EKSIGMA
Revista Ecuatoriana de Conocimiento Científico

Artículo de investigación

Diseño y análisis de una red LoRaWAN para la comunicación de vehículos de emergencia en entornos urbanos

Design and Analysis of a LoRaWAN Network for Emergency Vehicle Communication in Urban Environments

Carlos E. Mosquera-Bone[1]
carlosmosquera@insluistello.edu.ec
[1]Instituto Superior Tecnológico Luis Tello, Ecuador, 080116

Citación: Mosquera Bone, C. (2025). Design and Analysis of a LoRaWAN Network for Emergency Vehicle Communication in Urban Environments. *EKSIGMA*, *1*(2), 56-73. https://eksigma.com/index.php/principal/article/view/4

Recibido: *05 marzo 2025*
Aceptado: *08 abril 2025*
Publicado: *15 mayo 2025*

EKSIGMA
ISSN: 3121-2689

Correspondencia:
carlosmosquera@insluistello.edu.ec

Copyright © 2025. Los autores conservan los derechos de autor y los derechos de publicación. Asimismo, otorgan a EKSIGMA el derecho no exclusivo de primera publicación. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

Resumen: El gran avance de la tecnología y evolución de los sistemas de comunicaciones móviles y de las redes avanzadas han propiciado el uso de redes de sensores inalámbricos -WSN-, que se caracterizan por su ausencia de cableado, escalabilidad y poco consumo de energía, el objetivo principal de este estudio consistió en el diseño de una WSN detallando los componentes principales para establecer una infraestructura orientada a la comunicación de vehículos en casos de emergencia dentro de la ciudad de Esmeraldas, la presente investigación se la realizó mediante una recolección bibliográfica profunda con un enfoque sistemático y analítico, en la elaboración del diseño de la red de sensores se tuvo que tener en cuenta dos factores, el tipo de comunicación la cual se basó en arquitectura de red LoraWAN, y el radio máximo de cobertura donde se utilizó el modelo Okumura-Hata 231, una vez determinado la cobertura se procedió a probar el alcance mediante el programa CupCarbon para determinar el número de pasarelas -gateway- a utilizar, y Radio Mobile para predecir el desempeño del sistema de radio enlace, los resultados obtenidos del radio máximo de cobertura fue de 1,52km, determinando que para lograr una alcance total en la ciudad de Esmeraldas se deben colocar 6 pasarelas, en donde logra la transmisión de los datos sin embargo la aplicación Radio Mobile demostró en la simulación que existen lugares donde la cobertura no se lograba esto se debió a las edificaciones y zonas montañosas del lugar.

Palabras clave: WSN; transporte; LPwan; LoraWan; simulación.

Abstract: *The great progress in technology and evolution of mobile communications systems and advanced networks have led to the use of wireless sensor networks -WSN-, which are characterized by their absence of wiring, scalability and low power consumption, The main objective of this study consisted in the design of a WSN detailing the main components to establish an infrastructure oriented to the communication of vehicles in emergency cases in the city of Esmeraldas, the present investigation was carried out through a deep bibliographic collection with a systematic and analytical approach, in the elaboration of the design of the sensor network two factors had to be taken into account, The type of communication, which was based on LoraWAN network architecture, and the maximum coverage radius, where the Okumura-Hata 231 model was used. Once the coverage was determined, the scope was tested using the CupCarbon program to determine the number of gateways to be used, and Radio Mobile to predict the performance of the radio link system, The results obtained for the maximum coverage radius was 1.52km, determining that to achieve a total range in the city of Esmeraldas 6 gateways should be placed, where the data transmission is achieved, however the Radio Mobile application showed in the simulation that there are places where the coverage was not achieved due to the buildings and mountainous areas of the place.*

Keywords: *WSN; transport;* LPwan; LoraWan; simulation

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la red de sensores inalámbricos -WSN- se han posicionado como una tecnología que permite adaptar el ambiente físico al mundo digital (Quishpe et al., 2019), estas redes permiten a los dispositivos remotos que se conecten sin dificultad independientemente que estén cerca o muy apartados (Alves et al., 2021).

La WSN junto con los sistemas de transporte inteligentes y tecnología incorporada han avanzado hasta tal punto que los conductores pueden hacer uso pleno de diversa información como la congestión del tráfico, los accidentes de vehículos y la velocidad (Yu, 2018), un sistema generalizado de vigilancia del tráfico de vehículos consta de dos partes, un conjunto de sensores y las pasarelas o gateway (Apriantoro et al., 2020), los sensores son dispositivos aptos para detectar acciones o estímulos externos y realizar una determinada acción ya que pueden transformar las magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas(Asad et al., 2024); mientras que la pasarela es la encargada de procesar la información y enviar las notificaciones (Budi, 2023).

El presente artículo tiene como objetivo principal realizar el diseño de una WSN orientado a la comunicación de vehículos de emergencia, para lograrlo se realizó una recolección bibliográfica profunda con un enfoque sistemático y analítico, el método sistemático se la aplicó siguiendo el orden manifestado por reglas que permitió llegar a tener una comprensión de la situación dada, por otro lado la metodología analítica permitió conocer sobre los componentes y funcionamiento de la red de sensores inalámbricos, para el cálculo de cobertura de las pasarelas se utilizó el modelo Okumura-Hata 231 que proporcionó los valores de pérdidas dentro del entorno urbano y con ayuda del software CupCarbon y Radio Mobile se realizó la simulación de la cobertura y alcance de las pasarelas. Una problemática a tomar en cuenta es que los nodos -vehículos- se mueven de forma impredecible y a pesar de que existen varios protocolos de comunicación orientados a la WSN presentan limitaciones como es la cobertura y movilidad de los nodos, considerando este aspecto, la opción práctica y viable para lograr el objetivo planteado en este trabajo fue usar tecnología LPwan para ser más específico el estándar LoraWan que utilizan el protocolo de comunicación LoRa y que fue desarrollado por LoRa Alliance para crear WSN orientado al mercado de Internet de las cosas de gran alcance y bajo consumo energético (Cama-Pinto et al., 2016; Enriko et al., 2024).

2. MÉTODOS

2.1. Enfoque metodológico

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo descriptivo–analítico, orientado al diseño y evaluación técnica de una red de sensores inalámbricos aplicada a la comunicación de vehículos de emergencia en un entorno urbano (Fatima et al., 2023). El estudio se sustentó en una revisión bibliográfica sistemática que permitió identificar, analizar y sintetizar aportes científicos relacionados con redes WSN, protocolos de comunicación y movilidad vehicular. De forma complementaria, siguiendo el enfoque de Georgiadis et al. (2025) se aplicó un análisis técnico de los componentes y modelos de propagación, lo que permitió fundamentar la selección de la arquitectura LoRaWAN como alternativa viable para el contexto de estudio.

2.2. Población y muestra

Debido a que la investigación corresponde a un estudio de diseño y simulación, no se definió una población ni muestra en términos estadísticos tradicionales. La unidad de análisis estuvo constituida por los modelos teóricos de propagación de radio, los dispositivos de comunicación LoRaWAN y los escenarios urbanos simulados. En particular, se consideró como entorno de referencia la ciudad de Esmeraldas, Ecuador, seleccionada por sus características urbanas y geográficas. Asimismo, se analizaron pasarelas y nodos finales LoRaWAN a partir de especificaciones técnicas y antecedentes investigativos previos, los cuales fueron seleccionados mediante criterios de pertinencia técnica, compatibilidad normativa y aplicabilidad al contexto del estudio.

2.3. Instrumentos y técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se realizó a través de técnicas documentales y herramientas de simulación con base en Gonzalez et al. (2024). La técnica principal fue la revisión documental sistemática de artículos científicos, informes técnicos y documentación oficial de estándares y fabricantes, lo que permitió sustentar el diseño de la red propuesta. Como instrumentos de apoyo se utilizaron los programas CupCarbon y Radio Mobile, empleados para simular el comportamiento de la red de sensores inalámbricos y predecir el desempeño del enlace radioeléctrico, respectivamente. Adicionalmente, se aplicó el modelo matemático de propagación Okumura-Hata 231 como técnica analítica para estimar el radio de cobertura de las pasarelas en un entorno urbano, considerando los parámetros de frecuencia, altura de antenas y características del medio.

2.4. Procedimiento

El procedimiento metodológico siguiendo el enfoque de Ma et al. (2022) y Pérez & Risco (2019) inició con la identificación y análisis de literatura relevante sobre redes de sensores inalámbricos y sistemas de comunicación vehicular, lo que permitió establecer el marco conceptual del estudio. Posteriormente, se evaluaron distintos protocolos de comunicación con el fin de seleccionar la tecnología más adecuada, determinándose que LoRaWAN cumplía con los requisitos de alcance, bajo consumo energético y soporte para movilidad de nodos. A continuación, se realizó el cálculo del radio de cobertura de las pasarelas mediante la aplicación del modelo Okumura-Hata 231, cuyos resultados sirvieron como base para la configuración de los escenarios de simulación. Finalmente, se ejecutaron simulaciones en CupCarbon para estimar la cobertura de la red y en Radio Mobile para evaluar el desempeño del enlace radioeléctrico considerando factores geográficos y urbanos propios de la ciudad de Esmeraldas.

2.5. Análisis de datos cualitativos

El análisis de datos se realizó de manera descriptiva y comparativa, integrando los resultados obtenidos del modelo matemático de propagación y de las simulaciones efectuadas. Se contrastaron los valores teóricos de cobertura con los resultados generados por las herramientas de simulación, lo que permitió evaluar la coherencia del diseño propuesto, identificar limitaciones asociadas al entorno urbano y estimar el número de pasarelas necesarias para garantizar la cobertura de la ciudad.

2.6. Consideraciones técnicas

El diseño de la red de sensores inalámbricos se fundamentó en criterios técnicos orientados a garantizar la viabilidad operativa, la eficiencia energética y la cobertura adecuada en un entorno urbano con nodos móviles. La selección de la arquitectura LoRaWAN respondió a su capacidad de ofrecer comunicaciones de largo alcance con bajo consumo energético, así como a su soporte para la movilidad de los nodos, característica esencial para la comunicación vehicular. Para el dimensionamiento de la red se consideraron parámetros técnicos como la frecuencia de operación autorizada para la región, la altura de las antenas, el tipo de propagación radioeléctrica y las condiciones geográficas del entorno urbano. Asimismo, se empleó el modelo de propagación Okumura-Hata 231 por su aplicabilidad en escenarios urbanos densos, complementado con herramientas de simulación especializadas que permitieron evaluar el desempeño del enlace y la cobertura real de las pasarelas.

2.7. Consideraciones éticas

La investigación se desarrolló respetando principios éticos fundamentales asociados al uso responsable de la información y a la integridad académica. Al tratarse de un estudio basado en revisión bibliográfica, modelado y simulación, no se involucró la participación directa de personas ni la recolección de datos personales, lo que excluye riesgos relacionados con la privacidad o el consentimiento informado. Todas las fuentes de información utilizadas fueron debidamente citadas, reconociendo la autoría intelectual de los trabajos previos y evitando prácticas de plagio o uso indebido de información.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del diseño de las WSN orientados a la comunicación de vehículos de emergencia con arquitectura LoRaWAN y con los parámetros de los dispositivos a emplearse, los cuales fueron el TM-901 como nodo o dispositivo final y el RAK7240 como pasarela, en la Figura 1 se detalla el funcionamiento del diseño de la WSN.

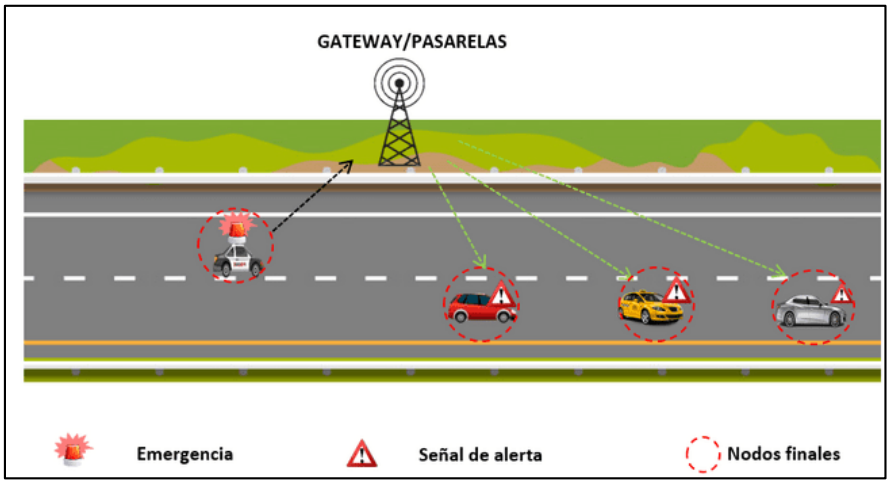


Figura 1. Diseño de la WSN

La pasarela seleccionada propaga ondas de radio omnidireccional, sin embargo, existen factores que alteran las comunicaciones inalámbricas causando pérdida de señal como son el entorno, las limitaciones del espectro del canal, reflexión de la señal y el ruido.

Para calcular los valores de pérdida entre la pasarela y un dispositivo móvil se utilizó el modelo Okumura-Hata 231, aplicando la siguiente formula:

$$L(dB)= 46,3+33,9Log (f))- 13.82 Log(hb)-ahm +(44.9-6.55 Log(hb))Log10(d) \quad (1)$$

En donde:

- f: frecuencia (915MHz - América)
- hb: altura de transmisor (10m)
- hm: altura de receptor (1.5m)
- ahm: Factor de corrección de la altura de la antena
- d: distancia entre transmisor y receptor

Para el cálculo del factor de corrección de la altura de la antena, a(h_m), se aplicó la siguiente formula:

$$ahm= (1,1Log(f)-0,7)(hm)-1,56Log(f)+0,8 \quad (2)$$

Con los resultados de la ecuación 1 se obtuvo un radio de cobertura de 1,52Km para la pasarela, para la medición de la zona de cobertura se empleó el programa CupCarbon en donde se configuró los datos de los dispositivos y radio de cobertura obtenido, y con la información resultante poder facilitar un mapa de cobertura de las pasarelas en la ciudad de Esmeraldas, de esta forma se visualiza en la Figura 2.

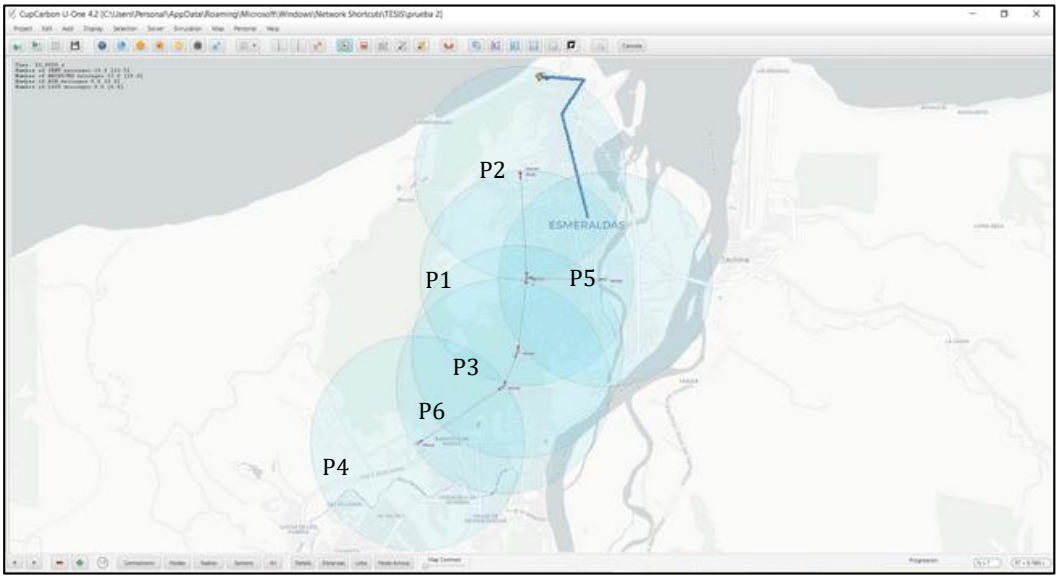


Figura 2 Cobertura de las pasarelas

Fuente: Aplicación CupCarbon

En la simulación se realizó la codificación en Python como se visualiza en la Tabla 1, en donde los dispositivos finales actúan como nodos trasmisor y las pasarelas como nodos receptores.

Tabla 1 Codificación Python

Nodos trasmisor	**Nodos receptores**
#Publisher import time while node.loop(): node.publish("cupcarbon/sensor", "1") time.sleep(2) node.publish("cupcarbon/sensor", "0") time.sleep(2)	**#Subscriber** **import time** **node.subscribe("cupcarbon/sensor")** **def callback(topic, message):** **node.mark(message)** **while node.loop():** **time.sleep(1)**

Para lograr una cobertura de la ciudad de Esmeraldas se deben colocar 6 pasarelas en sitios estratégicos (Tercer piso, Nuevos Horizontes, Esmeraldas libres, Barrio 15 de marzo, isla Luis Vargas Torres y cerro del gatazo), debido a su elevación como se indica en la Tabla 2 los cuales mejoraron la señar de propagación.

Tabla 2 Ubicación de las pasarelas

Pasarela/Gateway	**Lugar**	**Elevación (m)**	**Latitud**	**Longitud**
P1	Nuevos horizontes	83.0	0.97540078	-79.66573256
P2	Tercer piso	70.9	0.98486725	-79.65952988
P3	Esmeraldas libre	98.5	0.95517807	-79.66575150
P4	15 de marzo	72.1	0.94012536	-79.67527121
P5	Isla Luis Vargas Torres	5.0	0.95805405	-79.64888792
P6	Cerro del Gatazo	247.0	0.94811761	-79.66328681

En el cálculo de recepción de las antenas se elaboró el link Budget, como se representa en la Figura 3 con los datos de las antenas.

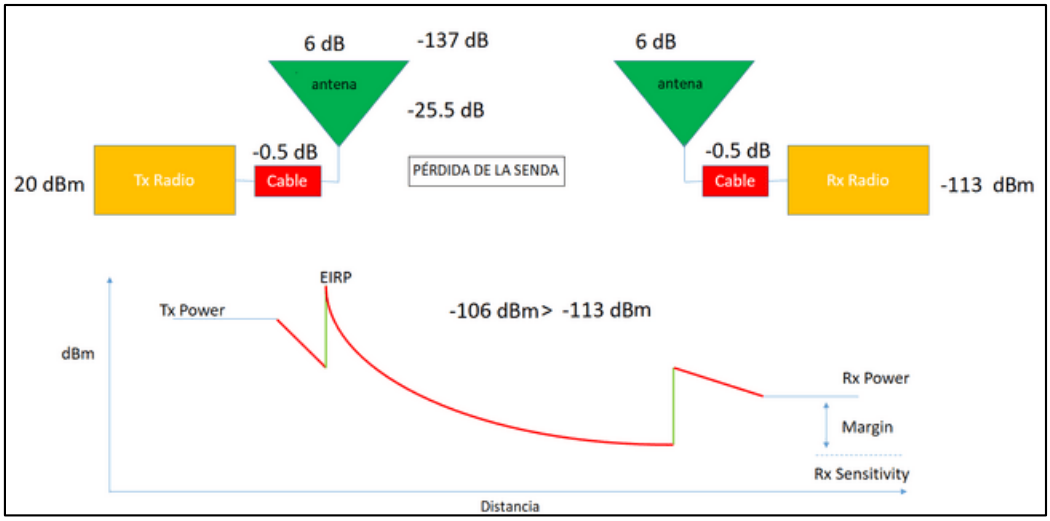
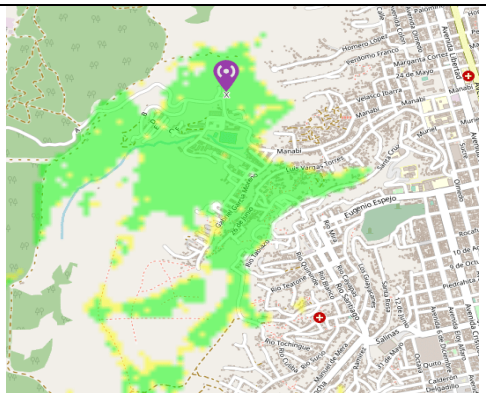
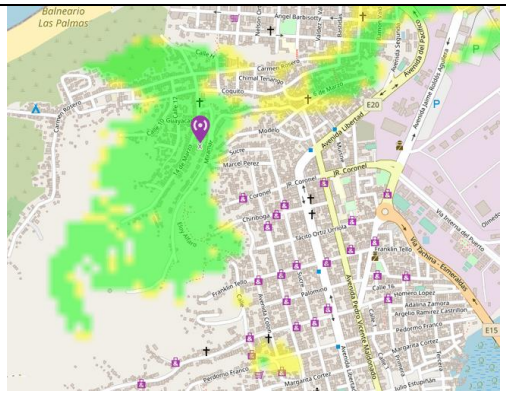


Figura 3 link Budget

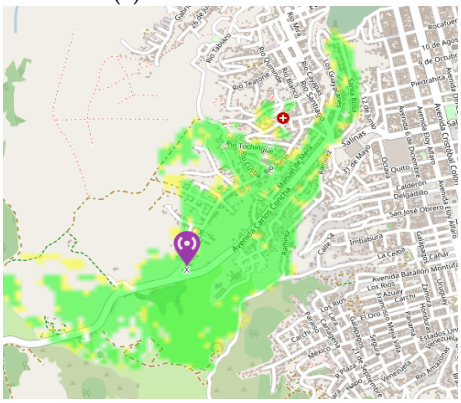
Una vez determinado la posición de las pasarelas se procedió a probar el alcance de las mismas mediante el programa Radio Mobile para predecir el desempeño de sistemas de radio enlace obteniendo los siguientes resultados ilustrados en la Figura 4.



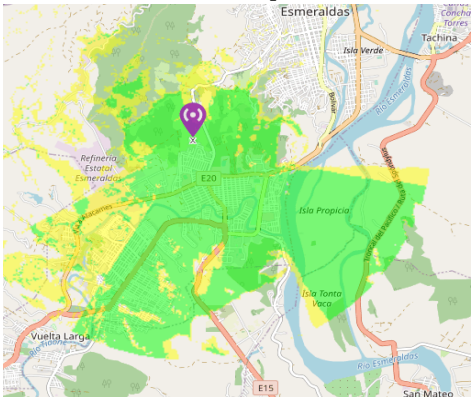
(a) Nuevos horizontes



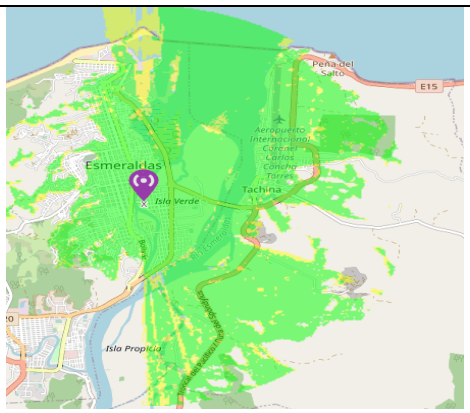
(b) Tercer piso



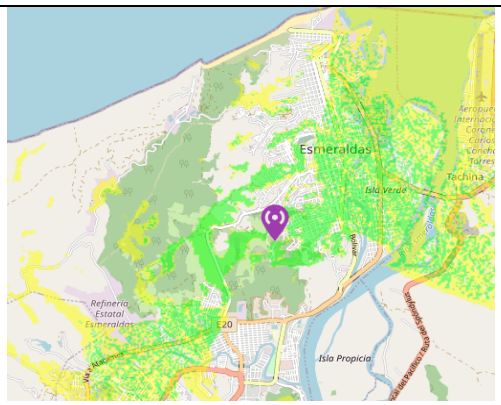
(c) Esmeraldas libre



(d) 15 de marzo de



(e) Isla Luis Vargas Torres



(f) Cerro del Gatazo

Figura 4 Desempeño de sistemas

Fuente: Radio Mobile

En las tablas 5,6,7,8,9,10 se detalla los datos resultantes de la simulación del programa Radio Mobile, ciertos resultados muestran un rango de cobertura de la pasarela mucho mayor a los datos obtenidos de la ecuación, esto se deben a la ubicación elevadas del sector donde se colocaron.

Descripción	Isla Luis Vargas Torres 915 MHz*
Frecuencia	915 MHz
Nombre de la estación base	Isla Luis Vargas Torres
Latitud	0.95805405 °
Longitud	-79.64888792 °
Latitud	00° 57' 28.99"N
Longitud	079° 38' 56.00"W
QRA	FJ00EW
UTM (WGS84)	17N E650338 N0105924
Elevación	5 m
Altura de la antena base	10 m
Ganancia de la antena base	6.0 dBi
Tipo de antena base	omni
Azimuth de la antena base	0 °
Inclinación de la antena base	0 °
Altura de la antena móvil	1.5 m
Ganancia de la antena móvil	25.0 dBi
Potencia Tx de transmisión	25.00000 W
Pérdidas en el cable de transmisión	3.0 dB
Pérdidas en el cable de recepción	0.5 dB
Sensibilidad del receptor	0.500 µV (-113.0 dBm)
Fiabilidad requerida	99.99%
Margen requerido para una señal fuerte	10.0 dB
Zona de señal débil	-1.6 dBµV/m
Zona de señal fuerte	8.4 dBµV/m

Figura 5 Datos simulación Luis Vargas Torres

Fuente: Radio Mobile

Descripción	Esmeraldas libre 915 MHz
Frecuencia	915 MHz
Nombre de la estación base	Esmeraldas libre
Latitud	0.95517807 °
Longitud	-79.66575150 °
Latitud	00° 57' 18.64"N
Longitud	079° 39' 56.71"W
QRA	FJ00EW
UTM (WGS84)	17N E648461 N0105605
Elevación	98.5 m
Altura de la antena base	10 m
Ganancia de la antena base	6.0 dBi
Tipo de antena base	omni
Azimuth de la antena base	0 °
Inclinación de la antena base	0 °
Altura de la antena móvil	2.0 m
Ganancia de la antena móvil	2.0 dBi
Potencia Tx de transmisión	25.00000 W
Pérdidas en el cable de transmisión	3.0 dB
Pérdidas en el cable de recepción	0.5 dB
Sensibilidad del receptor	0.500 µV (-113.0 dBm)
Fiabilidad requerida	99.99%
Margen requerido para una señal fuerte	10.0 dB
Zona de señal débil	21.4 dBµV/m
Zona de señal fuerte	31.4 dBµV/m

Figura 6 Datos simulación Esmeraldas libre

Fuente: Radio Mobile

Descripción	nuevos horizontes 915 MHz
Frecuencia	915 MHz
Nombre de la estación base	nuevos horizontes
Latitud	0.97540078 °
Longitud	-79.66573256 °
Latitud	00° 58' 31.44"N
Longitud	079° 39' 56.64"W
QRA	FJ00EX
UTM (WGS84)	17N E648463 N0107841
Elevación	83 m
Altura de la antena base	10 m
Ganancia de la antena base	6.0 dBi
Tipo de antena base	omni
Azimuth de la antena base	0 °
Inclinación de la antena base	0 °
Altura de la antena móvil	2.0 m
Ganancia de la antena móvil	2.0 dBi
Potencia Tx de transmisión	25.00000 W
Pérdidas en el cable de transmisión	3.0 dB
Pérdidas en el cable de recepción	0.5 dB
Sensibilidad del receptor	0.500 µV (-113.0 dBm)
Fiabilidad requerida	99.99%
Margen requerido para una señal fuerte	10.0 dB
Zona de señal débil	21.4 dBµV/m
Zona de señal fuerte	31.4 dBµV/m

Figura 7 Datos simulación nuevos horizontes

Fuente: Radio Mobile

Descripción	15 de marzo 915 MHz
Frecuencia	915 MHz
Nombre de la estación base	15 de marzo
Latitud	0.94012536 °
Longitud	-79.67527121 °
Latitud	00° 56' 24.45"N
Longitud	079° 40' 30.98"W
QRA	FJ00DW
UTM (WGS84)	17N E647403 N0103940
Elevación	72.1 m
Altura de la antena base	10 m
Ganancia de la antena base	6.0 dBi
Tipo de antena base	omni
Azimuth de la antena base	0 °
Inclinación de la antena base	0 °
Altura de la antena móvil	2.0 m
Ganancia de la antena móvil	2.0 dBi
Potencia Tx de transmisión	25.00000 W
Pérdidas en el cable de transmisión	3.0 dB
Pérdidas en el cable de recepción	0.5 dB
Sensibilidad del receptor	0.500 µV (-113.0 dBm)
Fiabilidad requerida	70%
Margen requerido para una señal fuerte	10.0 dB
Zona de señal débil	21.4 dBµV/m
Zona de señal fuerte	31.4 dBµV/m

Figura 8 Datos simulación 15 marzo

Fuente: Radio Mobile

Descripción	tercer piso 915 MHz
Frecuencia	915 MHz
Nombre de la estación base	tercer piso
Latitud	0.98486725 °
Longitud	-79.65952988 °
Latitud	00° 59' 05.52"N
Longitud	079° 39' 34.31"W
QRA	FJ00EX
UTM (WGS84)	17N E649153 N0108888
Elevación	70.9 m
Altura de la antena base	10 m
Ganancia de la antena base	6.0 dBi
Tipo de antena base	omni
Azimuth de la antena base	0 °
Inclinación de la antena base	0 °
Altura de la antena móvil	2.0 m
Ganancia de la antena móvil	2.0 dBi
Potencia Tx de transmisión	25.00000 W
Pérdidas en el cable de transmisión	3.0 dB
Pérdidas en el cable de recepción	0.5 dB
Sensibilidad del receptor	0.500 µV (-113.0 dBm)
Fiabilidad requerida	99.99%
Margen requerido para una señal fuerte	10.0 dB
Zona de señal débil	21.4 dBµV/m
Zona de señal fuerte	31.4 dBµV/m

Figura 9 Datos simulación Tercer piso

Fuente: Radio Mobile

Descripción	Cerro del Gatazo 915 MHz
Frecuencia	915 MHz
Nombre de la estación base	Cerro del Gatazo
Latitud	0.94811761 °
Longitud	-79.66328681 °
Latitud	00° 56' 53.22"N
Longitud	079° 39' 47.83"W
QRA	FJ00EW
UTM (WGS84)	17N E648736 N0104824
Elevación	247 m
Altura de la antena base	10 m
Ganancia de la antena base	6.0 dBi
Tipo de antena base	omni
Azimuth de la antena base	0 °
Inclinación de la antena base	0 °
Altura de la antena móvil	2.0 m
Ganancia de la antena móvil	2.0 dBi
Potencia Tx de transmisión	25.00000 W
Pérdidas en el cable de transmisión	3.0 dB
Pérdidas en el cable de recepción	0.5 dB
Sensibilidad del receptor	0.500 µV (-113.0 dBm)
Fiabilidad requerida	99.99%
Margen requerido para una señal fuerte	10.0 dB
Zona de señal débil	21.4 dBµV/m
Zona de señal fuerte	31.4 dBµV/m

Figura 10 Datos simulación Cerro del gatazo

Fuente: Radio Mobile

Como se observa en los resultados obtenidos del programa Radio Mobile, los datos de la ecuación 1 y la aplicación CupCarbon el radio de cobertura de la red LaRaWAN va en concordancia con los datos obtenidos. El alcance de la pasarela dentro de una zona urbana densa es de 875 metros aproximadamente (Manchev et al., 2023), si se analiza la figura 5 se puede observar que uno de los mayores retos que se le presenta a la WSN son las construcciones y las altas elevaciones que se interponen entre la pasarela y los nodos. Cabe mencionar que, teniendo en cuenta los siguientes factores, se puede obtener una mejor cobertura: tipo de antena, tamaño de antena, pasarela a una mayor altura y tipos de nodos. Desplegar una WSN presenta un gran reto cuando se trata de nodos en movimiento con arquitectura Lora, pero en los últimos años se han venido realizando investigaciones e implementaciones de redes LoRaWAN en varias ciudades europeas (Pérez & Risco, 2019), permitiendo tener acceso a documentación de publicaciones y proyectos que constantemente van a portando al desarrollo de esta tecnología, como es el caso de la comunicación de vehículos de emergencia en entornos urbanos.

4. DISCUSIÓN

Los resultados del diseño propuesto confirman que la elección de LoRaWAN responde, principalmente, a un equilibrio entre alcance, consumo energético y tolerancia a movilidad, criterios que el artículo asume como prioritarios para escenarios de comunicación vehicular en emergencia. Este encuadre es coherente con Quishpe-Morales et al. (2019) que indica que la tendencia reciente de utilizar LPWAN en aplicaciones de transporte inteligente donde la continuidad del servicio depende menos del ancho de banda y más de la disponibilidad del enlace y la eficiencia energética.

Desde el punto de vista del dimensionamiento radioeléctrico, el estudio obtiene un radio máximo teórico de 1,52 km usando Okumura-Hata 231 a 915 MHz y lo utiliza como base para configurar simulaciones en CupCarbon y contrastar desempeño en Radio Mobile (Rao & Chaudhari, 2019). La literatura muestra que, en urbano, la distancia útil suele degradarse por multipropagación, obstrucciones y densidad edificada; por ejemplo, se reportan rangos del orden de ~800 m en entornos urbanos y caídas notorias de desempeño a partir de ~500 m según mediciones y revisiones centradas en smart city (Sivasubramaniyam et al., 2025). En esa línea, el propio artículo reconoce que el enlace no depende solo del "radio" calculado, sino de un conjunto de perturbaciones (entorno, espectro, reflexión, ruido) que explican discrepancias entre predicción y comportamiento espacial real. La lectura técnica aquí es clara: el valor de 1,52 km funciona como cota de planificación, pero la cobertura efectiva se vuelve heterogénea por la morfología urbana (Suarez-Suarez et al., 2023).

El requerimiento de 6 pasarelas para cubrir la ciudad (bajo las especificaciones asumidas) se deriva de la combinación "modelo + simulación" y de la selección de ubicaciones con ventaja altimétrica. Este hallazgo es consistente con estudios de despliegue/planificación que, incluso en escenarios densos, muestran que la cobertura mejora al ubicar gateways en azoteas o cotas elevadas, aunque la densificación sigue siendo necesaria para reducir zonas sin servicio. De hecho, evidencia reciente (Tovar-Soto et al., 2021) de "blank spots" en redes LoRaWAN urbanas indica que, aun con despliegues funcionales, persisten vacíos de cobertura atribuibles a la geometría urbana y a la propagación real del canal. En términos interpretativos, el número de pasarelas estimado por el artículo no solo refleja área, sino también una decisión de ingeniería: compensar variabilidad del canal con redundancia espacial.

Un punto relevante es el contraste entre lo que el artículo obtiene con el modelo (Okumura-Hata 231) y lo que observa con Radio Mobile: se identifican pérdidas

locales de cobertura por edificaciones y zonas montañosas, y además la desconexión cuando el nodo sale del rango (Budi, 2023). Esta tensión coincide con trabajos que plantean que los modelos de propagación (incluidos los clásicos) requieren ajustes o calibración local para predecir mejor cobertura LoRaWAN a 915 MHz en ciudades; por ejemplo, se reporta explícitamente la necesidad de adaptar modelos y contrastarlos con mediciones RSSI en ambientes urbanos (Villanueva-Bayona et al., 2022). En consecuencia, el aporte del artículo se sostiene más como propuesta de diseño reproducible (procedimiento + herramientas) que como una caracterización definitiva del desempeño real: el flujo metodológico (revisión, selección tecnológica, cálculo, simulación comparativa) queda trazado con claridad, lo que facilita su transferencia a otros cantones con topografías similares.

Por último, las limitaciones del estudio recaen en primer lugar, por el diseño que se sustenta en modelos de propagación y simulaciones, sin una validación empírica mediante mediciones de campo que permitan contrastar el desempeño real de la red en condiciones dinámicas y de movilidad urbana (Asad et al., 2024; Enriko et al., 2024). Asimismo, el uso de un modelo de propagación generalista puede no capturar con precisión la complejidad del entorno urbano, especialmente en presencia de edificaciones densas y variaciones topográficas, lo que limita la exactitud de la cobertura estimada. Adicionalmente, el análisis se centra principalmente en el alcance del enlace, dejando fuera métricas clave para escenarios de emergencia, como latencia, tasa de entrega de paquetes y robustez ante interferencias.

5. CONCLUSIONES

En el desarrollo de la presente investigación se ha estudiado las propiedades de la red de sensores inalámbricos -WSN- y los principales componentes para establecer una correcta infraestructura de red orientada a la comunicación de vehículos en casos de emergencia en la ciudad de Esmeraldas. Asimismo, se realizó una exploración de los trabajos investigativos e informes técnicos más recientes y relacionados con el tema de estudio, permitiendo la comprensión de esta tecnología.

Se configuró e integró los componentes para formar una WSN basada en arquitectura de red LoRaWAN, la cual fue elegida porque permitía que los nodos -vehículos- tengan libre movilidad dentro de la zona de cobertura, además de su gran alcance.

Para evaluar la cobertura de la pasarela rak7240 con los dispositivos final TM-901 en el entorno urbano se utilizó el modelo Okumura-Hata 231 logrando alcanzar una distancia de 1,52 km aproximadamente y logrando enviar información exitosamente

desde las pasarelas a los nodos finales, determinando que para cubrir la ciudad de Esmeraldas se necesitarían 6 pasarelas con las mismas especificaciones.

Si bien con el cálculo de cobertura utilizando se puede cubrir la ciudad de Esmeraldas con solo 6 pasarelas, pero en la simulación realizada en el programa Radio Mobile se observó que existe pérdida de cobertura, en gran medida ocasionadas por las construcciones y zonas montañosas del sector, sin contar que los nodos al salir del rango de cobertura de las pasarelas se desconectan de la red.

Para cubrir las falencias de la pérdida de conexión se hace imprescindible diseñar un sistema de comunicación offline -fuera de línea- que permita la comunicación entre nodos, y que cuando ingresen a la zona de cobertura comunique a las pasarelas de alguna eventualidad.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de ninguna naturaleza en la presente investigación.

REFERENCIAS

Alves, A., Da Silva, C. B., & Tertuliano Filho, H. (2021). An experimental study on the use of LoRa technology in vehicle communication. *IEEE Access*, *9*, 26633-26640. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057602

Apriantoro, R., Suharjono, A., Kurnianingsih, K., & Enriko, I. K. A. (2020, November). Investigation of coverage and signal quality of LoRaWAN network in urban area. In *2020 International Conference on Computer Engineering, Network, and Intelligent Multimedia (CENIM)* (pp. 326-331). IEEE. https://doi.org/10.1109/CENIM51130.2020.9297982

Asad, M. A., Li, X., Mahmood, K., Tariq, T., Alenazi, M. J., & Das, A. K. (2024). Secure RFID-assisted authentication protocol for vehicular cloud computing environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *25*(9), 12528-12537. https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3371464

Budi Setiawan, F. (2023). Rancang Bangun WSN Menggunakan Ebyte E22-900T30D sebagai Media Komunikasi Jarak Jauh di Daerah Urban Area (Palur, Surakarta). *Informatics, Electrical and Electronics Engineering (Infotron)*, *3*(2), 65–75. https://doi.org/10.33474/infotron.v3i2.20841

Cama-Pinto, A., Piñeres-Espitia, G., Zamora-Musa, R., Acosta-Coll, M., Caicedo-Ortiz, J., & Sepúlveda-Ojeda, J. (2016). Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Ingeniare*, 24(4), 581–599. https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000400005

Enriko, I. K. A., Istikhomah, P. E. L., & Fabian, D. (2024, November). Mathematical Model to Determine LoRaWAN Gateway's Coverage Range in The Urban Area with Contour Index Parameter. In *2024 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)* (pp. 735-739). IEEE. https://doi.org/10.1109/COMNETSAT63286.2024.10862841

Fatima, M. N., Obaidat, M. S., Mahmood, K., Shamshad, S., Saleem, M. A., & Ayub, M. F. (2023). Privacy-preserving three-factor authentication protocol for wireless sensor networks deployed in agricultural field. *ACM Transactions on Sensor Networks*. https://doi.org/10.1145/3607142

Georgiadis, D., Karathanasopoulou, K., Liotou, E., & Dimitrakopoulos, G. (2025). LoRaWAN-Based Emergency Framework for Vehicular Networks. *IEEE Networking Letters*. https://doi.org/10.1109/LNET.2025.3583492

Gonzalez Preto, F. A., Avendaño Fernández, E., y Salcedo Parra, O. J. (2024). Intelligent Mobil App Design of IoT System Based on Wireless Sensor Networks for monitoring and improvement of production in fruit crops. Revista EIA, 21(41), 4114 pp. 1–29. https://doi.org/10.24050/reia.v21i41.1674

Ma, B., Yang, S., Zuo, Z., Zou, B., Cao, Y., Yan, X., ... & Li, J. (2022). An authentication and secure communication scheme for in-vehicle networks based on SOME/IP. *Sensors*, *22*(2), 647. https://doi.org/10.3390/s22020647

Manchev, N. P., Angelov, K. K., & Karapenev, B. D. (2023, September). Provision and Assessment of Wireless Coverage and Communication Range of a LoRaWAN Network in an Urban Environment. In *2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET)* (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/ET59121.2023.10278639

Pérez, D., & Risco, R. (2019). *Implementación de LoRa y LoRaWAN como escenario futuro de la Industria 4.0 en el sector agroindustrial peruano*. *Revista Campus*, *25*. https://doi.org/10.24265/campus.2020.v25n29.10

Quishpe-Morales, S., Pillo-Guanoluisa, D., Salazar-Chávez, N., Meneses-Narváez, S., & Tirira-Caluquí, P. (2019). Diseño de una red con Tecnología Sensor Cloud aplicada en prevención de accidentes de tránsito. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (E19), 708-720.

Rao, A., & Chaudhari, B. S. (2020, October). Development of LoRaWAN based traffic clearance system for emergency vehicles. In *2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)* (pp. 217-221). IEEE. https://doi.org/10.1109/I-SMAC49090.2020.9243341

Sivasubramaniyam, V., Ramasamy, S., Peer, M. S., Melesse, T. Y., Gatto, G. (2025). Navigating Wireless Data Transmission Challenges in Smart Transportation: Technologies, Sensor Networks, and Real-World Applications. *Electrical and Electronic Engineering*, 2025080707. https://doi.org/10.20944/preprints202508.0707.v1

Suarez-Suarez, C. R., Rueda, D. F., Timaná-Eraso, L. C., & Leon-Leon, J. (2023). Adaptation of propagation models to improve the coverage range prediction of LoRaWAN technology at 915 MHz in an urban environment. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 733-744.

Tovar-Soto, J. P., Pareja-Figueredo, C. F., García-Navarrete, O. L., & Gutiérrez-Martínez, L. C. (2021). Performance evaluation of LoRa technology for implementation in rural areas. *Dyna*, *88*(216), 69-78. https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.88258

Villanueva-Bayona, V., Lezama, J., Arizaca-Cusicuna, J. (2022). Smart City Based on LoRaWAN: Coverage Study for Cusco Urban Area. In: Zhang, YD., Senjyu, T., So-In, C., Joshi, A. (eds) Smart Trends in Computing and Communications. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 286. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4016-2_3