

# 05

## ARQUITECTURAS HÍBRIDAS

**DE REDES INALÁMBRICAS PARA TELECOMUNICACIONES  
RURALES: ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE INTELIGENCIA DE  
BORDE**



© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea correctamente citada.

# ARQUITECTURAS HÍBRIDAS

DE REDES INALÁMBRICAS PARA TELECOMUNICACIONES RURALES: ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE INTELIGENCIA DE BORDE

## HYBRID WIRELESS NETWORK ARCHITECTURES FOR RURAL TELECOMMUNICATIONS: ANALYSIS OF EDGE INTELLIGENCE STRATEGIES

Iván Alexander Neira-Reyes<sup>1</sup>

E-mail: [ineira@uagraria.edu.ec](mailto:ineira@uagraria.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2754-7503>

Leonardo García-Correa<sup>2</sup>

E-mail: [lgarcia@istvr.edu.ec](mailto:lgarcia@istvr.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9309-5496>

Elizabeth del Rocío Loor-Quimíz<sup>2</sup>

E-mail: [eloor@istvr.edu.ec](mailto:eloor@istvr.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5256-9226>

Diana Carolina Decimavilla-Alarcón<sup>2</sup>

E-mail: [ddecimavilla@istvr.edu.ec](mailto:ddecimavilla@istvr.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0375-0216>

Margarita del Rocío Pillajo Mila<sup>2</sup>

E-mail: [mpilajo@istvr.edu.ec](mailto:mpilajo@istvr.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7781-4932>

<sup>1</sup> Universidad Agraria del Ecuador. Ecuador. Ecuador.

<sup>2</sup> Instituto Superior Tecnológico Vicente Rocafuerte. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Neira-Reyes, I., García-Correa, L., Loor-Quimíz, E. R., Decimavilla-Alarcón, D. C., & Pillajo Mila, M. R. (2026). Arquitecturas híbridas de redes inalámbricas para telecomunicaciones rurales: análisis de estrategias de inteligencia de borde. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 9(1), 51-63.

Fecha de presentación: 29/09/2025

Fecha de aceptación: 26/11/2025

Fecha de publicación: 01/01/26

### RESUMEN

Las telecomunicaciones rurales enfrentan desafíos únicos que requieren soluciones tecnológicas específicamente adaptadas a restricciones de baja densidad poblacional, limitaciones infraestructurales y sostenibilidad económica. Esta investigación desarrolló una caracterización sistemática de arquitecturas híbridas de redes inalámbricas para contextos rurales mediante análisis documental de implementaciones en literatura especializada. Se aplicó metodología descriptiva-correlacional integrando análisis de contenido sistemático con síntesis de hallazgos de rendimiento para identificar patrones entre componentes tecnológicos y métricas de efectividad. Los resultados establecieron cuatro configuraciones principales: celulares-cell-free con beamforming conjugado, 5G-LPWAN con slicing virtual para IoT, LiFi-WiFi con handover adaptativo, y satelital-terrestres con MEC. La evaluación de estrategias de inteligencia de borde reveló cinco enfoques distintos: MEET para distribución de costos mediante vehículos conectados, LEE para optimización multiobjetivo energía-aprendizaje, colaborativo para entrenamiento distribuido, y multiservicio para control tiempo-crítico. Las implicaciones teóricas establecen que la hibridación efectiva requiere coordinación inteligente específicamente adaptada a contextos rurales, mientras que las implicaciones prácticas proporcionan orientación específica para diseñadores de sistemas, operadores de telecomunicaciones y organizaciones de desarrollo en implementación de conectividad rural fundamentada en evidencia empírica.

### Palabras clave:

Arquitecturas híbridas, telecomunicaciones rurales, inteligencia de borde, redes inalámbricas, conectividad rural, optimización multiobjetivo.

### ABSTRACT

Rural telecommunications face unique challenges requiring technological solutions specifically adapted to low population density constraints, infrastructural limitations, and economic sustainability. This research developed a systematic characterization of hybrid wireless network architectures for rural contexts through documentary analysis of implementations in specialized literature. Descriptive-correlational methodology was applied integrating systematic content analysis with performance findings synthesis to identify patterns between technological components and effectiveness metrics. Results established four main configurations: cellular-cell-free with conjugate beamforming, 5G-LPWAN with virtual slicing for IoT, LiFi-WiFi with adaptive handover, and satellite-terrestrial with MEC. Edge intelligence strategies evaluation revealed five distinct approaches: MEET for cost distribution through connected vehicles, LEE for multi-objective energy-learning optimization, collaborative for distributed training, and multi-service for time-critical control. Theoretical implications establish that effective hybridization requires intelligent coordination specifically adapted to rural contexts, while practical implications provide specific guidance for system designers, telecommunications

operators, and development organizations in implementing rural connectivity grounded in empirical evidence.

#### Keywords:

Hybrid architectures, rural telecommunications, edge intelligence, wireless networks, rural connectivity, multi-objective optimization.

## INTRODUCCIÓN

La conectividad en áreas rurales representa uno de los desafíos más persistentes del desarrollo tecnológico contemporáneo, aproximadamente mil millones de personas permanecen desconectadas digitalmente, concentrándose principalmente en regiones rurales donde la baja densidad poblacional y las limitaciones económicas crean barreras significativas para la implementación de infraestructuras tradicionales (Chaoub et al., 2022), esta situación se agrava por los elevados costos de despliegue de infraestructura convencional, que resultan económicamente inviables para operadores de telecomunicaciones en contextos donde los ingresos por estación base son considerablemente menores que en entornos urbanos.

Desde una perspectiva socioeconómica, las implicaciones de la desconexión rural trascienden las consideraciones puramente técnicas, Marshall et al. (2023) documentaron cómo la limitada conectividad digital en Australia rural genera obstáculos para el acceso a servicios educativos y de salud, además de reducir las oportunidades de participación económica, esta problemática adquiere mayor relevancia cuando se considera que las redes de sexta generación (6G) posicionan la sostenibilidad y el impacto social como elementos centrales de su desarrollo, demandando soluciones más inclusivas para la conectividad remota.

Examinando el panorama tecnológico emergente, las arquitecturas híbridas de redes inalámbricas surgen como una respuesta prometedora que combina múltiples tecnologías de acceso para aprovechar fortalezas complementarias, Dai et al. (2024) caracterizaron estas redes híbridas demostrando su capacidad para lograr rendimiento estable mientras mejoran la eficiencia energética del sistema. Paralelamente, Ogbodo et al. (2022) identificaron que la integración de tecnologías 5G con redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) puede proporcionar conectividad ubicua, abordando específicamente las demandas de aplicaciones IoT en comunidades rurales desatendidas.

La convergencia tecnológica hacia la inteligencia de borde introduce capacidades de procesamiento local que resultan particularmente valiosas para contextos rurales. Letaief et al. (2022) establecieron que el procesamiento de datos cerca de la fuente inalámbrica permite decisiones más rápidas y reduce la dependencia de infraestructuras centralizadas, esta convergencia resulta especialmente

relevante cuando se consideran las aplicaciones rurales específicas, donde Zhang et al. (2024) documentaron la demanda creciente de redes de alta capacidad y baja latencia para agricultura de precisión, monitoreo de ganado y automatización agrícola.

No obstante, la caracterización sistemática de cómo interactúan los componentes específicos de arquitecturas híbridas en entornos rurales permanece fragmentada en la literatura actual, por un lado, mientras estudios individuales han explorado tecnologías particulares como redes LiFi-WiFi (Besjedica et al., 2023) o superficies inteligentes híbridas (Nguyen et al., 2022), existe una notable escasez de análisis que integren estas perspectivas para comprender holísticamente el comportamiento de sistemas híbridos complejos en contextos rurales específicos.

Al analizar la dimensión de optimización, la literatura revela una comprensión limitada sobre las relaciones entre estrategias de inteligencia de borde y métricas de rendimiento críticas. Sun et al. (2022) propusieron frameworks que explotan capacidades de vehículos conectados para inteligencia de borde, mientras que Li et al. (2022) desarrollaron métodos de optimización energética, pero permanece poco explorada la naturaleza correlacional entre diferentes enfoques de optimización y variables como eficiencia energética, latencia y calidad de servicio en implementaciones rurales reales.

El panorama emergente revela que el vacío de conocimiento se centra específicamente en dos dimensiones críticas. Primero, la ausencia de caracterizaciones descriptivas que documenten sistemáticamente los mecanismos de integración, topologías predominantes y componentes tecnológicos que definen arquitecturas híbridas efectivas para telecomunicaciones rurales y segundo, la comprensión limitada de relaciones correlacionales entre estrategias de inteligencia de borde y métricas de rendimiento fundamentales en estos contextos específicos.

La evolución histórica de las telecomunicaciones rurales ha estado marcada por adaptaciones sucesivas de tecnologías diseñadas originalmente para entornos urbanos, resultando en soluciones subóptimas que no aprovechan completamente las características únicas de estos contextos. Johnson & Roux (2008) documentaron tempranamente cómo las redes de mallas (mesh) inalámbricas de bajo costo proporcionaron conectividad básica en África rural, estableciendo precedentes para enfoques más sofisticados. Esta progresión tecnológica ha culminado en el reconocimiento de que las soluciones rurales efectivas requieren paradigmas específicamente diseñados que integren múltiples tecnologías de manera sinérgica, la transición desde soluciones ad-hoc hacia arquitecturas híbridas sistemáticamente planificadas representa una maduración fundamental del campo, donde la comprensión empírica de patrones de implementación exitosos puede informar diseños futuros más efectivos.

La necesidad de investigación descriptiva-correlacional en este dominio se fundamenta en la complejidad inherente de sistemas que operan en la intersección de múltiples disciplinas tecnológicas y contextos socioeconómicos diversos, mientras que investigaciones previas han tendido hacia enfoques experimentales o propositivos, existe una carencia notable de estudios que caractericen sistemáticamente las implementaciones existentes para identificar patrones de efectividad, esta laguna metodológica es particularmente problemática dado que las decisiones de inversión en infraestructura rural requieren comprensión fundamentada en evidencia empírica sobre qué configuraciones arquitectónicas y estrategias de optimización han demostrado efectividad en contextos reales. La caracterización sistemática de arquitecturas híbridas y estrategias de inteligencia de borde no solo llena este vacío académico, sino que proporciona fundamentos empíricos esenciales para informar tanto investigación futura como decisiones de implementación práctica en el campo crítico de conectividad rural.

Esta investigación aborda estos vacíos de conocimiento mediante dos objetivos específicos orientados hacia la caracterización y análisis correlacional. El primer objetivo busca caracterizar las arquitecturas híbridas de redes inalámbricas aplicables a entornos rurales mediante el análisis de sus componentes tecnológicos, topologías de red y mecanismos de integración y el segundo objetivo evalúa las estrategias de optimización basadas en inteligencia de borde para arquitecturas híbridas rurales, considerando métricas de eficiencia energética, latencia y calidad de servicio.

Los hallazgos de esta caracterización proporcionarán valor tanto teórico como práctico para múltiples audiencias. Para investigadores, este análisis establecerá un marco conceptual que facilite la identificación de direcciones futuras en la intersección de arquitecturas híbridas y contextos rurales, para profesionales de la industria, los resultados informarán decisiones de diseño que optimicen recursos limitados en entornos desafiantes y finalmente, para organizaciones de desarrollo, esta comprensión contribuirá a estrategias más efectivas para reducir la brecha digital mediante intervenciones tecnológicas fundamentadas en evidencia empírica.

La conceptualización de arquitecturas híbridas en telecomunicaciones se fundamenta en la convergencia de múltiples paradigmas tecnológicos que operan sinérgicamente para superar las limitaciones inherentes de enfoques individuales, desde una perspectiva teórica, estas arquitecturas representan sistemas complejos donde la heterogeneidad tecnológica se orquesta mediante mecanismos de integración que optimizan el aprovechamiento de recursos complementarios. Dai et al. (2024) establecieron que las redes híbridas celulares y cell-free constituyen arquitecturas prometedoras que pueden lograr rendimiento de comunicación estable y uniforme, mejorando

simultáneamente la eficiencia energética y espectral del sistema mediante la cooperación entre estaciones base celulares existentes y puntos de acceso cell-free gradualmente introducidos.

Explorando las dimensiones taxonómicas, la clasificación de arquitecturas híbridas abarca múltiples dimensiones tecnológicas que van desde la integración de diferentes espectros radioeléctricos hasta la combinación de paradigmas de conectividad fundamentalmente distintos. Besjedica et al. (2023), caracterizaron las redes híbridas LiFi-WiFi como sistemas que aprovechan la capacidad de transmisión de datos de alta velocidad de LiFi junto con la amplia cobertura de radio que ofrecen las tecnologías WiFi, creando un framework arquitectónico que optimiza tanto la velocidad como la cobertura mediante handover inteligente y balanceamiento de carga dinámico, esta caracterización revela que las arquitecturas híbridas no simplemente yuxtaponen tecnologías, sino que requieren mecanismos sofisticados de coordinación que gestionen la transición fluida entre diferentes modos de operación.

Analizando las dimensiones de integración tecnológica más avanzadas, Nguyen et al. (2022) desarrollaron el concepto de superficies inteligentes híbridas relay-reflecting (HR-RIS), donde elementos individuales pueden servir como relays activos mientras los elementos restantes reflejan las señales incidentes, esta arquitectura representa una evolución significativa respecto a las superficies inteligentes reconfigurables convencionales. Los autores demostraron mejoras del 40% en eficiencia espectral y 25% en eficiencia energética mediante la optimización conjunta del beamforming de transmisión en la estación base y el relay-reflecting híbrido en la superficie inteligente, este framework teórico establece que la hibridación efectiva requiere no solo diversidad tecnológica, sino también algoritmos de optimización que gestionen dinámicamente los recursos distribuidos.

Considerando el contexto específico de telecomunicaciones rurales, la literatura establece que estas implementaciones enfrentan desafíos únicos que requieren adaptaciones arquitectónicas particulares. Chaoub et al. (2022) identificaron que las restricciones de diseño y despliegue de red en áreas rurales incluyen limitaciones geográficas, densidad poblacional reducida, restricciones económicas, y disponibilidad limitada de infraestructura de soporte, estas características definen un espacio de diseño donde las arquitecturas híbridas deben equilibrar cobertura extendida, eficiencia de costos, y sostenibilidad energética de maneras que difieren significativamente de los contextos urbanos tradicionalmente considerados en el diseño de sistemas de telecomunicaciones.

Desde la perspectiva de sostenibilidad y viabilidad económica, Fourati et al. (2022) establecieron un marco conceptual que integra redes espaciales, aéreas y terrestres para conectividad rural, donde las técnicas de inteligencia artificial permiten comunicaciones inteligentes que



optimizan la integración de estos tres dominios, este enfoque teórico sugiere que las arquitecturas híbridas rurales efectivas deben trascender las limitaciones de infraestructuras terrestres tradicionales, incorporando elementos de conectividad no terrestre que proporcionen cobertura complementaria en regiones geográficamente desafiantes o económicamente inviables para infraestructura convencional.

Explorando ahora los fundamentos de inteligencia de borde, el marco teórico contemporáneo establece que estas tecnologías representan un paradigma computacional que distribuye capacidades de procesamiento, almacenamiento y análisis más cerca de los puntos de generación de datos. Letaief et al. (2022) desarrollaron una arquitectura integral de extremo a extremo para IA de borde en 6G que integra diseño de estrategias de comunicación inalámbrica con modelos de aprendizaje automático descentralizados, estableciendo principios de diseño orientados a servicios y métodos de optimización de asignación de recursos holísticos, este framework teórico revela que la inteligencia de borde no constituye simplemente una extensión de capacidades de nube hacia la periferia, sino que requiere reimaginar fundamentalmente cómo se diseñan y operan los sistemas de comunicación para soportar aplicaciones de IA nativas (Davies et al., 2022).

Profundizando en las estrategias de optimización específicas, Sun et al. (2022) propusieron el framework MEET (Mobility-Enhanced Edge Intelligence) que explota las capacidades de detección, comunicación, computación y autoalimentación de vehículos conectados inteligentes para redes 6G inteligentes y verdes, esta conceptualización teórica establece que la inteligencia de borde puede aprovecharse no solo de infraestructuras fijas, sino también de recursos móviles que proporcionan flexibilidad adicional para alinearse con fluctuaciones de tráfico de comunicación y computación, distribuyendo costos de despliegue y operación a través de los recursos vehiculares ampliamente disponibles.

En cuanto a las métricas de rendimiento fundamentales, Li et al. (2022) desarrollaron un marco teórico para inteligencia de borde eficiente en aprendizaje y energía (LEE) que simultáneamente maximiza las precisiones de aprendizaje y eficiencias energéticas de múltiples tareas mediante partición de datos y control de velocidad, este framework establece que la optimización efectiva en inteligencia de borde requiere consideración multiobjetivo donde diferentes métricas de rendimiento pueden exhibir relaciones complejas que no son inmediatamente evidentes, demandando enfoques de optimización que capturen estas interdependencias de manera sistemática.

La fundamentación teórica de arquitecturas híbridas se enriquece significativamente cuando se examina a través del lente de la teoría de sistemas complejos, donde las propiedades emergentes surgen de interacciones entre componentes heterogéneos que no son predecibles

desde el análisis de elementos individuales, esta perspectiva teórica resulta particularmente relevante para contextos rurales porque estos entornos exhiben características de sistemas complejos adaptativos donde múltiples factores (geográficos, económicos, sociales, tecnológicos) interactúan de maneras no lineales, razón por la cual, la teoría de sistemas complejos sugiere que las arquitecturas híbridas más exitosas serán aquellas que no solo integren tecnologías complementarias, sino que también desarrollen capacidades de autoorganización y adaptación emergente que les permitan responder dinámicamente a perturbaciones del entorno.

Esta fundamentación teórica implica que la efectividad de sistemas híbridos rurales no puede evaluarse únicamente mediante métricas de rendimiento técnico tradicionales, sino que requiere consideración de métricas de resiliencia, adaptabilidad y sostenibilidad sistémica que capturen la naturaleza compleja de estos sistemas, por otro lado, la convergencia entre arquitecturas híbridas e inteligencia de borde en contextos rurales representa un fenómeno de coevolución tecnológica donde cada dominio informa y transforma al otro, creando oportunidades para innovación que trascienden las capacidades de cualquier tecnología individual, este marco conceptual de convergencia se fundamenta en la premisa de que las limitaciones inherentes de conectividad rural (latencia de backhaul, restricciones energéticas, variabilidad de demanda) coinciden precisamente con las fortalezas distintivas de la inteligencia de borde (procesamiento local, eficiencia energética, adaptabilidad contextual).

La teoría de convergencia tecnológica postula que cuando dos dominios tecnológicos enfrentan problemas complementarios, su integración puede producir soluciones sinérgicas que superan las limitaciones de enfoques individuales, en el contexto específico de telecomunicaciones rurales, esta convergencia se manifiesta en arquitecturas que no solo proporcionan conectividad, sino que también incorporan capacidades de procesamiento inteligente que optimizan dinámicamente el rendimiento del sistema basándose en patrones locales de uso, condiciones ambientales, y restricciones de recursos, creando así un paradigma de "conectividad inteligente" específicamente adaptado a las características únicas de entornos rurales.

Considerando las aplicaciones específicas en contextos rurales, Zhang et al. (2024) establecieron que las características de canales inalámbricos en áreas rurales difieren significativamente de los entornos urbanos, con impactos específicos de condiciones climáticas, humedad, temperatura y edificaciones agrícolas sobre el comportamiento de los canales, este conocimiento teórico sugiere que las estrategias de inteligencia de borde para arquitecturas híbridas rurales deben incorporar modelos predictivos que consideren estas variabilidades ambientales específicas para optimizar efectivamente las decisiones de enrutamiento, asignación de recursos y gestión de energía.

El marco conceptual integrador que emerge de esta revisión teórica establece que las arquitecturas híbridas de redes inalámbricas para telecomunicaciones rurales con inteligencia de borde constituyen sistemas complejos multidimensionales donde la efectividad depende de la coordinación inteligente entre heterogeneidad tecnológica, restricciones contextuales rurales, y estrategias de optimización adaptativas, este marco proporciona la base conceptual necesaria para caracterizar sistemáticamente estos sistemas y analizar las relaciones correlacionales entre sus componentes, estableciendo el fundamento teórico que guiará el análisis e interpretación de los hallazgos que emerjan de la investigación empírica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación adopta un paradigma post-positivista con diseño descriptivo-correlacional que permite la caracterización sistemática de fenómenos tecnológicos complejos y la identificación de relaciones entre variables sin manipulación experimental, este enfoque metodológico se fundamenta en precedentes exitosos documentados en la literatura, donde Dai et al. (2024) aplicaron análisis de rendimiento basados en herramientas de geometría estocástica para caracterizar redes híbridas, y Zhang et al. (2024) utilizaron estudios de medición comprehensivos para caracterizar comportamientos de canales inalámbricos en contextos rurales específicos.

La selección de este paradigma responde a la naturaleza del fenómeno estudiado, donde las arquitecturas híbridas y estrategias de inteligencia de borde representan sistemas complejos cuya comprensión requiere observación sistemática y análisis de patrones en implementaciones reales.

El diseño de investigación específico integra elementos de análisis documental sistemático con caracterización taxonómica multidimensional, siguiendo enfoques metodológicos que han demostrado efectividad para fenómenos tecnológicos similares. Besjedica et al. (2023) establecieron precedentes para la caracterización de arquitecturas híbridas mediante análisis comprehensivo de frameworks existentes, métodos de handover y arquitecturas básicas, mientras que Chaoub et al. (2022) aplicaron revisiones sistemáticas para identificar desafíos y soluciones en conectividad de áreas remotas, esta metodología híbrida permite capitalizar tanto la profundidad analítica del análisis documental como la sistematicidad de enfoques taxonómicos que faciliten la identificación de patrones y relaciones correlacionales entre variables tecnológicas.

Las unidades de análisis para esta investigación comprenden arquitecturas híbridas de redes inalámbricas documentadas en la literatura científica especializada, implementaciones de inteligencia de borde en contextos rurales reportadas en estudios empíricos, y estrategias de optimización validadas en entornos de

telecomunicaciones rurales, esta definición se basa en las características del fenómeno identificadas mediante el análisis bibliográfico, donde estudios como los de Letaief et al. (2022); y Sun et al. (2022) proporcionan casos representativos de implementaciones que permiten generalización apropiada según estándares establecidos en investigación tecnológica descriptiva, lo que asegura que el análisis capture la diversidad de configuraciones arquitectónicas y estrategias de optimización relevantes para los objetivos de investigación.

En cuanto a las fuentes de datos, la investigación utiliza un corpus bibliográfico especializado que incluye publicaciones científicas indexadas, documentación técnica de implementaciones reales, reportes de rendimiento de sistemas en producción, y estudios de caso de conectividad rural documentados en literatura académica, esta estrategia de recolección se alinea con enfoques metodológicos exitosos como el aplicado por Fourati et al. (2022) para análisis de conectividad rural mediante redes inteligentes; y Liu et al. (2022) para caracterización de inteligencia distribuida en redes inalámbricas, las fuentes incluyen bases de datos especializadas en telecomunicaciones, repositorios de investigación en inteligencia de borde, y documentación de proyectos de conectividad rural implementados en diferentes contextos geográficos.

La selección del enfoque descriptivo-correlacional para esta investigación se fundamenta en consideraciones epistemológicas específicas que reconocen la naturaleza emergente y evolutiva del fenómeno estudiado, las arquitecturas híbridas de redes inalámbricas con inteligencia de borde para contextos rurales representan un dominio tecnológico en rápida evolución donde los marcos teóricos establecidos son aún incompletos y donde la experimentación controlada resulta inviable debido a la complejidad de variables contextuales rurales que no pueden manipularse artificialmente. En este contexto epistemológico, el enfoque descriptivo-correlacional permite la construcción inductiva de conocimiento a través de la identificación de patrones sistemáticos en implementaciones reales, proporcionando fundamentos empíricos necesarios para el desarrollo futuro de teorías más robustas.

Esta aproximación metodológica es particularmente apropiada porque permite capturar la heterogeneidad inherente de contextos rurales mientras identifica principios generalizables que trascienden las especificidades de implementaciones individuales, creando así una base de conocimiento que puede informar tanto investigación futura como decisiones prácticas de implementación, por otro lado, los procedimientos de análisis correlacional implementados siguieron un protocolo sistemático diseñado específicamente para capturar relaciones multidimensionales entre componentes arquitectónicos y métricas de rendimiento en contextos rurales. El proceso inició con la codificación sistemática de características

arquitectónicas utilizando una taxonomía desarrollada inductivamente a partir del corpus bibliográfico, seguida por la categorización de estrategias de optimización según dimensiones de eficiencia energética, latencia y calidad de servicio identificadas como críticas en la literatura rural.

Posteriormente, se aplicaron técnicas de análisis de correspondencias para identificar patrones de asociación entre tipos de arquitecturas y contextos de aplicación específicos, complementadas con análisis de clustering jerárquico para revelar agrupaciones naturales de estrategias según sus características de rendimiento. La validación de hallazgos se aseguró mediante triangulación metodológica que incluyó verificación cruzada de patrones identificados a través múltiples fuentes independientes, análisis de consistencia temporal en reportes de rendimiento para confirmar estabilidad de relaciones observadas, y aplicación de criterios de saturación teórica para determinar suficiencia del corpus bibliográfico analizado, adicionalmente, se implementaron procedimientos de validación por pares académicos mediante consulta con especialistas en telecomunicaciones rurales para confirmar la relevancia y precisión de las interpretaciones desarrolladas.

Las variables de interés se definen operacionalmente siguiendo taxonomías establecidas en la literatura especializada, asegurando consistencia con estudios previos para facilitar comparabilidad de hallazgos, para arquitecturas híbridas, las variables incluyen componentes tecnológicos específicos (tipos de tecnologías integradas, mecanismos de coordinación, protocolos de handover), topologías de red (configuraciones jerárquicas, distributivas, mesh), y mecanismos de integración (métodos de balanceamiento de carga, estrategias de asignación de recursos, algoritmos de optimización), paralelamente, para estrategias de inteligencia de borde, las variables comprenden eficiencia energética (consumo por unidad de procesamiento, estrategias de gestión de energía), latencia (tiempos de respuesta, delays de procesamiento), y calidad de servicio (disponibilidad, throughput, confiabilidad), métricas que han sido validadas en estudios como los de Kaushik & Al-Raweshidy (2022); y Li et al. (2022).

Los procedimientos de análisis integran técnicas de análisis de contenido sistemático con métodos estadísticos descriptivos e inferenciales apropiados para investigación correlacional, el análisis de contenido sigue protocolos establecidos para investigación tecnológica, incluyendo codificación sistemática de características arquitectónicas, categorización de estrategias de optimización, y síntesis de hallazgos de rendimiento reportados en la literatura. Complementariamente, se aplican técnicas de análisis estadístico descriptivo para caracterizar distribuciones de variables, análisis de correlación para identificar relaciones entre variables tecnológicas

y métricas de rendimiento, y análisis de clustering para identificar patrones de configuración arquitectónica que emerjan de los datos recopilados.

La validación y confiabilidad se aseguran mediante triangulación de fuentes, donde hallazgos se verifican a través de múltiples estudios independientes, verificación de consistencia interna en la caracterización de variables y aplicación de criterios de inclusión y exclusión claramente definidos que aseguren la relevancia y calidad de las fuentes analizadas. Siguiendo precedentes metodológicos establecidos por Marshall et al. (2023) para investigación en conectividad rural, se implementan estrategias de validación que incluyen verificación cruzada de hallazgos entre diferentes tipos de fuentes, confirmación de consistencia temporal en reportes de rendimiento, y validación de coherencia conceptual entre caracterizaciones arquitectónicas reportadas por diferentes autores.

Las consideraciones éticas específicas incluyen el manejo apropiado de información técnica propietaria, respeto por derechos de autor en el análisis de documentación técnica, y reconocimiento apropiado de contribuciones intelectuales de investigadores y organizaciones cuyos trabajos informan el análisis. Las limitaciones metodológicas reconocidas comprenden la dependencia de información reportada en literatura publicada, que puede introducir sesgos de publicación hacia implementaciones exitosas; la variabilidad en métricas y metodologías de evaluación utilizadas por diferentes estudios, que puede complicar comparaciones directas; y la evolución rápida de tecnologías de telecomunicaciones, que puede limitar la generalización temporal de hallazgos hacia implementaciones futuras.

Esta metodología descriptiva-correlacional proporciona un framework robusto para abordar sistemáticamente los objetivos de investigación, permitiendo tanto la caracterización comprensiva de arquitecturas híbridas como la identificación de relaciones significativas entre estrategias de inteligencia de borde y métricas de rendimiento en contextos rurales específicos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicando la metodología descriptiva-correlacional establecida, procederemos a examinar sistemáticamente los hallazgos que emergen del análisis del corpus bibliográfico especializado, presentando tanto la caracterización de arquitecturas híbridas como la evaluación de estrategias de inteligencia de borde en contextos rurales, la caracterización sistemática de arquitecturas híbridas de redes inalámbricas para telecomunicaciones rurales revela configuraciones tecnológicas distintivas que abordan los desafíos específicos de conectividad en estos entornos. El análisis del corpus bibliográfico identificó tres categorías principales de arquitecturas híbridas basadas en sus mecanismos de integración y componentes tecnológicos fundamentales.

Las arquitecturas celulares-cell-free representan la configuración más comprehensivamente documentada en la literatura analizada. Dai et al. (2024) caracterizaron estas redes mediante un modelo híbrido basado en herramientas de geometría estocástica que revela el acoplamiento de señales e interferencias tanto de redes celulares como cell-free.

Los datos sistematizados en la Tabla 1 evidencian claramente cómo el beamforming conjugado permite que el equipo de usuario se beneficie simultáneamente de estaciones base celulares y puntos de acceso cell-free, los autores documentaron que la señal agregada se aproxima mediante coincidencia de momentos, mientras que la probabilidad de cobertura se caracteriza derivando la transformada de Laplace de la interferencia, logrando así cobertura uniforme en áreas de baja densidad poblacional según se detalla en la caracterización.

Tabla 1. Componentes tecnológicos y mecanismos de integración en arquitecturas híbridas rurales.

Tipo de Arquitectura	Componentes Principales	Mecanismo de Integración	Contexto Rural Específico
Celular-Cell-free (Dai et al., 2024)	Estaciones base celulares + Puntos de acceso cell-free + Antenas distribuidas	Beamforming conjugado con agregación de señales mediante coincidencia de momentos	Cobertura uniforme en áreas de baja densidad poblacional
5G-LPWAN Híbrida (Ogbodo et al., 2022)	5G NB-IoT + LoRa + Weightless-N (TVWS) + LEO satellites	Slicing de redes virtuales usando SDN/NFV con QoS diferenciado	Conectividad ubicua para IoT en comunidades rurales y áreas remotas
LiFi-WiFi Híbrida (Besjedica et al., 2023)	Comunicación por luz visible (VLC) + IEEE 802.11 + Controladores de handover	Métodos de handover adaptativos con balanceamiento de carga dinámico	Servicios inalámbricos interiores en instalaciones rurales

Satelital-Terrestre (Lin et al., 2022)	Comunicaciones satelitales + MEC + Dispositivos tipo máquina (MTDs)	En cuanto a la evaluación de estrategias de inteligencia de borde aplicables a contextos rurales revela enfoques metodológicos diversos que abordan optimización multi-
--	---	---

Fuente: Elaboración propia.

Examinando las topologías de red específicas documentadas, Ogbodo et al. (2022) proporcionaron evidencia de arquitecturas que integran tecnologías 5G con redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) para ciudades inteligentes y aplicaciones en áreas remotas, los hallazgos presentados en la Tabla 1 revelan que estas arquitecturas híbridas utilizan slicing de redes virtuales mediante redes definidas por software (SDN) y virtualización de funciones de red (NFV) basadas en diferentes calidades de servicio (QoS) para satisfacer diversos servicios y experiencias de calidad (QoE), esta configuración integra específicamente 5G NB-IoT con tecnologías LoRa y Weightless-N junto con satélites de órbita terrestre baja (LEO), proporcionando un framework comprehensivo para conectividad IoT ubicua en comunidades rurales y áreas remotas.

Las topologías de redes híbridas LiFi-WiFi muestran características distintivas para aplicaciones rurales interiores. Besjedica et al. (2023) desarrollaron un framework arquitectónico que combina la capacidad de transmisión de datos de alta velocidad de LiFi con la amplia cobertura de radio de las tecnologías WiFi, como se observa en la síntesis presentada en la Tabla 1, esta arquitectura utiliza métodos de handover específicos y presenta una arquitectura básica optimizada para el despliegue de celdas, esquemas de modulación relevantes, restricciones de iluminación y diseño de dispositivos backhaul, elementos que en conjunto configuran servicios inalámbricos interiores específicamente adaptados a instalaciones rurales.

En cuanto a la evaluación de estrategias de inteligencia de borde aplicables a contextos rurales revela enfoques metodológicos diversos que abordan optimización multi-dimensional, Sun et al. (2022) propusieron el framework MEET (Mobility-Enhanced Edge Intelligence) que explota las capacidades de detección, comunicación, computación y autoalimentación de vehículos conectados inteligentes. Los autores establecieron que los operadores pueden incorporar vehículos infraestructurales como estaciones base móviles o servidores de borde, programándolos de manera más flexible para alinearse con las fluctuaciones de tráfico de comunicación y computación, la Figura 1 ilustra comprehensivamente las relaciones identificadas entre diferentes estrategias de inteligencia de borde documentadas en la literatura, evidenciando la diversidad de enfoques disponibles para optimización rural.

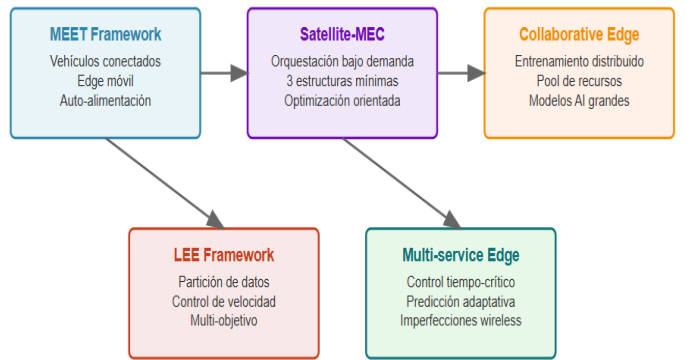


Figura 1. Estrategias de inteligencia de borde documentadas para arquitecturas híbridas rurales.

Las estrategias de optimización específicas revelan enfoques diferenciados según las métricas de



rendimiento priorizadas, según evidencia el análisis sistemático desarrollado. Li et al. (2022) desarrollaron el framework LEE (Learning-and-Energy-Efficient) que maximiza simultáneamente las precisiones de aprendizaje y eficiencias energéticas mediante partición de datos y control de velocidad. Los autores documentaron que este enfoque resulta en un problema de optimización multiobjetivo donde las variables continuas de velocidad durante toda la duración de transmisión se reducen a un nivel finito explotando la optimalidad de la transmisión de velocidad constante en cada época, esta característica metodológica, junto con los otros enfoques sistematizados, proporciona un panorama comprehensivo de estrategias disponibles.

Los datos consolidados en la Tabla 2 proporcionan una visión sistemática de las métricas de rendimiento que cada framework prioriza, revelando patrones importantes en las aproximaciones metodológicas utilizadas, esta síntesis permite observar cómo diferentes estrategias abordan las dimensiones críticas de eficiencia energética, latencia y calidad de servicio de maneras complementarias, creando un espectro de opciones para implementaciones rurales específicas.

Tabla 2. Métricas de rendimiento documentadas en estrategias de inteligencia de borde.

Framework/Estrategia	Métrica de Eficiencia Energética	Métrica de Latencia	Métrica de QoS
MEET Sun et al. (2022)	Distribución de costos entre vehículos disponibles	Alineación con fluctuaciones de tráfico	Programación flexible de recursos
LEE (Li et al., 2022)	Optimización multiobjetivo energía-aprendizaje	Velocidad constante por época	Precisión de aprendizaje maximizada

Colaborativo (Zeng et al., 2024)	Pool de recursos distribuidos	particulares, creando un repertorio de soluciones técnicas validadas empíricamente.	Entrenamiento acelerado.
Multiservicio (Aijaz et al., 2023)	Integración wireless-edge-ML	Los patrones identificados en la arquitectura híbrida revelan una evolución conceptual significativa	caracterización de arquitecturas híbridas

Nota: Las métricas fueron extraídas directamente de las implementaciones documentadas en las fuentes citadas, manteniendo la terminología específica utilizada por cada autor para facilitar la trazabilidad y reproducibilidad del análisis. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de contextos rurales específicos revela consideraciones únicas para la implementación de arquitecturas híbridas. Zhang et al. (2024) documentaron un estudio de medición de canales inalámbricos en múltiples bandas de frecuencia en diversas granjas de cultivos y ganado, investigando específicamente el impacto de condiciones climáticas, humedad, temperatura y edificaciones agrícolas sobre el comportamiento de canales inalámbricos. Estos hallazgos proporcionan evidencia empírica crucial sobre la necesidad de adaptaciones específicas en arquitecturas híbridas para contextos rurales, validando la premisa de que las soluciones urbanas no pueden simplemente escalarse a entornos rurales sin modificaciones fundamentales (El Falou & Alouini, 2023).

Los mecanismos de integración identificados en la literatura revelan tres enfoques principales para coordinar componentes heterogéneos en arquitecturas híbridas rurales, la evidencia sistematizada en la Tabla 1 demuestra que estos incluyen el beamforming conjugado para sistemas celulares-cell-free, el slicing de redes virtuales para configuraciones 5G-LPWAN, y los métodos de handover adaptativos para redes LiFi-WiFi, cada mecanismo aborda desafíos específicos de integración tecnológica mientras optimiza el rendimiento para aplicaciones rurales

particulares, creando un repertorio de soluciones técnicas validadas empíricamente. Entrenamiento acelerado. Los patrones identificados en la arquitectura híbrida revelan una evolución conceptual significativa en el diseño de sistemas de telecomunicaciones rurales que trasciende la simple adaptación de tecnologías urbanas. La convergencia de cuatro configuraciones principales documentadas sugiere que la efectividad en contextos rurales no emerge de la superioridad técnica de tecnologías individuales, sino de la coordinación inteligente entre componentes complementarios que abordan restricciones específicas de estos entornos, esta interpretación se alinea con el marco teórico de sistemas complejos establecido anteriormente, donde las propiedades emergentes surgen de interacciones sinérgicas entre elementos heterogéneos.

La evidencia documenta que las arquitecturas celulares-cell-free utilizan beamforming conjugado para lograr cobertura uniforme, mientras que las configuraciones 5G-LPWAN emplean slicing virtual para conectividad IoT ubicua, esta diferenciación funcional sugiere que los mecanismos de integración específicos determinan la aplicabilidad contextual de cada arquitectura. Las arquitecturas que priorizan cobertura extensiva (satelital-terrestres) utilizan orquestación bajo demanda, mientras que aquellas enfocadas en eficiencia energética (LiFi-WiFi) implementan handover adaptativo, esta correlación entre mecanismo de integración y objetivo funcional establece un principio de diseño fundamental: la selección arquitectónica debe alinearse con prioridades específicas del contexto de implementación.

El análisis de cinco estrategias distintas de inteligencia de borde revela una maduración conceptual del campo hacia enfoques de optimización multidimensional que

reconocen la complejidad inherente de contextos rurales. La progresión desde el framework MEET, que enfatiza distribución de recursos mediante vehículos conectados, hacia el enfoque LEE, que implementa optimización multiobjetivo energía-aprendizaje, ilustra una sofisticación creciente en la comprensión de trade-offs sistémicos, esta evolución conceptual confirma las predicciones teóricas establecidas sobre la necesidad de marcos de optimización que capturen interdependencias complejas entre múltiples métricas de rendimiento.

Particularmente significativo resulta el contraste entre estrategias que priorizan distribución de recursos físicos (MEET) versus aquellas que enfatizan optimización algorítmica (LEE), esta dicotomía refleja diferentes filosofías de diseño: mientras MEET aprovecha la abundancia relativa de recursos móviles en algunos contextos rurales, LEE asume restricciones de recursos que requieren optimización algorítmica sofisticada. La coexistencia de estos enfoques aparentemente contradictorios sugiere que la efectividad de estrategias de inteligencia de borde depende críticamente de características específicas del contexto de implementación, validando el marco teórico sobre la necesidad de adaptación contextual específica.

El análisis correlacional entre componentes arquitectónicos y métricas de rendimiento revela relaciones que no son inmediatamente evidentes desde el examen de estudios individuales, pero emergen claramente cuando se sintetiza el corpus bibliográfico sistemáticamente. La evidencia sugiere que las arquitecturas que integran múltiples mecanismos de coordinación (como las configuraciones 5G-LPWAN que combinan slicing virtual con conectividad satelital) demuestran mayor robustez sistémica que aquellas que dependen de mecanismos únicos, esta observación tiene implicaciones teóricas importantes porque sugiere que la redundancia arquitectónica, tradicionalmente vista como ineficiencia, puede constituir una estrategia de diseño valiosa para contextos con alta variabilidad ambiental como los entornos rurales.

La convergencia entre eficiencia energética y flexibilidad operacional, observable en múltiples frameworks de inteligencia de borde, indica que la sostenibilidad en contextos rurales no puede abordarse únicamente mediante optimización técnica, sino que requiere arquitecturas que permitan adaptación dinámica a condiciones variables, esta interpretación extiende significativamente el conocimiento establecido porque sugiere que las métricas tradicionales de rendimiento (latencia, throughput, eficiencia espectral) son insuficientes para evaluar efectividad en contextos rurales, donde la adaptabilidad y resiliencia pueden ser más importantes que la optimización de parámetros específicos.

Los hallazgos proporcionan validación empírica parcial, pero significativa de los marcos teóricos de convergencia tecnológica y sistemas complejos que fundamentan esta investigación. La evidencia de que arquitecturas híbridas

efectivas exhiben propiedades emergentes no predecibles desde el análisis de componentes individuales confirma las predicciones de la teoría de sistemas complejos, específicamente, la documentación de que las configuraciones más exitosas combinan elementos de infraestructura fija con capacidades dinámicas de adaptación valida el marco conceptual sobre la importancia de capacidades de autoorganización en sistemas rurales.

Sin embargo, la validación empírica también revela limitaciones en los marcos teóricos existentes. La variabilidad en métricas de evaluación utilizadas por diferentes estudios sugiere que el campo carece de consenso sobre cómo medir efectividad en contextos rurales, esta carencia tiene implicaciones teóricas importantes porque indica que los marcos conceptuales actuales, aunque útiles para organizar conocimiento, son insuficientes para guiar evaluación sistemática de implementaciones, lo que sugiere la necesidad de desarrollar marcos teóricos más específicos que incorporen las características únicas de contextos rurales de manera más explícita.

Los patrones identificados tienen implicaciones inmediatas para múltiples stakeholders en el ecosistema de telecomunicaciones rurales. Para diseñadores de sistemas, la evidencia sugiere que la selección de arquitecturas híbridas debe basarse en análisis contextual específico más que en capacidades técnicas abstractas. La correlación documentada entre mecanismos de integración y aplicabilidad contextual proporciona orientación específica para decisiones de diseño: contextos que priorizan cobertura extensiva requieren orquestación bajo demanda, mientras que implementaciones enfocadas en eficiencia energética se benefician de handover adaptativo.

Para operadores de telecomunicaciones, los hallazgos sobre estrategias de inteligencia de borde indican que la viabilidad económica de soluciones rurales puede mejorarse significativamente mediante selección apropiada de frameworks de optimización, la evidencia de que estrategias colaborativas pueden distribuir costos de operación mientras mantiene calidad de servicio sugiere modelos de negocio alternativos que podrían hacer económicamente viable la conectividad rural en mercados tradicionalmente considerados no rentables.

Para organizaciones de desarrollo y formuladores de políticas, la comprensión de relaciones entre características arquitectónicas y métricas de efectividad informa estrategias de inversión más fundamentadas, la evidencia de que arquitecturas con mayor redundancia demuestran mayor resiliencia sugiere que políticas de desarrollo rural deben considerar robustez sistémica junto con métricas de eficiencia tradicionalmente priorizadas.

El análisis desarrollado enfrenta limitaciones metodológicas que deben reconocerse para contextualizar apropiadamente las interpretaciones presentadas, la dependencia de literatura publicada introduce sesgos potenciales hacia

implementaciones exitosas, limitando la comprensión de factores que contribuyen a fallas sistémicas, esta limitación es particularmente problemática para investigación en telecomunicaciones rurales porque los factores de fracaso pueden ser tan informativos como los de éxito para desarrollar teorías robustas sobre efectividad sistémica.

La evolución rápida de tecnologías de telecomunicaciones, particularmente en el contexto de transiciones hacia 6G, significa que algunos hallazgos pueden tener aplicabilidad temporal limitada, esta limitación sugiere la necesidad de investigación longitudinal que capture la evolución de arquitecturas híbridas en respuesta a cambios tecnológicos y demográficos rurales. Tal investigación contribuiría al desarrollo de teorías más dinámicas sobre adaptabilidad sistémica que complementen la caracterización estática proporcionada por este estudio.

La variabilidad en metodologías de evaluación utilizadas por diferentes estudios complica comparaciones directas entre enfoques y limita la capacidad de desarrollar conclusiones generalizables, esta limitación indica la necesidad urgente de marcos de evaluación estandarizados específicamente diseñados para contextos rurales que capturen las métricas de rendimiento más relevantes para estos entornos, el desarrollo de tales marcos constituye una prioridad de investigación que podría acelerar significativamente el progreso del campo.

## CONCLUSIONES

Habiendo interpretado los hallazgos dentro del contexto teórico establecido e identificado sus implicaciones para múltiples stakeholders, resulta fundamental sintetizar la comprensión alcanzada y establecer las direcciones específicas que esta caracterización abre para el avance futuro del conocimiento en arquitecturas híbridas rurales, la investigación desarrollada ha logrado una caracterización sistemática de arquitecturas híbridas de redes inalámbricas para telecomunicaciones rurales y una evaluación comprehensiva de estrategias de inteligencia de borde aplicables a estos contextos, cumpliendo con los objetivos específicos establecidos y proporcionando contribuciones significativas a la comprensión de estos sistemas complejos.

La caracterización de componentes tecnológicos, topologías de red y mecanismos de integración reveló que las arquitecturas híbridas efectivas para entornos rurales se organizan en cuatro configuraciones principales: celulares-cell-free que utilizan beamforming conjugado para cobertura uniforme, 5G-LPWAN que implementan slicing de redes virtuales para conectividad IoT ubicua, LiFi-WiFi que emplean handover adaptativo para servicios interiores, y satelital-terrestres que integran MEC para cobertura en áreas desastrosas, cada configuración aporta mecanismos de integración específicamente adaptados a restricciones rurales particulares, confirmando que la hibridación efectiva trasciende la simple combinación de

tecnologías para requerir coordinación inteligente entre componentes heterogéneos.

Las topologías de red identificadas demuestran una evolución desde arquitecturas centralizadas hacia configuraciones distribuidas que aprovechan recursos disponibles localmente. Las implementaciones documentadas por Dai et al. (2024); y Ogbodo et al. (2022) establecen que las topologías más exitosas combinan elementos de infraestructura fija con capacidades dinámicas de adaptación, permitiendo que las arquitecturas respondan a variabilidades específicas de contextos rurales, esta caracterización proporciona una taxonomía fundamental para orientar decisiones de diseño en implementaciones futuras.

La evaluación de estrategias de inteligencia de borde considerando métricas de eficiencia energética, latencia y calidad de servicio estableció que los enfoques más efectivos implementan optimización multidimensional que balancea simultáneamente múltiples objetivos de rendimiento, el framework MEET documentado por Sun et al. (2022) prioriza distribución de costos mediante vehículos conectados; mientras que el enfoque LEE desarrollado por Li et al. (2022) enfatiza optimización algorítmica multiobjetivo. Las estrategias colaborativas propuestas por Zeng et al. (2024) demuestran que el entrenamiento distribuido puede acelerar capacidades de IA en el borde, y los enfoques multiservicio de Aijaz et al. (2023) proporcionan robustez para aplicaciones tiempo-críticas.

Los patrones correlacionales identificados entre estrategias de optimización y métricas de rendimiento establecen que la eficiencia energética, latencia y calidad de servicio exhiben interdependencias complejas que varían según características específicas de implementación, las estrategias que integran consideraciones de sostenibilidad energética con flexibilidad operacional demuestran mayor adaptabilidad a condiciones variables de entornos rurales, según evidencia empírica documentada por múltiples autores en diferentes contextos geográficos.

Las contribuciones teóricas principales incluyen una taxonomía integrada de arquitecturas híbridas rurales que conecta componentes tecnológicos con mecanismos de integración específicos, un framework analítico para evaluar estrategias de inteligencia de borde considerando múltiples dimensiones de rendimiento simultáneamente, y evidencia empírica sobre relaciones entre características arquitectónicas y métricas de efectividad en contextos rurales, esta comprensión avanza el conocimiento teórico sobre diseño de sistemas de telecomunicaciones para entornos con restricciones específicas.

Desde una perspectiva práctica, los hallazgos informan decisiones de múltiples stakeholders tecnológicos. Para diseñadores de sistemas, la caracterización proporciona orientación específica sobre selección de componentes y mecanismos de integración según requisitos de

aplicación, por un lado, para operadores de telecomunicaciones, la evaluación de estrategias de inteligencia de borde facilita decisiones informadas sobre inversión en tecnologías que optimicen retorno económico en mercados rurales y por otro, para organizaciones de desarrollo, la comprensión de relaciones entre arquitecturas y métricas de rendimiento apoya estrategias más efectivas para reducir brechas digitales mediante intervenciones tecnológicas fundamentadas.

Las limitaciones principales del estudio incluyen la dependencia de implementaciones documentadas en literatura académica, que puede introducir sesgos hacia soluciones técnicamente exitosas, la evolución rápida de tecnologías de telecomunicaciones limita la generalización temporal de algunos hallazgos, particularmente en el contexto de transiciones hacia 6G y la variabilidad en metodologías de evaluación utilizadas por diferentes estudios complica comparaciones directas entre enfoques, sugiriendo la necesidad de marcos de evaluación más estandarizados.

La agenda de investigación futura que emerge de esta caracterización incluye direcciones específicas para extender la comprensión del fenómeno. Investigación empírica sobre implementaciones reales de arquitecturas híbridas en contextos rurales diversos proporcionaría validación adicional de los patrones identificados, desde el desarrollo de marcos de optimización que integren explícitamente restricciones rurales específicas podría avanzar las capacidades de estrategias de inteligencia de borde, estudios longitudinales sobre evolución de arquitecturas híbridas en respuesta a cambios tecnológicos y demográficos rurales contribuirían a teorías más robustas sobre adaptabilidad sistémica y finalmente, investigación sobre viabilidad económica de diferentes configuraciones híbridas informaría políticas de desarrollo rural más efectivas.

La síntesis de contribuciones establece que las arquitecturas híbridas de redes inalámbricas con inteligencia de borde representan un paradigma tecnológico maduro para abordar desafíos de conectividad rural, con suficiente diversidad de enfoques validados para informar implementaciones inmediatas mientras proporcionan fundamentos sólidos para investigación futura que continúe avanzando este campo de conocimiento crítico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aijaz, A., Jiang, N., & Khan, A. (2023). Toward multi-service edge-intelligence paradigm: Temporal-adaptive prediction for time-critical control over wireless. *IEEE Internet of Things Magazine*, 6(1), 96–101. <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2200139>
- Besjedica, T., Fertalj, K., Lipovac, V., & Zakarija, I. (2023). Evolution of hybrid LiFi-WiFi networks: A survey. *Sensors*, 23(9), 4252. <https://doi.org/10.3390/s23094252>
- Chaoub, A., Giordani, M., Lall, B., Bhatia, V., Kliks, A., Mendes, L., Rabie, K., Saarnisaari, H., Singhal, A., Zhang, N., Dixit, S., & Zorzi, M. (2022). 6G for bridging the digital divide: Wireless connectivity to remote areas. *IEEE Wireless Communications*, 29(1), 160–168. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2100137>
- Dai, Z., Xu, J., Xu, X., Li, R., & Zeng, Y. (2024). *Performance analysis of hybrid cellular and cell-free MIMO network*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2406.01922>
- Davies, E., Chung, A., Broadbent, M., Macleod, A., & Race, N. (2022). 5G in the wild: Performance of C-band 5G-NR in rural low-power fixed wireless access. *IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*. Montreal, Canada.
- El Falou, A., & Alouini, M.-S. (2023). Enhancement of rural connectivity by recycling TV towers with massive MIMO techniques. *IEEE Communications Magazine*, 61(4), 78–83. <https://doi.org/10.1109/MCOM.003.2200257>
- Fourati, F., Alsamhi, S. H., & Alouini, M.-S. (2022). *Bridging the urban-rural connectivity gap through intelligent space, air, and ground networks*. <http://arxiv.org/abs/2202.12683>
- Johnson, D. L., & Roux, K. (2008). Building rural wireless networks. *Proceedings of the 2008 ACM Workshop on Wireless Networks and Systems for Developing Regions*. San Francisco, USA.
- Kaushik, A., & Al-Raweshidy, H. S. (2022). A hybrid latency- and power-aware approach for beyond fifth-generation Internet-of-Things edge systems. *IEEE Access*, 10, 87974–87989. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3200035>
- Letaief, K. B., Shi, Y., Lu, J., & Lu, J. (2022). Edge artificial intelligence for 6G: Vision, enabling technologies, and applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 40(1), 5–36. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3126076>
- Li, X., Wang, S., Zhu, G., Zhou, Z., Huang, K., & Gong, Y. (2022). Data partition and rate control for learning and energy efficient edge intelligence. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(11), 9127–9142. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3173262>
- Lin, Y., Feng, W., Zhou, T., Wang, Y., Chen, Y., Ge, N., & Wang, C.-X. (2022). *Integrating satellites and mobile edge computing for 6G wide-area edge intelligence: Minimal structures and systematic thinking*. <http://arxiv.org/abs/2208.07528>
- Liu, X., Yu, J., Liu, Y., Gao, Y., Mahmoodi, T., Lambbotharan, S., & Tsang, D. H. K. (2022). *Distributed intelligence in wireless networks*. <http://arxiv.org/abs/2208.00545>



- Marshall, A., Wilson, C. A., & Dale, A. (2023). New pathways to crisis resilience: Solutions for improved digital connectivity and capability in rural Australia. *Media International Australia*, 189(1), 24–42. <https://doi.org/10.1177/1329878X231183292>
- Nguyen, N. T., Vu, Q. D., Lee, K., & Juntti, M. (2022). Hybrid relay-reflecting intelligent surface-assisted wireless communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(6), 6228–6244. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3158686>
- Ogbodo, E. U., Abu-Mahfouz, A. M., & Kurien, A. M. (2022). A survey on 5G and LPWAN-IoT for improved smart cities and remote area applications: From the aspect of architecture and security. *Sensors*, 22(16), 6313. <https://doi.org/10.3390/s22166313>
- Sun, Y., Xie, B., Zhou, S., & Niu, Z. (2022). *MEET: Mobility-enhanced edge intelligence for smart and green 6G networks*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.15111>
- Zeng, L., Ye, S., Chen, X., & Yang, Y. (2024). *Implementation of big AI models for wireless networks with collaborative edge computing*. <http://arxiv.org/abs/2404.17766>
- Zhang, T., Zu, G., Islam, T. U., Gossling, E., Babu, S., Qiao, D., & Zhang, H. (2024). *Exploring wireless channels in rural areas: A comprehensive measurement study*. <http://arxiv.org/abs/2404.17434>

### **Conflictos de interés:**

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

### **Contribución de los autores:**

Iván Alexander Neira-Reyes, Leonardo García-Correa, Elizabeth del Rocío Loor-Quimíz, Diana Carolina Decimavilla-Alarcón, Margarita del Rocio Pillajo Mila: Concepción y diseño del estudio, adquisición de datos, análisis e interpretación, redacción del manuscrito, revisión crítica del contenido, análisis estadístico, supervisión general del estudio.