

Red de Conectividad Rural Inteligente: Cerrando la Brecha Digital en Zonas Rurales de Colombia con Apoyo de Herramientas de Inteligencia Artificial

Proyecto para la materia Redes de Computadores

1^{ro} David Santiago Nagles Barajas
Ingeniería Mecatrónica
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
dnagles@unal.edu.co

Abstract—Este proyecto propone un modelo de conectividad rural inteligente orientado a reducir la brecha digital en zonas remotas de Colombia mediante la integración de herramientas de inteligencia artificial (IA) y tecnologías de bajo costo como LoRaWAN y WiFi comunitario. Se desarrolló un prototipo funcional en Python con interfaz web basada en Streamlit, el cual simula una red distribuida compuesta por nodos autónomos capaces de detectar fallos, analizar rutas alternativas y registrar métricas clave de operación. Cada ciclo de simulación evalúa la latencia, disponibilidad, fallos y predicciones realizadas con modelos de machine learning, integrando sensores simulados de humedad para usos agroambientales. Además, el sistema incluye una funcionalidad de mensajería automática vía WhatsApp para alertar al administrador ante condiciones críticas. Este enfoque ofrece una base escalable para futuras implementaciones reales de redes comunitarias inteligentes orientadas al desarrollo rural.

Index Terms—rural connectivity, LoRaWAN, resilient networks, intelligent monitoring, Internet of Things (IoT), Streamlit, machine learning, Random Forest, community networks.

Resumen—Este trabajo presenta un prototipo funcional orientado a mejorar la conectividad en zonas rurales mediante la simulación de una red inteligente compuesta por nodos distribuidos que se comunican a través de tecnologías mixtas como LoRaWAN y WiFi comunitario. El sistema, desarrollado en Python con interfaz gráfica web usando Streamlit, permite evaluar la resiliencia de la red ante fallos, predecir comportamientos mediante modelos de aprendizaje automático y monitorear condiciones ambientales mediante sensores simulados de humedad. Cada ciclo de simulación actualiza el estado de los nodos, registra métricas como latencia, disponibilidad y fallos, y entrena un modelo de clasificación Random Forest para anticipar futuras caídas. Además, se incorpora una función de mensajería automática vía WhatsApp para emitir alertas en tiempo real. Este enfoque busca sentar las bases de soluciones tecnológicas inclusivas y replicables para comunidades rurales con acceso limitado a infraestructura digital.

Palabras clave—Conectividad rural, LoRaWAN, redes resilientes, monitoreo inteligente, Internet de las cosas (IoT), Streamlit, aprendizaje automático, Random Forest, redes comunitarias.

calidad afecta significativamente el acceso a la educación, la salud, el comercio y otros servicios esenciales. Esta situación profundiza las desigualdades sociales, económicas y territoriales existentes [6], [5].

A pesar de los esfuerzos gubernamentales para implementar soluciones de conectividad como el programa “Centros Digitales” del Ministerio TIC, persisten múltiples desafíos. Entre ellos se encuentran la limitada infraestructura, los altos costos de implementación y mantenimiento, y la falta de adaptación tecnológica al contexto rural [1], [2]. Iniciativas internacionales como el proyecto *Rural Connected Colombia* han demostrado el potencial de tecnologías alternativas para mejorar la conectividad en zonas remotas mediante enfoques más flexibles y sostenibles [3], [4].

Frente a esta problemática, emergen soluciones como las redes comunitarias, tecnologías de bajo costo (WiFi de largo alcance, enlaces satelitales) y protocolos de comunicación de baja potencia como LoRaWAN, capaces de facilitar esquemas de conectividad descentralizada, escalable y adaptada al entorno rural [7], [8], [11].

Este proyecto plantea el diseño e implementación de un prototipo funcional de una red rural inteligente simulada, compuesta por nodos virtuales interconectados con tecnologías mixtas (LoRaWAN y WiFi). El sistema incluye sensores de humedad con fines agrícolas, arquitectura distribuida, gestión autónoma de fallos, visualización geográfica interactiva y predicción de riesgos mediante algoritmos de inteligencia artificial entrenados localmente [10], [12].

La simulación fue desarrollada en Python, y ejecutada a través de una interfaz web accesible desde navegador gracias a la biblioteca Streamlit. Esta plataforma permite al usuario observar en tiempo real el estado de la red, el tráfico de datos entre nodos, los valores generados por sensores IoT y la respuesta del sistema ante eventos críticos. Como innovación

I. INTRODUCCIÓN

En Colombia, millones de personas que habitan zonas rurales y apartadas enfrentan una marcada exclusión digital. La falta de acceso a servicios de conectividad estables y de

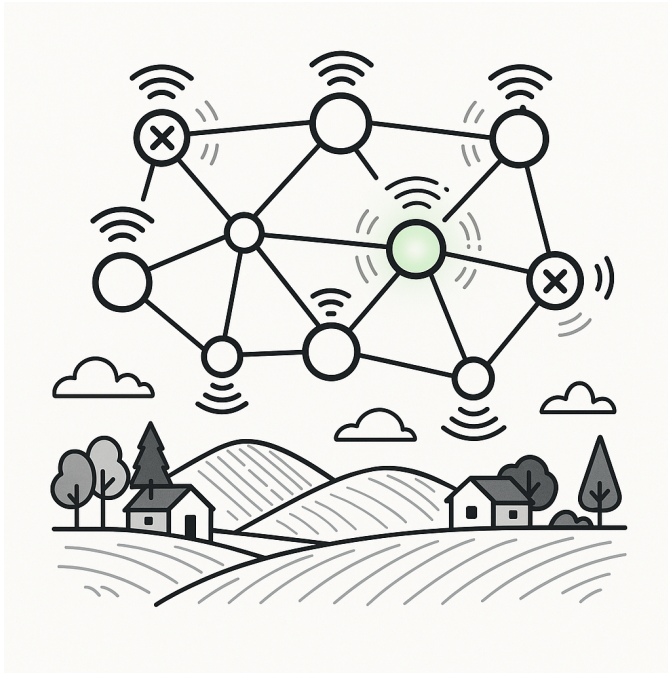


Fig. 1: Idea General del proyecto

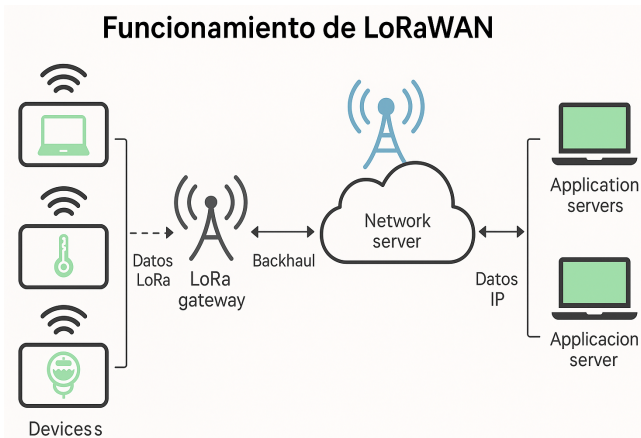


Fig. 2: Ejemplo de Funcionamiento LoRaWAN

adicional, el sistema genera alertas automáticas a través de WhatsApp cuando ocurren fallos sin rutas de respaldo, y exporta registros periódicos en formatos CSV, Excel y PDF [13], [14].

Este trabajo busca evidenciar cómo una arquitectura digital basada en tecnologías emergentes puede fortalecer procesos de monitoreo, comunicación y automatización en entornos rurales, aportando una solución replicable para mejorar la conectividad en poblaciones desconectadas del país [9], [16], [17].

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este proyecto se basa en el modelo CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining), adaptado a las necesidades de exploración tecnológica y simulación de redes rurales con inteligencia artificial. Si bien el enfoque fue académico y de alcance exploratorio, se desarrollaron con rigor las fases clave del proceso para asegurar la viabilidad técnica y conceptual del prototipo funcional.

A. Comprensión del problema

Se realizó una revisión crítica de la situación de conectividad en zonas rurales de Colombia, identificando los principales desafíos en términos de infraestructura, cobertura limitada, y acceso desigual a servicios TIC [1], [2], [5]. Esta etapa permitió contextualizar el problema desde una perspectiva sociotécnica, estableciendo como prioridad la búsqueda de soluciones asequibles, resilientes y adaptadas al entorno rural.

B. Análisis de datos disponibles

Se consultaron fuentes secundarias como informes del DANE, MinTIC y estudios técnicos de conectividad rural, para comprender la geografía, densidad poblacional, topografía y cobertura actual de red en zonas apartadas del país. Estos datos orientaron la definición de nodos, la disposición espacial simulada y la elección de tecnologías apropiadas para cada escenario [3], [4], [6].

C. Preparación de la información

A partir de la información recolectada, se estructuraron datasets y se definieron variables relevantes para el modelado. Se diseñó una arquitectura conceptual de red con formatos adecuados para su implementación en Python, incluyendo estructuras para ciclos, nodos, sensores y rutas alternativas. Esta etapa incorporó también visualización geográfica a través de coordenadas simplificadas y herramientas como Folium, inspirándose en metodologías previas de diseño de redes en contextos rurales [7], [17].

D. Modelado preliminar

Se construyó un modelo lógico basado en nodos interconectados con tecnologías mixtas (WiFi y LoRaWAN), capaces de cambiar de estado (activo/inactivo), detectar fallos, calcular métricas como latencia y disponibilidad, y registrar rutas disponibles. Además, se incorporó un sistema de predicción de fallos mediante modelos de clasificación como Random Forest, entrenado con datos acumulados por ciclo [8], [11], [13], [16].

E. Evaluación del modelo

A través de múltiples simulaciones, se analizaron las condiciones de desempeño de la red virtual en función de sus métricas clave: latencia promedio, porcentaje de disponibilidad, cantidad de fallos y efectividad de rutas alternativas. Esta fase fue fundamental para validar la utilidad del sistema de predicción de riesgos y el comportamiento dinámico de la red ante eventos adversos [9], [17].

F. Construcción del prototipo (simulado)

Se implementó un prototipo funcional en Python, desplegado como aplicación web mediante Streamlit. El entorno incluye visualización de la topología de red, simulación de sensores de humedad, monitoreo en tiempo real y exportación automática de resultados. Además, se integraron funciones de alerta mediante WhatsApp, simulando un esquema de notificación remota para entornos rurales. Este prototipo representa una base experimental replicable y ampliable para futuras implementaciones sobre hardware físico o entornos rurales reales [10], [12].

III. DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

Para validar conceptualmente la propuesta de red rural inteligente, se desarrolló un prototipo funcional en Python desplegado como aplicación web utilizando la biblioteca Streamlit. Este prototipo integra diversos módulos: simulación de nodos interconectados, representación geográfica de la topología de red, interfaz interactiva accesible desde navegador y una lógica autónoma para la gestión de fallos.

Cada nodo está definido con una tecnología de conectividad (WiFi o LoRaWAN), una probabilidad de fallo ajustada según dicha tecnología, capacidad de recuperación automática, y mecanismos de diagnóstico para evaluar rutas alternativas disponibles. Esta lógica simula el comportamiento descentralizado típico de redes comunitarias resilientes [13], [15].

Durante cada ciclo de simulación, el sistema actualiza el estado de todos los nodos, calcula su latencia, estima su disponibilidad y registra la información en un archivo .csv. Posteriormente, los datos se consolidan en hojas de cálculo .xlsx con métricas agregadas por nodo como latencia promedio, número total de fallos y disponibilidad porcentual, siguiendo lineamientos similares a los aplicados en plataformas de monitoreo automatizado para zonas rurales [10], [12].

El sistema también genera visualizaciones comparativas entre tecnologías, incluyendo gráficos de barras apiladas que comparan latencia y disponibilidad, e histogramas de fallos clasificados por tecnología. Estas representaciones permiten al usuario analizar fácilmente el rendimiento de la red y

| Red Rural Inteligente (Web + IA) | | | | | | | |
|----------------------------------|----------|---------------|--------------------|--------|----------------|------------------|--|
| Estado actual de nodos | | | | | | | |
| Nodo | Estado | Latencia (ms) | Disponibilidad (%) | Fallos | Rutas | Riesgo IA (1-50) | |
| 0 Nodo A | Activo | 88 | 100 | 0 | Nodo B, Nodo F | 0 | |
| 1 Nodo B | Inactivo | 58 | 0 | 1 | Nodo A, Nodo C | 1 | |
| 2 Nodo C | Activo | 35 | 100 | 0 | Nodo D | 0 | |
| 3 Nodo D | Activo | 75 | 100 | 0 | Nodo C, Nodo E | 0 | |
| 4 Nodo E | Activo | 31 | 100 | 0 | Nodo D, Nodo F | 0 | |
| 5 Nodo F | Activo | 89 | 100 | 0 | Nodo E, Nodo A | 0 | |

Fig. 3: Tabla de datos de página



Fig. 4: Mapa de nodos de página

tomar decisiones fundamentadas.

Como funcionalidad adicional, al finalizar cada ciclo se programa el envío automático de un resumen del estado de la red vía WhatsApp, utilizando la biblioteca pywhatkit. Este canal de notificación permite simular un sistema básico de monitoreo remoto y alerta en tiempo real.

Este prototipo demuestra la viabilidad de una red que responde dinámicamente ante fallos, diagnostica su entorno, y registra su comportamiento de manera automática. Además, sienta las bases para futuras mejoras como la integración de modelos de inteligencia artificial entrenados localmente con algoritmos como RandomForestClassifier, o su migración a una arquitectura distribuida sobre hardware físico con sensores reales en entornos rurales.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La simulación del sistema de conectividad rural permitió analizar el comportamiento de una red mallada distribuida con nodos interconectados que integran mecanismos de recuperación autónoma y análisis local de rutas. Se observó que la incorporación de lógica para detección de fallos y redirección de tráfico contribuye significativamente a mejorar la resiliencia global del sistema, en línea con estudios previos sobre topologías tolerantes a fallos en redes rurales [13], [15].

Los datos exportados en formatos .csv y .xlsx permitieron calcular métricas clave como la disponibilidad por nodo, número de fallos acumulados y latencia promedio.

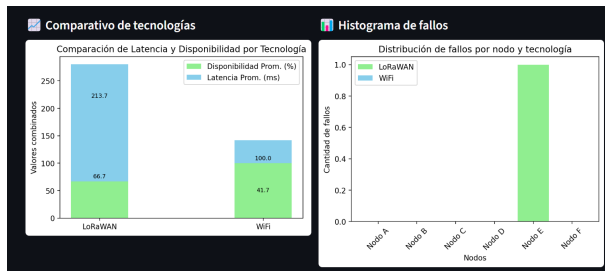


Fig. 5: Gráficas de comparación e Histograma

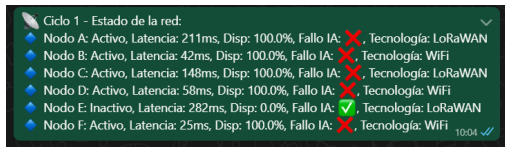


Fig. 6: Mensajería de Whatsapp

Estas métricas reflejaron diferencias según la tecnología empleada (WiFi o LoRaWAN), el grado de conectividad y la ubicación relativa de cada nodo, lo cual refuerza la necesidad de considerar criterios de redundancia, topología física y funciones de centralidad al diseñar redes comunitarias robustas [8], [11].

La visualización de la red mediante mapas interactivos (Folium) proporcionó un enfoque espacial para interpretar los estados de conectividad, la tecnología asociada a cada nodo y sus niveles de riesgo. Adicionalmente, la generación automática de informes en formato PDF con gráficos embebidos demostró ser una herramienta eficaz para comunicar el rendimiento de la red de forma accesible, sin necesidad de procesamiento externo [10].

En los casos donde se presentaron fallos múltiples simultáneos, el sistema logró identificar correctamente nodos sin rutas activas y generar alertas mediante mensajes automatizados por WhatsApp. Esta funcionalidad de monitoreo remoto, si bien simulada, representa un paso hacia la integración de plataformas de gestión descentralizada en contextos rurales de difícil acceso [16], [17].

Finalmente, los resultados obtenidos validan que un prototipo funcional desarrollado en Python, utilizando bibliotecas de código abierto, puede servir como plataforma de exploración y formación en soluciones de conectividad rural inteligente. Este enfoque puede ser escalado con sensores físicos, gateways LoRa reales, integración satelital o uso de redes comunitarias WiFi. El código fuente, documentación técnica y el prototipo están disponibles públicamente en el repositorio de GitHub: <https://github.com/DavidN110/Proyecto-de-Redes>.

V. CONCLUSIONES

Este proyecto permitió validar la viabilidad conceptual y técnica de una red rural inteligente a través de la simulación de un sistema distribuido compuesto por nodos interconectados con tecnologías mixtas (WiFi y LoRaWAN), capaces de responder de forma adaptativa ante eventos de falla.

La incorporación de algoritmos de inteligencia artificial, entrenados localmente con `RandomForestClassifier`, aportó capacidades predictivas al sistema, permitiendo anticipar posibles fallos a partir del análisis de métricas operativas como latencia, disponibilidad y conectividad vecinal. Este enfoque resulta especialmente valioso en contextos rurales, donde los recursos técnicos y la infraestructura de monitoreo son limitados.

La construcción de una interfaz web interactiva con `Streamlit` y la generación automatizada de reportes visuales facilitaron el seguimiento en tiempo real del estado de la red. Además, el envío de alertas a través de mensajería instantánea (WhatsApp) demostró el potencial de integrar canales de comunicación populares para el soporte técnico descentralizado.

Aunque el prototipo desarrollado opera en un entorno simulado y con una escala reducida, sienta las bases para futuras implementaciones con dispositivos físicos, nodos reales conectados mediante tecnologías LPWAN, y módulos de mantenimiento inteligente basados en IA. Este trabajo constituye un aporte académico significativo a los esfuerzos por cerrar la brecha digital en territorios marginados mediante soluciones accesibles, replicables y contextualizadas.

REFERENCES

- [1] The Borgen Project, "Colombia's Digital Divide: Internet Access Opens up Opportunities," 2023. [En línea]. Disponible en: <https://borgenproject.org/colombias-digital-divide/>
- [2] MinTIC, "Ministro TIC socializó Plan de Conectividad Rural, ruta para mejorar penetración de Internet en el campo," 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/228218:Ministro-TIC-socializo-Plan-de-Conectividad-Rural>
- [3] Cambium Networks, "Centros Digitales Rural Connectivity Project Improves Education in 7,000 Schools with Cambium Solutions," Wireless Broadband Alliance, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://wballiance.com/case-studies/colombias-centros-digitales-project/>
- [4] Satellite Applications Catapult, "Rural Connected Colombia," 2023. [En línea]. Disponible en: <https://sa.catapult.org.uk/projects/rural-connected-colombia/>
- [5] Freedom House, "Colombia: Freedom on the Net 2024 Country Report," 2024. [En línea]. Disponible en: <https://freedomhouse.org/country/colombia/freedom-net/2024>
- [6] UNIR Colombia, "Los desafíos en la implementación de las TIC en zonas rurales colombianas," 2023. [En línea]. Disponible en: <https://colombia.unir.net/actualidad-unir/desafios-implementacion-tic-zonas-rurales/>
- [7] J. L. E. K. Fendji and J. M. Nlong, "Rural Wireless Mesh Network: A Design Methodology," *Int. J. Commun. Netw. Syst. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.scirp.org/html/1-9701948_53084.htm
- [8] A. Sharma et al., "Exploration of IoT Nodes Communication Using LoRaWAN in Forest Environment," *Comput. Mater. Continua*, vol. 71, no. 3, pp. 6239–6256, 2022. doi: 10.32604/cmc.2022.024639

- [9] A. Pokharel et al., "Performance Evaluation of LoRa Technology for Rural Connectivity: An Experimental Analysis in Nepal," *arXiv preprint*, Dec. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2412.04563>
- [10] E. Bonilla-Fonte et al., "LoRaWAN Applied to WSN as Support for Sustainable Agriculture," in *CP 2023*, LNNS, vol. 1040, Springer, 2024, pp. 30–45. doi: 10.1007/978-3-031-55571-1_3
- [11] M. Jouhari, N. Saeed, M.-S. Alouini, and E. Amhoud, "A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances and Future Directions," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 25, no. 3, pp. 1841–1876, 2023. doi: 10.1109/COMST.2023.3272977
- [12] A. Arratia et al., "AI*LoRa: Enabling Efficient Long-Range Communication with Machine Learning at the Edge," in *Proc. MobiHoc '24*, Oct. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3630000.3630001>
- [13] L. R. Prade et al., "LoRa Mesh Architecture for Automation of Rural Electricity Distribution Networks," *Electron. Lett.*, vol. 56, no. 6, pp. 296–298, Mar. 2020. doi: 10.1049/el.2019.4155
- [14] X. Jiang et al., "Hybrid Low-Power Wide-Area Mesh Network for IoT Applications," *arXiv preprint*, Jun. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2006.12354>
- [15] A. Uberti et al., "Secure Energy-Constrained LoRa Mesh Network," in *AdHoc-Now 2020*, Springer, LNCS, vol. 12277, pp. 124–135, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-57983-8_10
- [16] A. Pokharel et al., "Evaluation of a LoRa Mesh Network for Smart Metering in Rural Locations," *Electronics*, vol. 10, no. 6, p. 751, 2021. doi: 10.3390/electronics10060751
- [17] A. Bonilla-Fonte et al., "Comprehensive Evaluation of LoRaWAN Technology in Urban and Rural Environments of Quito," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 57663–57677, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912029