



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE PARQUEO INTELIGENTE PARA EL CENTRO
HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUENCA, APLICANDO UNA RED LPWAN**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero/a Electrónico/a

AUTORES: DIEGO HUMBERTO CUZCO TORRES
SILVANA JANNETH PINOS CARANGUI
TUTOR: ING. JACK FERNANDO BRAVO TORRES, Ph.D.

Cuenca - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Diego Humberto Cuzco Torres con documento de identificación N° 0302569256 y Silvana Janneth Pinos Carangui con documento de identificación N° 0301967287; manifestamos que:

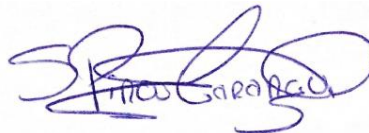
Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 08 de abril del 2022

Atentamente,



Diego Humberto Cuzco Torres
0302569256



Silvana Janneth Pinos Carangui
0301967287

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Diego Humberto Cuzco Torres con documento de identificación N° 0302569256 y Silvana Janneth Pinos Carangui con documento de identificación N° 0301967287, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Diseño de un sistema de parqueo inteligente para el centro histórico de la ciudad de Cuenca, aplicando una red LPWAN”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero/a Electrónico/a, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 08 de abril del 2022

Atentamente,



Diego Humberto Cuzco Torres
0302569256



Silvana Janneth Pinos Carangui
0301967287

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jack Fernando Bravo Torres con documento de identificación N° 1103708697, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN SISTEMA DE PARQUEO INTELIGENTE PARA EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUENCA, APLICANDO UNA RED LPWAN, realizado por Diego Humberto Cuzco Torres con documento de identificación N° 0302569256 y por Silvana Janneth Pinos Carangui con documento de identificación N° 0301967287, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 08 de abril del 2022

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**JACK FERNANDO
BRAVO TORRES**

Ing. Jack Fernando Bravo Torres, Ph.D.

1103708697

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen por cuidarme a lo largo de todo esta etapa, brindarme el conocimiento y sabiduría para afrontar las adversidades que se han presentado. A mis padres, hermana y sobrina, pilares fundamentales, por brindarme todo el apoyo y amor incondicional en mi formación profesional y en toda mi vida. A mi familia por estar pendientes de mí y por el apoyo brindado.

A los docentes y personal de la Universidad Politécnica Salesiana con los que he coincidido, por compartir sus conocimientos y ser un gran aporte en mi formación, de manera especial al Ing. Jack Bravo, director de tesis y al Ing. Juan Inga, como cotutor, por su amable colaboración y guía para el desarrollo y culminación exitosa de este trabajo. A la empresa EMOV por la facilidad en brindarnos la información necesaria para el desarrollo de este trabajo de titulación.

A todas las personas y amig@s que han sido parte de este proceso y que me han brindado siempre su apoyo. Mención especial a Jennifer y Fabián.

Diego Cuzco

Quiero expresar mi agradecimiento a Dios por guiarme con amor y sabiduría a lo largo de mi vida y sobre todo expresarle mi gratitud porque nunca me ha dejado sola. Agradezco también a mis padres, hermanos y familiares por su apoyo, consejos y confianza que cada día me motivaron a seguir luchando por mis metas las cuales me han ayudado a culminar mis estudios universitarios.

Gracias también a los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, por la formación académica y moral brindada a lo largo de mi preparación profesional. De manera especial, al Dr. Ing. Jack Fernando Bravo Torres tutor de nuestro Trabajo de Titulación e Ing. Juan Paul Inga Ortega colaborador del mismo, quienes nos han guiado con paciencia y conocimientos para la culminación de este Proyecto.

Silvana Pinos

DEDICATORIAS

Este trabajo de titulación va dedicado a Dios y la Virgen por su infinita bondad y por cuidarme siempre. A mis padres, por su apoyo y motivación constante para la culminación exitosa de esta etapa.

Diego Cuzco

Este trabajo va dedicado a Dios, a mis padres y hermanos por estar presentes en mi vida y por ser el pilar fundamental tanto en mi crecimiento personal como profesional porque con su amor, confianza y apoyo han sido mi soporte ante cualquier adversidad. Les dedico este triunfo como gratitud porque nunca han dejado de creer en mí y sobre todo hoy en día son mi mayor fuerza para seguir luchando por mis sueños.

Silvana Pinos

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIAS	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN	X
<i>CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i>	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes del problema de estudio	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
<i>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</i>	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Internet de las cosas	5
2.3. Red de sensores inalámbricos WSN	6
2.4. Redes LPWAN	6
2.4.1. ¿Por qué LoRaWAN?	8
2.5. LoRa	9
2.6. LoRaWAN.....	9
2.6.1. Arquitectura	10
2.6.2. Topología	11
2.6.3. Clases LoRaWAN.....	12
2.6.4. Métodos de activación de dispositivos finales.....	12
2.7. Implementaciones de parqueo inteligente aplicando LoRaWAN	13
<i>CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA DE RED</i>	15
3.1. Introducción.....	15
3.2. Delimitación del SERT en el centro histórico.	16
3.3. Tecnologías habilitadoras	17
3.3.1. Comparativa de sensores Smart Parking	18
3.3.2. Sensor Smart Parking Libelium	19
3.3.2.1. Hardware	19

3.3.2.2.	Consumo de energía y tiempo	20
3.3.2.3.	Configuración del nodo Smart Parking	21
3.3.2.4.	Funcionamiento del nodo	22
3.3.2.5.	Parámetros del nodo Smart parking Libelium.....	23
3.3.3.	Comparativa de concentradores LoRaWAN	24
3.4.	Diseño y planificación de la red	26
3.4.1.	Zonas delimitadas	26
3.4.2.	Ubicación de los sensores	27
3.4.3.	Topología	28
3.4.4.	Dimensionamiento de la red de sensores inalámbricos WSN	29
3.4.4.1.	Descripción del modelo.....	31
3.4.5.	Escenario original	34
3.4.6.	Escenario optimizado.....	36
3.4.7.	Seguridad	37
3.4.8.	Funcionamiento de la infraestructura de red.....	39
3.1.	Planificación	40
	<i>CAPÍTULO 4: ESTUDIO ECONÓMICO.....</i>	<i>44</i>
4.1.	Introducción.....	44
4.2.	Balance económico.....	44
4.2.1.	Balance sin proyecto	44
4.2.2.	VAN y TIR sin la implementación del proyecto	46
4.2.3.	Balance con proyecto.....	47
4.2.4.	VAN y TIR con la implementación del proyecto	52
4.3.	Resultados del VAN y TIR.....	53
	<i>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</i>	<i>55</i>
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
	ANEXOS.....	63
	ANEXO 1: Escenario original y optimizado para las zonas 2,3 y 4.....	63
	ANEXO 2: Infracciones emitidas por la EMOV	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Red de sensores inalámbricos.	6
Figura 2.2 Posicionamiento LPWAN entre tecnologías de comunicación por radio: Rango de alcance velocidad de datos.....	7
Tabla 2.2 Asignaciones de LoRa en Europa y Norteamérica.....	9
Figura 2.3 Pila de funcionamiento.....	10
Figura 2.4 Arquitectura LoRaWAN.	10
Figura 2.5 Topología de una red LoRaWAN.	11
Figura 3.1 Delimitación y zonas de parqueo en el centro histórico.	17
Figura 3.2 Base y recinto externo de un nodo Smart parking Libelium.....	19
Figura 3.3 Dimensiones del recinto.....	20
Figura 3.4 Indicador del estado “listo para instalar”.	21
Figura 3.5 Proceso para el cierre del nodo Smart parking.....	22
Figura 3.6 Proceso de arranque magnético del nodo Smart parking.	22
Figura 3.7 Ubicación del sensor.	27
Figura 3.8 Topología general de la red.....	28
Figura 3.9 Proceso de aplicación del modelo capacidad – cobertura.....	30
Figura 3.10 Área cuadrada en un espacio abierto de dimensiones $L \times Lm$	31
Figura 3.11 Georreferenciación de sitios candidatos.	33
Figura 3.12 Sitios totales de parqueo georreferenciados y ubicados por cada zona. .	34
Figura 3.13 Escenario original para la zona 1. Radio de cobertura de 180m.....	35
Figura 3.14 Escenario optimizado para la zona 1. Radio de cobertura de 180m.	36
Figura 3.15 Seguridad en LoRaWAN.	38
Figura 3.16 Infraestructura de la red planteada.	39
Figura 3.17 Radio de cobertura vs N concentradores para cada zona.	41
Figura 3.18 Radio de cobertura vs N concentradores totales para el centro histórico.	41
Figura 4.2 VAN sin y con proyecto.....	53
Figura 4.3 TIR sin y con proyecto.....	54
Figura 3.21 Escenario original para la zona 2. Radio de cobertura de 180m.....	63
Figura 3.22 Escenario original para la zona 3. Radio de cobertura de 180m.....	64
Figura 3.23 Escenario original para la zona 4. Radio de cobertura de 180m.....	66

Figura 3.24 Escenario optimizado para la zona 2. Radio de cobertura de 180m.	67
Figura 3.25 Escenario optimizado para la zona 3. Radio de cobertura de 180m.	68
Figura 3.26 Escenario optimizado para la zona 4. Radio de cobertura de 180m.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación de tecnologías LPWAN: Sigfox vs LoRaWAN.....	7
Tabla 3.1 Especificaciones técnicas de sensores de parqueo inteligente.	18
Tabla 3.2 Consumo de energía y tiempo del nodo LoRaWAN versión US.....	20
Tabla 3.3 Marco de enlace ascendente.	23
Tabla 3.4 Marco de enlace descendente.	23
Tabla 3.5 Parámetros del nodo.	23
Tabla 3.6 Comparación técnica de equipos concentradores.....	25
Tabla 3.7 División por zonas en el centro histórico de Cuenca.	27
Tabla 3.8 Número de sitios de parqueo por cada zona.	27
Tabla 3.9 Ubicación sitios candidatos para concentradores – zona 1.	35
Tabla 3.10 Ubicación final de los concentradores en la zona 1.	37
Tabla 4.1 Ingresos anuales de la empresa EMOV para el centro histórico.	45
Tabla 4.2 Egresos anuales de la empresa EMOV para el centro histórico.....	45
Tabla 4.3 Utilidad o ganancia de la empresa EMOV en el año 2021.....	46
Tabla 4.4 Inversión de la empresa EMOV-EP.	46
Tabla 4.5 Valor residual y depreciación sin proyecto.	47
Tabla 4.6 Flujo de fondos sin proyecto.	47
Tabla 4.7 VAN y TIR sin proyecto.	47
Tabla 4.8 Ingresos anuales de la EMOV para el centro histórico.	47
Tabla 4.9 Egresos por mantenimiento de la red.	48
Tabla 4.10 Egresos por arrendamiento de local.	48
Tabla 4.11 Egresos totales con proyecto.	49
Tabla 4.12 Ganancia con el proyecto.	49
Tabla 4.13 Inversión en equipos.....	49
Tabla 4.14 Inversión en operadores de maquinaria.....	50
Tabla 4.15 Tiempo de instalación.....	51
Tabla 4.16 Inversión en programación de nodos y concentradores.	51
Tabla 4.17 Inversión en programación y gestión de plataforma.	51
Tabla 4.18 Inversión total del proyecto.	52

Tabla 4.19 Valor residual y depreciación sin proyecto.	52
Tabla 4.20 Flujo de fondos con proyecto.	52
Tabla 4.21 VAN y TIR con proyecto.	53
Tabla 3.11 Ubicación de los sitios candidatos – zona 2	63
Tabla 3.12 Ubicación de los sitios candidatos – zona 3.	65
Tabla 3.13 Ubicación de los sitios candidatos – zona 4.	66
Tabla 3.14 Ubicación de los sitios óptimos – zona 2.	67
Tabla 3.15 Ubicación de los sitios óptimos – zona 3.	68
Tabla 3.16 Ubicación de los sitios óptimos – zona 4.	69

GLOSARIO

IoT	Internet de las cosas
LPWAN	Red de área amplia de baja potencia
LoRa	Largo alcance
LoRaWAN	Red de área amplia y largo alcance
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
ISM	Industrial, científico, médico
ETSI	Instituto Europeo de Telecomunicaciones
CSS	Espectro ensanchado por Chirp extendido
AES	Estándar de encriptación avanzada
OSI	Modelo de interconexión de sistemas abiertos
MAC	Control de acceso a medios
SERT	Servicio de estacionamiento rotativo tarifado.
WSN	Red de sensores inalámbricos
DAP	Punto de acceso de datos
OTAA	Activación por aire
ABP	Activación por personalización

RESUMEN

Los problemas ocasionados por el aumento de tráfico y la restricción de movilidad en las grandes ciudades del país y el mundo, ha ocasionado que aparezcan diversas propuestas de soluciones mediante la aplicación de las nuevas tecnologías inalámbricas.

En el presente trabajo de titulación se propone el diseño de un sistema de parqueo inteligente que permita la administración y gestión automatizada de los sitios de estacionamiento y el mejoramiento del tráfico en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, basado en tecnologías que proporcionen gran alcance de cobertura y sobre todo un bajo consumo de energía, para lo cual, las redes LPWAN son las que cumplen satisfactoriamente estos requerimientos.

Este documento estructurado en cinco capítulos: en el primero, se presenta la introducción que pone en contexto la problemática, sus causas, efectos y la solución que se plantea, además, los antecedentes y los objetivos. En el segundo, se hace una revisión de la fundamentación teórica de conceptos sobre el internet de las cosas, redes de sensores inalámbricos, redes LPWAN, LoRa y LoRaWAN, también una revisión del estado del arte de implementaciones de sistemas de parqueo en algunos sitios del mundo utilizando estas tecnologías. Por otra parte, el diseño se lo desarrolla dentro del capítulo tres, describiendo detalles como; la delimitación e identificación de zonas de parqueo en el centro histórico, tecnologías habilitadoras, algoritmo de optimización, seguridad, funcionamiento y planificación de la red. En el cuarto capítulo, se muestra un estudio económico que permita dar un amplio análisis de viabilidad en caso que a futuro se pretenda la implementación del proyecto, mediante la obtención del VAN y la TIR. Por último, en el quinto capítulo se presenta las conclusiones y recomendaciones sobre futuros trabajos que se pretendan realizar a partir del diseño propuesto.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Introducción

El presente trabajo pretende innovar en el área de la electrónica y de las telecomunicaciones, mediante la aplicación de tecnología emergente en el ámbito del IoT, como es LoRa, cuyas características apuntan a requerimientos como la comunicación de largo alcance, bajo consumo, tasa de datos baja, seguridad en conexiones bidireccionales y servicios de localización y movilidad [1][2].

Con esto se busca mejorar los problemas de movilidad que se presentan en el centro histórico de Cuenca. Dichos problemas surgen por vehículos que buscan una plaza de parqueo; lo que desencadena en ansiedad, tiempo perdido, atrasos innecesarios, gastos económicos (multas, combustible) y de forma indirecta, una mayor contaminación en el centro de la ciudad. Adicional, si no existe la correcta señalización de los sitios, supondrá los problemas mencionados.

Apoyado en el desarrollo tecnológico actual y de metodologías como la investigativa y cuantitativa, una de las soluciones que se plantea es el diseño de un sistema de parqueo inteligente que permita una administración automatizada y más eficaz de los sitios de estacionamiento y, por tanto, exista una mejor movilidad y planificación urbana. Esta solución además de reducir el tráfico en la ciudad y brindar un buen servicio a los usuarios, presenta ciertos beneficios extras como la reducción de gases contaminantes, ahorro de tiempo, disminución de gastos de combustible y gastos económicos, reducción de la contaminación acústica, aumento de ingresos, etc.

1.2. Antecedentes del problema de estudio

La ciudad de Cuenca tiene un alto índice de crecimiento tanto en términos de población como de vehículos motorizados, a la fecha de la investigación se tiene aproximadamente 580000 habitantes y más de 112000 automotores [3] [4]. Es decir, por cada 5 personas aproximadamente, un vehículo circula por el centro de la ciudad, desencadenando problemas de movilidad y tráfico, ya que, muchas de las veces estos se producen exclusivamente por la búsqueda de sitios de estacionamiento disponibles.

En [5], se estima que “diez minutos buscando aparcamiento varias veces al día significan más de 240 horas al año y un promedio de 700 días completos en su vida”. Además, que para el año 2050, el 66% de la población mundial vivirá en áreas urbanas, por lo que se requiere nuevos planes de movilidad.

Por tanto, hoy en día, las redes inalámbricas son una posible solución a dichos problemas, pues proporcionan conexiones de gran alcance, por lo que las empresas optan por usar la mejor tecnología que permita la conexión de sus productos o dispositivos hacia el Internet. Así, en el país, el 80% de la población tiene acceso al Internet, lo que representa unos 13.8 millones de usuarios, según un informe de “Estado Digital Ecuador 2020”. Una cifra que varía en casi el 40%, si se compara con la estadística del Ministerio de Telecomunicaciones de diciembre de 2013, que reflejaba que, en los datos de acceso a la red de Internet, estaba el 40.4% de la población [6].

Este avance ha permitido que los ecuatorianos tengan la oportunidad de aplicar el uso de las nuevas tecnologías en su diario vivir, a partir de dispositivos que funcionan como asistentes, lo que se denomina “Internet de las cosas”. Un claro ejemplo en la que se puede aplicar es en los sistemas de monitoreo, cuyas funciones permiten a los dispositivos conocer acciones que suceden en un entorno y de esta manera poder llevar a cabo ciertas acciones. Esto se logra mediante la interconexión de redes de sensores o circuitos integrados que permitan la recolección e intercambio de información entre los equipos, aplicaciones o el internet [6].

Esta realidad está llevando, cada vez más, a que las sociedades aprovechen las ventajas que ofrecen estos sistemas electrónicos para mejorar la calidad de vida. En este sentido,

en la actualidad, se está dando paso al desarrollo de las denominadas ciudades inteligentes, las cuales, si bien es un concepto muy amplio, tienden en parte, a hacer uso de tecnología para mejorar la experiencia de los ciudadanos. En la literatura, se puede apreciar múltiples propuestas de aplicaciones orientadas al mejoramiento del tránsito de la ciudad, en la seguridad de los peatones, o en la integración de los establecimientos y sectores culturales a los quehaceres diarios de los ciudadanos; todo esto, en una única aplicación que facilita su vida.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Diseñar la infraestructura de red para un sistema de parqueo inteligente en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, aplicando la tecnología LoRa.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar la estructura de sensado y ubicación de nodos en el centro histórico de Cuenca para el monitoreo de las plazas de parqueo.
- Diseñar la etapa de sensado, adquisición y transmisión de datos del sistema de parqueo.
- Realizar un estudio técnico – económico de factibilidad para la implementación del sistema de parqueo en el centro histórico de Cuenca.
- Diseñar el prototipo para el sistema de parqueo inteligente.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este capítulo se estudia los conceptos generales de IoT, las redes de sensores inalámbricos, redes LPWAN, LoRa, el protocolo LoRaWAN y la implementación de sistemas de parqueo inteligente aplicando esta tecnología.

2.1. Introducción

El IoT se ha convertido en un aspecto determinante de la evolución tecnológica, siendo considerada como una plataforma fundamental de la denominada Cuarta Revolución Industrial [7] [8]. El auge que presenta ha supuesto un aumento considerable en la cantidad de dispositivos conectados en múltiples aplicaciones como; agricultura, SmartCities, salud, domótica, monitoreo industrial, entre otros.

Esto ha generado un campo de estudio amplio, que busca mejorar la calidad en el proceso de acceso al internet y por tanto una mejor calidad de vida. Actualmente, existen soluciones de IoT que presentan grandes disminuciones en términos de gastos energéticos en una ciudad hasta en 46% y el aumento de la vida útil de las baterías en 8 años [9].

Los desafíos generados por la gran cantidad de dispositivos conectados a través de la red, han ocasionado la aparición de múltiples tecnologías que buscan que, además de generar comunicaciones bidireccionales seguras, proporcionen escalabilidad y movilidad. Como una alternativa, aparecen las redes LPWAN, cuyo objetivo se centra en proporcionar soluciones de IoT a gran escala permitiendo la ubicuidad en las conexiones [8].

Inicialmente, estas soluciones se limitaban a redes celulares con alto consumo energético o a redes de corto alcance como como Wifi o Bluetooth, sin embargo, las características de los mensajes a compartir por estos dispositivos han permitido la aparición de nuevas tecnologías en el mercado como; LoRaWAN, Sigfox, LTE-M, Narrowband IoT, Ingenn, Telensa, Qowisio, Amazon Sidewalk, entre otros., estos son algunos de las tecnologías LPWAN que se han desarrollado y que demuestra la competitividad que existirá en el mercado entre estas redes [8] .

Hoy en día, gran parte de los desarrolladores que hacen uso de la tecnología LPWAN se han inclinado en la aplicación de LoRaWAN como una red de comunicación para la creación de soluciones, productos y servicios que crean oportunidades comerciales nuevas y sostenibles [10].

Un claro ejemplo de aplicación IoT usando la tecnología LoRaWAN se da en la implementación de sistemas de parqueo inteligente en varias ciudades del planeta, permitiendo una mejor movilidad, reducción de volúmenes de tráfico en 8%, emisiones de gases en 40%, tiempo empleado en 43% y km viajados en un 30% [5].

2.2. Internet de las cosas

La ITU en la recomendación ITU-T Y.2060, define a el IoT como: “infraestructura mundial para la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperabilidad de tecnologías de la información y la comunicación presentes y futuras” [11].

Tiene como objetivo principal la interconexión digital de diferentes dispositivos como sensores, lámparas, lavadoras, móviles, tabletas, actuadores, entre otros., de manera que se conforme una red comunicacional y permita realizar operaciones de forma automatizada [12]. Todo esto se logra a través de la conexión a internet y a los servidores en la nube.

Para alcanzar dicho objetivo, el IoT se centra sobre cuatro pilares fundamentales que son [13]:

- 1) **Sensores / dispositivos:** encargados de la recopilación de datos de un entorno cualquiera. Según su aplicación, un dispositivo tiene varios sensores conectados.
- 2) **Conectividad:** Los datos recolectados por los sensores se envían a una infraestructura en la nube, para ello, se utiliza diferentes tecnologías; alámbricas como Ethernet, o inalámbricas como las redes móviles o satelitales, Bluetooth, WI-FI, WAN, Zigbee, etc.
- 3) **Procesamiento de datos:** Una vez que los datos llegan a la nube, el software los procesa, verifica y realiza las correcciones en caso de ser necesarias.

- 4) **Interfaz de usuario:** Después del procesamiento de la información, esta se muestra a los usuarios a través de aplicaciones, mensajes de texto, video, etc.

2.3. Red de sensores inalámbricos WSN

Una red de sensores inalámbricos (WSN – Wireless Sensor Network), es un conjunto de miles dispositivos que se interconectan y distribuyen físicamente a través de un área geográfica, para el monitoreo, recolección, almacenamiento y comunicación de datos de forma inalámbrica [14]. Este conjunto de dispositivos se denominan nodos, donde dicha información se transmite a través de un Gateway conectado al Internet.

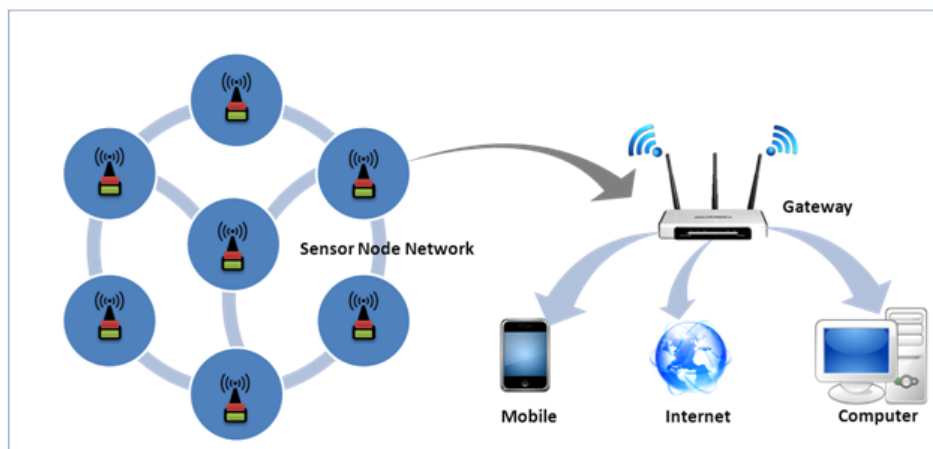


Figura 2.1 Red de sensores inalámbricos.

Fuente: [15]

2.4. Redes LPWAN

Las redes LPWAN son un tipo de red de comunicación inalámbrica, cuyas características técnicas destacan, el bajo consumo y el largo alcance geográfico (kilómetros), esto permite la conexión de los dispositivos por largos periodos de tiempo. El hecho de que esta tecnología se aplique en situaciones donde es necesario que la batería dure mucho, la transferencia de datos sea poca y el alcance sea extenso, hace la diferencia con respecto a otros protocolos de comunicación inalámbrica como Bluetooth, RFID, WIFI o Zigbee [16].

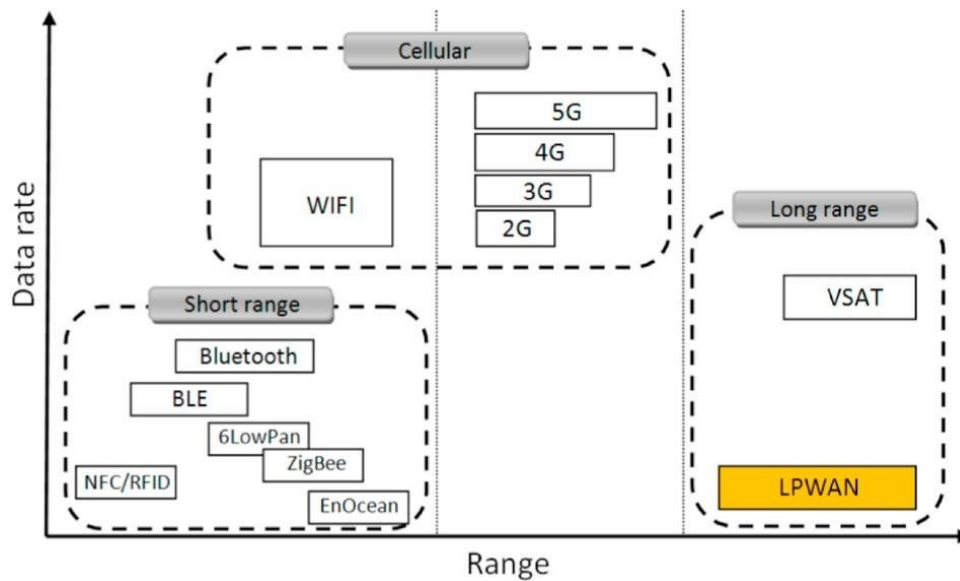


Figura 2.2 Posicionamiento LPWAN entre tecnologías de comunicación por radio: Rango de alcance velocidad de datos.

Fuente: [17]

LPWAN se desempeña sobre la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), es una banda no licenciada cuyos rangos de frecuencia para cada región son definidos por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) y el ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones). Por ejemplo, en Europa corresponde a la franja 867 y 869 MHz, en Estados Unidos se usa la franja 902 y 928 MHz, por lo que su uso depende directamente del lugar de ubicación [18].

El protocolo LPWAN tiene varias implementaciones, a continuación, se presenta una tabla con las propiedades de las tecnologías más utilizadas: Sigfox y LoRaWAN.

Tabla 2.1 Comparación de tecnologías LPWAN: Sigfox vs LoRaWAN [17].

	Sigfox	LoRaWAN
Modulation	BPSK	CSS
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America and 433 MHz in Asia)
Bandwidth	100 Hz	250 kHz and 125kHz
Maximum datarate	100 bps	50 kbps

Bidirectional	Limited / Half -duplex	Yes / Half -duplex
Maximum messages / day	140 (Uplink), 4 (Downlink)	Unlimited
Maximum payload length	12 bytes (Uplink), 8bytes (Downlink)	243 bytes
Range	10 km (urban), 40 km(rural)	5 km (urban), 20km (rural)
Interference immunity	Very high	Very high
Authentication& encryption	Not supported	Yes (AES 128b)
Adaptive datarate	No	Yes
Handover	End – devices do not join a single base station	End – devices do not join a single base station
Localization	Yes (RSSI)	Yes (TDOA)
Allow private network	No	Yes
Standardization	Sigfox Company is collaborating with ETSI on the standardization of Sigfox based network.	LoRa – Alliance

2.4.1. ¿Por qué LoRaWAN?

En base al análisis de las propiedades de cada una de las tecnologías LPWAN mencionadas en la tabla 2.1, la tecnología LoRaWAN presenta mayores ventajas para la propuesta, si bien las dos soluciones son de bajo costo y consumo energético, LoRaWAN permite una mayor transferencia de datos, posee encriptación, permite redes privadas y el número de mensajes que permite es ilimitado con respecto a la tecnología Sigfox que únicamente permite un número limitado de mensajes por día. Por estas características, LoRaWAN se posiciona como la solución a usar en el diseño del sistema de parqueo inteligente.

Físicamente estas redes constan de sensores de estacionamiento y coordinadores, los cuales reciben la información y se encargan de llevarlo hacia la nube.

2.5. LoRa

LoRa “Long Range” es una tecnología patentada por Semtech Corporation, se trata de una técnica de comunicación inalámbrica que se basa en la modulación de espectro ensanchado de chirp extendido (CSS), en la cual, la señal que se va a enviar utiliza mayor ancho de banda que el necesario teóricamente. Por tanto, presenta propiedades como un rango de comunicación muy amplio, bajo consumo de potencia, entre otros. LoRa robusta a las técnicas tradicionales de comunicación de espectro amplio [19].

Asociado a los niveles de la capa OSI, LoRa trabaja en la capa física y es completamente independiente de las implementaciones de capas superiores. Trabaja sobre la banda ISM, cuyos rangos de frecuencia y requerimientos reglamentarios varían de acuerdo a cada región. En la tabla 2.2 se observa las asignaciones de LoRa para Europa y Norteamérica.

Tabla 2.2 Asignaciones de LoRa en Europa y Norteamérica [20].

	Europa	Norteamérica
Banda de frecuencia	863 – 870 MHz	902-928 MHz
Canal de enlace ascendente	125/250 kHz	125/500 kHz
Canal de enlace descendente	125 kHz	500 kHz
Canales	10	64+8+8
Tx ON	+14 dBm	+30 dBm permitidos
Tx OFF	+14 dBm	+27 dBm
Velocidad de datos	250 bps – 50 kbps	980 bps – 21.9 kbps

LoRa es la tecnología de modulación que se usa en las redes LPWAN. Permite la transmisión de datos a bajo nivel entre dispositivos IoT, permite alcanzar grandes longitudes con un bajo consumo de energía y a una baja velocidad [20].

2.6. LoRaWAN

Es un protocolo de las redes LPWAN, recientemente aprobado oficialmente como estándar por la UIT, en la recomendación UIT-T Y4.4480 [21]. Este tipo de redes suelen construirse a partir de dispositivos electrónicos que forman parte del IoT y, por tanto, usan especificaciones como el consumo bajo y un largo rango de alcance.

Trabaja a nivel de capa 2, tomando en cuenta el modelo OSI. En este concepto, LoRaWAN se lo define como un protocolo MAC (Media Access Network), construido sobre la modulación LoRa [22]. LoRaWAN define la arquitectura y el protocolo de comunicación del sistema para la red, mientras que, LoRa habilita los enlaces de comunicación [20].

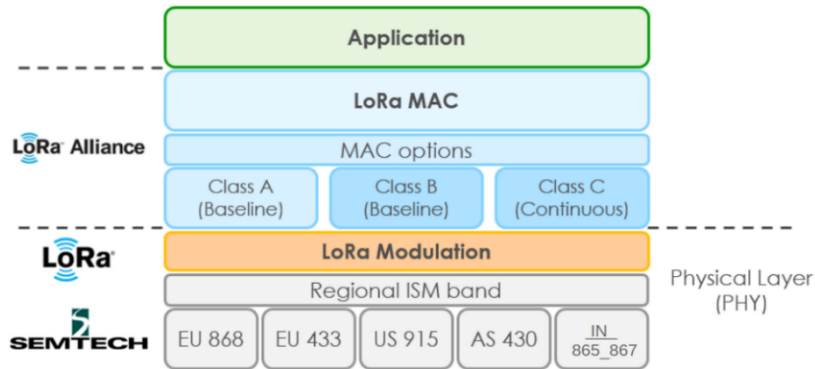


Figura 2.3 Pila de funcionamiento.

Fuente: [23]

2.6.1. Arquitectura

En la figura 2.4 se presenta la arquitectura clásica de una red LoRaWAN:

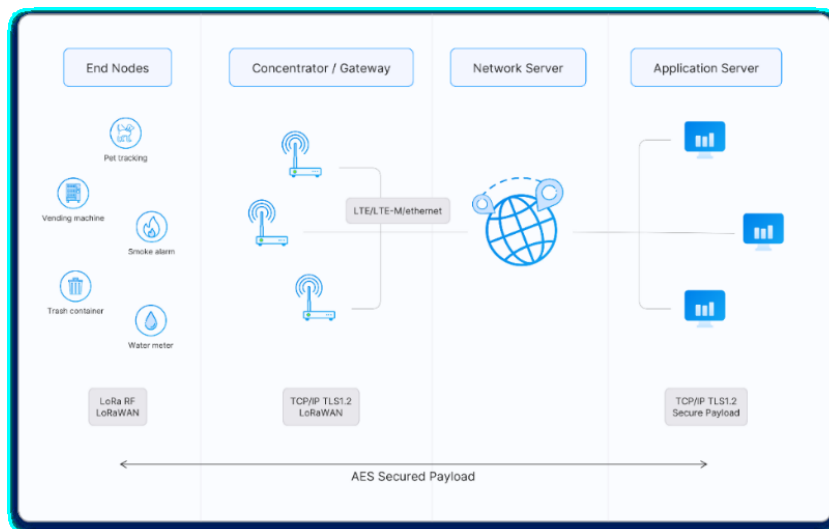


Figura 2.4 Arquitectura LoRaWAN.

Fuente: [22]

Como se observa, consta de:

- **Dispositivos finales:** generalmente sensores o actuadores, obtienen información del entorno y se conectan de forma inalámbrica a la red LoRaWAN.
- **Gateway o concentrador:** recibe los mensajes de los nodos y los reenvía al servidor de red LoRaWAN vía comunicación TCP/IP.
- **Servidor de red:** Enruta los mensajes desde los dispositivos finales por medio de una API, comunicación bidireccional.
- **Servidor de aplicaciones:** software por medio del cual el usuario final accede a la información.

2.6.2. Topología

LoRaWAN generalmente utiliza una topología de tipo estrella, pues cada uno de los nodos establecen una comunicación a uno o más coordinadores y no entre ellos, esta comunicación se realiza de forma asíncrona, es decir, se transmite cada que se tiene datos listos para enviar, siguiendo el protocolo ALOHA. A diferencia de la topología en malla, la de estrella permite un mejor aprovechamiento del consumo de las baterías, ya que los nodos no funcionan como repetidores, como si lo hacen en una topología en malla, lo que conlleva a un mayor consumo de energía.

En esta configuración, los equipos coordinadores se encargan de establecer el área de cobertura, que viene determinado por el alcance de radio.

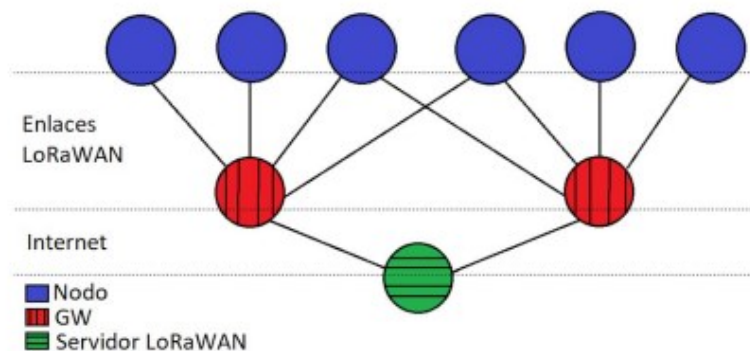


Figura 2.5 Topología de una red LoRaWAN.

Fuente: [24]

2.6.3. Clases LoRaWAN

En cuanto a los dispositivos finales que se pueden utilizar en una red LoRaWAN se dividen en tres clases y se describen a continuación:

- **Clase A:** basados en el protocolo ALOHA, es el sistema de dispositivo final de más bajo consumo. Utilizado en aplicaciones que requieren únicamente comunicación de enlace ascendente hacia el servidor, una ventana de enlace descendente se abre un tiempo luego de que el dispositivo final haya realizado una transmisión. Las comunicaciones de enlace descendente desde el servidor tienen que esperar hasta el siguiente enlace ascendente programado.
- **Clase B:** Posee ranuras de recepción programadas, se reciben mensajes en tiempos designados. Los concentradores envían una baliza de sincronización a los nodos, que se usan para sincronizar la apertura de ventanas de recepción adicionales.
- **Clase C:** Pueden iniciar la comunicación en cualquier momento de manera que genera un mayor gasto energético y son inadecuados para aplicaciones con baterías.

2.6.4. Métodos de activación de dispositivos finales

Para que los dispositivos finales se unan a una red LoRaWAN, estos deben ser personalizados y activados, para lograrlo se distinguen dos formas de activación: Over the air activation (OTAA) y Activation by personalization (ABP).

- **Over the air activation (OTAA)**

Es el método más seguro para la conexión a la red LoRaWAN y se da cuando se añade un nuevo dispositivo o se reinicia un dispositivo ya existente [25]. En este tipo de activación, los dispositivos finales siguen un proceso de unión, previo al intercambio de mensajes, para ello se necesita ciertos identificadores como el de dispositivo final único (DevEUI), identificador de aplicación (AppEUI) y una clave AES-128.

- **Activation by personalization (ABP)**

En el método más sencillo. El dispositivo se activa mediante su personalización, almacenando el identificador de la dirección del dispositivo (DevAddr) y de claves de sesión de red (NwkSKey) y clave de sesión de aplicación (AppSKey) en el dispositivo propio. Por tanto, una vez que se inicia, el dispositivo ya contiene la información para unirse a la red [26]. A diferencia del método OTAA, ABP no necesita unirse a la red previamente para el envío de información y la confirmación previa del servidor, pues la conexión se asigna de forma manual.

2.7. Implementaciones de parqueo inteligente aplicando LoRaWAN

En [27], se presenta una solución inteligente de parqueo para una playa de EEUU, St. Pete Beach, conjuntamente con Conure se colocó 750 nodos de Smart Parking de Libelium con tecnología LoRaWAN en cuatro de sus calles principales entre ellas: 9th Avenue, Gulf Way South, Pass-a-Grille Way and Gulf Way North, de manera que turistas y gestores puedan conocer la disponibilidad de aparcamiento. Cada sensor detecta la ocupación de la plaza, la información se transmite a la nube de Conure, esta se transmite a la aplicación móvil y a la página web d St. Pete Beach, en donde se actualiza la información en tiempo real. El modelo se encuentra en prueba por un año y si tiene éxito se expandirá a otras playas continuando con Upham Beach.

Otro ejemplo, en [28] se implementó en Montpellier un proyecto Smart Parking para aliviar la congestión del tráfico y reducir la búsqueda de aparcamientos. Con apoyo de la empresa Synox, se ha desarrollado la solución inteligente empleando tecnología Libelium, denominada “Connected Parking”. Las bases se sentaron en la Metrópolis Mediterránea de Montpellier usando el protocolo de comunicación LoRaWAN, para ello la empresa instaló antenas LoRaWAN en zonas estratégicas del área urbana para dar cobertura a próximos proyectos de SmartCities.

Se instaló específicamente 20 nodos de Smart Parking en dos áreas diferentes de la ciudad; seis alrededor del Hotel de Ville de Montpellier, y el resto en el cercano distrito de Parc Marianne. Inicialmente, se instaló en dichas zonas para personas con movilidad

reducida y servicios de entrega. A futuro se prevé la instalación de nodos en toda las Metrópolis.

Otro ejemplo en [29], es SmartParkUdeA, este sistema se basa en tecnología IoT y fue implementado en la Universidad de Antioquia en Medellín. La universidad presenta un ingreso diario de 3315 vehículos en promedio, por lo tanto, el congestionamiento de tráfico era muy grande. SmartParkU-de A propone la implementación de nodos con sensores, estos sensores magnéticos se instalaron en cada celda de parqueo las cuales se comunican mediante LoRaWAN.

El sistema además cuenta con una aplicación de software, la cual recolecta datos del estado de las celdas en tiempo real, muestra el número de celdas disponibles en la zona, captura los datos estadísticos sobre el uso del estacionamiento en una interfaz web y permitir cambiar el perfil energético de los dispositivos. Todo este proceso es llevado a cabo mediante el uso de los cuatro módulos principales que fueron usados: Frontend, Backend, servicio externo The Things Network y el IoT Hardware Board.

En [30], se presenta eXactpark, este proyecto fue implementado por una empresa con sede en Waterloo, Ontario, para reducir el estacionamiento en ciudades abarrotadas con tecnología de estacionamiento inteligente. eXactpark se basa en un sensor de ocupación de puestos pendiente de patente, que indica si existe o no un vehículo en el puesto y de esta manera ayuda a los conductores a encontrar lugares disponibles, simplificando también la cantidad de gases de efecto invernadero que se liberan al medio ambiente, la solución utiliza LoRaWAN.

Para ello, se instalaron los sensores inteligentes en cada puesto de estacionamiento de la ciudad para adaptarse a climas nevados y lluviosos. El sensor puede detectar cuando un automóvil entra en el lugar de estacionamiento y se estaciona. Posterior, los datos se envían a la red inalámbrica de eleven-x, se suben a la nube y se cargan en el software que la empresa proporciona a la ciudad para el análisis del tablero o se muestran en letreros digitales.

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA DE RED

3.1. Introducción

En este capítulo, se presenta el diseño y dimensionamiento de la infraestructura de red del sistema de parqueo inteligente para el centro histórico de la ciudad de Cuenca, para ello, primeramente, se identifica cada una de las calles del centro histórico que cuentan con el SERT. Posterior, se selecciona la tecnología habilitadora, analizando las especificaciones técnicas de tres tipos de sensores de parqueo y concentradores que manejen el protocolo LoRaWAN y que se adapten técnicamente al escenario de estudio planteado.

Para el diseño, se utiliza un modelo de dimensionamiento y optimización basado en la capacidad y la cobertura de la red. En el centro histórico, la cantidad de sitios de parqueo son de 1421 y se plantea 78 sitios candidatos en total para la colocación de los concentradores.

Desde esa perspectiva, se propone segmentar el área de estudio en cuatro zonas (Ver figura 3.1), de manera que el problema sea más pequeño y pueda ser solucionado usando modelos lineales de optimización ya que, si la cantidad de elementos a analizar es muy grande el problema puede convertirse en combinatorio y entonces el tiempo en el que los modelos lineales den solución sería muy grande convirtiéndose en un problema de optimización N_p – complete [31]. Así, el análisis en cada zona será de forma independiente e individual y el estudio y planificación será relajado de manera que el uso de modelos lineales nos entrega una respuesta exacta y óptima del resultado a diferencia del uso de heurísticas que permitirían obtener una solución pseudo-óptima correspondiente al caso de problemas N_p – complete.

La metodología utilizada para la resolución del modelo se basa sobre dos programas; LPSolve, software de código abierto (open source), que se encarga del proceso de optimización y Matlab, que se encarga de la generación de las gráficas de los escenarios antes y después de la aplicación del modelo.

Entonces, el presente trabajo propone establecer los sitios óptimos para la ubicación de los concentradores de la red de sensores en cada zona.

Este capítulo también resume características de seguridad de la red, el funcionamiento general del sistema de parqueo inteligente propuesto y la planificación de la red.

3.2. Delimitación del SERT en el centro histórico.

La EMOV nos ha propuesto considerar como zona piloto el centro histórico donde el SERT está siendo ocupado; esta zona se encuentra delimitada por las siguientes calles:

- Miguel Heredia
- Rafael Arízaga
- Calle Larga – La Condamine - Avenida 3 de noviembre
- Avenida Huayna Cápac

En la figura 3.1 se muestra un plano realizado en AutoCAD, que representa las calles que conforman el centro histórico de Cuenca, se identifica también las calles en las cuales funciona el SERT y los cuadrantes sombreados representan las cuatro zonas en las que se divide para la aplicación del modelo de optimización. La simbología en el plano representa:

- Líneas de color azul: zonas de parqueo tarifado
- Líneas de color rojo: Ejes del tranvía
- Área amarilla: zona 1
- Área verde: zona 2
- Área azul: zona 3
- Área rosa: zona 4

Las calles que no se identifican con líneas de color azul, no ofrecen el servicio de estacionamiento rotativo tarifado ya que son de circulación rápida y por lo tanto está prohibido estacionarse.

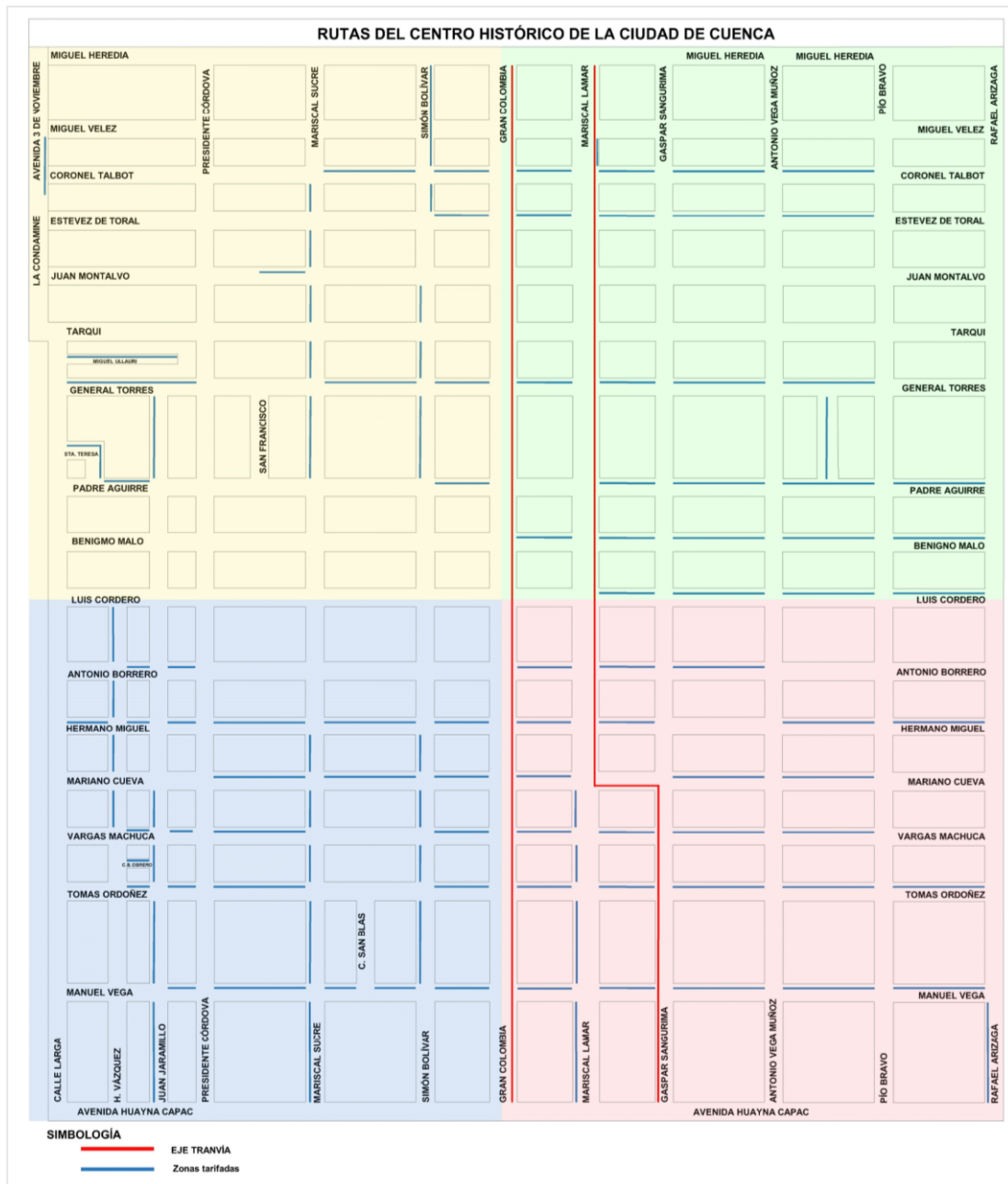


Figura 3.1 Delimitación y zonas de parqueo en el centro histórico.

Fuente: Autor

3.3. Tecnologías habilitadoras

Para la selección de la tecnología habilitadora, se realiza una comparación de especificaciones técnicas entre diferentes tipos de sensores de parqueo inteligente y equipos concentradores comerciales, que manejen el protocolo de comunicación LoRaWAN.

3.3.1. Comparativa de sensores Smart Parking

En la tabla 3.1 se presenta las especificaciones técnicas de tres tipos de sensores comerciales usados para sistemas de parqueo inteligente:

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas de sensores de parqueo inteligente [32] [33][34].

Descripción	Sensor Smart parking, Libelium	Sensor Smart parking SP-S X	Sensor Smart parking Bosch TPS110 JP
Comunicación			
Protocolo	LoRaWAN	LoRaWAN 1.02	LoRaWAN
Clase LoRaWAN	Clase A	Clase A	Clase A y C
Frecuencia	Estándar Norteamericano: 902-928 MHz	Estándar Norteamericano: 902-928 MHz	920 – 923.4 MHz, serie JP
Potencia de transmisión	Hasta 20 dBm	Hasta 20 dBm	14 dBm ERP
Detección	Radar y magnético	Magnético	Radar y magnético.
Mecanismo			
Recinto	Recinto forzado	Recinto forzado	Recinto forzado
Antena	Interna	Interna	Interna
Certificación de ingreso	IP68, protección contra el agua y polvo	IP67, impermeable, a prueba de polvo	IP67/IPx9K
Montaje	Exterior	Interior o exterior	Exterior
Peso	240 g	576g (1.24 lbs)	191 g
Seguridad			
Encriptación	AES-128	AES-128	AES-128
Ambientes y batería			
Temperatura de operación	-20°C a +65°C	-40°C a 85°C	-30°C a 65°C
Vida de la batería	Hasta los 10 años	Hasta los 10 años	Hasta los 5 años
Parámetros de batería	10400 mAh	3.6 V, 19000 mAh	3.6V, 1200 mAh
Humedad	0% - 95%	0% - 100%	0% - 97%
Certificaciones y costo			
Certificaciones	CE (Europa) FCC (EEUU)	FCC Part 15.247 ISED RSS - 247	FCC, CE
Costo	236,895 dólares	232.5 dólares	238.58 dólares

En base al análisis de las características técnicas de los sensores Smart Parking expuestos en la tabla 3.1, la solución elegida para la propuesta que realizamos ha sido el sensor de parqueo inteligente de la marca Libelium, ya que es compatible con la banda de frecuencia de 915 MHz, banda de frecuencia disponible de acuerdo a la regulación ecuatoriana establecida por la agencia de regulación y control de las telecomunicaciones (ARCOTEL) [35]. Estos sensores también poseen alta compatibilidad con diferentes tipos de concentradores LoRaWAN, hasta un 99% de fidelidad en la detección de plazas libres u ocupadas debido al sistema que posee, larga vida útil de la batería, máxima certificación contra ingresos, seguridad y diversos modos de configuración, todos los parámetros mencionados garantizan un correcto funcionamiento y gestión del nodo sensor.

3.3.2. Sensor Smart Parking Libelium

Se describe las principales características del sensor de parqueo Libelium, tales como los componentes del hardware, el consumo de energía y tiempo, el proceso para la configuración del nodo, el funcionamiento de las tramas de enlace ascendente y descendente que emplea el nodo y los parámetros de configuración.

3.3.2.1. Hardware

Se basa en dos piezas:

- Base
- Cerramiento exterior.

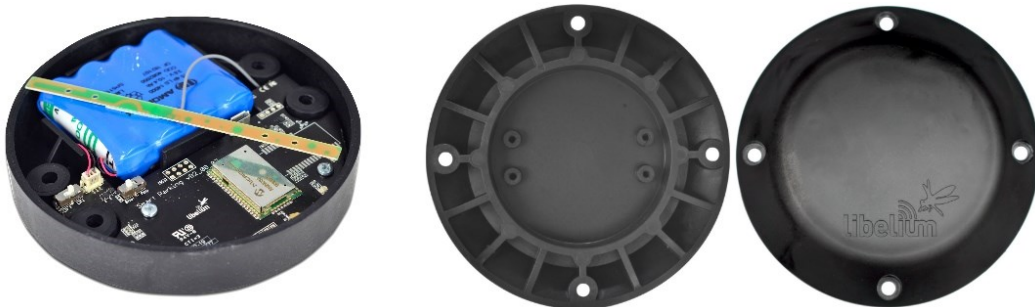


Figura 3.2 Base y recinto externo de un nodo Smart parking Libelium.

Fuente: [32]

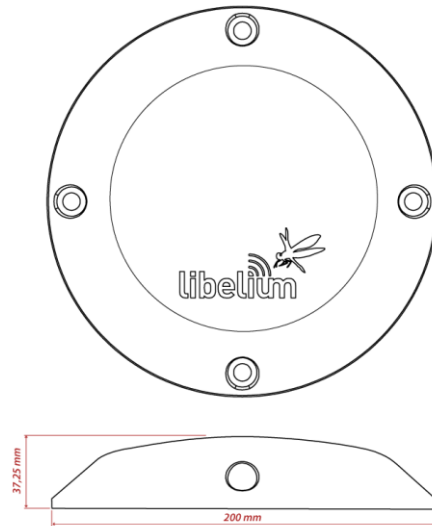


Figura 3.3 Dimensiones del recinto.

Fuente: [32]

El nodo incluye los siguientes componentes:

- PCB
- Batería
- Antena
- Pieza envolvente interna de la caja

3.3.2.2. Consumo de energía y tiempo

El firmware del nodo Smart Parking una vez que inicia sigue varios procesos. Primero, la configuración del nodo y luego un bucle infinito, en el que cada ciclo se basa en medir, enviar o reposo. En la tabla 3.2 se presenta el consumo de energía y tiempo de cada proceso, modelado como un pulso de una duración de tiempo específica y el tiempo de consumo promedio para la versión de EEUU.

Tabla 3.2 Consumo de energía y tiempo del nodo LoRaWAN versión US [32].

Descripción	Consumo de energía	Consumo de tiempo
Configuración de nodo	21.8 mA	53 s
Ciclo de medida	26 mA	340 ms
Medición y envío de ciclo	20 mA	3.6 s
Ciclo de sueño	5.5 uA	Depende de la configuración del tiempo de reposo.

3.3.2.3. Configuración del nodo Smart Parking

La configuración del nodo sigue dos procesos; el primero, colocar al dispositivo en modo “listo para instalar”, y el segundo, el proceso de cerrado.

- **Estado “listo para instalar”**

Los pasos a seguir para colocar al nodo en el modo “listo para instalar” son:

- Inicialmente los interruptores se encuentran configurados en modo “aplicación” y “apagado”.
- El dispositivo se enciende al activar el interruptor.
- Los leds rojo y verde parpadean 5 veces.
- Cuando por primera vez el dispositivo entra en modo de suspensión, el led rojo parpadea una vez por 1 segundo. En este estado, el nodo ha entrado en modo “listo para instalar”. Posterior, se debe instalar el nodo en el sitio y activarlo a través del proceso de puesta en marcha del imán.



Figura 3.4 Indicador del estado “listo para instalar”.

Fuente: [32]

De forma predeterminada, se encuentran configurados con su EUI LoRaWAN único y claves privadas aleatorias. Para cambiar sus parámetros, se puede realizar mediante “SmartDevicesApp”.

- **Proceso de cierre del nodo Smart parking**

Configurado al dispositivo en el estado “listo para instalar”, se debe cerrar el nodo a través del siguiente proceso:

- Los tornillos a usar deben tener juntas tóricas para evitar el ingreso de agua.

- Las carcasas, interior y exterior tienen una marca de posición, asegurarse que al unirse queden juntas una sobre la otra.
- Ajustar los tornillos, sin utilizar la presión máxima.



Figura 3.5 Proceso para el cierre del nodo Smart parking.

Fuente: [32]

Finalmente, habiendo completado el proceso de cierre, se debe realizar la puesta en marcha del imán, esto consiste en resetear el nodo 3 veces haciendo uso del imán 3 veces consecutivas. El imán recorre de izquierda a derecha con un solo movimiento y cada recorrido debe tener un intervalo de un segundo.



Figura 3.6 Proceso de arranque magnético del nodo Smart parking.

Fuente: [32]

3.3.2.4. Funcionamiento del nodo

La arquitectura Smart Parking gestiona tramas de enlace ascendente y descendente. En las tabla 3.3 y 3.4 se muestra los marcos de enlace ascendente y descendente respectivamente:

Tabla 3.3 Marco de enlace ascendente.

Tipo de marco ascendente	#num	Descripción
Iniciar cuadro 1	4	Primer fotograma enviado por el nodo al iniciar
Inicial cuadro 2	5	Segundo fotograma enviado por el nodo al iniciar
Marco de información	0	Informar un cambio de estado de parqueo
Marco para mantener vivo	1	Informar que el dispositivo sigue en funcionamiento desde el ultimo estado informado
Enlace ascendente de configuración	2	Confirmar que se aplicó o no un enlace descendente de configuración
Solicitud de actualización de RTC	7	Solicitar una sincronización de RTC una vez por día

Tabla 3.4 Marco de enlace descendente.

Tipo de marco descendente	#num	Descripción
Configuración de enlace descendente	3	Actualiza los parámetros del nodo. Luego de establecer una nueva configuración del nodo en el formulario de configuración remota, se coloca una nueva trama de configuración de enlace descendente en la cola de enlace descendente del servidor de red LoRaWAN.
Trama de sincronización RTC	6	Sincroniza el RTC del nodo con la marca de tiempo del servidor. Es la respuesta obligatoria a las tramas de enlace ascendente “iniciar trama” y “solicitud de actualización RTC”.

3.3.2.5. Parámetros del nodo Smart parking Libelium

El nodo Smart Parking tiene diferentes parámetros que influyen en el tiempo y el rendimiento de detección del sensor.

Tabla 3.5 Parámetros del nodo.

Parámetro	Rango	Descripción
Tiempo de reposo	1–10 min o 10–59 s	Tiempo entre cada ciclo de medición
Tiempo de mantenimiento	0, 5, 1, 2, ..., 23 horas	Tiempo transcurrido desde el último mensaje de enlace ascendente que activa un nuevo marco Kepp-Alive
Modo nocturno	0 / 1	Desactivado / activado

Inicio en modo nocturno	0, 1, ..., 23 horas	El modo nocturno inicia cuando el RTC alcanza este campo de parámetro
Duración del modo nocturno	1, 2, ..., 15 horas	Igual al periodo del modo nocturno
Reposo en modo nocturno	1, 2, ..., 10 min	Tiempo de reposo aplicado durante el modo nocturno
Inicio de rango de radar	20 hasta 50 cm	Distancia de medición inicial
Alcance del radar	50 hasta 100 cm	Rango de medición que se agregara al valor de "inicio de rango"
Umbral de radar	5 hasta 100	Umbral utilizado en el algoritmo de detección, a mayor umbral, detección con menor sensibilidad.
Método de activación LoRaWAN	0 (ABP) y 1 (OTAA)	Modo de unión utilizado por el módulo de radio LoRaWAN
LoRaWAN DevEUI	Identificador de 8 bytes	Define el dispositivo EUI utilizado por la radio LoRaWAN
LoRaWAN DevAddr	Identificador de 4 bytes	Dirección del dispositivo en modo ABP
LoRaWAN NwKSKKey	Clave de 16 bytes	Clave de sesión de red modo ABP
LoRaWAN App SKey	Clave de 16 bytes	Clave de sesión de la aplicación en modo ABP
LoRaWAN App Key	Clave de 16 bytes	Clave de aplicación en modo OTAA
LoRaWAN App EUI	Identificador de 8 bytes	Define la EUI de la aplicación LoRaWAN utilizada por la radio LoRaWAN en modo OTAA
Puerto LoRaWAN	1 a 223	Puerto utilizado para los envíos de enlaces ascendentes
LoRaWAN ADR	0 (OFF) y 1 (ON)	Tasa de datos adaptativa, habilitada o deshabilitada
Retardo RX1 LoRaWAN	0 a 65536	Retraso después de la primera ventana de LoRaWAN RX
Sub banda LoRaWAN	mapa de bits de 8 bits	Subbanda utilizada por la radio LoRaWAN (solo se aplica a las versiones de EE. UU. y AU)

3.3.3. Comparativa de concentradores LoRaWAN

En la tabla 3.6 se describe las especificaciones técnicas de tres de los diferentes tipos de equipos concentradores.

Tabla 3.6 Comparación técnica de equipos concentradores [36][37][38].

Descripción	Multitech MTCDT-246A-915-US-EU-GB	Gateway LoRaWAN F8L10GW	Gateway LORIX One
Comunicación			
Protocolo de comunicación de radio	LoRaWAN 1.0	LoRaWAN	LoRaWAN
Clases LoRaWAN soportado	Clase A, B y C	Clase A y C	Clase A
Bandas de frecuencia	915 MHz	US902-928 MHz	902 - 928 MHz
Canales ascendentes	8 canales (Half -dúplex)	8 canales	8 canales
Canales descendentes	-----	1 canal	1 canal
Distancia de comunicación	14 km con línea de visión, de 1 a 5 km en edificios.	6 a 11.5 km	10 km en áreas rurales y hasta 3 km en áreas urbanas
Plataformas compatibles	TTN, ChirpStack	Network Server, TTN, LOROIT, LinkWAN, CLAA	The Things of Network, LORIOT
Potencia de transmisión	Hasta 27 dBm	23 ± 2 dBm	Hasta 27 dBm
Sensibilidad RX	-137 dBm	-142 dBm	-135 dBm
Comunicación de red	Topología en estrella	Topología en estrella	Topología en estrella
Interfaz	Ethernet	Ethernet, Wifi estándar	Ethernet
Mecanismo y alimentación			
Dimensiones	161.3x107.4x42.8 mm	289.4x217.5x115mm	230x200x68mm
Software y sistema operativo	Linux 3.12 Kernel, Yocto 1.6	Industrial CPU 32 bits	Linux Yocto 4.4 CPU ARM*Cortex – A5 600 MHz RAM 128MBytes DDR2 200 MHz NAND 256 MBytes flash con PMECC
Alimentación	Entrada de 9 VDC 1.7A proporcionada a 100 - 240 VAC 50/60 Hz, POE.	AC220, POE, CC 12 - 48V	POE 24V pasivo

Puertos e indicadores integrados	Power Jack 2.5mm E-NET RJ45 2 USB 2.0 mcard API1, API2 SIM SD Card Leds indicadores Antenas	Puerto Ethernet, USB, leds de estado	Puerto Ethernet 10/100 Mbps con POE 24VDC. Botón de reseteo Ranura microSD Puerto USB Led de estado
Antena	Antena externa LoRa, 3 dBi	Antena interfaz: tipo N hembra, ganancia 2 dBi	Antena externa 3 dBi y 5 dBi, IP65
Certificación de ingreso	IP67	IP67	IP65
Peso	1 kg	2.7 kg	2.05 kg
Ambientes			
Temperatura de operación	-30 a +70°C	-35 a +75°C	-30 a +55°C
Humedad	20 a + 90%	0 a + 95%	0 a + 97%
Certificaciones y costo			
Certificaciones	CE, FCC	CE, FCC	FCC, CE, RCM, Telec, NCC, RCM.
Costo unitario	651.11 dólares	500 dólares	539.35 dólares

En base al análisis de las características técnicas de los concentradores con tecnología LoRaWAN expuestos en la tabla 3.6, la solución elegida para la propuesta ha sido el concentrador Multitech MTCDDT-246A-915-US-EU-GB, debido a la compatibilidad con todas las clases de dispositivos finales LoRaWAN, tasa de datos alta, rango de cobertura amplio, trabaja sobre la banda de frecuencia de 915 MHz, compatibilidad con múltiples servidores de red, entre otros.

3.4. Diseño y planificación de la red

3.4.1. Zonas delimitadas

Como se mencionó en la sección 3.1, se ha dividido el centro histórico en cuatro zonas que se visualizan en la figura 3.1 y las calles que las delimitan se resumen en la tabla 3.7. Actualmente, en este sector se cuenta con 1421 sitios de parqueo tarifado, sin embargo, se tiene planificado el incremento de 250 plazas en calles aledañas al parque Luis Cordero.

Tabla 3.7 División por zonas en el centro histórico de Cuenca.

Número zona	Calle 1 - Superior	Calle 2 - Izquierda	Calle 3 - Derecha	Calle 3 - Inferior
Zona 1	Miguel Heredia	Calle Larga – Avenida 3 de noviembre	Gran Colombia	Luis Cordero
Zona 2	Miguel Heredia	Gran Colombia	Rafael Arizaga	Luis Cordero
Zona 3	Antonio Borrero	Calle Larga	Gran Colombia	Huayna Cápac
Zona 4	Antonio Borrero	Gran Colombia	Rafael Arizaga	Huayna Cápac

El número total de plazas de parqueo por cada zona se resumen en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Número de sitios de parqueo por cada zona.

Zona	Número de sitios
1	303
2	367
3	448
4	307
Total	1421

3.4.2. Ubicación de los sensores

Se ha analizado y estandarizado los tipos de vehículos que utilizan los sitios de parqueo en el centro histórico de Cuenca, y se puede decir que el espacio asignado para cada uno tiene 6 metros de largo por 2 metros de ancho. En base a esto, la colocación de los sensores de parqueo se recomienda realizarlo en el centro del espacio asignado, para tener una mejor lectura y precisión. En la figura 3.7 se observa la ubicación del sensor.

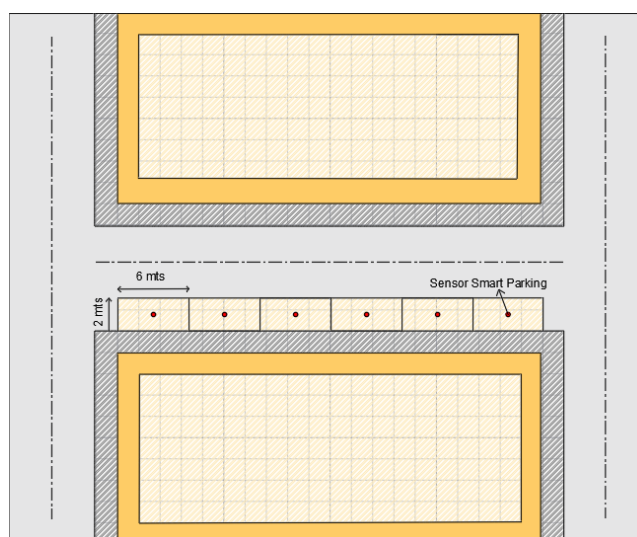


Figura 3.7 Ubicación del sensor.

Fuente: Autor

Para una correcta identificación y respeto de los sitios, se debe pintar el espacio según las medidas antes mencionadas y colocar una etiqueta con el número del sitio, ya que estos datos deberán ser cargados posteriormente en una base de datos.

3.4.3. Topología

Continuando con el diseño de la infraestructura de red para parqueo inteligente en el centro histórico de Cuenca, la topología que se aplica para la conexión de los nodos de parqueo inteligente con el concentrador será de tipo estrella. Los sensores Smart parking se conectarán directamente al concentrador a 915 MHz, formando una red de tipo estrella, en este tipo de topología no existe ningún salto, ya que la conexión entre sensores y concentradores son directas. La conexión entre concentrador y servidor, se realiza mediante enlace Ethernet. En la figura 3.8 se muestra de manera general la topología que se plantea para la red.

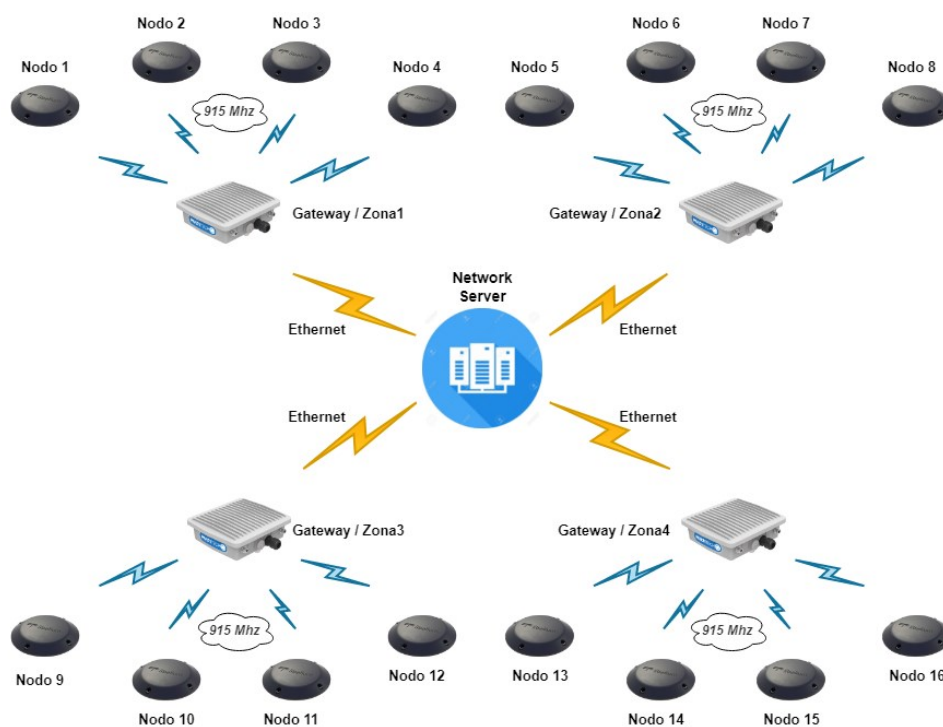


Figura 3.8 Topología general de la red.

Fuente: Autor

En la figura 3.8, es importante mencionar que cada concentrador que se muestra solo representa uno de los N concentradores que se utilizan en cada zona. Se recomienda

además que cada nodo sensor se cargue con parámetros únicos de identificación, como el ID, calle de ubicación, etiqueta del número de espacio que ocupa, entre otros. Toda la información mencionada, deberá almacenarse en una base de datos, con el fin de garantizar la correcta administración de los espacios de parqueo.

3.4.4. Dimensionamiento de la red de sensores inalámbricos WSN

Para el dimensionamiento de la red de sensores inalámbricos (WSN), en [39], se presenta un modelo que considera la capacidad y cobertura para la ubicación óptima de los concentradores. Estos parámetros que se mencionan son entradas para el programa de optimización, por lo que, es necesario identificar los valores óptimos del radio de cobertura y capacidad del concentrador que se ingresarán.

Para la selección del radio de cobertura, en [40], se realiza una evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos en tres sitios de la ciudad de Cuenca, Totoracocha, Centro histórico y sector del hotel Oro Verde; dicho estudio muestra que en el centro histórico los valores de RSSI confiables alcanzan un radio de cobertura de aproximadamente 200 m con el concentrador a una altura de 25 metros y los nodos a 1.5 metros. Por lo tanto, considerando este antecedente, proponemos un rango de alcance de 180 metros como máximo, no obstante, estos valores deben estar sujetos a comprobación.

En cuanto a la capacidad de la red, teóricamente en las especificaciones técnicas del concentrador se menciona que el equipo es capaz de soportar alrededor de 1000 nodos, sin embargo, en [41], se presenta una fórmula para obtener el valor real de la capacidad que puede soportar un concentrador, en función del tamaño de mensaje que envía el nodo, del intervalo de transmisión, número de canales y el tiempo en el aire del paquete enviado. La fórmula para el cálculo de la capacidad del concentrador es:

$$S = \frac{N_c * T}{2 * e * ToA}$$

- N_c , representa el número de canales del concentrador
- T [s] es el intervalo de transmisión
- $1/2e$, es el rendimiento máximo del ALOHA básico. El valor de e es 2.718.
- ToA [s], es el tiempo en el aire del paquete

En las especificaciones técnicas del sensor Libelium se indica que el tamaño total del paquete que transmite es de 11 bytes, incluido la cabecera y la carga útil. Por tanto, el *ToA* para un paquete de 11 bytes es de 103 ms, con un factor de dispersión *SF8* [42], el intervalo de transmisión que se plantea para el diseño es de 30 segundos y el número de canales del concentrador seleccionado es de 8. Por tanto:

$$S = \frac{8 * 30}{2 * e * 0.103} = 428.64 \approx 429 \text{ nodos}$$

La capacidad que se obtiene por concentrador es de 429 nodos. Entonces, nosotros proponemos un análisis con 100 nodos de manera que las capacidades técnicas del protocolo sean garantizadas y pueda la red operar con todos los nodos transmitiendo al mismo tiempo. Definidos los parámetros de cobertura y capacidad, en la figura 3.9 se describe el proceso para la implementación de una WSN aplicando el modelo de optimización.



Figura 3.9 Proceso de aplicación del modelo capacidad – cobertura.

Fuente: Autor, [39]

3.4.4.1. Descripción del modelo

Para realizar el dimensionamiento de la red de sensores inalámbricos (WSN) se supone un área cuadrada en un espacio abierto de dimensiones $L \times L$.

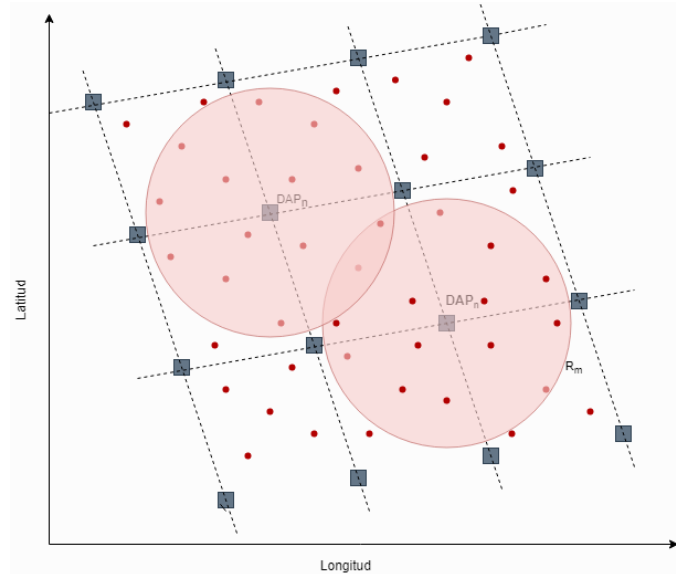


Figura 3.10 Área cuadrada en un espacio abierto de dimensiones $L \times L$.

Fuente: Autor

Se colocan los puntos de agregación de datos (DAP) en esta área para la conectividad de los sensores inalámbricos dentro de un área de cobertura R_m ; por consiguiente, los sensores inalámbricos pueden localizarse en cualquier posición dentro de la región delimitada.

La ubicación de los DAP se puede realizar en cualquier posición dentro de la región a instalarse, por ejemplo, en postes de alumbrado público, postes de semáforos, mástiles o en áreas elevadas. De esta manera, el modelo matemático minimiza el costo en términos del menor número de DAP. Las variables utilizadas para cubrir los sensores se describen a continuación.

Se instala un conjunto de N sensores en diferentes áreas de la región, además, se considera un conjunto de M posibles ubicaciones o sitios candidatos donde se implementan los DAP (Ver figura 3.10). La posible ubicación descrita anteriormente es un sitio candidato para un lugar donde se podría instalar un DAP; por tanto, no será preciso instalar un DAP en esa ubicación a menos que cubra un porcentaje de los sensores. El modelo define que un sensor inalámbrico está cubierto si está dentro de una distancia R de al menos un DAP;

la distancia de Haversine ($dist_{haversine}$) se utiliza para considerar la curvatura de la Tierra para puntos georreferenciados.

Un sitio candidato se considera un sitio activo si un DAP está habilitado o instalado en el sitio candidato. Cada DAP tiene una capacidad limitada en términos de sensores. Partiendo de los detalles anteriores, se define un problema de optimización que tiene como objetivo encontrar el número de sitios activos de manera que se cubra al menos un porcentaje P de los sensores.

Es necesario definir un conjunto $S = \{S_1, S_2, \dots, S_M\}$ de sitios candidatos, donde j -th posición viene dada por (x_{S_j}, y_{S_j}) . Un conjunto de $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ sensores o dispositivos inalámbricos es también definido. La posición del i -th sensor está definida por (x_{d_i}, y_{d_i}) .

Definimos la cantidad $\alpha_{ij} \in \{0,1\}$, lo que implica que si el sensor i está cubierto por DAP j , entonces el valor es 1; de lo contrario el valor es 0. Por lo tanto, para cada sitio candidato, se define la cantidad $Z_j \in \{0,1\}$ lo que implica que el valor es 1 cuando el sitio candidato j es un sitio activo.

De la misma forma, para cada sensor d_i , la cantidad $Y_i \in \{0,1\}$, se define cuando el valor es uno, lo que indica que el sensor está cubierto por al menos un sitio candidato. C se define como la capacidad de los DAP para acomodar sensores. El modelo de optimización para el dimensionamiento se presenta a continuación:

Función objetivo:

$$\min \sum_{j=1}^M Z_j \quad (1)$$

Sujeto a:

$$Y_i = \sum_{j=1}^M \alpha_{ij}; \quad \forall i \in D; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^M \alpha_{ij} \leq C \cdot Z_j; \quad \forall j \in S; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_j \geq N \cdot P; \quad \forall i \in D; \quad (4)$$

$$X_{j,i} \leq \alpha_{ij} \cdot Z_i; \quad \forall j \in S; \quad \forall i \in D; \quad (5)$$

Donde:

- El porcentaje P de sensores cubiertos en un área o región delimitada.
- El término N define el número de sensores en una área o región delimitada.
- El término M define el número de sitios candidatos en una área o región delimitada.
- El número de DAP cubiertos es $\alpha_{ij} \in \{0,1\}$. Si un sensor i está cubierto por un DAP j , α_{ij} es 1, caso contrario 0.
- Para cada sitio candidato s_j , se define $Z \in \{0,1\}$, donde Z_j es 1 si el sitio candidato está activo y 0 en caso contrario.
- $X_{j,i}$, indica si el sensor i está conectado al DAP j . $X_{j,i}$ es 1 si la conexión existe y 0 de lo contrario [39].

Antes de aplicar el modelo de optimización que tiene como objetivo minimizar el número de sitios candidatos para los DAP, es necesario realizar una visita en sitio para verificar la disponibilidad de los sitios candidatos para su uso como entradas para el modelo de optimización. Hemos tomado en cuenta la infraestructura de los semáforos y mástiles con equipos de la municipalidad existentes para su georreferenciación y por consiguiente usarlos como entradas para el modelo descrito.

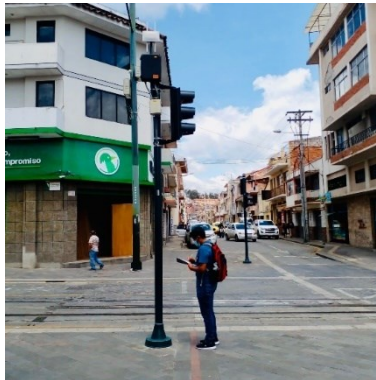


Figura 3.11 Georreferenciación de sitios candidatos.

Fuente: Autor

3.4.5. Escenario original

En la figura 3.12 se presenta el escenario del centro histórico con cada uno de los sitios de estacionamiento rotativo tarifado georreferenciados con los que cuenta actualmente y también con las cuatro zonas que se ha delimitado para la aplicación del modelo de optimización. En cada sitio de estacionamiento se colocará cada uno de los sensores.

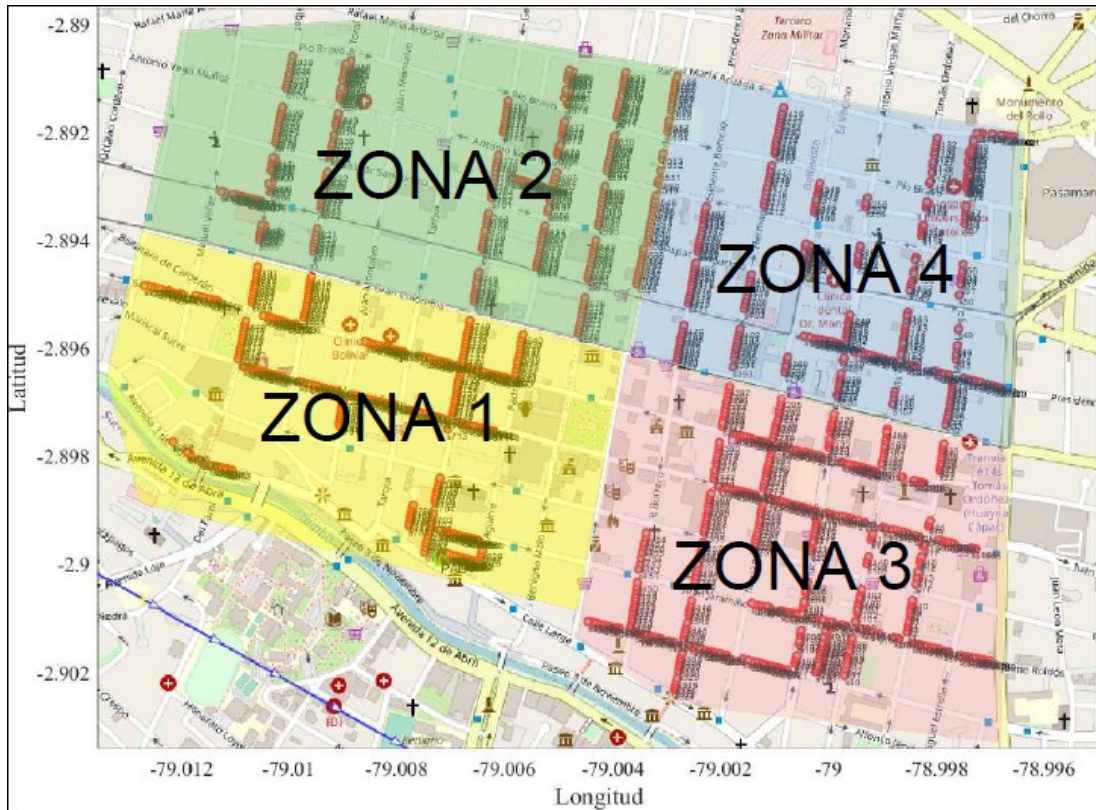


Figura 3.12 Sitios totales de parqueo georreferenciados y ubicados por cada zona.

Fuente: Autor

A continuación, la figura 3.13 representa el escenario original para la ZONA 1, donde se puede observar la ubicación de los sitios candidatos para la instalación de los concentradores, la ubicación de los sensores y los radios de cobertura que cubre cada uno de los DAP. Las líneas grises corresponden a las posibles conexiones de los sensores con los sitios candidatos para los concentradores. En el anexo 1 se presenta las gráficas y las tablas de los sitios candidatos para las zonas restantes.

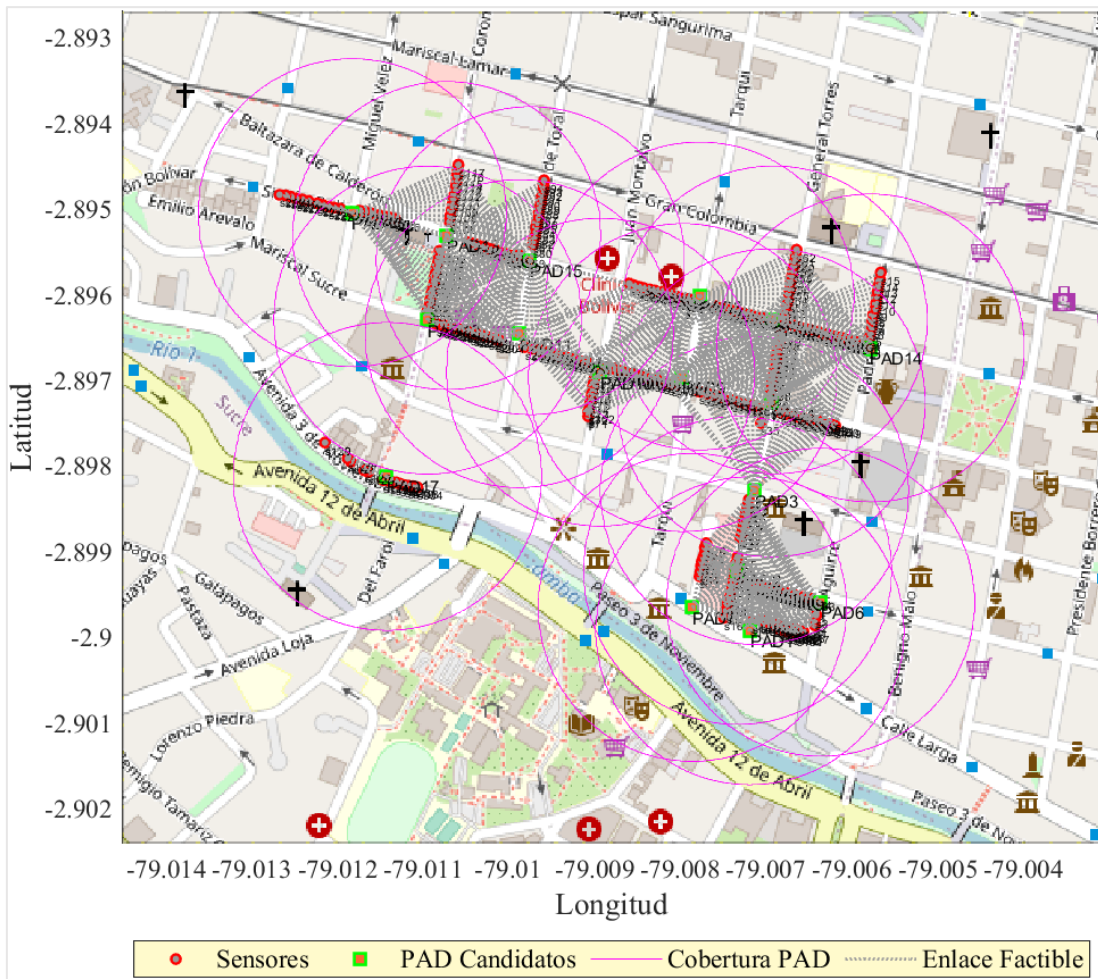


Figura 3.13 Escenario original para la zona 1. Radio de cobertura de 180m.

Fuente: Autor

En la tabla 3.9 se presenta la información (intersección, coordenadas) para los sitios candidatos en donde se ubicarán los concentradores de la zona 1.

Tabla 3.9 Ubicación sitios candidatos para concentradores – zona 1.

Número	Dirección	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
1.1	Santa Teresa y Calle Larga (esquina)	-2,899923	-79,007187
1.2	General Torres y Juan Jaramillo (esquina)	-2,899219	-79,007332
1.3	General Torres y presidente Córdova (esquina)	-2,898284	-79,007134
1.4	General Torres y Mariscal Sucre (esquina)	-2,897261	-79,006935
1.5	General Torres y Simón Bolívar (esquina)	-2,896292	-79,006912
1.6	Padre Aguirre y Juan Jaramillo (esquina)	-2,89959	-79,00636
1.7	Miguel Ullauri y Calle Larga (esquina)	-2,89965	-79,00786
1.8	Tarqui y Simón Bolívar (esquina)	-2,896013	-79,007774

1.9	Tarqui y Mariscal Sucre (esquina)	-2,89666	-79,007973
1.10	Juan Montalvo y Mariscal Sucre (esquina)	-2,896903	-79,008934
1.11	Estévez de Toral y Mariscal Sucre (esquina)	-2,896452	-79,00988
1.12	Coronel Talbot y Mariscal Sucre (esquina)	-2,896295	-79,010948
1.13	Coronel Talbot y Simón Bolívar (esquina)	-2,895307	-79,010727
1.14	Padre Aguirre y Simón Bolívar (esquina)	-2,89662	-79,00578
1.15	Estévez de Toral y Simón Bolívar (esquina)	-2,8956	-79,00975
1.16	Miguel Vélez y Simón Bolívar (esquina)	-2,89504	-79,01183
1.17	Coronel Talbot y av. 3 de noviembre (esquina)	-2,89812	-79,01142

3.4.6. Escenario optimizado

Aplicado el modelo de optimización, en la figura 3.14 se muestra la ubicación de los sitios óptimos para la instalación de los concentradores, sus respectivos radios de cobertura y los enlaces factibles que indican las posibles conexiones de los sensores.



Figura 3.14 Escenario optimizado para la zona 1. Radio de cobertura de 180m.

Fuente: Autor

Como se observa en la figura 3.4, los concentradores óptimos cubren toda el área donde serán colocados los sensores de parqueo inteligente. Cabe recalcar, que con el modelo desarrollado no se pretende definir que un sensor se va a conectar con un concentrador en específico, lo que se pretende, es garantizar los recursos en función de la capacidad y de la cobertura.

A continuación, la tabla 3.10 presenta la información de intersección y coordenadas de los sitios óptimos para la colocación de los concentradores en la zona 1.

Tabla 3.10 Ubicación final de los concentradores en la zona 1.

Número	Dirección	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
1.5	General Torres y Simón Bolívar (esquina)	-2,896292	-79,006912
1.7	Miguel Ullauri y Calle Larga (esquina)	-2,89965	-79,00786
1.9	Tarqui y Mariscal Sucre (esquina)	-2,896966	-79,007973
1.15	Estévez de Toral y Simón Bolívar (esquina)	-2,8956	-79,00975
1.16	Miguel Vélez y Simón Bolívar (esquina)	-2,89504	-79,01183
1.17	Coronel Talbot y av. 3 de noviembre (esquina)	-2,89812	-79,01142

Una vez que se ha obtenido los sitios óptimos para la colocación de los concentradores en cada zona, como se mencionó en la sección 3.4.4.1 la infraestructura que hemos utilizado para usar como entradas en el modelo de dimensionamiento y optimización ha sido los semáforos en su gran mayoría y también algunos mástiles ubicados en las esquinas de las casas que contienen equipos de la municipalidad (Ver figura 3.1). Para la instalación de los concentradores se debe colocar un mástil sobre la parte superior del semáforo de manera que el concentrador pueda adherirse.

3.4.7. Seguridad

La seguridad es un aspecto muy importante en el despliegue de una red de sensores en ciudades (SmartCities), ya que existe información que debe ser protegida. Es por esto, que proponemos la encriptación AES-128 para la seguridad de la red.

- **Encriptación de los sensores**

El protocolo LoRaWAN utiliza dos niveles de seguridad, un nivel para la red y otro para la aplicación. El tipo de cifrado que utiliza es el AES-128 [26].

Seguridad de red NwkSKey: se utilizan claves de sesión de red AES de 128 bits, garantizando la integridad del mensaje durante la comunicación y asegura la comunicación desde los dispositivos finales al servidor de red. La clave es única para cada dispositivo y se comparte entre el dispositivo final y el servidor de red.

Seguridad de aplicación AppSKey: Se utiliza claves AES de 128 bits responsables del cifrado de extremo a extremo de los datos del usuario. Las claves son únicas para cada dispositivo y se comparte entre el dispositivo y el servidor de aplicaciones. Esta clave cifra y descifra los mensajes de datos de la aplicación y protege los datos del usuario de la aplicación.

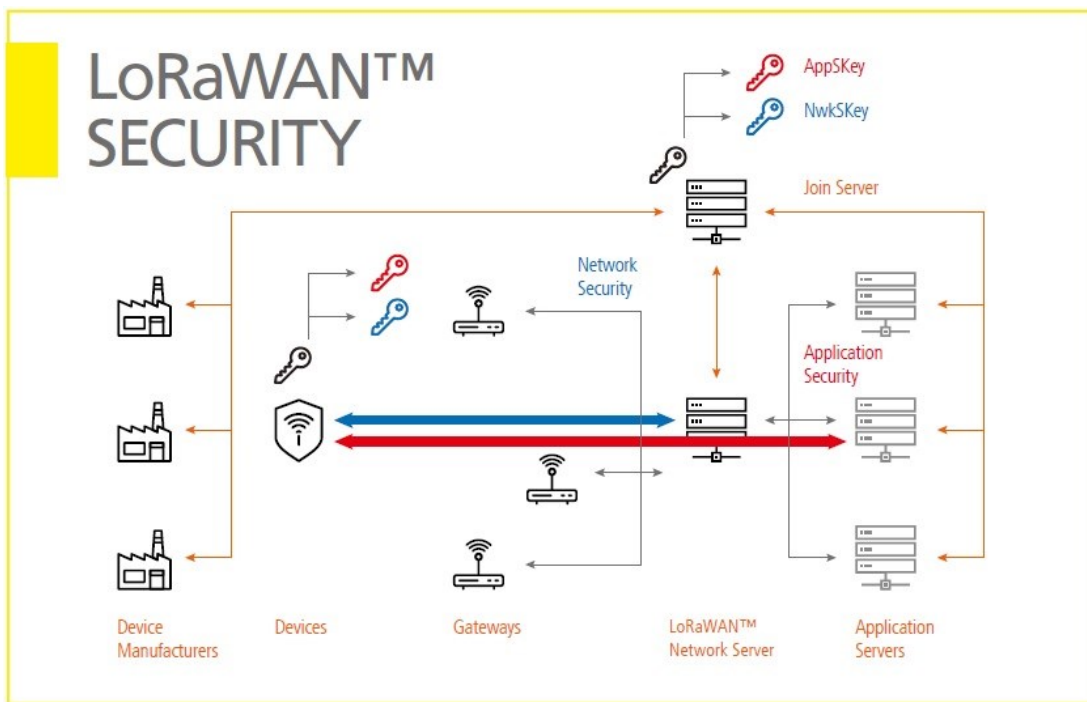


Figura 3.15 Seguridad en LoRaWAN.

Fuente: [43]

3.4.8. Funcionamiento de la infraestructura de red

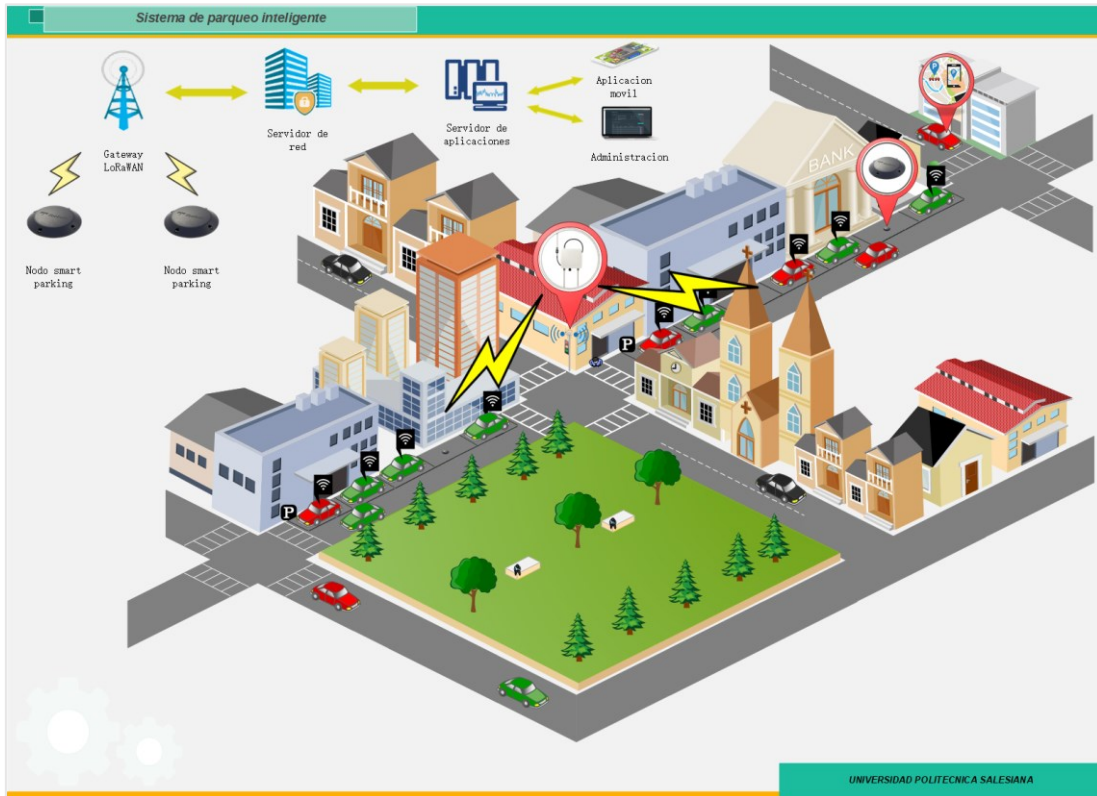


Figura 3.16 Infraestructura de la red planteada.

Fuente: Autor

En la figura 3.16 se muestra de forma gráfica la propuesta de infraestructura de red para la solución de parqueo inteligente en el centro histórico de Cuenca realizada en Visio. El sensor Smart Parking de Libelium es el principal actuador, pues se encarga de la detección del estado de los sitios de parqueo, libre u ocupado. Inicialmente, el nodo se encuentra en estado libre, una vez que un vehículo se estaciona sobre el sitio, el sensor envía inalámbricamente la información hacia los concentradores y estos retransmiten los mensajes hacia el servidor de red el cual almacena y actualiza la base de datos registrando el sitio como ocupado. En este lapso de tiempo, el usuario tiene 5 minutos para realizar su registro y el pago correspondiente. Para ello, es necesario haberse creado previamente una cuenta y tener cargados sus datos personales y datos del vehículo. Habiendo completado el proceso de registro y pago, la información enviada del sensor confirma el estado de la plaza. De esta manera, los demás usuarios podrán visualizar el estado de los

sitios de parqueo en tiempo real mediante la aplicación móvil para los diferentes sistemas operativos como Android o IOS.

Una vez transcurrido el tiempo solicitado por el usuario para el uso del sitio, se emitirá una notificación a su dispositivo móvil indicando que proceda a remover su vehículo, teniendo un tiempo corto adicional, caso contrario, el tiempo excedido pasará a registrarse en su cuenta como un valor de multa o se descontará del saldo disponible, según la opción que haya escogido, al momento de su registro.

Para la detección de las plazas de parqueo, el nodo Smart parking presenta varias alternativas en su configuración. En este caso, el equipo enviara la información de su ID y el estado de las plazas en un intervalo de medio minuto. Este funcionamiento será permanente durante las horas hábiles en las cuales funciona el sistema tarifado, en el caso del centro histórico, funciona de lunes a viernes de 7:30 am a 19:30 pm y los días sábados de 7:30 am a 13:30 pm. Para las horas en las cuales no se encuentra activo el sistema tarifado de sitios, se puede configurar al nodo en modo nocturno, es decir, no envíe datos de forma constante durante esos horarios.

3.1. Planificación

El diseño y dimensionamiento de la red se lo ha realizado para un caso estático, sin embargo, las gráficas de evaluación que se presentan, permiten tener una mayor perspectiva en cuanto a la variación del número de concentradores en función del radio de cobertura y la variación del costo en función de número de concentradores.

En la figura 3.17 y 3.18 se muestra la variación del radio de cobertura y del número de concentradores para cada zona del centro histórico y para el número total de zonas, respectivamente. Como se observa, se ha realizado un análisis desde un mínimo de 130 metros de radio de cobertura, ya que con valores menores no se cubre la totalidad de sensores para ciertas zonas, y, por tanto, el algoritmo de optimización no logra la resolución del problema, hasta el máximo de 180 metros, que es lo propuesto en el diseño, el intervalo de medición es en un rango de 10 metros. A medida que el radio de cobertura disminuye, se necesita un número mayor de concentradores para cubrir los nodos en cada zona.

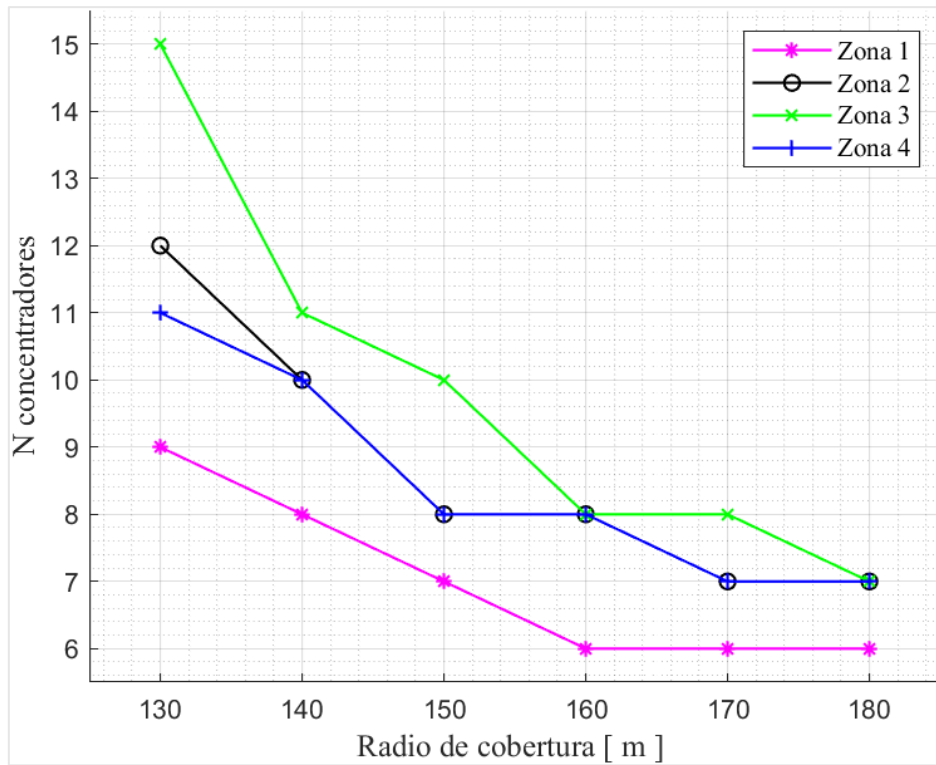


Figura 3.17 Radio de cobertura vs N concentradores para cada zona.

Fuente: Autor

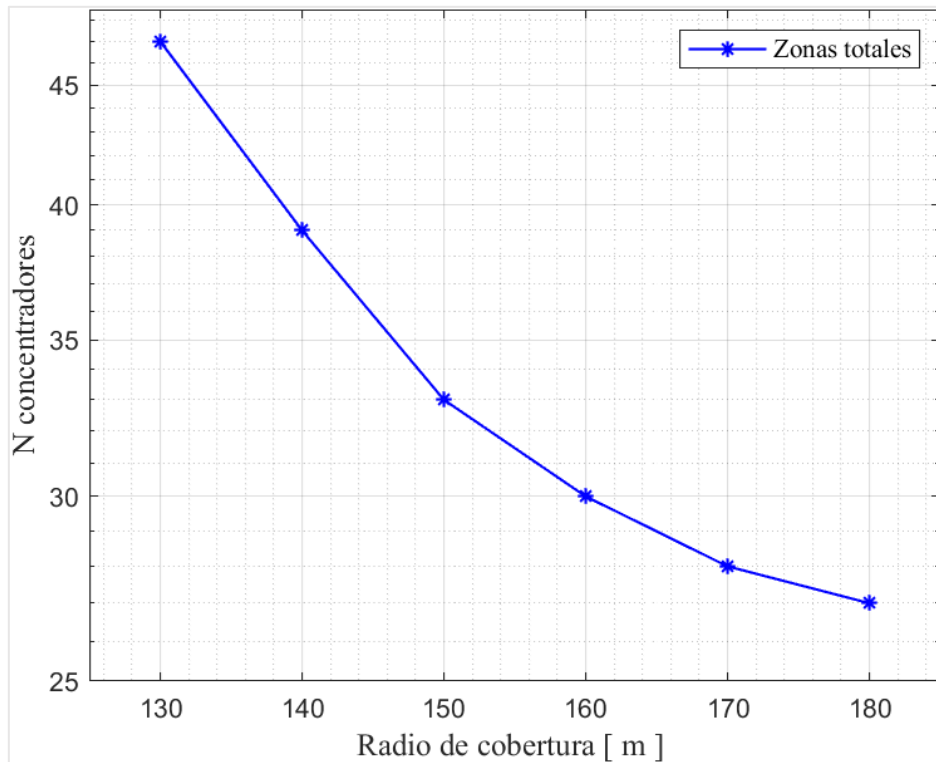


Figura 3.18 Radio de cobertura vs N concentradores totales para el centro histórico.

Fuente: Autor

En la gráfica 3.19, se muestra la variación del costo en concentradores con respecto al número de concentradores de cada zona. A medida que el número de concentradores aumenta, también el costo aumenta.

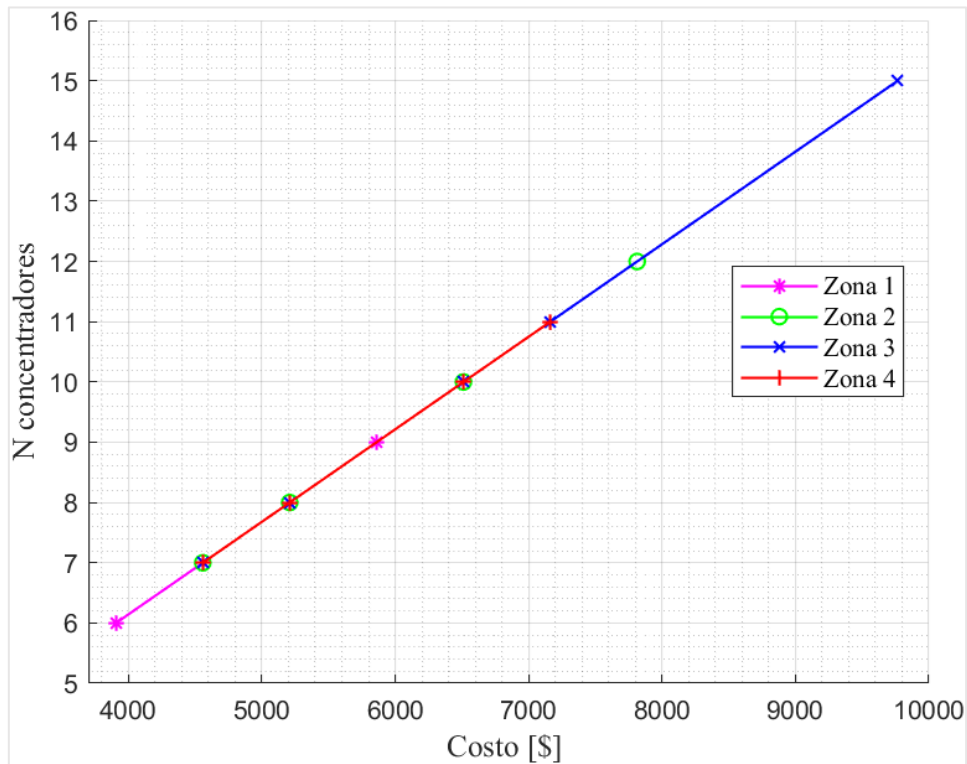


Figura 3.19 Costo vs N concentradores para cada zona.

Fuente: Autor

La figura 3.20, representa la variación del costo en función del total de concentradores para todas las zonas. Esto da una visión clara de la variación de costos de concentradores que supondrá en el estudio económico del siguiente capítulo.

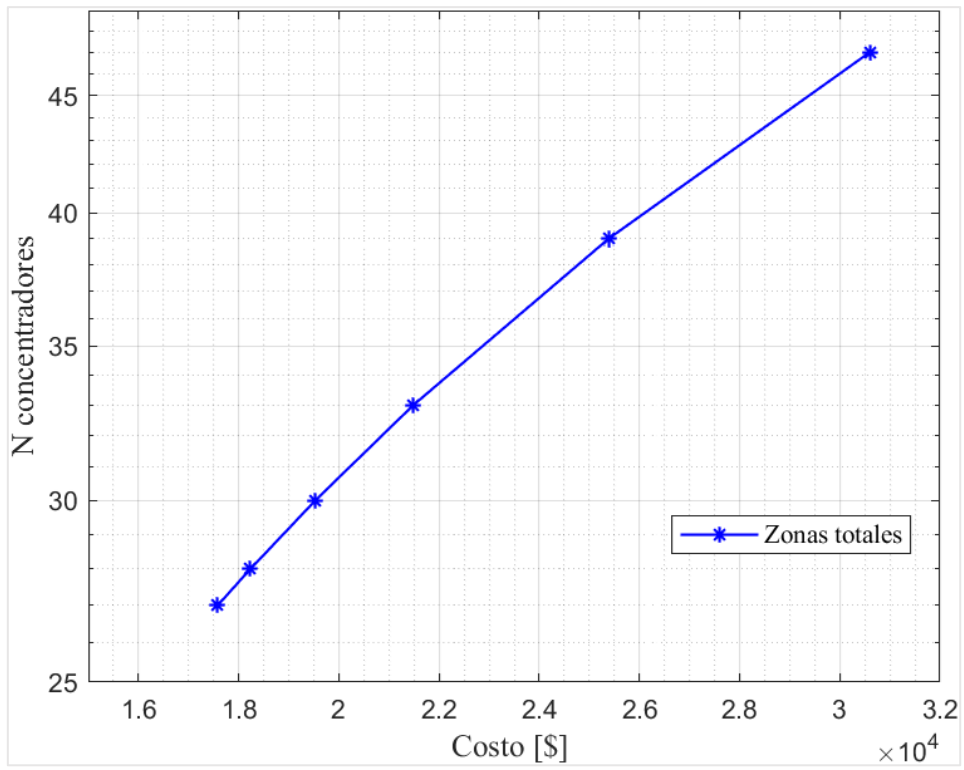


Figura 3.20 Costo vs N concentradores totales para el centro histórico.

Fuente: Autor

CAPÍTULO 4: ESTUDIO ECONÓMICO

4.1. Introducción

En el presente capítulo se desarrolla un estudio económico, para el mismo, se toma como recurso el análisis que se realiza en [44], con valores actuales y de acuerdo a la propuesta nuestra tanto para el balance actual, así como para el balance tomando en cuenta el diseño del sistema de parqueo inteligente. A partir de la información económica compartida por parte de la empresa EMOV-EP, se da a conocer los valores de ingresos, egresos, inversiones y ganancias aproximadas para el año 2021.

Estos serán evaluados únicamente con respecto al centro histórico de la ciudad de Cuenca, ya que el escenario de estudio se enfoca a esta zona de la ciudad. Por otra parte, una vez definido los equipos a utilizar en el diseño en el capítulo anterior, se debe investigar sus costos unitarios, costos de programación, desarrollo y gestión de la plataforma, costos de maquinaria y mano de obra para la instalación de los dispositivos.

Finalmente, se obtendrá los valores del VAN y la TIR, cuyos resultados permitirá a los interesados, en este caso la empresa EMOV-EP tener una visión clara de la viabilidad del proyecto en términos de una implementación real que se pretenda realizar a futuro.

4.2. Balance económico

Para efectuar el balance de la propuesta es necesario la investigación y el análisis de varios factores económicos del SERT en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, tales como:

- Ingresos
- Egresos
- Inversiones

Esta información se consiguió a través de una solicitud de acceso a la información pública respaldada por un oficio generado desde la dirección de carrera de Ingeniería Electrónica dirigido a la empresa de movilidad EMOV-EP.

4.2.1. Balance sin proyecto

A continuación, se detalla los valores de ingresos, egresos e inversiones.

- **Ingresos**

En la tabla 4.1 presenta los ingresos diarios, mensuales y anuales del año 2021 de la empresa EMOV-EP con respecto al SERT del centro histórico de la ciudad de Cuenca. Los valores aproximados de pagos realizados con tarjeta y con la app se han obtenido en la semana regular del 6 al 10 de diciembre. Los datos de multas son valores diarios aproximados.

Tabla 4.1 Ingresos anuales de la empresa EMOV para el centro histórico.

Ingresos					
Descripción	Cantidad	Costo	Semanal	Mensual	Anual
Tarjetas de parqueo			4827,24	19308,96	231707,5
Pagos APPSERT			220,8	883,2	10598,4
Multas	32	19,7	630,4	15129,6	181555,2
Retiros con grúa	5	58,7	293,5	7044	84528
				Total	\$508389,12

Los ingresos correspondientes a multas, se encuentran detalladas en el anexo 2, tabla 4.22, y se presenta los porcentajes respectivos de acuerdo al salario básico unificado actual.

- **Egresos**

En la tabla 4.2 se indica los egresos del año 2021 de la empresa EMOV-EP.

Tabla 4.2 Egresos anuales de la empresa EMOV para el centro histórico.

Egresos				
Descripción	Cantidad	Mensual	Anual	Total
Controladores	20	605	7260	145200
Décimo tercer sueldo	20		605	12100
Décimo cuarto sueldo	20		400	8000
Fondos de reserva	20	50,397	604,758	12095,16
Inspectores	3	852,50	10230	30690
Décimo tercer sueldo	3		852,50	2557,5
Décimo cuarto sueldo	3		400	1200
Fondos de reserva	3	71,013	852,159	2556,477
			Total	\$ 214399,14

- **Ganancia o utilidad**

Conocidos los valores de los ingresos y egresos de la empresa EMOV – EP, se calcula la ganancia que viene dada por la diferencia entre los valores mencionados. En la tabla 4.3 se aprecia el valor.

Tabla 4.3 Utilidad o ganancia de la empresa EMOV en el año 2021.

Ganancia	
Ingresos	\$ 508389
Egresos	\$ 214399
Total	\$ 293989,98

- **Activos fijos o inversiones**

La empresa de movilidad EMOV - EP cuenta con una inversión actual que se puede apreciar detalladamente en la tabla 4.4, dichos valores son útiles para el cálculo del VAN y de la TIR.

Tabla 4.4 Inversión de la empresa EMOV-EP.

Inversión EMOV-EP			
Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Total
Grúas	3	27921,42	83764,26
Uniformes	23	318	7314
Radios de comunicación, equipos, baterías, frecuencias y demás equipos.	1	420649,92	420649,92
Motos	3	5000	6000
Otros	1	20000	20000
		Inversiones	537728,18

4.2.2. VAN y TIR sin la implementación del proyecto

Se calcula en Excel, el valor residual, la depreciación y el flujo de fondos proyectado a 5 años, para ello, se toma en cuenta los valores de ingresos, egresos, inversión inicial y el porcentaje de la inflación anual y el aumento de sueldos en el país. Actualmente, la inflación se encuentra en 1.90% y el aumento de sueldos en 1.52%.

Tabla 4.5 Valor residual y depreciación sin proyecto.

Valor residual	\$ 53772,818
Depreciación	\$ 96791,07

Tabla 4.6 Flujo de fondos sin proyecto.

Periodo	Ingresos	Egresos	Flujo Neto
0	0	-537728,18	-537728,18
1	508389,12	311190,21	197198,91
2	518251,8689	315920,3006	202331,57
3	528305,9552	320722,2892	207583,67
4	538555,0907	325597,2679	212957,82
5	549003,0595	330546,3464	218456,71

En la tabla 4.7 se presenta los valores del VAN y la TIR calculados aplicando una tasa de descuento del 12 %, que es el porcentaje de ganancia esperado de la empresa.

Tabla 4.7 VAN y TIR sin proyecto.

Tasa de ganancia	12%
VAN	\$ 206690,47
TIR	26%

4.2.3. Balance con proyecto

En este apartado se presenta el análisis económico tomando en cuenta la propuesta planteada para el sistema de parqueo inteligente en el centro histórico de Cuenca.

- **Ingresos**

Se plantea que los nuevos ingresos para el centro histórico se incrementen en un 5%, las infracciones subirán ya que cada plaza funcionará de manera automatizada para los tiempos de parqueo y cobros respectivos. En la tabla 4.8 se muestra los ingresos del sistema de parqueo tarifado en el centro histórico de la ciudad de Cuenca.

Tabla 4.8 Ingresos anuales de la EMOV para el centro histórico.

Ingresos						
Descripción	Cantidad	Costo	Diario	Semanal	Mensual	Anual
Pagos app SERT				5300,442	21201,77	254421,22
Multas	35	19,7	689,5		16548	198576
Retiro con grúas	8	58,7	469,6		11270,40	135244,80
					Total	588242,02

- **Egresos**

La automatización de los sitios de parqueo inteligente, hace que no sea necesario la inspección en sitio por parte de los controladores, mismos que podrán ser removidos a otras funciones. En este caso, se plantea la necesidad de contar con 4 inspectores y 4 técnicos, repartidos para cada una de las cuatro zonas. Los inspectores se encargarán del control y monitoreo de los sitios de parqueo de la zona asignada desde las oficinas de gestión y los técnicos se encargan del mantenimiento continuo de la red para garantizar el correcto funcionamiento. En la tabla 4.9 se detalla los egresos generados.

Tabla 4.9 Egresos por mantenimiento de la red.

Egresos de la gestión y mantenimiento de la red				
Descripción	Cantidad	Sueldo Mensual	Sueldo anual	Anual
Inspectores	4	1200	14400	57600
Décimo cuarto sueldo	4		1200	4800
Décimo tercer sueldo	4		400	1600
Fondos de reserva	4	99,96	1199,52	4798,08
Técnicos	4	950	11400	45600
Décimo cuarto sueldo	4		950	3800
Décimo tercer sueldo	4		400	1600
Fondos de reserva	4	79,135	949,62	3798,48
Otros	1	5000	60000	60000
			Total	183596,56

Se debe tomar en cuenta el arrendamiento de un local en donde se instalará el servidor y los equipos de monitoreo. En la tabla 4.10 se presenta el costo aproximado del arrendamiento mensual.

Tabla 4.10 Egresos por arrendamiento de local.

Egresos del arrendamiento de un local			
Descripción	Cantidad	Mensual	Anual
Arrendamiento de local	1	1000,00	12000,00
		Total	12000,00

La suma de los egresos de mantenimiento y arrendamiento, nos da el total de egresos que se generan para el sistema de parqueo en el centro histórico. En la tabla 4.11 se muestra el valor total.

Tabla 4.11 Egresos totales con proyecto.

Egresos con Proyecto	
Egresos mantenimiento de la Red	183596,56
Egreso arrendamiento local	12000
Total	195596,56

- **Ganancia**

La diferencia de ingresos y egresos nos da la ganancia. En la tabla 4.12 se muestra el valor obtenido.

Tabla 4.12 Ganancia con el proyecto.

Ganancia	
Ingresos	\$ 588242,02
Egresos	\$ 195596,56
Total	\$ 392645,46

- **Inversiones**

Para la parte de inversiones se ha dividido en dos partes, la primera, es una lista de los equipos que se ocuparían en la propuesta del sistema de parqueo inteligente y en la segunda, los costos de mano de obra, maquinaria, programación, gestión de plataforma y los costos de la instalación tomando en cuenta el tiempo requerido para el trabajo.

- **Primera parte**

En la tabla 4.13 se enlista los materiales necesarios para la implementación de la propuesta, así como los costos respectivos.

Tabla 4.13 Inversión en equipos.

Costos de equipos			
Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Sensor Smart Parking de Libelium	1421	236,90	336627,80
Concentrador Multitech MTCDT-246A-915-US-EU-GB	27	651,11	17579,97
Accesorios extras	1	10000,00	10000,00
		Total	364207,77

- **Segunda parte.**

Se toma en cuenta lo siguiente:

- Maquinaria
- Operador
- Ayudante
- Programación de los nodos y gestión de plataforma

Para facilitar la instalación, en cada una de las zonas se usará una maquinaria diferente, operador y ayudante. En la figura 4.1 se muestra el proceso y maquinaria usada para la instalación de los sensores.



Figura 4.1 Maquinaria y proceso a realizar.

Fuente: [32]

En la tabla 4.14 se presenta el detalle de costos de los ítems mencionados. Estos factores se relacionan con el tiempo de instalación de los equipos.

Tabla 4.14 Inversión en operadores de maquinarias.

Costos de operadores de maquinarias				
Descripción	Cantidad	Costo Unitario/hora	Costo Total/hora	Costo Diario
Costo operador y maquinaria	4	65	260	2080
Costo ayudante	4	2,50	10,00	80,00

En esta última parte se toma en cuenta que se debe realizar 1421 perforaciones en la calzada para la instalación de los sensores, se ocuparán 4 maquinarias, cada perforación requerirá un tiempo aproximado de 30 minutos y el horario de trabajo será de 8 horas diarias. En la tabla 4.15 se calcula el tiempo de instalación de los sensores.

Tabla 4.15 Tiempo de instalación.

Tiempo de instalación		
	Horas	Días
4 máquinas	355,25	44,41
	Gastos	95917,5

Se calcula el costo total de instalación tomando en cuenta el tiempo que se requiere para realizar las instalaciones.

$$\text{Gastos por instalacion} = (2080 + 80) * 44,41$$

$$\text{Total de gastos de instalacion} = \$ 95917,5$$

Otro aspecto, es el servicio de programación, esto incluye el registro de los sensores y concentradores en el servidor y la configuración de cada uno de ellos. Se toma en cuenta también un monto aproximado que se invierte en la programación y gestión de la plataforma para la administración de los sitios de parqueo inteligente, cuyos valores han sido recomendados mediante la socialización con un ingeniero en sistemas. Los costos mencionados se muestran en la tabla 4.16 y 4.17 respectivamente.

Tabla 4.16 Inversión en programación de nodos y concentradores.

Costos de servicio de programación de nodos y concentradores			
Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Programación de los nodos / concentradores	1421/27	25	36200
		Total	36200

Tabla 4.17 Inversión en programación y gestión de plataforma.

Costo de programación y gestión de plataforma			
Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Programación y gestión de plataforma	1	100000	100000
		Total	100000

- **Inversión total del proyecto.**

En la tabla 4.18 se presenta los costos totales de la inversión.

Tabla 4.18 Inversión total del proyecto.

Inversión Total	
Gastos en equipos	364207,77
Gastos en instalación	95917,50
Gastos en programación y configuración de nodos y concentradores	36200
Gastos en programación y gestión de la plataforma de administración de sitios	100000
Total	596325,27

4.2.4. VAN y TIR con la implementación del proyecto

Se calcula el valor residual, la depreciación y el flujo de caja proyectado a 5 años, para ello, se toma en cuenta los nuevos valores de ingresos, egresos, inversión inicial y el porcentaje de la inflación anual y el aumento de sueldos en el país.

Tabla 4.19 Valor residual y depreciación sin proyecto.

Valor residual	\$ 59632,52
Depreciación	\$ 107338,55

Tabla 4.20 Flujo de fondos con proyecto.

Periodo	Ingresos	Egresos	Flujo Neto
0	0	-596325,27	-596325,27
1	588242,02	302935,11	285306,91
2	599653,9111	307539,7213	292114,19
3	611287,197	312214,3251	299072,87
4	623146,1686	316959,9828	306186,19
5	635235,2043	321777,7746	313457,43

En la tabla 4.21 se presenta los valores del VAN y la TIR aplicando una tasa de descuento del 12 %, debido a que este es un porcentaje de ganancia esperado de la empresa.

Tabla 4.21 VAN y TIR con proyecto.

Tasa de Descuento	12%
VAN	\$ 476609,87
TIR	40%

4.3. Resultados del VAN y TIR

En las figuras 4.2 y 4.3 se muestra las gráficas del VAN y la TIR sin el proyecto y con el proyecto. Para analizar estos dos factores se debe tomar en cuenta:

Cuando el VAN es:

- $VAN > 0$; *el proyecto es rentable*
- $VAN = 0$; *el proyecto es rentable, ya incluye la ganancia de TD*
- $VAN < 0$; *el proyecto no es rentable*

La TIR es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Para hallar su valor se toma en cuenta:

- Inversión inicial
- Flujo de caja neto
- **Valor actual neto (VAN)**

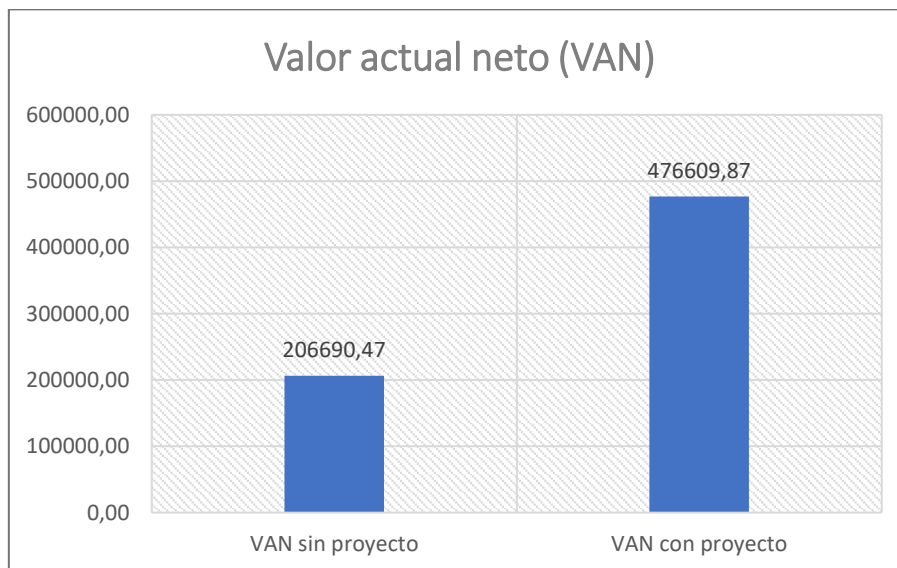


Figura 4.2 VAN sin y con proyecto.

Fuente: Autor

- **Tasa interna de retorno (TIR)**

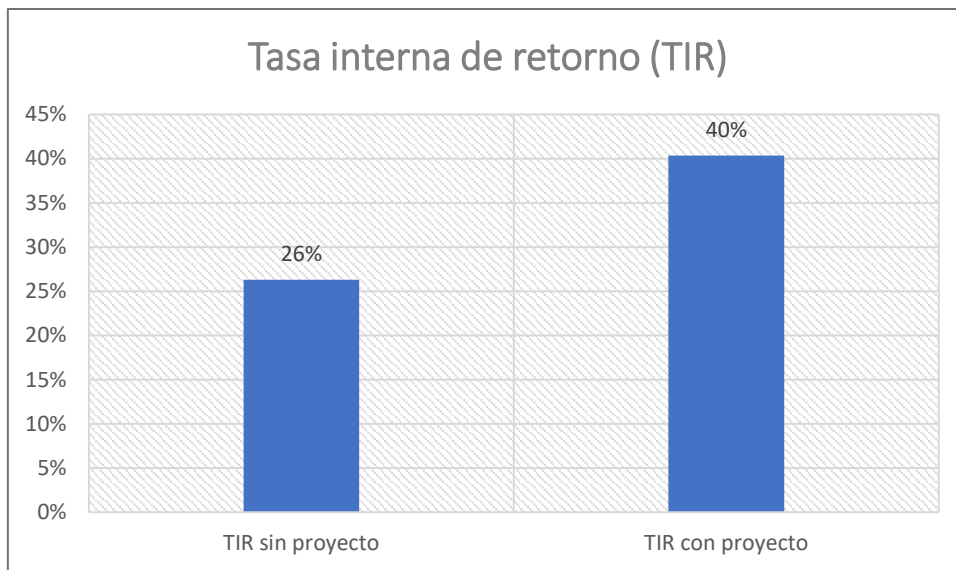


Figura 4.3 TIR sin y con proyecto.

Fuente: Autor

Las gráficas de la VAN y la TIR, tanto para el balance sin proyecto, así como del balance con la implementación del proyecto, nos muestran que la propuesta de parqueo inteligente en el centro histórico de Cuenca es realmente viable económicamente para su implementación. El valor obtenido de la VAN nos presenta que al cabo de 5 años la ganancia obtenida es de \$ 476609,87. Mientras que la TIR del 40 % obtenida es mayor al 12% de la ganancia que espera la empresa, por tanto, la propuesta presentada tiene alta rentabilidad.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y

TRABAJOS FUTUROS

CONCLUSIONES

Finalizado el proyecto de tesis intitulado “Diseño de un sistema de parqueo inteligente para el centro histórico de la ciudad de Cuenca, aplicando una red LPWAN”, se puede mencionar que se ha cumplido los objetivos planteados, logrando un diseño de infraestructura de red acorde a las exigencias actuales de la tecnología y en base a las necesidades de la empresa EMOV, específicamente del departamento que controla el sistema tarifado de sitios de parqueo. Permitiendo la inclusión de la ciudad en proyectos de SmartCities (ciudades inteligentes) y proporcionando herramientas para una gestión eficiente de la movilidad.

Este proyecto utiliza sensores Smart Parking de la marca Libelium, que cumplen con las especificaciones técnicas para la implementación del sistema de parqueo inteligente en la ciudad de Cuenca, pues trabajan sobre el protocolo LoRaWAN, utilizando la banda de los 915 MHz, banda libre en el país según la regulación de la ARCOTEL, posee un nivel muy bajo de consumo de energía, por tanto, la alimentación es a través de baterías, esto conlleva a que el mantenimiento del nodo sea prácticamente casi nulo durante su vida útil. Por otra parte, en cuanto a concentradores, utiliza el modelo MTCDDT-246A-915-US-EU-GB de la marca Multitech, puesto que trabaja sobre el mismo protocolo de comunicación y banda de frecuencia de los nodos, además posee amplia cobertura y capacidad.

La contribución innovadora en este proyecto fue la inclusión de modelos lineales de optimización para el dimensionamiento de una WSN, con el fin de minimizar los costos y obtener la ubicación de los sitios óptimos para los concentradores. La aplicación de este modelo para el sistema de estacionamiento tarifado en el centro histórico ha permitido

obtener la mejor ubicación para la instalación de los concentradores, de manera que se garantice los recursos en base de la cobertura y la capacidad establecida.

Proyectos similares implementados en otras ciudades, han obtenido grandes beneficios gracias a las características en cuanto a la arquitectura, ahorro de energía y funcionamiento que presenta la tecnología LoRa, y sobre la cual se desarrollan diversas aplicaciones de Smart Parking, como la expuesta en nuestro diseño. También dentro del funcionamiento se ha planteado un sistema de cobros que funcione únicamente mediante una aplicación móvil, por lo que su éxito dependerá fundamentalmente de la concientización y cultura de los ciudadanos que utilizan los espacios de estacionamiento.

Para el estudio económico realizado en este trabajo, se tomó en cuenta los valores aproximados de ingresos, egresos e inversiones para el sistema de estacionamiento tarifado en el centro histórico de la ciudad de Cuenca. Estos valores fueron facilitados directamente por la empresa EMOV-EP. Para analizar si la propuesta es viable en términos de implementación, calculamos el VAN y la TIR, llegando a la conclusión que el proyecto tiene alta rentabilidad, debido a que el valor de la TIR es del 40%, lo que supera la tasa de descuento del 12% propuesta en el proyecto, y que al cabo de 5 años se obtendrá una ganancia de \$ 476609,87.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Para el diseño propuesto, mantener actualizados las plazas de parqueo, ya que cambian debido a nuevos proyectos de movilidad en el centro histórico de la ciudad.
- Analizar el espectro de frecuencia de la banda de los 915 MHZ, para la verificación de la disponibilidad de los canales.
- Se recomienda, en caso de instalación de los concentradores, realizarlo a una altura considerable, de entre 10 o más metros a fin de garantizar una mejor adquisición de la información enviada por los sensores.
- A la empresa EMOV, tener en cuenta la propuesta de diseño presentado para una futura implementación.
- Como trabajo futuro, podría ser el desarrollo de la parte del software para la gestión del sistema de parqueo inteligente en el centro de la ciudad, complementando como una segunda parte a este trabajo de titulación y también, un estudio del rango de transmisión de LoRa en el centro histórico utilizando los equipos mencionados en este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Buestán Vera, “Desarrollo de una red IoT con tecnología LoRa para detección de automóviles.” 2019, Accessed: Jan. 23, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16897>.
- [2] “TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN PARA IOT,” Accessed: Sep. 21, 2021. [Online]. Available: www.efor.es.
- [3] “Conoce Cuenca | Turismo Cuenca Ecuador.” <http://cuenca.com.ec/es/conoce-cuenca> (accessed Nov. 25, 2021).
- [4] “919 vehículos más se matricularon en Cuenca - Diario El Mercurio.” <https://elmercurio.com.ec/2020/01/04/919-vehiculos-mas-se-matricularon-en-cuenca/> (accessed Nov. 25, 2021).
- [5] “Estacionamiento Inteligente - Telcombas.” <http://www.telcombas.com/estacionamiento-inteligente/> (accessed Dec. 20, 2021).
- [6] “Internet de las Cosas: objetos que cumplen los deseos de sus usuarios.” <https://www.metroecuador.com.ec/ec/tecnologia/2020/07/28/internet-de-las-cosas-objetos-que-cumplen-los-deseos-de-sus-usuarios.html> (accessed Nov. 24, 2021).
- [7] L. Dopazo González, “Test y despliegue de tecnología de comunicaciones LoRa para aplicaciones de Internet of Things,” 2019.
- [8] E. E. Carrasco Galdame, “Metodología para selección de tecnologías LPWAN para diversas aplicaciones de internet de las cosas,” 2020, Accessed: Dec. 15, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/179720>.
- [9] M. Jarrah and F. Al-Shrida, “A multi-objective evolutionary solution to improve the quality of life in Smart Cities,” *2017 14th Int. Conf. Smart Cities Improv. Qual. Life Using ICT IoT, HONET-ICT 2017*, vol. 2017-January, pp. 36–39, Nov. 2017, doi: 10.1109/HONET.2017.8102217.
- [10] “Página de inicio - LoRa Alliance®.” <https://lora-alliance.org/> (accessed Dec. 15, 2021).
- [11] “Y.2060 : Visión general de la Internet de las cosas.” <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I/es> (accessed Dec. 15, 2021).

- [12] “El Internet de las Cosas. Conoce sus objetivos | Telcel Empresas.” <https://www.telcel.com/empresas/tendencias/notas/conocer-objetivo-de-iot.html> (accessed Dec. 15, 2021).
- [13] “Tutorial de IoT para principiantes: ¿Qué es Internet de las cosas? Conceptos básicos de IoT.” <https://www.guru99.com/iot-tutorial.html> (accessed Dec. 15, 2021).
- [14] “(PDF) De las redes de sensores inalámbricos al Internet de las cosas: ¿Tecnologías complementarias o antagonistas?” https://www.researchgate.net/publication/310320964_De_las_redes_de_sensores_inalambricas_al_Internet_de_las_cosas_Tecnologias_complementarias_o_antagonistas (accessed Jan. 23, 2022).
- [15] “Wireless Sensor Network.” <http://irmadwmulyanti.it.student.pens.ac.id/index5.html> (accessed Jan. 23, 2022).
- [16] “Dispositivos conectados: LPWAN y su importancia para la Internet de las Cosas - ITSitio.” <https://www.itsitio.com/ar/dispositivos-conectados-lpwan-importancia-la-internet-las-cosas/> (accessed Dec. 15, 2021).
- [17] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,” *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.ICTE.2017.12.005.
- [18] “Qué es LPWAN: entrada al protocolo de comunicaciones de IoT.” <https://pandorafms.com/blog/es/que-es-lpwan/> (accessed Dec. 15, 2021).
- [19] J. C. Hernández Rodríguez, “Propuesta de escenario IoT LoRa utilizando la plataforma ThingsBoard,” Jun. 2019, Accessed: Jan. 23, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/xmlui/handle/123456789/11901>.
- [20] D. T. Ferrandis, “Estudio experimental de tecnologías LPWAN en entornos industriales 4.0,” Oct. 2020, Accessed: Jan. 23, 2022. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/152370>.
- [21] “LoRaWAN® Formally Recognized as ITU International Standard for Low Power Wide Area Networking - LoRa Alliance®.” <https://lora-alliance.org/lora-alliance-press-release/lorawan-formally-recognized-as-itu-international-standard-for-low-power-wide-area-networking/> (accessed Dec. 20, 2021).

- [22] “¿Qué son LoRa y LoRaWAN? | The Things Network.” <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/> (accessed Dec. 15, 2021).
- [23] E. L. Sector, A. Peruano, D. Pérez, and R. Risco, “IMPLEMENTACIÓN DE LORA Y LORAWAN COMO ESCENARIO FUTURO DE LA INDUSTRIA 4.0 EN IMPLEMENTATION OF LORA AND LORAWAN AS A FUTURE SCENARIO OF INDUSTRY 4.0 IN PERUVIAN AGRO-INDUSTRY SECTOR.”
- [24] A. Rafael and J. Osorio Jiménez, “Mitigación de pérdida de paquetes en una red LoRaWAN para aplicaciones sin línea de vista,” 2019.
- [25] J. F. Peralta Santos, “Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en cuencas hidrográficas en función del tamaño de carga útil, altura del gateway y potencia de transmisión,” Oct. 2018, Accessed: Jan. 23, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31506>.
- [26] M. Marín Cava, “Sistema de monitorización para elementos móviles IoT mediante redes LPWAN,” 2020, Accessed: Jan. 15, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/8861>.
- [27] “A smart parking solution for the best beach city in the USA - Libelium.” <https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/a-smart-parking-solution-for-the-best-beach-city-in-the-usa/> (accessed Dec. 19, 2021).
- [28] “Smart Parking project in Montpellier to relieve traffic congestion and reduce car parking search - Libelium.” <https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/smart-parking-project-in-montpellier-to-relieve-traffic-congestion-and-reduce-car-parking-search/> (accessed Dec. 20, 2021).
- [29] “(PDF) SmartParkUdeA: Sistema IoT para el estacionamiento inteligente de vehículos en ciudad universitaria.” https://www.researchgate.net/publication/349573638_SmartParkUdeA_Sistema_IoT_para_el_estacionamiento_inteligente_de_vehiculos_en_ciudad_universitaria (accessed Jan. 21, 2022).
- [30] “La compañía de Waterloo simplifica el proceso de estacionamiento en ciudades concurridas - Espanol News - espanol.news.” <https://espanol.news/la-compania->

- de-waterloo-simplifica-el-proceso-de-estacionamiento-en-ciudades-concurridas/ (accessed Jan. 21, 2022).
- [31] D. H. S., *Approximation Algorithms for NP-hard problems*, no. January 2001. California.
- [32] “Smart Parking node - Smart Parking Technical Guide.” <https://development.libelium.com/smart-parking-technical-guide/smartparkingnode> (accessed Dec. 20, 2021).
- [33] “LoRaWAN® marks used under license from the LoRa Alliance® SPS-X-Smart Parking Sensor *Specifications subject to change,” Accessed: Jan. 31, 2022. [Online]. Available: www.eleven-x.com.
- [34] “BOSCH 167-9421 Smart Parking Lot Sensor User Manual - Manuals+.” <https://manuals.plus/bosch/167-9421-smart-parking-lot-sensor-manual> (accessed Jan. 31, 2022).
- [35] “PLAN NACIONAL DE FRECUENCIAS,” Accessed: Jan. 30, 2022. [Online]. Available: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0_14-07-21_v.1.pdf.
- [36] Multitech, “MultiTech Conduit® Programmable Gateway for the Internet of Things US915 for North America,” Accessed: Jan. 31, 2022. [Online]. Available: www.multitech.com/conduit.
- [37] “F8L10GW F8L10GW LoRa Gateway User Manual Xiamen Four-Faith Communication Technology.” <https://fccid.io/2ALUW-F8L10GW/User-Manual/user-manual-4182013.html> (accessed Jan. 31, 2022).
- [38] “Low-cost IoT LoRa / LoRaWAN gateway, easy to use | LORIX One.” <https://www.lorixone.io/en/products> (accessed Jan. 31, 2022).
- [39] E. Inga, J. Inga, and A. Ortega, “Novel Approach Sizing and Routing of Wireless Sensor Networks for Applications in Smart Cities,” *Sensors 2021, Vol. 21, Page 4692*, vol. 21, no. 14, p. 4692, Jul. 2021, doi: 10.3390/S21144692.
- [40] C. L. Carrión Sarmiento, “Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en ambientes urbanos,” Oct. 2018, Accessed: Jan. 21, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31513>.

- [41] “LoRaWAN gateway: the Best way calculate the network capacity.”
<https://www.mokolora.com/calculate-the-network-capacity-of-lorawan-gateway/>
(accessed Jan. 27, 2022).
- [42] “LoRa and LoRaWAN: Technical overview | DEVELOPER PORTAL.”
<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/> (accessed Feb. 03, 2022).
- [43] “Seguridad en Redes LoRaWAN TM - Tecnología Humanizada.”
<https://humanizationoftechnology.com/seguridad-en-redes-lorawan/revista/iot/01/2019/> (accessed Jan. 15, 2022).
- [44] I. P. Sánchez Peñafiel and C. F. Shicay Arias, “Diseño de infraestructura de red para gestión de parqueo en el casco urbano de la ciudad de Cuenca,” 2015, Accessed: Jan. 26, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8049>.
- [45] “Consultar Multas de Tránsito Cuenca | EMOV Cuenca (2021).”
<https://www.tramitesbasicos.com/multas-emov-cuenca/> (accessed Nov. 24, 2021).

ANEXOS

ANEXO 1: Escenario original y optimizado para las zonas 2, 3 y 4.

- **Escenario original para la zona 2**

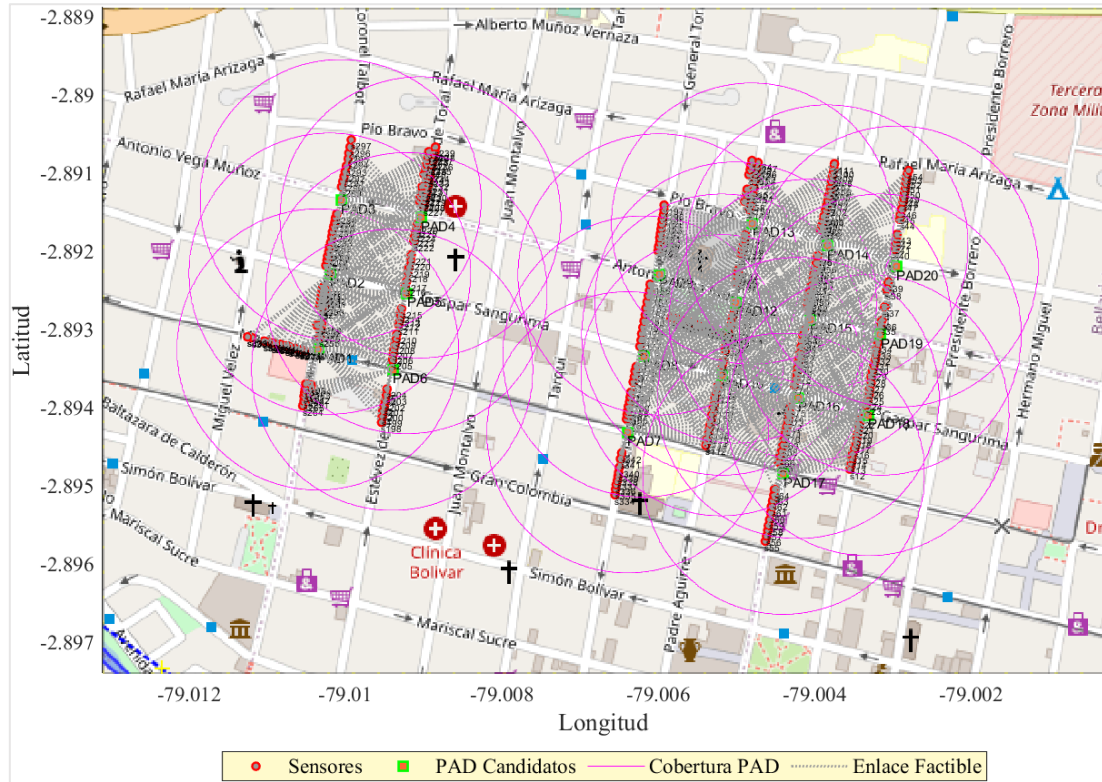


Figura 3.21 Escenario original para la zona 2. Radio de cobertura de 180m.

Fuente: Autor

Tabla 3.11 Ubicación de los sitios candidatos – zona 2

Número	Dirección	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
2.1	Coronel Talbot y Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89326	-79.01035
2.2	Coronel Talbot y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.89229	-79.0102
2.3	Coronel Talbot y Vega Muñoz (Esquina)	-2.89135	-79.01006
2.4	Estévez de Toral y Vega Muñoz (Esquina)	-2.89157	-79.00904
2.5	Estévez de Toral y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.89254	-79.00922
2.6	Estévez de Toral y Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89352	-79.0094
2.7	General Torres y Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89432	-79.00639
2.8	General Torres y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.89335	-79.00619
2.9	General Torres y Vega Muñoz (Esquina)	-2.8923	-79.00599
2.10	Padre Aguirre y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.89359	-79.00519

2.11	Padre Aguirre y Carlos Crespi (Esquina)	-2.89307	-79.00518
2.12	Padre Aguirre y Vega Muñoz (Esquina)	-2.89266	-79.00501
2.13	Padre Aguirre y Pio Bravo (Esquina)	-2.89165	-79.0048
2.14	Benigno Malo y Pio Bravo (Esquina)	-2.89193	-79.00384
2.15	Benigno Malo y Vega Muñoz (Esquina)	-2.89288	-79.00406
2.16	Benigno Malo y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.89388	-79.00421
2.17	Benigno Malo y Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89485	-79.0044
2.18	Luis Cordero y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.8941	-79.00332
2.19	Luis Cordero y Vega Muñoz (Esquina)	-2.89307	-79.00316
2.20	Luis Cordero y Pio Bravo (Esquina)	-2.8922	-79.00295

- **Escenario original para la zona 3**

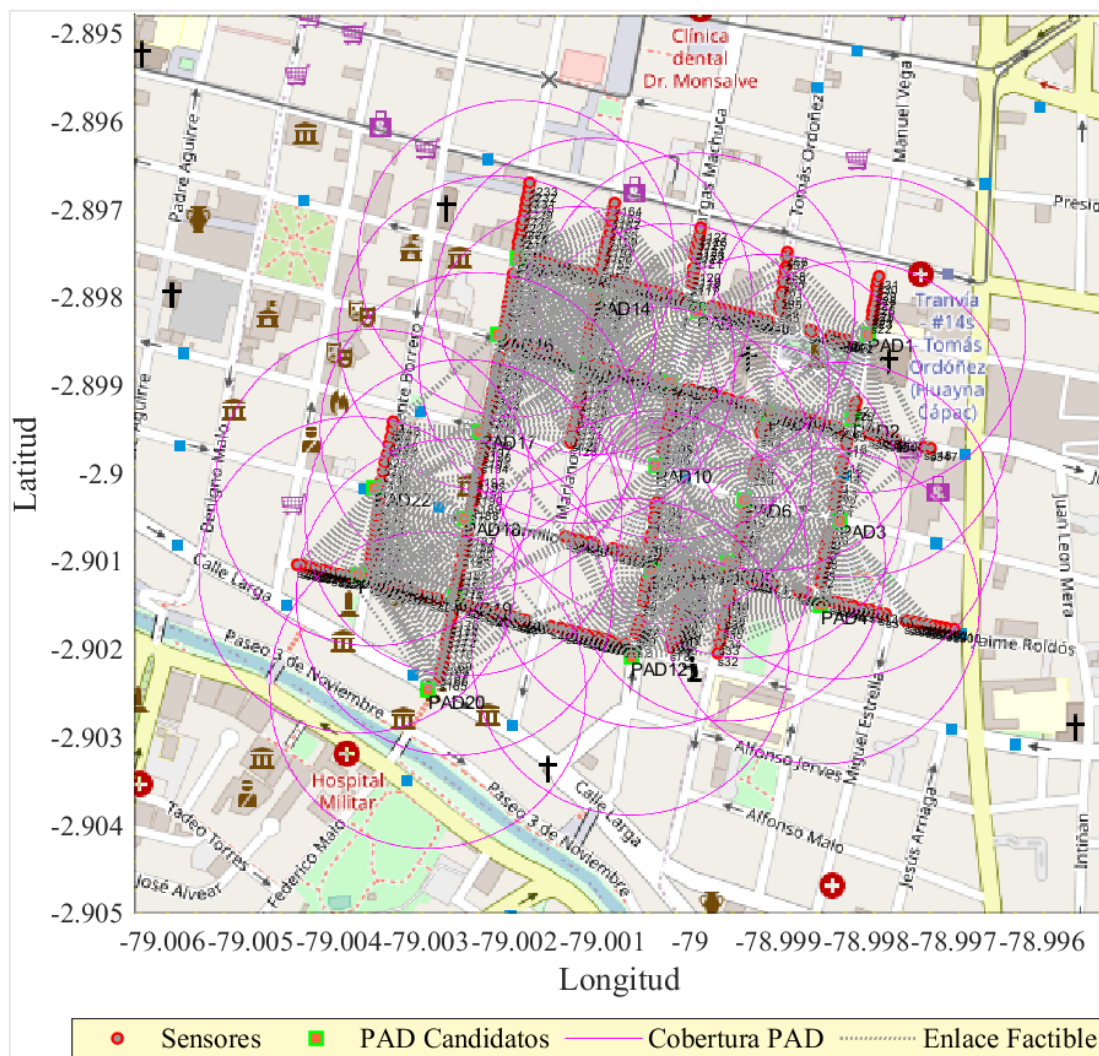


Figura 3.22 Escenario original para la zona 3. Radio de cobertura de 180m.

Fuente: Autor

Tabla 3.12 Ubicación de los sitios candidatos – zona 3.

Número	Dirección	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
3.1	Manuel Vega Y Simón Bolívar (Esquina)	-2.89842	-78.99798
3.2	Manuel Vega Y Mariscal Sucre (Esquina)	-2.89939	-78.99815
3.3	Manuel Vega Y Presidente Córdova (Esquina)	-2.90054	-78.9983
3.4	Manuel Vega Y Juan Jaramillo (Esquina)	-2.90151	-78.99851
3.5	Tomás Ordóñez Y Juan Jaramillo (Esquina)	-2.90102	-78.99957
3.6	Tomás Ordóñez Y Presidente Córdova (Esquina)	-2.9003	-78.99938
3.7	Tomás Ordóñez Y Mariscal Sucre (Esquina)	-2.89931	-78.99911
3.8	Vargas Machuca Y Simón Bolívar (Esquina)	-2.89816	-78.99992
3.9	Vargas Machuca Y Mariscal Sucre (Esquina)	-2.89896	-79.00021
3.10	Vargas Machuca Y Presidente Córdova (Esquina)	-2.89991	-79.0004
3.11	Vargas Machuca Y Juan Jaramillo (Esquina)	-2.9011	-79.00044
3.12	Vargas Machuca Y Honorato Vásquez (Esquina)	-2.90209	-79.00067
3.13	Mariano Cueva Y Mariscal Sucre (Esquina)	-2.89877	-79.00128
3.14	Mariano Cueva Y Simón Bolívar (Esquina)	-2.89799	-79.00109
3.15	Hermano Miguel Y Simón Bolívar (Esquina)	-2.89756	-79.00197
3.16	Hermano Miguel Y Mariscal Sucre (Esquina)	-2.89842	-79.00219
3.17	Hermano Miguel Y Presidente Córdova (Esquina)	-2.899517	-79.002396
3.18	Hermano Miguel Y Juan Jaramillo (Esquina)	-2.900508	-79.002571
3.19	Hermano Miguel Y Honorato Vásquez (Esquina)	-2.901409	-79.00267
3.20	Hermano Miguel Y Calle Larga (Esquina)	-2.902469	-79.002975
3.21	Presidente Borrero Y Honorato Vásquez (Esquina)	-2.901158	-79.003777
3.22	Presidente Borrero Y Juan Jaramillo (Esquina)	-2.900165	-79.003593

- **Escenario original para la zona 4**

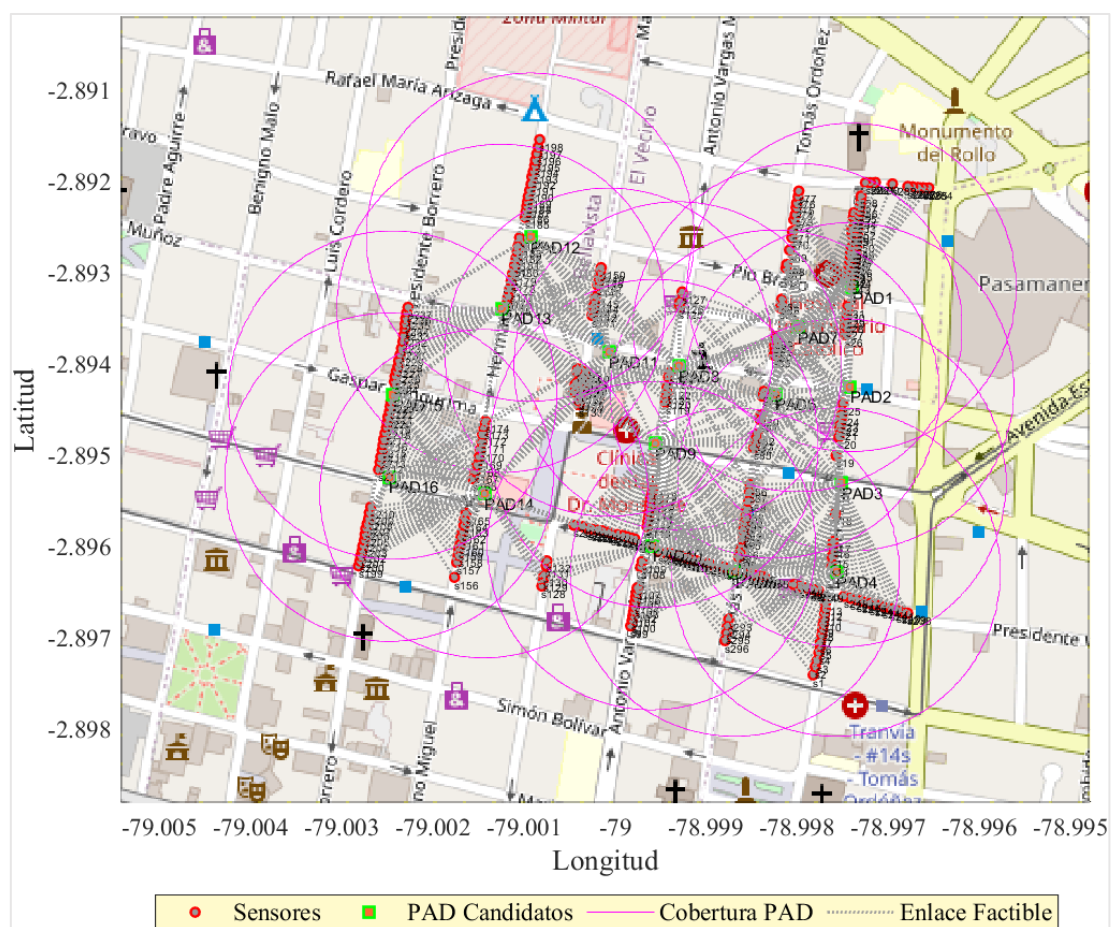


Figura 3.23 Escenario original para la zona 4. Radio de cobertura de 180m.

Fuente: Autor

Tabla 3.13 Ubicación de los sitios candidatos – zona 4.

Número	Dirección	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
4.1	Manuel Vega y C. Pio Bravo (Esquina)	-2.89316	-78.9974
4.2	Manuel Vega y Antonio Vega Muñoz (Esquina)	-2.89425	-78.99742
4.3	Manuel Vega y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.8953	-78.99751
4.4	Manuel Vega y C. Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89628	-78.99757
4.5	Tomás Ordóñez y C. Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89628	-78.99868
4.6	Tomás Ordóñez y Antonio Vega Muñoz (Esquina)	-2.89433	-78.99824
4.7	Tomás Ordóñez y A. Valdiviezo (Esquina)	-2.8936	-78.99799
4.8	Vargas Machuca y Antonio Vega Muñoz (Esquina)	-2.89402	-78.9993
4.9	Vargas Machuca y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.89487	-78.99956
4.10	Vargas Machuca y C. Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89599	-78.99959

4.11	Mariano Cueva y Antonio Vega Muñoz (Esquina)	-2.89387	-79.00006
4.12	Hermano Miguel y C. Pio Bravo (Esquina)	-2.89261	-79.00092
4.13	Hermano Miguel y Antonio Vega Muñoz (Esquina)	-2.89339	-79.00124
4.14	Hermano Miguel y C. Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89542	-79.00143
4.15	Presidente Borrero y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.89434	-79.00243
4.16	Presidente Borrero y C. Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89524	-79.00247

• **Escenario optimizado para la zona 2**



Figura 3.24 Escenario optimizado para la zona 2. Radio de cobertura de 180m.

Fuente: Autor

Tabla 3.14 Ubicación de los sitios óptimos – zona 2.

Número	Dirección	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
2.1	Coronel Talbot y Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89326	-79.01035
2.3	Coronel Talbot y Vega Muñoz (Esquina)	-2.89135	-79.01006
2.7	General Torres y Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89432	-79.00639
2.11	Padre Aguirre y Carlos Crespi (Esquina)	-2.89307	-79.00518
2.13	Padre Aguirre y Pio Bravo (Esquina)	-2.89165	-79.0048
2.17	Benigno Malo y Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89485	-79.0044
2.20	Luis Cordero y Pio Bravo (Esquina)	-2.8922	-79.00295

- **Escenario optimizado para la zona 3**

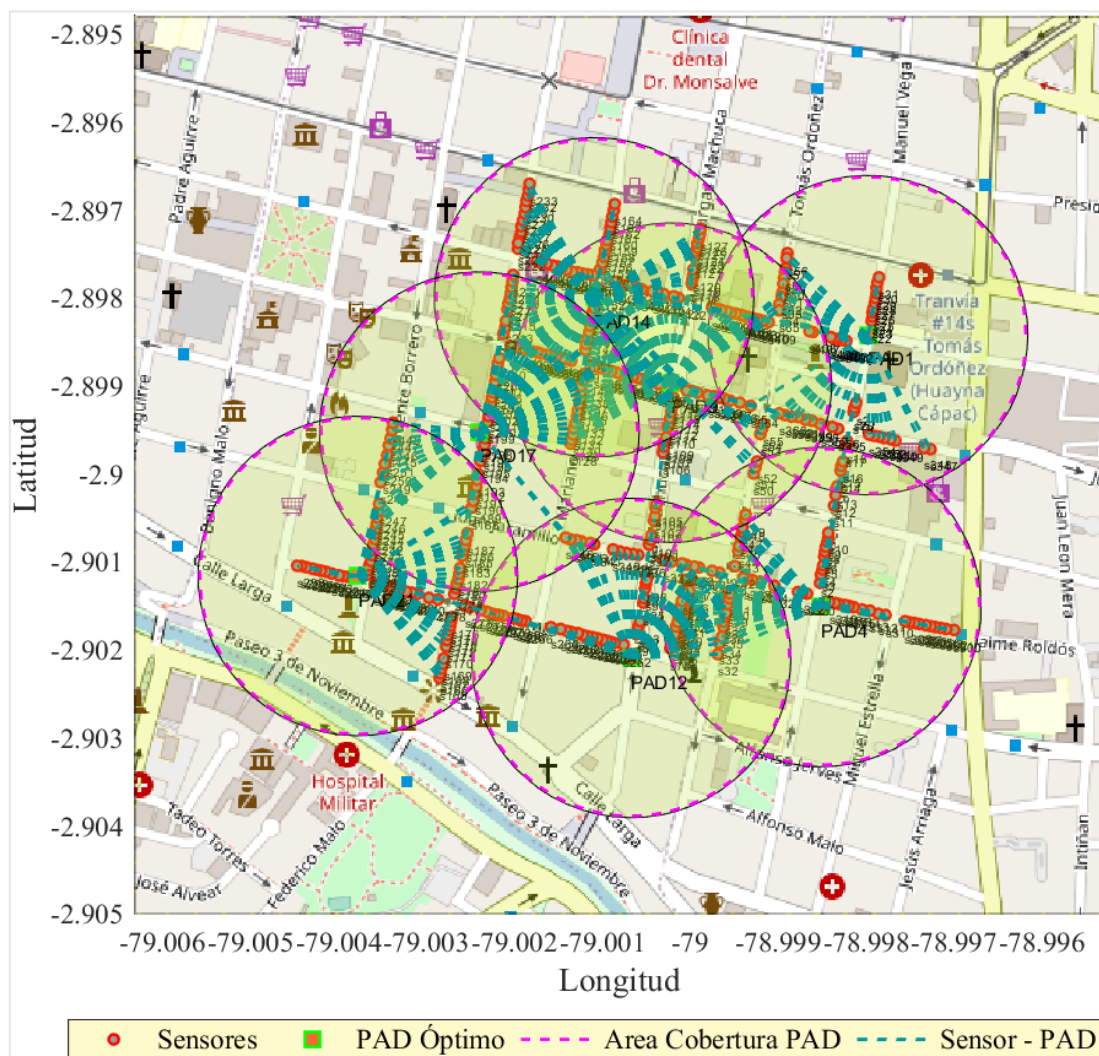


Figura 3.25 Escenario optimizado para la zona 3. Radio de cobertura de 180m.

Fuente: Autor

Tabla 3.15 Ubicación de los sitios óptimos – zona 3.

Número	Dirección	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
3.1	Manuel Vega Y Simón Bolívar (Esquina)	-2.89842	-78.99798
3.4	Manuel Vega Y Juan Jaramillo (Esquina)	-2.90151	-78.99851
3.9	Vargas Machuca Y Mariscal Sucre (Esquina)	-2.89896	-79.00021
3.12	Vargas Machuca Y Honorato Vásquez (Esquina)	-2.90209	-79.00067
3.14	Mariano Cueva Y Simón Bolívar (Esquina)	-2.89799	-79.00109
3.17	Hermano Miguel Y Presidente Córdova (Esquina)	-2.899517	-79.002396
3.21	Presidente Borrero Y Honorato Vásquez (Esquina)	-2.901158	-79.003777

- **Escenario optimizado para la zona 4**

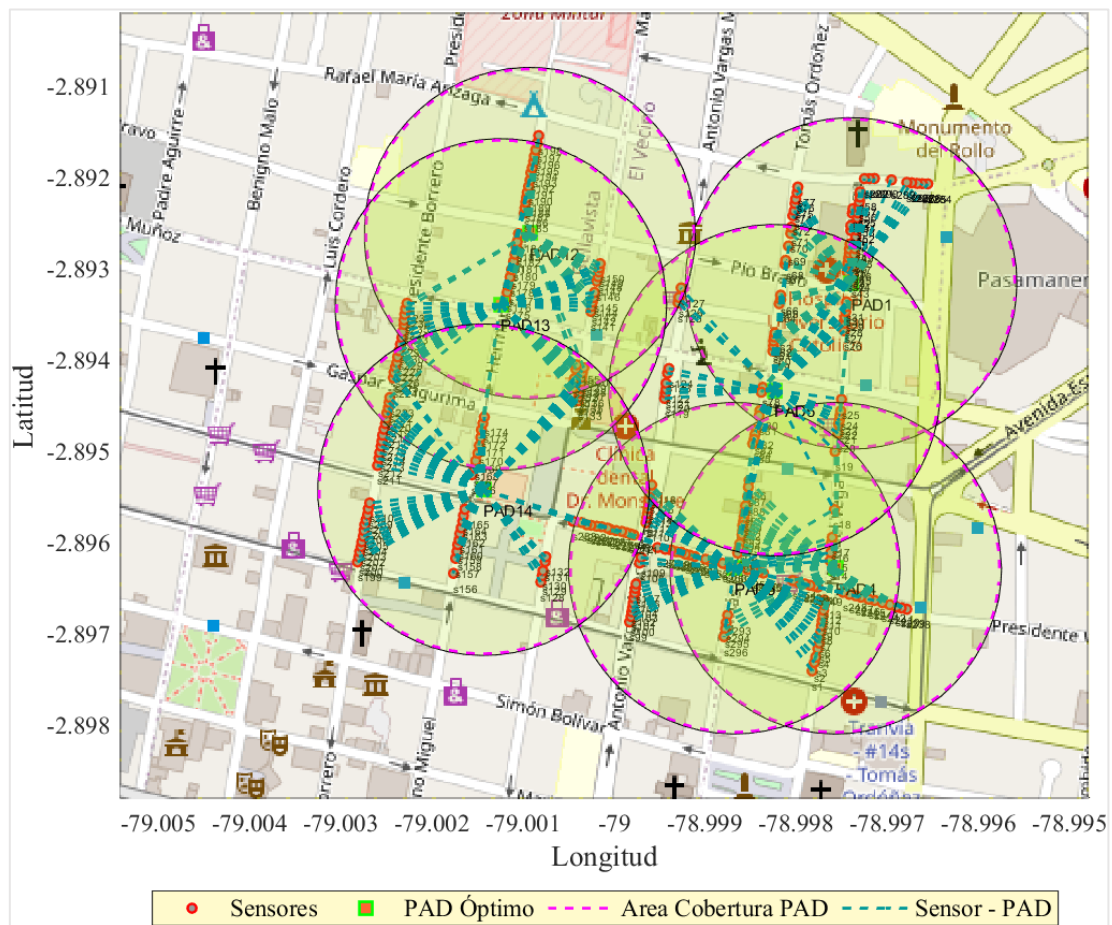


Figura 3.26 Escenario optimizado para la zona 4. Radio de cobertura de 180m.

Fuente: Autor

Tabla 3.16 Ubicación de los sitios óptimos – zona 4.

Número	Dirección	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
4.1	Manuel Vega y C. Pio Bravo (Esquina)	-2.89316	-78.9974
4.4	Manuel Vega y C. Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89628	-78.99757
4.8	Vargas Machuca y Antonio Vega Muñoz (Esquina)	-2.89402	-78.9993
4.10	Vargas Machuca y C. Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89599	-78.99959
4.12	Hermano Miguel y C. Pio Bravo (Esquina)	-2.89261	-79.00092
4.15	Presidente Borrero y Gaspar Sangurima (Esquina)	-2.89434	-79.00243
4.16	Presidente Borrero y C. Mariscal Lamar (Esquina)	-2.89524	-79.00247

ANEXO 2: Infracciones emitidas por la EMOV

Tomando en cuenta el salario básico unificado mensual para el año 2021 cuyo valor es de \$400, los valores económicos presentados en la tercera columna son obtenidos del sitio web de la EMOV EP.

Tabla 4.22 Sanciones fijadas en proporción a la remuneración básica unificada mensual [45].

Infracción	Sanción porcentaje del salario básico unificado	Equivalente aproximado en dólares
Ausencia de tarjeta u otro medio definido por la EMOVEP para el uso de zonas tarifadas	5%	\$19.70
Excederse en el tiempo máximo permitido de parqueo	5%	\$19.70
Alteración y/o falsificación de tarjeta u otro medio definido por la EMOV-EP	10%	\$19.70
Estacionar un vehículo motorizado en zona prohibida.	20%	\$39.40
Incursión con vehículos en ciclo vías, zonas peatonales, o vías que se encuentren momentáneamente cerradas al tránsito motorizado.	20%	\$39.40
Detener el vehículo generando doble fila.	10%	\$19.70
Estacionar el vehículo y realizar ventas en la vía pública	10%	\$19.70
Detener o estacionar el vehículo obstaculizando el espacio asignado para paradas de transporte público.	20%	\$39.40
Incursión con vehículos en carriles exclusivos de transporte público.	20%	\$39.40
Uso indebido de salvoconductos.	50%	\$197
Remolque del vehículo con grúa por parqueo en zona prohibida.	15%	\$58.70
Remolque de un vehículo con grúa por exceso en el tiempo máximo autorizado de parqueo.	10%	\$19.70
Inmovilización de vehículos pesados parqueados en zonas prohibidas o en las vías señaladas en esta ordenanza	50%	\$197
Vehículos pesados circulando en el Centro Histórico de Cuenca en horas no autorizadas.	50%	\$197

Realizar carga o descarga en vehículos menores a 3.5 toneladas en el Centro Histórico, fuera del horario autorizado.	20%	\$39.40
Realizar carga o descarga en vehículos pesados o menores a 3.5 toneladas, fuera del horario autorizado, según las distintas zonas de la ciudad.	20%	\$39.40
Obstruir vías o veredas con bienes o materiales.	Retiro de material a costa de propietario y multa de 20%	\$39.40
Remolque de vehículo con grúa por tener 3 o más multas impagas por cualquiera de las infracciones previstas en esta ordenanza.	10% deuda por multas pendientes	\$19.70