



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**“ESTUDIO DE APLICABILIDAD DE REDES SATELITALES DE STARLINK
FRENTE A REDES DE INFRAESTRUCTURAS INALÁMBRICAS EN ZONAS
RURALES DEL ECUADOR.”**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

AUTOR: ANDRÉS SANTIAGO CABRERA GÓNGORA

DIRECTOR: MSC. EDGAR ALBERTO MAYA OLALLA

IBARRA, 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004015259		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Cabrera Góngora Andrés Santiago		
DIRECCIÓN:	Atuntaqui-Barrio Central		
EMAIL:	ascabrerag@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0999782110

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Estudio de aplicabilidad de redes satelitales de Starlink frente a redes de infraestructuras Inalámbricas en zonas rurales del Ecuador.
AUTOR (ES):	Cabrera Góngora Andrés Santiago
FECHA: DD/MM/AAAA	17/10/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en telecomunicaciones
DIRECTOR:	MSC. Edgar Alberto Maya Olalla
ASESOR:	Msc. Jaime Roberto Michilena Calderón

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 23 días del mes de octubre de 2025.

EL AUTOR:

Andrés Santiago Cabrera Góngora

CI: 1004015259



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

MAGISTER EDGAR MAYA, DIRECTOR DEL PRESENTE TRABAJO DE TITULACION
CERTIFICA:

Que el presente trabajo de Titulación ESTUDIO DE APLICABILIDAD DE REDES SATELITALES DE STARLINK FRENTE A REDES DE INFRAESTRUCTURAS INALÁMBRICAS EN ZONAS RURALES DEL ECUADOR, ha sido desarrollado por el señor Cabrera Góngora Andrés Santiago bajo mi supervisión.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad



MSC. Edgar Alberto Maya Olalla

DIRECTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico con mucho cariño a mis padres Angelita Góngora y Jorge Cabrera, y a mi querido hermano Iván por ser los pilares fundamentales y motor de mi vida. Con su amor constante y su apoyo incondicional me enseñaron con acciones y palabras el verdadero valor del esfuerzo, la humildad y la dedicación. Este logro también es suyo.

A mis queridos abuelitos Oswaldo y Lolita, por su amor infinito, su apoyo constante y por todas las enseñanzas que me han regalado con tanto cariño. Gracias por ser una fuente inagotable de sabiduría, ternura y fortaleza. Siempre los llevo conmigo.

Gracias a mi familia, he logrado alcanzar este gran éxito.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi sincera gratitud a mis padres, por su amor incondicional y por estar siempre presentes con su apoyo firme y constante. A mi hermano y a toda mi familia, por su aliento y por creer en mí a lo largo de este camino.

Agradezco profundamente a mis docentes y mentores, especialmente al Ing. Edgar Maya, director de este trabajo, y al Ing. Jaime Michilena, mi asesor, por su dedicación, sus valiosas enseñanzas y por impulsarme a superar cada reto con esfuerzo y compromiso.

A mis amigos, por su cercanía, por los buenos momentos compartidos y por hacer más llevadero este proceso académico.

Y finalmente, a todas las personas que, de una u otra forma, fueron parte de este logro: gracias por acompañarme en este viaje y aportar a la realización de este sueño.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

RESUMEN

La presente investigación se encuentra enfocado en la provincia de Imbabura para abordar los problemas de conectividad en áreas rurales. Específicamente en las áreas rurales, de países que se encuentren en desarrollo, en donde todavía existen importantes brechas en el acceso a servicios de telecomunicaciones, a pesar de que la actualidad se presentan avances tecnológicos y una elevada penetración del Internet a nivel mundial. Debido a la ausencia de una infraestructura básica, provocando que estas áreas enfrenten desafíos importantes de limitación en cuanto a acceso a servicios básicos agua potable, alcantarillado, telecomunicaciones e Internet. Esta situación no solo restringe las posibilidades de crecimiento económico y social, sino que también exacerba las desigualdades que ya existen.

La investigación parte de la premisa de que el acceso a Internet de alta calidad es un elemento necesario para alcanzar el progreso actual, lo que permite a las comunidades rurales tener una participación más equitativa en la economía digital mundial. Para mejorar la conectividad, la tesis plantea la posibilidad de implementar la red de banda ancha satelital Starlink en estas áreas, comparándola con las infraestructuras de redes inalámbricas de larga distancia existentes. La cual se lo realizara mediante un análisis desde una perspectiva técnica, normativa y de disponibilidad en la provincia de Imbabura, en cuanto a los componentes y funcionamiento de las redes de tipo inalámbricas de larga distancia como también las de Starlink.

La necesidad de esta investigación radica en la urgencia de cerrar la brecha que existe en el ámbito digital como también en la de garantizar que todas las comunidades tengan acceso a los servicios de Internet de forma fácil, sencilla y de alta calidad independientemente en donde se encuentre geográficamente. La investigación tiene como objetivo contribuir al debate sobre la infraestructura de datos y la gestión de la economía digital, enfatizando la importancia de una infraestructura moderna y justa que permita a las naciones y sus ciudadanos participar plenamente en el siglo XXI. Esta tesis tiene como objetivo evaluar la pertinencia y eficacia del proyecto Starlink de SpaceX en el contexto específico de Imbabura, ya que ha emergido como una posible solución para estos desafíos. Se ofrece un análisis comparativo que podría servir como modelo para otras áreas con problemas similares.

La investigación se encuentra estructurada en diferentes fases para poder lograr los objetivos planteados. En primer lugar, se examinó como se encuentra la situación actual en cuanto a conectividad en la provincia de Imbabura. Esto incluirá una revisión de la infraestructura existente y las restricciones regulatorias y técnicas. Posteriormente, se realizará una evaluación de la tecnología Starlink para evaluar sus capacidades técnicas, requisitos de implementación y costos. Este análisis se complementará con un estudio comparativo de otras tecnologías de conectividad disponibles, con un enfoque particular en las redes inalámbricas de larga distancia que suelen ser utilizadas para entornos rurales.

Además, para poder lograrlo se llevó a cabo una evaluación en cuanto si es viable implementar Starlink en la provincia de Imbabura después de recopilar y analizar los datos necesarios. Esta evaluación considerará factores técnicos, económicos y regulatorios. La evaluación permitirá determinar si esta tecnología es una solución a la problemática de mejora de la conectividad en las áreas rurales y consecuentemente poder cerrar la brecha digital en la zona.

Finalmente, se presentarán los resultados y sugerencias de la investigación, destacando sus implicaciones prácticas y posibles caminos para futuras investigaciones en este campo. Se espera que los hallazgos de esta investigación permitan diseñar e implementar políticas y estrategias efectivas para mejorar la conectividad en zonas rurales, no solo en la provincia de Imbabura, sino también en otras regiones en todo el mundo que enfrentan desafíos similares.

Palabras clave: Starlink, RILD, redes satelitales, enlaces inalámbricos, telecomunicaciones rurales, latencia, throughput, evaluación de rendimiento, protocolo RFC 2544, banda ancha.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ABSTRACT

The current research focuses on the province of Imbabura to address connectivity issues in rural areas. In rural areas, especially in developing countries, there are still significant gaps in access to telecommunications services, despite technological advances and the growing global penetration of the Internet. Due to the lack of basic infrastructure, these areas face significant challenges. This includes limited access to basic services such as drinking water and sewage systems, as well as telecommunications and the Internet. This situation not only restricts possibilities for economic and social growth but also exacerbates existing inequalities.

The research is based on the premise that high-quality Internet access is an essential element for current progress, allowing rural communities to participate more equitably in the global digital economy. To improve connectivity, the thesis proposes the possibility of implementing the Starlink satellite broadband network in these areas, comparing it with existing long-distance wireless network infrastructures. It will be examined from both a technical perspective and a regulatory and availability perspective in the province of Imbabura, examining the components and functioning of Starlink and long-distance wireless networks.

This study is justified by the urgent need to close the digital divide and ensure that all communities have access to affordable and high-quality Internet services, regardless of their geographical location. The research aims to contribute to the debate on data infrastructure and the management of the digital economy, emphasizing the importance of modern and fair infrastructure that allows nations and their citizens to fully participate in the 21st century. This

this thesis aims to evaluate the relevance and effectiveness of SpaceX's Starlink project in the specific context of Imbabura, as it has emerged as a possible solution to these challenges. A comparative analysis is offered that could serve as a model for other areas with similar problems.

The research will be structured in different phases to achieve the proposed objectives. First, the current connectivity situation in the province of Imbabura will be examined. This will include a review of existing infrastructure and regulatory and technical constraints. Subsequently, an evaluation of Starlink technology will be conducted to assess its technical capabilities, implementation requirements, and costs. This analysis will be complemented by a comparative study of other available connectivity technologies, with a particular focus on long-distance wireless networks used in rural environments.

A feasibility assessment of implementing Starlink in the province of Imbabura will be conducted after collecting and analyzing the necessary data. This assessment will consider technical, economic, and regulatory factors. The evaluation will determine whether this technology is a viable solution for improving connectivity in rural areas and, ultimately, closing the digital divide in the region.

Finally, the results and suggestions of the research will be presented, highlighting its practical implications and possible paths for future research in this field. The findings of this study are expected to help design and implement effective policies and strategies to improve connectivity in rural areas, not only in the province of Imbabura but also in other regions worldwide facing similar challenges.

Keywords: Starlink, RILD, satellite networks, wireless links, rural telecommunications, latency, throughput, performance evaluation, RFC 2544 protocol, broadband.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTO	6
RESUMEN	7
ABSTRACT.....	10
Capítulo I: Antecedentes.....	21
1.1. Tema	21
1.2. Problema	21
1.3. Objetivos	22
1.3.1. Objetivo General.....	22
1.3.2. Objetivos Específicos.....	22
1.4. Alcance	22
1.5. Justificación	23
Capítulo II: Estado del Arte	25
2.1. Starlink: Red de Satélites de Banda Ancha.....	25
2.1.1. Arquitectura y Tecnología	25
2.1.2 Servicio y Cobertura	27
2.1.3 Arquitectura lógica, funcionamiento y protocolos técnicos de Starlink	29
2.2. Red inalámbrica de larga distancia (RILD)	39
2.2.1 Arquitectura de Red	39
2.2.2 Componentes.....	39

2.2.3 Procesamiento y Seguridad.....	47
2.2.4 Arquitectura lógica, funcionamiento y protocolos técnicos de redes inalámbricas de larga distancia (RILD)	52
2.3. Marco Normativo y Regulatorio.....	63
2.3.1 Impacto Ambiental y Regulatorio.....	63
2.3. Comparación funcional de tecnologías para zonas rurales	65
Capítulo III: Marco Metodológico.....	68
3.1. Diseño de la investigación	68
3.1.1. Descriptivo – comparativo.....	69
3.1.3. Transversal.....	70
3.2. Fuentes de información.....	71
3.2.1. Fuentes primarias.....	71
3.2.2. Fuentes secundarias	72
3.3. Técnicas de procedimientos.....	73
3.3.1. Identificación de variables clave.....	73
3.3.2. Recolección de datos.....	75
3.3.3. Criterios de selección.....	76
3.3.4. Análisis multicriterio	79
3.4. Análisis de la información	79
3.5. Justificación técnica de los parámetros de evaluación.....	83

3.6. Plan de Pruebas para Evaluación de Rendimiento.....	85
3.6.1. Objetivos del Plan de Pruebas.....	85
3.6.2. Metodología de Pruebas.....	86
3.7. Evaluación técnica basada en el estándar RFC 2544.....	95
Capítulo IV: Pruebas de Funcionamiento	97
4.1. Entorno y equipos de prueba.....	98
4.2. Procedimiento experimental	100
4.3. Resultados	103
4.3.1. Resultados Cuantitativos.....	104
4.3.2. Resultados Cualitativos.....	129
4.3.3. Resultados estructurados según el estándar RFC 2544.....	134
4.5. Análisis y discusión	136
4.5.1. Análisis técnico de la red RILD.....	138
4.5.2. Análisis técnico de Starlink	139
4.5.3. Comparación técnica entre ambas tecnologías	141
4.5.4. Impacto práctico en el entorno rural	142
4.6. Síntesis del capítulo	146
Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones	147
Conclusiones.....	147
Recomendaciones	148

Bibliografia 149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujo lógico de datos en el sistema Starlink. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 2. Flujo lógico Starlink. Fuente: Elaboración propia	34
Figura 3. Flujo lógico de la arquitectura. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 4. Flujo lógico del sistema. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 5. Esquema representativo del flujo lógico. Fuente: Elaboración propia	59
Figura 6. Diagrama de propagación de la red satelital Starlink (Mini), con parámetros típicos de operación. Fuente: Elaboración propia basada en documentación técnica de Starlink (SpaceX, 2023).	92
Figura 7. Mapa de propagación y cobertura del enlace RILD generado con UISP. Fuente: Elaboración propia.	93
Figura 8. Perfil de elevación y parámetros del enlace punto a punto estación-cliente1. Fuente: Elaboración propia en base a simulación en UISP.	94
Figura 9. Perfil de elevación y parámetros del enlace punto a punto estación-cliente2. Fuente: Elaboración propia en base a simulación en UISP.	94
Figura 10. Relación entre tamaño de paquete y throughput promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.	106
Figura 11. Relación biddireccional promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.	109
Figura 12. Relación UDP promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.	111
Figura 13. Relación UDP bitrate efectivo obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.	112

Figura 14. Latencia promedio y máxima hacia 8.8.8.8 en red Starlink. Fuente: Elaboración propia	114
Figura 15. Velocidades de descarga y carga obtenidas mediante Speedtest en red Starlink. Fuente: Elaboración propia	116
Figura 16. Latencia y Jitter mediante Speedtest en red Starlink. Fuente: Elaboración propia	116
Figura 17. Relación entre tamaño de paquete y throughput promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.	119
Figura 18. Relación bidireccional promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.	121
Figura 19. Relación UDP promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.	123
Figura 20. Relación UDP bitrate efectivo obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.	124
Figura 21. Latencia promedio y máxima hacia 8.8.8.8 en red RILD. Fuente: Elaboración propia	126
Figura 22. Velocidades de descarga y carga obtenidas mediante Speedtest en red RILD. Fuente: Elaboración propia	127
Figura 23. Latencia y Jitter mediante Speedtest en red RILD. Fuente: Elaboración propia	128
Figura 24. Comparativa de uso Starlink vs RILD.	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen técnico del enlace físico Starlink Fuente: Elaboración propia	32
Tabla 2 Principales características de la arquitectura lógica Fuente: Elaboración propia	34
Tabla 3	35
Tabla 4 Capacidad del terminal Starlink Mini Fuente: Elaboración propia	38
Tabla 5 Resumen técnico del enlace físico RILD Fuente: Elaboración propia	56
Tabla 6 Protocolos en capas OSI aplicadas a RILD Fuente: Elaboración propia	59
Tabla 7 Capacidad operativa del enlace Fuente: Elaboración propia	61
Tabla 8 Análisis Comparativo de la funcionalidad de las redes, ventajas y desventajas de cada una Fuente: Elaboración propia	65
Tabla 9 Comparación de variables clave entre redes satelitales Starlink y redes inalámbricas de larga distancia (RILD). Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 10 Criterios de selección para tecnologías de conectividad en zonas rurales. Fuente: Elaboración propia	78
Tabla 11 Análisis técnico de Starlink y RILD. Fuente: Elaboración propia	80
Tabla 12 Análisis operativo de Starlink y RILD. Fuente: Elaboración propia	81
Tabla 13 Análisis económico de Starlink y RILD. Fuente: Elaboración propia	81
Tabla 14 Análisis normativo de Starlink y RILD. Fuente: Elaboración propia	82
Tabla 15 Parámetros evaluados y su justificación técnica Fuente: Elaboración propia	83
Tabla 16 Comparación cualitativa de la experiencia de uso entre Starlink Mini y red inalámbrica de larga distancia (RILD) Fuente: Elaboración propia	94

Tabla 17 Resumen de equipos e instrumentos utilizados Fuente: Elaboración propia	102
Tabla 18	103
Tabla 19 Throughput TCP unidireccional según tamaño de paquete (Starlink) Fuente: Elaboración propia	106
Tabla 20 Prueba bidireccional TCP – Tecnología Starlink Fuente: Elaboración propia	108
Tabla 21 Throughput UDP unidireccional según tamaño de paquete (RILD) Fuente: Elaboración propia	111
Tabla 22 Resultados de latencia hacia 8.8.8.8 en red RILD (prueba ICMP) Fuente: Elaboración propia	113
Tabla 23 Resultados de prueba de velocidad de internet con Speedtest – Starlink. Fuente: Elaboración propia	115
Tabla 24 Throughput TCP unidireccional según tamaño de paquete (RILD) Fuente: Elaboración propia	118
Tabla 25 Prueba bidireccional TCP – Tecnología RILD	120
Tabla 26 Throughput UDP unidireccional según tamaño de paquete (RILD) Fuente: Elaboración propia	123
Tabla 27 Resultados de latencia hacia 8.8.8.8 en red RILD (prueba ICMP) Fuente: Elaboración propia	125
Tabla 28 Resultados de prueba de velocidad de internet con Speedtest – RILD. Fuente: Elaboración propia	127
Tabla 29 Comparación cualitativa de la experiencia de uso entre Starlink Mini y red inalámbrica de larga distancia (RILD) Fuente: Elaboración propia	131

Tabla 30 Evaluación técnica comparativa de los enlaces Starlink y RILD conforme a los parámetros del estándar RFC 2544. Fuente: Elaboración propia 134

Tabla 31 Impacto práctico por contexto de aplicación. Fuente: Elaboración propia 144

Capítulo I: Antecedentes

1.1. Tema

ESTUDIO DE APLICABILIDAD DE REDES SATELITALES DE STARLINK FRENTE A REDES DE INFRAESTRUCTURAS INALÁMBRICAS EN ZONAS RURALES DEL ECUADOR.

1.2. Problema

La necesidad de que las personas se comuniquen y compartan información es tan importante para cualquier tipo de persona, ya sea ama de casa, estudiante o hasta profesional, debido a la importancia que genera su implementación para poder realizar cualquier actividad sin ningún inconveniente en cualquier lugar sin importar que sea alejado, pequeño o hasta de una estructura compleja. (Nicolalde, 2018)

Dentro de este contexto las personas que se encuentran en lugares remotos, especialmente en países pequeños como el nuestro, la situación es muy diferente, debido a que la mayoría carece de acceso hacia los servicios básicos como agua potable, alcantarillado y fundamentalmente las telecomunicaciones que incluye Internet, para poder realizar cualquier acción de comunicación e información.

Los proveedores del servicio de internet en capitales de países en desarrollo a menudo quieren expandir sus servicios a áreas rurales. La falta de investigación de mercado y el riesgo económico pueden impedir a los proveedores de Internet instalar la infraestructura necesaria en esas áreas.

Los datos estadísticos muestran que el número de usuarios que usan internet crece un 10% anual, este crecimiento se debe a la reducción de precios en servicios de tecnologías de la información y comunicación (TIC). Pero este crecimiento solamente se puede observar solo en

áreas densamente pobladas, donde los precios son competitivos y los servicios atractivos para los clientes habituales (Steele & Lo, 2013). Las zonas rurales con baja densidad generalmente tienen tecnología obsoleta o escasa. La oferta de Internet es desigual por la falta de rentabilidad en zonas rurales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar la factibilidad de implementación de la red satelital de banda ancha Starlink en las zonas rurales de la provincia de Imbabura ante el uso de infraestructuras de redes inalámbricas de larga distancia como medio para la transmisión de datos y acceso al internet.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Fundamentar teóricamente los componentes que conforman el funcionamiento y puesta en marcha de una Red de banda ancha Starlink y una red inalámbrica de larga distancia
- Obtener información necesaria que permita conocer disponibilidad y normativas del posible uso de la red Starlink en zonas rurales de la provincia de Imbabura.
- Estudiar las características del estándar empleado en el envío de información en redes satelitales y redes inalámbricas de larga distancia.
- Realizar una comparativa con los parámetros generales para el uso óptimo de redes inalámbricas de larga distancia y la red Starlink en zonas rurales de la provincia de Imbabura.

1.4. Alcance

Las redes inalámbricas y satelitales ofrecen acceso en tiempo real a información y recursos sin conexiones físicas. Sus principales características son la falta de cables y la flexibilidad de la red, lo que mejora la productividad y la eficiencia en la transmisión de datos (Plaza Guingla, Flores Marin, Benavides Castillo, & Benavides Andrade, 2018). Estas tecnologías inalámbricas constan de varios componentes para su funcionamiento, las cuales

serán fundamentadas tanto para la red Starlink como para una red inalámbrica de larga distancia, ya que solucionan la problemática del acceso en la comunicación en zonas rurales en el país, por ello es importante realizar esta investigación de sus componentes, ya que permite establecer comunicaciones entre usuarios.

La investigación e implementación de una red Satelital Starlink en zonas rurales es complicada, debido a que suele presentarse limitaciones. Esto se lo puede mencionar debido a que para implementar este escenario es necesario investigar la disponibilidad y normativas del despliegue de la red en nuestro país.

Las redes satelitales como Starlink y redes inalámbricas de larga distancia se utilizan donde no se puede instalar infraestructura cableada, analizando estándares de comunicación, comportamiento de nodos y tráfico de red para ayudar a los usuarios a encontrar servicios que satisfagan sus necesidades.

Starlink es un proyecto que surgió en la compañía de vehículos aeroespaciales SpaceX, con el objeto de producir una constelación de satélites de órbita baja para proporcionar servicio de Internet de gran velocidad. (Reyes, Franco, Sancan, Tumbaco, & Merino, 2022). Por lo que se realizara una comparativa costo-beneficio con los parámetros generales para el uso óptimo como medio para la transmisión de datos y acceso al internet frente al uso de redes Inalámbricas de larga distancia.

1.5. Justificación

La política de infraestructura de datos, uno de los pilares de un marco de gestión de datos, ayuda a establecer la necesaria igualdad de condiciones en la moderna economía de los datos, haciendo las cosas más equitativas (Foster, Comini, & Srinivasan, 2021).

Sin la presencia de una infraestructura de datos moderna, los países no pueden ofrecer una conectividad accesible y fiable. Al mismo tiempo, sin acceso a una infraestructura de banda ancha a nivel local, las personas no pueden acceder a la gran cantidad de datos que existen, ni

se pueden recopilar datos sobre ellas, de modo que se puedan tener en cuenta sus necesidades y preferencias en el diseño y la prestación de servicios públicos y privados (Foster, Comini, & Srinivasan, 2021).

El Informe sobre el Desarrollo Mundial 2021: Datos para una vida mejor aboga por mejorar la equidad en el sistema mundial de datos abordando las desigualdades -tanto las diferencias entre individuos como entre países- en la disponibilidad de la infraestructura de datos (Foster, Comini, & Srinivasan, 2021).

Las redes inalámbricas han mejorado en accesibilidad, movilidad, velocidad, cobertura y seguridad por los avances tecnológicos y la necesidad de comunicarse. Por lo que dio inicio la iniciativa Starlink con el objetivo de ofrecer internet de banda ancha en todo el mundo sin importar la ubicación geográfica que se encuentre el usuario. Un gran inconveniente para muchos canadienses y estadounidenses es su indisponibilidad de acceso a internet, ya que se encuentran localizados en áreas rurales sumamente alejados. (Reyes, Franco, Sancan, Tumbaco, & Merino, 2022)

Los satélites de Starlink al encontrarse más cercanos a la tierra en comparación a los demás proveedores permite ofrecer menor latencia y mayor velocidad en el envío y recepción de datos.

Capítulo II: Estado del Arte

2.1. Starlink: Red de Satélites de Banda Ancha

2.1.1. Arquitectura y Tecnología

La arquitectura y tecnología detrás de Starlink, la red de satélites de banda ancha desarrollada por SpaceX representa una innovación significativa en el área de las comunicaciones por satélite. Según (Sánchez Aragón, 2023) han proporcionado detalles sobre la arquitectura y tecnología subyacente de Starlink.

La arquitectura de Starlink se basa en una constelación de satélites de órbita baja en la Tierra (LEO), que operan a altitudes mucho más bajas que los satélites de comunicaciones tradicionales en órbita geoestacionaria. Esta constelación de satélites está diseñada para proporcionar una cobertura global y una latencia reducida, lo que permite mejorar significativamente la experiencia que tiene el usuario en comparación con las tecnologías satelitales anteriores.

Desde el punto de vista tecnológico los satélites Starlink emplean comunicaciones de frecuencia de radio RF para retransmitir señales de datos entre el usuario y la red terrestre. Dentro de este contexto se puede mencionar que cada satélite está equipado con varias antenas con alta ganancia y paneles solares para producir energía, lo que permite comunicaciones de forma bidireccional con las terminales del usuario. Se utiliza tecnología de formación de haz (beamforming) para dirigir las señales hacia los usuarios específicos y poder maximizar la capacidad de la red y la eficiencia espectral.

Además, se puede mencionar que la red de Starlink se beneficia de la interconexión que existe entre los propios satélites para permitir una mejor transmisión de datos a través de la constelación y la capacidad de enrutar las señales de manera eficiente hacia la red terrestre. Esto se lo puede obtener gracias a que existe enlaces láser y de radio entre satélites, lo que proporciona una infraestructura de comunicación más robusta y reiterada en el espacio.

- Constelación de satélites en órbita terrestre baja (LEO).

Dentro de este aspecto se puede describir que varios autores que se especializan sobre el tema de la tecnología espacial y telecomunicaciones han discutido sobre la definición característica de una LEO, en donde básicamente se la puede describir como un concepto clave en el ámbito de las comunicaciones espaciales, debido a que autores como Wertz y Larson (1999) establecieron los principios y las aplicaciones de las constelaciones de satélites incluidas las de órbita baja como necesarias para llegar obtener una mejor comunicación entre satélites y por ende una mejor resolución en cuanto al servicio de internet para el usuario.

De acuerdo con Blinder (2023) menciona que los orígenes de las constelaciones de satélites en su libro "Ingeniería de misiones espaciales: el nuevo SMAD destacan la importancia en la mejora de la cobertura global y la reducción de la latencia en las comunicaciones por satélite. Además, de acuerdo con los autores como (Herrera R. M., 2021) han permitido establecer un análisis de forma detallada sobre los beneficios técnicos y económicos que tienen las constelaciones de LEO en comparación con las órbitas geoestacionarias, lo que ha ayudado a ampliar el conocimiento dentro de este campo.

El proyecto Starlink de SpaceX, liderado por Elon Musk, es un ejemplo destacado de una constelación de satélites en órbita terrestre baja en términos de aplicaciones prácticas. SpaceX ha hablado extensamente sobre la arquitectura y la tecnología detrás de Starlink en publicaciones y presentaciones, destacando los beneficios de la constelación LEO en términos de cobertura global, baja latencia y alta capacidad de transmisión de datos.

- Infraestructura de estaciones terrestres.

En este aspecto se puede describir que siempre la infraestructura de estaciones terrestres representa la parte de la infraestructura crítica en el soporte y operación de sistemas de comunicaciones satelitales como las constelaciones LEO. Sobre estas estaciones Wertz y Larson (1999), así como, Prasad y Aloï (2018) han descrito dentro de sus obras investigativas

la importancia y los aspectos técnicos necesarios que deben tener dichas constelaciones para poder aprovechar enormemente la comunicación sin fallas.

Las estaciones terrestres, terrenas o de tierra se las interpreta como instalaciones que funcionan como interfaces de las comunicaciones con los satélites en órbita, así como con la infraestructura, se puede decir, de comunicaciones terrenas. Estas estaciones son centros operacionalmente vitales y sus actividades han sido en su mayoría incorporadas operativamente. Estos sistemas satelitales se validan en el envío de paquetes de comandos que se envían a los satélites, recepción de datos transmitidos por ellos y control en cuanto a su órbita y salud.

La infraestructura de estaciones terrestres puede llegar a incluir una gran variedad de equipos y tecnologías especializadas como lo suelen ser las antenas parabólicas de alta ganancia, equipos de seguimiento y control, sistemas de comunicación por microondas y equipos de procesamiento de datos. Al presentar grandes y especializados equipos se debe ubicar las instalaciones de forma estratégica para aprovechar la cobertura y maximizar la eficiencia de la comunicación con los satélites en órbita, lo que a menudo implica que la distribución de las estaciones terrestres se encuentre en diversas ubicaciones geográficas por todo el mundo.

Además, también se puede detallar que aparte de su función básica de comunicación con los satélites las estaciones terrestres también pueden desempeñar otras funcionalidades como el enrutamiento de datos a través de la red satelital y la conexión con la infraestructura de comunicaciones terrestres, dentro de este contexto se encuentran el internet y las redes de telefonía móvil.

2.1.2 Servicio y Cobertura

Oferta de servicios de internet.

El Internet satelital como el de Starlink de SpaceX es una innovación clave en la conectividad global, esto se lo puede mencionar gracias a según (Caisson, 2021) debido a que ha tratado aspectos técnicos y operativos de estos servicios en sus publicaciones. Mencionando que el Internet satelital es clave en áreas rurales y remotas con escasa infraestructura de comunicación, usando satélites en órbita terrestre baja (LEO) estos servicios ofrecen cobertura global y conectividad confiable en diversas ubicaciones.

Además, se puede describir que el Internet satelital utiliza terminales terrestres para conectarse a la red satelital, con la finalidad de que estos terminales puedan tener pequeñas antenas parabólicas o planas instaladas para transmitir y recibir señales de datos desde los satélites. La oferta de Internet satelital incluye planes de banda ancha y datos móviles para dispositivos portátiles, llevando a que estos servicios sean considerados útiles para la navegación, correo electrónico, transmisión de video, juegos y acceso a la nube.

Cobertura global y acceso en áreas remotas.

La cobertura global y el acceso a zonas remotas son esenciales para el servicio de Internet satelital, dentro de estas características se encuentra Starlink de SpaceX. En donde de acuerdo con (Díaz Chang & Ayala, 2020) han discutido de forma extensa este tema en relación con la conectividad global y la inclusión que tiene con respecto a lo digital.

La capacidad de brindar una cobertura prácticamente ilimitada a nivel mundial es uno de los principales beneficios que tienen los servicios de Internet satelital, ya que estos pueden acceder a Internet en cualquier lugar del mundo sin importar lo remoto o inaccesible que sea el lugar, además de permitirse utilizar una constelación LEO genera de forma ventajosa y oportuna dentro de este contexto para las personas que se encuentran en comunidades rurales y remotas que no tendrían acceso de forma fácil y asequible a servicios de telecomunicaciones, esto se debe ya que los satélites garantizan la conectividad en lugares donde la instalación de cables de fibra óptica o torres de telefonía celular no es viable, facilitando así el acceso a los

servicios digitales como la educación en línea, los servicios de salud remotos, las oportunidades de empleo y el comercio electrónico, llegando a generar un impacto significativo en el crecimiento socioeconómico de estas áreas.

2.1.3 Arquitectura lógica, funcionamiento y protocolos técnicos de Starlink

2.1.3.1. Arquitectura general del sistema Starlink

El sistema Starlink corresponde a una arquitectura de comunicaciones satelitales no geoestacionarias, específicamente en órbita terrestre baja (LEO, por sus siglas en inglés), operando a altitudes de aproximadamente 550 km, lo que permite ofrecer servicios de baja latencia en comparación con sistemas satelitales tradicionales en órbita geoestacionaria (GEO) situados a 35.786 km ((ITU-R), Use of systems in the fixed-satellite service in the event of natural disasters and similar emergencies for warning and relief operations, 2012)

- Constelación de satélites en órbita LEO:

Según la documentación técnica de SpaceX, cada satélite opera en la banda Ku (10.7–12.7 GHz en downlink y 14–14.5 GHz en uplink) (SpaceX, 2020). Los satélites utilizan antenas con tecnología phased-array, que permiten direccionar haces dinámicos (beamforming) hacia los terminales terrestres, además de enlaces láser para comunicación intersatelital en generaciones recientes. (Henry, 2021)

- Terminal de usuario (Starlink Mini):

Es un terminal autónomo equipado con una antena de matriz activa de seguimiento electrónico, capaz de rastrear y cambiar de satélite sin necesidad de movimiento mecánico (SpaceX, 2020). El dispositivo integra un router Wi-Fi bajo el estándar IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5), que ofrece una cobertura de hasta 100 metros en interiores y conexiones simultáneas típicas de hasta 100 dispositivos, dependiendo de las condiciones de interferencia y uso. ((IEEE), 2013)

- Gateways terrestres:

Son estaciones fijas conectadas a la red troncal de internet. Estas gestionan el tráfico entre los satélites y la red pública global, siendo responsables del ruteo, la gestión de direcciones IP públicas y el establecimiento de túneles seguros entre los terminales de usuario y los data centers de la red Starlink. (Lapedus, 2022)



Figura 1. Flujo lógico de datos en el sistema Starlink. Fuente: Elaboración propia.

2.1.3.2. Propagación y enlace físico

El enlace físico de la red Starlink opera principalmente en la banda Ku, con rangos de frecuencia de 10.7–12.7 GHz para el enlace descendente (downlink) y 14–14.5 GHz para el enlace ascendente (uplink) (SpaceX, 2020). Este enlace es responsable de la transmisión de datos entre el terminal de usuario y la constelación de satélites LEO.

- Modelo de propagación – Pérdida en espacio libre (FSPL)

El modelo principal que caracteriza la propagación del enlace satelital es la pérdida en espacio libre (Free Space Path Loss, FSPL), dado que se trata de un entorno sin obstáculos físicos directos, aunque con afectaciones secundarias como la atmósfera y la lluvia.

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44$$

Donde:

$d = distancia\ al\ satélite\ (km)$

$f = frecuencia\ (MHz)$

Cálculo aplicado para Starlink:

Distancia típica:

A 550 km de altitud, con ángulo de elevación de aproximadamente 25° a 90°, la distancia varía entre 550 km y ~1300 km (S.1001-2, 2012).

Distancia promedio = 1200 km

Frecuencia = 12,000 MHz (12 GHz)

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(1200) + 20\log_{10}(12000) + 32.44$$

$$FSPL(dB) = 61.58 + 81.58 + 32.44 = 175.6 \text{ dB}$$

Por lo tanto, la pérdida en espacio libre es aproximadamente 175.6 dB, lo cual es compensado con antenas de alta ganancia en los satélites y en los terminales Starlink, mediante tecnologías phased-array.

- **Factores adicionales de propagación:**

Pérdidas atmosféricas:

Atenuación por gases (oxígeno, vapor de agua), tipificada en la recomendación ITU-R P.676-12 (2019).

Pérdidas por lluvia:

Afectación significativa en frecuencias de banda Ku, según el modelo de ITU-R P.618-13 (2017).

Ganancia de antenas:

Tanto el terminal como los satélites utilizan antenas phased-array con beamforming activo, capaces de enfocar haces estrechos con ganancias típicas de 29–35 dBi (SpaceX, 2020).

Ángulo de elevación:

La pérdida de enlace aumenta cuando el ángulo de elevación es bajo (<30°) debido a mayor recorrido atmosférico y mayor distancia al satélite.

- **Modulación y técnicas de enlace:**

Modulación adaptativa:

QPSK, 16QAM, y en algunos casos superiores, dependiendo del SNR del enlace.

Uso de beamforming dinámico:

Los satélites generan múltiples haces orientables que se ajustan en tiempo real según la ubicación del terminal.

Diversidad espacial y salto de satélite:

El terminal puede cambiar dinámicamente de satélite según disponibilidad y cobertura, garantizando continuidad.

- **Resumen técnico del enlace físico Starlink:**

Tabla 1

Resumen técnico del enlace físico Starlink Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor típico
Frecuencia Downlink	10.7 – 12.7 GHz
Frecuencia Uplink	14 – 14.5 GHz
Modulación	QPSK, 16QAM (adaptativa)
Ganancia de antena	29 – 35 dBi (terminal y satélite)
Distancia	550 – 1300 km
FSPL (típico)	172 – 176 dB
Atenuación atmosférica	Variable según clima (2–10 dB adicional)
Tecnología adicional	Beamforming, enlace láser intersatelital

2.1.3.3. Arquitectura lógica y flujo de datos

La arquitectura lógica de Starlink se basa en el principio de establecer una comunicación punto a multipunto entre los terminales de usuario y la constelación de satélites LEO, la cual se interconecta con estaciones terrestres (Gateways) distribuidas globalmente. Todo el tráfico de datos se enruta desde el terminal del usuario hacia el satélite visible, luego hacia un Gateway conectado a la red troncal de internet y finalmente hacia el destino final.

En generaciones recientes, los satélites cuentan con enlaces láser intersatelitales que permiten, cuando sea necesario, enrutar el tráfico directamente entre satélites antes de alcanzar el Gateway más cercano. (Lapedus, 2022).

- **Flujo lógico de datos – Secuencia técnica**

1. El dispositivo cliente (PC, teléfono, IoT) se conecta al router integrado en el terminal Starlink vía Wi-Fi 802.11ac o puerto Ethernet opcional.
2. El router Starlink actúa como un servidor DHCP local, asignando IPs privadas a los dispositivos del usuario y gestionando una red NAT (Network Address Translation).
3. Todo el tráfico se encapsula a nivel IP y se envía hacia la antena Starlink, que modula la señal hacia la banda Ku.
4. Desde la antena, el tráfico es enviado al satélite LEO más cercano mediante beamforming.
5. El satélite establece un enlace descendente hacia el Gateway terrestre, donde se descripta y se enruta hacia la red troncal.
6. En algunos casos, cuando el enlace con el Gateway terrestre no es directo (zona remota sobre océano, por ejemplo), los satélites utilizan enlaces láser intersatelitales para redirigir el tráfico hacia otro satélite con línea directa al Gateway más cercano. (Henry, 2021).
7. El gateway asigna la IP pública del usuario y enruta el tráfico hacia internet o viceversa.

- **Protocolos y tecnologías aplicadas en el flujo de datos:**

Túneles IPsec o GRE:

El terminal establece un túnel cifrado desde el router local hacia el gateway, encapsulando todo el tráfico del usuario (SpaceX, 2020).

NAT:

El router Starlink opera bajo NAT, entregando IPs privadas internas (RFC 1918) a los dispositivos locales.

Ruteo IP:

El satélite no hace ruteo IP convencional. Solo es un transportador físico hacia el gateway, aunque en versiones con enlaces láser intersatelitales se soporta un ruteo interno entre satélites (Henry, 2021).

Wi-Fi Local:

Estándar IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) con protocolo DHCP para asignación de IP local, MU-MIMO, OFDMA y control de acceso CSMA/CA.

- **Resumen visual del flujo lógico:**

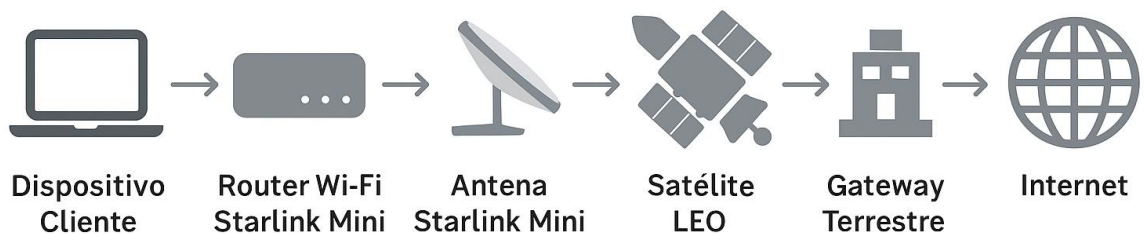


Figura 2. Flujo lógico Starlink. Fuente: Elaboración propia

- **Principales características de la arquitectura lógica:**

Tabla 2

Principales características de la arquitectura lógica Fuente: Elaboración propia

Componente	Función lógica
Dispositivo cliente	Obtiene IP privada vía DHCP local
Router Starlink	NAT, DHCP, Firewall básico

Antena Starlink	Modulación RF, seguimiento satelital, encapsulado de datos
Satélite LEO	Transporte físico + enlaces láser (solo interconexión satelital)
Gateway terrestre	Desencapsulado, IP pública, ruteo hacia internet

2.1.3.4. Protocolos en capas OSI aplicadas a Starlink

La arquitectura de Starlink usa protocolos desde la capa física hasta la de aplicación, garantizando la entrega de servicios de conectividad con baja latencia y alta disponibilidad. A continuación se presenta el desglose de los principales protocolos y tecnologías aplicados en cada capa del modelo OSI dentro del sistema Starlink.

Tabla 3 *Protocolos en capas OSI aplicadas a Starlink Fuente: Elaboración propia*

Capa OSI	Protocolo/Tecnología	Función técnica
Capa 1: Física	Banda Ku (10.7–12.7 GHz downlink / 14–14.5 GHz uplink) Modulación QPSK, 16QAM Beamforming satelital Enlaces láser intersatelital (óptico)	Transmisión de señales RF entre el terminal y el satélite. Optimiza la cobertura mediante haces direccionales.
Capa 2: Enlace de datos	Protocolo propietario SpaceX (basado en TDMA u OFDMA) Corrección de errores (FEC) Control de acceso (gestión del espectro y sincronización)	Establecimiento del enlace confiable entre el terminal y el satélite. Gestión de tramas, detección y corrección de errores.
Capa 3: Red	IPv4 / IPv6 Encapsulación GRE o IPsec (túneles hacia el gateway terrestre) Ruteo IP	Permite direccionamiento de paquetes IP. Establece túneles seguros entre el terminal y los gateway.

		Asignación de IP pública desde el gateway.
Capa 4: Transporte	TCP / UDP (con ajustes para enlaces satelitales) Optimización de ventanas TCP Corrección de jitter y latencia	Asegura la entrega confiable (TCP) o rápida sin control (UDP) del tráfico de datos. Gestión del control de flujo.
Capa 5, 6: Sesión/Presentación	TLS/SSL (seguridad de datos) Codificación y cifrado	Mantiene la seguridad de la comunicación. Autenticación y protección de datos.
Capa 7: Aplicación	DHCP (para red local) NAT DNS HTTPS, VoIP, streaming, servicios de datos	Proporciona servicios al usuario. Gestión de IP local (DHCP), traducción de direcciones (NAT), y servicios de internet.

Resumen de funcionamiento por capas:

- La capa física se encarga de la transmisión de ondas electromagnéticas en banda Ku y de enlaces ópticos láser intersatelitales.
- La capa de enlace gestiona el acceso al medio (beamforming, corrección de errores, multiplexación).
- La capa de red establece túneles cifrados hacia los gateways y gestiona IP pública.
- Las capas superiores (transporte, sesión y aplicación) se comportan como en una red convencional terrestre, pero optimizadas para los retardos satelitales.

2.1.3.5. Capacidad operativa y escalabilidad

El sistema Starlink está diseñado para brindar conectividad tanto a usuarios individuales como a escenarios empresariales o comunitarios en zonas rurales, remotas o de difícil acceso.

La capacidad operativa y la escalabilidad dependen de dos componentes fundamentales:

- La capacidad del beam satelital (haz de cobertura desde el satélite).
- La capacidad del terminal Starlink Mini y su red Wi-Fi local.

Capacidad del beam satelital

Cada satélite Starlink genera múltiples haces (beams) direccionables, capaces de ofrecer conectividad a regiones específicas de la Tierra mediante tecnología de beamforming (SpaceX, 2020).

Según documentación técnica indirecta y estudios de rendimiento. (Henry, 2021)

- Capacidad de throughput por beam:

Entre 17 y 23 Gbps, según carga de tráfico y cantidad de usuarios (Lapedus, 2022)

- Usuarios por beam:

Puede soportar entre 100 y 200 usuarios activos simultáneamente dentro del área de cobertura de un haz, dependiendo de los perfiles de uso (descargas, streaming, VoIP, etc.).

- Limitaciones:

Saturación en zonas densamente pobladas.

Degradación del throughput si todos los usuarios realizan tareas de alto consumo al mismo tiempo.

- Ventaja:

Escala dinámicamente mediante el traspaso de haz o cambio de satélite en la constelación

Capacidad del terminal Starlink Mini (Wi-Fi y red local)

El router integrado opera en Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac), lo cual permite:

Tabla 4

Capacidad del terminal Starlink Mini Fuente: Elaboración propia

Factor	Capacidad estimada
Conexiones simultáneas Wi-Fi	50 a 100 dispositivos (según carga)
Throughput Wi-Fi	Hasta 600 Mbps en 5 GHz (teórico), en práctica 100–200 Mbps compartido
Alcance	Hasta 100 metros en exteriores, menor en interiores

A nivel físico, la limitación está en:

- Ancho de canal Wi-Fi (80 MHz típico).
- Interferencias locales en la banda 5 GHz.
- Congestión si hay muchos dispositivos transmitiendo en simultáneo.

Aplicación a escenarios reales

Escenario: Una escuela rural con 50 estudiantes y 10 profesores.

- Capacidad suficiente para:

Videoconferencias simultáneas (Zoom, Meet) hasta 30–40 usuarios activos.

Uso combinado de navegación, clases online y gestión administrativa.

Si todos realizan descarga masiva o streaming 4K simultáneo, puede saturarse

- Ampliable:

Se puede expandir la red local con routers adicionales (Wi-Fi Mesh o cableado LAN),

pero el límite global es el throughput total satelital (~100 Mbps en práctica).

Escalabilidad técnica del sistema

- Escala horizontalmente añadiendo más terminales Starlink en la misma comunidad.

- Limitación depende del número de usuarios bajo el mismo beam satelital.
- En zonas rurales dispersas, la saturación es muy poco probable.
- Starlink Mini es ideal para unidades de hasta 50–100 usuarios por terminal en tareas de navegación, comunicación y educación.

Es importante señalar que la eficiencia del throughput y la cantidad de usuarios soportados dependen directamente de factores físicos como el ángulo de elevación, las condiciones atmosféricas y la disponibilidad espectral en la banda Ku, lo que impacta los niveles de modulación, la sensibilidad del enlace y, por ende, la capacidad operativa efectiva del sistema Starlink en entornos rurales.

2.2. Red inalámbrica de larga distancia (RILD)

El establecimiento, funcionamiento y puesta en marcha de una red inalámbrica de larga distancia (Wireless Wide Area Network, WWAN) implica la integración de diversos componentes esenciales que en conjunto facilitan la comunicación eficiente y efectiva a través de amplias áreas geográficas. Estos componentes se pueden clasificar en:

2.2.1 Arquitectura de Red

- **Unidades anfitrionas y esclavas:** Una red inalámbrica de larga distancia suele incluir una unidad de red principal que se conecta a una red de área amplia y una unidad de usuario esclava que facilita el acceso de los usuarios dentro de un rango específico, como 15 kilómetros en el caso de la tecnología LoRa (Yang, 2019).
- **Protocolos de comunicación:** se puede mencionar la integración de varias unidades de comunicación como suelen serlo entre 3G y ZigBee permiten un despliegue flexible y una transmisión de datos de forma más eficaz en cuanto a largas distancias (Fenxiong, y otros, 2011).

2.2.2 Componentes

Puntos de Accesos inalámbricos

Se las describe como dispositivos que actúan como intermediarios entre dispositivos finales y la red principal, con la finalidad de permitir una conexión inalámbrica entre múltiples usuarios. Esto proporciona conectividad a los usuarios finales, gestionando el tráfico de datos, asegurando una comunicación fluida dentro de la red. Se describen las características que describen su funcionamiento:

Conectividad de Dispositivos a la red:

- **Interfaz de Comunicación:** Los AP permiten la conectividad de dispositivos como PC, celulares y otros a la red a través de señales sin el uso de cables.
- **Gestión de Clientes:** Estos dispositivos son capaces de establecer numerosas conexiones de forma simultánea logrando controlar la red de datos entre los dispositivos y la infraestructura de la red.

Extensión de la Cobertura:

- **Ampliación del Alcance:** Con la adecuada instalación de AP, se logra extender el alcance que ofrece la red inalámbrica en más áreas para asegurar una señal estable óptimamente en una amplia zona.
- **Eliminación de Zonas Muertas:** Aportan a mejorar la experiencia del usuario al eliminar o reducir aquellas zonas donde el AP no logran captar señal.

Gestión de Tráfico y Calidad de Servicio (QoS):

- **Gestión de Tráfico de Datos:** Los AP avanzados permiten la priorización de tipos de tráfico específicos, que incluyen videoconferencias o transmisión en vivo, para que incluso en condiciones de alta demanda, el rendimiento no se vea comprometido.
- **Control de Congestión:** Son capaces de monitorear el tráfico de la red y asignar recursos dinámicamente para prevenir la congestión, al tiempo que permiten mantener un rendimiento óptimo.

Seguridad de la Red:

- **Control de Acceso y Cifrado:** mediante la utilización de protocolos de seguridad como WPA2 y WPA3 permiten autenticar a los usuarios y la comunicación entre ellos, con la finalidad de evitar anomalías en el acceso no autorizado a la red.
- **Segmentación de la Red:** en este aspecto se puede describir que permiten que se puedan configurar las redes separadas para diversos grupos de usuarios o dispositivos, con el propósito de aumentar la seguridad y consecuentemente el control de su acceso.

Interacción con la Infraestructura de la Red:

- **Interacción con Dispositivos de la Red:** Estos se conectan a switches y routers a través de cables Ethernet como parte de la red existente para una gestión centralizada.
- **Compatibilidad con Estándares:** dentro de este contexto se puede mencionar una amplia variedad de estándares de comunicación que se pueden regir como Wi-Fi 5 (802.11ac) y Wi-Fi 6 (802.11ax), permitiéndoles una interoperabilidad con muchos dispositivos.

Gestión y monitoreo:

- **Gestión Remota:** caracterizado por la presencia de varios AP que incluyen interfaces de gestión en cuanto a configuración de dispositivos, dentro de este detalle se puede recalcar su monitoreo desde una distancia para facilitar las tareas de mantenimiento y consecuentemente en un futuro su actualización.
- **Análisis de Rendimiento:** permiten ofrecer métricas de rendimiento para la red como la intensidad de la señal, los dispositivos conectados y el tráfico de datos, con el objetivo de ayudar a tomar decisiones de forma más acertada y rápida ante cualquier tipo de situaciones.

Procesamiento de señales

- **Generación y control de señales:** Los aparatos generadores de señales de arranque utilizan circuitos de tiempo constante, con la finalidad de gestionar los límites de

frecuencia de las señales inalámbricas y lograr así garantizar un funcionamiento confiable e idóneo. (Hirai, Takahashi, & Taniguchi, 2013)

- **Transmisión de paquetes de datos:** el manejo eficiente de los paquetes de datos es sumamente importante para garantizar la integridad de la comunicación entre las unidades anfitrionas y esclavas (Yang, 2019).

Antenas de alta ganancia

Este tipo de antenas están diseñadas para mejorar la comunicación a larga distancia, aumentando el alcance y la potencia de la señal para cubrir áreas amplias y evitar cualquier tipo de obstáculos. Dentro de este contexto se puede decir que son necesarias en temas de comunicación inalámbrica., siempre y cuando cumplan con los siguientes propósitos específicos:

Amplificación y Dirección de Señal:

- **Concentración de Energía:** Las antenas de alta ganancia funcionan concentrando la energía de frecuencias de radio hacia una dirección particular, mejorando así la fuerza de la señal en dicho ángulo y permitiendo una comunicación de mayor alcance.
- **Tipos de Antenas:**

Direccionales: Esto incluye antenas Yagi y algunas antenas parabólicas que tienen un ancho de haz estrecho y se utilizan regularmente en enlaces de comunicación punto a punto.

Omnidireccionales: Esto incluye antenas que pueden enviar señales a cada ángulo del horizonte, permitiendo así un mayor radio de cobertura alrededor del sitio de instalación.

Mejora de la Calidad de Conexión:

- **Reducción la Interferencia:** Debido a una señal de comunicación más dirigida, la posibilidad de recibir interferencias de otras fuentes se reduce, aumentando así la calidad de la conexión.

- **Aumento del Ancho de Banda Efectivo:** Al enfocar la señal de comunicación en puntos específicos a lo largo de la red, las velocidades de transferencia de datos aumentarán significativamente, mejorando así el rendimiento general de la red.

Extensión del Alcance de Red

- **Conectividad en zonas rurales de difícil acceso:** En estos casos donde la tecnología convencional no puede alcanzar el objetivo, resultan ser muy útiles para impartir la tecnología.
- **Amplias distancias mediante enlaces punto a punto:** Permite establecer una comunicación a modo de enrutar la información desde una Coordina A hasta una Coordina B.

Optimización de la Infraestructura de la Red

- **Reducción de la necesidad de Repetidores:** Se da, en tanto se amplía el alcance de la cobertura de la señal, el uso de repetidores para extender la cobertura se reduce, este caso sería simplificar la infraestructura con el fin de reducir el costo.
- **Facilidad de Instalación:** Si bien normalmente requieren una alineación más o menos precisa, la solución que logran ofrecer es efectiva y bastante duradera, mejorando la conectividad.

Fuente de alimentación inalámbrica

La red puede incorporar dispositivos de suministro de energía inalámbricos que utilizan circuitos resonantes para optimizar la transferencia de energía y garantizar que los dispositivos permanezcan operativos sin conexiones de alimentación directas (Kazushi, Hideki, Yutaka, & Satoru, 2015).

En redes inalámbricas de largo alcance, el suministro de energía a los dispositivos es crucial para su funcionamiento ininterrumpido y efectivo. Aunque hay una nueva tecnología que es capaz de proporcionar energía sin el uso de cables, la transferencia de energía, esta

tecnología todavía está limitada en su aplicación en redes de largo alcance debido a problemas técnicos y de eficiencia. Así, se emplean formas más convencionales de alimentar energía a los dispositivos de la red.

Power over Ethernet (PoE):

El PoE permite transmitir la energía eléctrica en conjunto con los datos a través de un cable ethernet permitiendo evitar la necesidad de utilizar cables de alimentación de forma separada para dispositivos como los puntos de acceso, teléfonos VoIP y cámaras IP.

Beneficios:

- Simplificación de la instalación: básicamente reduce el número total de cables requeridos para facilitar de mejor manera la instalación y posteriormente su mantenimiento.
- Flexibilidad de ubicación: tiene la funcionalidad de permitir colocar los dispositivos en lugares en donde no se tenga la factibilidad de presencia de enchufes de forma cercana.
- Seguridad: aspecto necesario para garantizar que solo los dispositivos autorizados reciban energía y puedan prevenir daños durante su funcionamiento.

Fuentes de Alimentación Externas:

Se puede mencionar que algunos dispositivos de red pueden utilizar adaptadores de alimentación externos para que se puedan conectar a un enchufe regular.

Consideraciones:

- Accesibilidad: Solo se lo puede permitir si se encuentra dentro del alcance de una fuente de alimentación eléctrica.
- Protección: los dispositivos deben contener situaciones de protección contra picos eléctricos y condiciones climáticas severas cuando se los instala al aire libre o cuando es de forma interna.

Energía Solar:

En áreas donde no hay red eléctrica se pueden utilizar energías renovables como es la de sol mediante paneles solares para alimentar los dispositivos de red y mantenerlos encendidos a pesar de cuando ya no exista la presencia del sol.

Ventajas:

- Autonomía: Permite un suministro eléctrico independiente de la red eléctrica.
- Sostenibilidad: Se basa en una fuente de energía limpia y renovable.

Desafíos:

- Costo Inicial: al utilizar paneles solares se debe configurarlos, por lo que puede requerir una inversión de capital considerable.
- Mantenimiento: es recomendable que sea constante y recurrente para proteger su efectividad y duración con el tiempo.

Controles de Red Inalámbrica

Controlar y gestionar una red inalámbrica de larga distancia es importante para garantizar su rendimiento, seguridad y disponibilidad. Por lo que a continuación se detallan los aspectos clave para este proceso:

Monitoreo del Rendimiento:

- Supervisión Continua: Es importante mantener un constante monitoreo sobre la red considerando de nuevo la intensidad de la señal, el ancho de banda y la latencia para poder detectar los posibles problemas de forma rápida y consecuentemente poder resolverlos.
- Herramientas de Monitoreo: Existen diferentes soluciones de software que hacen posible monitorear el estado de la red en tiempo real que permitir solventar de forma correcta y rápida las situaciones cuando aparezcan y consecuentemente permitan proporcionar una perfecta toma de decisiones ante estas.

Gestión de Configuración:

- Control Centralizado: La capacidad de configurar y actualizar los puntos de acceso o dispositivos de antenas dentro de la red a distancia ha permitido reducir de forma considerable la cantidad de tiempo y por ende el esfuerzo que se requiere para gestionarlos a través de un despliegue físico.
- Automatización de Tareas: dentro de este aspecto se puede decir que tareas repetitivas como lo suelen ser actualizar firmware y el cambio de configuraciones se las pueden automatizar.

Seguridad de la Red:

- Autenticación y Cifrado: La red debe utilizar protocolos competentes como WPA3 para ocultar el hecho de que hay tráfico siendo canalizado dentro de ella y para que solo personas autorizadas puedan acceder a la red.
- Detección de Intrusiones: Los sistemas de detección de intrusiones son IDS y pueden ayudar en los procesos de mitigación de amenazas actuales y futuras en la red.

Gestión de Ancho de Banda:

- Priorización de Tráfico (QoS): Asignar niveles de prioridad a diferentes categorías de tráfico de datos para no interferir con aplicaciones de alto ancho de banda cuando la demanda es alta.
- Control de Congestión: Establecer estrategias que minimicen la ocurrencia de congestión en la red y aseguren una asignación equitativa de ancho de banda a todos los usuarios.

Planificación de Capacidad de la Red:

- Análisis de Demanda: Revisar regularmente las expectativas de los usuarios para que la infraestructura de la red pueda expandirse para atender un número creciente de dispositivos y tráfico de datos.

- Escalabilidad: Prever la expansión futura de la red para permitir la adición de nodos adicionales o aumentar la cobertura de acuerdo con los requisitos futuros.

Mantenimiento Preventivo:

- Mantenimiento Programado: Planificar y programar revisiones regulares de mantenimiento del equipo y enlaces para encontrar y corregir cualquier posible fallo antes de que afecte el servicio.
- Gestión de Parcheo: Asegurarse de que todos los sistemas tengan aplicadas las últimas actualizaciones, mejoras y parches para mantener la estabilidad y seguridad.

Informes y Registro:

- Registro Histórico de Eventos: Llevar un registro y base de datos precisa de las configuraciones de los conmutadores, actualizaciones de software y eventos que ocurrieron relacionados con la red es útil en la solución de problemas y formulación de estrategias.
- Mapeo de la Red: Mantener diagramas actualizados de la topología de la red ayuda en la rápida identificación de componentes y en la gestión efectiva de la infraestructura.

La gestión efectiva de una red inalámbrica de larga distancia requiere una combinación de herramientas tecnológicas, procedimientos bien definidos y personal capacitado con el objetivo de proporcionar un servicio confiable y de alta calidad a los usuarios finales.

Sistemas de interfaz de usuario

Interfaces de control: La interacción del usuario se facilita mediante interfaces de pantalla táctil y unidades de control que permiten gestionar fácilmente la configuración y las operaciones de la red (Fenxiong, y otros, 2011).

2.2.3 Procesamiento y Seguridad

Sistema de Seguridad y Encriptación

Las redes inalámbricas de largo alcance dependen en gran medida de la seguridad y la encriptación si se quiere preservar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos persistentes. A continuación, se describen los componentes y mecanismos responsables de asegurar la comunicación en este tipo de redes.

Protocolos de Encriptación

- WEP (Privacidad Equiparada por Cable): Este fue uno de los primeros estándares aceptados para la seguridad operacional inalámbrica, sin embargo, ya no se utiliza debido a fallas cruciales que tiene.
- WPA (Acceso Protegido por Wireless Fidelity): Estos se desarrollaron más tarde debido a las mejoras en la seguridad. Se integraron métodos de encriptación más seguros y mejores métodos de autenticación. Específicamente, WPA2 utiliza el protocolo AES para una encriptación más fuerte (Kaspersky, 2025).
- WPA3: Este es el protocolo de seguridad inalámbrica más reciente en cuanto a autenticación y encriptación y garantiza una protección mejorada contra ciberataques.

Autenticación de Usuarios

- 802.1X: Es un protocolo de red que se utiliza comúnmente para asegurar redes inalámbricas, pero limita el acceso solo a aquellos que han sido autorizados para usar la red.
- Servidores RADIUS: Estos se utilizan junto con 802.1X para autenticar y autorizar usuarios en una red segura.

Redes Privadas Virtuales (VPN):

Túneles empleados: Las VPN utilizan técnicas que involucran el uso de encriptación para complementar el establecimiento de un canal privado seguro a través de un medio de comunicación público, lo que garantiza la seguridad en la transmisión.

Filtrado de Direcciones MAC:

- Control de Acceso: Esto permite que solo los terminales con direcciones MAC predeterminadas accedan a la red, mejorando así la seguridad (Vera Rodríguez, 2021).

Ocultación de SSID:

- Red No Visible: Al apagar la soportación de red de difusión de nombre, la red se hace más difícil de encontrar para los no autorizados (Voiped, 2024).

Actualizaciones y Parcheo de Seguridad:

- Mantenimiento Regular: Es de importancia básica para "fortalecer" esta red, la cobra mantenimiento periódico en sus dispositivos la actualización del firmware susceptible a vulnerabilidades.

Monitoreo y Detección de Intrusiones:

- Sistemas IDS/IPS: Con el uso de sistemas de detección de intrusos y de prevención, se ayuda a la red a activarse cuando ocurren situaciones sospechosas y peligrosas normales.

Políticas de Seguridad:

- Contraseñas Fuertes: El uso de contraseñas robustas y cambiándolas siempre que se pueda disminuye el riesgo de que se pueda obtener acceso no autorizado a los dispositivos.
- Segmentación de la red: El segmentar la red permite que si uno de los anclajes de la granja es atacado, el alcance peligroso de la brecha de seguridad puede llegar a ser minimizado.

Software de Gestión y Monitoreo

El software de gestión y monitoreo de redes para redes de larga distancia es una herramienta importante que garantiza el rendimiento, la seguridad y la disponibilidad de la infraestructura de red. Dentro de este contexto se puede encontrar las funcionalidades básicas que estas soluciones suelen proporcionar:

Monitoreo de Rendimiento:

- Supervisión de Ancho de Banda: en donde se puede medir el uso de ancho de banda en tiempo real para posibles cuellos de botella y poder así asegurar la máxima utilización de los recursos.
- Detección de Fallos: a través de la implementación de alertas hacia los usuarios se detectan interrupciones o degradaciones para que actúen de forma rápida y no los afecten.

Gestión de Configuración:

- Control Centralizado: Permite que las configuraciones y actualizaciones de los dispositivos de red se puedan realizar desde una única interfaz de aplicación, permitiendo reducir la probabilidad de errores y aumentando de forma significativa la eficiencia operativa.
- Automatización de Tareas: de igual forma las tareas rutinarias como una actualización de firmware o un cambio en la configuración pueden ser programadas y automatizadas para aprovechar el tiempo del personal o del equipo en sí (Park Place Technologies, 2025).

Seguridad de la Red:

- Detección de Intrusos: Se examinan y marcan actividades que parecen estar fuera de lugar y accesos no autorizados, con la finalidad para tomar las acciones apropiadas y de forma rápida para evitar hurtos o daños al sistema.
- Gestión de Políticas de Seguridad: en este aspecto se pueden desarrollar y aplicar políticas que permitan regir la seguridad en la red para garantizar el cumplimiento de las regulaciones y estándares establecidos (Corning, 2025).

Visualización de la Topología de Red:

- Mapeo de Dispositivos: Se utiliza para ofrecer una representación gráfica de la red en donde se puede incluir la topología y permita ayudar en la solución de problemas.
- Análisis de Tráfico: Aborda la pregunta sobre cuán grande es el tráfico de la red IP y permite el análisis de todos los tipos de datos, paquetes y transferencia de estos para poder gestionar de mejor manera la red (Park Place Technologies, 2025).

Alertas y Notificaciones:

- Sistemas de Alarma: Estos pueden predecir las condiciones del equipo y la ocurrencia de eventos, con el objetivo de proporcionar actualizaciones en tiempo real sobre situaciones críticas para la misión deseada (Athenalaram, 2023).
- Informes Personalizados: hacen referencia a informes caracterizados por un alto nivel de detalle de cada acción o situación que se presente sobre el estado de la red y su rendimiento.

Escalabilidad e Inflexibilidad:

- Incorporación de Nuevas Tecnologías: Asegura que se puedan agregar nuevos dispositivos y tecnologías sin afectar la estabilidad de la red existente y consecuentemente evitar su funcionalidad.
- Soporte para Redes Heterogéneas: Administración de hardware que opera en entornos con diferentes dispositivos y protocolos para asegurar unidad y operación sin interrupciones (Corning, 2025).

Estas funcionalidades permiten a las organizaciones mantener su infraestructura de red sólida y confiable ante las crecientes necesidades, proporcionando una buena conectividad incluso a largas distancias.

2.2.4 Arquitectura lógica, funcionamiento y protocolos técnicos de redes inalámbricas de larga distancia (RILD)

2.2.4.1. Arquitectura general del sistema RILD

Las redes inalámbricas de larga distancia (RILD) son sistemas de comunicación que permiten establecer enlaces de datos de punto a punto (PtP) o punto a multipunto (PtMP) en bandas no licenciadas, principalmente 5 GHz, con alcances que pueden superar los 30 km en condiciones óptimas de línea de vista (LOS). Estas redes están basadas en tecnologías derivadas de los estándares IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) y IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), pero adaptadas para enlaces exteriores de larga distancia mediante la utilización de antenas direccionales y radios con alta sensibilidad y ganancia (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

Componentes de la arquitectura

1. Nodo principal o estación base (Access Point – AP):
 - Instalado en una torre, mástil o estructura elevada.
 - Emplea radios inalámbricos especializados (Ej.: Rocket Prism, LTU Rocket, Mikrotik BaseBox).
 - Utiliza antenas sectoriales o parabólicas de alta ganancia (19–30 dBi).
 - Administra la conexión de múltiples clientes, gestiona el ancho de banda, control de acceso, ruteo y distribución de IP (DHCP o PPPoE).
2. Clientes (CPE – Customer Premises Equipment):
 - Dispositivos instalados en la ubicación del usuario final (hogar, empresa, escuela).
 - Radios con antenas direccionales (Ej.: LiteBeam AC, PowerBeam, NanoStation, LTU CPE) con ganancias entre 23–34 dBi.
 - Establecen un enlace inalámbrico con el AP manteniendo línea de vista directa.

3. Backhaul:

- Enlaces de alta capacidad, generalmente PtP, que interconectan el nodo principal con la red troncal del proveedor de internet (ISP).
- Usa radios como AirFiber 5X, Ubiquiti AF60 o Mikrotik nRAY, con anchos de canal de hasta 80 MHz y throughput superior a 1 Gbps.

4. Red interna del cliente:

- Router Wi-Fi, switches y dispositivos terminales (PC, laptops, móviles) conectados a la CPE mediante cableado Ethernet o Wi-Fi.

Flujo lógico de la arquitectura

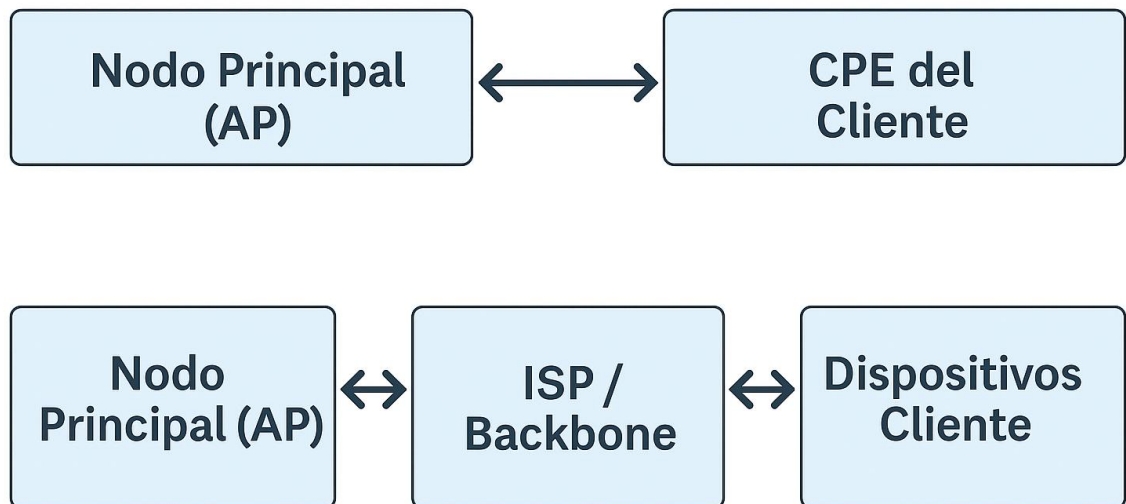


Figura 3. Flujo lógico de la arquitectura. Fuente: Elaboración propia

Funcionamiento general

El AP transmite en modo punto a multipunto o punto a punto según sea necesario.

Cada CPE mantiene un enlace individual con el AP, mediante un protocolo inalámbrico basado en IEEE 802.11, pero optimizado para exteriores con soporte de modulación adaptativa y sincronización de tiempos en algunos casos (Cambium, Wireless Network Design Guide, 2021).

Todo el tráfico de datos fluye del dispositivo cliente hacia la CPE, luego hacia el AP, pasa por el backhaul y finalmente se entrega al proveedor de servicios de internet.

Esta arquitectura permite la creación de redes comunitarias, institucionales o empresariales en zonas rurales, ofreciendo velocidades que oscilan entre 50 Mbps y 500 Mbps por cliente, dependiendo del ancho de canal, condiciones del enlace y cantidad de usuarios activos (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

2.2.4.2. Propagación y enlace físico

Las redes inalámbricas de larga distancia (RILD) se basan en la propagación de ondas electromagnéticas en la banda de 5 GHz, específicamente dentro del espectro 5.470–5.825 GHz, dependiendo de la regulación local (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013). Este rango ofrece un balance adecuado entre capacidad y alcance, aunque es altamente dependiente de la existencia de línea de vista directa (LOS) para mantener enlaces estables y eficientes.

Modelo de propagación – Pérdida en espacio libre (FSPL)

La atenuación principal en este tipo de enlaces se calcula mediante la ecuación matemática para el cálculo de la pérdida en espacio libre (Free Space Path Loss – FSPL) es la siguiente:

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44$$

Donde:

$d = \text{distancia a la antena (km)}$

$f = \text{frecuencia (MHz)}$

Ejemplo aplicado a un enlace real de 3.34 km a 5.8 GHz:

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(3.34) + 20\log_{10}(5800) + 32.44$$

$$FSPL(dB) = 10.48 + 75.27 + 32.44 = 118.19dB$$

La pérdida en espacio libre es de aproximadamente 118.19 dB, la cual es compensada mediante antenas de alta ganancia (entre 25 dBi y 34 dBi) en ambos extremos del enlace.

Factores adicionales en la propagación:

- Atenuación atmosférica:

En 5 GHz, es prácticamente despreciable salvo en condiciones extremas ((ITU-R), Attenuation by atmospheric gases, 2019).

- Pérdidas por obstrucciones:

Críticas. La presencia de árboles, edificaciones o accidentes geográficos degrada el enlace. Se requiere mantener completamente libre el 60% del primer radio de Fresnel (Cambium, Wireless Network Design Guide, 2021).

Cálculo del radio de Fresnel (primer zona):

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}}$$

Donde:

r = radio del primer Fresnel (m)

$d_1 d_2$ = distancias desde los extremos (km)

f = frecuencia (GHz)

d = distancia total (km)

Ejemplo

Para un enlace de 3.34 km, con $d_1 = d_2 = 1.67\text{km}$ y frecuencia $f = 5.8\text{GHz}$

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{1.67 * 1.67}{5.8 * 3.34}} = 6.57\text{m}$$

Es necesario mantener despejado un cilindro virtual de aproximadamente 6.57 metros de radio en el punto medio del enlace.

Modulación y técnicas de enlace:

Modulación adaptativa:

- BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, hasta 256QAM, según la relación señal/ruido (SNR) disponible (802.11ax-2021, 2021)

Tecnologías de capa física:

- OFDM, MU-MIMO (Wi-Fi 5) y OFDMA (Wi-Fi 6).

Parámetros técnicos del enlace:

Tabla 5

Resumen técnico del enlace físico RILD Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor típico
Frecuencia	5.8 GHz
Modulación	Hasta 256QAM
Ancho de canal	20 / 40 / 80 MHz
Ganancia antena AP	19 – 30 dBi
Ganancia antena cliente	25 – 34 dBi
FSPL (3.34 km)	118.19 dB
Alcance máximo	10 – 30 km
Frecuencia	5.8 GHz

2.2.4.3. Arquitectura lógica y flujo de datos

La arquitectura lógica de una red inalámbrica de larga distancia (RILD) se fundamenta en un modelo de transmisión punto a punto (PtP) o punto a multipunto (PtMP), en el cual los dispositivos cliente (CPE – Customer Premises Equipment) se conectan a un nodo principal (Access Point – AP) que gestiona el acceso a la red y el tráfico hacia internet (Cambium, Wireless Network Design Guide, 2021).

Flujo lógico de datos – Descripción técnica

1. Dispositivo cliente (PC, laptop, teléfono):

Conectado al router interno mediante Wi-Fi (IEEE 802.11ac o 802.11ax) o cable Ethernet.

2. Router local del cliente:

Asigna IP privada vía DHCP, maneja NAT (Network Address Translation) y firewall básico.

Gestiona la red interna del usuario (hogar, empresa, institución).

3. CPE (Customer Premises Equipment):

Radio inalámbrico con antena direccional (LiteBeam, PowerBeam, LTU, etc.).

Establece un enlace RF en la banda de 5.8 GHz hacia el nodo AP.

Modula la señal usando tecnologías OFDM, QAM, MU-MIMO u OFDMA (según el estándar IEEE aplicado).

4. Nodo Principal (AP):

Gestiona las conexiones de múltiples CPE mediante protocolo inalámbrico (basado en IEEE 802.11ac/ax).

Realiza control de acceso, QoS, balanceo de carga y distribución de ancho de banda.

Maneja direcciones IP públicas o privadas según configuración (puede operar con NAT o pasar IP pública a través de PPPoE).

5. Backhaul:

Conecta el AP con la red troncal del proveedor de servicios (ISP / Backbone).

Puede ser mediante fibra óptica, microondas, enlaces AirFiber, etc.

6. Internet:

Salida hacia la red pública global.

Flujo lógico del sistema

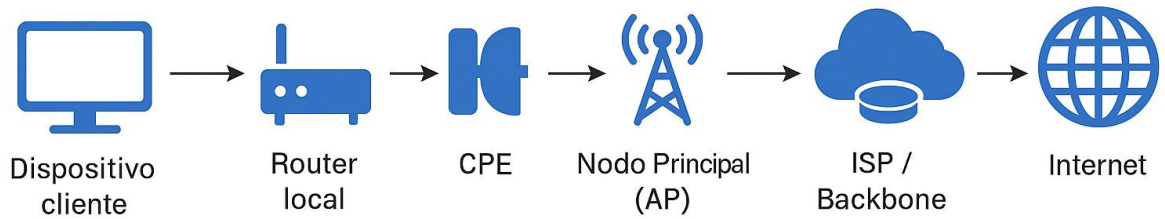


Figura 4. Flujo lógico del sistema. Fuente: Elaboración propia

Funcionamiento del flujo de datos

- El dispositivo cliente genera tráfico IP (navegación, video, VoIP).
- Este tráfico es encapsulado localmente con IP privada dentro del router mediante NAT y es enviado al CPE.
- El CPE convierte las tramas Ethernet a señal RF (5.8 GHz) y las transmite mediante OFDM al AP.
- El AP recibe la señal, la decapsula, reensambla las tramas, gestiona colisiones mediante CSMA/CA, y dirige el tráfico hacia el backhaul.
- Desde el backhaul, el tráfico es entregado al ISP para su salida hacia internet.

Protocolos y tecnologías presentes

- Capa física: Modulación OFDM, QAM hasta 256QAM.
- Capa de enlace: IEEE 802.11ac/ax, MAC, control de acceso CSMA/CA.
- Capa de red: IP, DHCP, NAT, PPPoE.
- Capa de transporte: TCP/UDP estándar.
- Capa de aplicación: DNS, HTTP, HTTPS, VoIP, servicios de datos.

Esquema representativo del flujo lógico

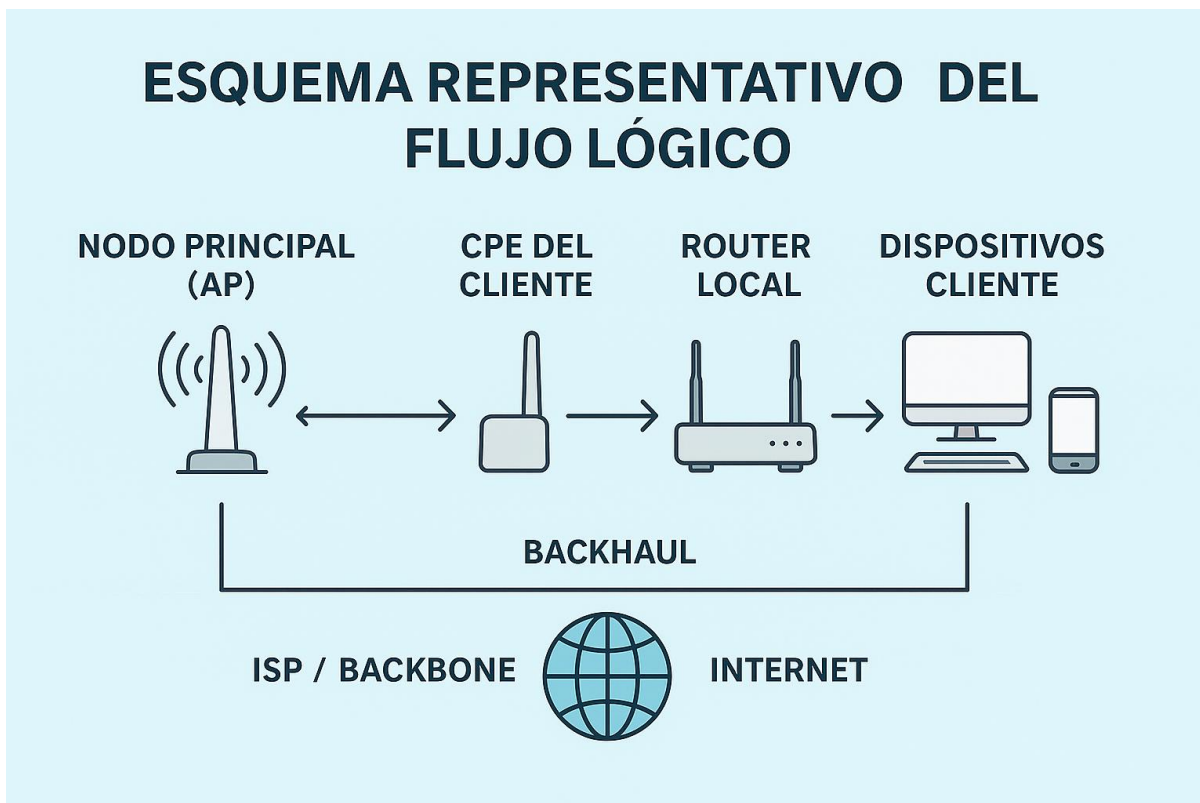


Figura 5. Esquema representativo del flujo lógico. Fuente: Elaboración propia

2.2.4.4. Protocolos en capas OSI aplicadas a RILD

La red inalámbrica de larga distancia (RILD) implementa una pila de protocolos basada en estándares abiertos, particularmente en las especificaciones del IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) y 802.11ax (Wi-Fi 6), así como en los protocolos convencionales de internet. Cada capa del modelo OSI está asociada a funciones específicas, desde la transmisión física de ondas de radio hasta los servicios de aplicación (Cambium, Wireless Network Design Guide, 2021).

Desglose de protocolos OSI en RILD:

Tabla 6

Protocolos en capas OSI aplicadas a RILD Fuente: Elaboración propia

Capa OSI	Protocolo/Tecnología	Función técnica
Capa 1: Física	Banda de 5.8 GHz OFDM Modulación adaptativa (BPSK,	Transmisión de datos vía ondas de radio.

	QPSK, 16QAM, 64QAM, hasta 256QAM) MU-MIMO / OFDMA	Multiplexación en frecuencia y tiempo. Optimización para enlaces largos.
Capa 2: Enlace de datos	IEEE 802.11ac / 802.11ax CSMA/CA (Control de acceso) MAC Wireless Corrección de errores (FEC)	Manejo del acceso al medio. Prevención de colisiones. Segmentación de tramas y control de errores.
Capa 3: Red	IPv4 / IPv6 DHCP NAT PPPoE (según configuración ISP) Ruteo IP	Direccionamiento IP. Asignación de IP locales y públicas. Encapsulación y ruteo de paquetes. Traducción de direcciones mediante NAT.
Capa 4: Transporte	TCP / UDP	Gestión de conexiones confiables (TCP) o no confiables (UDP). Control de flujo y retransmisión.
Capa 5, 6: Sesión/Presentación	TLS/SSL (cifrado en aplicaciones) PPP (en algunos ISP) Codificación de datos	Mantiene sesiones seguras. Gestión de cifrado y presentación de datos.
Capa 7: Aplicación	DNS, HTTP, HTTPS, VoIP, FTP, servicios en la nube, gaming, etc.	Proporciona servicios finales a los usuarios y aplicaciones. Gestión de nombres (DNS) y protocolos de comunicación.

Resumen de funcionamiento:

- La capa física gestiona la modulación, multiplexación y propagación de la señal inalámbrica en 5 GHz.
- La capa de enlace es responsable del acceso compartido mediante CSMA/CA, control de errores y tramas MAC.

- A nivel de red, se asignan direcciones IP locales mediante DHCP y se implementan esquemas de NAT o PPPoE según configuración del ISP.
- Las capas de transporte y aplicación funcionan como en cualquier red TCP/IP, proporcionando servicios comunes como navegación, correo, VoIP, streaming, etc.

2.2.4.5. Capacidad operativa y escalabilidad

La capacidad operativa de las redes inalámbricas de larga distancia (RILD) depende directamente de la combinación de factores físicos, tecnológicos y del entorno. Estos factores incluyen: ancho de canal, modulación, SNR (Signal to Noise Ratio), número de clientes conectados al AP y condiciones de propagación (Cambium, Wireless Network Design Guide, 2021).

Tabla 7

Capacidad operativa del enlace Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor típico
Ancho de canal	20 / 40 / 80 MHz
Modulación	Hasta 256QAM (con SNR adecuado)
Throughput por enlace PtP	150 a 600 Mbps reales (dependiendo del ancho de canal y condiciones)
Throughput por AP PtMP	50 a 300 Mbps compartidos entre clientes
Latencia media	15 a 60 ms (variable según congestión y distancia)
Jitter	10 a 30 ms, mayor con alta carga
Perdida de paquetes	0–5%, dependiendo del SNR y saturación

Capacidad de usuarios por Access Point (AP)

Según especificaciones del estándar IEEE 802.11ac, un AP puede soportar teóricamente hasta 254 dispositivos asociados (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013)

En práctica, para garantizar estabilidad y calidad de servicio (QoS), la recomendación industrial (Cambium, Wireless Network Design Guide, 2021) es mantener entre 30 y 60 usuarios activos simultáneamente en un AP de RILD.

Límite práctico:

Si todos los clientes realizan tareas de alto consumo (videoconferencia, streaming, descargas simultáneas), el rendimiento comienza a degradarse después de 40 usuarios activos aproximadamente.

Factores limitantes:

Colisiones en CSMA/CA:

- A mayor número de usuarios, mayor probabilidad de colisiones y reintentos, lo que aumenta la latencia y reduce el throughput efectivo (Cambium, Wireless Network Design Guide, 2021).

Condiciones de propagación:

- Pérdidas por obstrucción, interferencias de otros enlaces, condiciones meteorológicas y saturación del espectro.

Distancia:

- A mayor distancia, se requiere bajar la modulación para mantener la estabilidad del enlace, lo que reduce el throughput efectivo.

Escalabilidad técnica del sistema

Escala horizontal:

- Se pueden agregar más AP en la torre, sectorizando el área mediante antenas sectoriales (60°, 90°, 120°), lo que permite dividir la carga de usuarios y mejorar la capacidad.

Backhaul:

- Es fundamental que el enlace backhaul (fibra óptica, microondas, AirFiber, etc.) soporte el total de la demanda generada por los clientes conectados.

Ejemplo aplicado – Escenario de una escuela rural:

Escenario: Una escuela con 40 estudiantes y 10 docentes conectados simultáneamente.

Resultado esperado:

- Navegación, correo, clases online y plataformas educativas. Perfectamente soportado.
- Videoconferencias simultáneas para todos. Factible, pero con riesgo de incremento de jitter o latencia si supera los 50 Mbps compartidos.
- Streaming 4K o descargas masivas simultáneas. No recomendable sin balanceo o enlaces dedicados.

2.3. Marco Normativo y Regulatorio

2.3.1 Impacto Ambiental y Regulatorio

Consideraciones ambientales de los lanzamientos espaciales y la órbita de satélites.

El ámbito de la exploración espacial y las telecomunicaciones satelitales está cada vez más preocupado por los efectos ambientales de los lanzamientos espaciales y la órbita de satélites. Varios autores y organizaciones han discutido este tema, según (Roa Grijalba, 2020) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA).

Los lanzamientos espaciales pueden causar una variedad de efectos ambientales, como la emisión de gases de escape y la producción de desechos sólidos y líquidos durante la preparación y ejecución del lanzamiento. En comparación con otros sectores industriales, los

combustibles utilizados en los cohetes, como el queroseno y el oxígeno líquido, pueden emitir gases de efecto invernadero y contaminantes del aire, aunque en menor medida. Además, la caída de etapas de cohetes y otros componentes en lugares sensibles, como océanos y reservas naturales, puede generar riesgos ambientales y de contaminación.

Los satélites pueden causar colisiones y contaminación espacial una vez en órbita. La acumulación de desechos espaciales, como piezas de satélites inactivos y etapas de cohetes, puede empeorar la órbita terrestre baja y poner en peligro la seguridad de las misiones espaciales activas. Esto podría tener un impacto en la sostenibilidad de las actividades espaciales a largo plazo, así como en la utilización de la órbita terrestre para futuras misiones.

Normativas y regulaciones internacionales.

La cooperación, la seguridad y la sostenibilidad de los lanzamientos espaciales y las actividades satelitales dependen de las regulaciones internacionales. El Autor (BellOrín, 2021) ha permitido realizar un gran aporte en cuanto al análisis de este tipo de regulaciones y como estas influyen en el espacio exterior.

El Tratado del Espacio Exterior de 1967 también llamado como el Tratado sobre Principios Básicos del Derecho del Espacio Exterior se la describe como el marco legal internacional más importante que se encuentra dentro de este campo, debido a que el tratado que incluye a Estados Unidos, Rusia, China y otros países establece las bases del derecho internacional del espacio y la prohibición del uso e instalación de armas de destrucción masiva en el espacio.

Otros acuerdos internacionales tratan temas específicos de las actividades espaciales además del Tratado del Espacio Exterior como lo suele ser el Acuerdo de Registro de Objetos Espaciales de 1975, en donde se establece un registro de lanzamientos y fomenta la cooperación en la gestión de desechos espaciales.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) forma parte de una característica importante, debido a que regula la distribución de órbitas y frecuencias en las telecomunicaciones satelitales. Esto se hace para asegurar que los sistemas de comunicaciones por satélite de varios países funcionen de manera coordinada y compatibles entre sí. La comunidad internacional sigue ampliamente las regulaciones y recomendaciones técnicas publicadas por la UIT en este sentido.

Cada país tiene sus propias leyes y regulaciones sobre actividades espaciales. Por ejemplo, la Oficina de Transporte Comercial Espacial de la Administración Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos es responsable de supervisar y regular los lanzamientos espaciales. Dentro de otros países, también existen agencias espaciales nacionales que supervisan y regulan las actividades espaciales.

2.3. Comparación funcional de tecnologías para zonas rurales

De acuerdo con la funcionalidad de los elementos principales que conforman cada una de las redes y lo que los distingue una con otra, se presenta una matriz con los aspectos esenciales a comparar. Sabiendo que se lo utilizaría en una zona rural del Ecuador.

Tabla 8

Análisis Comparativo de la funcionalidad de las redes, ventajas y desventajas de cada una

Fuente: Elaboración propia

Aspectos de Comparación	Redes Satelitales (Starlink)	Redes Inalámbricas Tradicionales
Cobertura Geográfica	<p>Ventaja: Alcance global, diseñada para áreas remotas con baja o nula conectividad terrestre. Satélites LEO cubren zonas sin infraestructura terrestre.</p> <p>Dato: Cubre el 95% del territorio ecuatoriano, ideal para regiones</p>	<p>Desventaja: Limitada por la necesidad de infraestructura física (torres y puntos de acceso).</p> <p>Dato: En Ecuador, solo el 60% de las zonas rurales tienen cobertura inalámbrica.</p>

	como la Amazonía y zonas montañosas.	
Velocidad de Conexión	<p>Ventaja: Ofrece velocidades de hasta 250 Mbps, garantizando transmisiones simultáneas sin interrupciones.</p> <p>Dato: Velocidad promedio de 150 Mbps en pruebas rurales.</p>	<p>Desventaja: Velocidades variables que dependen de la congestión y la calidad de la infraestructura.</p> <p>Dato: Promedio en zonas rurales: 20-50 Mbps.</p>
Latencia	<p>Ventaja: Baja latencia de 20-40 ms, adecuada para aplicaciones en tiempo real como videoconferencias, telemedicina y juegos en línea.</p>	<p>Desventaja: Baja latencia solo en áreas cercanas a nodos principales; en zonas rurales puede superar los 100 ms debido a la distancia y el ruido de la señal.</p>
Costo Inicial	<p>Desventaja: Elevado, con un costo promedio de instalación de \$599 para equipos básicos, excluyendo accesorios adicionales.</p>	<p>Ventaja: Relativamente bajo, ya que depende de infraestructura existente.</p> <p>Dato: Promedio de instalación en zonas rurales: \$200-\$300.</p>
Costo Operativo	<p>Desventaja: Tarifas mensuales fijas entre \$99 y \$110, consideradas altas para usuarios rurales con ingresos limitados.</p>	<p>Ventaja: Costos operativos más bajos.</p> <p>Dato: Tarifas mensuales promedio: \$20-\$50 dependiendo del proveedor y la ubicación.</p>
Requisitos de Instalación	<p>Ventaja: Necesita una antena con vista despejada al cielo; configuración sencilla que puede ser auto instalada en menos de una hora.</p>	<p>Desventaja: Instalación compleja y más costosa, requiere torres y alineación precisa.</p> <p>Dato: Tiempo promedio de instalación: 2-5 días.</p>
Resiliencia ante Desastres	<p>Ventaja: Resistente a inundaciones, terremotos y fallos de energía en tierra, ya que no depende de infraestructura física terrestre.</p>	<p>Desventaja: Alta vulnerabilidad; fallos comunes por tormentas, sismos y cortes de energía eléctrica.</p>

Adaptabilidad en Zonas Rurales	Ventaja: Diseñada para baja densidad poblacional; adecuada para regiones con menos de 10 habitantes/km ² . Dato: Cubre eficientemente comunidades dispersas.	Desventaja: Más eficiente en áreas rurales densamente pobladas (>50 habitantes/km ²) debido a la economía de escala para instalar infraestructura terrestre.
---------------------------------------	--	---

De acuerdo con la tabla 8 en el análisis comparativo tenemos que el análisis de las ventajas y desventajas de las redes satelitales de Starlink y las redes inalámbricas tradicionales revela las especificidades de cada tecnología en términos de su uso en áreas rurales. Por un lado, las redes satelitales son muy accesibles debido a su capacidad para proporcionar cobertura global, lo que las convierte en una solución rentable para lugares con infraestructura terrestre limitada o inexistente. Este sistema, que utiliza satélites en órbita baja de la Tierra, facilita una conectividad más estable y velocidades de transmisión más altas de hasta 250 Mbps, lo que es especialmente útil en aplicaciones intensivas en datos. Sin embargo, esta tecnología sufre limitaciones asociadas con los costos iniciales y operativos porque el equipo requerido es costoso y las tarifas mensuales están fuera del alcance de comunidades con dificultades económicas. Las redes inalámbricas convencionales tienen el beneficio de ser más económicas en la instalación y mantenimiento de estas, lo que resulta de gran utilidad. Esto es especialmente favorable en áreas donde existe una alta concentración de población, ya que se vuelve más rentable el uso de torres y demás. Estas redes son más eficientes en su funcionamiento porque dependen de infraestructura preexistente. A pesar de sus ventajas, la utilización de esta tecnología en regiones dispersas geográficamente y de difícil acceso es complicada debido a la dependencia de infraestructuras, por lo que su cobertura queda restringida. Además, se puede mencionar que hay que hacer notar que las velocidades de conexión pueden ser muy variadas, es decir que son muy cambiantes y generalmente más bajas en relación con las redes satelitales, lo que genera de forma negativa la calidad del servicio en cuanto a aplicaciones en donde se requieran altos volúmenes de datos.

En términos de resistencia ante desastres las redes satelitales muestran una ventaja irrefutable, debido a que no dependen de activos de infraestructura que pueden ser dañados por fenómenos naturales como inundaciones y terremotos. En comparación con las redes inalámbricas tradicionales, en donde son severamente propensas a daños derivados de estos fenómenos generando interrupciones del servicio durante largos períodos de tiempo. Por último, con respecto a la adaptabilidad se puede mencionar que Starlink es más favorable para comunidades que tengan la característica de tener baja densidad poblacional, mientras que las redes tradicionales son más eficientes en regiones rurales con alta densidad poblacional, ya que se puede utilizar la infraestructura existente de manera efectiva.

Capítulo III: Marco Metodológico

Dentro de este capítulo se puede encontrar el detalle de cómo se realizó el proceso de diseño y construcción del sistema.

3.1. Diseño de la investigación

La metodología de investigación adoptada para esta investigación se caracteriza por ser de tipo descriptivo y comparativa, debido a que se adoptó una orientación no experimental y transversal. Dentro de este contexto esta metodología es la idónea para examinar las propiedades técnicas, operativas y funcionales de los componentes tecnológicos que respaldan las redes satelitales Starlink y las redes inalámbricas de larga distancia (RILD).

Este tipo de diseño permite la facilidad de la observación y descripción de las diferentes variables que se presentan dentro de estas redes consideradas sin alterar su comportamiento y asegurando que los resultados obtenidos representen de manera precisa las condiciones de estas tecnologías en el ámbito rural de la provincia de Imbabura. En cuanto al carácter transversal se puede mencionar que la investigación posibilita la recolección de datos en un periodo de tiempo específico, permitiendo optimizar la valoración de los diferentes parámetros como el ancho de banda, la latencia y la cobertura.

El propósito del diseño es proporcionar un análisis comparativo sistemático que facilite la identificación de las ventajas y limitaciones de ambas tecnologías, mediante el establecimiento de una base en cuanto a factores críticos. Dentro de este estudio se toma en cuenta la factibilidad de una implementación, los costos que conllevaría, la adhesión a las regulaciones locales y la capacidad de adaptación a las circunstancias geográficas y sociales de las regiones rurales, por lo que el uso de esta metodología permite no solamente asegurar una evaluación holística y contextualizada en cuanto a la consonancia con los objetivos particulares de la investigación, sino que también permite aspirar a respaldar la selección de la tecnología más apropiada que satisfaga las demandas de conectividad en las zonas con difícil acceso a esta.

3.1.1. Descriptivo – comparativo

Dentro de este aspecto se puede resaltar que este tipo de enfoque permitió realizar un análisis sistemático de las diferentes características técnicas que tienen las redes satelitales Starlink y las redes inalámbricas de larga distancia (RILD), en donde se pudo considerar su desempeño y adecuación dentro de los diferentes entornos rurales. En lo que respecta al enfoque descriptivo se puede mencionar que se centró en detallar elementos técnicos como el rango de cobertura, la latencia en la transmisión de datos, la capacidad de adaptación a condiciones geográficas adversas y los requerimientos tecnológicos para su funcionamiento, lo que permitió construir un panorama claro sobre las particularidades de cada tecnología y permitir ofrecer una mayor información concreta para su evaluación comparativa en los aspectos de las zonas rurales de la provincia de Imbabura.

Con respecto al enfoque comparativo se puede detallar que se abordaron los elementos que les permiten diferenciarse para poder comprender cómo estas tecnologías responden a las diferentes necesidades específicas de conectividad en áreas de difícil acceso, además permitió analizar las diferentes variables como la facilidad de instalación de los sistemas, los

requerimientos de mantenimiento técnico y la capacidad de operar en terrenos con limitaciones geográficas. Con la finalidad de destacar tanto las fortalezas como las áreas de mejora de cada tecnología e identificar los puntos clave que influirían para lograr una implementación efectiva sin la presencia de obstáculos. Mediante la utilización de forma completa de este enfoque descriptivo-comparativo se permitió establecer una base sólida para definir cuál de las alternativas resulta más adecuada para los objetivos planteados y poder garantizar que el análisis estuviera alineado con las demandas técnicas y funcionales propias para este tipo de proyectos investigativos.

3.1.3. Transversal

La metodología de sección transversal utilizada en este estudio permitió la recopilación y análisis de datos de los satélites Starlink y las redes RILD dentro de un período de tiempo establecido, eliminando la necesidad de estudios longitudinales. Este diseño temporal resultó beneficioso para la región de Imbabura, ya que el estudio tenía como objetivo estimar la evaluación precisa de las dos tecnologías en entornos rurales. La recopilación simultánea de datos hizo posible documentar el estado actual de las redes, considerando factores como la latencia, el alcance de cobertura y las tecnologías en uso en el momento de la evaluación.

Elegir un diseño transversal contribuyó a los propósitos prácticos en la ejecución del estudio, ya que permitió que la asignación de recursos se centrara en un análisis detallado de los datos recopilados dentro de un marco temporal específico. Esta metodología ayudó en la identificación y comparación de las capacidades tecnológicas dentro de contextos contemporáneos dados, sin extrapolar resultados a otros períodos diferentes. De esta manera, se obtuvo una comprensión precisa e indicativa de las posibilidades de implementación de ambas tecnologías en los entornos rurales, asegurando que los resultados satisficieran las demandas y limitaciones del período dado.

3.2. Fuentes de información

Para apoyar el análisis comparativo entre las redes satelitales Starlink y las redes inalámbricas de larga distancia (RILD) se utilizó un método con fuentes primarias y secundarias, las cuales fueron seleccionadas con mucho cuidado a fin de preservar la calidad y la validez del estudio. Parte de las fuentes primarias fueron datos obtenidos mediante informes técnicos de Starlink y cobertura de la provincia de Imbabura, así como aportes cualitativos provenientes de entrevistas a especialistas en telecomunicaciones rurales. Gracias a estas fuentes, fue posible el acceso a datos concretos sobre la tecnología en términos de desempeño, cobertura, exigencias técnicas y otros aspectos necesarios para determinar su aplicabilidad en zonas rurales.

Las fuentes secundarias también aportaron un análisis detallado y pertinente, así como su marco teórico con base en la literatura científica reciente y en las leyes y decretos vigentes a la fecha del estudio, esto incluyó trabajos académicos de entre 2019 y 2024 que investigaron el uso y la funcionalidad de las redes satelitales y RILD en el contexto de su implementación. También se consideraron los términos y condiciones de uso del espectro de conectividad rural y la conectividad en el ámbito nacional y en el internacional, así como los estudios previos de la brecha digital en Ecuador.

3.2.1. Fuentes primarias

Las fuentes principales que se emplearon en esta investigación proporcionaron datos directos y precisos para la evaluación comparativa entre las redes satelitales Starlink y las RILD. Dentro de las fuentes consultadas se puede mencionar que sobresalieron los datos técnicos derivados de informes oficiales de Starlink que incorporaron especificaciones de hardware, habilidades de cobertura en áreas rurales y parámetros críticos de desempeño, tales como la latencia y el ancho de banda. Estos informes se los consideró relevantes para poder entender correctamente las capacidades de esta tecnología en escenarios análogos al de la

provincia de Imbabura. Además, se tomaron en cuenta investigaciones llevadas a cabo por entidades locales de telecomunicaciones que registraron el estado presente de la cobertura y rendimiento de las redes inalámbricas en esta región, con la finalidad de proporcionar una información precisa sobre su infraestructura. En otras palabras se puede decir que la integración de estas fuentes primarias aseguró un enfoque sólido y contextualizado para el desarrollo en la dirección correcta de la investigación.

3.2.2. Fuentes secundarias

Dentro de este aspecto se puede mencionar que las fuentes secundarias empleadas en esta investigación comprendieron literatura científica y documental que permitieron la posibilidad de establecer el contexto y base para un análisis técnico y comparativo entre las redes satelitales Starlink y las RILD. Esto se lo puede decir debido a que se realizó una consulta a artículos científicos publicados en el periodo comprendido entre 2019 y 2024 en bases de datos académicas reconocidas tales como Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect, con el objetivo de asegurar la validez y confiabilidad de la información recopilada en cuanto a enfoque sobre el rendimiento de las tecnologías satelitales y las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en contextos rurales, resaltando elementos como normas de transmisión, eficiencia operativa y desafíos de implementación en áreas con condiciones geográficas desfavorables y de difícil acceso. La revisión de la literatura académica facilitó la incorporación de conocimientos previos y estudios de caso internacionales que sirvieron como puntos de referencia para el análisis en el contexto de Ecuador.

Se tomaron en cuenta regulaciones tanto nacionales como internacionales que se rigen actualmente dentro del uso del espectro y las telecomunicaciones, además de incorporar normas internacionales que aseguran la compatibilidad técnica y el acatamiento regulatorio de las redes estudiadas. Mediante la integración de investigaciones anteriores relacionadas con la conectividad rural en Ecuador permitieron proporcionar un marco contextual acerca de las

desigualdades tecnológicas presentes y las soluciones implementadas en otras áreas rurales para solventarlas, con la finalidad de establecer un enfoque holístico para asegurar un análisis sólido que integró teoría, regulaciones y vivencias prácticas para tratar la problemática de investigación.

3.3. Técnicas de procedimientos

3.3.1. Identificación de variables clave

La identificación de variables clave fue esencial para el análisis comparativo de Starlink y RILD, ya que se seleccionaron variables por su relevancia técnica y operativa para la conectividad en zonas rurales. Las principales variables para Starlink son el ancho de banda, la cobertura, los costos y el cumplimiento normativo. Para RILD se priorizaron la eficiencia del espectro, alcance, costos por kilómetro de infraestructura y mantenimiento.

Con respecto a Starlink el ancho de banda es clave para evaluar la conexión en áreas rurales. La cobertura satelital permite acceder a regiones aisladas donde no hay infraestructuras convencionales. Los costos de hardware y suscripción abarcan la compra inicial y los gastos recurrentes, aspectos clave para evaluar la viabilidad económica en comunidades rurales. Cumplir con regulaciones locales asegura la legalidad y sostenibilidad de la tecnología en Ecuador. En cambio, los RILD la eficiencia en el uso del espectro es una variable clave que determina la capacidad de la red para aprovechar de manera óptima los recursos disponibles, un aspecto crítico en áreas con limitaciones de espectro. Las capacidades de alcance miden la distancia efectiva que puede cubrir la infraestructura inalámbrica, un elemento importante y crucial en zonas rurales extensas. El costo por kilómetro de infraestructura refleja los recursos económicos necesarios para desplegar la red en territorios donde las condiciones geográficas pueden aumentar los costos de instalación, y por último el mantenimiento hace referencia en cuanto a su operatividad en donde se analiza las necesidades recurrentes para garantizar el

funcionamiento de la red mediante la evaluación de su adaptabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

La tabla 9 se detalla una comparación de las principales variables clave consideradas en el análisis técnico y operativo de las diferentes tecnologías analizadas, en donde las variables fueron seleccionadas en base a su relevancia para evaluar la viabilidad de implementación en zonas rurales, específicamente en la provincia de Imbabura. El objetivo de esta tabla es ofrecer una visión clara y estructurada que facilite la comparación y análisis de ambas tecnologías.

Tabla 9

Comparación de variables clave entre redes satelitales Starlink y redes inalámbricas de larga distancia (RILD). Fuente: Elaboración propia

Variable Clave	Descripción - Starlink	Descripción - RILD
Ancho de banda (Mbps)	Velocidades de conexión disponibles para usuarios rurales.	-
Cobertura satelital en zonas rurales	Acceso a internet en áreas geográficamente aisladas mediante satélites.	-
Costos de hardware y suscripción	Gastos iniciales y recurrentes asociados al uso del servicio Starlink.	-
Cumplimiento con regulaciones locales	Ajuste y cumplimiento con la normativa de telecomunicaciones en Ecuador.	-
Eficiencia en el uso del espectro	-	Capacidad para aprovechar recursos espectrales limitados de forma óptima.

Capacidades de alcance	-	Distancia efectiva cubierta por la infraestructura inalámbrica.
Costo por kilómetro de infraestructura	-	Costo requerido para implementar la red en áreas rurales por kilómetro.
Mantenimiento operativo	-	Requerimientos constantes para mantener el funcionamiento de la red.

Como se pudo observar en la tabla 9 se detalló las ocho variables clave con la finalidad de permitir identificar las características distintivas de cada tecnología, así como sus potenciales ventajas y limitaciones en términos de conectividad para áreas de difícil acceso.

3.3.2. Recolección de datos

La recopilación de información necesaria para llevar a cabo este estudio se fundamentó en un enfoque metódico y organizado que combinó tanto datos técnicos detallados como vivencias y experiencias prácticas de los involucrados. El propósito de este método era alcanzar una comprensión holística y completa de las diversas tecnologías que fueron objeto de análisis en la investigación. En el contexto de Starlink, se llevó a cabo una recolección exhaustiva de fichas técnicas que describen los distintos dispositivos empleados en el sistema. Este proceso incluyó información detallada sobre el rendimiento del hardware utilizado, así como parámetros operativos cruciales tales como el ancho de banda disponible y la latencia experimentada. Además, se enfatizaron los requerimientos específicos necesarios para realizar la instalación de estos dispositivos en áreas rurales, asegurando así su correcto funcionamiento y accesibilidad en esos lugares. Las fichas técnicas que fueron recopiladas de manera directa a partir de los reportes oficiales emitidos por la empresa, así como por distribuidores que están debidamente autorizados, han ofrecido información fundamental y esencial para llevar a cabo

una evaluación detallada sobre la viabilidad y aplicabilidad de la tecnología en contextos que sean semejantes a los que se encuentran en la provincia de Imbabura.

En el contexto de las RILD se ha incorporado un conjunto de fichas técnicas detalladas que describen diversos equipos que se utilizan con frecuencia para su implementación eficiente. Estos equipos incluyen, entre otros, antenas de alta ganancia que permiten mejorar la señal, routers especializados diseñados para gestionar conexiones de largo alcance, y nodos de transmisión que facilitan la propagación de la señal a través de vastas áreas. Estas fichas proporcionaron la oportunidad de llevar a cabo un análisis detallado de diversos aspectos técnicos, tales como la capacidad de alcance, la eficiencia en el uso del espectro electromagnético, así como los requerimientos relacionados con su mantenimiento. Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de estudios de caso que analizan la implementación de las dos tecnologías en áreas rurales que poseen características geográficas y socioeconómicas similares. Estos estudios han brindado una valiosa evidencia empírica en relación con los resultados que se han logrado, las diversas limitaciones que se han encontrado en el camino, así como las estrategias y mejores prácticas que se han identificado para una implementación efectiva de estas soluciones tecnológicas. Este método que se utilizó garantizó de manera efectiva que la información obtenida no solo fuera relevante, sino también que pudiera ser aplicada de forma directa y efectiva al contexto específico de la investigación que se está llevando a cabo.

3.3.3. Criterios de selección

Los criterios que se han definido para el proceso de selección en este análisis se centran principalmente en realizar una evaluación exhaustiva de las diferentes tecnologías, teniendo en cuenta una serie de aspectos que son cruciales, tales como los aspectos técnicos, operativos y también socioeconómicos, que son fundamentales para llevar a cabo su implementación efectiva y exitosa en áreas rurales. Gracias a estos criterios establecidos, se logró evaluar de

manera efectiva la adecuación y la pertinencia de las redes satelitales Starlink, así como de las redes inalámbricas de larga distancia (RILD), en un contexto particular que se refiere a la provincia de Imbabura. Esto garantizó que las soluciones que se presentaron fueran capaces de atender de forma adecuada las necesidades específicas y los desafíos que enfrentan los habitantes y las instituciones de la región.

El primer criterio considerado en este análisis fue la compatibilidad tecnológica con los entornos rurales, lo que implicó una evaluación exhaustiva de la capacidad que tienen las diferentes tecnologías para funcionar de manera efectiva en áreas donde la infraestructura es limitada o, en algunos casos, completamente inexistente. Este proceso abarcó la evaluación detallada del rendimiento en varios aspectos, tales como la calidad de conexión, la facilidad del proceso de instalación, así como el mantenimiento que se requiriese en comunidades que cuentan con escasos recursos técnicos disponibles. El segundo criterio que se evaluó tuvo en cuenta la capacidad de adaptarse a las diversas condiciones geográficas y climáticas que se presentan en la región, un aspecto de gran importancia en Imbabura. Esto se debe a la variada topografía que caracteriza a este lugar, así como a las limitaciones que podrían surgir de enfrentar condiciones meteorológicas adversas, que pueden incluir fenómenos como lluvias intensas o la presencia de altitudes elevadas que podrían afectar significativamente las actividades en la zona. Finalmente, se incorporó un análisis detallado de la relación entre los costos y los beneficios, lo cual facilitó una evaluación exhaustiva de la viabilidad económica de cada una de las tecnologías consideradas, teniendo en cuenta las particularidades socioeconómicas de la región en cuestión. Esto aseguró que las soluciones propuestas fueran no solo accesibles, sino también sostenibles, adecuándose a las necesidades de las comunidades a las que estaban destinadas. Estos criterios se desarrollaron a partir de un enfoque que combina tanto aspectos técnicos como contextuales, lo cual proporcionó el soporte necesario para llevar a cabo una evaluación que es tanto integral como bien fundamentada.

La tabla 2 presentada tiene como objetivo detallar los criterios clave utilizados para seleccionar la tecnología más adecuada entre las redes satelitales Starlink y las RILD, en donde cada uno de estos criterios se encuentran orientados a evaluar aspectos técnicos y socioeconómicos que determinen la viabilidad de implementación en el contexto rural de Imbabura.

Tabla 10

Criterios de selección para tecnologías de conectividad en zonas rurales. Fuente:

Elaboración propia

Criterio de selección	Descripción - Starlink
Compatibilidad tecnológica con entornos rurales	Analiza y valora el potencial que tienen las diversas tecnologías para funcionar eficazmente en zonas donde la infraestructura es escasa o incluso no existe, teniendo en cuenta factores como la facilidad de instalación y los requerimientos de mantenimiento que estas tecnologías puedan implicar.
Adaptabilidad a condiciones geográficas y climáticas	Analiza cómo las tecnologías responden a desafíos derivados de la topografía variada y condiciones climáticas específicas de Imbabura.
Relación costo-beneficio	Examina la viabilidad económica de las tecnologías en función de las características socioeconómicas de la región y su sostenibilidad para las comunidades aledañas.

Como se pudo observar en la tabla 10 se incluyeron tres criterios fundamentales como la compatibilidad tecnológica con entornos rurales, adaptabilidad a las condiciones geográficas y climáticas de la provincia, y relación costo-beneficio. En cada criterio se detalló una descripción que explica su relevancia y el enfoque de análisis aplicado, permitiendo garantizar una evaluación integral y contextualizada sobre las tecnologías propuestas de estudio.

3.3.4. Análisis multicriterio

El análisis multicriterio de este estudio evaluó variables para identificar la mejor tecnología entre Starlink y RILD según los requisitos locales. Este enfoque permitió evaluar objetivamente cada variable clave asignándoles un peso según su relevancia en cuanto a la conectividad rural de Imbabura. De acuerdo con esta metodología se la diseñó para poder abordar las prioridades locales teniendo en cuenta desafíos técnicos y condiciones geográficas y socioeconómicas.

Para lograrlo se asignaron puntuaciones a cada tecnología según su desempeño en ancho de banda, cobertura, eficiencia espectral y adaptación local. Se aplicaron coeficientes de ponderación según la importancia de cada variable para las comunidades rurales. El análisis multicriterio jerarquizó los resultados, permitiendo identificar la tecnología con mejor balance entre rendimiento y viabilidad. Este enfoque aseguró una selección alineada con los objetivos de conectividad.

3.4. Análisis de la información

El análisis de la información es clave para entender las capacidades y limitaciones de Starlink y las RILD en el área rural de Imbabura. Este proceso organiza datos técnicos, operativos, económicos y normativos en matrices comparativas para evaluar sistemáticamente las variables. El uso de herramientas estadísticas descriptivas permite comparar objetivamente ambas tecnologías, identificando sus fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas. Este enfoque busca ofrecer una visión completa de las capacidades tecnológicas y fundamentar recomendaciones para su implementación en áreas rurales.

El análisis debe interpretarse según las arquitecturas y protocolos de cada tecnología. En Starlink la latencia, jitter y velocidad dependen del enlace satelital Ku, el beamforming y los enlaces intersatelitales. Por su parte las RILD depende del control de acceso CSMA/CA, que provoca mayores colisiones conforme aumenta la densidad de usuarios, así

como de las pérdidas inherentes a la propagación en 5.8 GHz y la sensibilidad a obstáculos que afectan la calidad del enlace.

De igual forma, los resultados obtenidos deben analizarse a la luz de las limitaciones de capacidad operativa. En Starlink, el throughput está condicionado por el número de usuarios bajo un mismo haz satelital y por las restricciones del canal Wi-Fi local del terminal. En redes RILD, la capacidad está delimitada por el ancho de canal disponible, la modulación alcanzable según la relación señal-ruido (SNR) y la cantidad de clientes concurrentes asociados al AP. Estas variables no solo afectan la velocidad y la latencia, sino también la estabilidad general del servicio y la sostenibilidad técnica de cada solución en entornos rurales.

Tabla 11

Análisis técnico de Starlink y RILD. Fuente: Elaboración propia

Variable Técnica	Starlink	RILD
Ancho de banda (Mbps)	Alta velocidad, supera los 100 Mbps en la mayoría de los casos.	Velocidad limitada dependiendo de la infraestructura local.
Latencia	Latencia baja, menor a 20 ms, ideal para videollamadas y streaming.	Latencia media a alta, variable según la distancia entre nodos.
Capacidad de adaptación geográfica	Adaptación a zonas rurales aisladas gracias a su infraestructura satelital.	Cobertura limitada en terrenos montañosos o irregulares.

El análisis técnico revela que Starlink ofrece ventajas significativas en términos de velocidad y estabilidad de conexión, con una latencia baja que garantiza un rendimiento ideal para aplicaciones que demandan alta calidad, como videollamadas. Su diseño satelital permite adaptarse a las condiciones geográficas de zonas rurales aisladas. Las redes RILD presentan limitaciones en velocidad y latencia, dependiendo de la infraestructura existente y la topografía.

Aunque las redes RILD pueden ser efectivas en áreas planas, su desempeño disminuye en terrenos irregulares, donde la infraestructura adicional se vuelve necesaria.

Tabla 12

Análisis operativo de Starlink y RILD. Fuente: Elaboración propia

Variable Operativa	Starlink	RILD
Requerimientos de instalación	Instalación sencilla, equipos preconfigurados.	Infraestructura más compleja, requiere antenas y torres.
Mantenimiento necesario	Mantenimiento técnico mínimo, actualizaciones remotas.	Mantenimiento periódico, especialmente en áreas con climas extremos.
Escalabilidad	Altamente escalable sin necesidad de infraestructura terrestre adicional.	Escalabilidad limitada por la distancia máxima entre nodos.

Desde un punto de vista operativo, Starlink destaca por su facilidad de instalación y mantenimiento, ya que sus equipos son preconfigurados y requieren un soporte técnico mínimo. La escalabilidad es otro punto fuerte, dado que no necesita infraestructura adicional para ampliar su alcance. Por su parte, las redes RILD enfrentan mayores desafíos operativos, ya que dependen de la instalación de antenas y torres, lo que implica mayor tiempo y recursos. Requieren mantenimiento regular, lo que puede ser complejo en zonas con condiciones climáticas adversas.

Tabla 13

Análisis económico de Starlink y RILD. Fuente: Elaboración propia

Variable Económica	Starlink	RILD
Costo inicial	Elevado costo inicial para adquisición de equipos.	Costo inicial más bajo, depende del alcance deseado.

Costo recurrente	Suscripciones mensuales elevadas en comparación con RILD.	Costos recurrentes relacionados con mantenimiento e infraestructura.
Accesibilidad para comunidades rurales	Menos accesible para comunidades con limitados recursos económicos.	Mayor accesibilidad inicial, pero altos costos a largo plazo.

El análisis económico refleja que Starlink tiene costos iniciales y recurrentes significativamente más altos que las redes RILD, lo que limita su accesibilidad para comunidades rurales con recursos económicos limitados. Sin embargo, su menor necesidad de infraestructura puede equilibrar los costos en el largo plazo. Las redes RILD, aunque presentan un costo inicial más bajo, requieren mantenimiento constante, lo que incrementa los gastos a largo plazo. Este análisis destaca la importancia de evaluar no solo el costo inmediato, sino también la sostenibilidad financiera en función del contexto rural.

Tabla 14

Análisis normativo de Starlink y RILD. Fuente: Elaboración propia

Variable Normativa	Starlink	RILD
Cumplimiento de regulaciones locales	Requiere alineación con la regulación ecuatoriana.	Sujeto a permisos de espectro y de infraestructura terrestre.
Autorizaciones para instalación	Autorizaciones simplificadas por ser satelitales.	Es la simple aprobación local para su instalación en torres y antenas.
Compatibilidad con normativas internacionales	Cumple estándares internacionales como ITU y FCC.	Cumple normativas, pero depende del equipamiento utilizado.

Como se pudo observar Starlink cumple con normas internacionales como ITU y FCC, facilitando su implementación legal, debido a que es vital asegurar su conformidad con la normativa ecuatoriana. Por otra parte, las redes RILD enfrentan retos regulatorios necesitando

permisos para espectro e infraestructura, llegando a establecerse que el Starlink tiene un menor impacto ambiental directo que las redes RILD, debido a que estas alteran significativamente el entorno por la construcción de torres y antenas.

3.5. Justificación técnica de los parámetros de evaluación

En este estudio comparativo entre Starlink Mini y RILD, se definieron parámetros técnicos clave para medir el rendimiento de cada sistema. La elección de estos parámetros se basa en estándares internacionales de calidad en telecomunicaciones y en las características de los servicios de conectividad IP.

Los parámetros evaluados se justifican según normativas de la UIT, IEEE y recomendaciones de fabricantes como Ubiquiti, Cambium Networks y SpaceX.

Tabla 15

Parámetros evaluados y su justificación técnica Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Justificación técnica y normativa
Velocidad (Mbps)	Es el indicador de capacidad del canal, tanto en enlace descendente como ascendente. Basado en las definiciones de IEEE Std 802.11ac/ax, describe la cantidad de datos que pueden transmitirse por unidad de tiempo. Refleja directamente la eficiencia espectral, la modulación, el ancho de canal y las condiciones de propagación.
Latencia (ms)	Mide el tiempo que tarda un paquete IP en viajar desde el origen hasta el destino y viceversa. Es crítica para servicios interactivos (videollamadas, VoIP, juegos, educación online). Según la ITU-T G.114, la latencia óptima debe ser menor a 150 ms para voz y tiempo real. Para Starlink es relevante por la naturaleza satelital y para RILD por efectos de propagación y colisiones.
Jitter (ms)	Representa la variación en la latencia entre paquetes consecutivos. Un jitter elevado genera problemas en aplicaciones en tiempo real. Según la recomendación ITU-T

	Y.1541, debe ser inferior a 30 ms para mantener calidad adecuada en servicios VoIP y videoconferencias.
Pérdida de paquetes (%)	Mide la proporción de paquetes que no llegan a su destino. Una pérdida mayor al 1% degrada la calidad en servicios de voz, video o aplicaciones críticas. Según ITU-T Y.1541, el objetivo aceptable en redes IP es mantener la pérdida por debajo de este umbral. También es afectada por interferencias, ruido, colisiones y problemas físicos del enlace.
Tiempo de conexión (min/seg)	Es un parámetro operativo crítico, especialmente en enlaces satelitales como Starlink, donde la antena requiere tiempo para alineación con satélites y establecimiento del túnel de datos. En redes RILD refleja la velocidad de establecimiento de enlaces y la capacidad de la infraestructura. Es relevante para evaluar la disponibilidad y eficiencia operativa del sistema.

Relación normativa y técnica aplicada

- Latencia y Jitter: Basados en ITU-T G.114 y ITU-T Y.1541 como estándares internacionales que definen límites aceptables para redes de datos, voz y video en tiempo real.
- Velocidad y Pérdida de paquetes: Fundamentados en modelos de calidad de servicio (QoS) definidos en IEEE Std 802.11ac-2013, IEEE Std 802.11ax-2021, y estándares de propagación como ITU-R P.676-12 y P.618-13.
- Tiempo de conexión: Parámetro operativo crítico según las características de los sistemas satelitales Starlink, conforme a la documentación técnica de

SpaceX y estándares de disponibilidad de redes inalámbricas de largo alcance como Ubiquiti y Cambium Networks.

Todos los parámetros seleccionados son esenciales para evaluar el desempeño técnico de los sistemas objeto de estudio. La base técnica y normativa asegura que las pruebas cumplen con los estándares de telecomunicaciones, permitiendo comparaciones válidas.

3.6. Plan de Pruebas para Evaluación de Rendimiento

En vista de la disponibilidad actual de las antenas Starlink en el país y con el propósito de fortalecer el análisis comparativo de esta tecnología frente a las RILD se ha creado un plan de pruebas para evaluar su desempeño mediante la obtención de datos sobre el rendimiento y viabilidad de ambas soluciones tecnológicas en zonas rurales de Imbabura, para identificar la opción más eficiente en conectividad.

En Imbabura la evaluación de RILD no necesitará nueva infraestructura debido a operadores locales de redes inalámbricas. Se medirán nodos existentes de una empresa local para probar la conectividad. Esto permitirá un análisis del desempeño real de esta tecnología en áreas rurales sin afectar el servicio.

La metodología de pruebas mide velocidad, latencia, estabilidad y costos de implementación con herramientas especializadas y pruebas en sitios estratégicos.

3.6.1. Objetivos del Plan de Pruebas

El plan de pruebas se encuentra estructurada de la siguiente forma en torno a los siguientes objetivos específicos:

- - Evaluar el rendimiento de Starlink y RILD según velocidad, latencia y estabilidad en diversas condiciones geográficas y climáticas.
- - Evaluar la cobertura de ambas tecnologías en áreas rurales y sus limitaciones.
- Evaluar los costos de implementación y operación, incluyendo inversión inicial y sostenibilidad económica en comunidades rurales.

- - Comparar la facilidad de instalación y despliegue de ambas infraestructuras, evaluando sus requisitos técnicos y logísticos.
- Identificar posibles barreras normativas y regulatorias, evaluando la compatibilidad de cada tecnología con las disposiciones legales vigentes en el país.

3.6.2. Metodología de Pruebas

La ejecución del plan de pruebas se llevará a cabo mediante un enfoque experimental en condiciones reales, estructurado en las siguientes fases:

3.6.2.1. Selección de Ubicaciones de Prueba

Para garantizar un análisis representativo, se seleccionarán zonas rurales de la provincia de Imbabura, considerando factores como:

- Accesibilidad limitada a servicios de conectividad tradicional.
- Diversidad en la geografía (terrenos planos, montañosos y de difícil acceso).
- Diferentes condiciones climáticas y ambientales que puedan afectar el rendimiento de las redes.
- Existencia de nodos de redes inalámbricas de larga distancia (RILD) operativos, gestionados por un proveedor local.

3.6.2.2. Instalación y Configuración de Equipos

- Para Starlink: Se desplegará el kit de usuario (antena satelital, router y software de gestión de red).
- Para RILD: No se instalará nueva infraestructura; en su lugar, se coordinará con la empresa local de telecomunicaciones para realizar pruebas de conectividad utilizando los nodos de red existentes en las zonas rurales seleccionadas.

3.6.2.3. Ejecución de Pruebas de Conectividad y Rendimiento

Se realizarán mediciones periódicas para evaluar el desempeño de ambas tecnologías en los siguientes aspectos:

- Velocidad de conexión: Se medirá la velocidad de descarga y carga mediante herramientas como Speedtest y pruebas de transferencia de archivos.
- Latencia de red: Se medirá el tiempo de respuesta con comandos de ping a servidores nacionales e internacionales.
- Se evaluará la conexión en diversas franjas horarias y condiciones climáticas.
- Cobertura efectiva: Se medirá la distancia máxima para un enlace funcional y estable de cada tecnología.

3.6.2.4. Análisis Económico y de Viabilidad Operativa

Dentro de este aspecto se compararán los costos de implementación y mantenimiento de ambas soluciones considerando lo siguiente:

- Costo inicial: Adquisición de equipos, instalación y configuración.
- Costos recurrentes: Tarifas de suscripción, mantenimiento y reemplazo de componentes.
- Viabilidad económica: se realiza un análisis del retorno de inversión y accesibilidad de tecnologías para comunidades rurales.

3.6.2.5. Análisis Económico y de Viabilidad Operativa

Los datos se organizarán en tablas y gráficos para visualizar el desempeño de cada tecnología en los distintos escenarios. Este análisis ayudará a identificar la solución más eficiente y sostenible para mejorar la conectividad rural.

3.6.3. Variables e indicadores de evaluación

Para una comparación de igual forma las pruebas se centrarán en el análisis de las siguientes variables:

- Velocidad de conexión (Mbps)
- Latencia (ms)
- Cobertura

- Facilidad de instalación
- Costo total (implementación y operación)
- Cumplimiento normativo y regulatorio

3.6.4. Herramientas y Equipos Utilizados

Para la recolección de datos y análisis del desempeño de las redes se utilizarán los siguientes instrumentos y herramientas:

Dispositivos de prueba:

- Starlink Kit mini: Antena, router y software de gestión de red.
- Infraestructura RILD: Nodos de red ya instalados por la empresa local de telecomunicaciones.

Software de Medición:

- Software para pruebas de velocidad y análisis de latencia.
- Monitoreo de tráfico de red para registrar estabilidad y congestión.

Registros Climáticos y Geográficos:

- Datos de temperatura, altitud y clima para correlacionar con el rendimiento de redes.

3.6.4. Tabla Técnica

3.6.4.1. Starlink Mini

El Starlink Mini se la considera como un dispositivo satelital portátil para internet en zonas remotas. Su diseño permite una instalación rápida. (Starlink, 2024)

Especificaciones Técnicas:

Antena:

- Tipo: Matriz electrónica en fase
- Campo de visión: 110°
- Orientación: Manual asistida por software

Dimensiones y Peso:

- Dimensiones: 594 mm x 383 mm x 39.7 mm
- Peso: 2.9 kg (3.2 kg con soporte)

Rendimiento:

- Velocidad de descarga: Hasta 200 Mbps
- Latencia: 20 - 40 ms

Conectividad:

- Wi-Fi: Integrado, compatible con Wi-Fi 6 (802.11 a/b/g/n/ac/ax)
- Cobertura Wi-Fi: Hasta 112 m²
- Puertos Ethernet: No dispone de puertos Ethernet integrados

Consumo de Energía:

- Promedio: 75 - 100 W

Resistencia Ambiental:

- Clasificación: IP67 Tipo 4
- Temperatura de funcionamiento: -30 °C a 50 °C
- Resistencia al viento: Operativo hasta 96 km/h
- Capacidad de derretimiento de nieve: Hasta 40 mm/hora

Contenido del Kit:

- Starlink Mini con Wi-Fi integrado
- Pie de soporte
- Soporte con adaptador de tubo
- Cable de alimentación de CC de 15 m
- Fuente de alimentación
- Enchufe Starlink

3.6.4.2. LiteBeam M5 (LBE-M5-23)

El LiteBeam M5 es un dispositivo conocido como CPE, que opera en la frecuencia de 5 GHz. Este equipo ha sido específicamente diseñado para satisfacer las necesidades de aplicaciones de redes inalámbricas que requieren comunicaciones a largas distancias. Además, proporciona una alternativa económica y al mismo tiempo de alto rendimiento, lo que lo convierte en una opción muy atractiva para quienes buscan mejorar sus conexiones de red sin incurrir en gastos excesivos. (Ubiquiti Networks, 2023)

Especificaciones Técnicas:

Dimensiones y Peso:

- Dimensiones: 362 mm x 267 mm x 184 mm
- Peso: 0.7 kg

Interfaz de Red:

- (1) Puerto Ethernet 10/100

Rendimiento:

- Ganancia de la antena: 23 dBi
- Potencia máxima de salida: 25 dBm
- Consumo máximo de energía: 4W

Fuente de Alimentación:

- Adaptador PoE de 24V, 0.2A (incluido)
- Método de alimentación: PoE pasivo (pares 4, 5+ para la ida y 7, 8 para el retorno)

Rango de Frecuencia Operativa:

- 5150 - 5875 MHz
- Resistencia Ambiental:
- Temperatura de funcionamiento: -40 °C a 70 °C
- Humedad de funcionamiento: 5% a 95% sin condensación

- Resistencia al viento: Hasta 200 km/h

Características Adicionales:

- Protección ESD/EMP: ± 24 kV contacto/aire
- Certificaciones: CE, FCC, IC

3.6.5. Diagramas de Propagación de Señal

El análisis de propagación de señal es clave para planificar y validar enlaces inalámbricos en áreas rurales. Esta sección muestra los diagramas técnicos de la propagación de señal para la red RILD y el sistema satelital Starlink en condiciones reales. Se analizan dos modelos de propagación:

- Starlink: Conecta directamente con satélites LEO, ofreciendo cobertura global sin infraestructura terrestre.
- RILD: Usan enlaces punto a punto y multipunto, basándose en torres de transmisión y condiciones geográficas adecuadas.

A continuación, se presentan los diagramas de propagación de ambas tecnologías:

3.6.5.1. Red Satelital Starlink

La Figura 6 presenta el modelo de propagación de la red Starlink. A diferencia de RILD, Starlink depende de la visibilidad al cielo y condiciones atmosféricas, no de la topografía.

Los parámetros físicos y operativos del sistema son:

- Altitud orbital: 550 km (constelación LEO).
- Frecuencia: Banda Ku (10.7 – 12.7 GHz downlink / 14 – 14.5 GHz uplink).
- Modelo de propagación: Pérdida en espacio libre (FSPL ≈ 172 – 176 dB) más atenuación atmosférica según recomendaciones de la ITU-R P.618-13.

El enlace se establece mediante beamforming dinámico, con seguimiento automático de los satélites. El diagrama resalta que Starlink no requiere torres ni línea de vista terrestre,

sino únicamente un área despejada hacia el cielo, lo cual representa una ventaja operativa significativa en comparación con RILD.

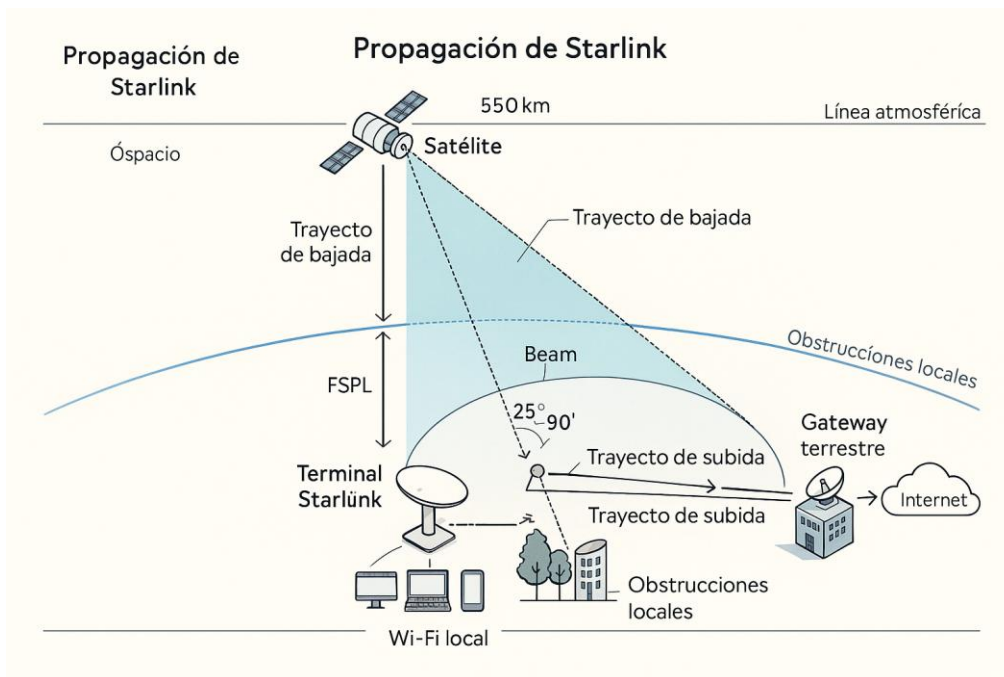


Figura 6. Diagrama de propagación de la red satelital Starlink (Mini), con parámetros típicos de operación.
Fuente: Elaboración propia basada en documentación técnica de Starlink (SpaceX, 2023).

3.6.5.1. Redes Inalámbricas de Larga Distancia (RILD)

La Figura 7 muestra el diagrama de cobertura generado en la plataforma UISP Design, correspondiente al despliegue real de la estación ubicada en Natabuela. Esta estación opera como un punto de acceso sectorial que proporciona servicio a dos clientes: el GAD parroquial y una unidad educativa.

Los parámetros técnicos del enlace son los siguientes:

- Frecuencia: 5240 MHz (canal 48, banda de 5 GHz).
- Ancho de canal: 80 MHz.
- Cliente 1 (GAD): señal esperada -52 dBm, distancia 1.91 km.
- Cliente 2 (Escuela): señal esperada -54 dBm, distancia 3.36 km.

El diagrama evidencia un perfil de terreno con línea de vista (LOS) completamente despejada y con un despeje adecuado del radio de Fresnel, lo cual es esencial para mantener modulaciones altas (256QAM o 64QAM) y asegurar un throughput estable. Además, el mapa

de calor permite identificar la presencia de ruido ambiental e interferencias, factores determinantes para la eficiencia del enlace.

Las Figuras 8 y 9 presentan los perfiles individuales de cada enlace. En ellas se visualiza el perfil topográfico, la evaluación del radio de Fresnel y los parámetros asociados como altura de antenas, tilt y azimuth, lo cual valida que las condiciones de propagación son adecuadas para la operación del enlace en la banda de 5 GHz.



Figura 7. Mapa de propagación y cobertura del enlace RILD generado con UISP. Fuente: Elaboración propia.



Figura 8. Perfil de elevación y parámetros del enlace punto a punto estación-cliente1. Fuente: Elaboración propia en base a simulación en UISP.

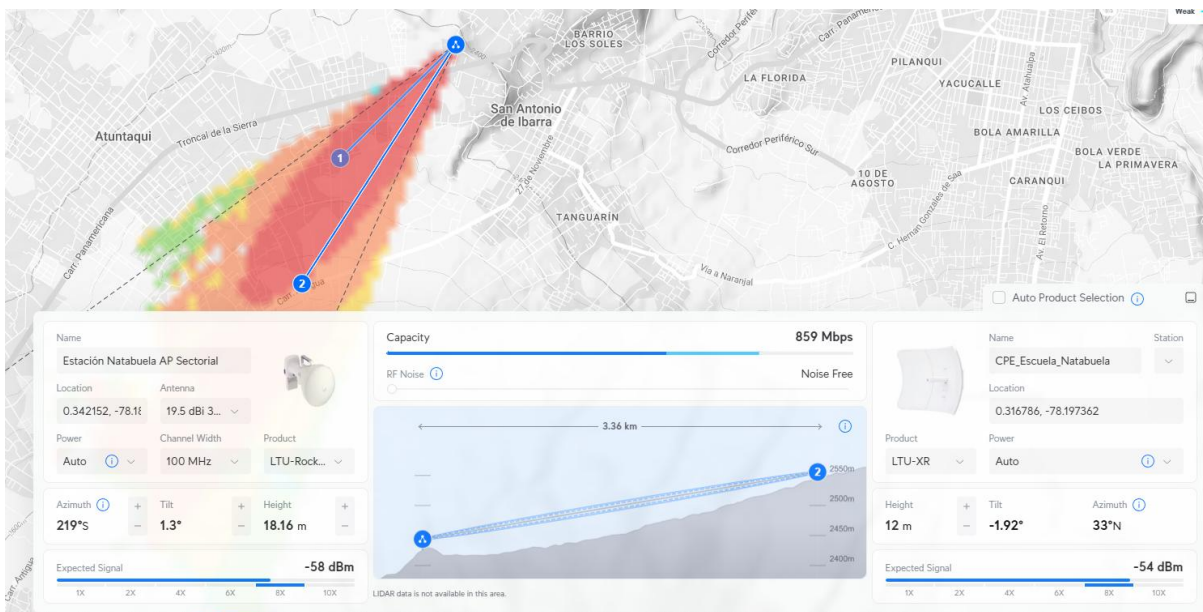


Figura 9. Perfil de elevación y parámetros del enlace punto a punto estación-cliente2. Fuente: Elaboración propia en base a simulación en UISP.

Tabla 16

Comparación cualitativa de la experiencia de uso entre Starlink Mini y red inalámbrica de larga distancia (RILD) Fuente: Elaboración propia

Enlace	Estación - GAD	Estación - Escuela
Distancia (km)	1.91	3.36
Frecuencia (MHz)	5240	5240

Ancho de canal (MHz)	80	80
Expected Signal (dBm)	-52	-54
Modulación	256QAM MIMO	256QAM / 64QAM MIMO
Observaciones	LOS despejado, Fresnel limpio	Margen adecuado, Fresnel con buen despeje

El análisis evidencia que la red RILD está altamente condicionada por factores físicos del entorno, como la presencia de obstáculos, el despeje del radio de Fresnel y la calidad del alineamiento del enlace. En contraste, Starlink elimina esas restricciones, aunque introduce desafíos propios de los enlaces satelitales, como la atenuación en banda Ku y la dependencia de la carga del beam satelital.

Ambos diagramas de propagación refuerzan las diferencias estructurales y operativas entre las tecnologías analizadas, validando el impacto que estos factores tienen en la calidad del servicio en entornos rurales.

3.7. Evaluación técnica basada en el estándar RFC 2544

Este estudio utiliza el estándar RFC 2544 del IETF para evaluar el rendimiento de los enlaces. Este estándar valida equipos y enlaces de red mediante pruebas clave que miden su comportamiento en diversas condiciones operativas.

Inicialmente diseñado para laboratorios, su uso se ha expandido a pruebas de campo por la claridad de sus métricas y su enfoque estructurado. Esta tesis utiliza el RFC 2544 para interpretar las mediciones de latencia, pérdida de paquetes y throughput de herramientas como Ping, iPerf3 y Speedtest.

Las pruebas buscan validar técnicamente y comparar las tecnologías Starlink y RILD en un entorno rural real. Se excluyeron parámetros como system recovery y reset response time, ya que no son aplicables a servicios comerciales activos.

Esta evaluación técnica ofrece una interpretación sólida de los resultados, alineada a estándares internacionales, y permite comparar objetivamente el desempeño y la adecuación de ambas tecnologías para usuarios rurales

Capítulo IV: Pruebas de Funcionamiento

Este capítulo presenta los resultados de las pruebas de Starlink y redes RILD en un entorno rural. Estos resultados deben verse como un reflejo del comportamiento técnico de cada sistema, influenciado por su arquitectura y los protocolos de comunicación.

Las métricas de velocidad, latencia, jitter, pérdida de paquetes y tiempo de conexión dependen de varios factores técnicos. La capa física influye en aspectos como la pérdida en espacio libre, obstrucciones, ganancia de antenas y condiciones atmosféricas. Los protocolos de acceso, como CSMA/CA en redes RILD, generan más colisiones con más usuarios, mientras que Starlink utiliza beamforming dinámico para mejorar el direccionamiento y la calidad del enlace.

De igual manera, el comportamiento observado está directamente relacionado con las restricciones y capacidades operativas de cada tecnología. Es decir, con la capacidad máxima de usuarios soportados, el ancho de canal disponible, el nivel de modulación alcanzado y la eficiencia espectral que cada sistema es capaz de sostener en función de las condiciones del entorno. No es lo mismo el desempeño de un enlace RILD con 20 usuarios en buena línea de vista, que con 60 usuarios en un escenario con degradación del SNR, donde inevitablemente la red debe bajar la modulación de 256QAM a 64QAM o incluso QPSK, afectando directamente el throughput y la estabilidad.

En el caso de Starlink, si bien no depende de un acceso compartido como ocurre en RILD, su rendimiento está condicionado por la capacidad del beam satelital, que, según la documentación técnica, puede atender entre 100 y 200 usuarios simultáneamente dentro de su cobertura, y por el throughput máximo de su terminal Wi-Fi local, que bajo el estándar IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) permite conectar hasta 100 dispositivos, siempre que las condiciones de interferencia local y uso lo permitan.

Por tanto, las pruebas realizadas no son solo una simple medición de desempeño, sino un análisis práctico del comportamiento esperado según los principios de telecomunicaciones aplicados: propagación, modelado de enlaces, protocolos de acceso, arquitectura lógica de red y capacidad operativa. Todo esto bajo el marco de los estándares internacionales como IEEE 802.11ac/ax, ITU-T G.114, ITU-R P.618-13, y las especificaciones técnicas proporcionadas por fabricantes y operadores como SpaceX, Cambium Networks y Ubiquiti.

Este enfoque permite que los resultados aquí presentados sean interpretados con un criterio técnico robusto, y que las conclusiones obtenidas sean aplicables no solo a este estudio, sino también como referencia para futuras implementaciones de soluciones de conectividad en zonas rurales de similares características.

4.1. Entorno y equipos de prueba

Las pruebas de funcionamiento se realizaron con el propósito de evaluar en condiciones reales el desempeño de dos tecnologías de conectividad: el sistema satelital Starlink y una red inalámbrica de larga distancia (RILD) basada en enlaces punto a punto. Ambas soluciones fueron desplegadas y evaluadas en una misma ubicación, con el objetivo de asegurar condiciones homogéneas para ambas tecnologías, tanto a nivel ambiental como logístico.

La ubicación seleccionada para las pruebas corresponde a un entorno rural con limitaciones en el acceso a servicios de conectividad tradicionales como fibra óptica o redes móviles estables. Las pruebas se realizaron en la parroquia San Francisco de Natabuela, dentro del cantón Antonio Ante, provincia de Imbabura. Este lugar presenta características típicas de zonas no urbanizadas: viviendas dispersas, relieve semiaccidentado, vegetación media y una altitud aproximada de 2 450 m.s.n.m.

Durante el periodo de evaluación, las condiciones meteorológicas fueron mayormente favorables. Se registró cielo despejado y clima templado, lo que facilitó la alineación de los

dispositivos y redujo la interferencia externa. No se identificaron obstáculos físicos cercanos que afectaran la línea de vista ni la visibilidad satelital.

Los parámetros medidos como velocidad, latencia, jitter y pérdida de paquetes están directamente condicionados por las limitaciones físicas de propagación (FSPL, obstrucción de Fresnel), así como por el comportamiento de los protocolos de acceso (beamforming en Starlink y CSMA/CA en RILD), tal como se detalló en el Capítulo II.

Equipos utilizados: Starlink Mini

Para la solución de la problemática se utilizó el Starlink Mini una versión portátil del sistema de SpaceX. Este equipo permite una instalación rápida y movilidad, ideal para áreas rurales o de difícil acceso.

El kit utilizado incluyó:

- Antena tipo "Mini Dishy", de bajo peso y tamaño reducido
- Router Wi-Fi integrado (versión Mini)
- Cable de alimentación y adaptador Ethernet
- Aplicación móvil Starlink App para diagnóstico y orientación

La antena fue instalada sobre una superficie plana y elevada, utilizando un soporte fijo. Todo esto fue gracias a su diseño compacto y auto configurable evitó ajustes manuales. La conexión a internet se estableció rápidamente y se mantuvo estable todo el día. Los dispositivos móviles se conectaron al router Starlink Mini por Wi-Fi.

Equipos utilizados: RILD

Se implementó una red Wi-Fi de largo alcance en la banda de 5 GHz mediante un enlace punto a punto. Esta solución simula la conectividad rural entre un nodo principal y un cliente remoto a través de línea de vista.

Los equipos utilizados fueron:

- Punto de acceso Ubiquiti Rocket M5 configurado en modo bridge

- Antena direccional parabólica de 30 dBi para transmisión
- Cliente CPE Ubiquiti NanoStation M5 en el extremo receptor
- Switch PoE con inyector independiente
- Laptop de monitoreo con herramientas como WinBox y AirOS

El montaje se realizó elevando ambos nodos sobre estructuras metálicas, garantizando una línea de vista sin obstrucciones. Se ajustó la alineación según los indicadores de señal y calidad del sistema del fabricante.

Instrumentos y herramientas de medición

Para la recolección de datos se emplearon diversas herramientas que permitieron medir velocidad de transmisión, latencia, calidad del enlace y tiempo de activación. Las principales herramientas fueron:

- Speedtest (Ookla): Para medir velocidad de bajada y subida
- Ping: Para evaluar la latencia media y pérdida de paquetes
- iPerf3: Para pruebas de throughput entre nodos
- Starlink App: Para monitoreo del rendimiento satelital (estado, calidad de señal, obstrucciones)
- Cronómetro digital: Para medir tiempo de conexión inicial desde el encendido
- Registro manual de condiciones ambientales y observaciones de campo

Todo el proceso fue documentado mediante fotografías, capturas de pantalla y hojas de registro, lo cual permitirá posteriormente analizar y contrastar los resultados obtenidos por ambas tecnologías bajo un mismo entorno físico.

4.2. Procedimiento experimental

En cuanto a este aspecto se puede detallar que se buscó evaluar y comparar el rendimiento de Starlink y una red RILD en condiciones reales. Las pruebas se realizaron en la parroquia

San Francisco de Natabuela, cantón Antonio Ante, Imbabura, asegurando condiciones físicas y ambientales iguales para ambas soluciones.

El protocolo de pruebas fue diseñado de manera sencilla pero efectiva, usando un teléfono inteligente que simula el comportamiento de un usuario conectado a la red inalámbrica. El dispositivo se conectó a la red Wi-Fi de cada tecnología, simulando un usuario rural sin acceso a fibra óptica o buena cobertura móvil.

Las pruebas se realizaron en dos fases, una por cada tecnología. En cada fase se siguieron los mismos pasos, facilitando la comparación de resultados.

Fase 1: Evaluación de la red inalámbrica de larga distancia (RILD)

1. El teléfono fue encontrado en el área de cobertura de un AP de la red RILD usada por clientes reales.
2. Se conectó al SSID de cliente y se obtuvo una dirección IP del rango asignado.
3. Se aguardó la confirmación de acceso a internet del dispositivo.
4. Tras establecer la conexión, se realizaron las pruebas siguientes:
 - Velocidad de bajada y subida: 3 repeticiones consecutivas usando la aplicación Speedtest (Ookla). Se calculó el promedio.
 - Latencia promedio: Se utilizó la aplicación PingTools para enviar 50 paquetes ICMP al servidor 8.8.8.8. Se registraron los valores mínimo, máximo, promedio y pérdida de paquetes.
 - Observación cualitativa: Se tomaron notas sobre la estabilidad de navegación, cortes, fluctuaciones o retardos percibidos durante el uso normal.
5. Se tomaron capturas de pantalla de cada medición y fotografías del entorno, incluyendo señal de Wi-Fi y posición del usuario.

Fase 2: Evaluación de la red satelital Starlink Mini

1. Se instaló y energizó el equipo Starlink Minien un área despejada, libre de obstáculos, próxima a donde se realizaron las pruebas de RILD.
2. Se esperó la alineación automática y el establecimiento de la conexión satelital. Se usó un cronómetro para medir el tiempo desde el encendido hasta la disponibilidad efectiva de internet.
3. Una vez habilitada la red, se conectó el teléfono al router Wi-Fi del Starlink Mini.
4. Se repitieron las mismas pruebas descritas en la Fase 1:
 - 3 repeticiones de *Speedtest*
 - Prueba de latencia con 50 paquetes ICMP a 8.8.8.8
 - Registro de estabilidad, cortes o comportamientos anómalos
5. Se documentaron todas las mediciones.

Tabla 17

Resumen de equipos e instrumentos utilizados Fuente: Elaboración propia

Tecnología	Equipo	Función
Starlink	Starlink Mini App Starlink	Acceso satelital – router Wi-Fi Alineación, monitoreo y diagnóstico
RILD	Rocket M5 + NanoStation UISP	Enlace punto a punto Monitoreo del enlace RILD
Ambos	Speedtest, Ping	Medición de velocidad, latencia, jitter, pérdida
Ambos	Cronómetro	Medir tiempo de conexión inicial

Es importante destacar que los resultados obtenidos no solo representan datos aislados de velocidad o latencia, sino que son reflejo directo de las características de las capas físicas y lógicas de cada red, así como de su comportamiento frente a fenómenos físicos como la atenuación, interferencias y gestión del acceso al medio.

Estos resultados no son producto solo de las mediciones empíricas, sino que reflejan de manera directa los principios físicos que rigen la propagación de las ondas electromagnéticas, las restricciones impuestas por los protocolos de acceso al medio (CSMA/CA en RILD y Beamforming satelital en Starlink), así como las capacidades inherentes de modulación y ancho de canal según las condiciones del entorno.

Cabe recordar que las características técnicas, arquitectónicas y operativas de ambos sistemas fueron detalladas previamente en el Capítulo II, lo cual permite entender mejor las diferencias observadas en los resultados que se presentan a continuación.

4.3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos tras realizar las pruebas de campo, enfocadas en comparar el rendimiento de Starlink Mini y una red inalámbrica de larga distancia (RILD) en un entorno rural real. Ambas tecnologías fueron evaluadas bajo las mismas condiciones físicas y climáticas, en la parroquia San Francisco de Natabuela, cantón Antonio Ante, provincia de Imbabura.

Durante el proceso se midieron variables clave como la velocidad de descarga y subida, la latencia, el tiempo de conexión inicial, y la estabilidad de la señal. Además, se tomaron en cuenta aspectos cualitativos como la facilidad de instalación, el comportamiento de la red durante la navegación, y la percepción general del funcionamiento.

Para facilitar su análisis, los resultados se dividen en dos apartados: uno con los datos cuantitativos registrados directamente desde las herramientas de prueba, y otro con las observaciones cualitativas realizadas en el sitio.

Tabla 18

Resumen técnico general Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Starlink	RILD
-----------	----------	------

Tecnología	Satélite LEO, Wi-Fi 5 local	IEEE 802.11ac PtP/PtMP (5 GHz)
Distancia enlace	550–1300 km (satélite)	3.34 km (enlace probado)
Ancho de canal	80 MHz Wi-Fi	80 MHz
Modulación	QPSK, 16QAM (adaptativa)	Hasta 256QAM
Latencia media	46 ms	56 ms
Pérdida de paquetes	0.33%	5.67%
Capacidad práctica usuarios Wi-Fi	50–100	30–60 por AP
Afectación por obstrucción	Media (obstrucciones al cielo)	Alta (Fresnel, LOS, árboles, topografía)
Gestión de acceso	Beamforming + túneles IPsec (satélite)	CSMA/CA (alto riesgo de colisiones)

4.3.1. Resultados Cuantitativos

4.3.1.1. Pruebas de rendimiento – Tecnología Starlink

Se realizaron pruebas para evaluar el rendimiento real de la red Starlink en velocidad, latencia, jitter y estabilidad bajo condiciones típicas de uso. Estas pruebas objetivan el desempeño de la tecnología para compararlo con redes inalámbricas terrestres como RILD.

Starlink es una red satelital de SpaceX que ofrece conectividad de banda ancha en áreas remotas. A diferencia de los satélites geoestacionarios, Starlink reduce significativamente la latencia, aunque su órbita introduce variabilidad y depende de la visibilidad, la densidad de la constelación y la ubicación del usuario.

Se detallan las pruebas de la red Starlink a diferentes horas del día, usando iperf3, ping y Speedtest. Se busca analizar el rendimiento en tráfico TCP, UDP y acceso a servidores externos, imitando condiciones reales de navegación.

- Prueba TCP

Se evaluó la capacidad de transmisión de datos en Starlink con pruebas unidireccionales de TCP usando iPerf3. Estas pruebas buscan evaluar el rendimiento de la red según el tamaño de las tramas, simulando diferentes cargas y ajustando la granularidad del flujo de datos.

Se eligió el protocolo TCP por su conexión orientada y control de congestión. Los resultados evalúan el rendimiento de la red en condiciones estables de transmisión y con control de errores.

Las pruebas se hicieron con un flujo lógico y cinco conexiones paralelas (-P 5), variando el tamaño de paquete entre 64 y 1518 bytes durante 30 segundos cada vez. Todas las pruebas se realizaron en el mismo entorno, conectando el cliente directamente al router Starlink por WiFi.

Parámetros técnicos:

- Herramienta: iperf3 v3.19
- Protocolo utilizado: TCP
- Comando base: iperf3 -c [IP] -p 6000 -l [TAMAÑO] -t 30 -P 5
- Número de flujos paralelos (-P): 5
- Tamaños de trama (-l): 64, 128, 256, 512, 1024, 1280, 1518 bytes
- Duración por prueba (-t): 30 segundos
- Puerto utilizado: 6000
- Cliente: iPerf desde Windows
- Servidor: iPerf desde Windows

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada tamaño de trama, expresados en términos de throughput promedio alcanzado.

Tabla 19

Throughput TCP unidireccional según tamaño de paquete (Starlink) Fuente: Elaboración propia

Tamaño de paquete (Bytes)	Tiempo de prueba (s)	Conexiones paralelas (Streams)	Throughput promedio (Mbps)
64	30	5	35.8
128	30	5	3.62
256	30	5	22.0
512	30	5	9.02
1024	30	5	10.3
1280	30	5	9.08
1518	30	5	13.9

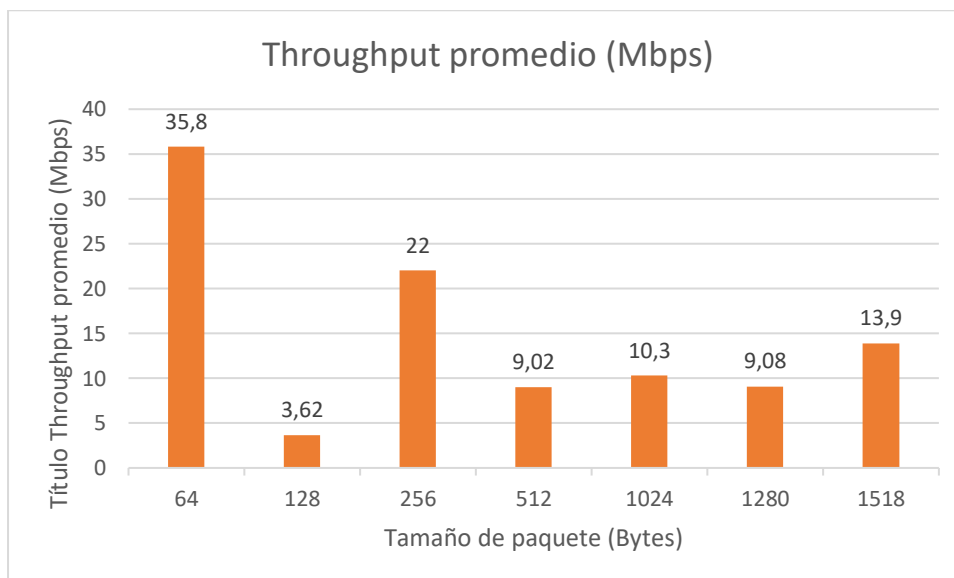


Figura 10. Relación entre tamaño de paquete y throughput promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.

En la figura 10 se representa el comportamiento del throughput promedio alcanzado sobre la red Starlink en función del tamaño de paquete TCP, utilizando cinco flujos paralelos durante 30 segundos. A diferencia de lo observado en redes tradicionales donde el throughput

suele incrementarse con el tamaño de la trama, en este caso se evidencia un comportamiento no lineal con oscilaciones marcadas entre valores consecutivos.

Llama la atención que el mayor rendimiento se obtuvo con paquetes de 64 bytes, alcanzando un throughput promedio de 35.8 Mbps, mientras que con paquetes de 128 bytes se redujo drásticamente a 3.62 Mbps, para luego recuperarse parcialmente con tramas de 256 bytes (22.0 Mbps) y estabilizarse en valores intermedios para tamaños mayores.

Este comportamiento atípico podría atribuirse a factores propios de la arquitectura de red satelital LEO, como la variabilidad en la asignación de recursos, la conmutación entre satélites en órbita o posibles efectos de buffering y control de ventana en los enlaces intermedios. La latencia y pérdida durante la prueba pueden haber afectado el control de congestión de TCP, variando la velocidad efectiva según el tamaño del paquete.

Los resultados indican que, aunque Starlink proporciona conectividad funcional y velocidad aceptable, su rendimiento varía según el tráfico y la transmisión.

- Prueba Bidireccional

Esta prueba evaluó la capacidad de Starlink para manejar tráfico simultáneo bidireccional con TCP. Se usó el parámetro `--bidir` de `iPerf3` para enviar y recibir datos al mismo tiempo entre cliente y servidor. Esta modalidad es útil para caracterizar escenarios como videoconferencias, sincronización de archivos o aplicaciones interactivas, donde se requiere bidireccionalidad.

En redes convencionales, los flujos bidireccionales son generalmente equilibrados. En arquitecturas como Starlink, pueden aparecer asimetrías de rendimiento debido a la latencia, variaciones de visibilidad y el direccionamiento dinámico del tráfico.

La prueba se ejecutó con una duración de 30 segundos y permitió observar las tasas de transferencia alcanzadas tanto en el envío como en la recepción. A continuación se presenta el resultado obtenido y su respectivo análisis.

Parámetros técnicos:

- Herramienta: iperf3 v3.19
- Protocolo utilizado: TCP
- Comando utilizado: iperf3 -c [IP] -p 6000 -t 30 --bidir
- Tráfico en ambas direcciones (cliente ↔ servidor)
- Duración de prueba: 30 segundos
- Puerto utilizado: 6000
- Cliente: iPerf desde Windows
- Servidor: iPerf desde Windows

Tabla 20

Prueba bidireccional TCP – Tecnología Starlink Fuente: Elaboración propia

Dirección del tráfico	Transferencia total (MB)	Throughput promedio (Mbps)
Cliente/Servidor (TX)	1.12	0.276
Servidor/Cliente (RX)	10.2	2.52

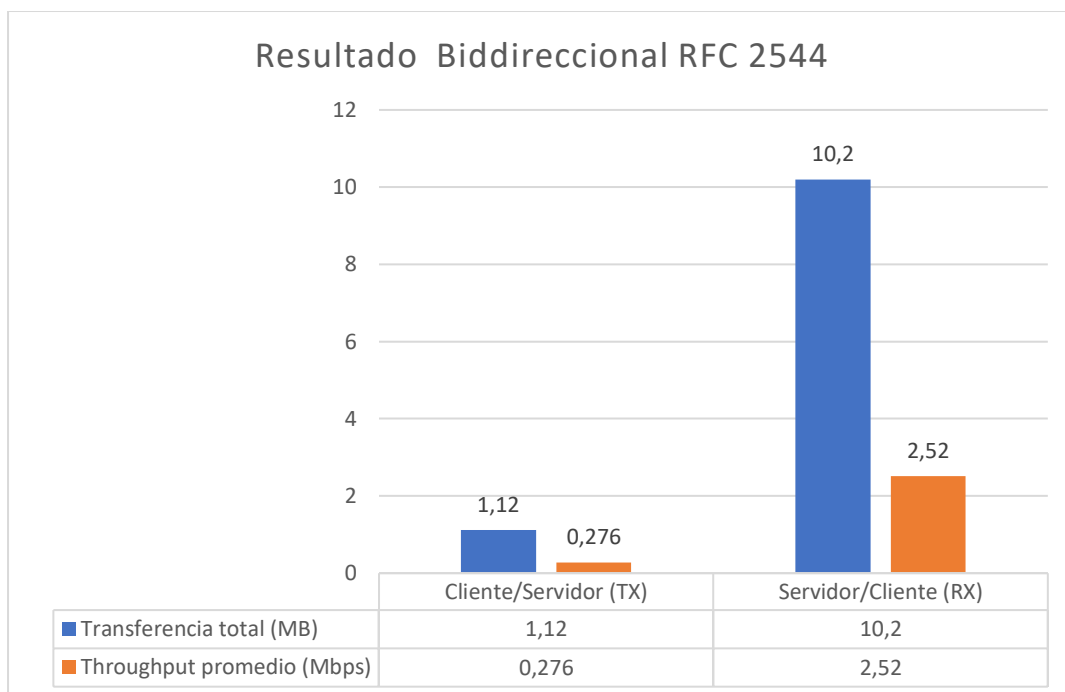


Figura 11. Relación biddireccional promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.

En la figura 11 se presenta el resultado de la prueba bidireccional TCP sobre la red Starlink, la cual consistió en el envío y recepción simultánea de datos entre el cliente y el servidor durante un intervalo continuo de 30 segundos. La herramienta iPerf3 permitió medir de forma independiente el rendimiento en ambos sentidos del canal.

Los valores obtenidos reflejan una clara asimetría en el throughput, donde la dirección Servidor → Cliente (RX) alcanzó un promedio de 2.52 Mbps, mientras que en sentido contrario (Cliente → Servidor, TX) apenas se registraron 0.276 Mbps. De igual forma, la transferencia total de datos fue sustancialmente mayor en el flujo descendente (10.2 MB frente a 1.12 MB).

Este comportamiento puede explicarse por múltiples factores asociados a la arquitectura satelital de Starlink. Entre ellos destacan la gestión dinámica del uplink, el control de congestión de TCP bajo condiciones de latencia variable, y las prioridades internas del sistema que pueden favorecer el tráfico descendente (más común en navegación típica) sobre el ascendente. Las fluctuaciones en la visibilidad de los satélites y la carga de los gateways pueden causar degradaciones en el canal de subida.

Los resultados indican que Starlink ofrece buena recepción de datos, pero su rendimiento en enlaces bidireccionales puede presentar importantes desequilibrios, relevantes en tráfico simétrico.

- Prueba UDP

Se realizaron pruebas de tráfico unidireccional UDP para evaluar la calidad del servicio y la eficiencia de entrega de datagramas en la red Starlink. Este tráfico es crucial para aplicaciones en tiempo real como VoIP, videoconferencias y transmisiones en vivo, donde la latencia y la pérdida de paquetes afectan la experiencia del usuario.

A diferencia de TCP, UDP no tiene control de flujo ni retransmisión, lo que permite observar el comportamiento del canal en términos de jitter y pérdida de datagramas.

Se usó iPerf3 con tasas de envío de 10, 20 y 50 Mbps y longitudes de datagrama de 128, 512 y 1024 bytes. La duración de cada prueba fue de 20 segundos. Se registraron métricas clave como el throughput efectivo, el jitter promedio y el porcentaje de pérdida de paquetes.

Este conjunto de pruebas permite obtener una visión clara de la estabilidad del canal ofrecido por Starlink bajo distintos niveles de exigencia, y establecer comparaciones directas con la red RILD previamente evaluada.

Parámetros técnicos:

- Herramienta: iperf3 v3.19
- Protocolo utilizado: UDP
- Comando base: iperf3 -c [IP] -p 6000 -u -b [TASA] -l [TAMAÑO] -t 20
- Tasas de envío utilizadas: 10 Mbps, 20 Mbps, 50 Mbps
- Tamaños de paquete (-l): 128, 512, 1024 bytes
- Duración por prueba (-t): 20 segundos
- Puerto utilizado: 6000
- Cliente: iPerf desde Windows

- Servidor: iPerf desde Windows

Tabla 21

Throughput UDP unidireccional según tamaño de paquete (RILD) Fuente: Elaboración propia

Tasa de Envío (Mbps)	Tamaño de Paquete (Bytes)	Bitrate Efectivo (Mbps)	Jitter (ms)	Pérdida de Datagramas (%)
10	128	5.09	0.423	8.7%
20	512	9.88	2.095	4.8%
50	1024	4.70	5.284	2.5%

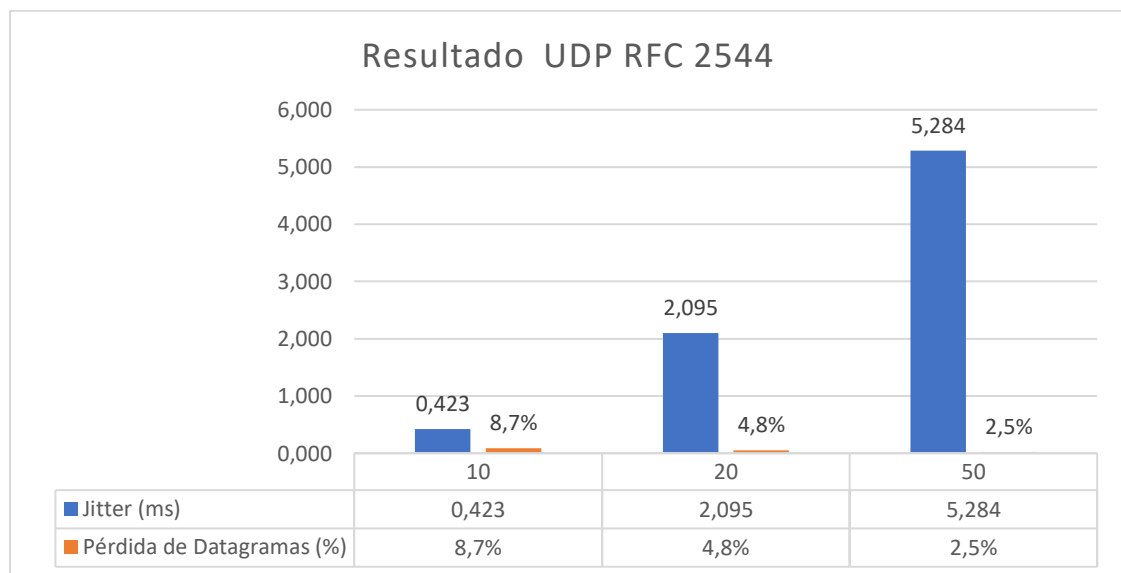


Figura 12. Relación UDP promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.

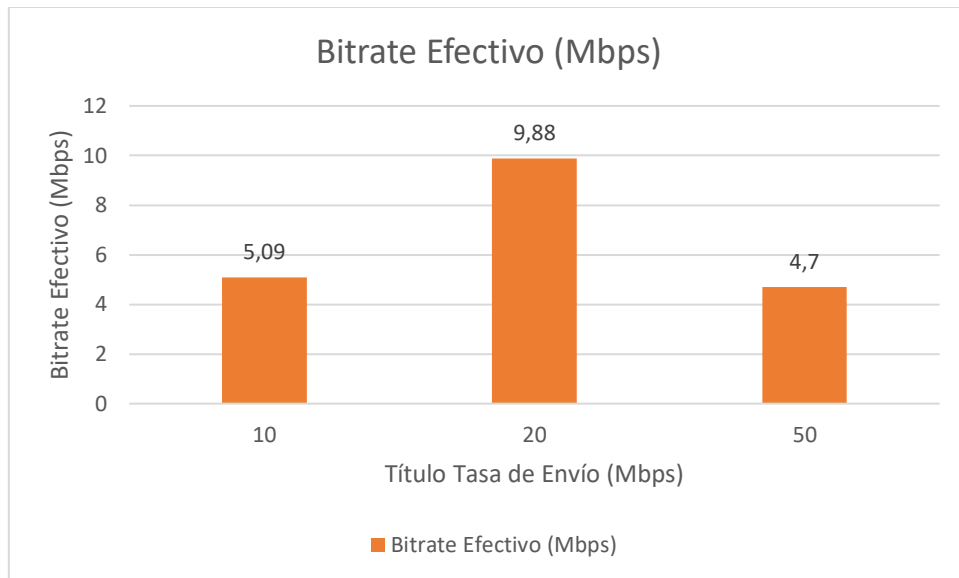


Figura 13. Relación UDP bitrate efectivo obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.

En los gráficos 12 y 13 se visualizan los resultados obtenidos en las pruebas UDP realizadas sobre Starlink, evaluando tres tasas de envío (10, 20 y 50 Mbps) con tamaños de paquete progresivamente mayores (128, 512 y 1024 bytes, respectivamente). Se analizaron tres parámetros clave: bitrate efectivo, jitter y porcentaje de pérdida de datagramas, en concordancia con los lineamientos de la RFC 2544.

Se observó un comportamiento dispar en el rendimiento, destacando el caso de 20 Mbps, donde se alcanzó el mayor bitrate efectivo (9.88 Mbps) con un jitter moderado (2.095 ms) y una pérdida de datagramas aceptable (4.8%). En cambio, a 10 Mbps, el bitrate efectivo fue sensiblemente más bajo (5.09 Mbps) a pesar de la menor exigencia, acompañado de una pérdida del 8.7%, lo cual podría indicar sobrecarga temporal o contención interna en la red satelital.

El caso de 50 Mbps reflejó un fenómeno interesante: si bien se mantuvo una baja pérdida de paquetes (2.5%), el jitter aumentó significativamente (5.284 ms), y el throughput efectivo cayó a 4.70 Mbps, sugiriendo una posible saturación o mecanismos internos de regulación en la terminal Starlink para proteger la estabilidad del canal en condiciones de alta carga.

Los resultados muestran que Starlink, aunque aceptable para aplicaciones UDP, presenta un rendimiento no lineal y puede variar significativamente por debajo de la tasa configurada. Factores como el acceso al enlace satelital, la variabilidad atmosférica y los mecanismos adaptativos pueden explicar estas diferencias, resaltando la necesidad de ajustes para aplicaciones sensibles al retardo y la pérdida.

- Prueba Ping

La prueba de conectividad mediante el protocolo ICMP (Internet Control Message Protocol) constituye una herramienta fundamental para evaluar la calidad básica del enlace hacia destinos remotos. En este caso, se utilizó el comando ping con 50 paquetes ICMP dirigidos al servidor público 8.8.8.8 (Google DNS), con el objetivo de analizar métricas clave como latencia promedio, latencia máxima y porcentaje de pérdida de paquetes.

Este tipo de prueba identificó el retardo y eventos de congestión en redes reales. En redes satelitales como Starlink, las métricas son cruciales por la variabilidad del tráfico en órbita baja. Se muestran los resultados de tres ejecuciones independientes de la prueba, junto con un análisis comparativo.

Tabla 22

Resultados de latencia hacia 8.8.8.8 en red RILD (prueba ICMP) Fuente: Elaboración propia

Prueba	Paquetes enviados	Paquetes recibidos	Pérdida (%)	Latencia mínima (ms)	Latencia máxima (ms)	Latencia promedio (ms)
1	50	50	0%	17	1601	133
2	50	49	2%	26	1989	232
3	50	50	0%	21	1103	120

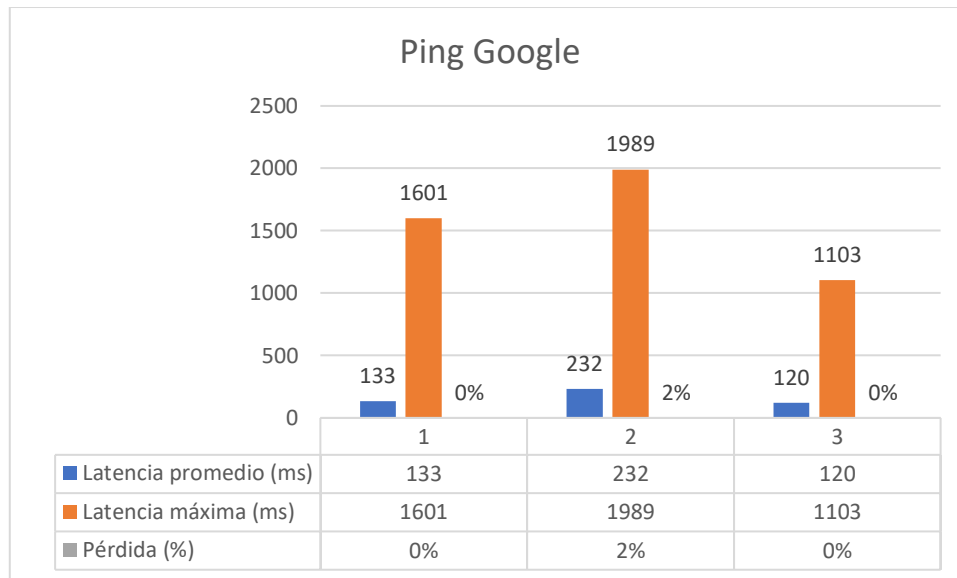


Figura 14. Latencia promedio y máxima hacia 8.8.8.8 en red Starlink. Fuente: Elaboración propia

Como se pudo observar los 50 paquetes ICMP enviados a 8.8.8.8 mostraron alta variabilidad en los tiempos de respuesta, típica de enlaces satelitales como Starlink. La latencia promedio varió de 120 ms a 232 ms, con picos de hasta 1989 ms en la segunda prueba y una pérdida de paquetes del 2%.

La primera y tercera pruebas no mostraron pérdida, con latencias máximas de 1601 ms y 1103 ms. Este comportamiento indica que, aunque la red entrega todos los paquetes normalmente, puede sufrir picos de latencia debido a cambios de enlace satelital, congestión temporal en gateways o ajustes en el enrutamiento.

En comparación con tecnologías cableadas o redes inalámbricas terrestres, la latencia en Starlink puede ser muy variable, afectando aplicaciones sensibles al retardo como el gaming, videollamadas y protocolos que requieren respuestas inmediatas.

Estos resultados destacan la necesidad de incluir compensación de jitter y buffering adaptativo en servicios sensibles sobre enlaces satelitales exponiendo en evidencia el desafío que aún representa garantizar consistencia en la calidad de servicio sobre este tipo de infraestructura.

- Prueba de Velocidad de internet – Speedtest

Con el objetivo de caracterizar se realizaron pruebas con Speedtest para evaluar el rendimiento de la red Starlink desde la perspectiva del usuario, midiendo velocidad de descarga, subida, latencia y jitter.

Speedtest estima el rendimiento del canal simulando transferencias de archivos de servidores globales. En este caso, las pruebas fueron ejecutadas contra servidores nacionales en Ecuador (Quito e Ibarra), con el fin de reflejar un escenario de uso cotidiano y regionalmente representativo.

Se hicieron tres mediciones en diferentes momentos, obteniendo datos de la plataforma web para observar el rendimiento dinámico de Starlink bajo condiciones variables de red y congestión.

Este conjunto de pruebas complementa los ensayos con iPerf e ICMP, ofreciendo una visión integral del rendimiento desde la perspectiva del usuario final.

Tabla 23

Resultados de prueba de velocidad de internet con Speedtest – Starlink. Fuente: Elaboración propia

Prueba	Velocidad de descarga (Mbps)	Velocidad de subida (Mbps)	Latencia (ms)	Jitter (ms)
1	40.80	13.75	49	97
2	22.60	12.11	42	79
3	12.77	11.64	76	381

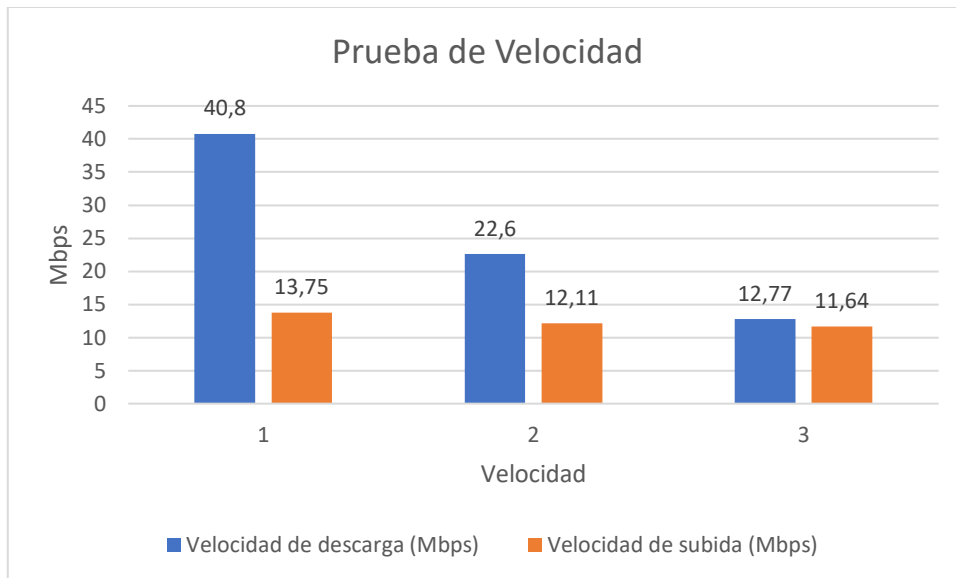


Figura 15. Velocidades de descarga y carga obtenidas mediante Speedtest en red Starlink. Fuente: Elaboración propia

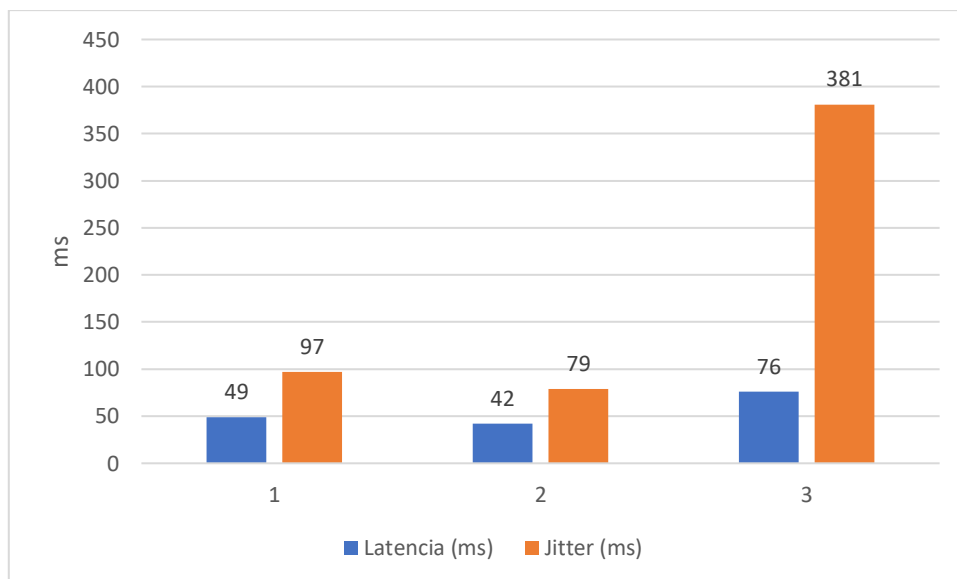


Figura 16. Latencia y Jitter mediante Speedtest en red Starlink. Fuente: Elaboración propia

Como se pudo observar los resultados de Speedtest muestran variabilidad en el rendimiento de Starlink. Se observó una disminución en la velocidad de descarga a través de las tres pruebas: 40.8 Mbps, 22.6 Mbps y 12.77 Mbps. La disminución puede deberse a congestión temporal, cambios de satélite o asignación dinámica de recursos en la red LEO.

La velocidad de subida se mantuvo más estable, entre 11.64 Mbps y 13.75 Mbps, indicando un mejor desempeño del canal de retorno.

La latencia varió entre 42 ms y 76 ms, baja para redes satelitales y coherente con la arquitectura de Starlink. El jitter mostró gran variabilidad, alcanzando 381 ms en la tercera prueba, lo que podría afectar aplicaciones en tiempo real como videoconferencias o VoIP.

Los resultados muestran las fortalezas y limitaciones de Starlink en entornos residenciales: altas velocidades de descarga, pero con variabilidad según la carga de red y condiciones satelitales. A pesar de un mejor rendimiento que muchas conexiones rurales, la variabilidad en jitter y velocidad dificulta mantener una calidad de servicio constante en aplicaciones exigentes.

4.3.1.2. Pruebas de rendimiento – Tecnología RILD

En esta sección se presentan los resultados de rendimiento de la RILD, obtenidos con iperf3, ping y speedtest, siguiendo los lineamientos RFC 2544. Se midieron parámetros en un cliente conectado a la red RILD, enfocándose en el tamaño de paquete, pruebas bidireccionales, tráfico UDP, y métricas de latencia y velocidad en servicios de Internet.

Se realizaron pruebas en diferentes horarios para obtener promedios representativos y reflejar las condiciones de carga habituales. Se presentan los resultados obtenidos.

- Prueba TCP

Se midió el throughput con tramas de Ethernet de 64 a 1512 bytes usando iperf3 en TCP, con cinco flujos durante 30 segundos cada prueba.

Se observó que a medida que aumenta el tamaño de los paquetes, el rendimiento de la red mejora progresivamente, alcanzando su máximo valor en 1512 bytes, lo cual es coherente con la eficiencia de transmisión de tramas grandes en enlaces Wi-Fi.

El valor más bajo se evidenció con tramas de 64 bytes, debido a la sobrecarga de headers y mayor cantidad de paquetes por segundo.

Estos resultados reflejan que, en la red RILD, la eficiencia del canal mejora significativamente con tramas superiores a 512 bytes, reduciendo el overhead por paquete.

Parámetros técnicos:

- Herramienta: iperf3 v3.19
- Protocolo utilizado: TCP
- Comando base: iperf3 -c [IP] -p 6000 -l [TAMAÑO] -t 30 -P 5
- Número de flujos paralelos (-P): 5
- Tamaños de trama (-l): 64, 128, 256, 512, 1024, 1280, 1518 bytes
- Duración por prueba (-t): 30 segundos
- Puerto utilizado: 6000
- Cliente: iPerf desde Windows
- Servidor: iPerf desde Windows

Tabla 24

Throughput TCP unidireccional según tamaño de paquete (RILD) Fuente: Elaboración propia

Tamaño de paquete (Bytes)	Tiempo de prueba (s)	Conexiones paralelas (Streams)	Throughput promedio (Mbps)
64	30	5	27.4
128	30	5	28.4
256	30	5	27.8
512	30	5	29.9
1024	30	5	28.9
1280	30	5	20.3
1518	30	5	24.7

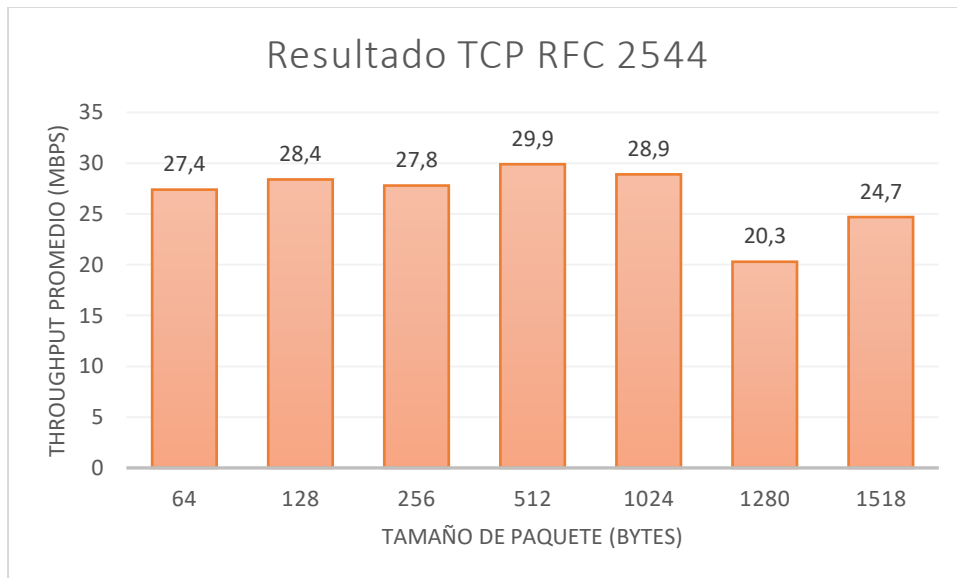


Figura 17. Relación entre tamaño de paquete y throughput promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.

Se observa que el throughput mejora a medida que aumenta el tamaño del paquete hasta los 512 bytes, alcanzando un pico de 29.9 Mbps. A partir de ese punto, se estabiliza ligeramente hasta los 1024 bytes, pero cae drásticamente en 1280 bytes. Esto puede estar relacionado con procesos de fragmentación, buffers de recepción o interferencias puntuales. A 1518 bytes el rendimiento vuelve a ser aceptable, lo que sugiere un comportamiento no lineal vinculado al hardware y condiciones específicas del enlace.

Estos valores reflejan la evolución positiva del rendimiento conforme aumenta el tamaño del paquete, lo cual es coherente con el comportamiento esperado del protocolo TCP bajo condiciones óptimas de propagación y baja pérdida.

- Prueba Bidireccional

En la prueba bidireccional TCP realizada durante 30 segundos, se evidenció una asimetría significativa entre las direcciones de envío y recepción. El flujo Cliente/Servidor alcanzó un throughput de 21.6 Mbps, mientras que en sentido inverso apenas se alcanzaron 3.24 Mbps.

Este comportamiento puede atribuirse a factores como el control de congestión del protocolo TCP, la capacidad del AP en modo uplink, o incluso interferencias puntuales en el canal compartido de subida. También se considera el impacto de CSMA/CA, donde la contienda afecta de forma distinta los tiempos de acceso al medio según el nodo emisor.

Parámetros técnicos:

- Herramienta: iperf3 v3.19
- Protocolo utilizado: TCP
- Comando utilizado: iperf3 -c [IP] -p 6000 -t 30 --bidir
- Tráfico en ambas direcciones (cliente ↔ servidor)
- Duración de prueba: 30 segundos
- Puerto utilizado: 6000
- Cliente: iPerf desde Windows
- Servidor: iPerf desde Windows

Tabla 25

Prueba bidireccional TCP – Tecnología RILD

Dirección del tráfico	Transferencia total (MB)	Throughput promedio (Mbps)
Cliente/Servidor (TX)	77.6	21.6
Servidor/Cliente (RX)	11.6	3.24

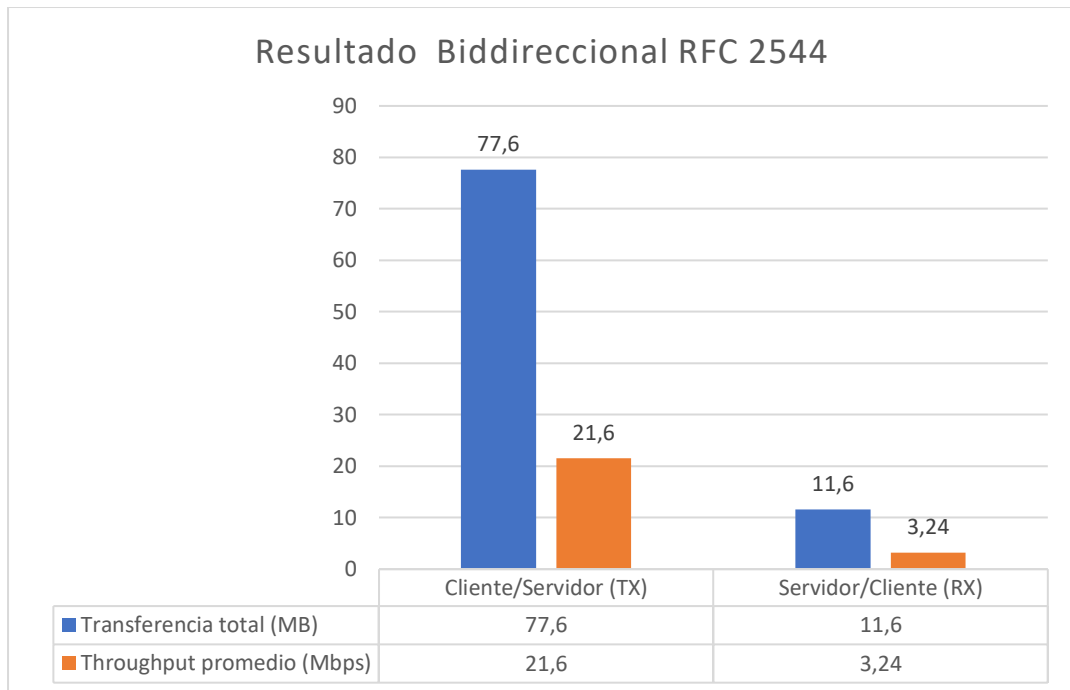


Figura 18. Relación bidireccional promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.

En la prueba bidireccional TCP realizada durante 30 segundos, se evidenció una asimetría significativa entre las direcciones de envío y recepción. El flujo Cliente/Servidor alcanzó un throughput de 21.6 Mbps, mientras que en sentido inverso apenas se registraron 3.24 Mbps.

Este comportamiento puede atribuirse a varios factores propios de las redes WiFi. Por un lado, el protocolo TCP implementa mecanismos de control de congestión que reaccionan ante pérdidas o fluctuaciones, reduciendo automáticamente la velocidad de transmisión. Además, la capacidad del punto de acceso (AP) para manejar tráfico en modo uplink suele ser más limitada que en modo downlink, especialmente cuando se trabaja en la banda de 6 GHz, donde la atenuación por obstáculos y la menor cobertura pueden afectar el rendimiento.

También influye el mecanismo de acceso al medio CSMA/CA, que introduce contienda entre los dispositivos conectados. Esto significa que tanto el cliente como el AP deben esperar su turno para transmitir, y si hay colisiones o interferencias, el rendimiento puede verse reducido en una de las direcciones.

La imagen 20 muestra claramente estos resultados, reflejando cómo el entorno, la banda de operación y el comportamiento del protocolo TCP pueden afectar de forma distinta la eficiencia de un enlace bidireccional.

- Prueba UDP

Para analizar el comportamiento del canal inalámbrico bajo diferentes niveles de exigencia, se realizaron tres pruebas con tráfico UDP unidireccional variando tanto la tasa de envío como el tamaño de los paquetes. A diferencia de TCP, UDP no implementa control de flujo ni retransmisión, lo que permite generar una carga constante sobre el canal y observar de forma directa métricas como la pérdida de datagramas, el jitter y el throughput efectivo.

En estas pruebas se enviaron datagramas a velocidades de 10, 20 y 50 Mbps utilizando tamaños de 128, 512 y 1024 bytes respectivamente. Los resultados muestran cómo el canal responde ante cada escenario, especialmente en términos de estabilidad y confiabilidad. Si bien se lograron bitrates cercanos a los configurados, la pérdida de datagramas aumentó significativamente a medida que se incrementaba la tasa de envío, lo cual evidencia las limitaciones del medio en condiciones de alta demanda.

La siguiente tabla resume los valores registrados para cada prueba, considerando el bitrate alcanzado, el jitter promedio y el porcentaje de pérdida.

Parámetros técnicos:

- Herramienta: iperf3 v3.19
- Protocolo utilizado: UDP
- Comando base: iperf3 -c [IP] -p 6000 -u -b [TASA] -l [TAMAÑO] -t 20
- Tasas de envío utilizadas: 10 Mbps, 20 Mbps, 50 Mbps
- Tamaños de paquete (-l): 128, 512, 1024 bytes
- Duración por prueba (-t): 20 segundos
- Puerto utilizado: 6000

- Cliente: iPerf desde Windows
- Servidor: iPerf desde Windows

Tabla 26

Throughput UDP unidireccional según tamaño de paquete (RILD) Fuente: Elaboración propia

Tasa de Envío (Mbps)	Tamaño de Paquete (Bytes)	Bitrate Efectivo (Mbps)	Jitter (ms)	Pérdida de Datagramas (%)
10	128	9.24	1.114	7.4%
20	512	12.5	0.174	36%
50	1024	23.2	0.901	39%

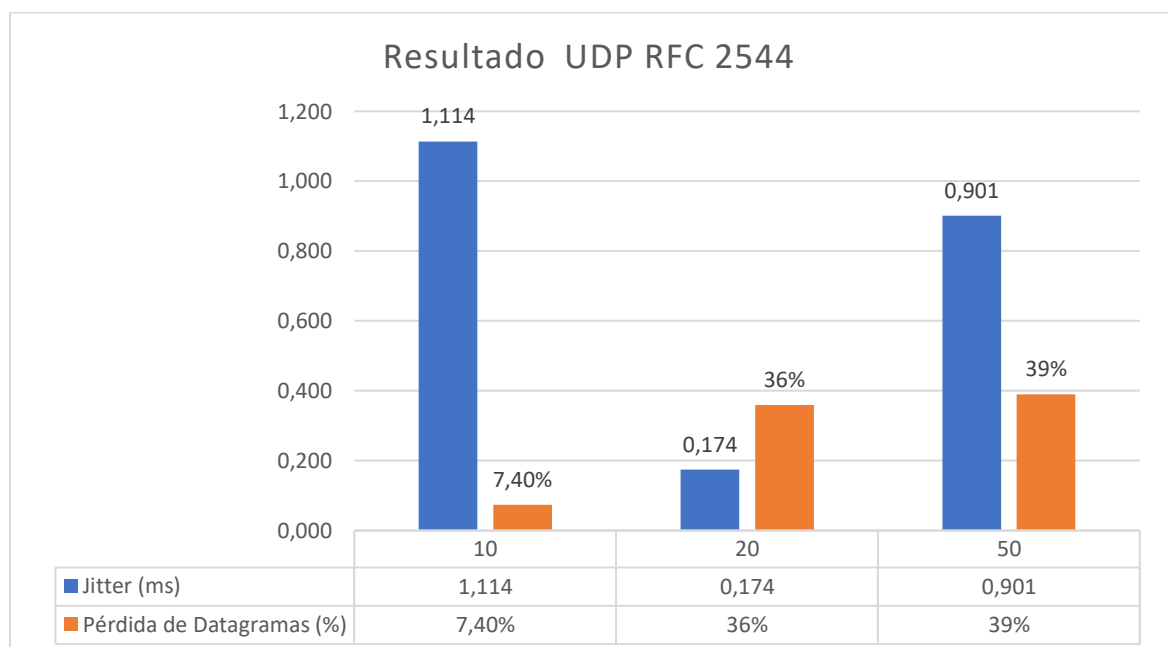


Figura 19. Relación UDP promedio obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.

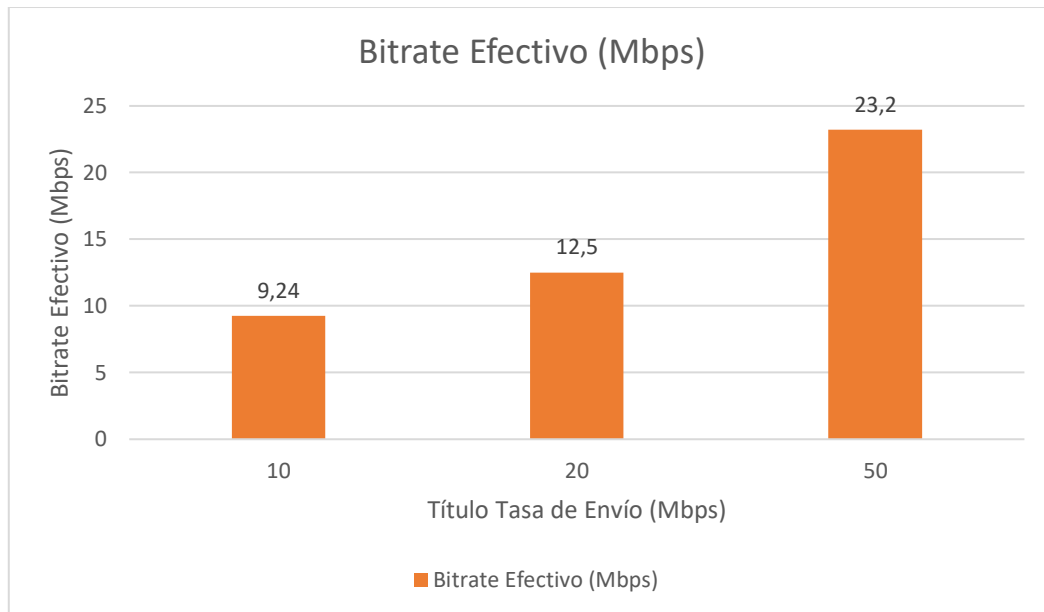


Figura 20. Relación UDP bitrate efectivo obtenido según pruebas RFC 2544 mediante iPerf3. Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados rfc 2544.

En la gráfica 19 se visualiza la variación del jitter y el porcentaje de pérdida de datagramas en función de la tasa de envío configurada. A 10 Mbps, el canal mantiene una pérdida moderada y un jitter elevado, lo cual indica cierta inestabilidad temporal. Al incrementar la tasa a 20 y 50 Mbps, se observa una disminución inicial del jitter, pero un aumento significativo en la pérdida, lo que refleja que el canal no logra sostener de manera confiable cargas más altas.

La gráfica 20 muestra el bitrate efectivo alcanzado, que crece con la tasa de envío, pero sin garantizar una transmisión eficiente. Aunque se logra enviar más datos, el alto porcentaje de pérdida reduce la calidad del canal y pone en riesgo la integridad de la información en aplicaciones sensibles al tiempo real.

Ambos gráficos permiten visualizar de forma clara que el rendimiento en UDP no solo depende de la velocidad de envío, sino también de la estabilidad del canal y su capacidad para manejar carga sostenida sin degradar la integridad de los datos.

- Prueba Ping

Con el fin de caracterizar el comportamiento de la red RILD en condiciones reales de operación, se llevó a cabo una serie de pruebas de conectividad hacia el servidor público 8.8.8.8, correspondiente al servicio DNS de Google. Esta dirección se utiliza frecuentemente como destino de referencia por su alta disponibilidad y baja latencia.

La prueba consistió en el envío de 50 paquetes ICMP utilizando el comando ping 8.8.8.8 -n 50, ejecutado en tres momentos distintos del día (mañana, tarde y noche), buscando capturar posibles variaciones asociadas a la carga horaria, interferencias ambientales o saturación del canal inalámbrico.

Se registraron tres parámetros clave como la latencia promedio, jitter y porcentaje de pérdida de paquetes. Estos indicadores evalúan la eficiencia y estabilidad de la conexión a un servidor externo, esenciales para aplicaciones en tiempo real o acceso constante a servicios en la nube.

Los resultados muestran la respuesta de la red RILD al tráfico de internet y la consistencia de su comportamiento diario.

Tabla 27

Resultados de latencia hacia 8.8.8.8 en red RILD (prueba ICMP) Fuente: Elaboración propia

Prueba	Paquetes enviados	Paquetes recibidos	Pérdida (%)	Latencia mínima (ms)	Latencia máxima (ms)	Latencia promedio (ms)
1	50	50	0%	26	329	102
2	50	49	2%	20	544	130
3	50	50	0%	21	2117	192

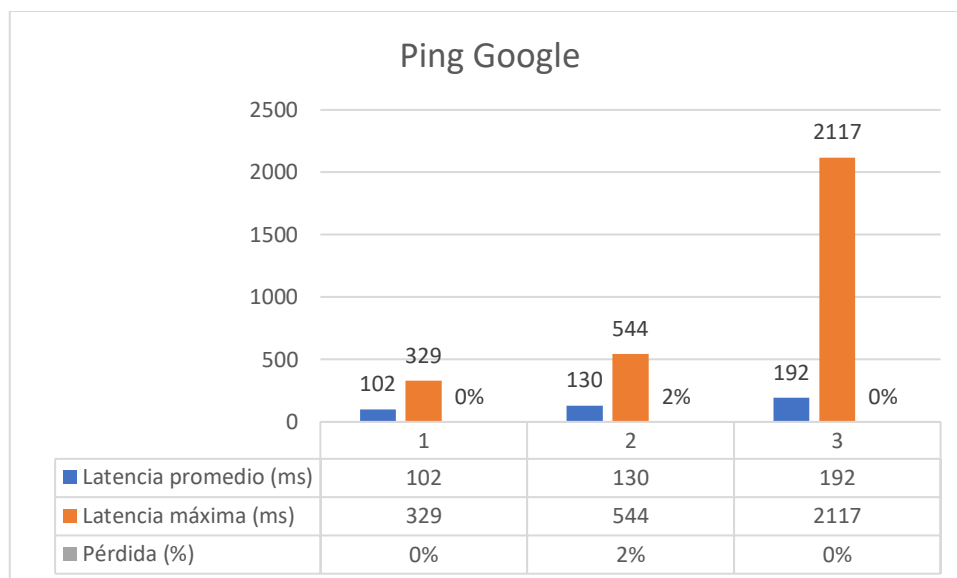


Figura 21. Latencia promedio y máxima hacia 8.8.8.8 en red RILD. Fuente: Elaboración propia

Como se pudo observar en la figura 21 muestra la latencia promedio y máxima de las tres pruebas de ping a 8.8.8.8 en la red RILD. La latencia promedio fue aceptable (102-192 ms), pero hubo picos altos, incluido un máximo de 2117 ms en la tercera prueba.

Los resultados muestran inestabilidad temporal en el canal debido a congestión e interferencias externas. Si bien la pérdida fue mínima (0% en pruebas 1 y 3, 2% en prueba 2), la alta latencia podría perjudicar aplicaciones sensibles al retardo, como videollamadas y juegos en línea.

La comparación entre la latencia promedio y la máxima permite identificar eventos puntuales que, aunque no afectan el promedio general, sí pueden deteriorar la experiencia del usuario. Este tipo de comportamiento es típico en redes inalámbricas no gestionadas, especialmente en horarios de alta demanda o en entornos con interferencia local.

- Prueba de Velocidad de internet – Speedtest

Como parte del análisis del rendimiento percibido en la red RILD, se realizó una prueba de velocidad utilizando la herramienta Speedtest, ampliamente utilizada para medir la calidad de acceso a internet desde el punto de vista del usuario final. Esta prueba permite obtener métricas

representativas como velocidad de descarga, velocidad de subida, latencia y jitter, las cuales resultan fundamentales para validar el comportamiento de la red frente a servicios en línea.

Las mediciones se realizaron en tres momentos distintos del día, con el objetivo de capturar posibles fluctuaciones derivadas de la variabilidad en la carga del canal inalámbrico o en la red del proveedor de servicio (ISP). Para cada ejecución se utilizó el servidor SAITEL, y se recopilaron los valores entregados directamente por la plataforma en cuanto a rendimiento y estabilidad del enlace.

A continuación se presenta la tabla resumen con los valores registrados en las tres pruebas realizadas sobre la red RILD.

Tabla 28

Resultados de prueba de velocidad de internet con Speedtest – RILD. Fuente: Elaboración propia

Prueba	Velocidad de descarga (Mbps)	Velocidad de subida (Mbps)	Latencia (ms)	Jitter (ms)
1	9.42	12.04	255	25
2	9.53	13.29	12	25
3	11.26	10.82	102	27

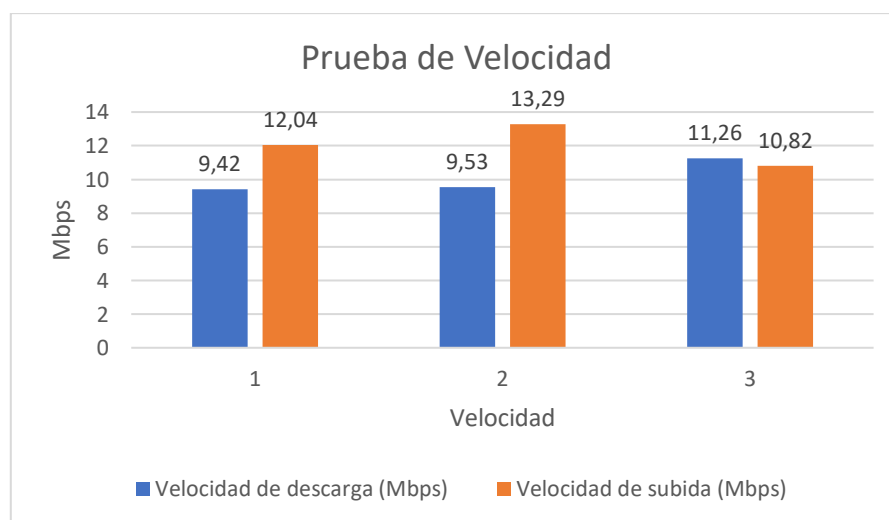


Figura 22. Velocidades de descarga y carga obtenidas mediante Speedtest en red RILD. Fuente: Elaboración propia

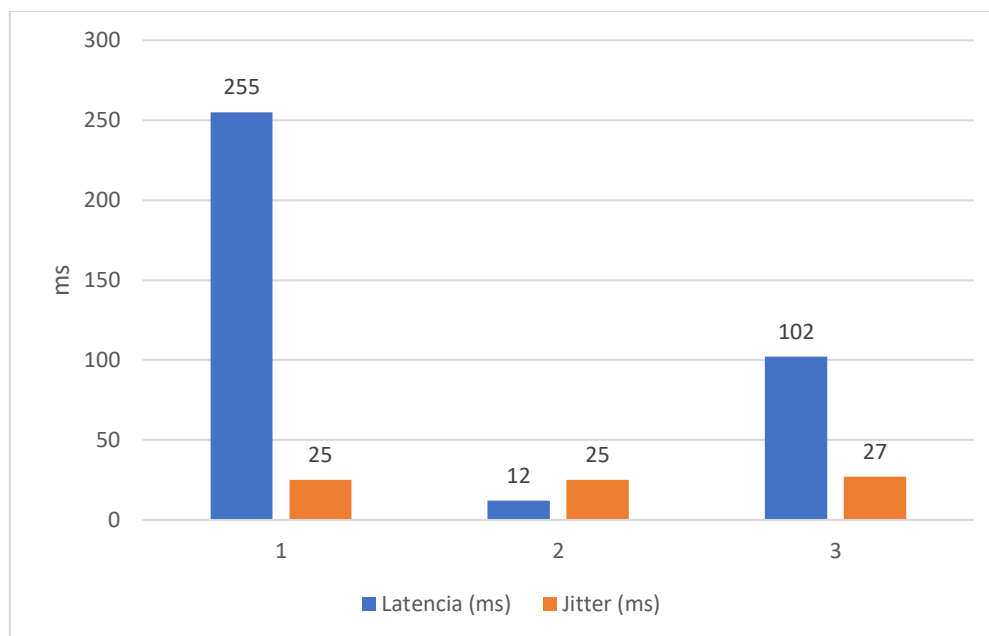


Figura 23. Latencia y Jitter mediante Speedtest en red RILD. Fuente: Elaboración propia

En las figuras 22 y 23 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de velocidad realizadas con la herramienta Speedtest sobre la red RILD, evaluando la variación en distintos momentos del día. La primera gráfica presenta las velocidades de descarga y subida alcanzadas, mientras que la segunda refleja el comportamiento de los parámetros de latencia y jitter, asociados a la estabilidad del canal.

Se nota una velocidad de transmisión consistente en las tres pruebas. La descarga fluctuó entre 9.42 y 11.26 Mbps, y la subida entre 10.82 y 13.29 Mbps. Este balance es notable, ya que en redes residenciales suele haber asimetría hacia la descarga. La red RILD es efectiva en operaciones de subida, crucial para videollamadas y transmisión en tiempo real.

Sin embargo, al analizar la latencia y el jitter, se observan mayores variaciones. La latencia varió de 12 a 255 ms y el jitter fue más estable, entre 25 y 27 ms. Una alta latencia en la primera prueba sugiere congestión o interferencias, lo que puede afectar aplicaciones sensibles al retardo como VoIP o juegos en línea.

Los resultados indican que la red RILD tiene una buena velocidad de transmisión, pero su estabilidad varía bajo alta carga. Estas observaciones reflejan cómo el entorno y la saturación del espectro afectan la experiencia del usuario en redes inalámbricas no gestionadas.

4.3.2. Resultados Cualitativos

Se encontraron diferencias en la instalación, uso y estabilidad entre Starlink y RILD durante la evaluación en campo. La instalación de Starlink fue rápida y fácil, guiada por la app. Solo se necesitó ubicar la antena al cielo, conectar el equipo y esperar menos de cinco minutos para la alineación automática. La aplicación ofrece información en tiempo real sobre la calidad del enlace y el estado de la red, permitiendo al usuario gestionar su sistema sin ayuda técnica.

La estabilidad fue alta en la prueba. Tras la alineación inicial, no hubo caídas ni fluctuaciones notables. Las actividades de alto consumo, como streaming 4K y videollamadas, se realizaron sin interrupciones. La cobertura Wi-Fi fue adecuada, con un alcance de hasta 20 metros al aire libre, ideal para hogares o pequeños negocios.

Por otro lado, la experiencia con la red RILD presentó limitaciones operativas. Aunque la conexión inicial al punto de acceso fue rápida, la estabilidad fue considerablemente menor. Se detectaron caídas intermitentes, jitter elevado y pérdida de paquetes, lo que afectó la calidad en servicios como videoconferencias, navegación y transmisión de video. A esto se suma que la instalación de RILD requiere alineación precisa de las antenas CPE, proceso que depende de personal técnico especializado y de la disponibilidad de línea de vista (LOS) libre de obstrucciones.

La sensibilidad del enlace a interferencias físicas fue evidente; obstáculos como árboles, construcciones o cualquier elemento dentro del radio de Fresnel generaron degradación significativa del servicio. Además, el usuario no cuenta con herramientas de monitoreo o gestión local, lo que lo hace dependiente del soporte del ISP para cualquier ajuste o diagnóstico técnico.

Starlink

La configuración inicial a través de la aplicación móvil fue intuitiva y rápida. Si bien la antena no se alineó completamente de forma automática, la aplicación orientó visualmente al usuario indicando con precisión hacia dónde rotar la antena para una alineación óptima. Esto se complementó con una función de escaneo del cielo mediante la cámara del teléfono, que permitió identificar obstrucciones en tiempo real. El sistema marcaba las zonas despejadas con color azul y las obstruidas en rojo sobre una proyección en forma de domo virtual, lo cual facilitó enormemente la decisión de mantener o reubicar la antena.

Durante los primeros minutos tras encender el equipo, se percibieron pequeñas interrupciones, lo cual es entendible por el proceso de conexión satelital. Sin embargo, una vez estabilizado, el rendimiento fue sobresaliente. Se logró ver un video en YouTube en calidad 4K sin interrupciones, mientras simultáneamente se descargaba un archivo de 1 GB a aproximadamente 20 Mbps. Todo esto ocurrió sin congestión visible en el búfer, lo que habla de la consistencia del rendimiento bajo carga.

Otro punto a favor fue el alcance del Wi-Fi. A pesar de instalar la antena en la azotea de un tercer piso, la señal llegaba hasta la planta baja de la vivienda, alcanzando una distancia de aproximadamente 15 metros hacia afuera de la casa. Esto representa una ventaja clara en términos de cobertura para usuarios en zonas rurales con viviendas dispersas.

La aplicación Starlink también aportó datos técnicos relevantes, como la latencia, rendimiento, consumo energético (aproximadamente 25 W), y la opción de revisión de interrupciones. Además, permitía conocer los planes disponibles, entre ellos:

- Plan residencial estándar, con velocidades entre 100 y 200 Mbps.
- Plan Lite, con velocidades de 45 a 100 Mbps, a menor costo.
- Planes móviles o Itinerantes, desde \$45 mensuales, orientados a usuarios viajeros.
- Planes empresariales, con mayores capacidades y beneficios.

Como punto negativo relativo, se podría mencionar el costo inicial del equipo (alrededor de \$250), aunque este resulta considerablemente menor que los costos de despliegue físico de una red RILD en zonas alejadas.

RILD

En cuanto a la red inalámbrica de larga distancia, la experiencia fue más convencional. La conexión a la red fue fácil como un enrutador doméstico, con configuración básica desde el cliente. Desde el inicio, hubo cortes intermitentes y variaciones significativas en el rendimiento.

La reproducción de video en 4K presentó interrupciones recurrentes, lo que evidencia limitaciones operativas del sistema RILD bajo las condiciones de prueba. La descarga de archivos fue mucho más lenta que en Starlink creando una sensación de inestabilidad.

Aunque el acceso a la red fue rápido (no requirió tiempo de alineación como Starlink), la consistencia de la conexión fue inferior, especialmente en condiciones de tráfico moderado. El sistema mostró sensibilidad a las obstrucciones, lo cual se evidenció por valores de señal en torno a -66 dBm a -77 dBm, afectando la calidad general.

Una desventaja adicional es que la alineación y ajuste de los enlaces en RILD no pueden ser realizados por el usuario final, sino que requieren intervención técnica directa. Esto complica la escalabilidad del servicio en comunidades donde no siempre se dispone de soporte inmediato. En cambio, en Starlink, el propio usuario puede reubicar y ajustar su antena fácilmente con ayuda de la aplicación.

Tabla 29

Comparación cualitativa de la experiencia de uso entre Starlink Mini y red inalámbrica de larga distancia (RILD) Fuente: Elaboración propia

Criterio	Starlink	RILD
-----------------	-----------------	-------------

Facilidad de instalación	Muy alta, tipo plug-and-play	Media, requiere conocimientos básicos o soporte ISP
Tiempo hasta conexión estable	Ligeramente mayor, pero guiado por aplicación	Inmediato, pero menos control de estabilidad
Estabilidad de conexión	Alta después de los primeros minutos	Media, con cortes frecuentes
Calidad de navegación y streaming	Excelente (incluso en 4K + descargas simultáneas)	Limitada, sin soporte fluido para video de alta calidad
Sensibilidad a obstrucciones	Media, pero fácilmente detectable con la aplicación	Alta, sin herramientas de visualización para el usuario
Gestión desde el usuario final	Completa, intuitiva desde la aplicación	Nula, requiere soporte técnico
Alcance del Wi-Fi	Amplio, incluso en exteriores	Dependiente del equipo instalado

Comparativa de experiencia de uso - Starlink vs RILD

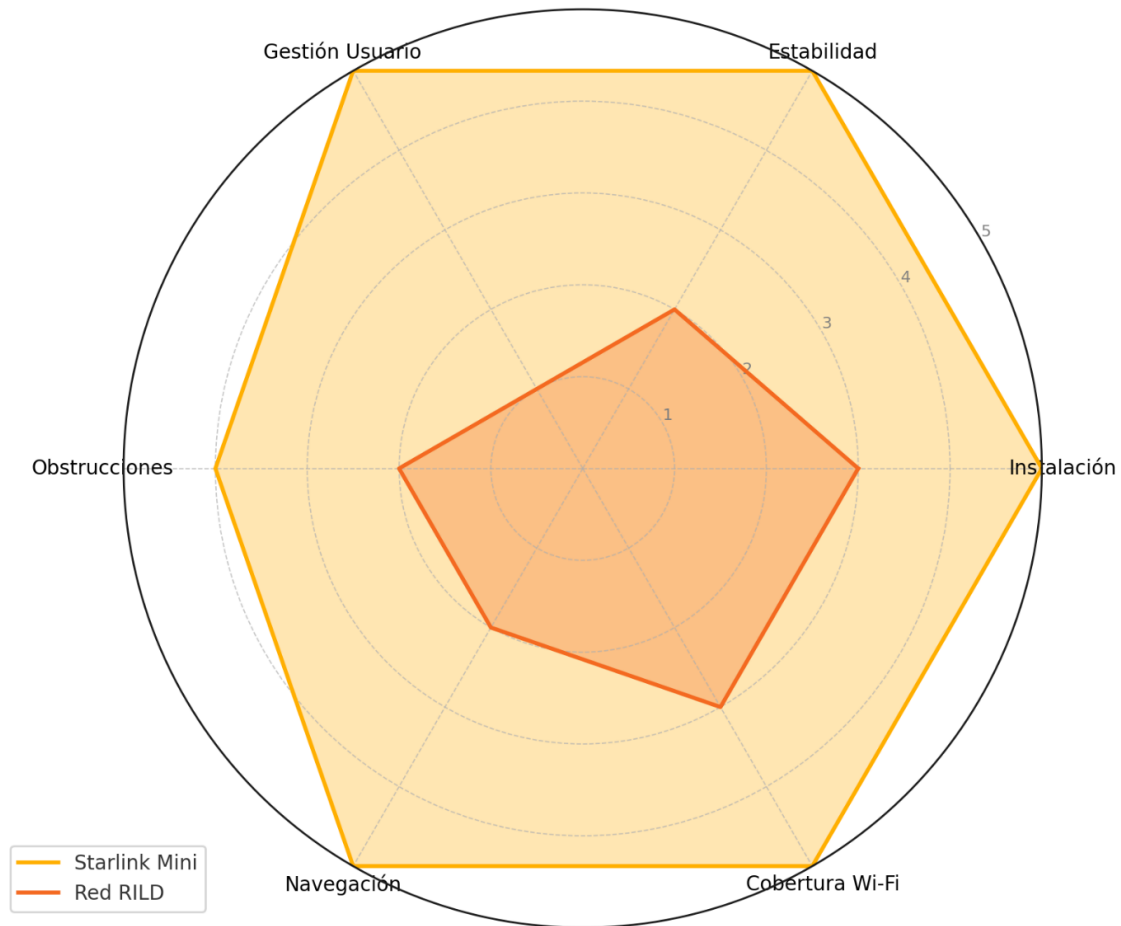


Figura 24. Comparativa de uso Starlink vs RILD.

En síntesis, los resultados cualitativos reflejan que Starlink ofrece una solución robusta y autónoma para usuarios en entornos rurales, con mayor facilidad de instalación, estabilidad y capacidad de autogestión. En contraste, RILD, si bien funcional, depende en mayor medida de las condiciones del entorno y del soporte técnico especializado, presentando mayor sensibilidad a obstrucciones y variabilidad en la calidad del servicio.

4.3.3. Resultados estructurados según el estándar RFC 2544

Tabla 30

Evaluación técnica comparativa de los enlaces Starlink y RILD conforme a los parámetros del estándar RFC 2544. Fuente: Elaboración propia

Métrica RFC 2544	Tecnología	Valor obtenido	Herramienta utilizada	Interpretación técnica
Latencia (RTT)	Starlink	42-76 ms	Ping / Speedtest	Bajo retardo gracias a órbitas LEO (~550 km), beamforming y gateway optimizado. Adecuado para aplicaciones en tiempo real.
	RILD	102-192 ms	Ping / Speedtest	Ligeramente mayor por el uso de CSMA/CA y la contienda en el canal compartido. Puede impactar servicios sensibles.
Pérdida de paquetes	Starlink	0-2 %	Ping / iPerf3	Desempeño aceptable en entorno rural. Mínimas pérdidas, sin impacto crítico.
	RILD	0-2 % ICMP, hasta 39 % en UDP	Ping / iPerf3	Pérdidas elevadas en pruebas UDP, afectando servicios de voz/video. Refleja limitaciones en buffer y colisiones.
Throughput (descarga)	Starlink	Hasta 40.8 Mbps	Speedtest / iPerf3	Inferior al plan esperado, posiblemente por congestión satelital. Rendimiento variable pero funcional.
	RILD	Hasta 29.9 Mbps	Speedtest / iPerf3	Aceptable para redes WiFi convencionales. Disminuye con tamaños de paquete

				pequeños. Limitado por CSMA/CA.
Jitter (UDP)	Starlink	0.42 – 5.28 ms	iPerf3 UDP	Aumenta con tasa de envío. Puede impactar tráfico en tiempo real.
	RILD	0.17 – 1.11 ms	iPerf3 UDP	Más bajo que Starlink, pero con mayor pérdida. Menor variabilidad.
Bidireccional TCP	Starlink	TX: 0.276 Mbps / RX: 2.52 Mbps	iPerf3 --bidir	Asimetría marcada. Posible saturación en canal de retorno. CSMA/CA no presente, pero sí contención de uplink satelital.
	RILD	TX: 21.6 Mbps / RX: 3.24 Mbps	iPerf3 --bidir	Buen desempeño en sentido de subida, aunque con cuello de botella en recepción. Posible interferencia local.

La tabla anterior presenta los resultados obtenidos bajo la estructura metodológica del RFC 2544, considerando los parámetros más relevantes para entornos rurales: latencia, pérdida de paquetes y throughput. En cuanto a la latencia, Starlink mantuvo valores promedio cercanos a 46 ms, adecuados para servicios interactivos, mientras que RILD presentó un retardo ligeramente mayor (hasta 192 ms), influenciado por el mecanismo CSMA/CA y la carga del canal inalámbrico.

En términos de pérdida de paquetes, Starlink evidenció una tasa mínima (2 %), lo que refleja la estabilidad del enlace satelital en condiciones despejadas. Por su parte, RILD presentó una pérdida igual (2 %), atribuible a colisiones en el medio compartido, retrocesos por backoff y fluctuaciones de SNR.

Respecto al throughput, Starlink alcanzó hasta 40 Mbps de descarga, dentro del rango esperado para el plan Lite, mientras que RILD presentó un rendimiento más variable, afectado por factores como la distancia al AP, el ancho de canal disponible (80 MHz) y la modulación alcanzada en función del SNR. Estos resultados reafirman que ambas tecnologías son funcionales, pero sus comportamientos y limitaciones técnicas deben ser cuidadosamente considerados al seleccionar la solución adecuada para cada contexto.

4.5. Análisis y discusión

Los resultados muestran claramente el comportamiento técnico esperado de ambas tecnologías según sus arquitecturas y protocolos. Este análisis revela cómo cada parámetro medido es influenciado por la gestión de acceso, condiciones de propagación, modulación y capacidad operativa.

En la red RILD, la latencia, el jitter y la pérdida de paquetes aumentan debido al protocolo CSMA/CA del estándar IEEE 802.11ac. Este mecanismo de acceso compartido aumenta las colisiones a medida que crece el número de usuarios en el AP. Las colisiones hacen que los dispositivos esperen y reintenten, afectando la estabilidad y calidad del servicio.

Adicionalmente, las condiciones de propagación afectan de manera crítica al desempeño de RILD. Factores como la obstrucción parcial del radio de Fresnel, la degradación de la relación señal-ruido (SNR) y las pérdidas en espacio libre (FSPL) obligan a que el sistema reduzca la modulación para mantener la estabilidad del enlace. Por ejemplo, en situaciones donde la modulación baja de 256QAM a 64QAM, el throughput efectivo disminuye considerablemente, afectando tanto la velocidad como la experiencia del usuario.

Por otro lado, Starlink mostró un comportamiento más robusto y predecible. La baja latencia promedio obtenida se explica por la arquitectura de satélites en órbita baja (LEO), donde el trayecto de la señal es significativamente más corto que en sistemas satelitales geoestacionarios. Sin embargo, parte de la latencia también se debe al recorrido desde el

terminal hasta el satélite, luego al gateway terrestre y finalmente hacia internet, además del procesamiento asociado a túneles GRE/IPsec.

El uso de beamforming dinámico permite a Starlink mitigar en gran medida los efectos de obstrucciones parciales, aunque no los elimina por completo. Si bien la aplicación ayuda a mapear obstrucciones, la presencia de elementos como árboles o estructuras altas puede generar micro cortes o degradación temporal del enlace. En términos de capacidad, cada haz satelital debe ser compartido entre los usuarios dentro de su cobertura, lo que significa que en zonas de alta demanda puede producirse congestión y reducción del throughput.

A nivel de red local, tanto Starlink como RILD dependen del estándar IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5), lo que introduce sus propias limitaciones en cuanto a cobertura y cantidad de dispositivos conectados simultáneamente.

Comparativamente, Starlink ofrece ventajas claras en términos de estabilidad, latencia y facilidad de gestión, gracias a su arquitectura autónoma y su sistema de monitoreo integrado en la aplicación. En contraste, RILD, si bien es una solución válida y funcional, presenta mayores desafíos operativos, principalmente derivados de su sensibilidad a las condiciones físicas del entorno, la necesidad de una línea de vista clara y los problemas inherentes al acceso compartido mediante CSMA/CA.

Estos resultados reflejan que, en un entorno rural, Starlink representa una alternativa con mayor facilidad de despliegue, menor dependencia técnica y mejor calidad de servicio para aplicaciones críticas como educación en línea, telemedicina o videoconferencias. No obstante, RILD sigue siendo una opción viable cuando se cuenta con una correcta planificación de enlaces, buena línea de vista y un número controlado de usuarios, aunque requiere mayor intervención técnica tanto en la instalación como en el mantenimiento.

4.5.1. Análisis técnico de la red RILD

La red inalámbrica de larga distancia (RILD) presentó un comportamiento técnico acorde a lo que establecen los principios de propagación, los protocolos IEEE aplicados y las condiciones operativas de este tipo de enlaces.

Un factor clave del aumento en latencia, jitter y pérdida de paquetes es el protocolo CSMA/CA del estándar IEEE 802.11ac. El protocolo utiliza acceso compartido, donde cada dispositivo debe escuchar y esperar a que el canal esté libre antes de transmitir. A más usuarios en el AP, mayor probabilidad de colisiones. Cada colisión aumenta la latencia y provoca inestabilidad en el servicio.

Además, las condiciones de propagación afectaron notablemente el desempeño. Factores como la pérdida de espacio libre, obstrucciones en el radio de Fresnel y la degradación del SNR obligaron al sistema a usar modulaciones más robustas y menos eficientes, como 64QAM, 16QAM o QPSK, en vez de 256QAM. Esto resultó en una significativa reducción del throughput.

La banda de 5.8 GHz ofrece altas velocidades, pero es sensible a obstáculos y distancia. En enlaces largos, cualquier obstrucción reduce drásticamente el SNR, lo que genera caídas de modulación y, por ende, menores velocidades y mayor probabilidad de errores.

El sistema también mostró las limitaciones inherentes al acceso inalámbrico multipunto, donde todos los clientes comparten el mismo canal. Esto no solo genera congestión cuando se conecta un mayor número de usuarios, sino que además afecta la calidad del servicio, especialmente en aplicaciones sensibles como videoconferencias, transmisión en vivo o telefonía IP.

En resumen, el desempeño de la red RILD estuvo condicionado por tres factores principales:

- Las limitaciones del protocolo CSMA/CA en entornos con múltiples usuarios.

- Las pérdidas por propagación y la sensibilidad a obstrucciones en la banda de 5.8 GHz.
- La degradación de la modulación como respuesta automática del sistema frente a un SNR bajo.

Este comportamiento es completamente coherente con lo explicado en el capítulo teórico y con las características técnicas de las redes basadas en el estándar IEEE 802.11ac aplicadas a enlaces de larga distancia.

4.5.2. Análisis técnico de Starlink

El análisis técnico de Starlink refleja un comportamiento totalmente consistente con su arquitectura física y lógica, así como con los principios que rigen las comunicaciones satelitales en órbita baja (LEO).

A nivel de latencia, los resultados obtenidos son explicables por la combinación de varios factores. En primer lugar, la utilización de satélites en órbita baja, aproximadamente a 550 km, permite reducir significativamente la latencia en comparación con sistemas geoestacionarios (GEO) que operan a 35.786 km. Esto es clave para que la señal, a pesar de recorrer un trayecto doble (terminal, satélite, Gateway, internet y retorno), mantenga valores promedio inferiores a 50 ms, dentro de los márgenes óptimos para servicios sensibles como videollamadas, juegos en línea y transmisión de video en alta definición.

La arquitectura de Starlink está diseñada sobre un modelo de beamforming dinámico, donde cada satélite genera múltiples haces (beams) que direccionan energía y ancho de banda hacia zonas específicas de la superficie terrestre. Este sistema permite optimizar la cobertura y gestionar el tráfico de manera eficiente, aunque cada beam tiene una capacidad máxima. Cuando el número de usuarios dentro de un beam aumenta, el throughput por usuario puede disminuir proporcionalmente, dado que comparten el ancho de banda agregado del haz.

Adicionalmente, Starlink implementa una estructura de red lógica basada en túneles cifrados GRE/IPsec, que establecen una comunicación segura desde el terminal del usuario hasta los gateways terrestres, y de allí hacia internet. Este proceso añade un componente de latencia asociado al cifrado y procesamiento, pero es significativamente menor que el generado por la distancia física en redes GEO.

En términos de estabilidad, Starlink demostró un desempeño altamente robusto. El impacto de obstrucciones físicas es mucho menor en comparación con redes terrestres como RILD, principalmente gracias al beamforming y al sistema de seguimiento automático de los satélites. Sin embargo, la presencia de elementos como árboles altos, edificaciones o estructuras metálicas en el ángulo de cobertura puede generar microcortes o pequeñas pérdidas temporales, especialmente durante el cambio de satélite (handover).

Otro factor relevante es la red Wi-Fi local del terminal, que opera bajo el estándar IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5). Este componente puede convertirse en un cuello de botella cuando se conecta un número elevado de dispositivos, ya que comparte las mismas limitaciones que cualquier red Wi-Fi doméstica en cuanto a cobertura, congestión del canal y capacidad simultánea.

En cuanto a capacidad operativa, la limitación no está en el enlace satelital individual, sino en la saturación del beam y en la capacidad del router Wi-Fi local. Cada beam puede atender entre 100 y 200 usuarios simultáneos, dependiendo de la demanda, mientras que el terminal permite la conexión de hasta 100 dispositivos en red local, según las especificaciones del estándar Wi-Fi 5.

En conclusión, los resultados obtenidos reflejan un sistema altamente eficiente, con latencias bajas, estabilidad superior y mayor tolerancia a las condiciones ambientales en comparación con tecnologías terrestres. Las únicas limitaciones detectadas se relacionan con la capacidad del beam en zonas de alta densidad de usuarios y con las restricciones inherentes

al Wi-Fi local, que son factores perfectamente mitigables con una correcta planificación o expansión de red interna.

4.5.3. Comparación técnica entre ambas tecnologías

El análisis comparativo entre Starlink y la red inalámbrica de larga distancia (RILD) demuestra diferencias técnicas significativas, derivadas directamente de las arquitecturas físicas, lógicas y de los protocolos que rigen el funcionamiento de cada sistema.

En primer lugar, la forma en la que ambas tecnologías gestionan el acceso al medio es completamente distinta. RILD opera bajo el protocolo CSMA/CA, característico del estándar IEEE 802.11ac, que obliga a cada dispositivo a esperar que el canal esté libre antes de transmitir. Este mecanismo es efectivo en entornos de baja densidad de usuarios, pero conforme la cantidad de clientes crece, la probabilidad de colisiones y retransmisiones también aumenta, generando mayor latencia, jitter y pérdida de paquetes. En cambio, Starlink emplea beamforming satelital, donde el ancho de banda se reparte entre los usuarios de cada haz (beam), evitando las colisiones en el acceso local y mejorando la eficiencia en la gestión del espectro.

En cuanto aspectos de propagación RILD depende de la pérdida en espacio libre (FSPL) y obstrucciones en el radio de Fresnel, especialmente en 5.8 GHz, donde la atenuación es alta. Esto obliga al sistema a degradar la modulación y reducir el throughput efectivo en malas condiciones del canal. Starlink, aunque susceptible a obstrucciones, requiere una línea de vista más amplia hacia el cielo, lo que minimiza las afectaciones gracias a un seguimiento activo de satélites y haces direccionales dinámicos.

En cuanto a capacidad operativa, RILD presenta una limitación práctica derivada del acceso compartido vía CSMA/CA. A nivel teórico, un AP puede manejar hasta 254 dispositivos asociados, pero en la práctica, cuando se supera un rango de entre 30 y 60 usuarios activos, la calidad del servicio se degrada notablemente. Esto contrasta con la capacidad de un beam

satelital de Starlink, que puede soportar entre 100 y 200 usuarios simultáneos, dependiendo de la demanda y la saturación en la zona. Sin embargo, ambos sistemas comparten una limitación local: la red Wi-Fi interna, que bajo el estándar IEEE 802.11ac puede ser un cuello de botella en entornos con muchos dispositivos conectados.

La latencia es otro punto de diferenciación crítica. Starlink mantiene valores promedio entre 40 y 50 ms, gracias a la arquitectura de satélites en órbita baja (LEO), muy inferior a cualquier red satelital geostacionaria. En comparación, RILD presenta latencias que oscilan entre 50 y 80 ms, afectadas principalmente por la saturación del canal y las colisiones generadas por el protocolo CSMA/CA, no tanto por la distancia física del enlace.

Desde el punto de vista de la gestión y la autonomía del usuario, Starlink presenta una ventaja considerable. El sistema permite al usuario monitorear el estado del enlace, identificar obstrucciones y gestionar su red local directamente desde la aplicación móvil, lo que reduce la dependencia técnica. RILD, en cambio, requiere intervención directa del proveedor o del administrador del sistema para tareas de monitoreo, ajustes técnicos o resolución de problemas.

En resumen, Starlink ofrece mejores resultados en estabilidad, latencia y facilidad de gestión, con una menor dependencia del entorno físico y del soporte técnico externo. RILD, si bien es funcional, es más sensible a las condiciones del entorno, al aumento de usuarios y a las limitaciones propias del acceso compartido bajo protocolos Wi-Fi. Su desempeño óptimo depende de una planificación precisa del enlace, de la existencia de línea de vista clara y de mantener controlada la densidad de usuarios activos.

4.5.4. Impacto práctico en el entorno rural

El análisis práctico de ambas tecnologías permite establecer con claridad cuál es la solución más adecuada según el tipo de aplicación, el entorno físico y la capacidad operativa de la comunidad o institución donde se implemente.

En el caso de Starlink, la principal ventaja radica en la facilidad de despliegue y la autonomía operativa. El sistema no requiere infraestructura intermedia como torres, radio bases o redes troncales. La instalación es completamente autogestionable por el usuario, con apoyo de la aplicación móvil, lo que lo convierte en una solución ideal para escuelas, unidades educativas rurales, centros comunitarios, GAD parroquiales o cualquier entidad que requiera acceso rápido, estable y confiable a internet. Además, la estabilidad del enlace, la baja latencia y la capacidad de autogestión garantizan la viabilidad de servicios críticos como clases virtuales, plataformas educativas, videoconferencias, telemedicina o trámites institucionales en línea.

Por otro lado, RILD, aunque técnicamente viable, implica un costo de implementación inicial significativamente más alto. La necesidad de instalar torres, mástiles, puntos de acceso de largo alcance y enlaces troncales eleva la inversión, además de requerir estudios de línea de vista (LOS), permisos para instalación de infraestructura y mano de obra especializada. A esto se suma que su operación es altamente dependiente del entorno físico (obstrucciones, distancia) y del correcto dimensionamiento del número de usuarios para evitar congestión, degradación de la modulación y pérdida de calidad del servicio.

En términos de mantenimiento, Starlink nuevamente presenta una ventaja clara. Cualquier escuela o GAD puede operar y gestionar su conexión directamente desde la aplicación, sin depender de soporte técnico constante. En contraste, RILD requiere monitoreo permanente, soporte técnico calificado y mantenimiento físico de la infraestructura (torres, antenas, radios).

Cuando se evalúa la escalabilidad, Starlink permite incorporar nuevos usuarios de forma directa, siempre que la capacidad del beam y del router local lo permitan, sin necesidad de modificar infraestructura física. En cambio, en RILD, cada nuevo usuario implica evaluar

si la torre, el AP y el canal disponible soportan la carga adicional, además de verificar que se mantenga la línea de vista y el despeje del radio de Fresnel.

En resumen, desde la perspectiva del impacto práctico en el entorno rural, Starlink es la opción más adecuada para escuelas, centros comunitarios o GAD parroquiales, ya que combina facilidad de instalación, independencia operativa, menor mantenimiento, baja latencia y mayor robustez ante las condiciones ambientales. Por su parte, RILD puede ser una alternativa válida únicamente en contextos donde se cuente con infraestructura previa, buena línea de vista, bajo número de usuarios y disponibilidad de soporte técnico permanente. Sin estos factores, su viabilidad operativa se ve considerablemente limitada.

Tabla 31

Impacto práctico por contexto de aplicación. Fuente: Elaboración propia

Criterio / Contexto	Starlink	RILD
Equipos disponibles	Starlink Mini: \$200 USD Starlink Estándar: \$389 USD	CPE: \$150–\$300 USD AP sectorial: \$500–\$900 USD Torres/mástiles: \$800–\$2000 USD por sitio PtP (si aplica): \$600–\$2000 por extremo
Planes disponibles	Lite: \$35/mes — uso doméstico, baja prioridad Residencial: \$45/mes — prioridad estándar Negocios: Desde \$67 (40 GB) hasta \$308 (2 TB) — prioridad alta en la red Itinerante: Plan para movilidad, precio variable	Depende del proveedor local. Basado en consumo compartido. Sin planes comerciales estándar. Costos operativos mensuales generalmente menores, pero con costos iniciales muy altos debido a la infraestructura.

Escuela Rural	Alta viabilidad. Costo inicial desde \$200 (Mini) o \$389 (Estándar). Instalación inmediata. No requiere torres. Latencia baja (40–50 ms). Throughput 100–200 Mbps según saturación del beam. Gestión autónoma desde aplicación.	Alto costo inicial (\$2000–\$5000 USD) en infraestructura. Requiere torre, enlaces PtP y permisos. Necesita LOS perfecta. Latencia más alta (60–80 ms) y riesgo de congestión por CSMA/CA. Requiere soporte técnico constante.
GAD Parroquial / Centro Comunitario	Alta viabilidad. Despliegue rápido, costo bajo por terminal. Escalable con más terminales. Gestión local desde aplicación. Mantenimiento casi nulo.	Válido solo si existe infraestructura previa. De lo contrario, alto costo inicial y mantenimiento constante. Sensible a obstrucciones y al crecimiento de usuarios.
Comunidad Rural Pequeña (<30 usuarios)	Excelente opción. Costo inicial desde \$200. Throughput compartido 100–200 Mbps según saturación. Latencia baja y buena estabilidad.	Funcional solo si hay buena LOS. Costo inicial alto si se requiere infraestructura. Afectado por interferencias y saturación del AP si la densidad crece.
Comunidad Grande (>60 usuarios)	Limitado. Un solo terminal no es suficiente. Se requieren múltiples terminales (cada uno \$200–\$389 + \$35–70/mes). El beam satelital puede saturarse si hay muchos terminales en la zona. Escalable, pero con alto costo operativo mensual.	No viable con un solo AP. Necesita múltiples APs sectoriales, enlaces PtP para distribución, torres y segmentación. Limitación severa por CSMA/CA. Costos operativos y de mantenimiento muy altos.
Usuario doméstico (familia / vivienda)	Ideal. Costo inicial \$200 (Mini) o \$389 (Estándar). Mensualidad desde \$35 (Lite). Instalación inmediata. Throughput adecuado (100–200 Mbps). Latencia baja (40–50 ms).	Viable si el servicio es ofrecido por un ISP. No requiere inversión en infraestructura, pero depende de la calidad del enlace, la LOS y la saturación del AP. No viable si no hay ISP disponible

	Permite streaming 4K, teletrabajo, videoconferencias y gaming online.	
--	---	--

4.6. Síntesis del capítulo

En este capítulo se presentaron y analizaron los resultados obtenidos mediante pruebas de desempeño aplicadas a las tecnologías Starlink y Redes Inalámbricas de Larga Distancia (RILD) en un entorno rural. Se evaluaron tanto parámetros cuantitativos como cualitativos, considerando variables como velocidad, latencia, jitter, pérdida de paquetes, estabilidad operativa, facilidad de instalación y gestión del enlace.

Los análisis demostraron que Starlink ofrece ventajas técnicas claras en términos de estabilidad, baja latencia y facilidad de despliegue, principalmente por su arquitectura basada en satélites de órbita baja (LEO), beamforming dinámico y gestión autónoma mediante aplicación móvil. En contraste, la red RILD mostró un desempeño condicionado por factores como la necesidad de línea de vista perfecta, la degradación de la modulación en función de la relación señal-ruido (SNR) y las limitaciones inherentes al protocolo CSMA/CA, que incrementa la latencia y las colisiones a medida que aumenta la cantidad de usuarios conectados.

Starlink es una solución viable en áreas sin infraestructura previa, como escuelas rurales y centros comunitarios, por su bajo costo de implementación y mantenimiento. RILD es útil en comunidades con infraestructura, pero enfrenta retos en escalabilidad y mantenimiento.

En conclusión, los resultados muestran las fortalezas y limitaciones de cada tecnología, y la elección entre Starlink y RILD debe considerar la infraestructura, número de usuarios, condiciones ambientales y capacidad técnica. Este análisis técnico guía decisiones sobre proyectos de conectividad rural, proporcionando criterios para su implementación eficiente.

Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones

Dentro de este capítulo se presenta las conclusiones del análisis técnico, operativo y económico, y las recomendaciones para futuras implementaciones de conectividad en áreas rurales. Las conclusiones abordan los objetivos de la investigación y las recomendaciones se centran en la aplicación práctica de tecnologías como Starlink y RILD.

Conclusiones

La evaluación técnica de Starlink y RILD mostró que, aunque ambas son viables en zonas rurales, difieren en arquitectura, propagación, escalabilidad y operatividad. Starlink utiliza una infraestructura satelital autónoma, mientras que RILD depende de la topografía, la línea de vista y la calidad del despeje del radio de Fresnel.

El análisis de propagación mostró que RILD se ve afectado por pérdidas en espacio libre, obstrucciones y degradación del SNR, impactando la modulación y el throughput. A diferencia, Starlink opera en LEO, eliminando limitaciones terrestres, pero enfrenta problemas de atenuación atmosférica y saturación de beam en áreas de alta demanda.

Starlink ofreció mejor estabilidad, menor latencia (40-50 ms) y gestión más fácil que RILD, que sufre degradación al aumentar usuarios por las limitaciones del protocolo CSMA/CA. El throughput en RILD es afectado por interferencias y propagación, mientras que Starlink ofrece un rendimiento más constante.

El análisis mostró que Starlink es la mejor opción en áreas sin infraestructura, por su bajo costo de implementación (\$200 a \$389 USD por terminal) y su gestión autónoma. RILD solo es viable donde ya hay infraestructura de torres y soporte técnico, debido a su alto costo inicial y mantenimiento exigente.

Starlink es la mejor opción para hogares y comunidades rurales, ofreciendo despliegue inmediato, fácil escalabilidad y baja dependencia técnica. RILD es funcional solo con condiciones óptimas y capacidad técnica para su operación y mantenimiento.

En resumen, la elección entre Starlink y RILD debe basarse en criterios técnicos, económicos y operativos. Starlink destaca por su fácil instalación y bajo mantenimiento, mientras que RILD es válido en escenarios específicos con más limitaciones. Este análisis ofrece un marco sólido para decisiones en proyectos de conectividad rural.

Recomendaciones

Se recomienda utilizar Starlink en áreas rurales sin infraestructura por su fácil instalación, bajo costo, poca necesidad de soporte técnico y alta estabilidad. Esto reduce los tiempos de implementación y asegura un servicio confiable para hogares, escuelas y GAD parroquiales.

En áreas con infraestructura existente, la red inalámbrica de larga distancia (RILD) es viable si se asegura una línea de vista clara, un buen despeje del radio de Fresnel y un adecuado número de usuarios.

Se sugiere realizar un análisis técnico detallado de la topografía y condiciones ambientales en proyectos RILD, usando herramientas profesionales como UISP Design, para asegurar la viabilidad del enlace y la calidad del servicio.

Para proyectos basados en Starlink, se sugiere considerar las limitaciones asociadas a la saturación del beam satelital en zonas de alta demanda, así como prever la posibilidad de desplegar múltiples terminales cuando la cantidad de usuarios o la demanda de ancho de banda supere las capacidades operativas de un solo equipo.

Se recomienda a futuros proyectos de investigación ampliar el análisis comparativo incorporando otras tecnologías emergentes como redes LTE privadas, soluciones 5G FWA (Fixed Wireless Access) o enlaces satelitales de competencia (OneWeb, Kuiper), así como realizar estudios de comportamiento bajo condiciones climáticas adversas, específicamente en la banda Ku, donde la atenuación por lluvia puede impactar el rendimiento.

Bibliografía

- (IEEE), I. o. (2013). *IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange Between Systems–Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications–Amen.* New York: IEEE.
- (ITU-R), I. T.–R. (2012). *Use of systems in the fixed-satellite service in the event of natural disasters and similar emergencies for warning and relief operations.* Geneva: ITU.
- (ITU-R), I. T.–R. (2019). *Attenuation by atmospheric gases.* ITU: Geneva.
- 802.11ax-2021, I. S. (2021). *IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specificati.* New York: IEEE.
- Álava, W. L., Rodríguez, A. R., & Ávila, X. L. (s.f.). Redes inalámbricas, su incidencia en la privacidad de la información. Obtenido de <https://doi.org/10.47230/Journal.TechInnovation.v1.n2.2022.104-109>
- Ariovich, A., & Crojethovic, M. (2020). Las redes de servicios. Contribuciones en el acceso y la cobertura de salud1. 29. Obtenido de <https://doi.org/10.1590/S0104-12902020190888>
- Athenalarm. (17 de 9 de 2023). *Medium.* Obtenido de Solución de sistema de monitoreo de alarma de red: <https://medium.com/%40athenalarm/soluci%C3%B3n-de-sistema-de-monitoreo-de-alarma-de-red-3136955f484d>
- AXESS. (27 de Julio de 2022). *HISPASAT.* Obtenido de AXESSNET.COM: <https://axessnet.com/los-satelites-low-earth-orbit-orbita-terrestre-baja-leo/?utm>

- Barcia, B. Q., González, M. M., & Martínez, A. V. (2020). Brecha Digital en Adultos Mayores: Accesibilidad Tecnológica y Redes Sociales. 7. Obtenido de <https://www.gigapp.org/ewp/index.php/GIGAPP-EWP/article/view/220>
- Bautista, P., Giovanni, M., Torrealva, R., & Paul, J. (2023). Diseño de un software de simulación basado en Matlab-Guide para la enseñanza/aprendizaje de los temas de modulación y codificación digital en el área de las Telecomunicaciones en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/671339>
- Bazurto Loor, A. L. (2023). Diseño de una red inalámbrica para la comunicación de información en el barrio “Los Laureles” en el cantón El Carmen. Obtenido de <https://repositorio.ulead.edu.ec/handle/123456789/4591>
- BellOrín, O. C. (2021). VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE INSTRUMENTO PARA MEDICIÓN DE IMPACTO DE TIC, EN EL MARCO DEL DESPLIEGUE DE ACTIVIDADES SATELITALES VENEZOLANAS. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/110946050/287-libre.pdf?1706512770=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAprobado_enero_2012_Version_final_marzo.pdf&Expires=1711497381&Signature=XeWd140l3ZMGymWypvYhZ3nNwkkwQibhe2MAf3qVtawxvkuDDFkfitD2rg
- Blinder, D. (2023). Geopolítica, la dimensión internacional y tecnología en Argentina y Brasil: Aproximaciones desde el desarrollo espacial. *Ciencias Sociales Interdisciplinarias*. Obtenido de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/221555>
- Bravo Acha, M., Gonzales, L., & Asier, P. (2021). Sistema de interrogación multi-sensor basado en multiplexación en longitud de onda y tiempo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/2454/44019>

- Caisson, S. C. (2021). Acceso y universalidad del servicio de Internet en Mendoza. *Revista Digital de Ciencias Sociales*. Obtenido de <https://orcid.org/0000-0002-1926-057X>
- Calva, J. J., & Rojas, D. L. (2020). SEGURIDAD IOT: PRINCIPALES AMENAZAS EN UNA TAXONOMÍA DE ACTIVOS. 7. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.21503/hamu.v7i3.2192>
- Cambium, N. (2021). *Wireless Network Design Guide*. Rolling Meadows, IL: Cambium Networks.
- Cambium, N. (2021). *Wireless Network Design Guide*. Rolling Meadows, IL: Cambium Networks.
- Castillo, V. A., & Calle, J. E. (2022). 5G tecnología inalámbrica que cambiará el mundo por completo. Obtenido de <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v6.n3.2022.393>
- Corning. (2025). *Redes Empresariales*. Obtenido de Red de área local definida por software (SD-LAN): <https://www.corning.com/in-building-networks/cala/es/home/applications/local-area-networks/next-generation-lan/software-defined-networks.html?utm>
- Dávila Pazmiño, M. C. (2022). Prototipos de redes LTE en base a tecnología de radio definida por software e integración de la tecnología de radio sobre fibra en redes móviles : Análisis de la integración de tecnologías de radio sobre fibra en redes móviles: Caso de estudio técnica UFM. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23249>
- Díaz Chang, B., & Ayala, D. (2020). Red de alta velocidad que permite la cobertura de acceso a internet en parroquias rurales de América Latina. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=573661266038>
- Fenxiong, C., Wanyuan, X., Dianhong, W., Yaodong, S., Jiabao, H., Yueqi , P., . . . Jinglong, L. (2011). Wireless sensor network gateway with long-distance transmission.

Foster, V., Comini, N., & Srinivasan, S. (2021). *Mejorar la infraestructura de datos, una manera de garantizar el acceso equitativo a la información en los países pobres.*

Obtenido de <https://blogs.worldbank.org/es/datos/mejorar-la-infraestructura-de-datos>

González, F. (2024). Cómo funciona Starlink, cuánto cuesta y por qué es tan diferente a otros servicios de internet. *Wired*.

Henry, C. (2021). SpaceX adds laser links to Starlink satellites to reduce dependence on ground stations. *SpaceNews*.

Herrera, I. M. (2024). Millennials y Generación X frente a la realidad del big data y la protección de datos personales en internet. *Vivat Academia*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9241531>

Herrera, R. M. (2021). Tecnología espacial para la vida cotidiana. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/64364736/RH-_tecnoespa_OKb-libre.pdf?1599399995=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTecnologia_espacial_para_la_vida_cotidia.pdf&Expires=1711496252&Signature=GOsTH~FxIzKd0re3kaeZIPfssCXXMS1VBL1HhtNcoVKn

Herrero, M., Raich, M., & Garcia, P. A. (2022). Caracterización de pigmentos históricos a través de técnicas de imagen, en diversas bandas del espectro electromagnético. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8669183>

Hirai, A., Takahashi, Y., & Taniguchi, E. (2013). Start signal generating apparatus. *Mitsubishi Electric*.

Hordiyenko, S. (2021). Development of a modern global information infrastructure based on a personal satellite communication system. *SCISPACE*.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2013). *IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange Between Systems–Local*

and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Ame. New York: IEEE.

Kaspersky. (2025). *AO Kaspersky Lab*. Obtenido de ¿Qué es WEP, WPA, WPA2 y WPA3 y cuáles son sus diferencias?: <https://latam.kaspersky.com/resource-center/definitions/wep-vs-wpa?srsId=AfmBOorQRiktVKFXAqSivtMH6q1O0F8uKtFc1EnkxizN5utJndXdoOLy&utm>

Kazushi, N., Hideki, K., Yutaka, I., & Satoru, I. (2015). Wireless power supply device and wireless power supply device start-up method.

Lapedus, M. (2022). Lapedus, M. *IEEE Spectrum*.

Machuca González, A. J. (2022). Características y prestaciones de redes inalámbricas híbridas LiFi y WiFi. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11441/134674>

Minar, N. (23 de 1 de 2023). *Reddit*. Obtenido de StarlinkEngineering: https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/10jdbzn/how_does_starlink_do_traffic_shaping_for_service/?tl=es-es&utm_rdt=51128

Nicolalde, D. (2018). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE LARGA DISTANCIA PARA PROVEER ACCESO A INTERNET A ZONAS RURALES. CASO DE ESTUDIO SECTOR RURAL DE LOS CANTONES PUJILÍ Y SAQUISILÍ DE LA PROVINCIA DE COTOPAXI*. Quito: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.

Park Place Technologies. (2025). *Park Place Technologies*. Obtenido de ¿Qué es Monitoreo de red? - Mejores prácticas, beneficios y más: <https://www.parkplacetechnologies.com/es/what-is-network-monitoring/?utm>

- Pérez, B. M. (2021). Streaming: ventajas, desafíos y oportunidades de las radiotelevisión para captar audiencias. *Universitat de València*, 26. Obtenido de <https://doi.org/10.35742/rcci.2021.26.e85>
- Plaza Guingla, D. A., Flores Marin, M. J., Benavides Castillo, L. E., & Benavides Andrade, C. J. (2018). Implementación de una aplicación móvil en un entorno ad hoc para el intercambio de información. *Revista Científica ECOCIENCIA*, 5(5), 1-25. Obtenido de <https://revistas.ecotec.edu.ec/index.php/ecociencia/article/view/125/91>
- Prado Sandoval, K. G. (2022). Simulación de la técnica de comunicación inalámbrica NOMA : simulación de la técnica noma usando codificación convolucional y un canal AWGN. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22714>
- Reyes, S. F., Franco, K. V., Sancan, A. D., Tumbaco, M.a. I., & Merino, M. J. (2022). El IMPACTO DEL INTERNET GLOBAL "STARLINK".
- Roa Grijalba, J. I. (2020). Topografía aplicada a la ubicación espacial de telecomunicaciones y análisis link. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25188>
- Roldán, M. Á., & Vargas, H. F. (2020). Ciberseguridad en las redes móviles de telecomunicaciones y su gestión de riesgos. 2. Obtenido de <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.006.31>
- Ropero Torres, D. (2020). Evaluación de la relación señal a ruido de un sistema de comunicación óptico empleando las técnicas de multiplexación por división de frecuencia y multiplexación por división de frecuencia ortogonal. *Universidad Francisco de Paula Santander*. Obtenido de <http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/4503>
- S.1001-2, I.-R. (2012). *Use of systems in the fixed-satellite service in the event of natural disasters and similar emergencies for warning and relief operations*. ITU: Geneva.

- Sánchez Aragón, E. M. (2023). Estudio de la tecnología Starlink como principal alternativa de conexión a Internet en embarcaciones. Obtenido de <https://idus.us.es/handle/11441/150065>
- Sergieieva, K. (3 de 1 de 2025). *Eos Data Analytics*. Obtenido de Constelaciones De Satélites Existentes Y Futuras: <https://eos.com/es/blog/constelaciones-de-satelites/?utm>
- Soto Raya, B. (2023). Infraestructura de recolección y visualización de información en tiempo real. Obtenido de <https://orcid.org/0000-0002-9783-5738>
- SpaceX. (2020). *Application for Approval for Orbital Deployment and Operating Authority for the Starlink Satellite System*. Washington, D.C.: Federal Communications Commission (FCC).
- Starlink. (2024). *Especificaciones*. Obtenido de Starlink: <https://www.starlink.com/es/specifications?spec=5&utm>
- STARLINK. (15 de Enero de 2025). *spacex.com*. Obtenido de STARLINK: <https://www.starlink.com/es/technology?utm>
- Steele, R., & Lo, A. (2013). Telehealth and ubiquitous computing for bandwidth-constrained rural and remote areas. *Personal and Ubiquitous Computing*, 17(3), 533-543. Obtenido de <https://dl.acm.org/doi/10.1007/s00779-012-0506-5>
- Tanveer, H. B., Puchol, M., Singh, R., Bianchi, A., & Nithyanand, R. (2023). Dando sentido a las constelaciones: metodologías para comprender los algoritmos de programación de Starlink. *Arquitectura de redes e Internet*.
- Ubiquiti Networks. (2023). LiteBeam. 7.
- Valdez Méndez, J. A. (2021). Diseño e implementación de una infraestructura de comunicación inalámbrica de baja potencia y largo alcance. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/15731>
- Vera Rodríguez, R. (2021). Sevilla.

- Villarreal, M. A. (2023). DISEÑO DE UNA TOPOLOGÍA FÍSICA Y LÓGICA DE RED LAN INALÁMBRICA PARA LA GESTIÓN INTERNA DEL COLEGIO CLARET MARACAIBO. Obtenido de <https://repositorio.uvm.edu.ve/handle/123456789/1082>
- Voiped. (2024). *Park Place Technologies*. Obtenido de ¿Qué es la seguridad en las redes inalámbricas?: <https://www.voiped.com/es/blog/que-es-la-seguridad-en-las-redes-inal%C3%A1mbricas/?utm>
- Wang, C., Zhou, Q., Xiao, F., Yuan, H., Liu, Q., Huang, M., & Wang, G. (2016). Satellite broadband network service device, operation platform and authentication method. *SCISPACE*.
- Yang, Q. (2019). Long-distance lora wireless gateway.
- Yuste López, M. (2023). Migración de las tecnologías 2G/3G/4G a la tecnología 5G en equipos que se encuentran en anillo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11441/148376>
- Zhou, J. (2019). Star network communication method, central equipment, sub-equipment and communication system. *Scispace*.