube.com/watch?v=T3dGLqZrjIQ> (consultado el 11 de mayo de 2022).
- [69] “SX1308 | Digital Baseband Chip indoor LoRaWAN™ pico gateways | Semtech”. <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1308#download-resources> (consultado el 11 de mayo de 2022).
- [70] “LoRa — LoRa documentation”. <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#decrypt-raw-lorawan-packets> (consultado el 11 de mayo de 2022).
- [71] H. Kwame y S. Ekin, “RSSI-Based Localization Using LoRaWAN Technology”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99856–99866, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929212.
- [72] “RAKARJ16 915MHz Black Blade Antenna Datasheet | RAKwireless Documentation Center”. <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/Accessories/RAKARJ16/Datasheet/#overview> (consultado el 12 de mayo de 2022).