

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

Red de acceso y distribución para mejorar la conectividad en la I.E. 10789,

C.P. Atumpampa, distrito de Incahuasi, Ferreñafe, Lambayeque

Para Optar por el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

ELABORADA POR:

Bachiller: Gonzales Siesquén, Elvis Jonathan

Bachiller: Tenorio Ayacila Cristhofer Luis

ASESOR: Mg. Ing. Juan Carlos Ñáñez Aguilar

LAMBAYEQUE – PERÚ

03 de septiembre de 2026

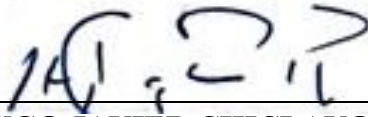
TESIS

Red de acceso y distribución para mejorar la conectividad en la I.E. 10789,

C.P. Atumpampa, distrito de Incahuasi, Ferreñafe, Lambayeque

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:



**MG. ING. HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA
PRESIDENTE**



**MG. ING. MARTÍN AUGUSTO NOMBERRA LOSSIO
SECRETARIO**



**MG. ING. THAUSO GAD PACHAMANGO BAUTISTA
VOCAL**

TESIS

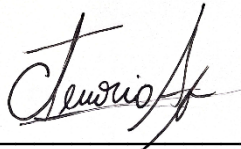
**RED DE ACCESO Y DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR LA CONECTIVIDAD EN LA
I.E. 10789, C.P. ATUMPAMPA, DISTRITO DE INCAHUASI, FERREÑAFE,
LAMBAYEQUE**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

AUTORES:



Bach. Gonzales Siesquén, Elvis Jonathan



Bach. Tenorio Ayacila, Cristhofer Luis

ASESOR:



Mg. Ing. Juan Carlos, Ñañez Aguilar



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria – Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD



0115



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 72.-2026.-D/FACFyM

Siendo las 11:30 a.m. del día 03 de Setiembre del 2026, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

"Red de acceso y distribución para mejorar la conectividad en la I.E. 10789 CP. Atumpampa, distrito de Incahuasi, Ferreñafe, Lambayeque"

Designados por Resolución N° 194-2026-D/D/FACFyM de fecha 10 de marzo de 2026

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

M. Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla

Presidente

Mg. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio

Secretario

Mg. Ing. Thauso Gad Pachamango Bautista

Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) Mg. Ing. Juan Carlos Nañez Aguilar, nombrado por Resolución N° 194-2026-D/D/FACFyM de fecha 10 de marzo de 2026

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 607-2026-D/D/FACFyM de fecha 27 de agosto de 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Tenorio Ayacila, Cristhófer Luis y Gonzales Siesquen, Elvis Jonathan y tuvo una duración de 35 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de Diecisiete (17) en la escala vigesimal, mención Bueno.

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12:32 p.m. se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

M. Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla
Presidente

Mg. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio
Secretario

Mg. Ing. Thauso Gad Pachamango Bautista
Vocal

Mg. Ing. Juan Carlos Nañez Aguilar
Asesor

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL ASESOR

Yo, Mg. Ing. Juan Carlos Ñañez Aguilar, usuario revisor del documento titulado:
“Red de acceso y distribución para mejorar la conectividad en la I.E. 10789, C.P. Atumpampa, distrito de Incahuasi, Ferreñafe, Lambayeque”

Cuyos autores son:

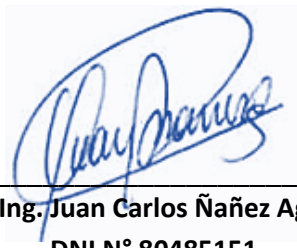
- Bach. Gonzales Siesquén, Elvis Jonathan
- Bach. Tenorio Ayacila Cristhofer Luis

Identificado con Documento de Identidad 80485151; declaro que la evaluación realizada por el Programa Informático Turnitin, ha arrojado un porcentaje de similitud de 07 %, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 26 de agosto del 2026



Mg. Ing. Juan Carlos Ñañez Aguilar

DNI N° 80485151

Asesor

Red de acceso y distribución para mejorar la conectividad en la I.E. 10789, C.P. Atumpampa, dist Incahuasi, Ferreñafe, Lambayeque

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.unprg.edu.pe

Fuente de Internet

2

Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Trabajo del estudiante

3

repositorio.upt.edu.pe

Fuente de Internet

4

www.mef.gob.pe

Fuente de Internet

5

Submitted to Multimedia University

Trabajo del estudiante

6

www.coursehero.com

Fuente de Internet

7

Submitted to Universidad Nacional de Cajamarca

Trabajo del estudiante

8

alicia.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

9

repositorio.ucn.edu.ni

Fuente de Internet

10

Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes

Trabajo del estudiante

11

renatiqa.sunedu.gob.pe

Fuente de Internet

12

repositorio.unu.edu.pe

Fuente de Internet

13

Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola

Trabajo del estudiante

14

publicaciones.unad.edu.co

Fuente de Internet

repositorio.ucp.edu.pe



Mg. Ing. Juan Carlos Ñañez Aguilar

jnaneza@unprg.edu.pe - 925969159

DNI N° 80485151

Asesor

15

Fuente de Internet

16

Submitted to Desarrollo Educativo S.A. Instituto Toulouse Lautrec

Trabajo del estudiante

17

www.riuady.uady.mx

Fuente de Internet

18

Submitted to University of Southern Queensland

Trabajo del estudiante

19

Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, UNAD

Trabajo del estudiante

Excluir citas

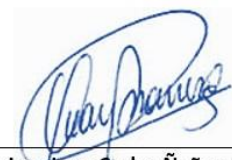
Activo

Excluir coincidencias

< 15 words

Excluir bibliografía

Activo



Mg. Ing. Juan Carlos Ñañez Aguilar

jnaneza@unprg.edu.pe - 925969159

DNI N° 80485151

Asesor



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Gonzales Siesquén Elvis Jonathan Tenorio Ayacila Cristhofer Luis
Título del ejercicio:	Quick Submit
Título de la entrega:	Red de acceso y distribución para mejorar la conectividad en l...
Nombre del archivo:	INFORME_N_03_-_Atumpampa.docx
Tamaño del archivo:	8.81M
Total páginas:	74
Total de palabras:	11,401
Total de caracteres:	64,981
Fecha de entrega:	06-jul-2026 05:53p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega:	2994425198

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

Red de acceso y distribución para mejorar la conectividad en la I.E. 10789,
C.P. Atumpampa, distrito de Incahuasi, Ferreñafe, Lambayeque

Para Optar por el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

ELABORADA POR:

Bachiller: Gonzales Siesquén, Elvis Jonathan

Bachiller: Tenorio Ayacila Cristhofer Luis

ASESOR: Mg. Ing. Juan Carlos Ñáñez Aguilar

LAMBAYEQUE – PERÚ
2025


Mg. Ing. Juan Carlos Ñáñez Aguilar
jnaneza@unprg.edu.pe - 925969159
DNI N° 80485151
Asesor

AGRADECIMIENTOS

El primer agradecimiento es a mi querido Dios, por sus tantas bendiciones sobre mi y mi familia, porque gracias a él podemos disfrutar con salud este gran paso académico, fruto de su inmenso amor.

De igual forma quiero agradecer a mis familiares, aquellas personas que me apoyaron tanto desde un inicio creyendo en mí y que sabían que lo podía lograr.

Y no puedo dejar de agradecer a todos aquellos docentes que durante mi carrera profesional me compartieron su conocimiento y experiencia, asimismo a mi asesor que me guio de la mejor forma para poder lograr este objetivo.

Y un agradecimiento también a todas aquellas personas que de alguna u otra manera fueron partícipes y contribuyeron para que esta meta se haga realidad.

Elvis Jonathan Gonzales Siesquén,

DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro a mi madre hermosa, que siempre estuvo ahí sin importar las circunstancias haciéndome sentir que nunca estaré solo, a mi excelente padre que me enseñó a hacer el bien sin importar quien, porque de eso se trata de disfrutar tus logros sin haber sobrepasado por encima a alguien y a mis hermanos que siempre estuvieron ahí apoyándome y guiándome para que en cada paso que dé sea con firmeza y no un paso en falso para así poder lograr poco a poco mis metas.

Este logro es de ellos y no solo mío, porque sin ellos y su apoyo incondicional no hubiera dado este gran paso e importante para mi vida personal y profesional.

Elvis Jonathan Gonzales Siesquén

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar satisfactoriamente esta etapa de mi vida.

A mi madre, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante durante toda mi formación académica. Gracias por acompañarme en cada desafío, por impulsarme a seguir adelante y por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia es posible alcanzar cualquier meta.

A la memoria de mi abuelo, quien dejó una huella imborrable en mi vida. Aunque no pudo acompañarme físicamente hasta este momento, sus enseñanzas, valores y recuerdos fueron una motivación permanente para seguir luchando por mis sueños. Su legado vivirá siempre en mí.

A mis familiares, por su comprensión, confianza y palabras de aliento en cada etapa de este proceso. Su apoyo fue fundamental para culminar este importante objetivo.

Finalmente, agradezco a mis asesores, docentes y a todas las personas que contribuyeron, directa o indirectamente, en el desarrollo y culminación de esta tesis, compartiendo sus conocimientos, orientación y experiencia.

Que este logro represente no solo un crecimiento profesional, sino también un homenaje a todas las personas que hicieron posible este sueño.

Cristhofer Luis Tenorio Ayacila

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis, fruto de esfuerzo, perseverancia y dedicación, en primer lugar, a la memoria de mi querido abuelo Gerardo Ayacila, quien, aunque hoy no se encuentra físicamente a mi lado, sigue siendo una fuente de inspiración en mi vida. Sus enseñanzas, valores, consejos y ejemplo permanecerán siempre en mi corazón y me motivan a seguir adelante en cada uno de mis objetivos. Este logro también es suyo, porque su recuerdo me impulsó a no rendirme y a esforzarme cada día para alcanzar mis metas.

A mi madre Maribel Ayacila, con profundo amor y gratitud, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por tu apoyo incondicional, tus sacrificios, tus palabras de aliento y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Tu esfuerzo, dedicación y amor han sido la fuerza que me permitió culminar esta importante etapa académica. Este logro es también el reflejo de todo lo que has hecho por mí.

Asimismo, dedico este trabajo a mi familia, quienes con su cariño, comprensión y constante apoyo estuvieron presentes a lo largo de este camino, brindándome ánimo y motivación para seguir adelante y alcanzar esta meta profesional.

Cristhofer Luis Tenorio Ayacila

Índice General

1	CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO	19
1.1	Antecedentes	19
1.1.1	Antecedentes Internacionales.....	19
1.1.2	Antecedentes Nacionales	20
1.2	Bases Teóricas.....	22
1.2.1	Conectividad rural y brecha digital	22
1.2.2	Conceptos fundamentales: red de acceso y red de distribución.....	23
1.2.3	Alternativas tecnológicas para la red de acceso.....	23
1.2.4	Alternativas tecnológicas para la red de distribución interna	24
1.2.5	Propagación radioeléctrica, topografía y presupuesto de enlace	24
2	CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES	26
2.1	Tipo de investigación	26
2.2	Diseño de la investigación.....	27
2.3	Población y muestra	28
2.3.1	Población y muestra.....	28
2.4	Técnicas, Instrumentos, equipos y materiales	28
2.4.1	Técnicas	28
2.4.2	Instrumentos.....	28
2.4.3	Equipos y materiales	29
3	CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.1	Resultados	30
3.1.1	Determinación de la demanda de conectividad	30

3.1.2	Modelado del entorno físico y geográfico	32
3.1.3	Evaluación de la alternativa de radioenlace inalámbrico.....	33
3.1.4	Evaluación de la alternativa de fibra óptica	53
3.1.5	Evaluación de la alternativa satelital.....	55
3.1.6	Análisis comparativo y selección de la alternativa tecnológica.....	58
3.2	Discusión.....	60
4	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
4.1	Conclusiones	63
4.2	Recomendaciones.....	66
5	REFERENCIAS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Brecha digital	22
Figura 2 redes inalámbricas	25
Figura 3 Ubicación de los puntos del enlace en el simulador LINKPlanner.	33
Figura 4 Arquitectura de enlace Inalámbrico con un repetidor.	34
Figura 5 Área de cobertura de señal en el punto de Incahuasi	35
Figura 6 Perfil topográfico del enlace Incahuasi–Repetidor	36
Figura 7 Configuración del radioenlace Incahuasi–Repetidor en LINKPlanner	36
Figura 8 Configuración de la antena emisora estación Incahuasi.....	37
Figura 9 Configuración de la antena receptora estación Repetidor	38
Figura 10 Resultados de desempeño antena emisora (Incahuasi).....	39
Figura 11 Resultados de desempeño antena receptora (Repetidor).....	39
Figura 12 Resultado agregado del enlace Incahuasi–Repetidor	40
Figura 13 Parámetros agregados y pérdidas de propagación enlace Incahuasi - Repetidor ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 14 Capacidad de transmisión vs. disponibilidad sentido Incahuasi . ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 15 Capacidad de transmisión vs. disponibilidad sentido Repetidor	41
Figura 16 Resultados por modo de modulación enlace Incahuasi–Repetidor	42
Figura 17 Perfil topográfico del enlace Repetidor–I.E. Atumpampa	43
Figura 18 Configuración de equipamiento enlace Repetidor - I.E. Atumpampa	43
Figura 19 Configuración de antena emisora estación Repetidor	44

Figura 20 Configuración de antena receptora I.E. Atumpampa	44
Figura 21 Resultados de desempeño estación Repetidor (tramo 2).....	45
Figura 22 Resultados de desempeño estación I.E. Atumpampa (tramo 2).....	46
Figura 23 Resumen del enlace (Link Summary) Repetidor - I.E. Atumpampa.....	47
Figura 24 Resultados por modo de modulación enlace Repetidor–I.E. Atumpampa.....	48
Figura 25 Capacidad vs. disponibilidad sentido Repetidor (tramo 2)	48
Figura 26 Capacidad vs. disponibilidad sentido I.E. Atumpampa (tramo 2).....	49
Figura 27 Arquitectura de enlace inalámbrico con estación repetidora.....	50
Figura 28 Simulación en Radio Mobile del enlace directo Incahuasi - I.E. Atumpampa	51
Figura 29 Diagrama del enlace de fibra óptica Incahuasi–I.E. Atumpampa	54
Figura 30 Topología simulada en Cisco Packet Tracer (acceso satelital y distribución por VLAN)	56
Figura 31 Enlace Satelital LEO: Incahuasi - IE Atumpampa.....	57
Figura 32 Comparación multicriterio de las tres tecnologías de conectividad evaluadas	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ancho de banda estimado por tipo de uso	31
Tabla 2 Escenario de demanda con 40 usuarios concurrentes	32
Tabla 3 Coordenadas geográficas de los puntos del enlace radioeléctrico	32
Tabla 4 Configuración de antena estación Incahuasi	37
Tabla 5 Configuración de antena estación Repetidor	38
Tabla 6 Parámetros de desempeño del enlace Incahuasi–Repetidor.....	39
Tabla 7 Principales resultados por modo de modulación enlace Incahuasi–Repetidor	42
Tabla 8 Costos de equipamiento enlace Incahuasi – Repetidor.....	42
Tabla 9 Parámetros de desempeño del enlace Repetidor–I.E. Atumpampa	46
Tabla 10 Parámetros agregados y pérdidas de propagación enlace Repetidor–I.E. Atumpampa	47
Tabla 11 Costos de equipamiento enlace Repetidor - I.E. Atumpampa	49
Tabla 12 Parámetros principales del enlace directo Incahuasi - I.E. Atumpampa (Radio Mobile)	51
Tabla 13 Capacidad teórica según el límite de Shannon - enlace directo.....	52
Tabla 14 Especificaciones técnicas del enlace de fibra óptica.....	54
Tabla 15 Plan de direccionamiento IP de la red de distribución (VLAN)	57
Tabla 16 Comparativo de las tres alternativas tecnológicas de acceso	58

RESUMEN

La Institución Educativa N.º 10789 Señor de los Milagros, C.P. Atumpampa, distrito de Incahuasi, provincia de Ferreñafe, Lambayeque, presenta conectividad limitada por su ubicación rural, la topografía andina y la escasa infraestructura de telecomunicaciones. La investigación tuvo como objetivo diseñar una red de acceso y distribución para mejorar dicha conectividad, mediante un enfoque cuantitativo, aplicado y experimental, con simulación controlada. Se evaluaron tres alternativas de acceso radioenlace inalámbrico, fibra óptica y enlace satelital y el diseño de la red de distribución interna mediante VLAN. Se determinó una demanda de 240 Mbps para 40 usuarios concurrentes, modelando el entorno geográfico como insumo de simulaciones en LINKPlanner, Radio Mobile y Packet Tracer. Los resultados evidenciaron que las tres alternativas son técnicamente viables: el radioenlace alcanzó 449,75 Mbps agregados con disponibilidad cercana al 100 %; la fibra óptica ofreció 100 Mbps escalables a 1 Gbps con 99,91 % de disponibilidad; y el enlace satelital permitió 212 Mbps de descarga con 28 ms de latencia. El análisis comparativo determinó que la fibra óptica es la alternativa más conveniente, mientras que el radioenlace y el satélite constituyen respaldos viables. Se confirma la hipótesis: el diseño de la red mejora la conectividad de la I.E. 10789.

Palabras clave: Red de acceso, red de distribución, conectividad rural, radioenlace inalámbrico, fibra óptica.

ABSTRACT

Educational Institution No. 10789 Señor de los Milagros, Atumpampa, Incahuasi district, Ferreñafe province, Lambayeque, faces limited connectivity due to its rural location, Andean topography and scarce telecommunications infrastructure. This research aimed to design an access and distribution network to improve that connectivity, following a quantitative, applied approach with experimental design and controlled simulation. Three access alternatives were evaluated: wireless radio link, fiber optics and satellite link along with the internal distribution network design through VLAN segmentation. A demand of 240 Mbps for 40 concurrent users was determined, modeling the geographic environment as input for simulations in LINKPlanner, Radio Mobile and Packet Tracer. Results showed that all three alternatives are technically feasible: the radio link reached 449.75 Mbps aggregated with availability close to 100 %; fiber optics offered 100 Mbps scalable to 1 Gbps with 99.91 % availability; and the satellite link allowed 212 Mbps download speed with 28 ms latency. The comparative analysis determined that fiber optics is the most convenient alternative, while the radio link and satellite link represent viable backups. This confirms the hypothesis: designing the network improves the connectivity of I.E. 10789.

Keywords: Access network, distribution network, rural connectivity, wireless radio link, fiber optics.

INTRODUCCIÓN

La conectividad escolar constituye un habilitador clave de los modelos educativos híbridos, del acceso a recursos digitales y de la continuidad pedagógica; sin embargo, su disponibilidad sigue siendo desigual. En Latinoamérica, aproximadamente 2 de cada 10 estudiantes asisten a escuelas sin acceso a Internet o con un acceso deficiente, lo que limita el uso de plataformas educativas, bibliotecas digitales y evaluación en línea. Esta brecha convierte a la conectividad en un determinante de exclusión o inclusión educativa, con efectos acumulativos sobre el aprendizaje y las oportunidades de los estudiantes (UNESCO, 2023).

En el Perú, la conectividad ha crecido de manera sostenida, pero la brecha rural persiste tanto en la calidad del servicio como en las capacidades de uso efectivo. Según ERESTEL (2025), el 80,1 % de los hogares rurales accedió a Internet fijo o móvil; sin embargo, la disponibilidad de equipamiento para el aprendizaje es considerablemente menor: en el trimestre octubre-noviembre-diciembre de 2024, solo el 21,7 % de los hogares rurales contaba simultáneamente con computadora e Internet, condición crítica para la realización de tareas escolares, actividades de ofimática y el acceso a contenidos de mayor complejidad. Esta problemática se traduce en escuelas con una conectividad limitada para sostener servicios educativos digitales (OSIPTEL, 2024).

En la Institución Educativa N.º 10789, ubicada en el Centro Poblado Atumpampa, distrito de Incahuasi, provincia de Ferreñafe, región Lambayeque, la conectividad educativa se ve condicionada por la dispersión de las viviendas, el relieve andino y los mayores costos de última

milla, factores que se traducen en enlaces inestables y en restricciones para el desarrollo de clases mediadas por tecnología. A nivel regional, en 2023 Lambayeque registró un 46,6 % de hogares con Internet fijo y un 7,1 % sin acceso a Internet ni fijo ni móvil, cifras que evidencian limitaciones de infraestructura y de asequibilidad que se acentúan en los centros poblados rurales. Estos datos confirman que la educación rural enfrenta barreras estructurales para el acceso a recursos digitales (AFIN, 2025).

Investigar y diseñar una red de acceso y distribución para la I.E. 10789 resulta relevante porque la conectividad ha dejado de ser un insumo accesorio para convertirse en una condición necesaria para el acceso equitativo a oportunidades educativas, la formación docente y la gestión escolar informada. Reducir la inestabilidad del servicio y optimizar la distribución interna de la conectividad permitirá integrar con mayor continuidad los recursos digitales, las plataformas institucionales y los contenidos abiertos al currículo; asimismo, el cierre de brechas de conectividad en zonas rurales contribuye a disminuir las desigualdades territoriales, con efectos sociales y económicos que se proyectan en el mediano plazo (Paternina, 2022).

La presente investigación se justifica en que el problema combina limitaciones de acceso externo, restricciones de infraestructura regional y necesidades de distribución interna propias de un entorno rural. En consecuencia, la propuesta de red debe responder a la demanda educativa real, a criterios de cobertura, capacidad y disponibilidad, y a las restricciones geográficas y económicas propias del distrito, de modo que la institución educativa pueda sostener los servicios digitales mínimos para la enseñanza, la consulta de información, el trabajo académico y la comunicación institucional, a partir de una arquitectura técnicamente viable (Gamboa & García, 2024).

Frente a esta problemática, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera el diseño de la red de acceso y distribución mejorará la conectividad en la Institución Educativa N.º 10789, Centro Poblado Atumpampa, distrito de Incahuasi, provincia de Ferreñafe, región Lambayeque? Como hipótesis de trabajo se plantea que, si se diseña una red de acceso y distribución, entonces se mejorará la conectividad en la I.E. 10789, C.P. Atumpampa, distrito de Incahuasi, provincia de Ferreñafe, región Lambayeque.

Para dar respuesta a esta interrogante, se estableció como objetivo general diseñar la red de acceso y distribución para mejorar la conectividad en la I.E. 10789. Este objetivo general se desagregó en los siguientes objetivos específicos: (i) revisar la literatura científica sobre redes de acceso, redes de distribución y soluciones de conectividad en ámbitos rurales, con la finalidad de identificar y evaluar alternativas tecnológicas compatibles con las condiciones geográficas de la institución; (ii) determinar la demanda y los requisitos de servicio de la institución educativa, identificando el número de usuarios potenciales y concurrentes, así como los perfiles de uso; (iii) modelar el entorno físico y geográfico del Centro Poblado Atumpampa, generando información de terreno, elevación y obstáculos como insumo técnico para las herramientas de simulación; (iv) simular y validar el desempeño de alternativas tecnológicas de acceso y distribución, considerando escenarios que reproduzcan las características reales del entorno rural; y (v) determinar la alternativa tecnológica más adecuada para la red de acceso y distribución de la I.E. 10789, sustentando la selección en criterios de viabilidad técnica, cobertura, estabilidad del servicio y sostenibilidad operativa.

El presente informe se organiza en cuatro capítulos. El Capítulo I presenta el diseño teórico de la investigación, integrando los antecedentes internacionales y nacionales, así como las bases teóricas referidas a la conectividad rural, los conceptos de red de acceso y de distribución, las alternativas tecnológicas disponibles y los fundamentos de propagación radioeléctrica. El Capítulo II describe los métodos y materiales empleados, incluyendo el tipo y diseño de la investigación, el diseño de contrastación de la hipótesis, la población y muestra, y las técnicas, instrumentos, equipos y materiales utilizados. El Capítulo III presenta los resultados obtenidos a partir de la determinación de la demanda, el modelamiento del entorno geográfico y la simulación de las alternativas de radioenlace inalámbrico, fibra óptica y enlace satelital, junto con la discusión de dichos resultados a la luz de los antecedentes y las bases teóricas revisadas en el Capítulo I. Finalmente, el Capítulo IV expone las conclusiones derivadas del estudio, organizadas en función de cada objetivo específico y del objetivo general, así como las recomendaciones orientadas a la implementación de la red de acceso y distribución propuesta.

1 **CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO**

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes Internacionales

Llongo (2022), diseñó e implementó un sistema de comunicación inalámbrico para el monitoreo del sistema de emergencia eléctrico en nodos críticos de comunicación de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT EP en Chimborazo. La investigación fue experimental, utilizando métodos analíticos y técnicas de observación. El prototipo monitorea el voltaje de la red eléctrica y baterías de respaldo mediante Arduino Mega 2560, ESP8266NodeMCU y sensores, transmitiendo los datos vía WiFi a una app móvil. La muestra incluyó 50 mediciones con el dispositivo, la app y un multímetro en las líneas L1, L2 y baterías. Los resultados mostraron que los promedios de voltaje son estadísticamente iguales entre los instrumentos, con alta efectividad y confiabilidad del dispositivo.

Chela (2023), diseñó e implementó una red inalámbrica en Las Cochas, Ecuador, para proveer internet en una zona sin cobertura ni red eléctrica. Mediante una metodología cuantitativa y el diseño Top-Down, se analizaron 55 familias de cuatro sectores. Se utilizaron software como Radio Mobile y Packet Tracer para simular radioenlaces, y encuestas para el estudio de factibilidad. Los resultados validaron un enlace punto a punto de 5.58 km con potencia recibida de -53 dBm y cobertura sectorial en 5 GHz con velocidades de descarga superiores a 154 Mbps. Se concluye que la red inalámbrica energizada con paneles solares es una solución viable para brindar conectividad en entornos rurales aislados.

Castillo & Rodríguez (2025), planteó como objetivo fue diseñar una infraestructura para proveer internet de alta calidad en dichas zonas costeras. Mediante un enfoque cualitativo de estudio de caso, se recolectaron datos a través de entrevistas a profundidad y grupos focales aplicados a un experto en redes y a grupos pequeños de 10 habitantes locales. Los resultados identificaron una necesidad crítica de conectividad estable, determinaron que la tecnología WiMAX es óptima para enlaces punto a punto en el terreno montañoso y propusieron una topología en malla con torres estratégicas. Se concluye que el diseño de red elaborado garantiza cobertura y calidad de servicio, mejorando significativamente el acceso a información y oportunidades socioeconómicas para las comunidades.

1.1.2 Antecedentes Nacionales

Sangama (2023), propone como objetivo determinar si es posible mejorar el servicio de internet mediante la implementación del estándar IEEE 802.11ax. La metodología empleada fue de tipo aplicada, nivel descriptivo y diseño preexperimental con medición pre-test y post-test. La población estuvo conformada por 23 tarjetas de red y 23 trabajadores, seleccionando una muestra no probabilística de 7 tarjetas de red y 7 trabajadores. Se utilizaron como instrumentos una ficha de observación para medir indicadores técnicos (SNR, potencia de señal, latencia, velocidad de transmisión) y un cuestionario de satisfacción del usuario. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en todos los indicadores: calidad de enlace (39.14 dB), distancia máxima (6.57 m), potencia de señal (27.86 dBm), reducción de latencia (93.29 ms) y velocidades de descarga/subida incrementadas. Concluyó que la implementación del Wifi-6 mejoró significativamente el servicio de internet, elevando la satisfacción del usuario de 3.0 a 4.0 puntos según escala Likert.

Apaza & Ramos (2022), diseñaron un sistema de radioenlaces digitales de banda ancha para mejorar el acceso a los servicios de tele-educación digital en las instituciones educativas rurales del distrito de Torata, región Moquegua. La metodología siguió un levantamiento topográfico del terreno, selección de equipos para alta disponibilidad y buen margen de desvanecimiento, cálculo de parámetros básicos de cada radioenlace y simulación con el software RadioMobile para estudiar la viabilidad. La muestra comprendió 11 instituciones educativas rurales con 654 estudiantes y 65 docentes. Como resultado, se determinó una velocidad de transmisión de 248.25 Mbps y un ancho de banda de 1,136.5 Mbps, cumpliendo los objetivos de calidad y confiabilidad según el CCIR.

Gutiérrez (2024), tuvo como objetivo determinar la relación entre dicha infraestructura y la reducción de la brecha digital. Empleó una metodología cuantitativa, no experimental y correlacional, aplicando un cuestionario validado (Alfa de Cronbach de 0.801 y 0.804) a una muestra de 167 habitantes de Obrajillo. Los resultados mostraron una correlación baja pero significativa (Rho de Spearman = 0.40, $p = 0.000$) entre las variables principales, confirmándose además correlaciones moderadas con el acceso a las TIC ($\rho = 0.45$) y el desarrollo socioeconómico ($\rho = 0.47$), y baja con la cultura digital ($\rho = 0.30$). Se concluye que la infraestructura de telecomunicaciones se relaciona significativamente, aunque con intensidad baja, con la reducción de la brecha digital en el contexto rural estudiado.

1.2 Bases Teóricas

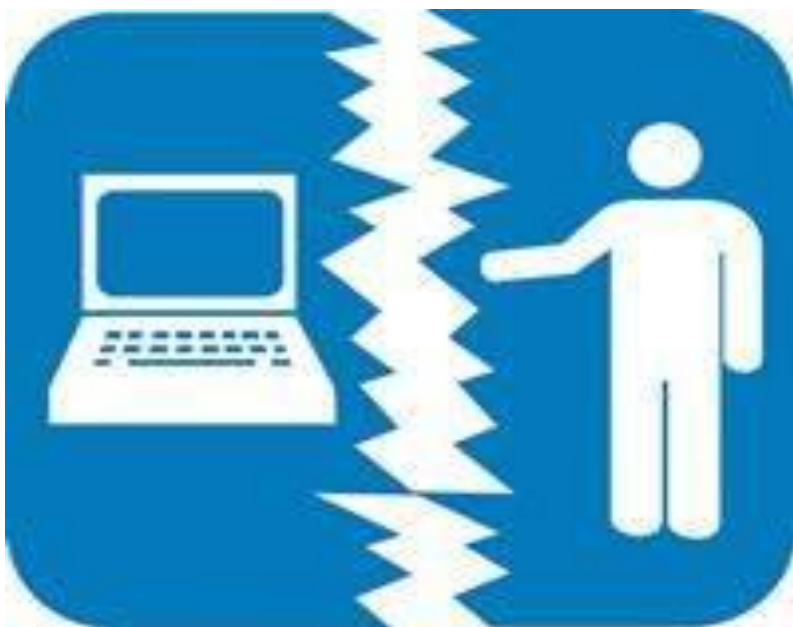
1.2.1 Conectividad rural y brecha digital

La conectividad en entornos rurales no se reduce a tener Internet, sino a asegurar continuidad, capacidad y calidad de servicio, en un contexto condicionado por dispersión geográfica, limitaciones de infraestructura y costos de despliegue. En Perú, OSIPTEL reporta que en 2023 el acceso a Internet fijo o móvil en hogares rurales alcanzó 80.1%, lo cual evidencia avance en inclusión digital, pero no garantiza calidad suficiente para usos educativos institucionales, evidenciándose en la capacidad por usuario, estabilidad, disponibilidad (ERESTEL, 2023).

La política pública orientada al cierre de brechas a través de proyectos e intervenciones muestra que la conectividad de instituciones públicas y educativas es un eje de intervención, reforzando la pertinencia de diseñar soluciones de conectividad para escuelas rurales como una prioridad de desarrollo territorial (PRONATEL, 2024).

Figura 1

Brecha digital



1.2.2 Conceptos fundamentales: red de acceso y red de distribución

En telecomunicaciones, la conectividad se modela con dos subsistemas:

- **Red de acceso:** el tramo que vincula la institución con un punto de presencia o proveedor (backhaul, middle-mile y last-mile según el caso).
- **Red de distribución:** el tramo interno que reparte la conectividad dentro del campus escolar hacia aulas, laboratorios y administración (LAN y WLAN).

Este enfoque es coherente con principios contemporáneos de arquitectura por capas, donde cada capa tiene un rol funcional y facilita escalabilidad y gestión (Matela, 2025).

1.2.3 Alternativas tecnológicas para la red de acceso

En zonas rurales, la red de acceso suele resolverse con combinaciones de tecnologías, seleccionadas por factibilidad técnica y económica, en la literatura reciente sobre evolución de tecnologías inalámbricas y decisiones de conectividad, se enfatiza que la combinación de soluciones tecnológicas, depende de espectro disponible, topografía, demanda y sostenibilidad del modelo de inversión (Oughton et al., 2024).

Las opciones tecnológicas para el acceso son:

- **Fibra óptica**, cuando existe infraestructura cercana o proyectos de transporte.
- **Radioenlaces microondas / backhaul inalámbrico**, cuando la fibra no es viable por relieve o costos. Una revisión sobre backhaul en 5G para países en desarrollo detalla desafíos y alternativas de redes de transporte y backhaul, útiles para sustentar criterios de selección en entornos con restricciones de infraestructura (Sawad et al., 2023).

- **Acceso móvil tipo Fixed Wireless Access (FWA)** sobre redes 4G/5G, que suele evaluarse mediante análisis tecno-económicos para ruralidad y suburbios, comparando costos y viabilidad de inversión (Laitsou et al., 2022).
- **Satélite (GEO o LEO)** como alternativa cuando el transporte terrestre es inviable o demasiado costoso, un estudio empírico reciente sobre adopción LEO reporta mejoras percibidas en velocidad, confiabilidad y costo-efectividad frente a servicios satelitales alternativos en comunidades remotas, aportando base para considerar LEO como opción de acceso en ruralidad (McMahon et al., 2025).

1.2.4 Alternativas tecnológicas para la red de distribución interna

La distribución interna en una institución educativa típicamente combina:

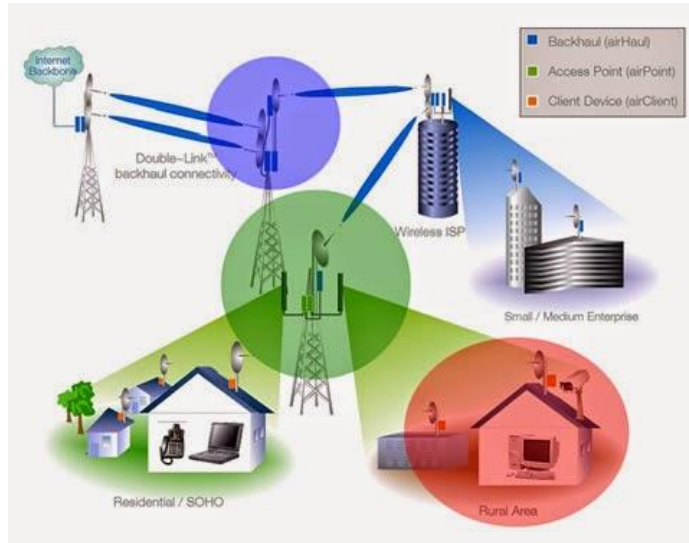
- **LAN cableada** (Ethernet con cableado estructurado y switches), recomendada para equipos fijos, estabilidad y baja latencia.
- **WLAN (Wi-Fi)** para movilidad y cobertura en aulas, El estándar IEEE 802.11ax (base de Wi-Fi 6) está orientado a eficiencia en escenarios densos, lo que puede ser relevante para aulas con múltiples dispositivos conectados.

1.2.5 Propagación radioeléctrica, topografía y presupuesto de enlace

En zonas como Incahuasi, la topografía y obstáculos condicionan la conectividad, especialmente en enlaces inalámbricos, reflejándose en indicadores como: pérdidas de propagación, línea de vista, zona de Fresnel, difracción y márgenes de desvanecimiento, porque estos determinan disponibilidad y estabilidad del enlace (Chateauvert et al., 2025).

Figura 2

redes inalámbricas



2 CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, cuantitativa, tecnológica y experimental con simulación controlada. Es aplicada porque busca resolver un problema tecnológico concreto: diseñar una red de acceso y distribución orientada a mejorar la conectividad en la Institución Educativa N.º 10789, ubicada en el Centro Poblado Atumpampa, distrito de Incahuasi, provincia de Ferreñafe, región Lambayeque. La propuesta responde a una necesidad real de conectividad educativa en un entorno rural, donde las condiciones geográficas, la limitada infraestructura de telecomunicaciones y las restricciones de acceso a servicios digitales afectan el desarrollo de actividades académicas, administrativas y de gestión institucional.

Es cuantitativa porque las variables de estudio se expresan mediante indicadores técnicos medibles, tales como ancho de banda disponible, velocidad de transmisión, latencia, pérdida de paquetes, nivel de señal, relación señal/ruido, margen de enlace, cobertura inalámbrica, disponibilidad del servicio, capacidad de usuarios concurrentes y calidad de conectividad en los ambientes de la institución educativa. Estos indicadores permitirán evaluar objetivamente el desempeño de la red propuesta y compararlo con las condiciones actuales de conectividad.

Es experimental con simulación controlada porque se evaluará el comportamiento de la red propuesta en un entorno computacional, mediante el modelamiento de escenarios de conectividad, propagación, cobertura, tráfico de datos y desempeño de la infraestructura de red. En dicho entorno se manipularán parámetros técnicos como la tecnología de acceso, ubicación de equipos, potencia de transmisión, ganancia de antenas, altura de instalación, ancho de banda asignado, número de

usuarios, demanda de tráfico y distribución de puntos de acceso, con la finalidad de observar su efecto sobre los indicadores de conectividad.

2.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental con simulación controlada y comparación técnica entre escenarios, debido a que se evaluará el desempeño de la red de acceso y distribución propuesta frente a las condiciones actuales de conectividad de la institución educativa. Para ello, se establecerá una línea base del estado actual del servicio, considerando aspectos como cobertura, estabilidad, velocidad de transmisión, latencia, disponibilidad, cantidad de usuarios atendidos y limitaciones de infraestructura. Posteriormente, se diseñará y simulará una arquitectura de red que responda a la demanda educativa y a las condiciones geográficas del Centro Poblado Atumpampa.

El diseño contempla una secuencia metodológica compuesta por el diagnóstico de la conectividad actual de la I.E. 10789, el levantamiento de información técnica y geográfica del entorno, la estimación de la demanda de ancho de banda, la selección de la tecnología de acceso más adecuada, el diseño de la red de distribución interna, el dimensionamiento de equipos, la simulación de cobertura y desempeño, y la evaluación comparativa de los indicadores técnicos obtenidos. Este procedimiento permitirá verificar si la propuesta mejora las condiciones de conectividad respecto al escenario inicial.

La variable independiente está representada por el diseño de la red de acceso y distribución, considerando la tecnología seleccionada, la topología de red, los equipos de telecomunicaciones, los parámetros de transmisión, el sistema de distribución interna y la ubicación de los puntos de

acceso. La variable dependiente corresponde a la mejora de la conectividad, expresada mediante indicadores como cobertura, ancho de banda disponible, velocidad de transmisión, latencia, pérdida de paquetes, disponibilidad del servicio, estabilidad del enlace y capacidad de atención a usuarios concurrentes.

2.3 Población y muestra

2.3.1 Población y muestra

Está constituida por las alternativas tecnológicas y configuraciones de redes de acceso y de distribución empleadas para proveer conectividad a Internet en instituciones educativas ubicadas en ámbitos rurales, considerando condiciones comparables a las del Centro Poblado Atumpampa, distrito de Incahuasi, provincia de Ferreñafe, región Lambayeque, tales como topografía compleja, limitaciones de infraestructura y restricciones operativas para instalación y mantenimiento.

2.4 Técnicas, Instrumentos, equipos y materiales

2.4.1 Técnicas

- Análisis documental de tesis, artículos científicos, normas técnicas y reportes especializados sobre redes de acceso, redes de distribución y conectividad rural.
- Modelado y simulación con herramientas especializadas para validar desempeño de alternativas en escenarios representativos del entorno rural.

2.4.2 Instrumentos

- Fichas bibliográficas, registro de fuentes y metadatos).
- Fichas de contenido, síntesis de fundamentos, parámetros, métricas y hallazgos relevantes.

- Matriz de comparación de alternativas, criterios técnicos y operativos para acceso y distribución.
- Datos técnicos provenientes de artículos científicos, tesis, especificaciones de equipos y parámetros de simulación.

2.4.3 Equipos y materiales

- Computadora con capacidad de procesamiento y memoria para simulación y análisis.
- Software de simulación de redes.
- Herramientas de información geográfica y datos cartográficos, para modelado del entorno.
- Repositorio digital para organización de fuentes (gestor bibliográfico y almacenamiento de documentos).

3 CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

La Institución Educativa N.º 10789, Señor de los Milagros, ubicada en el Centro Poblado Atumpampa, distrito de Incahuasi, provincia de Ferreñafe, región Lambayeque, presenta condiciones geográficas rurales en las que el acceso a servicios de telecomunicaciones se ve limitado por la topografía, la dispersión de la población y la escasa infraestructura de transporte de datos disponible en la zona. Estas características dificultan el acceso a un servicio de Internet con la capacidad y estabilidad necesarias para el desarrollo de las actividades académicas, administrativas y de gestión institucional.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en función de los objetivos específicos de la investigación: la determinación de la demanda de conectividad, el modelamiento del entorno físico y geográfico, y la simulación y validación del desempeño de tres alternativas tecnológicas de acceso a Internet radioenlace inalámbrico, fibra óptica y enlace satelital, considerando en cada caso las condiciones del terreno, la infraestructura disponible y el desempeño esperado del enlace. Finalmente, se presenta el análisis comparativo que permite seleccionar la alternativa más adecuada para la institución educativa.

3.1.1 Determinación de la demanda de conectividad

La Institución Educativa N.º 10789 atiende el nivel secundario con cinco aulas (1.º a 5.º grado, una sección por grado) y un promedio de 15 alumnos por aula, lo que equivale a 75

estudiantes. A ello se agregan 6 docentes y 2 trabajadores administrativos, con lo cual la población total de usuarios potenciales de la red asciende a 83 personas.

Para dimensionar el ancho de banda requerido se consideraron cuatro perfiles de uso característicos de un entorno educativo (Tabla 1), navegación web y correo electrónico, acceso a plataformas educativas, videoclases en alta definición y uso de laboratorios virtuales o contenido multimedia. A partir de estos perfiles se estimó un consumo promedio de 6 Mbps por usuario activo.

Tabla 1

Ancho de banda estimado por tipo de uso

Tipo de uso	Ancho de banda por alumno
Navegación web y correo	0,5 Mbps
Plataformas educativas	1 Mbps
Videoclases HD	2 Mbps
Laboratorios virtuales y contenido multimedia	2,5 Mbps

Considerando un escenario realista de concurrencia en el que no la totalidad de los 83 usuarios se conecta de manera simultánea, sino un máximo de 40 usuarios concurrentes durante las horas de mayor actividad académica se obtiene una demanda de ancho de banda recomendada de 240 Mbps (Tabla 2). Este valor constituye el referente principal contra el cual se contrasta el desempeño de las alternativas tecnológicas simuladas en las secciones siguientes.

Tabla 2*Escenario de demanda con 40 usuarios concurrentes*

Concepto	Valor
Usuarios totales	83
Usuarios simultáneos	40
Consumo promedio por usuario	6 Mbps
Ancho de banda recomendado	240 Mbps

3.1.2 Modelado del entorno físico y geográfico

Debido a las condiciones topográficas del distrito de Incahuasi, caracterizadas por la presencia de elevaciones y accidentes geográficos andinos, el modelamiento del entorno físico constituyó un insumo indispensable para evaluar la viabilidad de cada alternativa de acceso. Se identificaron tres puntos de interés: el nodo de acceso a Internet en el distrito de Incahuasi, una posible estación repetidora en una zona de mayor elevación, y la Institución Educativa N.º 10789 en el centro poblado Atumpampa. Las coordenadas geográficas de estos puntos, obtenidas mediante el software Cambium Networks LINKPlanner, se presentan en la Tabla 3.

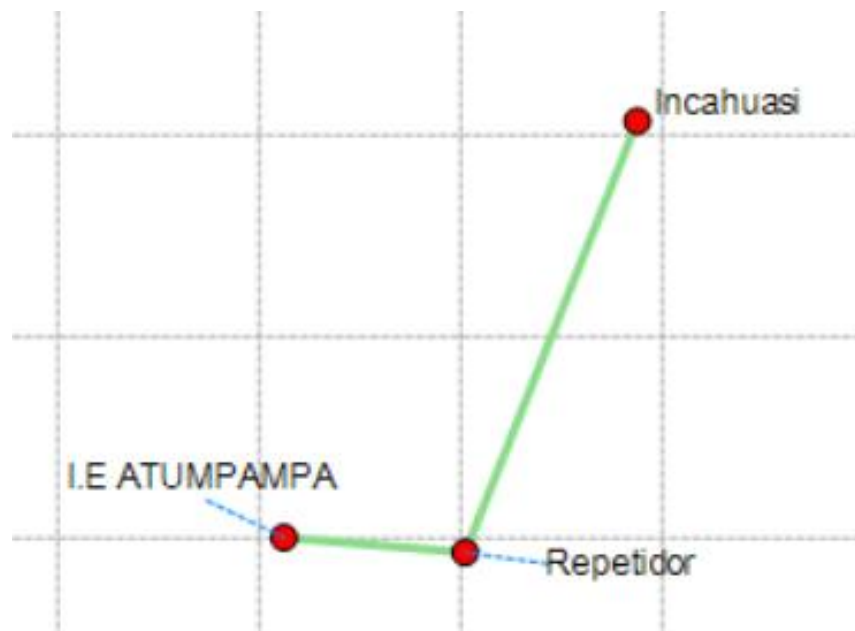
Tabla 3*Coordenadas geográficas de los puntos del enlace radioeléctrico*

Punto	Latitud	Longitud
Incahuasi	06.23418 S	079.31919 W
Repetidor	06.25337 S	079.32685 W
I.E. Atumpampa	06.25271 S	079.33491 W

A partir de estas coordenadas se generaron los perfiles topográficos de cada tramo de enlace (altura sobre el nivel del mar en función de la distancia), empleados como insumo directo para el cálculo de línea de vista, despeje de la primera zona de Fresnel y presupuesto de enlace en cada una de las alternativas de radioenlace evaluadas. De manera análoga, estas mismas coordenadas permitieron trazar la ruta de tendido del enlace de fibra óptica sobre la infraestructura de postes existente y ubicar el punto de instalación del terminal satelital.

Figura 3

Ubicación de los puntos del enlace en el simulador LINKPlanner.



3.1.3 Evaluación de la alternativa de radioenlace inalámbrico

Se planteó una propuesta preliminar para la implementación de la red de acceso inalámbrica hacia la Institución Educativa N.º 10789. Un primer análisis de línea de vista, basado en el modelo digital de elevación utilizado por Cambium Networks LINKPlanner, indicó que las elevaciones y accidentes geográficos del distrito de Incahuasi limitarían la línea de vista directa entre el nodo de

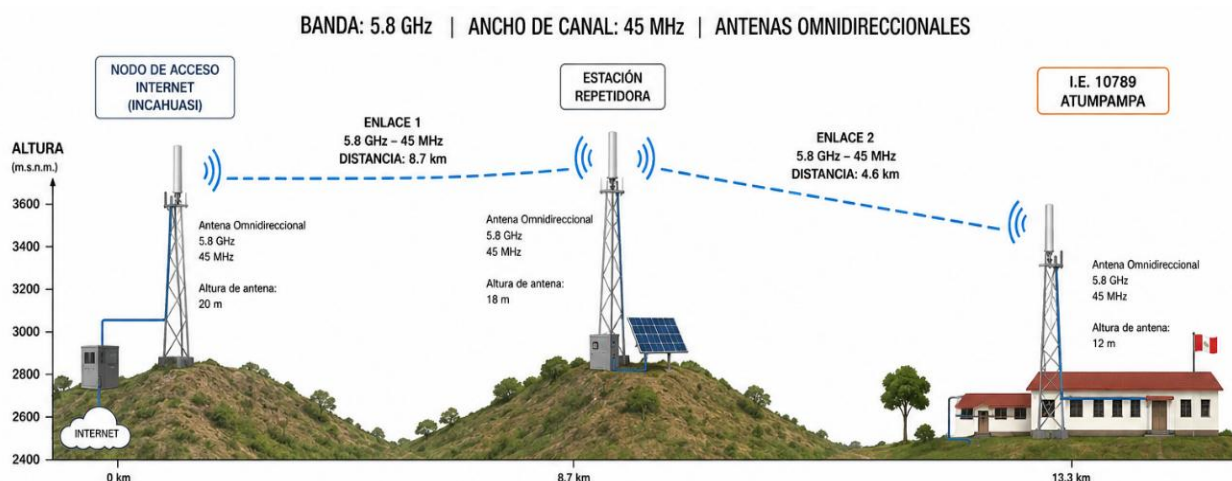
acceso a Internet y la institución educativa, por lo que se planteó como primer escenario una arquitectura de dos saltos con una estación repetidora intermedia. En una etapa posterior, empleando el software Radio Mobile con un modelo de elevación distinto, se evaluó también un segundo escenario de enlace directo de un solo salto. Ambos escenarios se presentan y comparan a continuación.

3.1.3.1 Escenario 1: arquitectura de dos saltos con estación repetidora (LINKPlanner)

En este escenario, el punto de acceso a Internet se ubica en el distrito de Incahuasi, desde donde se establece un primer radioenlace punto a punto hacia una estación repetidora estratégicamente ubicada en una zona de mayor elevación. Posteriormente, desde dicha estación repetidora se implementa un segundo radioenlace punto a punto hasta la Institución Educativa N.º 10789. La estación repetidora tiene como función restablecer la línea de vista entre ambos extremos, garantizando niveles adecuados de potencia recibida, despeje de la primera zona de Fresnel y disponibilidad del servicio.

Figura 4

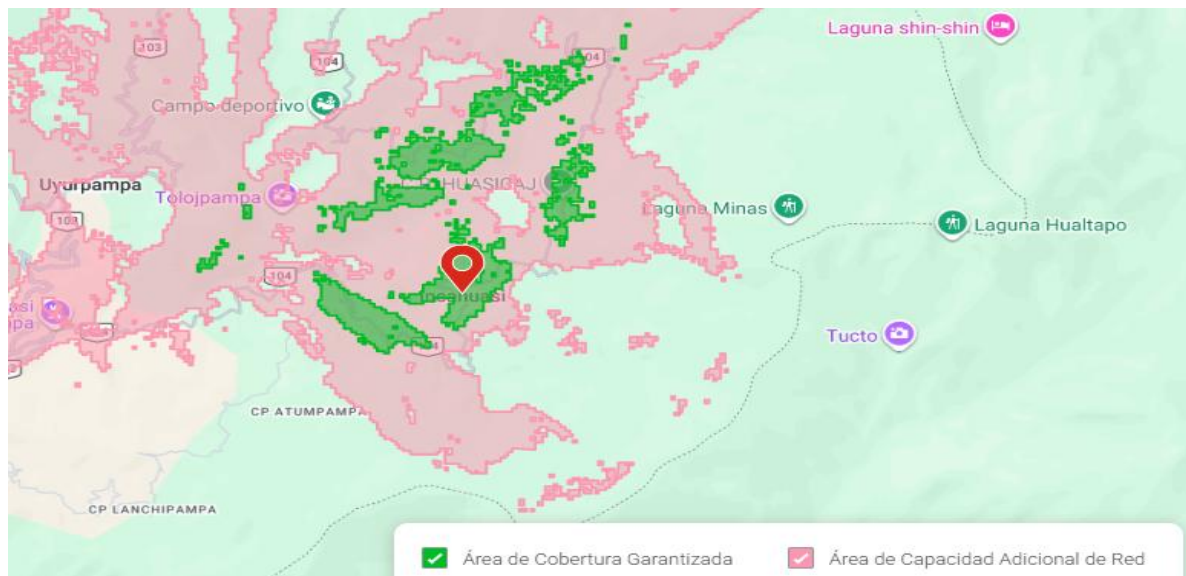
Arquitectura de enlace Inalámbrico con un repetidor.



El análisis de cobertura realizado para el punto de Incahuasi (Figura 5) muestra condiciones adecuadas para establecer en dicho lugar el punto de suministro principal, garantizando una comunicación estable con los demás puntos de la red.

Figura 5

Área de cobertura de señal en el punto de Incahuasi

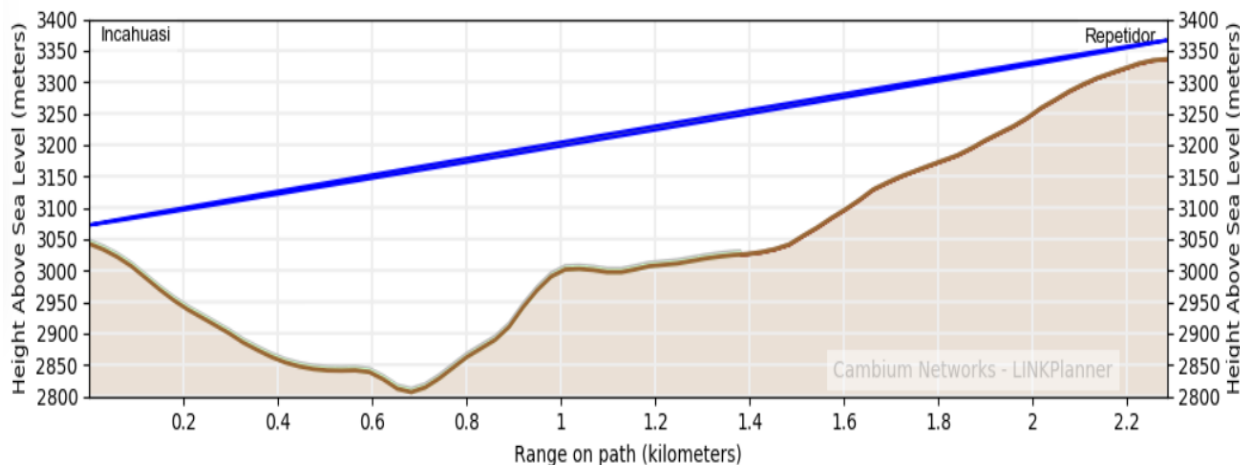


3.1.3.2 Tramo 1: Incahuasi - Repetidor

El perfil topográfico del tramo Incahuasi - Repetidor (Figura 6), de aproximadamente 2,3 a 2,64 km de longitud, muestra una depresión topográfica en la zona central del recorrido, donde la elevación desciende hasta aproximadamente 2 820 m s.n.m., para luego ascender hasta cerca de 3 340 m s.n.m. en la ubicación del repetidor. La línea de vista (LOS) se mantiene por encima del relieve durante todo el trayecto, sin obstáculos significativos que generen pérdidas adicionales por difracción, lo que favorece la estabilidad del enlace.

Figura 6

Perfil topográfico del enlace Incahuasi–Repetidor



Para el diseño de este tramo se seleccionó el equipo Cambium Networks PTP670, operando en la banda de 5,8 GHz con un ancho de canal de 45 MHz, optimización IP, tráfico simétrico, Dual Payload habilitado, modulación máxima 256QAM 0.81 y modulación mínima BPSK 0.63 Single, configurando el sitio de Incahuasi como estación maestra (Figura 8). Esta configuración permite un equilibrio adecuado entre capacidad, eficiencia espectral, estabilidad y disponibilidad del enlace.

Figura 7

Configuración del radioenlace Incahuasi - Repetidor en LINKPlanner

Region and Equipment Selection			
Band	Product	Regulation	Precise Network Timing
5.8 GHz	PTP670	Peru (preliminary)	Disabled

PTP670 Configuration								
Bandwidth	E1/T1	Optimization	Sync	Symmetry	Dual Payload	Highest Mod Mode	Lowest Ethernet Mode	Master
45 MHz	None	IP	Disabled	Symmetric	Enabled	256QAM 0.81	BPSK 0.63 Sngl	Incahuasi

En ambos extremos del tramo se emplearon antenas integradas de alta ganancia (23,0 dBi), instaladas a 20 m de altura dentro del límite máximo permitido de 30 m, con una EIRP máxima de

36 dBm y una potencia máxima de transmisión de 13 dBm (figura 8 y figura 9; tabla 4 y tabla 5).

La combinación de una antena de alta ganancia, una altura adecuada de instalación y una EIRP suficiente favorece el despeje de la zona de Fresnel y la disponibilidad del radioenlace.

Figura 8

Configuración de la antena emisora estación Incahuasi

Incahuasi

Cambium Networks High Gain Integrated (23.0dBi)

Antenna Height :

20.0

meters (Max height at site is 30.0 m)

Positioner :

☐

Maximum EIRP :

36.0 dBm

☐ User limit

Maximum Power :

13.0 dBm

☐ User limit

☐ Interference :

Tabla 4

Configuración de antena estación Incahuasi

Parámetro	Valor
Modelo de antena	Cambium Networks High Gain Integrated
Ganancia de antena	23,0 dBi
Altura de antena	20 m
Altura máxima permitida	30 m
EIRP máxima	36 dBm
Potencia máxima de transmisión	13 dBm
Positioner	Deshabilitado
Análisis de interferencia	Deshabilitado

Figura 9*Configuración de la antena receptora estación Repetidor*

Repetidor	
Cambium Networks High Gain Integrated (23.0dBi)	
Antenna Height :	20.0 meters (Max height at site is 30.0 m)
Positioner :	☐
Maximum EIRP :	36.0 dBm ☐ User limit
Maximum Power :	13.0 dBm ☐ User limit
☐ Interference :	

Tabla 5*Configuración de antena estación Repetidor*

Parámetro	Valor
Modelo de antena	Cambium Networks High Gain Integrated
Ganancia de antena	23,0 dBi
Altura de antena	20 m
Altura máxima permitida	30 m
EIRP máxima	36 dBm
Potencia máxima de transmisión	13 dBm
Positioner	Deshabilitado
Análisis de interferencia	Deshabilitado

Los resultados de desempeño obtenidos para este tramo (figura 11 y figura 12; Tabla 6) muestran una potencia de recepción estimada de $-56 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$ y una capacidad IP media de 224,88 Mbps por sentido, con una disponibilidad estimada del 100 %, muy por encima del 99,99 % mínimo exigido. Cabe precisar que el software fue configurado con un requerimiento de prueba de apenas 5 Mbps muy inferior a la demanda real de 240 Mbps estimada para 40 usuarios concurrentes (Tabla 2), por lo que el porcentaje de cumplimiento reportado por la herramienta (4 498 %) corresponde a dicho valor de prueba y no debe interpretarse como el margen frente a la

demanda real; no obstante, la capacidad efectivamente entregada (224,88 Mbps por sentido) supera también, con amplitud, la demanda real de 240 Mbps.

Figura 10

Resultados de desempeño antena emisora (Incahuasi)

Performance to Incahuasi	
Predicted Receive Power :	-56 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	224.88 Mbps
Mean IP Required :	5.0 Mbps
% of Required IP :	4498 %
Min IP Required :	1.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Tabla 6

Parámetros de desempeño del enlace Incahuasi–Repetidor

Parámetro	Valor
Potencia recibida estimada	-56 dBm ± 5 dB
Capacidad IP media estimada (por sentido)	224,88 Mbps
Capacidad IP requerida (prueba software)	5 Mbps
Capacidad mínima requerida (prueba software)	1 Mbps
Disponibilidad mínima requerida	99,99 %
Disponibilidad estimada	100 %

Figura 11

Resultados de desempeño antena receptora (Repetidor)

Performance to Repetidor	
Predicted Receive Power :	-56 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	224.88 Mbps
Mean IP Required :	5.0 Mbps
% of Required IP :	4498 %
Min IP Required :	1.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Figura 12

Resultado agregado del enlace Incahuasi–Repetidor

Link Summary	
Aggregate IP Throughput :	449.75 Mbps
Lowest Mode Availability :	100.0000 %
System Gain Margin :	32.39 dB
Free Space Path Loss :	114.88 dB
Gaseous Absorption Loss :	0.01 dB
Excess Path Loss :	0.00 dB
Total Path Loss :	114.89 dB

El resumen del enlace (Tabla 7) reporta una capacidad IP agregada de 449,75 Mbps, una disponibilidad del modo mínimo de 100,0000 %, un margen de ganancia del sistema (System Gain Margin) de 32,39 dB y pérdidas totales de trayecto de 114,89 dB, prácticamente equivalentes a la pérdida en espacio libre (114,88 dB), lo que evidencia la ausencia de obstáculos significativos en la trayectoria.

Tabla 7

Parámetros agregados y pérdidas de propagación enlace Incahuasi - Repetidor

Parámetro	Valor
Capacidad IP agregada	449,75 Mbps
Disponibilidad del modo mínimo	100,0000 %
Margen de ganancia del sistema	32,39 dB
Pérdida en espacio libre	114,88 dB
Pérdida por absorción gaseosa	0,01 dB
Pérdida adicional del trayecto	0,00 dB
Pérdida total del trayecto	114,89 dB

El análisis de la relación entre capacidad de transmisión y disponibilidad (figura 13 y figura 14) muestra que el enlace puede proporcionar aproximadamente 225 Mbps con una disponibilidad

de 99,886 %, equivalente a una indisponibilidad aproximada de 9,9 horas al año, mientras que para capacidades inferiores a 200 Mbps la disponibilidad se mantiene prácticamente constante y muy próxima al 100 %. Este comportamiento refleja la adaptación dinámica del sistema de modulación y codificación (AMC) entre los modos 256QAM 0.81 (449,84 Mbps agregados) y BPSK 0.63 (21,65 Mbps), detallada en la Tabla 8, lo que garantiza la continuidad del servicio incluso ante degradaciones de la señal.

Figura 13

Capacidad de transmisión vs. disponibilidad sentido Incahuasi

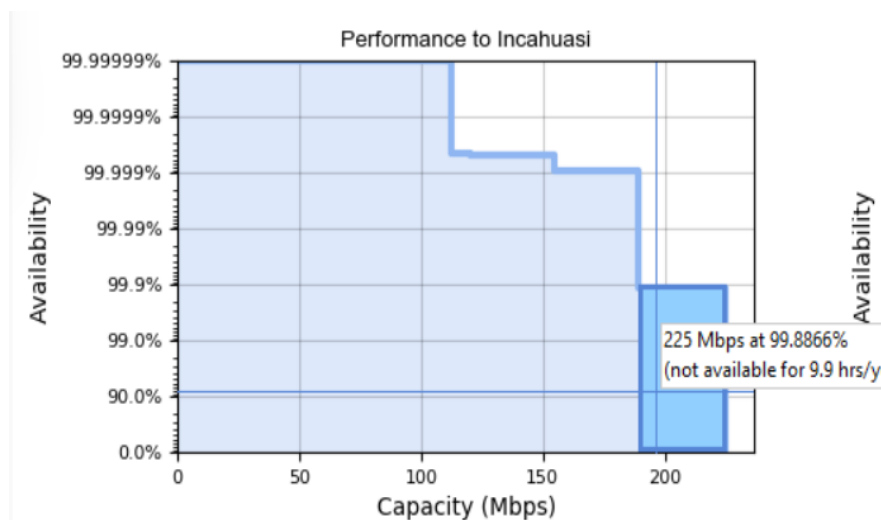


Figura 14

Capacidad de transmisión vs. disponibilidad sentido Repetidor

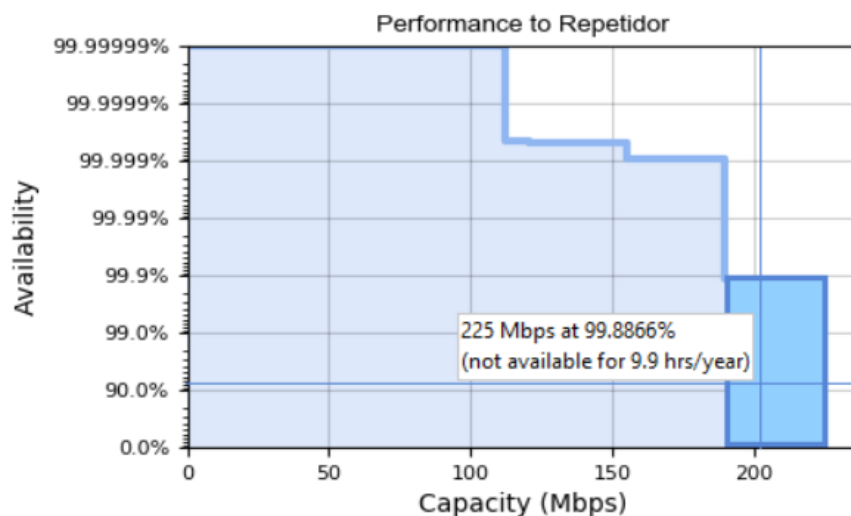


Figura 15

Resultados por modo de modulación enlace Incahuasi–Repetidor

1

Common details													
Mode:	256QAM	64QAM	64QAM	16QAM	16QAM	256QAM	64QAM	64QAM	16QAM	16QAM	QPSK	QPSK	BPSK
Code Rate:	0.81	0.92	0.75	0.87	0.83	0.81	0.92	0.75	0.87	0.83	0.87	0.83	0.83
Payloads:	Dual	Dual	Dual	Dual	Dual	Single	Single	Single	Single	Single	Single	Single	Single
Max Aggregate IP Throughput (Mbps):	449.84	379.00	309.71	240.95	173.21	224.92	189.50	154.86	120.47	86.60	60.23	43.30	21.65
Performance to Incahuasi													
Max IP Throughput (Mbps):	224.92	189.50	154.86	120.47	86.61	112.46	94.75	77.43	60.24	43.30	30.12	21.65	10.82
Fade Margin (dB):	4.38	8.11	12.24	15.36	18.99	8.03	11.41	15.36	18.43	22.94	25.26	29.28	32.39
Mode Availability (%):	99.8886	99.9990	99.9995	99.9995	99.9995	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000
Receive Time in Mode (%):	99.8886	0.1124	0.0005	0.0000	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Performance to Repetidor													
Max IP Throughput (Mbps):	224.92	189.50	154.86	120.47	86.61	112.46	94.75	77.43	60.24	43.30	30.12	21.65	10.82
Fade Margin (dB):	4.38	8.11	12.24	15.36	18.99	8.03	11.41	15.36	18.43	22.94	25.26	29.28	32.39
Mode Availability (%):	99.8886	99.9990	99.9995	99.9995	99.9995	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000
Receive Time in Mode (%):	99.8886	0.1124	0.0005	0.0000	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 8

Principales resultados por modo de modulación enlace Incahuasi–Repetidor

Parámetro	Valor
Capacidad IP agregada máxima	449,84 Mbps
Capacidad máxima por dirección	224,92 Mbps
Modulación de máxima capacidad	256QAM 0.81
Disponibilidad a máxima capacidad	99,8866 %
Margen de desvanecimiento máximo	32,39 dB
Capacidad mínima operativa	21,65 Mbps
Modulación mínima	BPSK 0.63
Disponibilidad en modos robustos	100 %

Tabla 9

Costos de equipamiento enlace Incahuasi – Repetidor

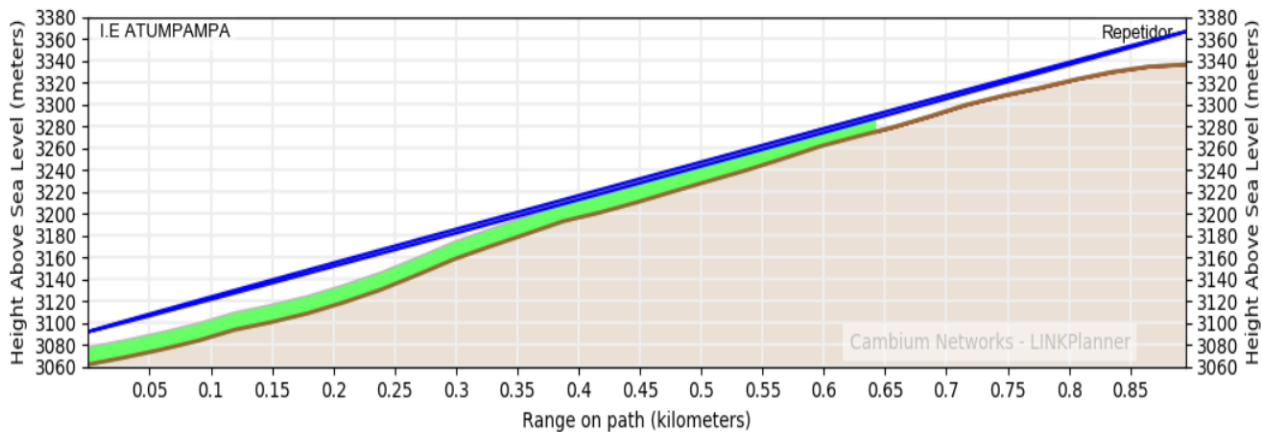
Part Number	Descripción	Cant.	Precio (S/.)	Total (S/.)
01010419001	Coaxial Cable Grounding Kit (1/4" y 3/8")	4	180	720
AR-E4PT6XX-WW	PTP 670 All Risks Advance Replacement (4 años)	2	1,210	2,420
C000065L007	LPU and Grounding Kit	2	450	900
C050067H010	PTP 670 Integrated 23 dBi END con fuente AC+DC	2	16,500	33,000
WB3176	Cable CAT5e Outdoor Copper Clad 100 m	1	450	450
			TOTAL	37,490

3.1.3.3 Tramo 2: Repetidor – I.E. Atumpampa

El perfil topográfico del segundo tramo (figura 16), de aproximadamente 0,9 a 1,10 km de longitud, muestra que, a pesar de las variaciones topográficas del terreno, la línea de vista se mantiene despejada en todo el trayecto y el primer lóbulo de Fresnel no se ve comprometido por el relieve, condición esencial para minimizar pérdidas por difracción.

Figura 16

Perfil topográfico del enlace Repetidor–I.E. Atumpampa



Para este tramo se empleó el mismo equipo PTP670 en banda de 5,8 GHz, con 45 MHz de ancho de canal, definiendo a la estación Repetidor como maestra (figura 17). En el extremo del repetidor se instaló una antena de 23 dBi con diversidad espacial (separación de 5,0 m), altura de 20 m y EIRP máxima de 35,3 dBm (Figura 18); en el extremo de la I.E. Atumpampa se empleó una configuración equivalente, con la misma altura y diversidad espacial (Figura 19), orientada a maximizar la ganancia y estabilidad del enlace en condiciones rurales y montañosas.

Figura 17

Configuración de equipamiento enlace Repetidor - I.E. Atumpampa

Region and Equipment Selection							
Band	Product	Regulation	Precise Network Timing				
5.8 GHz	PTP670	Peru (preliminary)	Disabled				

PTP670 Configuration								
Bandwidth	E1/T1	Optimization	Sync	Symmetry	Dual Payload	Highest Mod Mode	Lowest Ethernet Mode	Master
45 MHz	None	IP	Disabled	Symmetric	Enabled	256QAM 0.81	BPSK 0.63 Sngl	Repetidor

Figura 18

Configuración de antena emisora estación Repetidor

Repetidor		
Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)		
Antenna Height :	20.0	meters (Max height at site is 30.0 m)
Spatial Diversity :	☒	
Diversity Spacing :	5.0	meters ☐ Reflection Mitigation
Cable Loss :	1.0	dB ☐ Calculate
Maximum EIRP :	35.3 dBm	☐ User limit
Maximum Power :	-2.0 dBm	☐ User limit
☐ Interference :		
MAC Address :		

Figura 19

Configuración de antena receptora I.E. Atumpampa

I.E ATUMPAMPA		
Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)		
Antenna Height :	20.0	meters (Max height at site is 30.0 m)
Spatial Diversity :	☒	
Diversity Spacing :	5.0	meters ☐ Reflection Mitigation
Cable Loss :	1.0	dB ☐ Calculate
Maximum EIRP :	35.3 dBm	☐ User limit
Maximum Power :	-2.0 dBm	☐ User limit
☐ Interference :		
MAC Address :		

Figura 20

Resultados de desempeño estación Repetidor (tramo 2)

Performance to Repetidor	
Predicted Receive Power : -54 dBm ± 11 dB	
Mean IP Predicted :	213.75 Mbps
Mean IP Required :	200.0 Mbps
% of Required IP :	107 %
Min IP Required :	150.0 Mbps
Min IP Availability Required :	90.9900 %
Min IP Availability Predicted :	92.7502 %

Los resultados de desempeño obtenidos para este tramo (Figura 20, Figura 21; Tabla 10) muestran una potencia de recepción estimada de $-54 \text{ dBm} \pm 11 \text{ dB}$ en ambos sentidos y una capacidad IP media predicha de 213,75 Mbps. A diferencia del primer tramo, en este segundo tramo el software fue configurado con un requerimiento de prueba más cercano a la demanda real de la institución (200 Mbps en sentido hacia la I.E. Atumpampa y 210 Mbps en sentido hacia el repetidor), obteniendo porcentajes de cumplimiento de 107 % y 101 % respectivamente. En cuanto a disponibilidad, el valor predicho de 92,75 % supera el mínimo requerido de 90,99 % en ambos sentidos.

Figura 21

Resultados de desempeño estación I.E. Atumpampa (tramo 2)

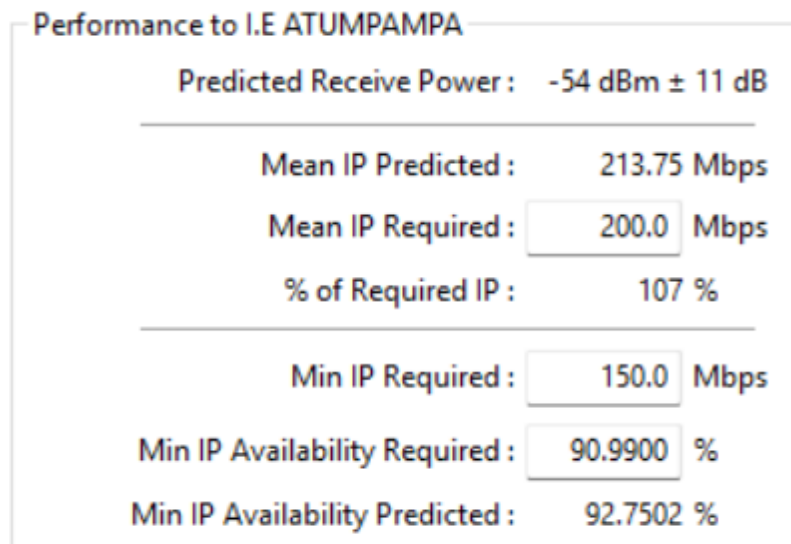


Tabla 10

Parámetros de desempeño del enlace Repetidor–I.E. Atumpampa

Sentido	Potencia recibida	Throughput predicho	Throughput requerido	Cumplimiento	Disponibilidad req.	Disponibilidad predicha
Hacia Repetidor	-54 dBm ± 11 dB	213,75 Mbps	210 Mbps	101 %	90,99 %	92,75 %
Hacia I.E. Atumpampa	-54 dBm ± 11 dB	213,75 Mbps	200 Mbps	107 %	90,99 %	92,75 %

El enlace muestra una capacidad IP agregada de 427,49 Mbps, disponibilidad del modo más bajo de 100 %, margen de ganancia del sistema de 34,12 dB y pérdida total de trayecto de 126,75 dB, con una pérdida excedente (Excess Path Loss) de 20,01 dB atribuible a las condiciones del relieve de este tramo, mayor que en el primer tramo pero aún dentro de márgenes operativos adecuados.

Figura 22

Resumen del enlace (Link Summary) Repetidor - I.E. Atumpampa

Link Summary	
Aggregate IP Throughput : 427.49 Mbps	
Lowest Mode Availability : 100.0000 %	
System Gain Margin :	34.12 dB
Free Space Path Loss :	106.73 dB
Gaseous Absorption Loss :	0.00 dB
Excess Path Loss :	20.01 dB
Total Path Loss :	126.75 dB

Tabla 11

Parámetros agregados y pérdidas de propagación enlace Repetidor–I.E. Atumpampa

Parámetro	Valor
Capacidad IP agregada	427,49 Mbps
Disponibilidad del modo mínimo	100 %
Margen de ganancia del sistema	34,12 dB
Pérdida en espacio libre	106,73 dB
Pérdida por absorción gaseosa	0,00 dB
Pérdida adicional del trayecto	20,01 dB
Pérdida total del trayecto	126,75 dB

La comparación de los distintos modos de modulación disponibles para este tramo (Figura 23) confirma el mismo principio de adaptación dinámica observado en el primer tramo: los esquemas de orden superior (256QAM, 64QAM) permiten throughputs agregados superiores a 400 Mbps con menor margen de desvanecimiento, mientras que los esquemas robustos (QPSK, BPSK) sacrifican capacidad a cambio de mayor disponibilidad. El comportamiento de capacidad frente a disponibilidad (Figura 24 y Figura 25) muestra que, para una capacidad baja de 43 Mbps,

la disponibilidad alcanza el 100 % (indisponibilidad de apenas 3 segundos al año), mientras que a 121 Mbps la disponibilidad desciende a 93,51 % en el sentido hacia el repetidor y a 99,98 % a 113 Mbps en sentido hacia la I.E. Atumpampa, evidenciando el compromiso propio de los enlaces de radiofrecuencia entre capacidad y confiabilidad.

Figura 23

Resultados por modo de modulación enlace Repetidor–I.E. Atumpampa

Common details

Mode:

256QAM

64QAM

64QAM

16QAM

16QAM

256QAM

64QAM

64QAM

16QAM

16QAM

QPSK

QPSK

BPSK

Code Rate:

0.81

0.92

0.75

0.87

0.83

0.81

0.92

0.75

0.87

0.83

0.87

0.83

0.83

Payloads:

Dual

Dual

Dual

Dual

Dual

Single

Single

Single

Single

Single

Single

Single

Single

Max Aggregate IP Throughput (Mbps):

450.47

379.54

310.15

241.29

173.46

225.23

189.77

155.08

120.64

88.73

60.32

43.36

21.68

Performance to I.E. ATUMPAMPA

Max IP Throughput (Mbps):

225.24

189.77

155.08

120.64

88.73

112.62

94.88

77.54

60.32

43.36

30.16

21.68

10.84

Fade Margin (dB):

6.11

9.85

13.97

17.10

20.72

9.77

13.14

17.10

20.16

24.67

27.00

31.02

34.12

Mode Availability (%):

85.3992

91.0281

92.7502

93.1798

93.3854

6.4673

6.4682

6.4682

6.4682

100.0000

100.0000

100.0000

100.0000

Receive Time in Mode (%):

85.3992

5.6289

1.7220

0.4296

0.2056

6.4673

0.0008

0.0000

0.0000

0.1464

0.0000

0.0000

0.0000

Performance to Repetidor

Max IP Throughput (Mbps):

225.24

189.77

155.08

120.64

88.73

112.62

94.88

77.54

60.32

43.36

30.16

21.68

10.84

Fade Margin (dB):

6.11

9.85

13.97

17.10

20.72

9.77

13.14

17.10

20.16

24.67

27.00

31.02

34.12

Mode Availability (%):

85.3992

91.0281

92.7502

93.1798

93.3854

6.4673

6.4682

6.4682

6.4682

100.0000

100.0000

100.0000

100.0000

Receive Time in Mode (%):

85.3992

5.6289

1.7220

0.4296

0.2056

6.4673

0.0008

0.0000

0.0000

0.1464

0.0000

0.0000

0.0000

Figura 24

Capacidad vs. disponibilidad sentido Repetidor (tramo 2)

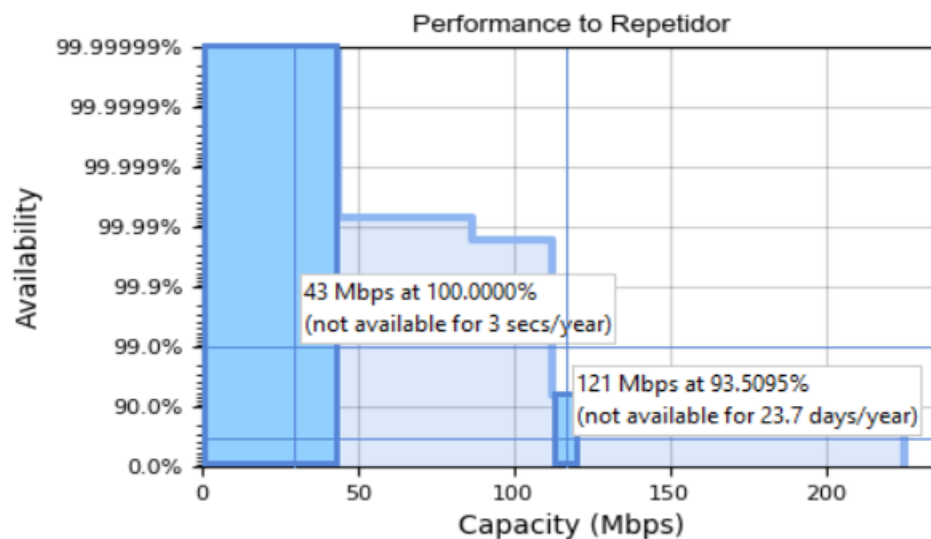


Figura 25

Capacidad vs. disponibilidad sentido I.E. Atumpampa (tramo 2).

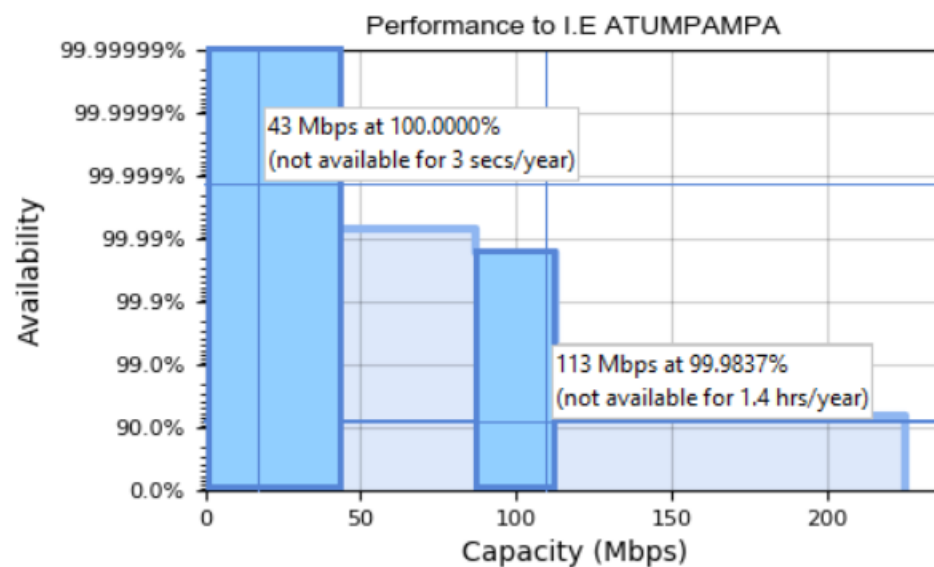


Tabla 12

Costos de equipamiento enlace Repetidor - I.E. Atumpampa

Part Number	Descripción	Cant.	Precio (S/.)	Total (S/.)
01010419001	Coaxial Cable Grounding Kit	14	180	2,520
AR-E4PT6XX-WW	PTP 670 All Risks Advance Replacement (4 años)	2	1,210	2,420
C000065L007	LPU and Grounding Kit	2	450	900
C050067H008	PTP 670 Connectorized END con fuente AC+DC	2	18,000	36,000
N050067D019	Antena 5,25–5,85 GHz, 6 ft, Single Pol	4	4,500	18,000
WB3176	Cable CAT5e Outdoor 100 m	1	450	450
			TOTAL	60,290

La Figura 26, integra ambos tramos en la arquitectura final validada, con coordenadas reales y distancias de 2,64 km (Incahuasi–Repetidor) y 1,10 km (Repetidor - I.E. Atumpampa), totalizando 3,74 km de trayecto. El costo total de equipamiento de este escenario asciende a S/ 97,780 (S/ 37,490 del tramo 1 más S/ 60,290 del tramo 2, Tablas 9 y 12).

Figura 26

Arquitectura de enlace inalámbrico con estación repetidora



3.1.3.4 Escenario 2: enlace directo Incahuasi–I.E. Atumpampa (Radio Mobile)

Con fines de validación cruzada, se evaluó adicionalmente un escenario de enlace directo de un solo salto entre Incahuasi y la I.E. Atumpampa, empleando el software Radio Mobile con un modelo digital de elevación independiente del utilizado en LINKPlanner (Figura 27). El análisis arrojó una distancia de 2,64 km con línea de vista despejada y un despeje mínimo de la primera zona de Fresnel de 1,0 F1, resultado que a diferencia de la evaluación inicial que motivó la propuesta del repetidor indica que, bajo este modelo de elevación, un enlace directo de un solo salto también resulta técnicamente viable.

Con una antena de 23 dBi a 25 m de altura en el extremo transmisor y una antena de 23 dBi a 20 m en el extremo receptor, alimentadas con una potencia de transmisión de 27 dBm (500 mW), se obtuvo una EIRP de 47 dBm y un nivel de señal recibida de $-45,3$ dBm, muy por encima de la sensibilidad del receptor (-80 dBm), con una relación señal-ruido (SNR) de 34,7 dB y pérdidas totales de 110,2 dB (Tabla 13).

Figura 27

Simulación en Radio Mobile del enlace directo Incahuasi - I.E. Atumpampa

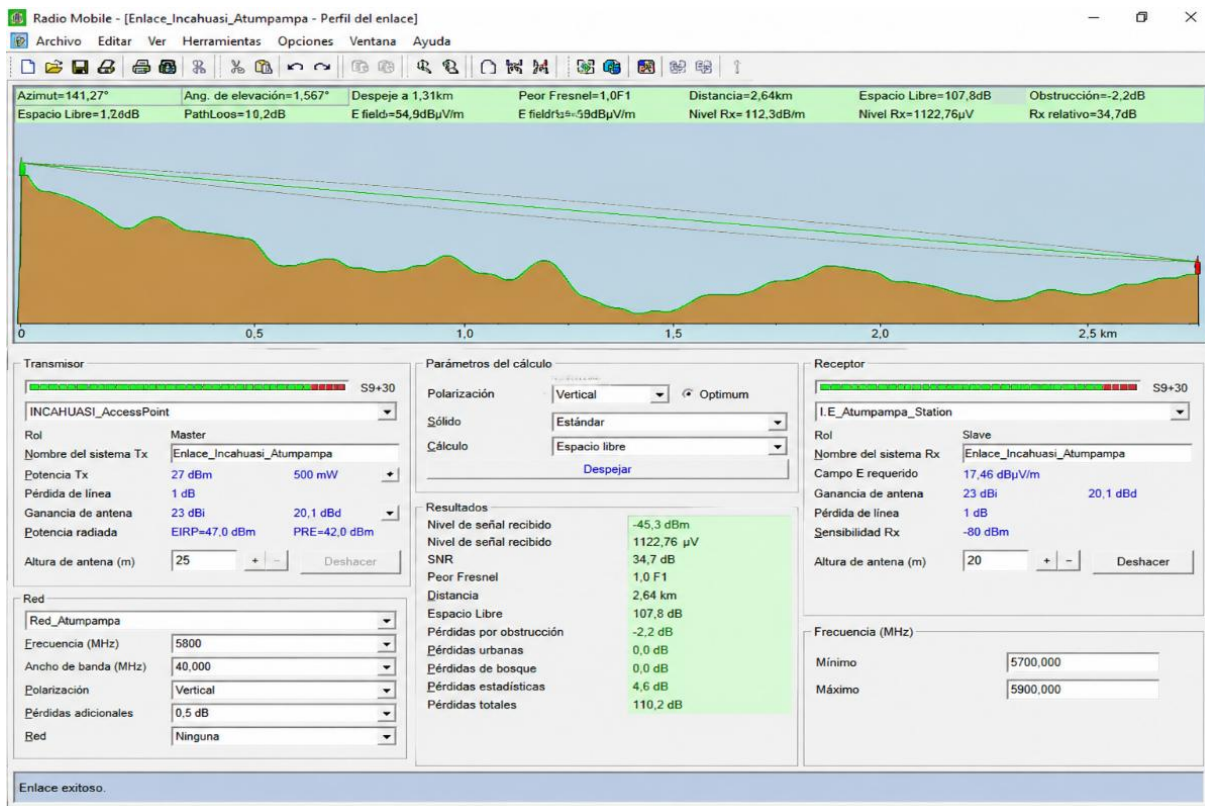


Tabla 13

Parámetros principales del enlace directo Incahuasi - I.E. Atumpampa (Radio Mobile)

Parámetro	Valor
Distancia del enlace	2,64 km
Frecuencia de operación	5 800 MHz
Ancho de banda	40 MHz
Polarización	Vertical
Potencia de transmisión	27 dBm
Ganancia de antena TX / RX	23 dBi / 23 dBi
Altura de antena TX / RX	25 m / 20 m
Nivel de señal recibido	-45,3 dBm
Relación señal-ruido (SNR)	34,7 dB
Despeje mínimo de Fresnel	1,0 F1
Pérdida en espacio libre	107,8 dB
Pérdidas totales	110,2 dB

Aplicando el límite teórico de Shannon con un ancho de banda de 40 MHz y un SNR de 34,7 dB se obtiene una capacidad teórica de 461 Mbps (Tabla 14). Considerando que, en un enlace punto a punto de 40 MHz con modulación 256-QAM, la eficiencia real suele ubicarse entre 45 % y 60 % de la capacidad teórica debido a encabezados, control MAC, acuses de recibo (ACK) y corrección de errores, la capacidad útil estimada se sitúa entre 220 y 250 Mbps por sentido y entre 440 y 500 Mbps agregados en full dúplex, rango que coincide de forma consistente con los valores obtenidos en el escenario con repetidor (224,88 Mbps por sentido y 449,75 Mbps agregados), lo que aporta una segunda fuente de validación a los resultados del radioenlace.

Tabla 14

Capacidad teórica según el límite de Shannon - enlace directo

Parámetro	Valor
Ancho de banda	40 MHz
SNR	34,7 dB
Capacidad teórica (Shannon)	461 Mbps

3.1.3.5 Comparación de escenarios de radioenlace

La Tabla 15 compara ambos escenarios de radioenlace evaluados. El escenario con estación repetidora, si bien duplica la inversión en equipamiento (S/ 97,780 frente a un estimado de S/ 37,490 a S/ 60,290 para un único enlace PTP670 de características similares a las del tramo Incahuasi–Repetidor) y añade la complejidad operativa de una estación intermedia con alimentación solar, ofrece redundancia frente a obstrucciones puntuales de línea de vista por ejemplo, crecimiento de vegetación o construcciones futuras que el modelo digital de elevación no captura necesariamente. El escenario de enlace directo, en cambio, reduce el costo, el número de sitios a mantener y el tiempo de implementación, pero concentra el desempeño del sistema en una

única trayectoria cuya viabilidad depende enteramente de la validación en campo del despeje de Fresnel a lo largo de los 2,64 km del trayecto. Ambos escenarios superan los requisitos de capacidad y disponibilidad de la institución educativa, por lo que la selección entre uno u otro debe definirse en la etapa de implementación a partir de un levantamiento topográfico de campo que confirme cuál de los dos modelos de elevación describe con mayor precisión el terreno real.

Tabla 15

Comparación de escenarios de radioenlace: con repetidor vs. enlace directo

Criterio	Con estación repetidora	Enlace directo
N.º de saltos	2 (Incahuasi–Repetidor–I.E.)	1 (Incahuasi–I.E.)
Distancia total	3,74 km (2,64 + 1,10 km)	2,64 km
Capacidad por sentido	224,88 Mbps	220–250 Mbps (estimado, Shannon)
Disponibilidad estimada	100 % / 92,75 %	≥ 99 % (según despeje de campo)
Costo de equipamiento	S/ 97 780	S/ 37 490–60 290 (estimado)
Sitios a mantener	3 (2 activos + repetidor)	2
Redundancia ante obstrucciones	Alta	Baja (punto único de falla)
Validación de campo requerida	En ambos extremos y el repetidor	En todo el trayecto de 2,64 km

3.1.4 Evaluación de la alternativa de fibra óptica

Como segunda alternativa se evaluó un enlace de fibra óptica entre Incahuasi y la I.E. Atumpampa, aprovechando la infraestructura existente de postes de distribución eléctrica para el tendido aéreo del cable, bajo una topología punto a punto que no requiere repetidores ni elementos activos intermedios (Figura 28).

Figura 28

Diagrama del enlace de fibra óptica Incahuasi–I.E. Atumpampa



El enlace tiene una longitud total de 12,52 km y emplea cable de fibra óptica monomodo G.652.D en configuración ADSS (All Dielectric Self Supporting), seleccionado por sus bajas pérdidas de transmisión, su capacidad para cubrir largas distancias sin regeneradores intermedios y su inmunidad frente a descargas eléctricas e interferencias electromagnéticas propia de instalaciones aéreas sobre infraestructura eléctrica. El tendido considera una separación promedio entre postes de 35 a 45 m y una altura de cable de 7 a 9 m sobre el nivel del suelo. La estación de origen (Incahuasi) se ubica a 3,360 m s.n.m. y el destino (I.E. Atumpampa) a 3,210 m s.n.m., diferencia de altitud moderada que puede cubrirse mediante un único tramo de fibra (Tabla 16).

Tabla 16
Especificaciones técnicas del enlace de fibra óptica

Parámetro	Valor
Tipo de red	Aérea sobre postes existentes
Longitud total	12,52 km
Tipo de fibra	Monomodo G.652.D
Cable recomendado	ADSS 48 hilos
Pérdida estimada de la fibra	2,5 dB
Pérdida por empalmes y conectores	1,5 dB
Pérdida total estimada	4,0 dB
Margen de diseño	2,6 dB
Atenuación total estimada	5,1 dB
Capacidad del enlace	100 Mbps (escalable a 1 Gbps)
Disponibilidad esperada	99,91 %
Topología	Punto a punto

En el nodo de origen se considera la instalación de un ODF (Optical Distribution Frame) principal, un switch de acceso, un conversor óptico, un sistema de protección eléctrica y una fuente de alimentación respaldada mediante UPS; en el nodo de destino, un ODF secundario, equipos de conversión óptica, dispositivos de seguridad perimetral y la conexión a la red interna de la institución educativa. La atenuación total estimada de 5,1 dB se encuentra dentro de los márgenes aceptables para un enlace de esta longitud, permitiendo una operación estable sin repetidores.

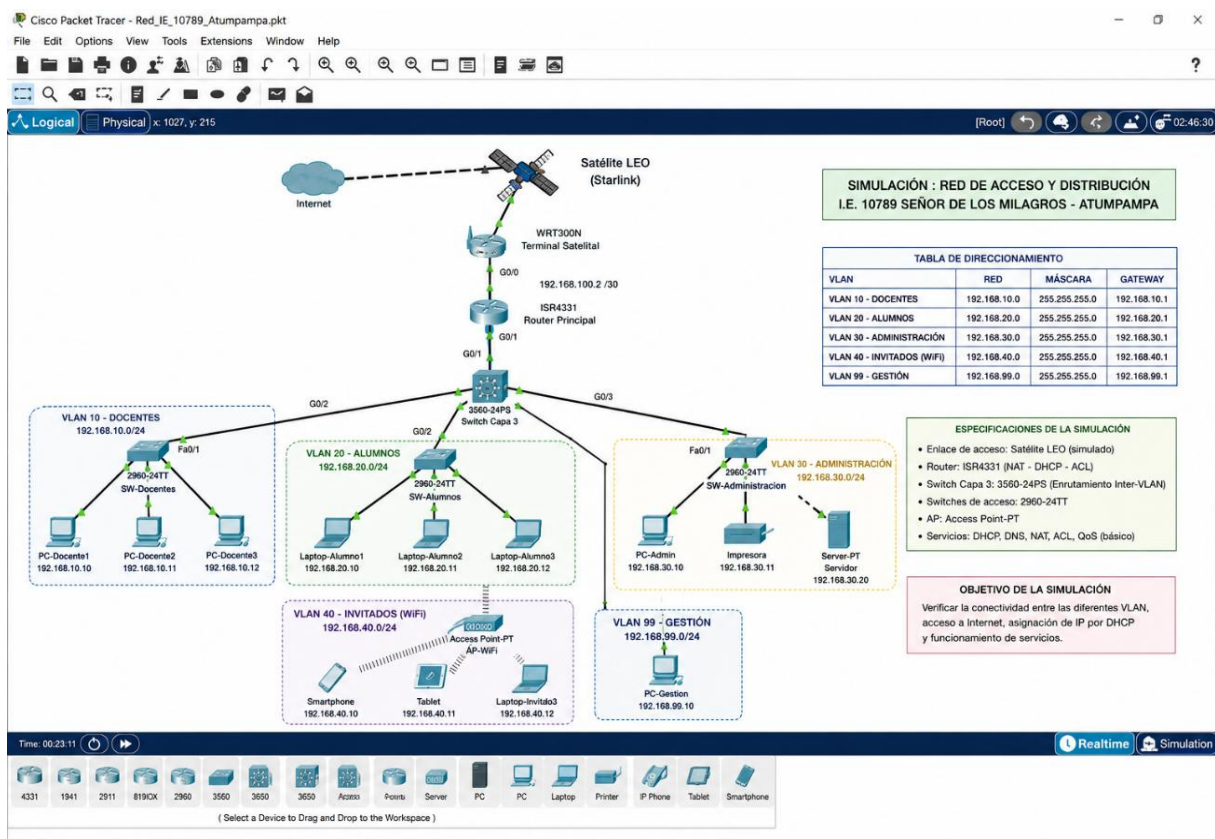
Cabe precisar que la capacidad inicial de 100 Mbps es inferior a la demanda máxima proyectada de 240 Mbps para 40 usuarios concurrentes (Tabla 2); no obstante, dado que la tecnología de fibra monomodo soporta un escalamiento inmediato hasta 1 Gbps mediante la actualización del equipo terminal óptico, sin modificar el tendido físico desplegado, se recomienda contratar o dimensionar el enlace inicial en un valor igual o superior a 240 Mbps simétricos, de modo que la capacidad contratada cubra la demanda concurrente estimada desde la puesta en servicio.

3.1.5 Evaluación de la alternativa satelital

Como tercera alternativa se evaluó un enlace de acceso mediante un terminal satelital de órbita baja (LEO), sobre el cual se diseñó y simuló la red de distribución interna de la institución educativa en el software Cisco Packet Tracer (Figura 29). La arquitectura sigue un modelo jerárquico compuesto por las capas de acceso, distribución y salida hacia Internet: el terminal satelital se conecta a un router principal ISR4331, enlazado a un switch multicapa Catalyst 3560-24PS que realiza el enrutamiento entre VLAN (Inter-VLAN Routing) y constituye el núcleo de la infraestructura de red.

Figura 29

Topología simulada en Cisco Packet Tracer (acceso satelital y distribución por VLAN)



La red de distribución se segmentó en cinco VLAN (Tabla 17) con el propósito de mejorar la seguridad, administración y rendimiento de las comunicaciones: VLAN 10 - Docentes, VLAN 20 - Alumnos, VLAN 30 - Administración (con el servidor institucional), VLAN 40 - Invitados (acceso WiFi para usuarios temporales) y VLAN 99 - Gestión, destinada a la administración y monitoreo de los dispositivos de red, separada del tráfico de los usuarios finales. Esta segmentación reduce los dominios de broadcast y mejora la seguridad entre los distintos grupos de usuarios, mientras que el switch de capa 3 facilita el enrutamiento entre VLAN sin sobrecargar el router principal.

Tabla 17

Plan de direccionamiento IP de la red de distribución (VLAN)

VLAN	Descripción	Red	Gateway
VLAN 10	Docentes	192.168.10.0/24	192.168.10.1
VLAN 20	Alumnos	192.168.20.0/24	192.168.20.1
VLAN 30	Administración	192.168.30.0/24	192.168.30.1
VLAN 40	Invitados (WiFi)	192.168.40.0/24	192.168.40.1
VLAN 99	Gestión	192.168.99.0/24	192.168.99.1

El dimensionamiento del enlace satelital (Figura 30) considera una constelación de órbita baja tipo Starlink, con una latencia típica de 20 a 40 ms y una velocidad diseñada de 200 Mbps de descarga, escalable según la demanda. La simulación de visibilidad del cielo en el emplazamiento de la I.E. Atumpampa reportó un 93,4 % de cielo despejado con una elevación mínima libre de 25°, condición favorable dado el relieve montañoso circundante. Los resultados de la simulación arrojaron una latencia (RTT) de 28 ms, una velocidad de descarga de 212 Mbps, una velocidad de subida de 22 Mbps, una pérdida de paquetes de 2,1 % y una disponibilidad anual estimada de 99,56 %.

Figura 30

Enlace Satelital LEO: Incahuasi - IE Atumpampa



La velocidad de descarga obtenida (212 Mbps) cubre con holgura la demanda concurrente de 240 Mbps si se considera únicamente el sentido de bajada, que concentra la mayor parte del tráfico educativo típico (navegación, plataformas educativas y videoclases); sin embargo, la asimetría del enlace con apenas 22 Mbps de subida constituye una limitación para actividades que demandan mayor ancho de banda de subida, como videoconferencias simultáneas desde múltiples aulas, aspecto que debe considerarse si esta alternativa se adopta como solución principal y no como respaldo.

3.1.6 Análisis comparativo y selección de la alternativa tecnológica

La Tabla 18 resume el desempeño comparado de las tres alternativas evaluadas en función de capacidad, latencia, disponibilidad, escalabilidad, mantenimiento, tiempo de implementación y costo. El análisis multicriterio, representado en el diagrama radial de la Figura 31, confirma que la fibra óptica domina en la mayoría de los criterios técnicos capacidad, latencia, disponibilidad y escalabilidad, mientras que el enlace satelital sobresale únicamente en tiempo de implementación y costo inicial, y el radioenlace se ubica en una posición intermedia, con buen desempeño técnico y un costo mensual más bajo que el de la solución satelital.

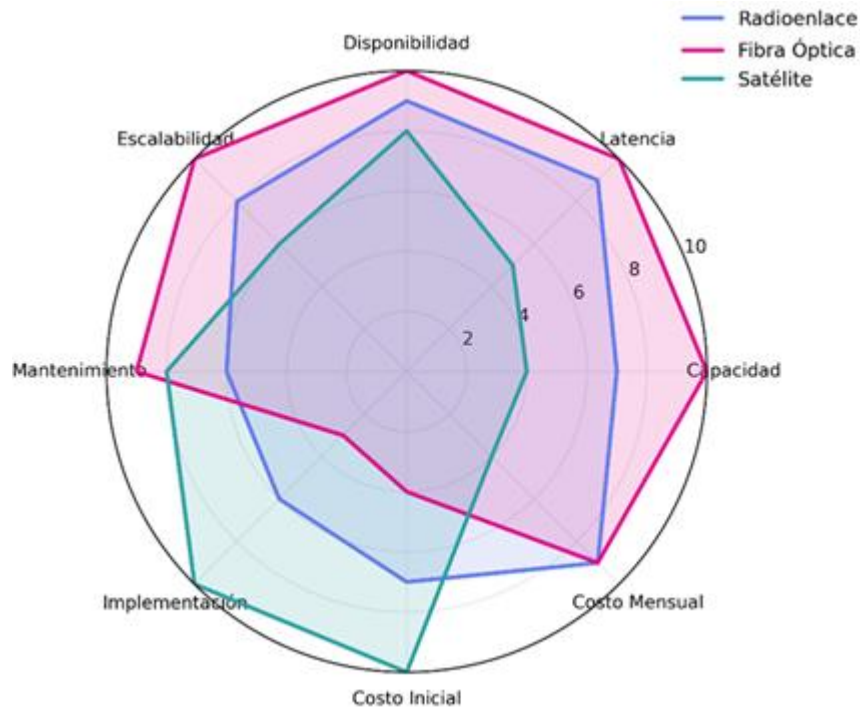
Tabla 18

Comparativo de las tres alternativas tecnológicas de acceso

Criterio	Radioenlace	Fibra óptica	Satélite
Capacidad	450 Mbps	1 Gbps	100–300 Mbps
Latencia	2–5 ms	< 1 ms	20–40 ms
Disponibilidad	99,9 %	99,99 %	98–99,5 %
Escalabilidad	Alta	Muy alta	Media
Mantenimiento	Medio	Bajo	Bajo
Tiempo de implementación	Medio	Alto	Muy bajo
Costo inicial	Medio	Alto	Bajo
Costo mensual	Bajo	Bajo	Alto

Figura 31

Comparación multicriterio de las tres tecnologías de conectividad evaluadas



A partir del análisis técnico, la comparación de indicadores de desempeño y las simulaciones realizadas, se determina que la fibra óptica constituye la alternativa tecnológica más adecuada para la red de acceso de la I.E. 10789, debido a su mayor capacidad de transmisión, menor latencia, mayor disponibilidad y facilidad de escalamiento futuro, aprovechando además la infraestructura de postes eléctricos existente para reducir los costos de implementación. El radioenlace inalámbrico en cualquiera de sus dos escenarios evaluados constituye una alternativa de respaldo técnicamente sólida, mientras que el enlace satelital resulta conveniente como solución de implementación inmediata o de respaldo ante restricciones presupuestales o de acceso a la infraestructura de postes.

3.2 Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la selección de una tecnología de acceso para instituciones educativas rurales no depende de un criterio único, sino de la combinación de espectro disponible, topografía, demanda y sostenibilidad del modelo de inversión, tal como señalan Oughton et al. (2024). En el caso de la I.E. 10789, las tres alternativas evaluadas resultaron técnicamente viables, lo que respalda la pertinencia de un análisis comparativo multicriterio antes de optar por una solución definitiva, en lugar de asumir a priori que una única tecnología es la más adecuada para todo contexto rural.

Respecto al radioenlace inalámbrico, los resultados obtenidos (224,88 Mbps por sentido y 449,75 Mbps agregados en el tramo Incahuasi–Repetidor) son coherentes con los reportados por Chela (2023) en Las Cochas, Ecuador, quien validó un enlace punto a punto de 5,58 km con velocidades de descarga superiores a 154 Mbps en la banda de 5 GHz, y con Apaza y Ramos (2022), quienes en instituciones educativas rurales de Torata, Moquegua, obtuvieron una velocidad de transmisión de 248,25 Mbps mediante radioenlaces digitales de banda ancha simulados con RadioMobile. La coincidencia entre estos antecedentes y los resultados del presente estudio, obtenidos con equipos y bandas de frecuencia similares, refuerza la validez de la simulación como herramienta de estimación del desempeño real del enlace en entornos rurales con relieve complejo. La necesidad de recurrir a una estación repetidora o, alternativamente, de validar en campo un enlace directo coincide con lo observado por Castillo y Rodríguez (2025) en zonas costeras montañosas, quienes concluyeron que la tecnología WiMAX en topología de malla con torres estratégicas resultaba óptima para enlaces punto a punto en terreno accidentado. La discrepancia encontrada entre el modelo de elevación de LINKPlanner (que descartó el enlace directo) y el de

Radio Mobile (que lo validó con un despeje de Fresnel de 1,0 F1) ilustra una limitación conocida de los modelos digitales de elevación de acceso público, cuya resolución puede no capturar con precisión accidentes geográficos locales, por lo que ambos escenarios se presentan en este estudio como alternativas técnicamente viables sujetas a validación topográfica de campo antes de la implementación definitiva.

En cuanto a la fibra óptica, la capacidad y disponibilidad obtenidas (100 Mbps escalable a 1 Gbps, 99,91 % de disponibilidad) son consistentes con las ventajas de baja latencia, alta inmunidad electromagnética y bajo mantenimiento descritas en la literatura sobre backhaul para países en desarrollo (Sawad et al., 2023), y confirman que el aprovechamiento de infraestructura de postes eléctricos existente estrategia empleada también en despliegues de fibra en otras regiones del país reduce significativamente el costo de implementación frente a un tendido subterráneo o una nueva línea de postes dedicada.

El desempeño proyectado del enlace satelital LEO (212 Mbps de descarga, 28 ms de latencia, 99,56 % de disponibilidad) es sustancialmente superior al reportado para servicios satelitales geoestacionarios tradicionales, y resulta coherente con los hallazgos de McMahon et al. (2025) sobre la adopción de sistemas satelitales de órbita baja en comunidades remotas del norte de Canadá, donde se documentaron mejoras percibidas en velocidad, confiabilidad y costo-efectividad frente a servicios satelitales alternativos. No obstante, la asimetría entre las velocidades de bajada y subida identificada en el presente estudio (212 Mbps frente a 22 Mbps) es consistente con una limitación estructural de este tipo de tecnología, que debe considerarse al evaluarla como solución principal y no únicamente como alternativa de respaldo.

La selección de la fibra óptica como alternativa más adecuada guarda relación con lo planteado por Gutiérrez (2024), quien encontró una relación significativa aunque de intensidad baja entre la infraestructura de telecomunicaciones y la reducción de la brecha digital en un centro poblado rural de Lima, lo que sugiere que la sola disponibilidad de infraestructura no garantiza el cierre de la brecha digital si no se acompaña de una adecuada red de distribución interna y de capacidades de uso efectivo, tal como advierten ERESTEL (2023) y PRONATEL (2024). En este sentido, el diseño de la red de distribución interna mediante segmentación en VLAN evaluado en el escenario satelital y extensible a las demás alternativas de acceso constituye un aporte complementario que permite traducir la disponibilidad de ancho de banda en un servicio efectivamente utilizable por estudiantes, docentes y personal administrativo, en línea con el concepto de arquitectura por capas descrito por Matela (2025).

4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Respecto a la revisión de la literatura científica sobre redes de acceso, redes de distribución y soluciones de conectividad rural, se determinó que la selección de una tecnología de acceso en entornos rurales depende de la combinación de espectro disponible, topografía, demanda y sostenibilidad del modelo de inversión, y que las alternativas de fibra óptica, radioenlace microondas, acceso móvil FWA y enlace satelital constituyen las opciones tecnológicas compatibles con las condiciones geográficas del Centro Poblado Atumpampa.

- En relación a la determinación de la demanda y los requisitos de servicio, se estableció que la I.E. 10789 cuenta con una población de 83 usuarios potenciales (75 estudiantes, 6 docentes y 2 trabajadores administrativos), de los cuales se estima un máximo de 40 usuarios concurrentes, lo que genera una demanda de ancho de banda recomendada de 240 Mbps, valor que se empleó como referencia principal para evaluar la suficiencia de cada alternativa tecnológica.

- Respecto al modelado del entorno físico y geográfico, se obtuvieron las coordenadas y los perfiles topográficos de los puntos de interés (Incahuasi, estación repetidora e I.E. Atumpampa), insumos que permitieron confirmar la existencia de línea de vista despejada y despeje adecuado de la primera zona de Fresnel en los tramos de radioenlace evaluados, así como trazar la ruta viable de tendido aéreo para el enlace de fibra óptica de 12,52 km.

- Respecto a la simulación y validación del desempeño de las alternativas tecnológicas, se determinó que las tres son técnicamente viables para la I.E. 10789: el radioenlace inalámbrico alcanzó una capacidad de 224,88 Mbps por sentido y 449,75 Mbps agregados, con disponibilidad cercana al 100 %, tanto en el escenario de dos saltos con repetidor como en el escenario de enlace directo validado mediante Radio Mobile; la fibra óptica ofreció una capacidad inicial de 100 Mbps escalable hasta 1 Gbps con una disponibilidad estimada de 99,91 %; y el enlace satelital de órbita baja permitió 212 Mbps de descarga, 22 Mbps de subida y 28 ms de latencia, con una disponibilidad de 99,56 %. En los tres casos, la capacidad efectivamente entregada superó la demanda concurrente de 240 Mbps estimada para la institución, con la salvedad de la capacidad inicial contratada de fibra óptica (100 Mbps), que requeriría ser dimensionada al alza desde la puesta en servicio.
- Respecto a la determinación de la alternativa tecnológica más adecuada, el análisis comparativo multicriterio evidenció que la fibra óptica constituye la opción más conveniente para la red de acceso de la I.E. 10789, por su mayor capacidad, menor latencia, mayor disponibilidad y escalabilidad, aprovechando la infraestructura de postes eléctricos existente para reducir costos de implementación; el radioenlace inalámbrico y el enlace satelital constituyen alternativas de respaldo técnicamente viables ante restricciones presupuestales, de infraestructura o de plazos de implementación.
- Los resultados obtenidos permiten confirmar la hipótesis planteada: el diseño de una red de acceso y distribución, sustentado en la determinación de la demanda, el modelamiento del entorno geográfico y la simulación comparativa de alternativas tecnológicas, mejora la

conectividad de la Institución Educativa N.º 10789 Señor de los Milagros, C.P. Atumpampa, distrito de Incahuasi, provincia de Ferreñafe, región Lambayeque, cumpliéndose así el objetivo general de la investigación.

4.2 Recomendaciones

- Realizar un levantamiento topográfico definitivo en campo antes de la implementación del radioenlace, con el fin de determinar cuál de los dos escenarios evaluados arquitectura de dos saltos con repetidor o enlace directo de un solo salto describe con mayor precisión el despeje real de línea de vista y de la primera zona de Fresnel, dado que los modelos digitales de elevación empleados (LINKPlanner y Radio Mobile) arrojaron resultados distintos para el mismo trayecto.
- Priorizar la implementación de la fibra óptica como solución de acceso principal, dimensionando el enlace inicial en un valor igual o superior a 240 Mbps simétricos y no en los 100 Mbps considerados inicialmente para cubrir desde la puesta en servicio la demanda concurrente estimada para los 40 usuarios simultáneos de la institución, seleccionando equipos terminales con capacidad de escalamiento hasta 1 Gbps.
- Conservar el diseño de radioenlace inalámbrico como alternativa de respaldo, dada su viabilidad técnica demostrada en ambos escenarios simulados, e implementar un sistema de monitoreo continuo de indicadores como utilización de ancho de banda, latencia, disponibilidad y estado de los equipos, que facilite el mantenimiento preventivo de la red.
- Considerar el enlace satelital de órbita baja como alternativa de implementación inmediata o de respaldo ante limitaciones económicas, de infraestructura o de plazos que impidan el despliegue de fibra óptica o radioenlace, teniendo en cuenta la asimetría entre las velocidades

de bajada y subida al dimensionar servicios que requieran mayor ancho de banda de subida, como videoconferencias simultáneas.

- Mantener y ampliar, en futuras investigaciones, el diseño de la red de distribución interna mediante segmentación en VLAN (docentes, alumnos, administración, invitados y gestión) propuesto para el escenario satelital, extendiéndolo a las alternativas de fibra óptica y radioenlace, de modo que la mejora de la conectividad externa se traduzca en un servicio de red interna seguro, administrable y efectivamente utilizable por la comunidad educativa.

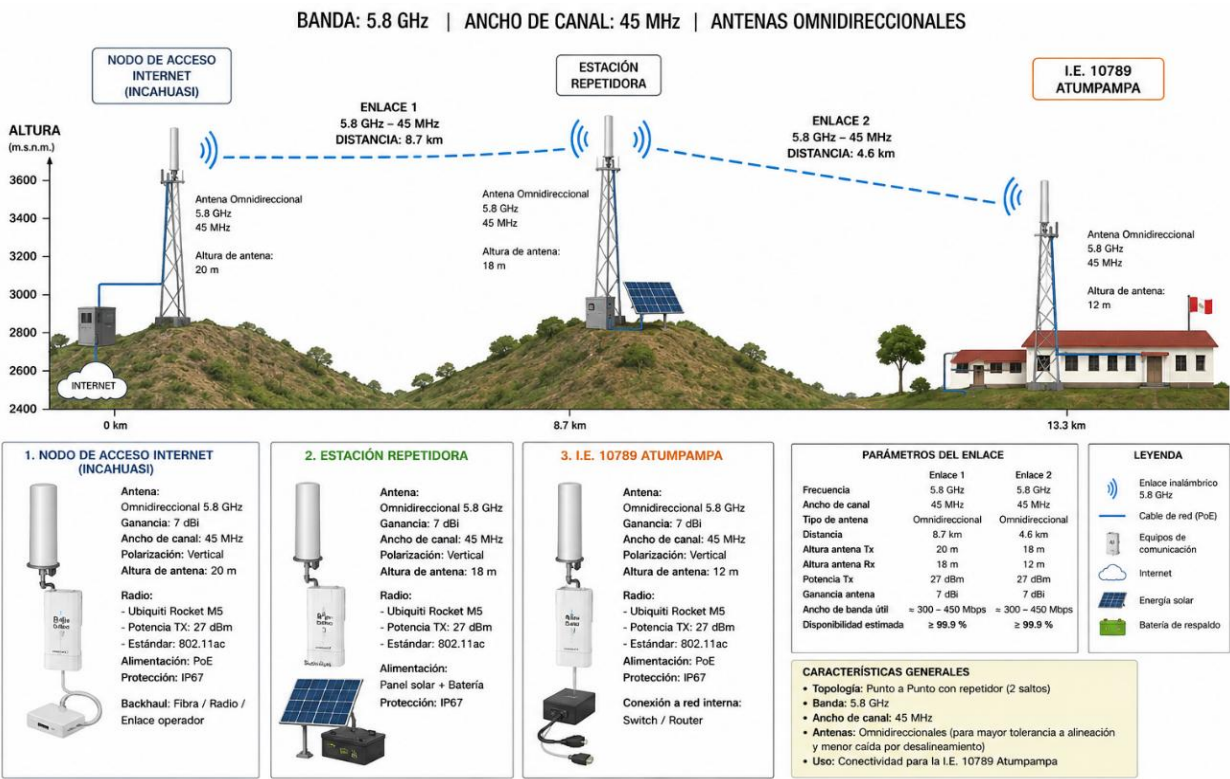
5 REFERENCIAS

- Apaza, F., & Ramos, J. (2022). Diseño de un sistema de radioenlaces digitales de banda ancha para mejorar el acceso a los servicios de tele-educación digital en las instituciones educativas rurales del distrito de Torata, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua, año 2022 [Tesis de grado, Universidad Privada de Tacna]. <http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/2412>
- Castillo, J., & Rodríguez, J. (2025). Diseño de una Infraestructura de Red Inalámbrica de Telecomunicaciones para las comunidades de Casares y Huehuate, noviembre 2024 -febrero 2025 [Other, Universidad Central de Nicaragua]. <https://repositorio.ucn.edu.ni/id/eprint/84/>
- Chateauvert, M., Ethier, J., & Florea, A. (2025). Estimating Rural Path Loss with ITU-R P.1812-7: Impact of Geospatial Inputs (arXiv:2501.11708). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.11708>
- Chela, A. (2023). Diseño e implementación de una red inalámbrica para proveer servicio de telecomunicaciones en las Cochas, energizado con paneles solares. [bachelorThesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10661>
- ERESTEL. (2023). Erestel: 4 de cada 5 hogares rurales accedió a internet fijo o móvil en 2023. https://www.osiptel.gob.pe/portal-del-usuario/noticias/erestel-4-de-cada-5-hogares-rurales-accedio-a-internet-fijo-o-movil-en-2023/?utm_source=chatgpt.com
- Gutierrez, I. (2024). Infraestructura de telecomunicaciones y su influencia en la reducción de la brecha digital en el centro poblado de Obrajillo, Lima 2023 [Tesis de grado]. Universidad San Ignacio de Loyola.
- Laitsou, E., Ioannou, N., & Katsianis, D. (2022). 5G Fixed Wireless Access for rural broadband. 31.^a Conferencia Europea de La Sociedad Internacional de Telecomunicaciones (ITS). https://www.econstor.eu/bitstream/10419/265649/1/Laitsou-et-al.pdf?utm_source=chatgpt.com

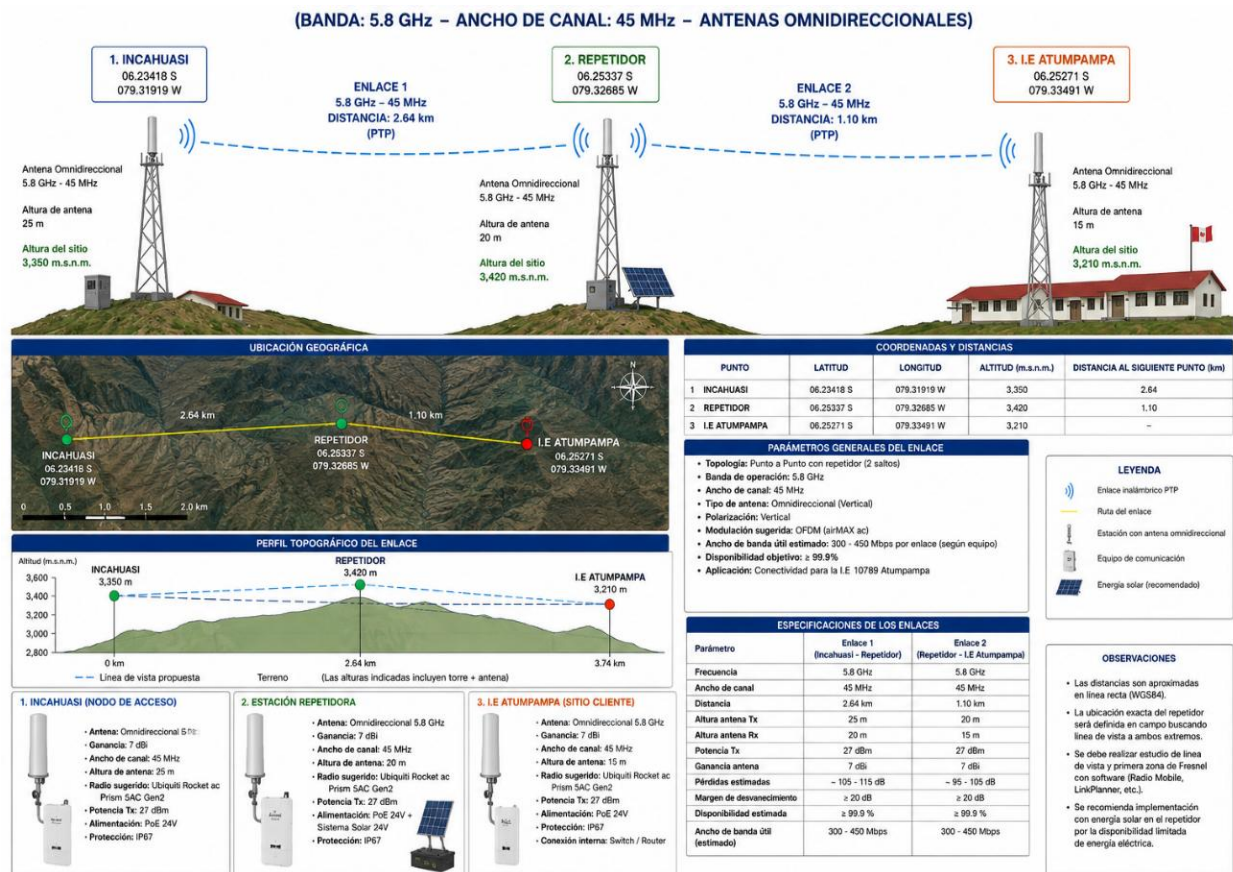
- Llongo, C. (2022). Diseño e implementación de sistema de comunicación inalámbrico para monitoreo del sistema de emergencia eléctrico en nodos críticos de comunicación [bachelorThesis, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/8858>
- Matela, J. (2025). Introduction to Campus Network Design and Multilayer Architectures [BRKENS-1500]. Cisco live. https://www.ciscolive.com/c/dam/r/ciscolive/global-event/docs/2025/pdf/BRKENS-1500.pdf?utm_source=chatgpt.com
- McMahon, R., Akçayır, M., Norris, B., & Fabian, L. (2025). Assessing the impacts of low-earth orbital satellite systems in remote indigenous communities: Social and economic outcomes of use in northern Canada. *Telecommunications Policy*, 49(2), 102912. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2025.102912>
- Oughton, E., Geraci, G., Polese, M., Shah, V., Bubley, D., & Blue, S. (2024). Reviewing wireless broadband technologies in the peak smartphone era: 6G versus Wi-Fi 7 and 8. *Telecommunications Policy*, 48(6), 102766. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2024.102766>
- PRONATEL. (2024). Pronatel avanzó en el cierre de brechas y promoción de competencias digitales en localidades rurales durante el 2024. <https://www.gob.pe/institucion/pronatel/noticias/1087646-pronatel-avanzo-en-el-cierre-de-brechas-y-promocion-de-competencias-digitales-en-localidades-rurales-durante-el-2024>
- Samanga, R. (2023). Estándar Wifi-6 y el servicio de internet en el área de gestión pedagógica de la Unidad De Gestión Educativa local, Pucallpa – 2022 [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Ucayali.
- Sawad, I., Nilavalan, R., & Al-Raweshidy, H. (2023). Backhaul in 5G systems for developing countries: A literature review. *IET Communications*, 17(6), 659-669. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12578>

ANEXOS

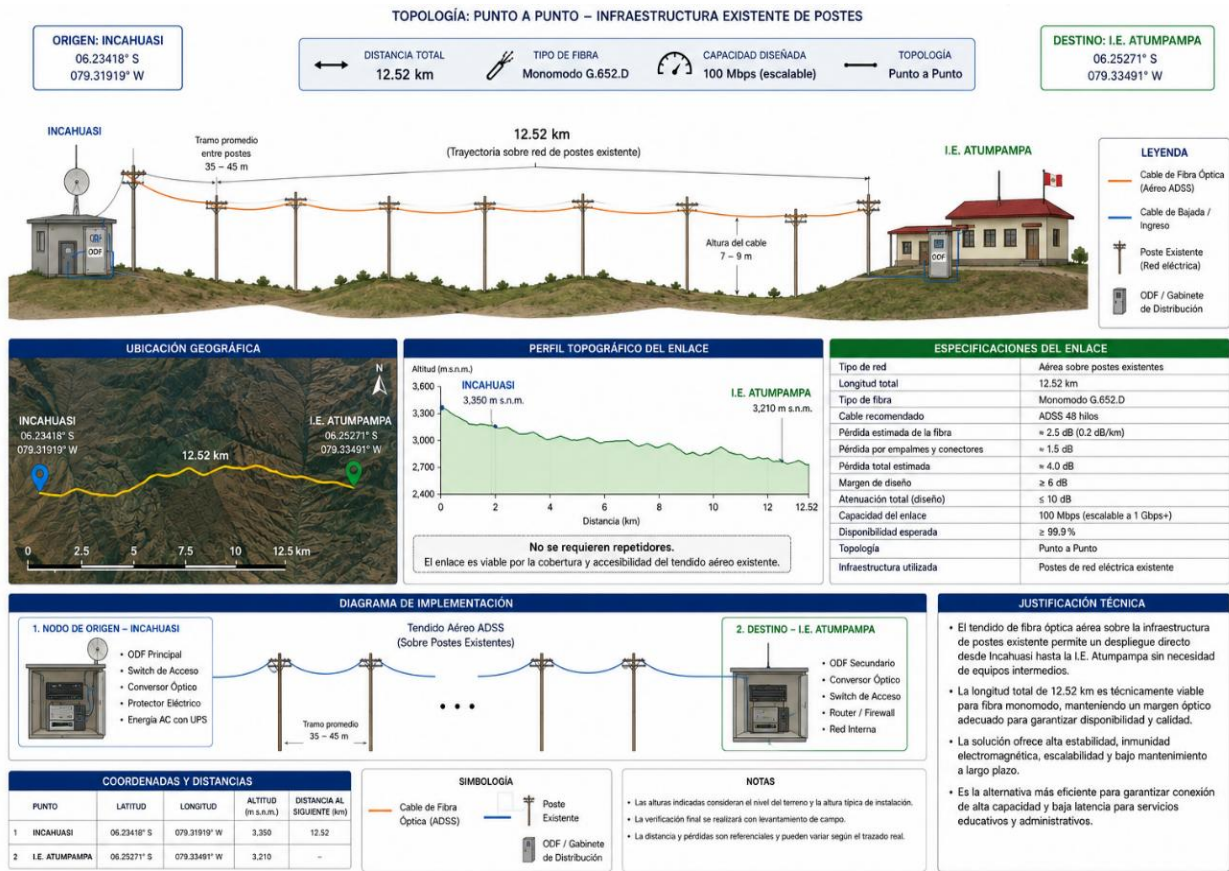
Anexo 01: Arquitectura de enlace Inalámbrico con un repetidor.



Anexo 02: Arquitectura de enlace inalámbrico con estación repetidora



Anexo 03: Diagrama del enlace de fibra óptica Incahuasi–I.E. Atumpampa



Anexo 04: Enlace Satelital LEO: Incahuasi – IE Atumpampa

