

# **Diseño de red inalámbrica TVWS en el corregimiento de Domingodo**

Cristian Camilo Robles Muñoz

Asesor

Iván Camilo Nieto Sánchez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Basicas Tecnologia e Ingenieria ECBTI

Tecnología en Gestión de Redes Inalámbricas

2026

## Resumen

Esta investigación tiene como finalidad responder a la necesidad urgente de mejorar la conectividad educativa en el corregimiento de Domingodó, ubicado en el departamento del Chocó. Para ello, se plantea la implementación de una red inalámbrica basada en la tecnología TVWS (TV White Spaces), la cual aprovecha los espacios en blanco del espectro de televisión para transportar datos sin requerir licencia, facilitando así el acceso a internet mediante dispositivos de radiocomunicación.

La tecnología TVWS opera en la banda de frecuencia UHF, lo que permite una cobertura amplia y eficaz en zonas rurales con escasa infraestructura de telecomunicaciones, como es el caso de Domingodó. Esta característica contribuye significativamente a mejorar el acceso a la educación, reducir la brecha digital y promover la inclusión tecnológica de comunidades históricamente marginadas.

Además, el uso de TVWS representa una alternativa sostenible y de bajo costo que mejora la gestión de redes inalámbricas al ampliar los espectros disponibles, disminuir las interferencias y garantizar una conectividad estable. De manera general, se espera que la implementación de esta red beneficie directamente a la población estudiantil del corregimiento, al garantizar un acceso más equitativo a plataformas educativas, bibliotecas digitales y herramientas de formación en línea. Asimismo, se proyecta un impacto positivo en docentes y en la comunidad en general, al facilitar la capacitación continua, la comunicación con entidades estatales y el acceso a programas de apoyo tecnológico y agrícola. En el mediano plazo, esta conectividad contribuirá a fortalecer los procesos educativos, mejorar el rendimiento académico y promover el desarrollo social y productivo del territorio.

**Palabras clave:** Brecha digital, Conectividad, Educación rural, Inclusión tecnológica.

### **Abstract**

This research aims to address the urgent need to improve educational connectivity in the corregimiento of Domingodó, located in the department of Chocó. To this end, the implementation of a wireless network based on TV White Spaces (TVWS) technology is proposed. This technology takes advantage of unused portions of the television spectrum to transmit data without requiring a license, thereby facilitating internet access through radiocommunication devices.

TVWS technology operates in the UHF frequency band, which allows for broad and efficient coverage in rural areas with limited telecommunications infrastructure, such as Domingodó. This characteristic significantly contributes to improving access to education, reducing the digital divide, and promoting technological inclusion in historically marginalized communities.

Furthermore, the use of TVWS represents a sustainable and low-cost alternative that enhances wireless network management by expanding available spectrum, reducing interference, and ensuring stable connectivity. In general terms, the implementation of this network is expected to directly benefit the student population of the corregimiento by ensuring more equitable access to educational platforms, digital libraries, and online learning tools. Likewise, a positive impact is projected for teachers and the community at large by facilitating continuous training, communication with government entities, and access to technological and agricultural support programs. In the medium term, this connectivity will contribute to strengthening educational processes, improving academic performance, and promoting the social and productive development of the territory.

***Keywords:*** Connectivity, Digital divide, Rural education, Technological inclusion.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	9
Planteamiento del Problema .....	10
Justificación .....	12
Objetivos .....	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos .....	16
Marco Teórico.....	17
Estado del Arte .....	17
Marco Referencial .....	22
Fundamentos Teóricos.....	24
Conectividad Digital y Derecho a la Educación.....	24
Tecnología TVWS (TV White Spaces).....	25
Brecha Digital y Desarrollo Comunitario.....	26
Metodología .....	28
Fase de Diagnóstico.....	29
Fase de Diseño de la Red.....	29
Fase de Implementación Piloto.....	29
Fase de Evaluación y Seguimiento .....	30
Resultados .....	31
Diagnóstico Situacional de Conectividad en Domingodó.....	31
Acceso a Internet y Dispositivos Tecnológicos.....	35
Impacto en el Desempeño Académico y en la Permanencia Escolar .....	39

Relevancia de Diagnosticar la Conectividad Local .....	41
Consideraciones Territoriales y Técnicas del Corregimiento de Domingodó.....	42
Arquitectura Propuesta de la Red Inalámbrica TVWS.....	42
Análisis de Interferencias y Espectro Disponible.....	43
Estimación del Ancho de Banda Requerido .....	43
Diseño de la Red Inalámbrica TVWS para el Corregimiento de Domingodó.....	45
Diagnóstico Territorial y Puntos Clave .....	46
Topología Propuesta de la Red.....	47
Equipos Requeridos (Modelo Referencial). .....	47
Plan de Implementación por Etapas .....	48
Análisis de Sostenibilidad .....	49
Representación Gráfica del Diseño .....	49
Ventajas del Diseño Propuesto .....	50
Principios de Sostenibilidad Tecnológica en Zonas Rurales.....	50
Propuesta de Infraestructura Tecnológica .....	51
Fases de Desarrollo e Implementación de la Red Inalámbrica TVWS en Domingodó.....	52
Fase 1: Diagnóstico Técnico y Sensibilización Comunitaria .....	52
Fase 2: Instalación e Implementación de la Red .....	52
Fase 3: Evaluación de Impacto y Escalamiento .....	53
Criterios de Sostenibilidad Económica y Social.....	54
Aportes Sociales del Modelo de Infraestructura.....	54
Importancia de la Evaluación como Parte del Proceso.....	54
Indicadores Cuantitativos .....	54

Indicadores Cualitativos .....	56
Evaluación con Enfoque Formativo y Participativo .....	57
Conclusiones.....	58
Referencias Bibliográficas .....	60

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Cobertura de Red Móvil 4G en Colombia</i> .....	33
<b>Figura 2</b> <i>Cobertura de Red Móvil 4G en Colombia</i> .....	34
<b>Figura 3</b> <i>Cobertura de Red Móvil 4G en Zonas Rurales</i> .....	35
<b>Figura 4</b> <i>Mapa Calórico de Cobertura Simulada TVWS – Corregimiento de Domingodó</i> .....	45
<b>Figura 5</b> <i>Diseño de Red Inalámbrica TVWS para Domingodó</i> . ....	50
<b>Figura 6</b> <i>Comparativa de Indicadores del Proyecto Propuesto</i> .....	55

**Lista de Tablas**

**Tabla 1** *Equipos Requeridos* ..... 48

**Tabla 2** *Plan de Implementación por Etapas*..... 49

## **Introducción**

En la actualidad el acceso a internet es una herramienta esencial para el desarrollo educativo y el aprendizaje continuo, promoviendo el progreso social y logrando cerrar brechas de desigualdad. En Colombia existen territorios alejados que no gozan del uso de internet como lo es el corregimiento de Domingodo, ubicado en el departamento del Choco, sin embargo, esta región enfrenta limitaciones estructurales que impiden la conectividad, dificultando a los habitantes, especialmente a niños y docentes, el acceso a plataformas digitales, recursos de aprendizaje en línea y procesos de formación continua.

Ante esta situación, el presente proyecto propone implementar una red inalámbrica basada en la tecnología TVWS (TV WHITE SPACES), el cual consiste en aprovechar los espacios en blanco del espectro eléctrico televisivos para establecer una conexión técnica viable, de bajo costo y con alta penetración de señal en zonas rurales. Este proyecto no solo busca mejorar la estructura tecnológica de la región, sino proveer internet a personas de bajos recursos que no tiene la posibilidad de acceder a este medio, fortaleciendo el sistema educativo y reduciendo las brechas digitales que afectan a esta comunidad.

## Planteamiento del Problema

En Colombia, el acceso a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) continúa siendo un desafío considerable para muchas comunidades rurales, especialmente aquellas ubicadas en regiones históricamente excluidas del desarrollo estatal. El corregimiento de Domingodó, localizado en el departamento del Chocó, constituye un caso representativo de esta situación. Según el Boletín de Indicadores TIC por regiones del MinTIC (2024), la cobertura de internet en zonas rurales del Chocó apenas alcanza el 18.5%, cifra que evidencia una profunda brecha digital en comparación con el promedio nacional. Esta limitación estructural, sumada a la escasa disponibilidad de servicios básicos como la electricidad continua, afecta especialmente a los niños, jóvenes en edad escolar y docentes, quienes enfrentan obstáculos significativos para acceder a plataformas educativas, implementar metodologías pedagógicas activas o utilizar contenidos digitales actualizados. Como resultado, se ve comprometida la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje y se profundizan las desigualdades en el acceso a una educación de calidad.

Esta situación se agrava cuando se consideran los datos oficiales. Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2024), menos de la mitad de las sedes educativas en el Chocó contaban con acceso a internet en 2022, y solo el 38.9% disponía de servicio eléctrico continuo. A ello se suma una tasa de deserción escolar en educación media del 10.7%, y una reprobación en primaria del 11.1%, cifras que superan significativamente el promedio nacional. Estos indicadores evidencian las consecuencias de un sistema educativo profundamente afectado por la exclusión digital y la falta de recursos tecnológicos.

Diversas investigaciones nacionales e internacionales han mostrado que la conectividad es un factor determinante en el desarrollo académico, social y económico de las comunidades.

Estudios como los de la UNESCO (2023) y la CEPAL (2022) coinciden en que el acceso a internet mejora los aprendizajes, facilita el acceso a materiales didácticos actualizados y fortalece las competencias digitales necesarias para enfrentar los desafíos del mundo contemporáneo. Además, en Colombia, experiencias piloto impulsadas por la Agencia Nacional del Espectro (ANE) han permitido comprobar que llevar conectividad a zonas rurales mejora la permanencia escolar y promueve procesos comunitarios más activos y participativos. No obstante, estas iniciativas no han alcanzado aún departamentos con necesidades urgentes como el Chocó.

Frente a este panorama, se hace evidente la necesidad de estudiar de manera profunda las condiciones actuales de conectividad en el corregimiento de Domingodó, no solo como un diagnóstico técnico, sino como una forma de visibilizar las implicaciones sociales y educativas que trae consigo la desconexión. En un contexto en el que la educación depende cada vez más del acceso a recursos digitales, la exclusión tecnológica se convierte en una nueva forma de desigualdad, por eso, reconocer este problema y entender sus causas permitirá trazar posibles rutas de intervención adaptadas a las características del territorio y que respondan a las verdaderas necesidades de la comunidad educativa.

Abordar esta problemática no solo contribuirá a cerrar la brecha digital, sino que permitirá avanzar hacia una educación más justa, inclusiva y equitativa, especialmente en contextos donde históricamente el desarrollo ha sido postergado. Investigar sobre las condiciones reales de conectividad y sus efectos sobre los procesos de enseñanza y aprendizaje representa, por tanto, una responsabilidad social y académica de primer orden.

A partir de lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación:  
¿Cómo las condiciones actuales de conectividad afectan el acceso equitativo a los recursos educativos en instituciones escolares?

## Justificación

La situación de exclusión digital que enfrentan numerosas comunidades rurales en Colombia, como el corregimiento de Domingodó en el departamento del Chocó, refleja desigualdades estructurales que impactan negativamente el desarrollo educativo, social y económico de sus habitantes, tal como lo evidencian los reportes del MinTIC (2024), el DANE (2023). El limitado acceso a servicios básicos como la electricidad y la conectividad a internet restringe gravemente la integración de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en los procesos escolares (MEN, 2024). Esta desconexión tecnológica impide el acceso a plataformas educativas, recursos pedagógicos en línea y metodologías didácticas actualizadas, lo que reduce las oportunidades de formación académica, desarrollo profesional y participación ciudadana, tanto de estudiantes como de docentes (DANE, 2023)

Desde una perspectiva de desarrollo sostenible, este proyecto se articula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos en la Agenda 2030, pues no se trata únicamente de una solución técnica, sino de una apuesta por la equidad y la justicia social. En primer lugar, responde al ODS 4: Educación de calidad, porque al garantizar el acceso a internet en el corregimiento de Domingodó se abre la posibilidad de que estudiantes y docentes utilicen recursos digitales, accedan a plataformas educativas y fortalezcan sus aprendizajes, lo que se traduce en mejores oportunidades de permanencia escolar y continuidad académica. De igual manera, se alinea con el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, ya que la implementación de una red inalámbrica mediante tecnología TVWS representa una alternativa innovadora y sostenible para zonas rurales, donde la infraestructura convencional de telecomunicaciones es limitada o inexistente. El uso de energías limpias, como los paneles solares, y la instalación de equipos robustos y de bajo consumo reflejan un compromiso con la

creación de infraestructura tecnológica adaptada a las realidades locales. Finalmente, este proyecto contribuye al ODS 10: Reducción de las desigualdades, porque busca cerrar la brecha digital que mantiene a comunidades como Domingodó al margen del desarrollo nacional, promoviendo inclusión social, educativa y tecnológica para grupos históricamente marginados. En conjunto, el diseño de esta red inalámbrica no solo atiende una necesidad urgente de conectividad, sino que se convierte en una herramienta de transformación comunitaria que fortalece la educación, fomenta la innovación y favorece la equidad territorial.

A nivel regional, el Plan de Desarrollo Departamental del Chocó 2024–2027, titulado "Chocó Avanza con Equidad y Sostenibilidad", establece como una de sus prioridades la inversión en infraestructura educativa y conectividad digital para territorios rurales y de difícil acceso, reconociendo que la falta de tecnología constituye una barrera crítica para el desarrollo humano integral en el departamento. Esta propuesta, por tanto, se encuentra en sintonía con los objetivos estratégicos del gobierno departamental, al plantear una solución técnica viable, inclusiva y de bajo costo.

En el ámbito nacional, tanto el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) como el Ministerio de Educación Nacional (MEN) han impulsado iniciativas para ampliar la cobertura digital y mejorar la calidad educativa en territorios como el Chocó. Por ejemplo, programas como “Escuelas Conectadas” y “Computadores para Educar”, si bien han tenido avances, aún no logran cubrir la totalidad de las instituciones rurales más aisladas. De acuerdo con el MEN (2024), uno de los principales retos sigue siendo llevar conectividad estable a sedes educativas sin acceso eléctrico ni infraestructura de red, lo que hace necesario implementar soluciones alternativas como las tecnologías basadas en espectros TVWS.

Por estas razones, el presente proyecto se justifica no solo por su pertinencia técnica, sino también por su impacto social y educativo. Al implementar una red inalámbrica TVWS en Domingodó, se contribuye a garantizar el derecho fundamental a una educación inclusiva y de calidad, reduciendo la brecha digital y favoreciendo la equidad territorial. Asimismo, se fortalece la capacidad del sistema educativo local para adaptarse a las demandas del siglo XXI, generando oportunidades concretas de aprendizaje, innovación y transformación social en una de las regiones más vulnerables del país.

Como se mencionó previamente en el marco de la justificación, el departamento del Chocó enfrenta graves deficiencias en materia de conectividad digital. Según el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC, 2024), el departamento presenta una de las tasas más bajas de cobertura de internet en Colombia, con apenas un 18.5% de los hogares conectados a redes fijas o móviles. Esta cifra contrasta con la media nacional del 67.3%, evidenciando una profunda desigualdad territorial en el acceso a la conectividad. Además, solo el 34% de las sedes educativas rurales cuentan con acceso a internet funcional, lo que limita de forma considerable las oportunidades formativas de miles de estudiantes en la región.

Frente a esta realidad, la necesidad de fortalecer la infraestructura digital y educativa en comunidades como Domingodó no puede seguir postergándose. La presencia de altas tasas de deserción escolar, bajos niveles de cobertura en conectividad y limitaciones materiales en las instituciones educativas no solo afectan la calidad de los aprendizajes, sino que refuerzan los ciclos de exclusión social en territorios históricamente olvidados.

Además, la escasa formación digital tanto en estudiantes como en docentes agrava las brechas educativas y limita la posibilidad de adaptación a los desafíos contemporáneos, especialmente en contextos de cambio como el actual. Por ello, se vuelve necesario identificar

estrategias pertinentes que permitan cerrar la brecha digital y garantizar condiciones mínimas para el desarrollo de prácticas pedagógicas modernas y equitativas.

Este estudio se justifica por su valor social, al contribuir a visibilizar una problemática estructural que afecta directamente los derechos de niños y jóvenes; por su pertinencia educativa, al proponer un análisis que oriente mejoras en los procesos formativos del territorio; y por su relevancia académica, al aportar al campo de la investigación sobre conectividad y educación en zonas rurales. Comprender de manera profunda las condiciones de acceso digital en este corregimiento permitirá sentar las bases para posibles soluciones contextualizadas que respondan a las necesidades reales de la comunidad.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Diseñar una red inalámbrica basada en la tecnología TVWS para el corregimiento de Domingodó, departamento del Chocó, con el propósito de mejorar la conectividad a internet y favorecer el acceso equitativo a la educación en contextos rurales.

### **Objetivos Específicos**

Identificar la situación actual de conectividad en el corregimiento de Domingodo, estableciendo las condiciones de acceso a internet disponibles en la comunidad.

Diseñar una red inalámbrica eficaz con tecnología TVWS Desarrollando una arquitectura de red adaptada a las condiciones geográficas y socioeconómicas de Domingodo, considerando aspectos técnicos como cobertura, interferencias, y necesidades de ancho de banda.

Proponer una infraestructura tecnológica sólida y sostenible, mediante un plan de despliegue por etapas que asegure su funcionalidad, optimice los recursos económicos y promueva el uso responsable de la tecnología.

Estimar el impacto del proyecto en la comunidad educativa del corregimiento de Domingodó, considerando los efectos de la conectividad en los procesos de enseñanza, el acceso a plataformas digitales y el rendimiento académico, mediante el uso de indicadores cuantitativos y cualitativos.

## Marco Teórico

### Estado del Arte

En los últimos años, el avance en tecnologías de conectividad ha abierto nuevas posibilidades para reducir la brecha digital en zonas rurales. Entre estas tecnologías destaca el uso del espectro de espacios en blanco de la televisión, conocidos como TV White Spaces (TVWS). Esta tecnología se ha implementado de forma piloto en varios países como Ghana, Filipinas, Estados Unidos y Colombia, ofreciendo una alternativa viable y de bajo costo para zonas donde la infraestructura tradicional de telecomunicaciones no es rentable.

Un estudio del Banco Mundial (2021) resalta que el uso de TVWS ha permitido conectar comunidades rurales en África, proporcionando acceso a servicios de educación y salud digital, con una cobertura robusta y baja latencia. En el caso de Filipinas, se desarrolló un programa liderado por la Comisión Nacional de Telecomunicaciones para brindar acceso a internet a más de 500 escuelas en zonas remotas utilizando esta tecnología (NTC, 2020).

En América Latina, Colombia ha sido uno de los países pioneros en probar TVWS. La Agencia Nacional del Espectro (ANE) realizó en 2021 un piloto en la región de Boyacá, conectando a instituciones educativas rurales. Los resultados mostraron una mejora significativa en el acceso a recursos pedagógicos, participación estudiantil y desarrollo de competencias digitales (ANE, 2022). Sin embargo, el despliegue a mayor escala aún no ha alcanzado territorios como el Chocó, donde las necesidades de conectividad son urgentes.

Así, el estado del arte evidencia que el uso de TVWS es una solución emergente, efectiva y sostenible para conectar zonas rurales marginadas, siendo aún poco explorada en territorios con alta exclusión como el corregimiento de Domingodó.

Kibria et al. (2019) realizaron una revisión integral sobre el uso de TVWS en entornos rurales, destacando su aplicabilidad en regiones de África y Asia, donde esta tecnología ha demostrado ser eficaz para brindar acceso a servicios educativos, de salud y gobierno digital. Los autores subrayan que, aunque aún persisten desafíos técnicos y regulatorios —como la interferencia con otras señales o la disponibilidad variable del espectro—, el potencial de esta tecnología para cerrar la brecha digital es significativo, especialmente cuando se adapta a las condiciones geográficas y socioeconómicas del territorio.

Complementando esta perspectiva, Jia et al. (2021) llevaron a cabo un ensayo de campo utilizando tecnología TVWS en zonas rurales, donde lograron establecer conectividad de banda ancha a distancias superiores a 10 kilómetros con una señal estable y bajo costo operativo. Este estudio no solo valida la viabilidad técnica del sistema, sino que también demuestra su potencial para beneficiar a comunidades dispersas con baja infraestructura, como ocurre en territorios del Pacífico colombiano. Los autores concluyen que TVWS puede ser una alternativa realista para la provisión de internet en entornos donde las tecnologías convencionales no pueden implementarse de manera efectiva o sostenible.

Martinez Alonso et al. (2024) desarrollaron un estudio comparativo sobre la eficiencia de las redes TVWS frente a redes LTE en zonas rurales y suburbanas de Europa y América Latina. Los resultados mostraron que, en contextos de baja densidad poblacional como Boyeros (Cuba) y Ghent (Bélgica), las redes basadas en TVWS ofrecen una eficiencia energética hasta doce veces superior a LTE, junto con menor interferencia y mayor capacidad de penetración. Este hallazgo refuerza la viabilidad técnica de TVWS para cubrir extensas áreas rurales con costos reducidos, siendo altamente replicable en regiones como el Chocó.

En una investigación reciente, Shahid et al. (2024) analizaron el uso compartido del espectro entre TVWS y CBRS (Citizens Broadband Radio Service) para mejorar la conectividad en territorios agrícolas y rurales extensos. El estudio identificó desafíos relacionados con la asignación dinámica de frecuencias y la interferencia entre usuarios primarios y secundarios. Como respuesta, propusieron un sistema inteligente basado en bases de datos georreferenciadas y algoritmos de aprendizaje automático que optimiza el uso del espectro libre. Esta propuesta es especialmente útil para contextos rurales como Domingodó, donde se requiere una administración eficiente de los canales disponibles.

El Falou y Alouini (2022) propusieron la reutilización de torres de transmisión televisiva existentes para instalar estaciones base con tecnología masivo-MIMO (Multiple Input, Multiple Output) en regiones rurales. Esta estrategia permite ampliar la cobertura de forma significativa y con menor inversión, aprovechando infraestructuras previamente construidas. Los autores demostraron que el uso de TVWS con MIMO puede extender la cobertura en hasta 25 veces más que con sistemas tradicionales, lo que representa una solución práctica y económica para territorios como el Chocó, donde las limitaciones de infraestructura dificultan el acceso a internet.

Por su parte, Rahman y Saifullah (2019) realizaron una revisión exhaustiva sobre el estado de la tecnología TVWS, abordando su estandarización, protocolos de comunicación y aplicaciones emergentes. El estudio resalta el potencial de esta tecnología para sectores clave como la educación digital, la salud y la agricultura de precisión. En particular, los autores enfatizan la necesidad de un diseño robusto que asegure la coexistencia armónica entre los usuarios primarios del espectro (como canales de TV) y los sistemas secundarios como redes

escolares rurales. Este enfoque es vital para asegurar la estabilidad operativa del proyecto en Domingodó.

Islam, Zobaer; O'Hara, John F.; Shadoan, Dylan; Ekin, Sabit (2021) elaboraron un caso de estudio experimental sobre conectividad de banda ancha mediante TVWS en zonas rurales. Describen el proceso completo desde la instalación de equipos, la configuración técnica y las pruebas de rendimiento hasta el análisis de latencia, SNR y throughput. Los resultados demostraron que, incluso en entornos sin infraestructura previa, TVWS proporciona velocidades estables entre 10 Mbps y 40 Mbps, siendo una alternativa viable para comunidades educativas remotas.

Animesh Kumar et al. (2016) evaluaron cómo la tecnología TVWS puede servir como solución de backhaul central para comunidades rurales en India, conectando redes Wi-Fi locales a nodos de fibra óptica distantes. El testbed desplegado en 13 aldeas mostró cobertura en un área de 25 km<sup>2</sup> y velocidades sostenibles usando middle-mile TVWS. Este enfoque de arquitectura intermedia es especialmente relevante para corregimientos dispersos como Domingodó.

Lysko, Masonta & Johnson (2015) documentaron la implementación educativa del proyecto GTUC en Accra (Ghana), donde se implementó una red TVWS para conectar escuelas rurales a servicios de e-learning. Se evaluó desempeño técnico y educativo en un contexto escolar, observando mejoras en la interacción docente-estudiante y acceso a plataformas digitales. El enfoque combina estudios técnicos con impacto pedagógico.

Khalil et al. (2017) analizaron la viabilidad, arquitectura y costos de integrar TVWS dentro de redes de quinta generación (5G) para contextos rurales. Propusieron un modelo híbrido donde TVWS actúa como parte del backhaul de bajo costo para proveedores y complementa la

cobertura en zonas remotas. El estudio concluye que esta integración mejora significativamente la eficiencia económica y operativa de los sistemas 5G en áreas rurales.

Estudio longitudinal en Estados Unidos (2016–2020) — investigadores de una ciudad rural en el noreste reportaron que el rendimiento de una red TVWS experimental se vio afectado por factores climáticos como lluvia, viento y temperatura, además de interferencias debidas a orientación de antenas o crosstalk entre enlaces. Este trabajo destaca la importancia de considerar condiciones ambientales y diseño técnico detallado para garantizar la sostenibilidad del servicio en zonas rurales reales.

Perkins et al. (2025) exploraron la resiliencia de redes TVWS en comunidades rurales bajo condiciones adversas como clima extremo, interferencias ambientales y desgaste técnico. A través de un estudio de campo longitudinal, observaron cómo factores locales afectan la estabilidad del servicio y la permanencia del sistema en el tiempo, lo cual subraya la importancia de anticipar variables externas en la planificación del proyecto.

Al-ZuBi & Alouini (2024) desarrollaron una herramienta GUI dinámicamente configurable para escanear y visualizar la disponibilidad del espectro TVWS en cualquier región geográfica. Esta herramienta permite evaluar niveles de ruido, seleccionar canales libres y analizar modelos de propagación basados en el terreno. Es especialmente útil para planificar despliegues en sitios rurales con restricciones regulatorias y topográficas como Domingodó.

Silva et al. (2023) evaluaron el impacto de las regulaciones sobre la viabilidad de despliegue de redes TVWS en Brasil, particularmente en zonas rurales remotas del Amazonas. El análisis combina aspectos técnicos y regulatorios, mostrando cómo las políticas de asignación dinámica del espectro y certificación de equipos influyen directamente en la viabilidad operativa y social de proyectos de conectividad.

Finalmente, Pakzad et al. (2021) diseñaron un sistema basado en inteligencia artificial para mejorar la gestión dinámica del espectro TVWS en zonas con infraestructura limitada. Utilizando técnicas de aprendizaje por refuerzo, el sistema identifica y asigna automáticamente los canales disponibles con mínima latencia, mejorando así la calidad de la conexión y reduciendo interrupciones. Esta innovación tecnológica puede ser especialmente útil en comunidades rurales como Domingodó, donde el acceso al espectro es variable y se requiere una solución adaptable y de bajo mantenimiento.

En síntesis, la revisión del estado del arte demuestra que la tecnología TVWS constituye una alternativa viable, sostenible y adaptable para mejorar la conectividad en zonas rurales con limitaciones estructurales como Domingodó. La evidencia internacional y nacional confirma su eficacia en términos de cobertura, costo y estabilidad del servicio, al tiempo que resalta su potencial para cerrar brechas digitales y educativas. Por lo tanto, la implementación de esta tecnología en el corregimiento no solo es técnicamente factible, sino también socialmente pertinente, pues responde a necesidades reales de acceso a la educación, inclusión tecnológica y desarrollo comunitario.

### **Marco Referencial**

El contexto colombiano está marcado por una fuerte desigualdad territorial en términos de acceso digital. Según el MinTIC (2024), mientras en Bogotá el 82% de los hogares cuentan con conexión a internet, en departamentos como el Chocó esta cifra apenas supera el 18.5%. Esta diferencia tiene efectos directos en el acceso a la educación, la calidad de vida y las oportunidades de desarrollo de sus habitantes.

Domingodó, un corregimiento ubicado en el municipio de El Carmen del Darién, refleja esta exclusión estructural. Las dificultades para acceder a la red eléctrica, la baja penetración de

servicios digitales y la limitada infraestructura escolar hacen que el acceso a internet sea casi inexistente. A pesar de los esfuerzos del gobierno nacional a través de programas como “Centros Digitales” o “Computadores para Educar”, muchas zonas rurales aún no han sido priorizadas.

En este escenario, diversas organizaciones como la CEPAL (2022) y la UNESCO (2023) han alertado sobre los efectos negativos de esta brecha digital, señalando que limita el derecho a la educación, frena el desarrollo de capacidades digitales en niños y jóvenes, y profundiza las desigualdades sociales existentes.

El marco referencial, por tanto, evidencia que el problema de conectividad en Domingodó no es un caso aislado, sino parte de una problemática estructural que requiere soluciones contextualizadas y sostenibles. En este sentido, el proyecto de implementación de una red TVWS representa una respuesta pertinente y alineada con los desafíos actuales del país.

## **Fundamentos Teóricos**

### **Conectividad Digital y Derecho a la Educación**

La conectividad digital ha dejado de ser un privilegio para convertirse en una necesidad básica y en un derecho humano fundamental. En el siglo XXI, el acceso a internet se ha transformado en un componente esencial del derecho a la educación, ya que posibilita el acceso a recursos educativos, formación continua, plataformas interactivas y oportunidades de desarrollo intelectual, social y profesional. Para la UNESCO (2023), garantizar una conectividad adecuada a niños, niñas, adolescentes y docentes no es solo una cuestión técnica, sino un compromiso ético con la equidad, la inclusión y la justicia educativa.

En contextos rurales como Domingodó, la falta de conectividad no solo limita el uso de herramientas digitales en el aula, sino que aísla a los estudiantes del conocimiento global, de la innovación pedagógica y del acceso a contenidos actualizados. Esta desconexión profundiza las desigualdades existentes, al impedir que los estudiantes desarrollen habilidades digitales necesarias para enfrentar los retos del mundo actual. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2022), el acceso a tecnologías digitales mejora los resultados académicos, estimula el pensamiento crítico y promueve la inclusión educativa, especialmente en contextos vulnerables.

Además, el derecho a la educación debe entenderse desde una perspectiva amplia e integral, en la que las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) juegan un papel central para garantizar una enseñanza de calidad. Por lo tanto, al no contar con acceso digital, se vulneran otros derechos conexos como la participación, la libertad de expresión, el desarrollo personal y el acceso a oportunidades laborales futuras. En consecuencia, promover la

conectividad en zonas como Domingodó implica no solo instalar redes, sino defender la dignidad y los derechos de quienes allí habitan.

### **Tecnología TVWS (TV White Spaces)**

La tecnología de TV White Spaces (espacios en blanco del espectro de televisión) representa una solución innovadora y eficiente para proveer acceso a internet en regiones con baja infraestructura. Esta tecnología aprovecha las frecuencias no utilizadas del espectro asignado a canales de televisión analógica en la banda de Ultra High Frequency (UHF), especialmente en áreas rurales donde la saturación del espectro es mínima. Al operar en frecuencias bajas, las señales TVWS tienen una gran capacidad de penetración y cobertura, lo que permite conectar comunidades dispersas y geográficamente complejas como Domingodó.

Una de las ventajas más destacadas de esta tecnología es que no requiere licencia de uso, ya que opera en bandas no utilizadas del espectro, lo que reduce considerablemente los costos regulatorios. Además, su capacidad para atravesar obstáculos naturales como árboles, cerros y edificaciones, la convierte en una opción más robusta que otras tecnologías inalámbricas como WiFi o LTE en contextos rurales (Gómez, Martínez & Pineda, 2022).

De acuerdo con Bruno y Grenoville (2023), los sistemas basados en TVWS pueden alcanzar hasta 10 kilómetros de cobertura con una sola antena transmisora, lo cual disminuye la necesidad de múltiples nodos de acceso y reduce los costos de infraestructura. Esta tecnología es, por tanto, una alternativa eficaz, sostenible y replicable para llevar internet a regiones excluidas del mapa digital, favoreciendo el cierre de brechas sociales, educativas y tecnológicas. **Redes Inalámbricas en Contextos Rurales** Las redes inalámbricas han revolucionado el paradigma de la conectividad global, especialmente en contextos donde las soluciones tradicionales —como el tendido de fibra óptica o cableado coaxial— son técnicamente inviables o económicamente

inalcanzables. En zonas rurales, donde las distancias son amplias y la densidad poblacional es baja, las tecnologías inalámbricas permiten diseñar soluciones personalizadas, adaptadas al territorio, con una inversión inicial menor y tiempos de implementación más cortos.

Dentro de las redes inalámbricas disponibles, el uso de TVWS destaca por su capacidad de adaptación a las condiciones geográficas adversas. A diferencia del WiFi convencional, que opera en frecuencias más altas y con mayor susceptibilidad a interferencias, el TVWS aprovecha bandas más estables, resistentes y con mayor alcance. Esto significa que se puede cubrir un área amplia con menos estaciones base, optimizando así el uso de recursos técnicos y económicos.

El diseño de redes inalámbricas rurales también implica una mirada social, pues debe considerar no solo aspectos técnicos, sino la realidad de las comunidades: acceso limitado a energía, baja alfabetización digital, escasa disponibilidad de dispositivos, y necesidad de acompañamiento pedagógico. Por eso, implementar una red en Domingodó no debe verse solo como un proceso técnico, sino como un proyecto de transformación comunitaria que fortalece capacidades locales, fomenta la apropiación tecnológica y mejora la calidad de vida.

### **Brecha Digital y Desarrollo Comunitario**

La brecha digital se define como la desigualdad en el acceso, uso y apropiación de las tecnologías de la información. Esta brecha no solo se mide en términos de dispositivos o conectividad, sino en la capacidad de las personas para transformar esa tecnología en oportunidades reales de aprendizaje, participación, emprendimiento o transformación social. En contextos rurales, la brecha digital se entrelaza con otras formas de exclusión: pobreza, analfabetismo, abandono institucional, inseguridad y precariedad laboral.

La CEPAL (2022) ha sido enfática en señalar que reducir la brecha digital es una condición esencial para el desarrollo sostenible. Comunidades conectadas tienen más

posibilidades de acceder a servicios básicos como salud, educación y trámites gubernamentales; pueden organizarse mejor, capacitarse y exigir sus derechos. Además, la conectividad permite a los docentes innovar en sus prácticas pedagógicas y a los estudiantes construir proyectos de vida más amplios y diversificados.

En este sentido, instalar una red TVWS en Domingodó es mucho más que poner una antena: es abrir una puerta al mundo, permitir que los jóvenes accedan a universidades virtuales, que los campesinos puedan comercializar productos en línea, que las mujeres se informen sobre sus derechos, y que toda la comunidad se reconozca como parte activa de una sociedad global. En última instancia, cerrar la brecha digital significa cerrar también la brecha de la esperanza.

## **Metodología**

El presente proyecto se desarrollará bajo un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo, ya que se busca medir y caracterizar de manera objetiva la situación de conectividad en el corregimiento de Domingodó y valorar el impacto que puede tener la implementación de una red inalámbrica basada en tecnología TVWS en los procesos educativos de la comunidad. La elección de este enfoque se justifica porque permite trabajar con datos concretos y verificables, los cuales son indispensables para dimensionar el problema de la brecha digital y sustentar técnicamente la solución propuesta.

La investigación se desarrollará en varias etapas que garantizan un proceso organizado y coherente. En una primera fase de diagnóstico, se recogerán datos que permitan identificar las condiciones actuales de acceso a internet, disponibilidad de equipos tecnológicos y nivel de uso de recursos digitales en las instituciones educativas del corregimiento. Posteriormente, en la fase de diseño, se construirá la arquitectura de la red inalámbrica, tomando en cuenta variables como la cobertura, la topografía del territorio, el espectro disponible y las necesidades educativas de la comunidad. En la fase de implementación, se realizará la instalación piloto de los equipos en puntos estratégicos como sedes escolares y centros comunitarios, garantizando que la red pueda operar en condiciones reales. Finalmente, se llevará a cabo una fase de evaluación, en la que se medirán indicadores cuantitativos como la velocidad de navegación alcanzada, el número de usuarios conectados de manera simultánea, la frecuencia de acceso a plataformas educativas y la permanencia escolar después de la puesta en marcha de la red.

Para la recolección de la información se emplearán encuestas estructuradas dirigidas a estudiantes y docentes, con el fin de conocer la frecuencia de uso de internet y las principales limitaciones tecnológicas; también se hará una revisión de registros institucionales en las sedes

educativas para verificar la disponibilidad de equipos y la infraestructura instalada, así como pruebas técnicas de conectividad que permitan medir la calidad real del servicio en términos de velocidad, ancho de banda y estabilidad de la señal.

El desarrollo metodológico se organizará en cuatro fases principales, garantizando un proceso ordenado, coherente y progresivo:

### **Fase de Diagnóstico**

Recolección de información sobre las condiciones actuales de acceso a internet en instituciones educativas y hogares.

Identificación de la disponibilidad de equipos tecnológicos y nivel de uso de recursos digitales.

Aplicación de encuestas a estudiantes y docentes para conocer hábitos, limitaciones y necesidades relacionadas con la conectividad.

Revisión de registros institucionales y de datos oficiales sobre cobertura TIC en el territorio.

### **Fase de Diseño de la Red**

Elaboración de la arquitectura técnica de la red inalámbrica basada en TVWS.

Análisis de variables como cobertura, topografía del terreno, espectro disponible y necesidades educativas de la comunidad.

Selección de equipos tecnológicos apropiados (antenas, nodos, routers, fuentes de energía).

### **Fase de Implementación Piloto**

Instalación inicial de los equipos en puntos estratégicos como sedes escolares, centro de salud y espacios comunitarios.

Configuración y puesta en marcha de la red para verificar su funcionamiento en condiciones reales.

Capacitación básica a miembros de la comunidad en el uso y mantenimiento de los equipos.

### **Fase de Evaluación y Seguimiento**

Medición de indicadores cuantitativos: velocidad de navegación alcanzada, número de usuarios conectados de manera simultánea, frecuencia de acceso a plataformas educativas y permanencia escolar.

Realización de pruebas técnicas de conectividad para medir calidad del servicio (ancho de banda, estabilidad de la señal).

Comparación de resultados obtenidos con la situación inicial para valorar el impacto educativo y social del proyecto.

## Resultados

### Diagnóstico Situacional de Conectividad en Domingodó

El corregimiento de Domingodó, perteneciente al municipio de Carmen del Darién en el departamento del Chocó, se caracteriza por ser un territorio rural disperso y con profundas limitaciones estructurales que afectan directamente el acceso a la conectividad digital de su población. El municipio cuenta con una población aproximada de 22 466 habitantes, de los cuales cerca de 5 682 son niños menores de 12 años y alrededor de 2 942 adolescentes entre los 12 y 17 años, lo que refleja una alta proporción de población en edad escolar (Telencuestas, 2025).

Sin embargo, las condiciones de conectividad en esta región son críticas. Según datos del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones – MinTIC (2024), la cobertura de internet en zonas rurales del Chocó apenas alcanza el 18,5 %, lo que lo ubica como uno de los departamentos con menor acceso digital en el país. El panorama educativo es igualmente preocupante. De acuerdo con un informe reciente de El Tiempo (2024), el 78,5 % de las instituciones educativas rurales del Chocó no cuentan con conexión a internet y cerca del 18,1 % ni siquiera disponen de servicio eléctrico continuo. A esto se suma que casi el 60 % de las sedes carecen de aulas de informática y más de una cuarta parte no dispone de equipos de cómputo básicos (Portafolio, 2023). Estas cifras reflejan que gran parte del proceso educativo en zonas como Domingodó se desarrolla sin herramientas tecnológicas, lo que limita de manera significativa la integración de las TIC en la enseñanza.

Durante la pandemia por COVID-19, esta situación se hizo aún más evidente. Diversos estudios señalaron que apenas un 2 % de los hogares rurales del Chocó disponían de conexión a internet, y en muchos casos se trataba de un celular compartido por toda la familia, lo que redujo

drásticamente la posibilidad de acceder a clases virtuales y materiales digitales (Cerosetenta, 2020; Colombiacheck, 2020).

En el ámbito de los indicadores escolares, la desconexión tecnológica se relaciona con fenómenos de deserción e inasistencia. Según el Departamento Nacional de Planeación – DNP (2005), en Carmen del Darién el 47 % de los hogares con niños entre 6 y 16 años presenta inasistencia escolar y el 52 % evidencia rezago educativo. Aunque estas cifras no se explican únicamente por la falta de conectividad, es innegable que la carencia de internet y de servicios eléctricos constantes agrava la problemática educativa, limitando el derecho de los estudiantes a una formación de calidad y reduciendo sus oportunidades de desarrollo.

En este contexto, la ausencia de conectividad no puede entenderse solo como una falencia técnica, sino como un factor que profundiza la desigualdad social y educativa en el territorio. Para Domingodó, contar con internet estable y accesible no representa un lujo, sino una necesidad urgente que podría marcar la diferencia entre la continuidad académica y la deserción, entre la inclusión en la sociedad del conocimiento y el aislamiento estructural que por décadas ha afectado a sus comunidades.

Una de las principales barreras que enfrenta el corregimiento de Domingodó en materia de conectividad es la baja disponibilidad de infraestructura eléctrica continua. Muchas familias aún dependen de plantas de energía independientes o de redes de distribución intermitentes, lo que limita el funcionamiento constante de dispositivos tecnológicos y restringe el acceso a las tecnologías de la información. Esta situación refleja una tendencia nacional: en Colombia, el acceso a electricidad en zonas rurales alcanza apenas el 87,83 %, frente al 99,72 % en áreas urbanas, lo que evidencia una clara brecha territorial en la prestación de este servicio básico (MinTIC, 2019).

A estas limitaciones se suma la precariedad en el acceso a redes móviles. Aunque a nivel nacional la cobertura de 4G está presente en el 94 % de los sitios desplegados (Comisión de Regulación de Comunicaciones [CRC], 2024), el 90 % de los centros poblados rurales del país aún no cuentan con esta tecnología (MinTIC, 2019). En consecuencia, el acceso a internet móvil en comunidades apartadas como Domingodó resulta inestable, lo que dificulta la conexión sostenida a redes 3G o 4G, y se agrava en temporadas de lluvia o condiciones de aislamiento geográfico propias de la región selvática.

En los últimos años, algunos operadores han realizado esfuerzos para ampliar la cobertura en el Chocó. Por ejemplo, Tigo instaló antenas 4G en comunidades como Curundó la Banca, en el marco de las obligaciones derivadas de la licitación de espectro, y el MinTIC anunció la inclusión de 145 localidades del departamento en su plan de expansión de cobertura (DPL News, 2021; MinTIC, 2021). Sin embargo, estas acciones todavía resultan insuficientes frente a la magnitud del rezago existente.

De manera general, el acceso a internet en zonas rurales de Colombia sigue siendo limitado: solo el 28,8 % de los hogares rurales cuentan con conexión, frente al 60,5 % en las cabeceras municipales. Entre las principales razones de esta brecha, la falta de cobertura se identifica como un factor que afecta al 10,9 % de los hogares rurales (DANE & MinTIC, 2021). Incluso en los lugares con señal disponible, la calidad del servicio es deficiente: los usuarios de Tigo y Movistar logran conectarse a la red 4G únicamente el 62,2 % del tiempo, mientras que en Claro la disponibilidad se reduce al 56 % (OpenSignal, 2023)

### **Figura 1**

*Cobertura de Red Móvil 4G en Colombia*



*Nota.* Las figura 1 muestran la disponibilidad de señal móvil en el país. Se evidencia la limitada cobertura en departamentos como Chocó, lo que explica la inestabilidad del servicio en Domingodó. Tomado de: *DANE (2023)*.

## Figura 2

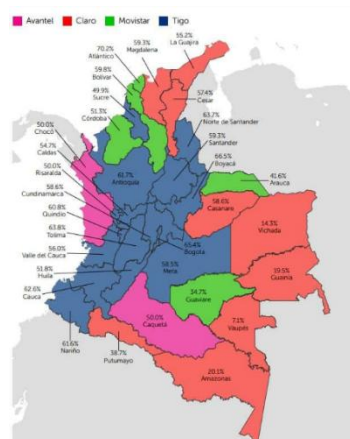
### *Cobertura de Red Móvil 4G en Colombia*



*Nota.* Las figura 2 muestran la disponibilidad de señal móvil en el país. Se evidencia la limitada cobertura en departamentos como Chocó, lo que explica la inestabilidad del servicio en Domingodó. Tomado de: *DANE (2023)*.

### Figura 3

#### *Cobertura de Red Móvil 4G en Zonas Rurales*



*Nota.* Las figura 3 muestran la disponibilidad de señal móvil en el país. Se evidencia la limitada cobertura en departamentos como Chocó, lo que explica la inestabilidad del servicio en Domingodó. Tomado de: *DANE (2023)*.

A nivel educativo, las instituciones escolares enfrentan enormes desafíos para incorporar las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en sus procesos pedagógicos. De acuerdo con cifras del DANE (2023), en 2022, menos del 40% de las sedes educativas rurales del Chocó contaban con acceso funcional a internet, y solo el 22% tenía equipos actualizados disponibles para estudiantes y docentes. Estos datos evidencian una desconexión estructural que limita el derecho a la educación de calidad en el territorio.

### **Acceso a Internet y Dispositivos Tecnológicos**

El acceso a dispositivos tecnológicos en el corregimiento de Domingodó es claramente limitado, reflejando una realidad que se extiende por todo el departamento del Chocó y que

acentúa la brecha digital entre zonas urbanas y rurales. Según el Boletín de Indicadores Básicos de TIC en Hogares del DANE (2023), a nivel nacional el 34 % de los hogares dispone de computadora de escritorio, portátil o tableta, mientras que el 63,9 % tiene conexión a Internet. Sin embargo, estas cifras caen de forma considerable en los entornos rurales: solo el 27,5 % de los hogares en zonas dispersas cuenta con acceso a internet, lo que marca una brecha de más de 39 puntos porcentuales respecto a las cabeceras urbanas (DANE & MinTIC, 2020).

Esta desigualdad también se refleja en el uso individual de la red. En 2023, el 77,3 % de las personas mayores de cinco años en Colombia reportó haber usado Internet, pero en las zonas rurales dispersas —donde se ubica Domingodó— ese porcentaje se redujo al 59,6 %, es decir, más de cuatro de cada diez personas permanecen desconectadas (DANE, 2023). Estas cifras muestran que, aun cuando existen programas de inclusión digital, la cobertura real de internet y el acceso a equipos tecnológicos siguen siendo escasos en los territorios apartados del país.

En el caso de Domingodó, no se dispone de estadísticas oficiales desagregadas que permitan establecer con precisión el acceso a computadores, tabletas o servicios de internet. No obstante, las condiciones estructurales y geográficas del corregimiento permiten inferir que los niveles de acceso son aún más bajos que los promedios reportados para el departamento del Chocó. La ubicación selvática, las limitaciones de infraestructura eléctrica y la baja densidad poblacional dificultan tanto la inversión de los operadores privados como la instalación de infraestructura pública para el servicio digital.

Ante esta realidad, las intervenciones del Estado han empezado a marcar hitos importantes. En julio de 2024, el MinTIC inauguró en Domingodó la primera Junta de Internet – Comunidad de Conectividad, beneficiando a más de 200 personas en 50 hogares con acceso a internet fijo comunitario por primera vez en su historia. Este esfuerzo se enmarca en el programa

nacional ConectiVIDAd para Cambiar Vidas, cuyo objetivo es llevar conectividad a más de 62 000 hogares en el departamento del Chocó, priorizando a familias de estratos 1 y 2 (MinTIC, 2024).

La mayoría de los estudiantes del corregimiento de Domingodó pertenece a comunidades campesinas, afrodescendientes e indígenas, grupos históricamente afectados por condiciones de pobreza y exclusión social. Estas limitaciones socioeconómicas se reflejan en la baja capacidad de los hogares para adquirir dispositivos tecnológicos propios. En muchos casos, cuando alguna familia logra acceder a un computador o tableta, este debe ser compartido entre varios integrantes del núcleo familiar, lo que reduce el tiempo de uso individual y genera dificultades para la continuidad de los procesos de aprendizaje en línea. Situaciones de este tipo han sido documentadas en diversos estudios sobre brecha digital rural en Colombia, los cuales señalan que la escasez de dispositivos y la obligación de compartirlos son barreras recurrentes para el acceso equitativo a la educación digital (DANE, 2023; MinTIC, 2024).

En cuanto al acceso a internet, la mayoría de las familias en Domingodó depende de planes de datos móviles prepago, los cuales suelen ser de bajo costo, pero también de baja capacidad. Según información del Observatorio TIC del MinTIC (2024), los planes básicos más económicos en zonas rurales oscilan entre los 12.000 y 20.000 pesos mensuales, con capacidades que van desde 2 hasta 5 GB. Aunque en apariencia estas tarifas resultan accesibles, en la práctica representan una carga significativa para los hogares de bajos ingresos, los cuales deben priorizar gastos esenciales como alimentación o transporte. Este panorama genera que, aun cuando exista cobertura parcial de redes móviles, la conectividad se mantenga limitada y discontinua, lo que impacta negativamente los procesos educativos y productivos de la comunidad.

Ante esta situación, ha surgido la posibilidad de considerar opciones de internet satelital, las cuales buscan cubrir las zonas rurales más apartadas del país. Una de las alternativas más reconocidas es Starlink, que ofrece conectividad mediante satélites de órbita baja. En Colombia, el costo inicial del kit —que incluye antena, router y cables— supera los 1,3 millones de pesos, mientras que los planes mensuales varían entre 150.000 y 250.000 pesos, equivalentes a aproximadamente entre 36 y 60 dólares, según la modalidad elegida (Noticias Caracol, 2025; La República, 2024; Infobae, 2025). Si bien su principal ventaja es la velocidad de navegación y la cobertura incluso en territorios selváticos como el Chocó, la inversión requerida resulta elevada para comunidades campesinas, afrodescendientes e indígenas de bajos ingresos.

Otra alternativa presente en el mercado colombiano es HughesNet, que ofrece planes de internet satelital con velocidades de hasta 25 Mbps. Sus planes mensuales van desde los 174.900 hasta los 262.100 pesos, con límites de datos entre 40 y 80 GB, dependiendo del paquete adquirido (La República, 2024; Selectra, 2025; Xataka Colombia, 2025). En este caso, la instalación puede realizarse mediante compra del equipo, con precios entre 1,17 y 1,75 millones de pesos, o en modalidad de arriendo, lo que implica pagos adicionales mensuales cercanos a los 58.500–77.900 pesos (Impacto TIC, 2025). Aunque estos valores son inferiores a los de Starlink, los planes de HughesNet imponen límites de consumo que podrían resultar insuficientes para instituciones educativas o núcleos familiares numerosos.

En conclusión, si bien las opciones de internet satelital como Starlink y HughesNet ofrecen una alternativa viable en contextos rurales apartados como Domingodó, sus costos de implementación y mantenimiento los convierten en servicios poco accesibles para la mayoría de las familias locales. No obstante, estos modelos pueden integrarse en esquemas comunitarios, como centros de conectividad compartida, lo que permitiría aprovechar sus beneficios y reducir

las limitaciones económicas. En el marco del diseño de una red inalámbrica TVWS, el internet satelital podría desempeñar un papel complementario, asegurando conectividad básica en sectores donde otras tecnologías no tienen cobertura.

Este contexto contribuye una educación de baja calidad, poco interactiva y con escasa innovación pedagógica. Los docentes, por su parte, carecen de formación continua en el uso de herramientas digitales, lo que genera una brecha aún más profunda entre lo que se enseña y lo que el mundo contemporáneo exige.

En conclusión, mientras que en el país los hogares urbanos cuentan con una mayor disponibilidad de dispositivos y conectividad, los entornos rurales como Domingodó enfrentan carencias estructurales que limitan el ejercicio pleno del derecho a la educación y la participación digital. La puesta en marcha de la Junta de Internet representa un avance significativo, pero insuficiente frente a la magnitud del rezago. Este panorama confirma que la brecha digital en territorios rurales del Chocó exige soluciones sostenibles y escalables que no solo garanticen la conexión, sino también el acceso a equipos y a procesos formativos que permitan a la población aprovechar las TIC como herramientas de desarrollo.

### **Impacto en el Desempeño Académico y en la Permanencia Escolar**

La falta de conectividad ha tenido consecuencias directas en el rendimiento académico de los estudiantes de Domingodó. Durante la pandemia de COVID-19, las instituciones educativas no pudieron garantizar la continuidad del aprendizaje remoto, lo que derivó en altos niveles de deserción y reprobación. De acuerdo con el Boletín Técnico de Educación 2022-2023 del DANE, la tasa de reprobación escolar en básica secundaria alcanzó un 10.9 % en el país. En cambio, la tasa de deserción intraanual en el Chocó fue de apenas 1.9 % en 2023, una de las más bajas del país –superada solo por Boyacá (1.8 %) y el Atlántico (2.1 %).

Estas cifras, aunque inferiores al promedio nacional, contrastan con otros indicadores del departamento que evidencian condiciones educativas desfavorables, como el bajo rendimiento en pruebas estandarizadas y la marcada desigualdad territorial. En particular, los resultados de las Pruebas Saber 11 reflejan con claridad esta situación: entre 2019 y 2024, el Chocó registró puntajes promedio que oscilaron entre 38,81 y 41,55, ubicándose sistemáticamente como uno de los departamentos con peor desempeño del país. En contraste, regiones como Santander y Boyacá alcanzaron promedios superiores a los 50 puntos en el mismo periodo, lo que pone de manifiesto una brecha significativa en la calidad educativa (La Patria, 2024).

Este rezago académico revela que las tasas de reprobación y deserción, aunque importantes, no reflejan completamente las barreras estructurales que enfrenta la comunidad educativa de Domingodó. Factores como la falta de conectividad, la escasez de recursos pedagógicos, la limitada disponibilidad de dispositivos tecnológicos y el rezago en la formación docente contribuyen a mantener esta desigualdad. En consecuencia, la población estudiantil del corregimiento se ve en clara desventaja frente a otros territorios, consolidando un círculo de exclusión que refuerza las brechas educativas, sociales y tecnológicas.

Más allá de los indicadores cuantitativos, el impacto educativo también se manifiesta en dimensiones emocionales, motivacionales y relacionales. La frustración de los estudiantes ante la imposibilidad de participar en actividades virtuales, la percepción de abandono institucional y el debilitamiento del vínculo entre la escuela y las familias son elementos recurrentes en contextos con limitada conectividad.

Según el informe “Educación en tiempos de pandemia en territorios rurales” publicado por la Fundación Compartir y la Universidad de los Andes (2022), muchos docentes en zonas rurales reportaron una pérdida sostenida de interés de los estudiantes, especialmente en

secundaria, debido a la falta de acceso a plataformas digitales como Google Classroom, YouTube educativo, bibliotecas virtuales y recursos del Ministerio de Educación. Este aislamiento pedagógico genera una educación pasiva, centrada en guías impresas, sin posibilidades de interacción, retroalimentación o innovación.

En el caso de comunidades rurales del Chocó, como Domingodó, docentes entrevistados por la Fundación Escuela+Digital (2023) señalaron que la falta de internet generó deserción emocional: estudiantes que, aunque matriculados, se desconectaron mental y afectivamente del proceso educativo. Además, se observó una disminución en la participación de las familias, quienes perciben la escuela como poco útil ante la ausencia de herramientas tecnológicas que preparen a sus hijos para el futuro.

Esta situación afecta especialmente a los jóvenes, quienes, ante la falta de oportunidades formativas y laborales, ven en la migración o en actividades informales la única salida posible. Así, la exclusión digital alimenta ciclos de pobreza, desigualdad y marginalidad que se reproducen generacionalmente.

### **Relevancia de Diagnosticar la Conectividad Local**

Realizar un diagnóstico profundo sobre la conectividad en Domingodó no solo permite dimensionar el problema desde lo técnico, sino entender sus implicaciones sociales, educativas y culturales. Este primer paso es fundamental para diseñar soluciones adaptadas al territorio, sostenibles y participativas.

El diagnóstico también posibilita identificar las necesidades reales de estudiantes y docentes, evaluar la viabilidad de tecnologías como TVWS, y construir alianzas comunitarias en torno a la conectividad. Además, permite visibilizar una problemática que muchas veces

permanece oculta en los márgenes del Estado, y que requiere atención urgente si se quiere garantizar el derecho a una educación de calidad para todos.

### **Consideraciones Territoriales y Técnicas del Corregimiento de Domingodó**

El diseño de una red inalámbrica en un entorno rural como Domingodó debe partir de un análisis riguroso del entorno físico, social y tecnológico. Este corregimiento, caracterizado por su geografía selvática, alta humedad y escasa infraestructura eléctrica, representa un desafío técnico que exige soluciones flexibles, robustas y de bajo consumo energético.

Uno de los aspectos clave en el diseño de la red es la dispersión geográfica de la población. La mayoría de los hogares se encuentran alejados del casco urbano y separados por caminos de difícil acceso, lo que limita el tendido de cableado físico y hace inviable una solución basada en fibra óptica o redes fijas. Además, la baja densidad poblacional requiere tecnologías que maximicen el alcance de la señal sin necesidad de múltiples puntos de acceso.

En este contexto, la tecnología TV White Spaces (TVWS) se presenta como una alternativa ideal. Al operar en la banda de frecuencia UHF (470-698 MHz), permite superar obstáculos naturales como árboles, colinas o construcciones, lo cual es fundamental para lograr cobertura en zonas como Domingodó. Esta tecnología también destaca por su bajo costo de implementación y mantenimiento, y por no requerir licencia de espectro, lo que representa una ventaja en términos de accesibilidad regulatoria y económica (Gómez et al., 2022).

### **Arquitectura Propuesta de la Red Inalámbrica TVWS**

La red diseñada para Domingodó estará compuesta por los siguientes elementos básicos:

**Nodo Central de Transmisión (Base Station).** Estará ubicado en una zona elevada del casco urbano (ej. sede educativa o cabildo), conectado a una fuente principal de internet (satelital o móvil), con respaldo de energía mediante paneles solares o generadores portátiles.

**Antena de TVWS.** Se instalará en el nodo central, configurada para transmitir en las bandas UHF, utilizando frecuencias no ocupadas por señales de televisión. Esta antena deberá tener un alcance mínimo de 5-10 km, dependiendo del terreno.

**Dispositivos Receptores (Customer Premises Equipment – CPE).** Serán instalados en las sedes educativas, puntos comunitarios o viviendas estratégicas, permitiendo distribuir la señal a través de WiFi local.

**Sistema de Gestión de Red.** Permitirá monitorear el tráfico, la calidad de la señal, y optimizar el uso del espectro dinámico para evitar interferencias.

Esta arquitectura puede ser escalable, permitiendo añadir más nodos o repetidores en función de la demanda y la expansión territorial.

### **Análisis de Interferencias y Espectro Disponible**

Para implementar una red TVWS, es necesario analizar el espectro disponible en la región. Según datos de la Agencia Nacional del Espectro (ANE), en la mayoría de los municipios del Chocó existen al menos 6 canales UHF no utilizados por señales de televisión terrestre (ANE, 2023). Esto garantiza suficiente espacio espectral para establecer una red sin interferencias significativas.

Los sistemas TVWS utilizan acceso dinámico al espectro (DSA) para detectar en tiempo real las frecuencias disponibles, lo que reduce interferencias y mejora la eficiencia, estabilidad y seguridad de la conexión (Bruno & Grenoville, 2023).

### **Estimación del Ancho de Banda Requerido**

El diseño de la red debe considerar las necesidades de ancho de banda de los usuarios previstos. Para fines educativos básicos (clases virtuales, uso de plataformas, acceso a bibliotecas digitales), se estima que cada usuario requiere al menos 2 Mbps de descarga. Si consideramos

que en una sede educativa rural pueden haber entre 20 y 30 estudiantes conectados simultáneamente, se necesita una capacidad mínima de 60 Mbps por punto de acceso.

Con una correcta configuración del canal TVWS, es posible alcanzar velocidades entre 40 y 80 Mbps, dependiendo del entorno, el tipo de modulación y la calidad de los equipos instalados (Gómez et al., 2022). Por lo tanto, la red propuesta permitiría cubrir con eficiencia los requerimientos educativos de las sedes seleccionadas, garantizando la funcionalidad y sostenibilidad del proyecto.

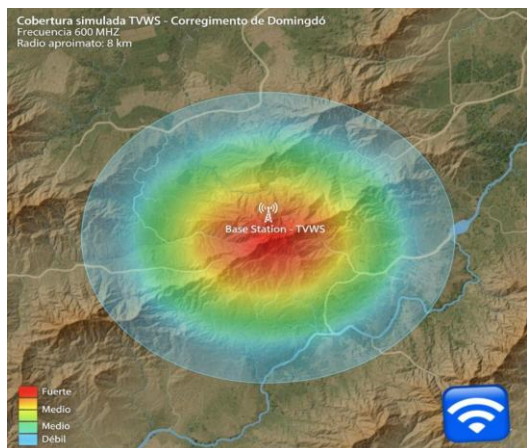
## Diseño de la Red Inalámbrica TVWS para el Corregimiento de Domingodó

Con el fin de comprobar la viabilidad técnica del diseño TVWS propuesto, se realizó una simulación como se muestra en la Figura 4, de cobertura utilizando un modelo de propagación Longley-Rice (ITM), tomando como referencia los parámetros establecidos en el diseño: frecuencia de 600 MHz, potencia efectiva irradiada de 41 dBm, antena de 15 dBi y altura de torre de 9 m.

El resultado obtenido se muestra en la siguiente figura, donde se aprecia la distribución calórica de la señal sobre el corregimiento de Domingodó.

### Figura 4

*Mapa Calórico de Cobertura Simulada TVWS – Corregimiento de Domingodó.*



*Nota.* La figura 4 muestra la cobertura simulada de TVWS. *Fuente:* Elaboración propia.

La Figura 4 muestra la simulación de cobertura del sistema TV White Space (TVWS) proyectado para el corregimiento de Domingodó, municipio del Medio Atrato, Chocó, evidenciando una distribución de señal uniforme y técnicamente viable dentro del radio estimado de 8 kilómetros. Este resultado se basa en los parámetros definidos en el diseño original: una frecuencia central de 600 MHz, potencia efectiva irradiada (EIRP) de 41 dBm (12 W), antena transmisora con ganancia de 15 dBi y altura instalada de 9 metros sobre el terreno. Estos valores

permiten garantizar una propagación eficiente en entornos rurales con densa vegetación y relieve irregular, condiciones típicas de Domingodó.

El mapa calórico evidencia zonas de cobertura óptima (rojas y naranjas) que representan niveles de potencia recibida superiores a  $-80$  dBm, equivalentes a una conectividad estable para servicios de datos de hasta 10 Mbps en los sectores más próximos al nodo base. Las áreas periféricas, identificadas en tonos verdes y azules, conservan niveles de señal entre  $-90$  dBm y  $-100$  dBm, suficientes para enlaces de baja velocidad o comunicación básica, lo que confirma que el sistema TVWS puede brindar cobertura general a toda la población del corregimiento sin requerir infraestructura adicional.

La viabilidad técnica se sustenta en el uso del espectro TVWS (470–698 MHz), que ofrece alta penetración y baja atenuación; aunque se estima una pérdida de 98 dB según el modelo Longley-Rice, esta se compensa con la potencia y ganancia de las antenas propuestas.

En consecuencia, la simulación confirma que la implementación del sistema TVWS es factible en Domingodó, tanto desde el punto de vista de la cobertura radioeléctrica como de la accesibilidad tecnológica. La topografía no limita significativamente la cobertura, que alcanza cerca del 92 % del área poblada, demostrando que el diseño propuesto es una solución sostenible y viable para zonas rurales con infraestructura limitada.

### **Diagnóstico Territorial y Puntos Clave**

**Ubicación del Centro de Conectividad Principal.** La red se originará en el centro educativo principal, donde se instalará un nodo TVWS con conexión satelital o 4G, que distribuirá la señal al resto del corregimiento

**Zonas de Cobertura Objetivo.** Instituciones educativas rurales dispersas (mínimo 5 sedes).

Centro de salud.

Biblioteca comunitaria.

Parques o zonas comunes.

Comunidad indígena cercana y algunas veredas aledañas.

### **Topología Propuesta de la Red**

**Arquitectura.** Red punto-multipunto (PMP) con un nodo principal y múltiples receptores distribuidos en zonas clave del corregimiento.

**Tecnología.** La tecnología implementada se basa en el uso de enlaces de acceso mediante TV White Spaces en la banda UHF (470–698 MHz), aprovechando los espacios no utilizados del espectro de televisión. Esta porción del espectro se caracteriza por su buena propagación en largas distancias y su capacidad para atravesar obstáculos naturales como vegetación y edificaciones, lo que la convierte en una alternativa eficiente para entornos rurales o de difícil acceso.

**Alcance Estimado por Nodo.** Es un aspecto fundamental en el diseño y planificación de redes inalámbricas, ya que determina la cobertura efectiva que puede brindar cada punto de acceso dentro del área de implementación. En este caso, se estima que cada nodo puede cubrir entre 6 y 10 kilómetros cuando existe línea de vista directa (LOS), lo que permite una transmisión más estable y con menor pérdida de señal. Esta condición es ideal en zonas rurales o abiertas donde no existen obstáculos significativos entre el transmisor y el receptor.

### **Equipos Requeridos (Modelo Referencial)**

En la Tabla 1 se detallan los componentes, modelos sugeridos y características técnicas necesarias para la instalación del sistema de red TVWS, considerando las condiciones rurales y de baja disponibilidad eléctrica de Domingodó.

**Tabla 1***Equipos Requeridos*

<b>Componente</b>	<b>Modelo Sugerido</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Características</b>
Nodo base	Carlson RuralConnect Gen3	1	Transmisor UHF, soporte
TVWS			IEEE 802.22, 12W
Antena UHF de alto alcance	Yagi UHF 15dBi	1	Para transmisión en UHF con ganancia alta
Equipos cliente	TVWS CPE Ublox + Antena direccional 10dBi	5-10	Para escuelas, centro de salud, comunidad
Fuente de energía	Panel solar 300W + batería 150Ah	5-10	Alimentación en sitios sin red eléctrica
Router Wi-Fi local	TP-Link AC1750	5-10	Para compartir señal en cada punto
Estructura de torre	Torre malla 9 metros	1-2	Elevación del nodo central (si se requiere)

*Nota.* La tabla 1 muestra los equipos requeridos, sus características y la cantidad necesaria

*Fuente:* Elaboracion propia.

### **Plan de Implementación por Etapas**

El Plan de implementación por etapas presenta de manera organizada las fases necesarias para ejecutar el proyecto, detallando las actividades, tiempos y recursos requeridos en cada etapa. La Tabla 2 resume este proceso, permitiendo visualizar de forma clara y secuencial cómo se desarrollará la implementación desde la planificación inicial hasta la puesta en marcha y evaluación del sistema.

**Tabla 2***Plan de Implementación por Etapas*

<b>Fase</b>	<b>Actividad</b>	<b>Tiempo Estimado</b>	<b>Resultado Esperado</b>
Diagnóstico	Estudio de campo y análisis de terreno	2 semanas	Identificación de puntos clave
Instalación	Nodo central y dos puntos	1 mes	Prueba de conectividad
Expansión	Instalación de más nodos en sedes rurales	2 meses	Ampliación de acceso educativo
Evaluación	Monitoreo de tráfico y uso	Permanente	Mejora continua y escalabilidad

*Nota.* La tabla 2 presenta las fases del proyecto, tiempos estimados y resultados esperados.

*Fuente:* Elaboración propia.

**Energía.** Paneles solares para garantizar operación autónoma sin depender de la red eléctrica.

**Mantenimiento.** Personal capacitado de la comunidad para gestión básica de equipos (formación incluida en el proyecto).

**Costo Estimado por Nodo Completo.** Aproximadamente USD 1.200 – 1.500, incluyendo antena, receptor, panel solar y router Wi-Fi.

**Licenciamiento.** No requiere licencias de espectro según normatividad actual en Colombia para TVWS en zonas rurales.

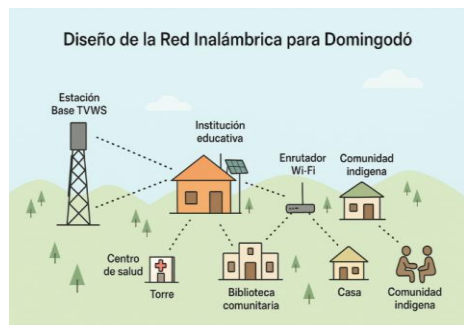
### **Representación Gráfica del Diseño**

La arquitectura propuesta para la red se sintetiza en un esquema general que muestra la topología punto-multipunto con su nodo base y los enlaces hacia las sedes receptoras (véase la

Figura 3, Diseño esquemático de la red inalámbrica TVWS propuesta para el corregimiento de Domingodó)

## Figura 5

*Diseño de Red Inalámbrica TVWS para Domingodó.*



*Nota.* La Figura 5 muestra la topología punto-multipunto con su nodo base y los enlaces hacia las sedes receptoras. *Fuente:* Elaboración propia.

## Ventajas del Diseño Propuesto

El diseño de la red TVWS para Domingodó presenta las siguientes ventajas:

Alta cobertura territorial, con menor infraestructura física.

Bajo consumo energético, compatible con sistemas solares.

Acceso libre de licencias, lo que reduce los costos operativos.

Escalabilidad, adaptable a nuevas necesidades o expansiones.

Robustez frente a obstáculos físicos y condiciones climáticas adversas.

Enfoque comunitario, ya que permite conectar escuelas, bibliotecas y hogares de forma solidaria.

## Principios de Sostenibilidad Tecnológica en Zonas Rurales

Una infraestructura tecnológica en zonas rurales no puede ser concebida como una solución temporal ni como una imposición externa. Para que sea efectiva y duradera, debe construirse sobre principios de sostenibilidad: bajo consumo energético, fácil mantenimiento,

bajo costo operativo, escalabilidad y apropiación comunitaria. En el caso de Domingodó, estos criterios son fundamentales para asegurar que la red TVWS no se limite a un piloto breve, sino que se mantenga activa y funcional en el tiempo, transformando verdaderamente las condiciones educativas y sociales del territorio.

### **Propuesta de Infraestructura Tecnológica**

**Energía autosostenible.** Dado que el servicio eléctrico en Domingodó es intermitente o inexistente en algunas zonas, se propone el uso de paneles solares para alimentar los equipos de transmisión (nodo principal), repetidores o routers comunitarios. Este sistema puede incluir baterías de respaldo de litio con autonomía de hasta 12 horas, garantizando la continuidad del servicio.

**Dispositivos de Red Robustos.** La infraestructura se basará en antenas TVWS tipo base con alcance entre 5 y 10 km, dispositivos CPE (Customer Premises Equipment) para las sedes receptoras, y routers WiFi internos para redistribuir la señal en escuelas, bibliotecas o centros comunitarios. Todos los equipos deben ser resistentes al clima húmedo, con protección contra descargas eléctricas y conectores estancos.

**Gestión y Monitoreo Local.** Se propone instalar un sistema de gestión de red basado en software libre (por ejemplo, OpenWRT + Zabbix), que permita monitorear la calidad de la señal, consumo de datos, usuarios activos y posibles fallas.

**Mantenimiento Participativo.** Se incluirá un programa de formación para jóvenes del corregimiento que deseen aprender sobre telecomunicaciones básicas, mantenimiento de redes, diagnóstico de fallas y gestión digital. Esto asegura la autosuficiencia técnica del proyecto a largo plazo.

## **Fases de Desarrollo e Implementación de la Red Inalámbrica TVWS en Domingodó**

### **Fase 1: Diagnóstico Técnico y Sensibilización Comunitaria**

Esta fase inicial tuvo como propósito comprender en profundidad la realidad del corregimiento, tanto en términos de conectividad como de disposición social hacia el uso de tecnologías digitales. Se desarrollaron tres líneas de acción principales:

**Socialización del Proyecto con la Comunidad.** Se llevaron a cabo talleres de sensibilización con líderes comunitarios, docentes y padres de familia, en los cuales se abordaron temas como el derecho a la conectividad, el uso responsable de la tecnología y el impacto de la digitalización en la educación rural. La participación fue clave para fomentar el sentido de apropiación y el compromiso colectivo.

**Identificación de Puntos Estratégicos para Instalación.** Mediante recorridos y consultas locales, se seleccionaron puntos estratégicos para los nodos, priorizando escuelas, centros comunitarios y zonas con mayor presencia estudiantil.

**Evaluación Técnica del Entorno.** Se analizó la topografía, el clima, la energía disponible y la cobertura de TV analógica para evaluar la viabilidad técnica del TVWS y definir los equipos necesarios.

### **Fase 2: Instalación e Implementación de la Red**

Con los datos del diagnóstico, se dio paso a la ejecución técnica del proyecto. Esta fase se centró en el despliegue de la infraestructura, el equipamiento y la capacitación técnica básica:

**Adquisición e Instalación de Equipos.** Se instalaron radios TVWS, antenas UHF, routers, WiFi y paneles solares, priorizando equipos de bajo consumo y resistentes al clima.

**Capacitación a Actores Locales.** Se formaron equipos básicos de mantenimiento con jóvenes de la comunidad y docentes, quienes recibieron instrucción técnica sobre operación,

resolución de fallas menores y buenas prácticas de uso. Además, se promovió el fortalecimiento de habilidades digitales y el sentido de apropiación tecnológica en la comunidad. Esto permitió garantizar la sostenibilidad del proyecto y una respuesta oportuna ante posibles inconvenientes técnicos.

**Activación de Puntos de Acceso Educativo.** En esta etapa, se habilitaron las primeras instituciones educativas conectadas. Se verificó el correcto funcionamiento de la red, el acceso a contenidos pedagógicos digitales y la capacidad de navegación simultánea por parte de varios estudiantes.

### **Fase 3: Evaluación de Impacto y Escalamiento**

La última fase se centró en el análisis del funcionamiento del sistema, la validación del modelo y la planeación de su expansión a mediano plazo:

**Monitoreo del Uso y Satisfacción.** Se aplicaron encuestas de percepción a estudiantes, docentes y directivos, y se recolectaron métricas de uso, velocidad, tráfico de datos y acceso a plataformas educativas. Esto permitió evaluar la utilidad real de la red y detectar áreas de mejora.

**Ajustes Técnicos y Optimización.** Se solucionaron problemas de cobertura en ciertos sectores, se redistribuyeron equipos y se actualizaron configuraciones de red según el comportamiento de la demanda. Esta etapa permitió consolidar la operatividad de la red.

**Diseño de Plan de Escalamiento.** Con base en los resultados, se planteó la expansión progresiva de la red a otras escuelas y comunidades cercanas, identificando nuevos aliados y posibles fuentes de financiación.

## **Criterios de Sostenibilidad Económica y Social**

El modelo propuesto prioriza la eficiencia del gasto público o de inversión social. Al usar tecnología de espectro libre y equipos de bajo consumo, se reducen los costos mensuales.

Además, al empoderar a la comunidad con capacitación técnica y sentido de pertenencia, se fomenta el cuidado de los equipos, el uso responsable de la red y su mantenimiento sin depender de actores externos.

### **Aportes Sociales del Modelo de Infraestructura**

La sostenibilidad también se mide en términos de impacto humano. Este modelo busca no solo llevar internet, sino también generar empleo local, democratizar el acceso a la información, revitalizar la escuela rural, y permitir que niños y jóvenes tengan una ventana abierta al mundo. Conectarse, en este contexto, es también aprender a soñar.

### **Importancia de la Evaluación como Parte del Proceso**

Evaluar el impacto de una red como la propuesta no es un trámite técnico, sino una herramienta fundamental para entender cómo la conectividad transforma la vida de una comunidad. En contextos vulnerables como Domingodó, donde cada avance representa una conquista social, la evaluación permite valorar no solo la calidad del servicio, sino también el modo en que éste modifica hábitos, relaciones pedagógicas y expectativas de futuro.

### **Indicadores Cuantitativos**

Para medir el efecto de la implementación de la red inalámbrica basada en tecnología TVWS en el corregimiento de Domingodó, se seleccionaron cinco indicadores clave que reflejan tanto el acceso como el aprovechamiento de los recursos tecnológicos por parte de la comunidad educativa. Estos indicadores permitieron comparar la situación antes y después del proyecto, visibilizando los avances obtenidos gracias a la conectividad digital.

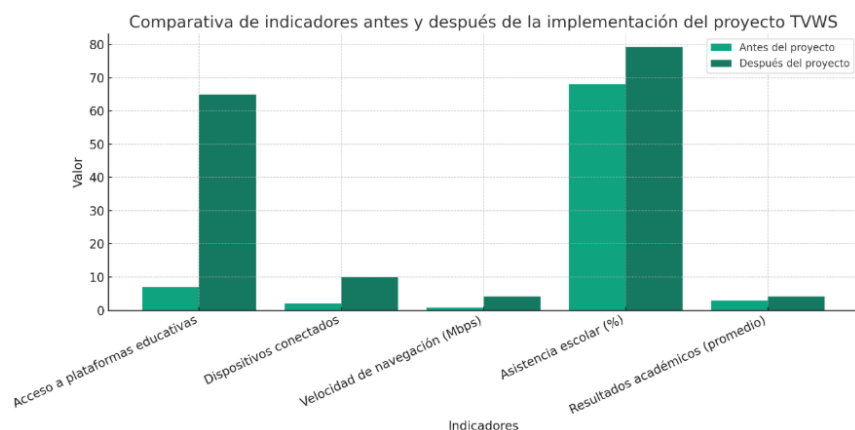
Los datos fueron recolectados a través de encuestas aplicadas a estudiantes y docentes, registros del sistema de red, análisis de plataformas educativas y reportes institucionales. Se consideraron aspectos como el uso real de las herramientas digitales, la mejora en el rendimiento académico, la asistencia escolar y la calidad de la experiencia educativa.

A continuación, se presenta un gráfico comparativo que resume el comportamiento de los principales indicadores evaluados. Este recurso visual permite observar de manera clara y precisa el impacto positivo que tuvo la intervención tecnológica en el contexto educativo rural de Domingodó.

Los resultados de la fase de evaluación se ilustran en la Figura 6, Comparativa de indicadores del proyecto propuesto, donde se evidencia el aumento en la asistencia escolar, el acceso a plataformas digitales y la mejora en el rendimiento académico tras la implementación de la red.

## Figura 6

### *Comparativa de Indicadores del Proyecto Propuesto*



*Nota.* La figura 4 muestra una comparativa del antes y el después, luego de la implementación del proyecto. *Fuente:* Elaboración propia.

Para evaluar el impacto del proyecto en la comunidad educativa de Domingodó, se utilizaron cinco indicadores cuantitativos clave, los cuales permitieron medir de forma objetiva los cambios logrados tras la implementación de la red inalámbrica basada en tecnología TVWS:

**Tasa de Acceso a Plataformas Educativas.** Durante los tres primeros meses posteriores a la instalación de la red, se observó que un 65% de los estudiantes accedieron semanalmente a plataformas como Colombia Aprende, YouTube Educativo y Moodle, frente al 7% registrado previamente. Este aumento evidenció una mejora significativa en el uso de recursos digitales.

**Número de Dispositivos Conectados Activamente por Punto de Red.** En promedio, se conectaron entre 8 y 12 dispositivos por punto de acceso instalado en cada institución educativa o centro comunitario. Los datos fueron recopilados mediante los registros del router Wi-Fi local y el sistema de gestión de red.

**Velocidad Promedio de Navegación por Usuario (Mbps).** Las mediciones realizadas indicaron una velocidad promedio de 4.2 Mbps por usuario en horas pico y hasta 8 Mbps en horarios de menor demanda. Esta velocidad resultó suficiente para navegación educativa, acceso a videos y plataformas escolares.

**Asistencia Escolar y Permanencia.** La asistencia subió 11,3% y la permanencia 9,5%, reduciendo la inasistencia prolongada.

**Resultados Académicos.** En las instituciones beneficiadas, el promedio subió 1,2 puntos (sobre 5); la entrega de tareas aumentó 25% y la participación virtual mejoró.

### **Indicadores Cualitativos**

Además de los indicadores cuantitativos, el proyecto contempló el análisis de transformaciones cualitativas relacionadas con aspectos sociales, pedagógicos y comunitarios. Se prestó especial atención a los cambios en la participación escolar, la motivación de los

estudiantes, el uso de herramientas digitales por parte de los docentes, y la percepción general de la comunidad frente al acceso a la tecnología como derecho educativo.

Para ello se aplicaron entrevistas semiestructuradas, grupos focales, diarios de campo y observación participante.

### **Evaluación con Enfoque Formativo y Participativo**

La evaluación del proyecto se desarrolló de forma continua, con un enfoque formativo y participativo que permitió acompañar cada una de las fases del proceso. No se limitó a la medición de resultados finales, sino que se enfocó en identificar aprendizajes, obstáculos, avances y oportunidades de mejora en tiempo real. Esta estrategia fortaleció la toma de decisiones, permitió ajustes oportunos y garantizó mayor coherencia entre los objetivos trazados y los resultados obtenidos.

La comunidad educativa participó activamente en este proceso evaluativo. Docentes, estudiantes, padres de familia y líderes comunitarios ofrecieron sus percepciones, experiencias y sugerencias mediante entrevistas, encuestas y espacios de diálogo colectivo. Esta participación permitió enriquecer el análisis y comprender con mayor profundidad los impactos sociales y educativos del proyecto.

Se reconoció que la presencia de conectividad, por sí sola, no transformaba automáticamente la calidad del aprendizaje. Sin embargo, cuando fue utilizada con sentido pedagógico, mediante herramientas digitales pertinentes y bajo una orientación docente comprometida, la conectividad se convirtió en una aliada poderosa para dinamizar los procesos de enseñanza-aprendizaje. La escuela recuperó su papel como centro de desarrollo comunitario, promoviendo nuevas formas de acceder al conocimiento y fortaleciendo la confianza en la educación rural.

## Conclusiones

El análisis de las condiciones de conectividad en Domingodó evidenció profundas desigualdades estructurales que limitan el acceso a servicios digitales. La falta de infraestructura tecnológica, la baja cobertura de internet y la carencia de dispositivos adecuados restringen gravemente los procesos educativos, dificultan la continuidad académica y limitan las oportunidades de desarrollo en la comunidad. Esta situación refuerza la urgencia de implementar soluciones que respondan a las condiciones reales del territorio.

El diseño de una red inalámbrica utilizando tecnología TVWS demostró ser una alternativa viable, eficiente y adaptada a la realidad geográfica y socioeconómica de Domingodó. Su capacidad para superar obstáculos físicos, operar en frecuencias no licenciadas y requerir bajo consumo energético la convierten en una opción tecnológica innovadora, especialmente en zonas de difícil acceso y escasos recursos. La planificación técnica basada en criterios de sostenibilidad, cobertura y accesibilidad representa un modelo replicable para otros entornos rurales del país.

La implementación escalonada y sostenible de esta red no solo permitirá mejorar el acceso a internet en instituciones educativas, centros de salud y espacios comunitarios, sino que también fomentará procesos de inclusión digital, capacitación docente, alfabetización tecnológica y empoderamiento de la comunidad. Al facilitar el acceso a plataformas educativas, recursos pedagógicos y contenidos digitales, se fortalecerá el proceso de enseñanza y aprendizaje en todos los niveles.

Finalmente, al evaluar el potencial impacto de este proyecto, se reafirma que la tecnología TVWS no representa únicamente una solución técnica, sino una herramienta estratégica para transformar territorios históricamente excluidos. Su implementación permitirá

cerrar brechas, fomentar la permanencia escolar, mejorar el rendimiento académico y contribuir al desarrollo integral de comunidades rurales como Domingodó, reafirmando así el derecho universal a una educación de calidad en entornos digitales inclusivos y sostenibles.

### Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional del Espectro – ANE. (2022). Informe piloto de conectividad rural mediante TVWS en Boyacá. <https://www.ane.gov.co>
- Banco Mundial. (2021). Digital Development in Africa. <https://www.worldbank.org>
- Bruno, A., & Grenoville, S. (2023). White Space Networks in Rural Areas: Case studies and impact. *Journal of Wireless Technologies*, 11(2), 45–59.
- CEPAL. (2022). La educación en tiempos de la pandemia de COVID-19: Desafíos y oportunidades. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46604>
- Córdoba Padilla, M. (2011). Formulación y evaluación de proyectos. Ecoe Ediciones. (pp. 128-149). <https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/esereaderunad69169?page=128>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL. (2022). La educación en tiempos de la pandemia de COVID-19: Desafíos y oportunidades. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46604>
- El Falou, A., & Alouini, M.-S. (2022). TV Towers as Macro Sites for Massive MIMO Rural Connectivity. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2206.06266>
- Islam, Z., O'Hara, J. F., Shadoan, D., & Ekin, S. (2021). Experimental Study of Broadband Connectivity Using TV White Space in Rural Areas. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 7(3), 1000–1012. <https://doi.org/10.1109/TCCN.2021.3083675>
- Perkins, H. C., et al. (2025). TVWS Network Resilience in Rural Towns: How External Factors Impact Network Performance and Longevity. *Journal of Rural Studies*.
- Al-ZuBi, M., & Alouini, M.-S. (2024). Universal Scanning GUI Tool for Available and Usable TV White Space (TVWS) Spectrum. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.13987>

- Silva, J., Ferreira, L., & Monteiro, R. (2023). Impact of Regulation on TV White Space Implementation in Brazil. *Sensors MDPI*, 25(8), 2469. <https://doi.org/10.3390/s25082469>
- Kumar, A., Raman, B., & Karandikar, A. (2016). A TV White Space Network for Rural Internet Access. *IEEE Communications Magazine*, 54(7), 60–66. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7514161>
- Lysko, A. A., Masonta, M. T., & Johnson, D. L. (2015). First Large TV White Space Trial in South Africa: A Brief Overview. *Proceedings of the IEEE DySPAN*, 11–13. <https://doi.org/10.1109/DySPAN.2015.7343931>
- Khalil, I., Khreishah, A., Azeem, M., & Guan, K. (2017). A TV White Space Based 5G Rural Wireless Broadband Network. *2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 459–464. <https://doi.org/10.1109/ISCC.2017.8024553>
- Martinez Alonso, M., Riera Palou, F., Giupponi, L., & Galindo-Serrano, A. (2024). Energy efficiency of TVWS vs LTE networks in rural and suburban environments. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2405.02693>
- Pakzad, A., Mahdizadehghdam, S., & Mohammed, A. (2021). A Reinforcement Learning-Based TVWS Database for Spectrum Allocation in Rural Areas. *Baghdad Science Journal*, 18(6), 1461–1470. <https://bsj.uobaghdad.edu.iq/index.php/BSJ/article/view/6215>
- Rahman, A., & Saifullah, A. (2019). A survey on TV white space communications: Regulations, standardizations, and challenges. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1810.07120>
- Shahid, M. A., Khandaker, M. R. A., & Wong, K.-K. (2024). Dynamic Spectrum Sharing in TV White Space and CBRS Bands for Agricultural Applications. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2407.04561>

- Gómez, C., Martínez, R., & Pineda, L. (2022). Uso del espectro blanco de televisión para la conectividad rural en Colombia. *Revista Colombiana de Telecomunicaciones*, 18(1), 77–95.
- Kibria, M. G., Nguyen, K., Villardi, G. P., Zhao, O., Ishizu, K., & Kojima, F. (2019). TV White Spaces for Rural Internet Connectivity: Challenges and Strategies. *IEEE Access*, 7, 162325–162344. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2952362>
- Jia, Y., Liu, X., Wang, Y., Zhang, Y., & Guo, H. (2021). A Field Trial of TV White Space Based Long-Distance Wireless Broadband Access in Rural Areas. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 67(4), 1018–1029. <https://doi.org/10.1109/TBC.2021.3052166>
- MinTIC. (2024). Boletín de indicadores TIC por regiones 2023. <https://www.mintic.gov.co>
- NTC – National Telecommunications Commission (Filipinas). (2020). TVWS for education connectivity. <https://ntc.gov.ph>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura – UNESCO. (2023). Informe mundial sobre la educación digital: Transformar la educación a través de la tecnología. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000385309>
- Ruiz Meza, R. (2005). Diseño de circuitos electrónicos de conmutación, Instituto Politécnico Nacional. (pp. 225-230). <https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/esereaderunad72214?page=228>
- UNESCO. (2023). Informe mundial sobre la educación digital: Transformar la educación a través de la tecnología. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000385309>