

# 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<sup>ro</sup> David Santiago Nagles Barajas  
*Ingeniería Mecatrónica*  
*Universidad Nacional de Colombia*  
Bogotá, Colombia  
dnagles@unal.edu.co

**Abstract**—This project proposes an intelligent rural connectivity model aimed at reducing the digital divide in remote areas of Colombia. Through the integration of artificial intelligence (AI), it seeks to simulate and evaluate network behavior under failure conditions, optimizing node interactions based on environmental constraints. A functional prototype was implemented using simulation tools to represent distributed nodes, each capable of autonomous behavior. The system includes performance monitoring, automated diagnostics, alert generation, and basic predictive decision-making supported by machine learning. The prototype offers a scalable foundation aligned with educational goals and adaptable to broader rural contexts.

**Index Terms**—rural connectivity, digital divide, community networks, LoRaWAN, mesh networks, community WiFi.

**Resumen**—Este proyecto propone un modelo de conectividad rural inteligente orientado a cerrar la brecha digital en zonas remotas de Colombia. A través de la integración de herramientas de inteligencia artificial (IA), se busca simular y evaluar el comportamiento de una red distribuida bajo condiciones de fallo, optimizando la interacción entre nodos de acuerdo con restricciones ambientales. Se implementó un prototipo funcional que representa nodos distribuidos con comportamiento autónomo, incluyendo supervisión de rendimiento, diagnósticos automáticos, generación de alertas y toma de decisiones básicas mediante aprendizaje automático. Este prototipo ofrece una base escalable, alineada con objetivos educativos y adaptable a diversos contextos rurales.

**Palabras clave**—conectividad rural, brecha digital, redes comunitarias, LoRaWAN, redes malladas, WiFi comunitario.

## 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 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].

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].

En este contexto, el presente proyecto propone el diseño de una red de conectividad rural inteligente, haciendo uso de tecnologías emergentes como redes malladas, WiFi comunitario, enlaces satelitales y LoRaWAN, apoyadas por herramientas de inteligencia artificial (IA) para optimizar su diseño, operación y mantenimiento. El uso de IA permitirá, entre otros aspectos, optimizar la topología de red, predecir fallos, y mejorar la asignación de recursos en entornos con infraestructura limitada.

En este contexto, el presente proyecto propone el diseño de una red de conectividad rural inteligente, simulando escenarios de operación distribuida y toma de decisiones autónoma con apoyo de inteligencia artificial (IA). El uso de IA permite, entre otros aspectos, anticipar fallos, analizar el estado de la red y mejorar la asignación de recursos en entornos con infraestructura limitada [4], [5], [7].

## II. METODOLOGÍA

La metodología seguida en este proyecto se inspira en principios del modelo CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining), adaptados a los objetivos de diseño preliminar de soluciones de conectividad rural mediante tecnologías de red e inteligencia artificial. Dado el carácter académico y exploratorio del trabajo, se desarrollaron algunas fases con mayor profundidad que otras, centrando los esfuerzos en la construcción de un modelo conceptual viable acompañado de un prototipo funcional a pequeña escala.

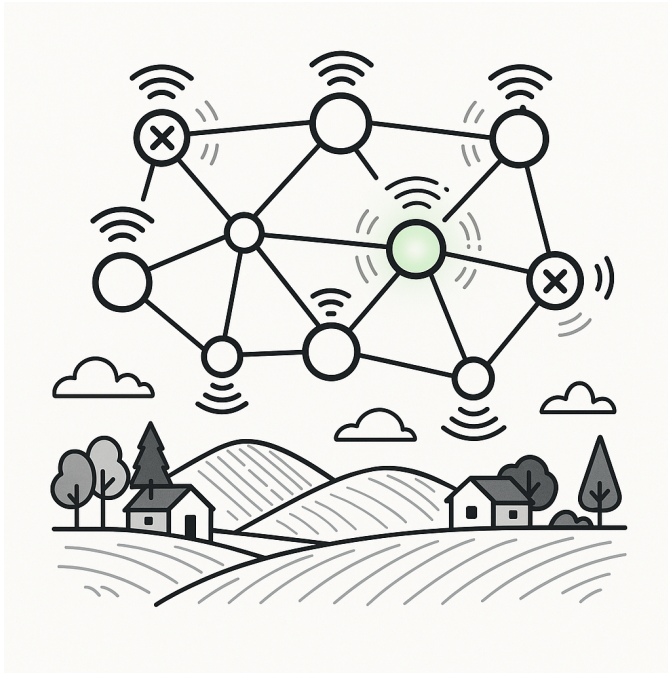


Fig. 1: Idea General del proyecto

#### A. Comprensión del problema

Se realizó una revisión contextual de la brecha digital en zonas rurales de Colombia, identificando los principales retos relacionados con infraestructura, cobertura y acceso a servicios TIC [1], [2], [5]. Esto permitió delimitar el enfoque del proyecto, así como los criterios técnicos y sociales considerados prioritarios.

#### B. Análisis de datos disponibles

Se consultaron fuentes públicas (como DANE, MinTIC y estudios previos) para entender aspectos básicos del entorno: distribución geográfica, cobertura actual de red, densidad poblacional y condiciones topográficas. Estos datos sirvieron como base para definir posibles escenarios de implementación y evaluar tecnologías adecuadas [3], [4], [6].

#### C. Preparación de la información

Se organizaron y adaptaron los datos relevantes para facilitar el diseño conceptual de la red. Este paso incluyó la selección de formatos útiles para simulación y visualización, con apoyo de herramientas como Python y QGIS, siguiendo enfoques similares a los propuestos en estudios sobre diseño de redes en entornos rurales [7], [17].

#### D. Modelado preliminar

Se propuso un modelo lógico de red distribuida, compuesto por nodos con capacidad de falla, recuperación, y análisis de conectividad hacia sus vecinos, lo cual permitió evaluar criterios de cobertura, disponibilidad y resiliencia en entornos simulados [8], [11], [13], [16].

#### E. Evaluación del modelo

Las configuraciones fueron evaluadas mediante simulaciones personalizadas, priorizando métricas como latencia, disponibilidad y tolerancia a fallos, con base en datos obtenidos en los ciclos de simulación [9], [17].

#### F. Construcción del prototipo (simulado)

Finalmente, se diseñó y montó un entorno de prueba que simula el funcionamiento de la red seleccionada, con componentes limitados pero representativos. Este prototipo permite visualizar la operación básica del sistema, identificar posibles mejoras y sentar las bases para desarrollos futuros más robustos, en línea con enfoques propuestos en literatura reciente sobre IA en redes IoT [12], [10].

### III. DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

Para la validación conceptual del sistema propuesto, se desarrolló un prototipo funcional en Python que integra múltiples componentes: simulación de nodos interconectados, interfaz gráfica interactiva, visualización de topología, representación geográfica y lógica de gestión autónoma de fallos. Cada nodo está caracterizado por una probabilidad de falla definida, lógica de recuperación automática, y mecanismos de diagnóstico que evalúan rutas alternativas disponibles, replicando decisiones locales típicas de redes comunitarias resilientes [13], [15].

Durante cada ciclo de simulación, el sistema evalúa el estado de todos los nodos, actualiza su disponibilidad, calcula la latencia simulada por nodo y registra el comportamiento en un archivo CSV. Esta información se exporta además a una hoja de cálculo en formato Excel con métricas agregadas por nodo, como latencia promedio, número total de fallos y porcentaje de disponibilidad, siguiendo metodologías similares a las aplicadas en proyectos de conectividad rural automatizada [10], [12].

Complementariamente, el sistema genera un informe técnico automático en formato PDF que incluye gráficos y análisis por nodo, facilitando la interpretación visual de los datos generados. En caso de fallos críticos sin rutas de respaldo, el sistema envía una alerta automatizada por correo electrónico al administrador, simulando un esquema básico de monitoreo en tiempo real.

Este prototipo evidencia cómo una red puede responder dinámicamente a eventos de falla, diagnosticar su entorno, y registrar su comportamiento de forma automatizada, sentando una base sólida para futuras mejoras como integración de modelos predictivos con inteligencia artificial o implementación sobre hardware físico distribuido.

### IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La simulación del sistema de conectividad rural permitió observar comportamientos clave en la operación de una red



Fig. 2

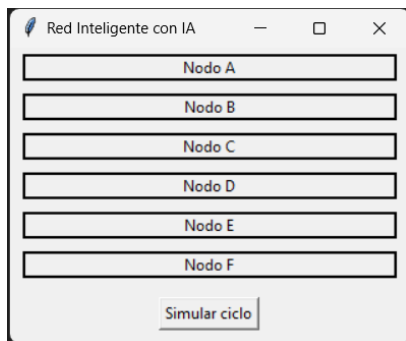


Fig. 3

mallada distribuida con características adaptativas. En primer lugar, se evidenció que la inclusión de mecanismos de recuperación automática y diagnóstico de rutas alternativas mejora significativamente la resiliencia de la red ante fallos, replicando estrategias similares a las propuestas en topologías tolerantes a fallos para zonas rurales [13], [15].

Los registros exportados en formato CSV y Excel permitieron cuantificar la disponibilidad por nodo, la frecuencia de fallos y la latencia promedio simulada. Estas métricas mostraron variaciones esperadas según la topología y los nodos críticos de la red, lo cual destaca la importancia de considerar criterios de redundancia y centralidad al momento de diseñar redes comunitarias sostenibles, como se ha analizado en evaluaciones experimentales de LoRaWAN en entornos rurales [8], [11].

Además, la generación automatizada de informes en PDF con gráficos y tablas sintetizó de forma clara el desempeño del sistema, facilitando su interpretación sin requerir procesamiento externo adicional. Esta funcionalidad, complementada con la visualización geográfica mediante mapas interactivos generados con herramientas como Folium, aporta una perspectiva espacial sobre el estado de la red y posibles puntos de falla críticos [10].

Cabe resaltar que el sistema respondió adecuadamente a eventos simulados de fallos múltiples. En casos donde un nodo no contaba con rutas disponibles, se generó una alerta por correo electrónico. Esta estrategia puede integrarse en futuros esquemas de monitoreo remoto o soporte técnico de-



Fig. 4: Enter Caption



Fig. 5: Enter Caption

scentralizado, en línea con propuestas orientadas a la operación autónoma de redes comunitarias rurales [16], [17].

En conjunto, los resultados sugieren que incluso un prototipo básico, desarrollado con herramientas accesibles como Python, puede servir como plataforma efectiva para la exploración de soluciones de conectividad rural inteligente. A futuro, estos resultados podrían escalarse mediante integración con sensores físicos, redes LoRa o WiFi comunitario, y módulos de predicción de fallos apoyados en inteligencia artificial. En el siguiente enlace se encuentra el repositorio de github <https://github.com/DavidN110/Proyecto-de-Redes/tree/main>.

## V. CONCLUSIONES

Este proyecto permitió validar la viabilidad conceptual y técnica de una red de conectividad rural inteligente, a partir de la simulación de un sistema distribuido con nodos que presentan fallos aleatorios y comportamiento adaptativo.

La integración de modelos de inteligencia artificial permitió predecir fallos con base en métricas de operación de los nodos, mejorando así la capacidad del sistema para reaccionar proactivamente a eventos críticos. Este enfoque puede ser útil en zonas rurales con infraestructura limitada, donde el monitoreo constante y el mantenimiento técnico son restringidos.

El desarrollo de una interfaz gráfica y una plataforma web complementaria facilitó la visualización, análisis y registro

automático del comportamiento del sistema, promoviendo un entorno accesible para la validación de conceptos clave en redes distribuidas.

Si bien se trabajó con un prototipo académico de bajo costo y alcance limitado, se sentaron las bases para futuras implementaciones que podrían integrar dispositivos físicos, comunicación real entre nodos y sistemas avanzados de mantenimiento autónomo basados en IA. Esta experiencia representa un aporte educativo y técnico a las discusiones sobre la conectividad en territorios marginados.

## 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](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