

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS



TESIS

**“DISEÑO DE RED DE TELECOMUNICACIONES BASADA EN
RADIOENLACES Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN EL DISTRITO
DE CALQUIS”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE SISTEMAS

AUTOR:

BACH. ALINDOR LOZANO ROMERO

ASESOR:

DR. ING. CARLOS JESUS KOO LABRÍN

CAJAMARCA – PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** ALINDOR LOZANO ROMERO
DNI: 60485069
Escuela Profesional: INGENIERÍA DE SISTEMAS
- Asesor:** DR. ING. CARLOS JESUS KOO LABRÍN
Facultad: INGENIERÍA
- Grado académico o título profesional**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
- Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:**
"DISEÑO DE RED DE TELECOMUNICACIONES BASADA EN RADIOENLACES Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN EL DISTRITO DE CALQUIS"
- Fecha de evaluación:** 20 de diciembre 2025
- Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 6 %
- Código Documento:** trn:oid:::3117:542412894
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 21 de diciembre 2025



FIRMA DEL ASESOR
DR. ING. CARLOS JESUS KOO LABRÍN

DNI: 07626109



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 21/12/2025 10:31:34-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : *DISEÑO DE RED DE TELECOMUNICACIONES BASADA EN RADIOENLACES Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN EL DISTRITO DE CALQUIS.*

ASESOR : *Dr. Ing. Carlos Jesús Koo Labrín.*

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0789-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 31 de diciembre de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **seis días del mes de enero de 2026**, siendo las dieciséis horas (04:00 p.m.) en la Aula Taller 8 (Edificio 4K) de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas, de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Edwin Alberto Valencia Castillo.
Vocal : Dr. Ing. Jaime Amador Meza Huamán.
Secretario : M.Cs. Ing. Néstor Elías Muñoz Abanto.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *DISEÑO DE RED DE TELECOMUNICACIONES BASADA EN RADIOENLACES Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN EL DISTRITO DE CALQUIS*, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Sistemas *ALINDOR LOZANO ROMERO*, asesorado por el Dr. Ing. Carlos Jesús Koo Labrín, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante, debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA :*07*..... PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA :*11*..... PTS.
EVALUACIÓN FINAL :*18*..... PTS *Dieciocho* (En letras)

En consecuencia, se lo declara *Aprobada* con el calificativo de *dieciocho* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *17:15* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.


Dr. Ing. Edwin Alberto Valencia Castillo.
Presidente


Dr. Ing. Jaime Amador Meza Huamán.
Vocal


M.Cs. Ing. Néstor Elías Muñoz Abanto.
Secretario


Dr. Ing. Carlos Jesús Koo Labrín.
Asesor

Agradecimiento

A Dios, por darme la vida, la salud y la sabiduría necesaria para culminar este proyecto, guiando mis pasos en cada momento. A mi asesor, Dr. Ing. Carlos Jesús Koo Labrín por su orientación, paciencia y compromiso, que fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

Dedicatoria

A mis queridos padres, Almilcar Lozano Malca y Zaragoza Romero Cuñe con todo mi amor y gratitud, por su esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Este logro es reflejo de sus enseñanzas, su ejemplo y la confianza que siempre depositaron en mí. Esta tesis está dedicada especialmente a ustedes, porque sin su guía y apoyo, nada de esto habría sido posible.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1. Antecedentes teóricos..... | 4 |
| 2.2. Bases teóricas..... | 7 |
| 2.2.1. Red de telecomunicaciones basada en radioenlaces..... | 7 |
| 2.2.2. Evaluación del desempeño de red de radioenlaces..... | 13 |
| 2.2.3. Diseño de red..... | 15 |
| 2.2.4. Banda ancha..... | 17 |
| 2.2.5. Conectividad rural..... | 19 |
| 2.2.6. Red de backhaul..... | 20 |
| 2.3. Definición de términos básicos..... | 21 |
| CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 24 |
| 3.1. Procedimiento..... | 24 |
| 3.1.1. Etapa 1: Recopilación de información técnica y geográfica..... | 26 |
| 3.1.1.1. Contexto educativo, salud y social..... | 26 |
| 3.1.1.2. Ubicación de centros poblados..... | 27 |
| 3.1.1.3. Diagnóstico de la situación actual de conectividad..... | 30 |
| 3.1.1.4. Infraestructura energética..... | 32 |
| 3.1.1.5. Proyecto regional de la RDNFO..... | 33 |
| 3.1.2. Etapa 2: Definición de las necesidades de la red..... | 34 |
| 3.1.2.1. Estimación del ancho de banda efectivo – throughput..... | 34 |
| 3.1.3. Etapa 3: Diseño físico y selección de equipos..... | 37 |
| 3.1.3.1. Selección del simulador de radioenlaces..... | 37 |
| 3.1.3.2. Radios y antenas utilizados en radioenlaces..... | 39 |
| 3.1.3.3. Proyección de la red de backhaul..... | 42 |
| 3.1.4. Etapa 4: Simulación y evaluación técnica del desempeño..... | 50 |

| | |
|--|-----|
| 3.1.4.1. Configuración de los radioenlaces PTP | 50 |
| 3.1.4.2. Simulación de la red backhaul..... | 51 |
| 3.1.4.3. Selección de enlaces relevantes para la evaluación de desempeño..... | 51 |
| 3.1.4.4. Radioenlace Calquis a El Cedro | 53 |
| 3.1.4.5. Radioenlace El Cedro a Lauchamud | 59 |
| 3.1.4.6. Radioenlace Lauchamud a Torre 4 | 66 |
| 3.1.4.7. Radioenlace El Galpon a Taulis | 72 |
| 3.1.4.8. Radioenlace Taulis a Nuevo San Miguel..... | 77 |
| 3.1.4.9. Radioenlace San Lorenzo Alto a San Lorenzo | 83 |
| 3.1.4.10. Radioenlace Alto Palmito a El Palmito..... | 89 |
| 3.1.4.11. Radioenlace Taulis a El Brete | 96 |
| 3.1.4.12. Radioenlace Succhapampa a Valdivia | 101 |
| 3.1.4.13. Mapa de cobertura de hogares en los centros poblados | 107 |
| 3.1.5. Etapa 5: Análisis de costos..... | 111 |
| 3.1.5.1. Análisis de costos de red..... | 111 |
| 3.2. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados | 123 |
| CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 125 |
| 4.1. Discusión de resultados según antecedentes | 128 |
| CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 131 |
| 5.1. Conclusiones..... | 131 |
| 5.2. Recomendaciones | 132 |
| CAPÍTULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 134 |
| CAPÍTULO VII. ANEXOS | 142 |
| 7.1. ANEXO 01: Operacionalización de variables | 142 |
| 7.2. ANEXO 02: Matriz de consistencia | 143 |
| 7.3. ANEXO 03: Diagrama de RDNFO Región Cajamarca | 144 |

| | |
|---|-----|
| 7.4. ANEXO 04 Preguntas a realizar en la entrevista al experto..... | 145 |
| 7.5. ANEXO 05 Informe de opinión de expertos | 147 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla I Comparación de radioenlaces utilizados en redes de telecomunicaciones..... | 11 |
| Tabla II Parámetros de un radioenlace | 15 |
| Tabla III Etapas para diseñar una red | 17 |
| Tabla IV Coordenadas de los Centros Poblados..... | 28 |
| Tabla V Cobertura de operadas de internet | 32 |
| Tabla VI Estimación de ancho de banda por CCPP | 35 |
| Tabla VII Asignación de ancho de banda a Instituciones Públicas de cada CCPP | 36 |
| Tabla VIII Comparación de softwares de simulaciones de radioenlaces..... | 37 |
| Tabla IX Comparación de radios Cambiun..... | 39 |
| Tabla X Especificaciones técnicas de antenas utilizadas para radioenlaces ... | 41 |
| Tabla XI Diferencias técnicas entre antes SPD2-6, SPD3-6 y HDP3-6..... | 41 |
| Tabla XII Radioenlaces con más demanda de ancho de banda | 52 |
| Tabla XIII Radioenlaces con distancia mayor a 4 km..... | 52 |
| Tabla XIV Radioenlaces con torres de altura mayor a 30 metros. | 52 |
| Tabla XV Características técnicas del radioenlace Calquis – El Cedro..... | 54 |
| Tabla XVI Comparación de SNR Calquis - El Cedro..... | 55 |
| Tabla XVII Parámetros de transmisión Calquis - El Cedro..... | 56 |
| Tabla XVIII Desempeño del enlace según modulación Calquis – El Cedro | 57 |
| Tabla XIX Throughput y disponibilidad del enlace Calquis - El Cedro..... | 58 |
| Tabla XX Características técnicas del radioenlace El Cedro - Lauchamud..... | 61 |
| Tabla XXI Comparación de SNR El Cedro - Lauchamud | 62 |
| Tabla XXII Parámetros de transmisión El Cedro - Lauchamud | 63 |
| Tabla XXIII Desempeño del enlace según modulación El Cedro - Lauchamud | 63 |
| Tabla XXIV Throughput y disponibilidad del enlace El Cedro - Lauchamud ... | 65 |
| Tabla XXV Características técnicas del radioenlace Lauchamud - Torre 4..... | 67 |
| Tabla XXVI Comparación de SNR Lauchamud - Torre 4 | 68 |
| Tabla XXVII Parámetros de transmisión Lauchamud - Torre 4 | 69 |
| Tabla XXVIII Desempeño del enlace según modulación Lauchamud - Torre 4 | 70 |
| Tabla XXIX Throughput y disponibilidad del enlace Lauchamud - Torre 4..... | 71 |
| Tabla XXX Características técnicas del radioenlace El Galpon - Taulis..... | 73 |

| | |
|---|-----|
| Tabla XXXI Comparación de SNR El Galpon - Taulis | 74 |
| Tabla XXXII Parámetros de transmisión El Galpon - Taulis | 75 |
| Tabla XXXIII Desempeño del enlace según modulación El Galpon - Taulis | 76 |
| Tabla XXXIV Throughput y disponibilidad del enlace El Galpon - Taulis | 77 |
| Tabla XXXV Características técnicas del radioenlace Taulis - Nuevo San Miguel | 79 |
| Tabla XXXVI Comparación de SNR Taulis - Nuevo San Miguel | 80 |
| Tabla XXXVII Parámetros de transmisión Taulis - Nuevo San Miguel | 81 |
| Tabla XXXVIII Desempeño del enlace según modulación Taulis - Nuevo San Miguel..... | 82 |
| Tabla XXXIX Throughput y disponibilidad del enlace Taulis - Nuevo San Miguel | 83 |
| Tabla XL Características técnicas del radioenlace San Lorenzo Alto - San Lorenzo | 85 |
| Tabla XLI Comparación de SNR San Lorenzo Alto - San Lorenzo | 86 |
| Tabla XLII Parámetros de transmisión San Lorenzo Alto - San Lorenzo | 87 |
| Tabla XLIII Desempeño del enlace según modulación San Lorenzo Alto - San Lorenzo | 88 |
| Tabla XLIV Throughput y disponibilidad del enlace San Lorenzo Alto - San Lorenzo | 89 |
| Tabla XLV Características técnicas del radioenlace Alto Palmito - El Palmito . | 91 |
| Tabla XLVI Comparación de SNR Alto Palmito - El Palmito | 92 |
| Tabla XLVII Parámetros de transmisión Alto Palmito - El Palmito..... | 93 |
| Tabla XLVIII Desempeño del enlace según modulación Alto Palmito - El Palmito | 94 |
| Tabla XLIX Throughput y disponibilidad del enlace Alto Palmito - El Palmito .. | 95 |
| Tabla L Características técnicas del radioenlace Taulis - El Brete..... | 97 |
| Tabla LI Comparación de SNR Taulis - El Brete | 98 |
| Tabla LII Parámetros de transmisión Taulis - El Brete | 99 |
| Tabla LIII Desempeño del enlace según modulación Taulis - El Brete | 100 |
| Tabla LIV Throughput y disponibilidad del enlace Taulis - El Brete..... | 101 |
| Tabla LV Características técnicas del radioenlace Succhapampa - Valdivia . | 103 |
| Tabla LVI Comparación de SNR Succhapampa - Valdivia..... | 104 |
| Tabla LVII Parámetros de transmisión Succhapampa - Valdivia..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| Tabla LVIII Desempeño del enlace según modulación Succhapampa - Valdivia | 106 |
| Tabla LIX Throughput y disponibilidad del enlace Succhapampa - Valdivia .. | 107 |
| Tabla LX Detalle del costo de implementación de la red | 114 |
| Tabla LXII Presupuesto de implementación infraestructura - Calquis | 119 |
| Tabla LXIII Presupuesto supervisión de obra implementación – Calquis | 120 |
| Tabla LXIV Presupuesto expediente técnico implementación – Calquis | 121 |
| Tabla LXV Presupuesto el mantenimiento anual - Calquis | 122 |
| Tabla LXVI Gasto total de implementación | 123 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1 Red de telecomunicaciones basada en radioenlaces | 8 |
| Fig. 2 Enlace punto a punto..... | 9 |
| Fig. 3 Enlace punto a multipunto | 9 |
| Fig. 4 Red mallada | 10 |
| Fig. 5 Tecnologías de banda ancha | 18 |
| Fig. 6 Conectividad rural | 19 |
| Fig. 7 Red de backhaul | 21 |
| Fig. 8 Red inalámbrica | 21 |
| Fig. 9 Conectividad rural mediante radioenlaces..... | 23 |
| Fig. 10 Ubicación del distrito de Calquis en el mapa de la provincia de San Miguel..... | 24 |
| Fig. 11 Etapas de la metodología..... | 25 |
| Fig. 12 Ubicación de los centros poblados del distrito de Calquis..... | 29 |
| Fig. 13 Mapa de cobertura en el distrito de Calquis | 31 |
| Fig. 14 Red de transporte en la provincia de San Miguel..... | 34 |
| Fig. 15 Radio Cambiun ePMP 4600L y ePMP 4600C | 40 |
| Fig. 16 Proyección de la red backhaul para el distrito de Calquis | 43 |
| Fig. 17 Radioenlaces de la red de banda ancha para el distrito de Calquis | 45 |
| Fig. 18 Ancho de banda para cada centro poblado | 47 |
| Fig. 19 Diseño final de la red de telecomunicaciones para el distrito de Calquis | 49 |
| Fig. 20 Ilustración de un radioenlace..... | 50 |
| Fig. 21 Radioenlace Calquis a El Cedro..... | 53 |
| Fig. 22 Perfil del radioenlace Calquis a El Cedro | 54 |
| Fig. 23 Modo MSC vs sensibilidad Calquis – El Cedro | 56 |
| Fig. 24 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Calquis – El Cedro | 57 |
| Fig. 25 Desempeño del enlace Calquis - El Cedro..... | 59 |
| Fig. 26 Radioenlace El Cedro a Lauchamud..... | 60 |
| Fig. 27 Perfil del radioenlace El Cedro a Lauchamud | 60 |
| Fig. 28 Modo MSC vs sensibilidad El Cedro - Lauchamud | 62 |

| | |
|---|----|
| Fig. 29 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento El Cedro - Lauchamud..... | 64 |
| Fig. 30 Desempeño del enlace El Cedro - Lauchamud | 65 |
| Fig. 31 Radioenlace Lauchamud a Torre 4 | 66 |
| Fig. 32 Perfil del radioenlace Lauchamud a Torre 4..... | 67 |
| Fig. 33 Modo MSC vs sensibilidad Lauchamud - Torre 4..... | 69 |
| Fig. 34 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Lauchamud - Torre 4..... | 70 |
| Fig. 35 Desempeño del enlace Lauchamud - Torre 4 | 71 |
| Fig. 36 Radioenlace El Galpon a Taulis | 72 |
| Fig. 37 Perfil del radioenlace El Galpon a Taulis..... | 73 |
| Fig. 38 Modo MSC vs sensibilidad El Galpon - Taulis..... | 75 |
| Fig. 39 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento El Galpon - Taulis..... | 76 |
| Fig. 40 Desempeño del enlace El Galpon - Taulis | 77 |
| Fig. 41 Radioenlace Taulis a Nuevo San Miguel..... | 78 |
| Fig. 42 Perfil del radioenlace Taulis a Nuevo San Miguel | 79 |
| Fig. 43 Modo MSC vs sensibilidad Taulis - Nuevo San Miguel | 81 |
| Fig. 44 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Taulis - Nuevo San Miguel | 82 |
| Fig. 45 Desempeño del enlace Taulis - Nuevo San Miguel..... | 83 |
| Fig. 46 Radioenlace San Lorenzo Alto a San Lorenzo | 84 |
| Fig. 47 Perfil del radioenlace San Lorenzo Alto a San Lorenzo | 85 |
| Fig. 48 Modo MSC vs sensibilidad San Lorenzo Alto - San Lorenzo | 87 |
| Fig. 49 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento San Lorenzo Alto - San Lorenzo..... | 88 |
| Fig. 50 Desempeño del enlace San Lorenzo Alto a San Lorenzo | 89 |
| Fig. 51 Radioenlace entre Alto Palmito a El Palmito | 90 |
| Fig. 52 Perfil del radioenlace Alto Palmito a El Palmito..... | 91 |
| Fig. 53 Modo MSC vs sensibilidad Alto Palmito - El Palmito | 93 |
| Fig. 54 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Alto Palmito - El Palmito | 94 |
| Fig. 55 Desempeño del enlace Alto Palmito - El Palmito | 95 |
| Fig. 56 Radioenlace Taulis a El Brete | 96 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 57 Perfil del radioenlace Taulis a El Brete..... | 97 |
| Fig. 58 Modo MSC vs sensibilidad Taulis - El Brete..... | 99 |
| Fig. 59 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Taulis - El Brete..... | 100 |
| Fig. 60 Desempeño del enlace Taulis - El Brete | 101 |
| Fig. 62 Radioenlace Succhapampa a Valdivia | 102 |
| Fig. 63 Perfil del radioenlace Succhapampa a Valdivia..... | 103 |
| Fig. 64 Modo MSC vs sensibilidad Succhapampa - Valdivia..... | 105 |
| Fig. 65 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Succhapampa - Valdivia..... | 106 |
| Fig. 66 Desempeño del enlace Succhapampa - Valdivia | 107 |
| Fig. 67 Mapa de cobertura de la red de acceso a internet en los hogares de los CCPP del distrito de Calquis | 108 |
| Fig. 68 Vista de hogares beneficiados por la cobertura de la red..... | 110 |

RESUMEN

El distrito de Calquis, ubicado en la región Cajamarca, enfrenta limitaciones significativas en conectividad debido a su geografía accidentada y la ausencia de operadores de internet, lo que restringe el acceso de la población a servicios básicos de comunicación, educación virtual y plataformas digitales, manteniendo una marcada brecha respecto a zonas urbanas. Ante esta problemática, el objetivo de la investigación fue diseñar una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para interconectar los centros poblados con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, optimizando el uso de torres repetidoras y costos, a fin de garantizar una conectividad eficiente, sostenible y adecuada a las necesidades del distrito. La metodología fue de carácter descriptivo, e incluyó la recopilación de información técnica y geográfica, la simulación del desempeño de los radioenlaces y la validación de parámetros críticos como throughput, disponibilidad y márgenes de desvanecimiento, considerando además criterios de la UIT-R. Los resultados mostraron que los enlaces diseñados alcanzan capacidades superiores a 2500 Mbps, márgenes de desvanecimiento mayores a 20 dB y disponibilidad cercana al 99.999 %, asegurando un servicio confiable aun en condiciones adversas. Desde el punto de vista económico, se comprobó que la alternativa de radioenlaces es aproximadamente un 40 % más económica que la fibra óptica, con bajos costos de operación y mantenimiento. En conclusión, la propuesta constituye una solución técnica, económica y socialmente viable, capaz de reducir la brecha digital en Calquis y replicable en otros distritos rurales del país.

Palabras clave: Red de telecomunicaciones, radioenlace, conectividad rural, diseño, throughput.

ABSTRACT

The Calquis district, located in the Cajamarca region, faces significant connectivity limitations due to its rugged geography and the absence of internet operators. This restricts the population's access to basic communication services, virtual education, and digital platforms, maintaining a marked gap with respect to urban areas. Faced with this problem, the objective of the research was to design a telecommunications network based on radio links to interconnect population centers with the National Fiber Optic Backbone Network, optimizing the use of repeater towers and costs, in order to guarantee efficient, sustainable connectivity adequate for the district's needs. The methodology was descriptive, and included the collection of technical and geographic information, simulation of radio link performance, and validation of critical parameters such as throughput, availability, and fading margins, also considering ITU-R criteria. The results showed that the designed links achieve capacities exceeding 2,500 Mbps, fade margins greater than 20 dB, and availability close to 99.999%, ensuring reliable service even under adverse conditions. From an economic standpoint, the radio link alternative was proven to be approximately 40% cheaper than fiber optics, with low operation and maintenance costs. In conclusion, the proposal constitutes a technically, economically, and socially viable solution, capable of reducing the digital divide in Calquis and replicable in other rural districts across the country.

Keywords: Telecommunications network, radio link, rural connectivity, design, throughput.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito internacional la conectividad rural enfrenta múltiples desafíos como baja densidad poblacional y altos costos de infraestructura por el difícil acceso. En países como Canadá y EE.UU., la inversión privada es limitada, ya que el mercado rural no genera suficientes ingresos para justificar la inversión [1], mientras que iniciativas como "5G RuralDorset" en el Reino Unido han demostrado aplicaciones útiles, aunque con restricciones de infraestructura y costos [2].

En Latinoamérica la brecha digital entre áreas urbanas y rurales alcanza 34 puntos porcentuales, dejando a 77 millones de personas sin acceso a internet viviendo en zonas rurales [3]. Proyectos en Brasil y Chile han mostrado beneficios en educación, pero la implementación a gran escala sigue siendo un reto por limitaciones presupuestarias y su complejidad geográfica restringiendo el acceso a servicios públicos esenciales [4].

En el contexto nacional, aunque algunas zonas urbanas acceden a 5G [5], solo el 8.2% de los hogares en áreas altoandinas tienen internet fijo [6]. A pesar del esfuerzo de la RDNFO para mejorar la conectividad en nuestro país, el 77% de la población rural sigue sin acceso a internet en la región de Cajamarca debido a su accidentada geografía [7].

Cajamarca, una de las regiones más pobres del país, enfrenta una profunda brecha digital, ya que solo el 14.4 % de la población tiene acceso a internet en instituciones educativas, lo que refleja las limitaciones en infraestructura tecnológica [8].

El distrito de Calquis, ubicado en la provincia altoandina de San Miguel, presenta una geografía accidentada y la dispersión de sus centros poblados dificultan la implementación de fibra óptica, dejando a sus habitantes sin acceso a una conectividad básica. Esta exclusión digital limita el desarrollo educativo, económico y social, perpetuando la pobreza del distrito. Ante esta situación, los radioenlaces surgen como una alternativa viable para interconectar Calquis con la RDNFO. Aunque su implementación presenta desafíos, un diseño eficiente y escalable podría cerrar la brecha digital, mejorar la calidad de vida de la población y fomentar el desarrollo del distrito.

Teniendo como referencia el contexto mencionado, se formuló el problema general: ¿Cuál es el diseño de una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para interconectar los centros poblados del distrito de Calquis con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, optimizando el uso torres, repetidoras y costos, pero garantizando una conectividad eficiente?, con los subsiguientes problemas: 1) ¿Cuál es la ubicación óptima de torres y repetidoras que permita garantizar un alcance adecuado y una conectividad eficiente entre los centros poblados?, 2) ¿Qué configuraciones técnicas como modulaciones y parámetros de los radioenlaces son las óptimas para las condiciones geográficas y climáticas del distrito de Calquis?, 3) ¿Cuál es el análisis de costos asociado a la implementación, operación y mantenimiento de la red en el distrito de Calquis?

Esta investigación se justifica desde un punto de vista práctico al permitir mejorar la conectividad en el distrito de Calquis mediante una red de radioenlaces, superando las limitaciones de infraestructura por su compleja geografía y reduciendo la dependencia de tecnologías cableadas inviables. Socialmente, fomenta la inclusión digital, mejorando la comunicación, el acceso a servicios en línea y el desarrollo de las comunidades. Teóricamente, aporta conocimientos sobre el diseño y desempeño de redes inalámbricas en zonas rurales, proporcionando una metodología replicable para contextos similares.

El alcance de esta investigación se centra exclusivamente en diseñar una red de telecomunicaciones para interconectar los centros poblados de Calquis, considerando infraestructura necesaria y especificaciones técnicas que aseguren una cobertura efectiva. También Incluye un estudio de factibilidad técnica y económica, evaluando costos y beneficios para la viabilidad del proyecto en términos prácticos, y ofrecer recomendaciones adaptadas a las condiciones geográficas y económicas del distrito.

Para el estudio del problema general se propuso como objetivo: Diseñar una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para interconectar los centros poblados de Calquis con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, optimizando el uso de torres repetidoras y costos, garantizando una conectividad eficiente y adecuada a las necesidades del distrito; y teniendo en cuenta los problemas específicos, se plantearon los siguientes objetivos: 1) Identificar la ubicación óptima de torres y repetidoras asegurando un alcance adecuado y una

conectividad eficiente entre los centros poblados, 2) Determinar las configuraciones técnicas óptimas, como modulaciones y parámetros de los radioenlaces que permitan un desempeño eficiente de la red teniendo en cuenta las condiciones geográficas y climáticas del distrito de Calquis, y 3) Realizar un análisis de costos detallado que incluya la implementación, operación y el mantenimiento de la red de telecomunicaciones.

Considerando lo expuesto, se formuló la siguiente hipótesis general: Un diseño de una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para interconectar los centros poblados de Calquis con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, utilizando una cantidad optimizada de torres, repetidoras y costos, garantizará una conectividad eficiente y adecuada a las necesidades del distrito, con las siguientes hipótesis específicas: 1) La ubicación óptima de torres y repetidoras, determinada mediante análisis geográfico y simulaciones técnicas, permitirá garantizar un alcance adecuado y una conectividad eficiente entre los centros poblados, 2) La elección de configuraciones técnicas óptimas, como modulaciones y parámetros específicos de los radioenlaces, permitirá un desempeño adecuado de la red en las condiciones geográficas y climáticas del distrito, y 3) Un análisis detallado de costos que incluya CAPEX Y OPEX de la red de telecomunicaciones permitirá identificar las inversiones necesarias para motivar la participación de actores externos, como gobiernos y asociaciones privadas en la viabilidad del proyecto.

La presente tesis se estructura en cinco capítulos: el Capítulo I: describe el problema, hipótesis, justificación, alcances y objetivo general. El Capítulo II: presenta antecedentes, bases teóricas y definición de términos básicos. El Capítulo III: expone la metodología, tipo de investigación, muestra y técnicas de recolección de datos. El Capítulo IV: analiza y discute los resultados obtenidos, y el Capítulo V: presenta conclusiones y recomendaciones para aspectos no abordados.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos

En los antecedentes internacionales, en España, García [9] en su tesis de maestría titulada “Evaluación y diseño de un sistema de red para dar servicios de banda ancha en entornos rurales” tuvo como objetivo estudiar diferentes alternativas tecnológicas que ofrezcan dar servicios de banda ancha en estas zonas y seleccionar la más adecuada. Los resultados obtenidos del radioenlace más largo mostraron una buena calidad de señal entre emisor y receptor existiendo una distancia de 1.29 km entre ellos, con una antena de 40 y 15 metros respectivamente y un nivel de recepción de -57,3 dBm. La pérdida de propagación total fue de 110,3 dB y con ganancias de 119,5 dB (BS-Banco) y 128 dB (Banco-Estación Base), con esto demostró que puede ofrecer una señal optima en todos los emplazamientos. Se concluyó que no existe una tecnología ideal pero cada una tienen condiciones que lo hacen más apropiadas para una situación geográfica, por ende, una alternativa muy provechosa es esta tecnología wimax que permite las mejores opciones para llegar a lugares de difícil acceso. Este antecedente es considerado por la evaluación de alternativas tecnológicas para ofrecer servicios de banda ancha en zonas rurales, destacando la importancia de seleccionar la bien las configuraciones de los enlaces.

Del mismo modo, en España, Sansaloni [10] en su tesis titulada “Diseño y despliegue de una red wimax para entornos rurales en núcleos de población dispersos en el interior de la comunidad valenciana” tuvo como objetivo diseñar una red wimax para entornos rurales con poblaciones diversas, evaluar la viabilidad económica del despliegue de esta tecnología en zonas rurales, así como simular el diseño en Radio Mobile. Los resultados obtenidos muestran que la red ofrece una capacidad neta de 140 Mbps para 94 personas, permitiendo asignar 1 Mbps por persona, con un throughput total de 94 Mbps. Sin embargo, se estima que solo el 60% de los clientes estarán conectados simultáneamente, es decir, 56 usuarios. Esto permite asignar 2.5 Mbps por usuario, suficiente para cubrir las necesidades del cliente. Se concluyó que esta tecnología es altamente recomendable y efectiva para proporcionar servicios de banda ancha en áreas rurales, además que representa una oportunidad para fortalecer a estas

comunidades. Este antecedente es considerado por el diseño y despliegue de redes para entornos rurales, evaluando las necesidades de los usuarios.

Por otro lado, Fernández et al. [11] en el estudio realizado en Colombia, titulado “Diseño de una red inalámbrica con tecnología wimax para la vereda la Chacua del municipio de Soacha – Cundinamarca” tuvo como objetivo diseñar la interconexión de la red inalámbrica, banda ancha con tecnología wimax; la muestra de este estudio estuvo compuesta por 2 mil habitantes y una muestra de 66 personas. Los resultados encontrados muestran que el radio tiene un valor de 8.80 km cuando la frecuencia es de 5.8 Ghz y cuando la frecuencia es de 2.4 GHz el valor es de 13.69 km lo que indica que las dos frecuencias son óptimas para el enlace ya que superan la distancia de 6 km, ofreciendo una disponibilidad en el 99,9 %. Se concluyó que el diseño de redes inalámbricas para áreas rurales se considera una solución de bajo costo si se llegase a usar la tecnología wimax porque ofrece una solución óptima que puede llevar internet a cualquier zona alejada o de difícil acceso. Este antecedente es considerado por el diseño de redes inalámbricas de banda ancha en áreas rurales, evaluando diferentes frecuencias no licenciadas para dar acceso a internet en comunidades de difícil acceso.

De acuerdo a Mosquera [12], en Colombia, en su tesis titulada “Diseño y simulación de una arquitectura de red para mejorar la conexión a internet en una zona de baja densidad en Colombia, usando tecnología wimax” tuvo el objetivo de hacer uso de la tecnología wimax para generar una mejora en la red actual. Este estudio descriptivo obtuvo resultados muy prometedores para la red, pues se tiene un tiempo de respuesta máximo en promedio 35.56 ms superando las especificaciones técnicas planteadas, también se comprobó la estabilidad del paquete dando una estabilidad de 99.65% lo que significa una muy baja pérdida de paquetes y que se puede expandir de forma segura. Se concluyó que si se aumenta la cantidad de usuarios en algunas zonas la red demostró ser lo suficientemente robusta para tener un gran aumento de usuarios. Este antecedente es considerado por el uso de la tecnología wimax para mejorar la conectividad en zonas de baja densidad, evaluando la estabilidad y el rendimiento de la red.

En los antecedentes nacionales, en Piura, Peña [13] en su tesis titulada “Propuesta de implementación de una red de datos y radio enlaces para el CLAS Canchaque – Piura; 2021” tuvo como objetivo principal fue realizar la propuesta de implementación de una red de datos y radio enlaces para el CLAS Canchaque. Este estudio descriptivo estuvo conformado por una población de 81 trabajadores y una muestra de 40 trabajadores. Los resultados mostraron que el 95 % están insatisfechos con la red actual, mientras el 100 % de los encuestados expresaron una necesidad de la implementación de una red de datos y radio enlace. Se concluyó que existe la necesidad de contar con una red de datos y radio enlaces para mejorar los servicios de conectividad. Este antecedente es considerado por el análisis prospectivo sobre la necesidad de implementar una red de datos y radio enlaces.

Según Dongo [14], en su tesis de maestría titulada “Internet de banda ancha y la inclusión tecnológica de la población rural del distrito de Abancay” tuvo como objetivo determinar el nivel de relación entre el internet de banda ancha y la inclusión tecnológica de la población rural del distrito de Abancay. Para lo cual la metodología seleccionada fue cuantitativa, de nivel correlacional y de diseño no experimental-transversal, donde se llevó a cabo una encuesta para recolectar los datos. Los resultados obtenidos mostraron que, de los 142 beneficiarios del proyecto de banda ancha en el sector rural, el 12% percibe que el internet es ineficiente, para el 70.4% es moderado y para el 17.6% de la población el servicio es eficiente. Se concluyó que existe una relación positiva entre las variables de la investigación dado que al aplicar la prueba de hipótesis se obtuvo un coeficiente de 0.556 el cual se interpreta de forma positiva. Este antecedente es considerado por la relación entre el internet de banda ancha y la inclusión tecnológica en zonas rurales, evaluando la eficiencia del servicio en el distrito de Abancay.

Por último, se menciona a la tesis de maestría de Silva [15], titulada “Banda ancha y TIC’s en el desarrollo de competencias de estudiantes de instituciones educativas del distrito de Chancay, Huaral - Perú, primer semestre 2020” que tuvo como objetivo determinar el impacto de la banda ancha y TIC’s en el

desarrollo de competencias de estudiantes de instituciones educativas del distrito de Chancay. Para lo cual la metodología seleccionada tuvo un enfoque cualitativo de diseño no experimental donde su población estaba conformada por 3092 personas y una muestra de 160 alumnos. Los resultados mostraron que el 75 % llega a un nivel intermedio, mientras que un 7.5 % logra nivel avanzado y el 17.5 % adquiere un nivel básico. Este trabajo llegó a la conclusión de que la banda ancha y el desarrollo de competencias en alumnos presentan una correlación negativa media lo que evidenciaría que a menor banda ancha menor es el desarrollo de competencias en los estudiantes debido a la correlación negativa. Este antecedente es considerado por el impacto de la banda ancha y las TIC's en el desarrollo de competencias de los estudiantes, evaluando su relación en el distrito de Chancay.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Red de telecomunicaciones basada en radioenlaces

Una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces es un sistema de comunicación que utiliza ondas electromagnéticas para transmitir señales entre dos o más puntos distantes sin necesidad de cables físicos [16]. Este tipo de redes es especialmente útil en áreas donde la instalación de infraestructura cableada es costosa. Los radioenlaces permiten una comunicación rápida y confiable, facilitando la conectividad en zonas rurales o de difícil acceso [17].

Un radioenlace funciona a partir de la transmisión de señales de radiofrecuencia entre un transmisor y un receptor ubicados en distintos puntos. Para asegurar la eficiencia del enlace, es fundamental que exista línea de vista directa (Line of Sight, LoS), lo que implica que no debe haber obstáculos físicos como árboles, edificaciones o montañas que interfieran con la señal. Además, es importante mantener despejada la zona de Fresnel, una elipsoide imaginaria que rodea el trayecto principal de la señal y que puede causar difracciones si no está libre de obstáculos.

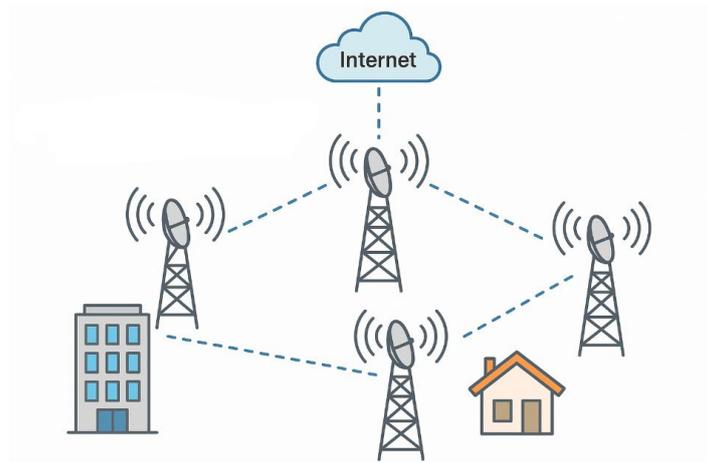


Fig. 1 Red de telecomunicaciones basada en radioenlaces

Fuente: INGETEC

Este tipo de enlaces puede operar en bandas de frecuencia licenciadas o no licenciadas, dependiendo de la normativa del país. En Perú, por ejemplo, las bandas libres más comunes están alrededor de los 2.4 GHz y 6 GHz que ha sido liberada para su uso sin licencia, mientras que los operadores profesionales suelen usar bandas licenciadas como 11 GHz o 18 GHz para garantizar menor interferencia y mayor capacidad.

Los radioenlaces pueden clasificarse según su arquitectura de comunicación y el número de puntos conectados. En una red de telecomunicaciones inalámbrica, esta clasificación es fundamental, ya que influye directamente en la topología de red, el dimensionamiento de tráfico, la cobertura geográfica y la redundancia.

- **Enlace punto a punto (Point-to-Point, PtP)**

Es el tipo más básico y común de radioenlace. Conecta directamente dos ubicaciones fijas: una estación transmisora y una estación receptora. Se utiliza principalmente para enlaces troncales (backhaul), interconectar dos puntos donde se requiere alta capacidad de transmisión, este tipo de enlace ofrece gran estabilidad y throughput, ya que todo el ancho de banda está dedicado al canal único entre ambos extremos [18].

Este tipo de enlace requiere línea de vista clara y frecuentemente se instalan antenas direccionales (parabólicas) con alta ganancia para maximizar la eficiencia del enlace.

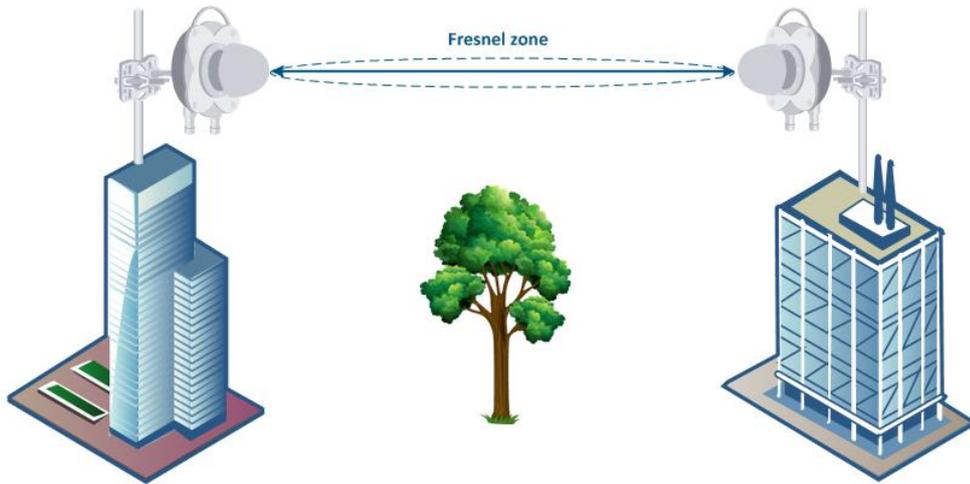


Fig. 2 Enlace punto a punto

Fuente: Anvimur telecomunicaciones

- **Enlace punto a multipunto (Point-to-Multipoint, PtMP)**

En esta configuración, una estación base central se comunica con múltiples estaciones remotas. Es ideal para brindar conectividad a varias localidades desde un solo punto de distribución, como una torre ubicada en una zona elevada. A diferencia del PtP, aquí el ancho de banda se distribuye entre todos los clientes conectados, lo cual puede afectar el rendimiento individual si no se gestiona adecuadamente [18].

Este modelo es ampliamente utilizado en zonas rurales o semirurales donde es necesario cubrir varias comunidades desde un solo nodo troncal.

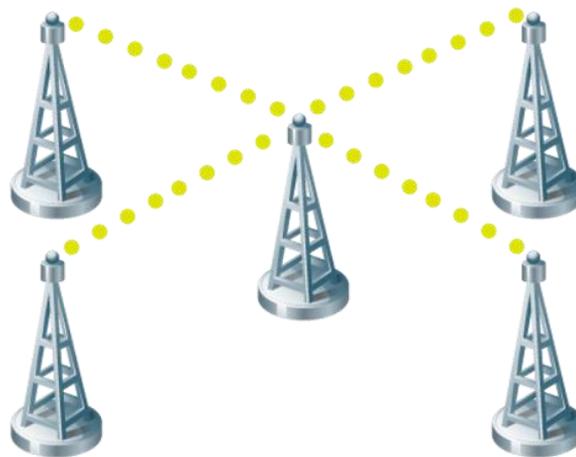


Fig. 3 Enlace punto a multipunto

Fuente: ASSTIC PERÚ

- **Red mallada (Mesh Network)**

Una red mallada consiste en múltiples nodos interconectados entre sí, formando rutas redundantes. Cada nodo puede actuar como transmisor y receptor, permitiendo que los datos viajen por distintas rutas hasta alcanzar su destino. Este tipo de red ofrece alta tolerancia a fallos, ya que, si un enlace falla, el tráfico puede redirigirse automáticamente por otro camino [19].

Las redes malladas son más complejas de implementar y gestionar, pero son ideales en contextos donde se requiere alta disponibilidad y escalabilidad, como en redes comunitarias, áreas urbanas densas o zonas de emergencia.



Fig. 4 Red mallada

Fuente: Computer Weekly

La siguiente tabla presenta una comparación entre los principales tipos de radioenlaces utilizados en redes de telecomunicaciones: punto a punto (PtP), punto a multipunto (PtMP) y mallado (Mesh). Esta comparación incluye características técnicas, aplicaciones comunes, ventajas y limitaciones de cada tipo, lo que permite identificar cuál se ajusta mejor a las necesidades del entorno en estudio. Esta información es fundamental para la toma de decisiones en el diseño de redes de comunicación inalámbricas eficientes, especialmente en zonas rurales o de difícil acceso como el distrito de Calquis.

Tabla I Comparación de radioenlaces utilizados en redes de telecomunicaciones

| Característica | Punto a punto (PtP) | Punto a multipunto (PtMP) | Red mallada (Mesh) |
|--------------------------------------|---|---|--|
| Topología | Dos nodos fijos conectados directamente | Un nodo central y múltiples nodos periféricos | Todos los nodos se interconectan entre sí |
| Ancho de banda disponible | Dedicado | Compartido entre varios usuarios | Compartido y redireccionable |
| Escalabilidad | Limitada a una conexión directa | Alta, permite agregar nodos periféricos fácilmente | Muy alta, se pueden añadir nodos en cualquier punto de la red |
| Tolerancia a fallos | Baja, si falla un nodo el enlace se interrumpe | Media, dependiendo del nodo central | Alta, múltiples rutas disponibles para redirección de tráfico |
| Complejidad de implementación | Baja | Media | Alta |
| Aplicaciones típicas | Backhaul, interconexión de edificios, enlaces troncales | Cobertura rural, distribución de Internet a zonas dispersas | Redes comunitarias, ciudades inteligentes, zonas con movilidad |
| Costo relativo | Medio | Bajo a medio | Alto (mayor cantidad de equipos y configuración compleja) |

Un radioenlace está compuesto por varios elementos que trabajan en conjunto para permitir la transmisión eficaz de señales inalámbricas entre dos o más puntos. La correcta selección, instalación y configuración de estos componentes es determinante para asegurar un rendimiento óptimo, especialmente en zonas rurales.

A continuación, se describen los principales componentes de un sistema de radioenlace:

- **Antenas**

Las antenas son dispositivos encargados de emitir y recibir ondas electromagnéticas. En los radioenlaces se utilizan principalmente antenas direccionales, que enfocan la señal en una dirección específica para maximizar la ganancia y reducir la interferencia. La elección del tipo de antena depende de la topología de red, la distancia entre estaciones y las condiciones del entorno. Entre los tipos más comunes se encuentran:

- **Antenas parabólicas:** ideales para enlaces de largo alcance y alta capacidad, debido a su alta ganancia.
- **Antenas de panel o sectoriales:** utilizadas en enlaces punto a multipunto, ya que permiten cubrir un amplio ángulo de apertura.
- **Radios**

Los radios, también conocidos como transceptores, son los equipos encargados de modular y demodular la señal digital que se transmite o recibe. También controlan parámetros como la potencia de transmisión, la frecuencia de operación y el tipo de modulación. Existen radios integrados con antena incluida y radios separados conectados mediante guía de ondas o cables coaxiales a la antena.

En proyectos modernos se utilizan radios digitales de alto rendimiento, como los ePMP 4600L de Cambium Networks, que permiten altas tasas de transmisión y configuraciones de canal flexibles.
- **Torres**

Las torres sirven como estructuras de soporte para instalar las antenas a una altura suficiente que garantice línea de vista y despeje de la zona de Fresnel. Su diseño puede variar entre la utilidad que se le va dar, si son utilizadas en instalaciones permanentes o por espacio limitado. Estas torres son calculadas de acuerdo a la relieve del terreno, obstáculos naturales y el alcance del enlace.
- **Fuentes de energía**

Los radioenlaces requieren una fuente de alimentación confiable. En zonas rurales sin acceso a la red eléctrica convencional, se emplean sistemas autónomos basados en paneles solares, baterías y reguladores de voltaje. Para sitios con red eléctrica, se recomienda incluir un sistema de respaldo (UPS) para evitar interrupciones ante cortes de energía.
- **Cables y conectores**

Los cables de red (Ethernet) y coaxiales, junto con sus conectores, permiten la interconexión entre radios, antenas, fuentes de energía y demás dispositivos. Es importante que sean de alta calidad, resistentes a condiciones climáticas extremas, y estén bien aislados para evitar pérdidas de señal.

2.2.2. Evaluación del desempeño de red de radioenlaces

La evaluación del desempeño de una red de radioenlaces es un proceso técnico fundamental que permite verificar la eficacia, estabilidad y calidad del servicio inalámbrico. Este análisis tiene como objetivo determinar si los enlaces cumplen con los requerimientos de capacidad, disponibilidad y confiabilidad establecidos en el diseño de red. Además, permite identificar posibles debilidades técnicas y proponer mejoras que garanticen una operación sostenible a largo plazo [20].

El desempeño de una red se refiere a la eficiencia y eficacia con la que ésta maneja el tráfico de datos, medido a través de parámetros como velocidad de transmisión, latencia, tasa de error y disponibilidad. Un alto desempeño indica que la red puede manejar grandes volúmenes de datos con mínima demora y errores, proporcionando una experiencia satisfactoria a los usuarios [21].

Existen diversos indicadores técnicos que permiten medir el rendimiento real de una red de radioenlaces. Los más representativos son los siguientes:

- **Disponibilidad de una red**

Indica el porcentaje del tiempo en el que el enlace está operativo sin interrupciones. Se calcula considerando factores como condiciones climáticas (lluvia, niebla), fallas de energía, errores de configuración o mantenimiento. Las recomendaciones internacionales, como las de la UIT-R, sugieren una disponibilidad superior al 99.99% para enlaces críticos.

La disponibilidad de una red es la proporción de tiempo durante la cual el sistema está operativo y accesible para los usuarios, generalmente expresada como un porcentaje. Una alta disponibilidad es crucial para aplicaciones críticas, ya que minimiza el tiempo de inactividad y asegura que los servicios estén siempre disponibles cuando se necesitan [22].

- **Margen de desvanecimiento**

El margen de desvanecimiento es la diferencia entre la potencia recibida nominal (en condiciones ideales) y el umbral mínimo necesario para una recepción adecuada. Este margen se establece para compensar las variaciones y pérdidas de señal causadas por factores como condiciones

atmosféricas, obstáculos físicos o interferencias, garantizando así la calidad y continuidad de la comunicación [23].

Formula general:

$$FM = P_R + G_{min}$$

Donde:

- FM: Margen de desvanecimiento (dB)
- P_R : Potencia de señal recibida estimada (dBm)
- G_{min} : Nivel mínimo de señal recibido necesario para una comunicación aceptable (umbral de sensibilidad del receptor, en dBm).
- **Latencia**
Es el tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde el origen hasta el destino y viceversa. Aunque no es crítica en enlaces dedicados de backhaul, sí tiene gran impacto en aplicaciones en tiempo real (VoIP, videollamadas, juegos en línea).

Existen diversas herramientas que permiten simular y evaluar el desempeño de un radioenlace antes de su implementación. Una de las más reconocidas es LINKPlanner desarrollada por Cambium Networks, Radio Mobile, entre otros. Estas plataformas permiten ingresar variables técnicas y geográficas para obtener resultados como:

- Perfil topográfico del enlace.
- Cálculo de zonas de Fresnel.
- Estimación de throughput esperado.
- Predicción de la disponibilidad en base a modelos de lluvia y clima.
- Margen de desvanecimiento y potencia recibida.

La evaluación del desempeño de una red de radioenlaces requiere un análisis detallado de diversos parámetros técnicos que permiten estimar la calidad, eficiencia y confiabilidad del sistema de comunicación. Estos parámetros son fundamentales tanto en la etapa de diseño como en la operación, ya que influyen directamente en la capacidad del enlace para garantizar un servicio estable y continuo.

Los parámetros de un radioenlace son las variables que determinan su rendimiento y calidad de transmisión. Entre estos se incluyen la frecuencia de operación, ancho de banda, potencia de transmisión, sensibilidad del receptor, ganancia de las antenas y margen de desvanecimiento. La correcta configuración y optimización de estos parámetros son esenciales para asegurar una comunicación estable y eficiente [24].

A continuación, se describen los principales parámetros utilizados en la evaluación técnica:

Tabla II Parámetros de un radioenlace

| Parámetro | Descripción técnica |
|--|--|
| Throughput (Mbps) | Es la tasa efectiva de transmisión de datos a través del enlace, considerando factores como la modulación, el ancho de banda disponible y las pérdidas. Es uno de los indicadores más representativos del desempeño. |
| Potencia Transmitida (Tx) | Nivel de potencia emitido por el equipo transmisor, expresado generalmente en dBm. Afecta la cobertura y alcance del enlace. |
| Potencia Recibida (Rx) | Nivel de señal que llega al receptor después de la atenuación por distancia, obstáculos y condiciones atmosféricas. |
| Relación Señal-Ruido (SNR) | Mide la calidad de la señal recibida en relación con el ruido de fondo. Un SNR alto indica mejor calidad de transmisión. |
| Modulación (MCS) | Se refiere al esquema de modulación y codificación usado. Modulación más compleja (como 1024-QAM o 4096-QAM) permite mayores velocidades, pero requiere condiciones de canal más favorables. |
| Margen de Desvanecimiento (Fade Margin) | Reserva de potencia adicional que permite compensar pérdidas debidas a condiciones desfavorables como lluvia, interferencias o cambios de propagación. Un margen de al menos 10–20 dB se considera adecuado. |
| Tasa de Error de Bit (BER) | Indica la probabilidad de que un bit sea recibido erróneamente. Un BER bajo garantiza mayor integridad en la transmisión. |
| Disponibilidad (%) | Representa el porcentaje de tiempo en el que el enlace está operativo en el año. Se estima considerando desvanecimientos, fallos técnicos y eventos meteorológicos. |
| Latencia (ms) | Tiempo que tarda un paquete en recorrer el enlace de un punto a otro. Es relevante especialmente en aplicaciones en tiempo real como voz o videoconferencia. |

2.2.3. Diseño de red

El diseño de una red implica la planificación y estructuración de la infraestructura necesaria para garantizar una comunicación eficiente y confiable. Esto incluye la selección de tecnologías adecuadas, la determinación de la topología de la red, la ubicación de los nodos y enlaces, y la consideración de otros factores. Un

diseño óptimo asegura que la red pueda manejar el tráfico esperado y adaptarse a futuras expansiones o modificaciones [25].

Diseñar una red involucra definir cómo se interconectarán los distintos nodos de comunicación como estaciones base, repetidores o terminales con el objetivo de cumplir con requerimientos específicos de capacidad, cobertura, disponibilidad y calidad del servicio. En redes rurales o de difícil acceso, el uso de radioenlaces resulta particularmente eficaz, ya que evita la necesidad de infraestructura física compleja como cableado de fibra óptica.

El diseño de redes por radioenlace se basa en principios fundamentales, entre ellos:

- **Cobertura efectiva:** Determinar las áreas geográficas que deben ser conectadas, evaluando factores como la densidad poblacional, demanda de servicios y topografía del terreno.
- **Topología adecuada:** Elegir el tipo de topología (punto a punto, punto a multipunto o mallada) según la geografía y los requerimientos de la red.
- **Visibilidad y línea de vista (LOS):** Confirmar que exista línea de vista directa entre los puntos del enlace, evaluando la primera zona de Fresnel para evitar interferencias por obstáculos físicos.
- **Capacidad y demanda:** Calcular el throughput requerido por cada nodo y dimensionar los equipos de acuerdo con la cantidad de usuarios, aplicaciones y servicios esperados.
- **Disponibilidad y redundancia:** Diseñar enlaces con márgenes de desvanecimiento adecuados y de ser necesario implementar enlaces redundantes o rutas alternativas para prever posibles fallos de la red.

Para lograr un diseño de red eficiente y adaptado al contexto geográfico, es necesario seguir un conjunto de etapas sistemáticas que permiten garantizar la viabilidad y el rendimiento de la solución propuesta. Estas etapas no solo ayudan a estructurar el proceso de planificación, sino que también permiten tomar decisiones informadas sobre la elección de tecnologías, equipos y topologías. A continuación, se presenta una tabla de las fases más relevantes en el diseño de una red de radioenlaces:

Tabla III Etapas para diseñar una red

| Etapa | Descripción |
|---|---|
| Recopilación de información técnica y geográfica | Se reúne información topográfica, climática y socioeconómica del área de estudio, así como coordenadas GPS, altitudes, distancias y condiciones del terreno, con el fin de definir los parámetros iniciales del diseño de red |
| Definición de las necesidades de la red | Se analizan las demandas de conectividad de la población, instituciones educativas, centros de salud y entidades públicas, estableciendo los requerimientos de cobertura, capacidad y calidad de servicio. |
| Diseño físico y selección de equipos | Se elabora la estructura de la red, definiendo torres, antenas, radios, fuentes de energía y demás componentes, considerando criterios técnicos, disponibilidad comercial y costo-beneficio. |
| Simulación y evaluación técnica del desempeño | Se utilizan herramientas como Link Planner para simular los enlaces y calcular parámetros de rendimiento como potencia recibida, relación señal/ruido (SNR), pérdidas, disponibilidad y throughput, conforme a los estándares UIT-R e IEEE. |
| Análisis de costos | Se determina el presupuesto del proyecto considerando costos de adquisición, instalación y mantenimiento de los equipos, con el fin de evaluar la viabilidad económica y la sostenibilidad de la implementación. |

2.2.4. Banda ancha

La banda ancha se refiere a una tecnología de transmisión de datos que proporciona un alto rendimiento y velocidad en la transferencia de información a través de diferentes medios, como cables coaxiales, fibra óptica o conexiones inalámbricas. Permite la transmisión simultánea de múltiples señales y el acceso rápido a servicios en línea, como Internet, televisión y telefonía, facilitando una experiencia de usuario más eficiente y versátil. La capacidad expansiva de la banda ancha contribuye a la mejora de la conectividad, permitiendo la transmisión de datos de gran volumen de manera rápida y confiable, lo que impulsa el desarrollo de aplicaciones y servicios avanzados en la era digital [26].

Desde el punto de vista técnico, la banda ancha se refiere a cualquier sistema de comunicación que utilice un ancho de banda amplio para transmitir datos, superando significativamente las capacidades de tecnologías anteriores. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) definen las conexiones de banda ancha como aquellas que permiten una velocidad de descarga mínima de 25 Mbps y una velocidad de subida de al menos 3 Mbps.

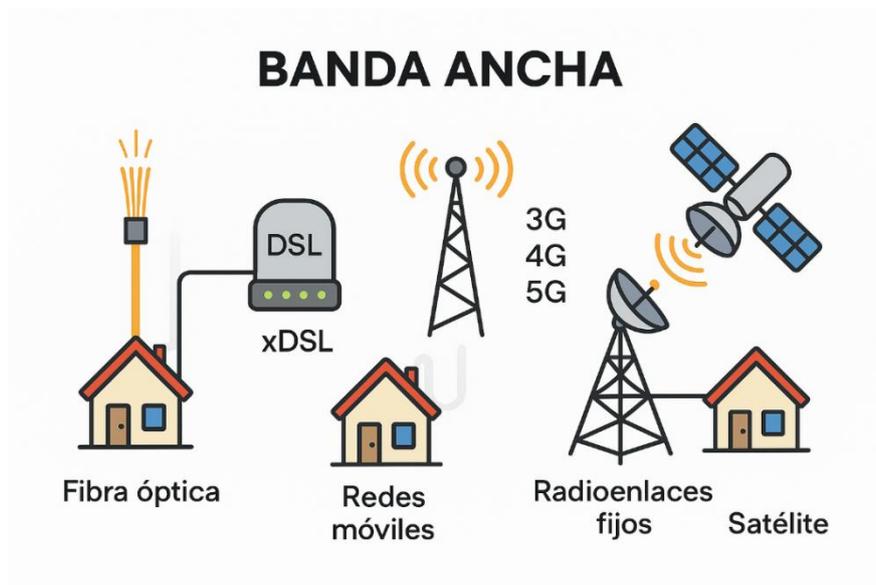


Fig. 5 Tecnologías de banda ancha

Fuente: Techno geek

Existen múltiples tecnologías que ofrecen servicios de banda ancha, entre ellas:

- **Fibra óptica:** Es la tecnología de mayor capacidad y fiabilidad. Permite alcanzar velocidades de hasta 1 Gbps o más, con baja latencia y gran estabilidad.
- **Redes móviles (3G, 4G, 5G):** Proporcionan acceso inalámbrico de banda ancha, especialmente útil en zonas rurales o de difícil acceso.
- **Enlaces inalámbricos:** Son soluciones eficientes para proporcionar banda ancha en zonas donde el despliegue de fibra óptica es inviable o costoso.
- **Satélite:** Útil para zonas extremadamente remotas, aunque presenta mayores latencias y costos operativos.

En el contexto de zonas rurales y de difícil acceso, la banda ancha mediante radioenlaces se presenta como una solución viable, flexible y de rápida implementación. Esta modalidad permite conectar centros poblados a través de nodos intermedios, asegurando la disponibilidad de servicios digitales incluso en condiciones topográficas adversas.

El acceso a banda ancha se ha convertido en un factor clave para el desarrollo económico, social y educativo de las poblaciones. Según estudios del Banco Mundial, un incremento del 10% en la penetración de banda ancha puede

traducirse en un crecimiento del 1.21% del PIB en países en desarrollo. Además, la conectividad de banda ancha es fundamental para reducir la brecha digital, mejorar el acceso a la información y fortalecer los servicios de salud, educación, comercio y gestión pública.

2.2.5. Conectividad rural

La conectividad rural hace referencia a la disponibilidad y accesibilidad de infraestructuras tecnológicas y de comunicación en zonas rurales, que permiten la integración de estas áreas en redes más amplias de información y servicios. La implementación de redes de banda ancha facilita no solo el acceso a Internet, sino también el desarrollo de oportunidades socioeconómicas al mejorar el acceso a la educación, la salud y el comercio digital. La falta de conectividad en áreas rurales contribuye a la desigualdad al limitar el acceso a recursos y servicios esenciales, lo cual puede frenar el desarrollo de estas comunidades [27].

En estos entornos, las soluciones de conectividad deben adaptarse a condiciones adversas. Las tecnologías inalámbricas, como los radioenlaces de microondas en configuraciones punto a punto (PtP) o punto a multipunto (PtMP), se presentan como una alternativa eficiente, flexible y de menor costo frente a la infraestructura cableada. Estas soluciones permiten desplegar redes sobre terrenos complejos, minimizando el impacto ambiental y la inversión en obras civiles.



Fig. 6 Conectividad rural

Fuente: Mergroup

2.2.6. Red de backhaul

La red de backhaul es la infraestructura que conecta las redes de acceso donde los usuarios finales se conectan con el núcleo o la red central de un proveedor de servicios de comunicación. En una red inalámbrica, el backhaul es el enlace de alta capacidad que lleva el tráfico de datos desde puntos de acceso locales, como torres o estaciones base, hacia el centro de datos principal o hacia Internet. Este enlace es esencial para asegurar que los datos de los usuarios se transmitan eficientemente entre la red de acceso y la red principal, y puede utilizar enlaces de fibra óptica, microondas u otras tecnologías de alta velocidad [28].

El backhaul puede estar conformado por distintas tecnologías de transmisión, como enlaces de fibra óptica, enlaces satelitales, o enlaces de radiofrecuencia (radioenlaces). En contextos rurales o zonas geográficas complejas donde el tendido de fibra resulta costoso o inviable, los radioenlaces punto a punto (PtP) o punto a multipunto (PtMP) se presentan como soluciones eficaces, debido a su facilidad de implementación, bajo costo relativo y buen rendimiento en términos de velocidad y estabilidad.

Un diseño eficiente del backhaul permite transportar grandes volúmenes de información con baja latencia, alta disponibilidad y capacidad de escalabilidad. Esto resulta especialmente importante cuando se busca garantizar servicios de calidad como acceso a internet, transmisión de datos administrativos, videovigilancia entre otros servicios. Además, el diseño del backhaul debe considerar aspectos como la capacidad de tráfico, el crecimiento proyectado de usuarios, la redundancia de rutas, y la compatibilidad con tecnologías de acceso y núcleo [29].

Existen diferentes formas de estructurar una red de backhaul. La topología punto a punto (PtP) es utilizada cuando se necesita conectar directamente dos ubicaciones, garantizando un alto rendimiento. La topología punto a multipunto (PtMP), en cambio, permite conectar múltiples nodos remotos a un nodo central, lo cual es útil para comunidades dispersas o redes con múltiples usuarios. Finalmente, la topología mallada (mesh) permite que varios nodos se interconecten entre sí, generando rutas redundantes que incrementan la tolerancia a fallos y la disponibilidad del sistema.

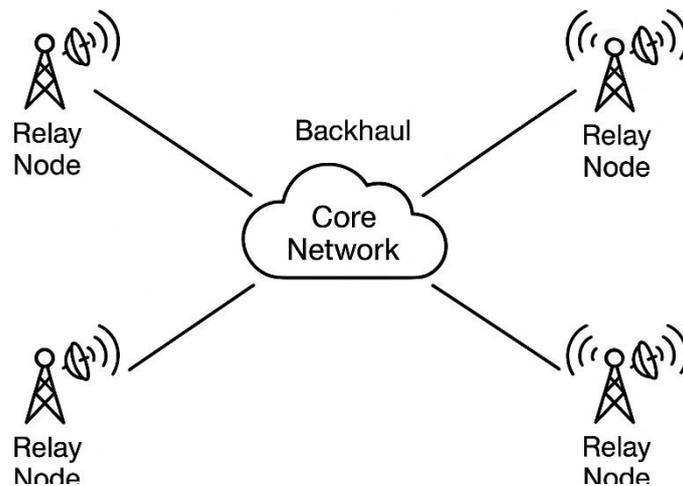


Fig. 7 Red de backhaul

Fuente: VIAVI Solutions

2.3. Definición de términos básicos

- **Ancho de Banda:** Capacidad de transmisión de datos de una conexión, generalmente medida en Mbps (megabits por segundo). A mayor ancho de banda, mayor cantidad de datos pueden transmitirse simultáneamente [30].
- **Red Inalámbrica:** Tipo de red que permite la conexión de dispositivos sin necesidad de cables físicos, utilizando ondas de radio para transmitir datos entre dispositivos conectados [31].



Fig. 8 Red inalámbrica

Fuente: Fabricum PUCP

- **Throughput:** Es la tasa efectiva de transmisión de datos que una red o enlace puede manejar en un periodo determinado, generalmente medido en Mbps (megabits por segundo). A diferencia de la velocidad teórica máxima de la red, el throughput refleja el rendimiento real que los usuarios experimentan, considerando factores como interferencias, congestión de red y condiciones del entorno [32].
- **Zona de Fresnel:** Es el espacio elíptico alrededor de la línea de visión directa entre un transmisor y un receptor en una red inalámbrica. Es fundamental mantener esta zona despejada de obstáculos (como árboles o edificios) para minimizar interferencias y pérdidas de señal [33]. La claridad de la zona de Fresnel es crucial en la planificación de enlaces de microondas y de radio, ya que una zona obstruida puede reducir significativamente la calidad de la señal.
- **Pérdida en el Espacio Libre:** Es la disminución de la intensidad de la señal de radio a medida que se propaga a través del espacio vacío. A medida que la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta, la potencia de la señal disminuye debido a la dispersión natural de las ondas de radio [34]. Esta pérdida depende de la frecuencia de la señal y la distancia del enlace, y es un factor importante al diseñar redes inalámbricas de largo alcance, como las redes WiMAX para áreas rurales.
- **Cobertura Geográfica:** Área o extensión en la que una red de telecomunicaciones puede ofrecer sus servicios, incluyendo áreas urbanas, suburbanas y rurales. En redes inalámbricas, depende de factores como potencia de señal y topografía.
- **Conectividad Rural:** Acceso a servicios de comunicación, incluyendo Internet, en zonas rurales o de baja densidad poblacional, diseñado para superar desafíos como la falta de infraestructura y altos costos de acceso [35].



Fig. 9 Conectividad rural mediante radioenlaces

Fuente: Ufinet

- **Latencia:** Tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde el origen hasta el destino. Es un factor importante en la calidad de la conexión, especialmente para actividades en tiempo real como videollamadas o juegos en línea [36].
- **Fiabilidad:** Capacidad de una red para ofrecer un servicio continuo y estable con pocas interrupciones, fundamental para asegurar una experiencia de usuario satisfactoria [37].
- **Frecuencia:** Rango de ondas de radio utilizadas para transmitir datos en redes inalámbricas. La frecuencia afecta la cobertura y la velocidad de transmisión de una red inalámbrica [38].

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el distrito de Calquis ubicado en la provincia de San Miguel, departamento de Cajamarca (Fig. 10), en el primer semestre del año 2025. Este distrito fue creado mediante Ley N° 15465 del 19 de noviembre de 1965. Tiene una expansión de 339 km² y una altitud media de 2855 msnm.



Fig. 10 Ubicación del distrito de Calquis en el mapa de la provincia de San Miguel

Fuente: FamilySearch

3.1. Procedimiento

El presente trabajo se desarrolló mediante un conjunto de etapas ordenadas y sistemáticas utilizando la metodología Top-Down Network Design [39], orientado al diseño de una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces y a la evaluación de su desempeño en el distrito de Calquis.

A continuación, en la siguiente figura se presenta de forma visual y ordenada las etapas de la metodología desarrollada en esta investigación:



Fig. 11 Etapas de la metodología

Etapa 1: Recopilación de información técnica y geográfica.

Comprende la recopilación de información del distrito, datos geográficos, coordenadas y altitudes de los centros poblados de Calquis. Asimismo, se identifica el estado actual de la conectividad y los puntos sin acceso a servicios de telecomunicaciones.

Etapa 2: Definición de las necesidades de la red.

Se identifican las necesidades de comunicación de centros poblados. Esto incluye estimaciones del número de usuarios, demanda de ancho de banda, condiciones mínimas de disponibilidad y cobertura.

Etapa 3: Diseño físico y selección de equipos.

En esta etapa se determinan los puntos estratégicos para instalar los radios, así como la infraestructura necesaria para establecer los enlaces. Se seleccionan dispositivos como radios y antenas, además de accesorios como cableado y

torres de soporte. Esta etapa busca garantizar un diseño robusto, eficiente y que se adecúe a las características técnicas del distrito.

Etapa 4: Simulación y evaluación técnica del desempeño.

En esta etapa se emplea software para modelar los radioenlaces propuestos. En esta simulación se introducen parámetros como coordenadas geográficas, altura de torres, tipo de equipo, frecuencia y potencia, para obtener indicadores clave como distancia efectiva, pérdidas por trayectoria, potencia recibida, margen de desvanecimiento, modulación alcanzada, disponibilidad y throughput. Con estos resultados, se evalúa si los enlaces cumplen con los requerimientos técnicos definidos. En caso contrario se ajusta el diseño optimizando la ubicación de estaciones, modificando la altura de las torres o cambiando equipos.

Etapa 5: Análisis de costos.

Se realiza un análisis preliminar de costos de infraestructura, instalación y mantenimiento de la red. Este análisis considera también aspectos técnicos, económicos y operativos.

3.1.1. Etapa 1: Recopilación de información técnica y geográfica

3.1.1.1. Contexto educativo, salud y social

El proyecto adquiere gran relevancia al contribuir directamente a la reducción de las brechas digitales, educativas y sociales existentes en el distrito de Calquis. Actualmente, el 50% de la población solo ha alcanzado el nivel de primaria y el 27.95% completó la secundaria, mientras que la tasa de analfabetismo alcanza el 15.31%, afectando en mayor proporción a las mujeres (61.47%) que a los hombres (38.53%) [40]. La falta de acceso a tecnologías de información y comunicación limita las oportunidades de aprendizaje, capacitación y acceso a contenidos educativos modernos. Con la implementación de la red de telecomunicaciones, se fortalecerá la educación digital, permitiendo el acceso a plataformas virtuales, programas de alfabetización y recursos pedagógicos en línea [41].

En el ámbito de la salud, donde solo el 39.24% cuenta con SIS y el 5.24% con ESSALUD, mientras que un 54.71% carece de seguro, la mejora en conectividad facilitará la telemedicina, el registro digital de pacientes y el acceso remoto a

servicios médicos especializados. Asimismo, al mejorar la cobertura digital, se impulsa el desarrollo social y económico, brindando a los pobladores oportunidades de comunicación, emprendimiento y acceso a información pública relevante [42].

Las viviendas, mayoritariamente de adobe y sin acceso a red pública de agua (96.48% obtienen el recurso de ríos o manantiales), reflejan las condiciones rurales y la necesidad de proyectos integrales de desarrollo. En este contexto, la conectividad mediante radioenlaces representa un pilar fundamental para impulsar la inclusión digital, mejorar la calidad de vida y sentar las bases de un desarrollo sostenible y equitativo en Calquis [43].

3.1.1.2. Ubicación de centros poblados

Los centros poblados analizados en este estudio se encuentran distribuidos a lo largo del distrito de Calquis, en una región de geografía variada y predominantemente montañosa. Las altitudes de estas localidades varían entre los 1727 m.s.n.m. en La Granadilla y los 3472 m.s.n.m. en San Lorenzo Alto, lo que representa un factor clave a considerar en la evaluación de la conectividad y las condiciones del terreno. La ubicación geográfica de estos centros poblados influye en la propagación de señales inalámbricas y en los desafíos asociados a la infraestructura de telecomunicaciones en la zona.

La disposición geográfica de los centros poblados refleja la diversidad del relieve, con algunas localidades asentadas en laderas pronunciadas y otras en mesetas o valles interandinos. Por ejemplo, comunidades como Cushuro, El Brete y La Totorá, con altitudes superiores a los 3100 m.s.n.m., se ubican en zonas de mayor elevación, lo que les permite una mejor propagación de señal inalámbrica, pero también las expone a condiciones climáticas más extremas. En contraste, localidades como La Granadilla y Taulis Calquis, situadas a menores altitudes, se encuentran en terrenos más accesibles y con mayor vegetación.

Las coordenadas geográficas de estos centros poblados muestran una distribución que abarca tanto el sector oriental como occidental del distrito, lo que demanda un diseño de red que considere la existencia de barreras naturales como colinas y quebradas. La ubicación estratégica de los puntos de

interconexión garantizará una cobertura eficiente a lo largo de la región, optimizando la conectividad en comunidades aisladas y permitiendo la integración de toda la población en la red de telecomunicaciones.

En la siguiente tabla se presentan las coordenadas y altitudes de los centros poblados, proporcionando una referencia precisa de su localización dentro del distrito.

Tabla IV Coordenadas de los Centros Poblados

| Centro Poblado | Latitud | Longitud | Altitud |
|-------------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| Alto Palmito | -6.90392164 | -79.03793 | 2560 |
| Calquis | -6.98017248 | -78.8499954 | 2859 |
| Cushuro | -6.92794353 | -78.947305 | 3171 |
| El Brete | -6.96797352 | -78.9945499 | 3189 |
| El Cedro | -6.97655823 | -78.8620961 | 2980 |
| El Galpon | -6.94528523 | -78.9440978 | 3315 |
| El Medina | -6.96666047 | -78.9629738 | 3270 |
| El Palmito | -6.91079371 | -79.0531684 | 2647 |
| La Colpa | -6.92316787 | -78.8279462 | 3286 |
| La Granadilla | -6.89276565 | -79.0643839 | 1727 |
| La Totora | -6.96811271 | -78.874604 | 3316 |
| Lauchamud | -6.9559449 | -78.8491704 | 2997 |
| Los Tres Ríos | -6.94967577 | -78.8727781 | 3076 |
| Nuevo San Miguel | -6.94964777 | -79.0282355 | 3285 |
| San Francisco De Vista Alegre | -6.93864735 | -78.8406179 | 3280 |
| San Lorenzo | -6.87429568 | -78.9157454 | 3354 |
| San Lorenzo Alto | -6.88455027 | -78.8774024 | 3472 |
| Succhapampa | -6.91468599 | -79.0116496 | 2764 |
| Taulis Calquis | -6.93337436 | -78.9811107 | 2716 |
| Taulis Playa | -6.93737374 | -78.990024 | 2734 |
| Valdivia | -6.88567687 | -78.9910395 | 3035 |

A partir de las coordenadas geográficas obtenidas, se ha representado la ubicación de los centros poblados en el mapa mostrado en la figura. Esta representación cartográfica permite visualizar la distribución de las localidades dentro del distrito de Calquis, facilitando el análisis de su disposición geográfica y las condiciones del terreno.

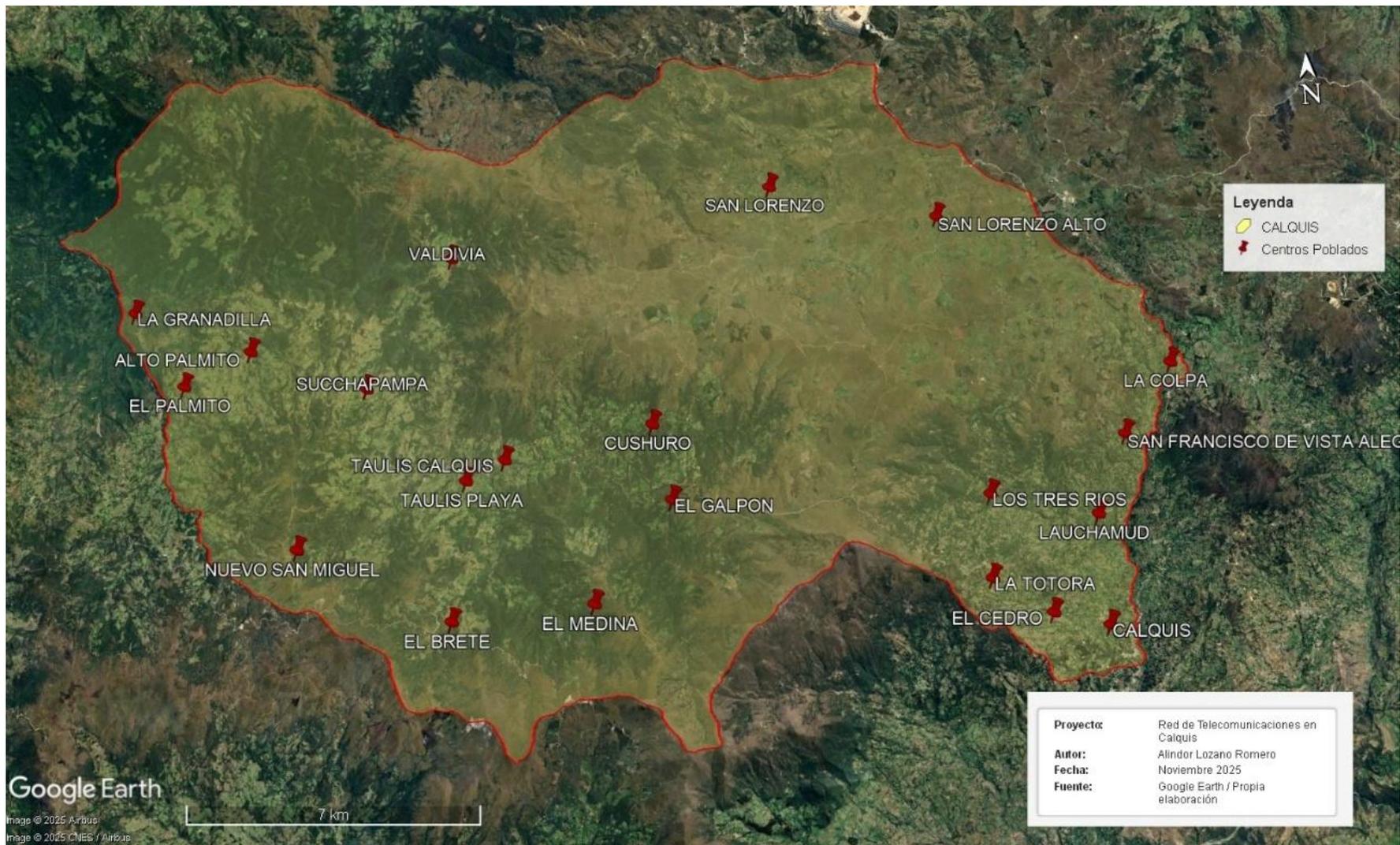


Fig. 12 Ubicación de los centros poblados del distrito de Calquis

3.1.1.3. Diagnóstico de la situación actual de conectividad

De acuerdo con la consulta realizada en el portal web de OSIPTEL, el distrito de Calquis presenta una cobertura móvil limitada, lo que evidencia la brecha digital existente en la zona. Actualmente, solo dos operadoras brindan servicios de telefonía móvil y datos: Movistar y Bitel. Movistar presenta mayor cobertura, con señal disponible en localidades como Calquis, El Cedro, La Totorá, Lauchamud, Los Tres Ríos y San Francisco de Vista Alegre, mientras que Bitel únicamente tiene presencia en Calquis, Lauchamud y Los Tres Ríos, y con niveles de señal más reducidos. Las empresas Claro y Entel no cuentan con cobertura en ninguna localidad del distrito, lo que restringe la competencia y la calidad del servicio.

Esta situación refleja una conectividad desigual, donde gran parte de la población rural enfrenta dificultades para acceder a servicios digitales, educativos, de salud y productivos. La infraestructura actual solo permite acceso parcial a tecnologías móviles básicas, sin garantizar una conectividad estable ni servicios de banda ancha.

En este contexto, el proyecto propuesto contribuye significativamente a cerrar la brecha digital mediante la implementación de radioenlaces de alta capacidad que mejoran la cobertura y disponibilidad del servicio en todas las localidades del distrito. Esta mejora en conectividad permitirá fortalecer los servicios educativos y sanitarios a través de plataformas digitales, impulsar la inclusión tecnológica y generar oportunidades de desarrollo económico, reforzando la relevancia social del proyecto dentro del marco de transformación digital rural.

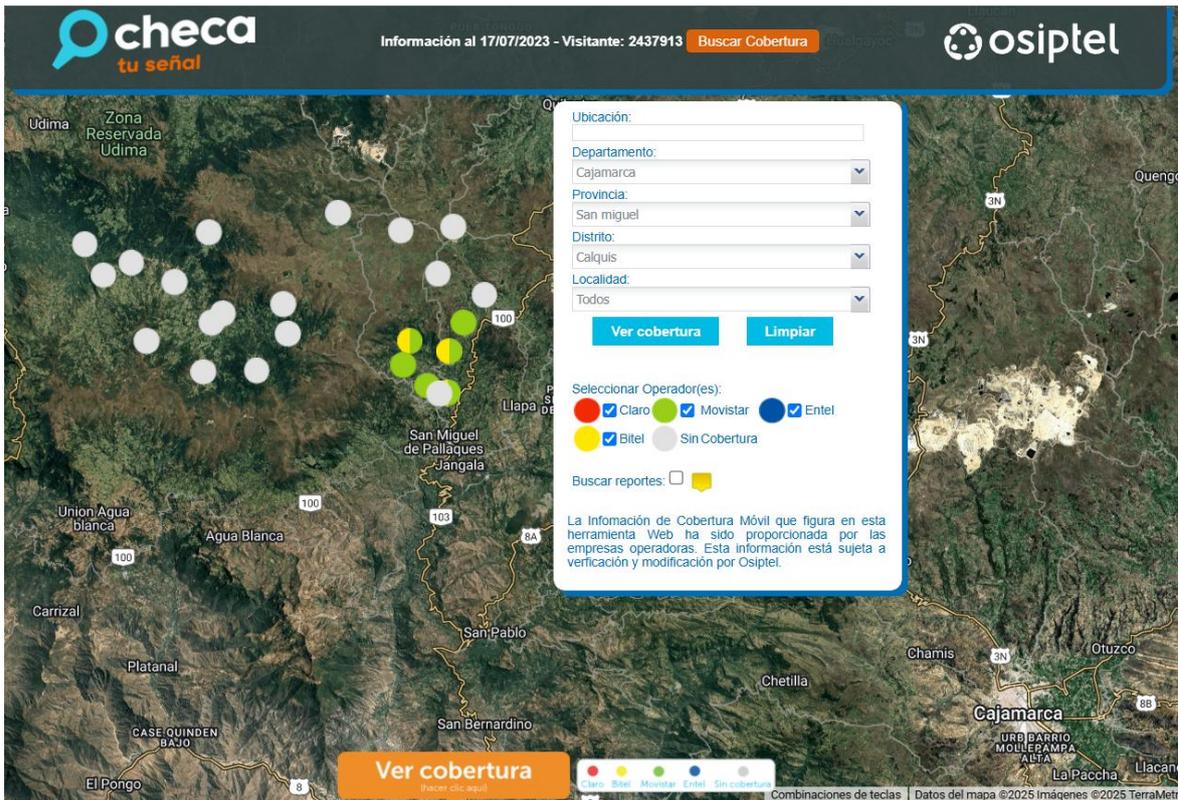


Fig. 13 Mapa de cobertura en el distrito de Calquis

Fuente: OSIPTEL

La siguiente tabla, basada en la información del servicio web de cobertura móvil de OSIPTEL, muestra la disponibilidad de señal de las principales operadoras en distintas localidades del distrito de Calquis. Los datos reflejan una cobertura limitada y desigual, donde solo algunas operadoras ofrecen servicio en ciertas zonas, mientras que en la mayoría de los caseríos y centros poblados no hay acceso a telefonía móvil ni datos.

Se destaca que Movistar es la operadora con mejor cobertura en el distrito, presente en localidades como Calquis, El Cedro, La Totorá, Lauchamud, Los Tres Ríos y San Francisco de Vista Alegre, mientras que Bitel tiene cobertura en Calquis, Lauchamud y Los Tres Ríos. Sin embargo, operadores como Claro y Entel no cuentan con estaciones base (BTS) activas en la zona, lo que deja a muchas comunidades sin acceso a servicios de telecomunicaciones esenciales.

Esta situación evidencia la brecha digital existente en el distrito de Calquis, lo que afecta la conectividad de sus habitantes y su acceso a servicios digitales, comunicación y desarrollo tecnológico.

Tabla V Cobertura de operadas de internet

| Centro Poblado | CLARO | MOVISTAR | ENTEL | BITEL |
|-------------------------------|-------|----------|-------|-------|
| Alto Palmito | No | No | No | No |
| Calquis | No* | Si | No | Si |
| Cushuro | No | No | No | No |
| El Brete | No | No | No | No |
| El Cedro | No* | Si | No | No* |
| El Medina | No | No | No | No |
| El Palmito | No | No | No | No |
| Galpon | No | No | No | No |
| La Colpa | No* | No | No | No |
| La Granadilla | No* | No | No | No |
| La Totora | No* | Si | No | No* |
| Lauchamud | No* | Si | No | Si |
| Los Tres Ríos | No* | Si | No | Si |
| Nuevo San Miguel | No | No | No | No |
| San Francisco De Vista Alegre | No* | Si | No | No* |
| San Lorenzo Alto | No | No | No | No |
| San Lorenzo Bajo | No | No | No | No |
| Suchapampa | No | No | No | No |
| Taulis Calquis | No | No | No | No |
| Taulis Playa | No | No | No | No |
| Valdivia | No | No | No | No |

3.1.1.4. Infraestructura energética

El distrito de Calquis cuenta con infraestructura eléctrica suministrada por Hidrandina, empresa encargada de la distribución de energía en la región. La cobertura eléctrica abarca la mayor parte de los centros poblados, permitiendo a los habitantes acceder a servicios básicos y facilitando el desarrollo de actividades comerciales, educativas y productivas.

Sin embargo, en algunas localidades más alejadas, el suministro de electricidad puede presentar limitaciones debido a la distancia de las redes de distribución y las condiciones geográficas del distrito. En estos casos, algunas familias complementan su acceso a la energía con fuentes alternativas como paneles solares o pequeños generadores, especialmente en zonas rurales sin conexión directa a la red principal.

El acceso a la electricidad ha impulsado el uso de electrodomésticos, la iluminación nocturna y la conectividad en la zona, aunque aún persisten desafíos en la ampliación de la red y la estabilidad del servicio, especialmente durante temporadas de lluvias intensas que pueden afectar la infraestructura eléctrica.

3.1.1.5. Proyecto regional de la RDNFO

La Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO) es una infraestructura de telecomunicaciones diseñada para mejorar el acceso a internet en todo el país, especialmente en zonas rurales y de difícil acceso. Su objetivo es interconectar 22 capitales regionales y 158 capitales provinciales, permitiendo la expansión de servicios digitales en educación, salud, administración pública y comercio.

En la Región Cajamarca, el proyecto contempla la instalación de nodos de agregación, distribución y acceso, los cuales permiten canalizar el tráfico de datos y garantizar una conectividad eficiente en la zona. Esta red facilita la integración digital de provincias y distritos, promoviendo el desarrollo socioeconómico a través de la tecnología.

Dentro de la provincia de San Miguel, la RDNFO ha desplegado un nodo de distribución (DIST), el cual actúa como un punto clave para la transmisión de datos en la provincia. Este nodo permite distribuir el servicio de conectividad a través de enlaces troncales y secundarios, facilitando el acceso a internet en localidades alejadas.

En el distrito de Calquis, la existencia de este nodo de distribución representa una oportunidad clave para extender la infraestructura digital hacia sus centros poblados, muchos de los cuales se encuentran en áreas montañosas con acceso limitado a servicios digitales. La presencia de la fibra óptica en la capital de distrito permite planificar una red de transporte basada en radioenlaces, que actúe como extensión local de la RDNFO, garantizando mayor cobertura, estabilidad y velocidad en la transmisión de datos. Esta integración es esencial para promover el acceso a servicios digitales en zonas rurales y cerrar la brecha digital existente.

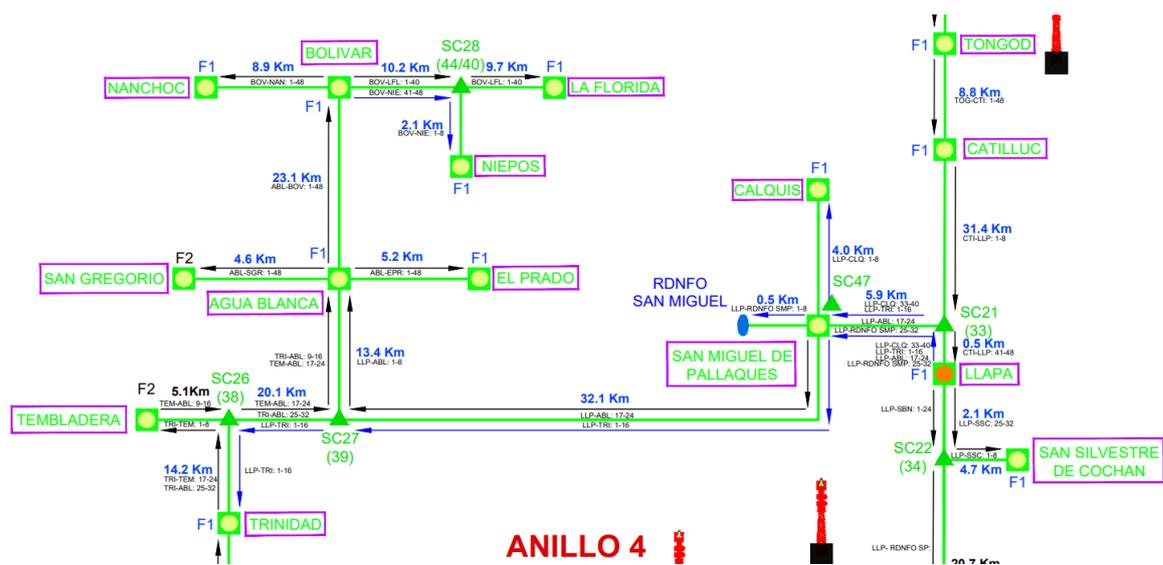


Fig. 14 Red de transporte en la provincia de San Miguel

Fuente: Redes Andinas de Comunicaciones S.R.L.

3.1.2. Etapa 2: Definición de las necesidades de la red

3.1.2.1. Estimación del ancho de banda efectivo – throughput

En el distrito de Calquis, donde el promedio de habitantes por vivienda es de aproximadamente tres personas, las recomendaciones de ancho de banda deben ajustarse al perfil de uso de los hogares. Para actividades básicas como la navegación web, acceso al correo electrónico y redes sociales, pueden ser suficientes conexiones de baja velocidad, en el rango de 3 a 5 Mbps por hogar. No obstante, considerando el crecimiento del uso de servicios digitales como la educación virtual, el teletrabajo, las videollamadas y el acceso a contenidos multimedia, es recomendable contar con conexiones de al menos 10 Mbps por vivienda. Este nivel de servicio permite una experiencia más estable y eficiente, alineándose con los estándares mínimos sugeridos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones para zonas rurales y urbanas emergentes [44].

Una conexión de 10 Mbps puede ser suficiente para un hogar o una pequeña oficina con un uso moderado de Internet, facilitando tareas como navegación web, correo electrónico, educación virtual, trabajo remoto y juegos en línea, aunque con ciertas limitaciones en el uso simultáneo y la calidad del servicio. Si bien esta velocidad puede resultar aceptable en comunidades rurales de la sierra con infraestructura limitada, es crucial anticipar el crecimiento en las necesidades de ancho de banda y planificar redes capaces de soportar

velocidades mayores para adaptarse a la creciente demanda de servicios digitales y aplicaciones que requieren más datos [45].

Para la estimación del ancho de banda, se ha considerado un throughput de 10 Mbps por vivienda habitada. En la siguiente tabla se presenta el cálculo correspondiente para cada centro poblado del distrito.

Tabla VI Estimación de ancho de banda por CCPP

| Centro Poblado | Población | Viviendas | Estimación De Ancho De Banda |
|-------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|
| Cushuro | 152 | 46 | 460 Mbps |
| San Lorenzo Alto | 52 | 30 | 300 Mbps |
| Nuevo San Miguel | 116 | 32 | 320 Mbps |
| Valdivia | 39 | 14 | 140 Mbps |
| San Lorenzo Bajo | 181 | 74 | 740 Mbps |
| Alto Palmito | 195 | 52 | 520 Mbps |
| La Granadilla | 74 | 31 | 310 Mbps |
| El Palmito | 184 | 72 | 720 Mbps |
| Suchapampa | 158 | 46 | 460 Mbps |
| Taulis Calquis | 121 | 40 | 400 Mbps |
| La Colpa | 170 | 65 | 650 Mbps |
| El Medina | 74 | 19 | 190 Mbps |
| El Brete | 77 | 24 | 240 Mbps |
| Taulis Playa | 138 | 45 | 450 Mbps |
| Galpon | 98 | 39 | 390 Mbps |
| San Francisco De Vista Alegre | 216 | 97 | 970 Mbps |
| Los Tres Ríos | 431 | 161 | 1610 Mbps |
| Lauchamud | 295 | 107 | 1070 Mbps |
| La Titora | 154 | 50 | 500 Mbps |
| El Cedro | 306 | 116 | 1160 Mbps |
| Calquis | 514 | 256 | 2560 Mbps |

Para garantizar una conectividad adecuada en los centros poblados del distrito, se ha determinado un ancho de banda base de 20 Mbps para cada institución pública, incluyendo centros de salud (CCSS), instituciones educativas (IIEE) y comisarías [46]. En aquellas localidades donde existen múltiples instituciones, el ancho de banda total se ha incrementado proporcionalmente, asignando 20

Mbps adicionales por cada entidad. De esta manera, centros poblados como Calquis y Taulis Playa, que cuentan con escuelas de nivel primario y secundario, así como centros de salud y comisarías, dispondrán de 80 Mbps y 60 Mbps respectivamente. De acuerdo con la siguiente tabla presentada, se ha incrementado el ancho de banda en aquellas localidades que cuentan con múltiples instituciones, asegurando así una conectividad óptima para el desarrollo de sus actividades y la atención de la población. Este enfoque busca no solo mejorar el acceso a Internet en los hogares, sino también fortalecer la infraestructura digital en las instituciones públicas, promoviendo el desarrollo social y económico del distrito.

Tabla VII Asignación de ancho de banda a Instituciones Públicas de cada CCPP

| Centro Poblado | Instituciones Publicas | Velocidad | Total |
|-------------------------------|--|------------------|--------------|
| Alto Palmito | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| Calquis | Primaria / Secundaria / Centro Salud /Comisaria | 20 Mbps | 80 Mbps |
| Cushuro | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| El Brete | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| El Cedro | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| El Galpon | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| El Medina | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| El Palmito | - | - | - |
| La Colpa | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| La Granadilla | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| La Totorá | Primaria / Secundaria | 20 Mbps | 40 Mbps |
| Lauchamud | Primaria / Secundaria | 20 Mbps | 40 Mbps |
| Los Tres Ríos | Primaria / Secundaria | 20 Mbps | 40 Mbps |
| Nuevo San Miguel | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| San Francisco De Vista Alegre | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| San Lorenzo | - | - | - |
| San Lorenzo Alto | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| Succhapampa | Primaria / Secundaria | 20 Mbps | 40 Mbps |
| Taulis Calquis | Primaria | 20 Mbps | 20 Mbps |
| Taulis Playa | Primaria / Secundaria / Centro Salud | 20 Mbps | 60 Mbps |
| Valdivia | - | - | - |

3.1.3. Etapa 3: Diseño físico y selección de equipos

3.1.3.1. Selección del simulador de radioenlaces

Para realizar un diseño eficiente de la red de radioenlaces requiere de herramientas de simulación que permitan modelar con precisión el entorno geográfico, calcular las pérdidas de propagación, analizar la visibilidad entre estaciones y estimar la disponibilidad de los enlaces. En el caso del distrito de Calquis, caracterizado por una geografía montañosa y dispersión poblacional, la elección del simulador resulta crítica para garantizar la viabilidad técnica del proyecto.

Para realizar una simulación correcta se evalúa cuatro softwares ampliamente conocidos y utilizados en el ámbito de las telecomunicaciones para el diseño de enlaces punto a punto y redes inalámbricas de backhaul: Link Planner, Radio Mobile, Ubiquiti AirLink y Pathloss.

Cada uno de estos softwares es evaluado en base criterios clave como la precisión topográfica, interfaz y facilidad de uso, base de datos de equipos, capacidades de simulación, generación de reportes técnicos, requerimientos de instalación y costo de licencias. A continuación, se presenta una tabla comparativa que resume los principales atributos de cada simulador:

Tabla VIII Comparación de softwares de simulaciones de radioenlaces

| Criterio | Link Planner | Radio Mobile | Ubiquiti AirLink | Pathloss |
|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Precisión topográfica | Alta (SRTM/Google Elevation) | Alta (SRTM/DEM personalizable) | Media (limitada por área) | Muy alta (requiere calibración) |
| Interfaz y facilidad de uso | Alta (intuitiva y visual) | Media (curva de aprendizaje) | Alta (web gráfica) | Baja (compleja, técnica) |
| Radio de Fresnel y pérdidas | Cálculo automático | Cálculo detallado manual | Parcial | Completo (manual) |
| Soporte de enlaces punto a punto | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Base de datos de equipos | Integrada (Cambium/Motorola) | No (requiere ingreso manual) | Limitada a Ubiquiti | No (requiere configuración) |
| Instalación | No (versión web y PC) | Sí | No (web-based) | Sí |
| Exportación de reportes | Sí (PDF, Excel) | Limitada | No (pantalla únicamente) | Sí |
| Costo y disponibilidad | Gratuito | Gratuito | Gratuito | Pago (licencia comercial) |

Tras la evaluación comparativa de los cuatro simuladores de radioenlaces como son Link Planner, Radio Mobile, Ubiquiti AirLink y Pathloss, se determinó que Link Planner es el software más adecuado para el diseño y simulación de la red de telecomunicaciones del distrito de Calquis. Este simulador, desarrollado por Cambium Networks, destaca por su alta precisión en el modelado topográfico mediante datos del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) y su integración con Google Earth, lo que permite representar fielmente la compleja geografía montañosa de la zona.

Link Planner permite calcular y analizar parámetros de desempeño conforme a estándares internacionales establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R P.530-17) y la IEEE 802.11, entre ellos: nivel de potencia recibida (Prx), relación señal/ruido (SNR), pérdidas por propagación, radio de la primera zona de Fresnel, disponibilidad del enlace (reliability), fade margin, y throughput estimado. Estos indicadores fueron esenciales para verificar la viabilidad técnica de cada enlace, garantizando la confiabilidad y la calidad del servicio.

Adicionalmente, el software incorpora una base de datos actualizada de equipos Cambium ePMP, con sus fichas técnicas, potencias de transmisión, sensibilidades y modulaciones disponibles, lo que permite realizar simulaciones realistas y ajustadas a las condiciones del proyecto. Su interfaz intuitiva y la generación automática de reportes técnicos detallados facilitan la documentación y validación del diseño.

En comparación con otras herramientas, Link Planner combina precisión, facilidad de uso, soporte técnico y disponibilidad gratuita, sin comprometer el rigor profesional. Su adopción en este proyecto está plenamente justificada, ya que cumple con los estándares internacionales de evaluación de desempeño de radioenlaces, permitiendo un diseño óptimo, reproducible y sustentado en métricas técnicas reconocidas.

3.1.3.2. Radios y antenas utilizados en radioenlaces

a. Radios

De acuerdo al simulador seleccionado los siguientes equipos pertenecen a la serie ePMP 4600 de Cambium Networks, orientados a brindar conectividad inalámbrica de alta capacidad en despliegues rurales y semiurbanos. La elección de los modelos Cambium ePMP 4600L y ePMP 4600C responde a una estrategia de escalabilidad y optimización de recursos en zonas con diferentes niveles de demanda. El ePMP 4600L es una opción rentable y eficiente para nodos de baja o media densidad, brindando velocidades de hasta 2 Gbps con tecnología 2x2 MIMO, ideal para pequeñas comunidades del distrito de Calquis. Por su parte, el ePMP 4600C ofrece un rendimiento superior, con soporte para hasta 4 Gbps y tecnología 4x4 MU-MIMO, lo que lo hace ideal para centros poblados más grandes o con alta demanda de usuarios simultáneos. Ambos modelos operan en la banda de 6 GHz, cuentan con sincronización GPS para evitar interferencias, y están disponibles en el mercado peruano. La inclusión de garantía extendida asegura continuidad operativa y soporte técnico ante cualquier contingencia.

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre los radios Cambium ePMP 4600L y ePMP 4600C.

Tabla IX Comparación de radios Cambium

| Característica | ePMP 4600L | ePMP 4600C |
|--------------------------|---|---|
| Tipo | Access Point | Access Point |
| Banda | 6 GHz | 6 GHz |
| Tecnología | 2x2 MIMO, GPS Sync | 4x4 MU-MIMO, GPS Sync |
| Ancho de canal soportado | Hasta 160 MHz | Hasta 160 MHz |
| Capacidad máxima | Hasta 2 Gbps | Hasta 4 Gbps |
| Densidad de usuarios | Baja a media | Alta (más usuarios simultáneos) |
| Aplicación recomendada | Zonas rurales de baja densidad | Centros poblados o zonas densas |
| Precio estimado | Medio | Alto |
| Ventajas clave | Económico, buen rendimiento, ideal para celdas pequeñas | Mayor capacidad, eficiencia y escalabilidad para alta demanda |

En la siguiente figura se presentan los radios Cambium ePMP 4600L y ePMP 4600C respectivamente.



Fig. 15 Radio Cambium ePMP 4600L y ePMP 4600C

Fuente: Cambium Networks

b. Antenas

Las antenas Radio Waves SPD2-6, SPD3-6 y HPD3-6 seleccionadas por su disponibilidad en el mercado peruano, compatibilidad con radios Cambium ePMP y su balance costo-beneficio adecuado para el distrito de Calquis. La SPD2-6, más pequeña y económica, es ideal para enlaces de media distancia y despliegues con presupuesto limitado. La SPD3-6, con mayor ganancia, permite cubrir distancias más largas manteniendo buena estabilidad. Finalmente, la HPD3-6, de alto desempeño, es perfecta para enlaces críticos donde la interferencia es frecuente, gracias a su estrecho haz y mejor rechazo lateral, garantizando mayor precisión y calidad en la señal. Así, se dispone de una gama que permite ajustar la solución según la topografía y demanda del proyecto.

Estas antenas son muy usadas en enlaces inalámbricos punto a punto (PtP) y punto a multipunto (PtMP), ideales para cubrir distancias medias y largas con alta ganancia y buena directividad. Son accesibles en precio y compatibles con radios como los Cambium ePMP.

En la siguiente tabla se resume las principales especificaciones técnicas de tres modelos de antenas parabólicas utilizadas en enlaces inalámbricos: SPD2-6, SPD3-6 y HPD3-6.

Tabla X Especificaciones técnicas de antenas utilizadas para radioenlaces

| Modelo | Tipo | Tamaño | Ganancia (a 6 GHz) | Radiación (Beamwidth) | Aplicación | Ventajas |
|---------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|---|------------------------------------|--|
| SPD2-6 | Dual-Polar Parabólica | 2 pies | 29 dBi | Aproximadamente 6° (horizontal) / 6° (vertical) | Enlaces PtP de media distancia | Compacta, económica, fácil de instalar |
| SPD3-6 | Dual-Polar Parabólica | 3 pies | 32 dBi | Aproximadamente 4.5° / 4.5° | Enlaces PtP de larga distancia | Mayor ganancia para tramos más largos |
| HPD3-6 | High-Performance Parabólica | 3 pies | 34 dBi | Más estrecha, ~3.5° / 3.5° | Enlaces críticos con interferencia | Mejor rechazo lateral, alta precisión |

En la siguiente tabla se destacan las diferencias clave en términos de tamaño, ganancia, apertura de haz, aplicación preferida, costo estimado y ventajas estratégicas lo que permite seleccionar la antena ideal según la distancia del enlace.

Tabla XI Diferencias técnicas entre antes SPD2-6, SPD3-6 y HDP3-6

| Característica | SPD2-6 | SPD3-6 | HPD3-6 |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Tamaño | 2 pies | 3 pies | 3 pies |
| Ganancia | 29 dBi | 32 dBi | 34 dBi |
| Beamwidth (ancho de haz) | ~6° (H/V) | ~4.5° (H/V) | ~3.5° (H/V) |
| Aplicación | Enlaces de media distancia | Enlaces de larga distancia | Enlaces con interferencias o críticos |
| Precio | Bajo | Medio | Alto |
| Ventaja clave | Fácil instalación, bajo costo | Mejor ganancia para distancia | Alta precisión y rechazo de interferencia |

3.1.3.3. Proyección de la red de backhaul

Para optimizar la conectividad en las localidades del distrito de Calquis, se diseñó una red de interconexión inalámbrica basada en un nodo central conectado al Proyecto Regional Cajamarca (PRC). Esta infraestructura será administrada y supervisada desde un Centro de Operaciones de Red (NOC), lo que garantizará un monitoreo eficiente y una gestión adecuada del servicio. La red se compondrá de dos partes fundamentales: la red de transporte o backhaul, encargada de enlazar los principales nodos con la infraestructura troncal, y la red de acceso, que facilitará la distribución del servicio a las comunidades locales.

Para la implementación de la red de backhaul, se llevó a cabo una geolocalización precisa de las localidades y una planificación detallada de la infraestructura de transporte, asegurando un uso eficiente de los recursos. A partir del análisis realizado, se ha determinado la ubicación estratégica de las torres en los centros poblados, seleccionando estructuras con la altura adecuada para la instalación de antenas repetidoras. Estas permitirán mantener la línea de vista (LOS) requerida para cada enlace de radio, optimizando así la calidad y estabilidad de las comunicaciones en el área de cobertura.

En la siguiente figura se muestra las vistas de los nodos y los radioenlaces en relación de cada centro poblado considerado en el diseño de la red.

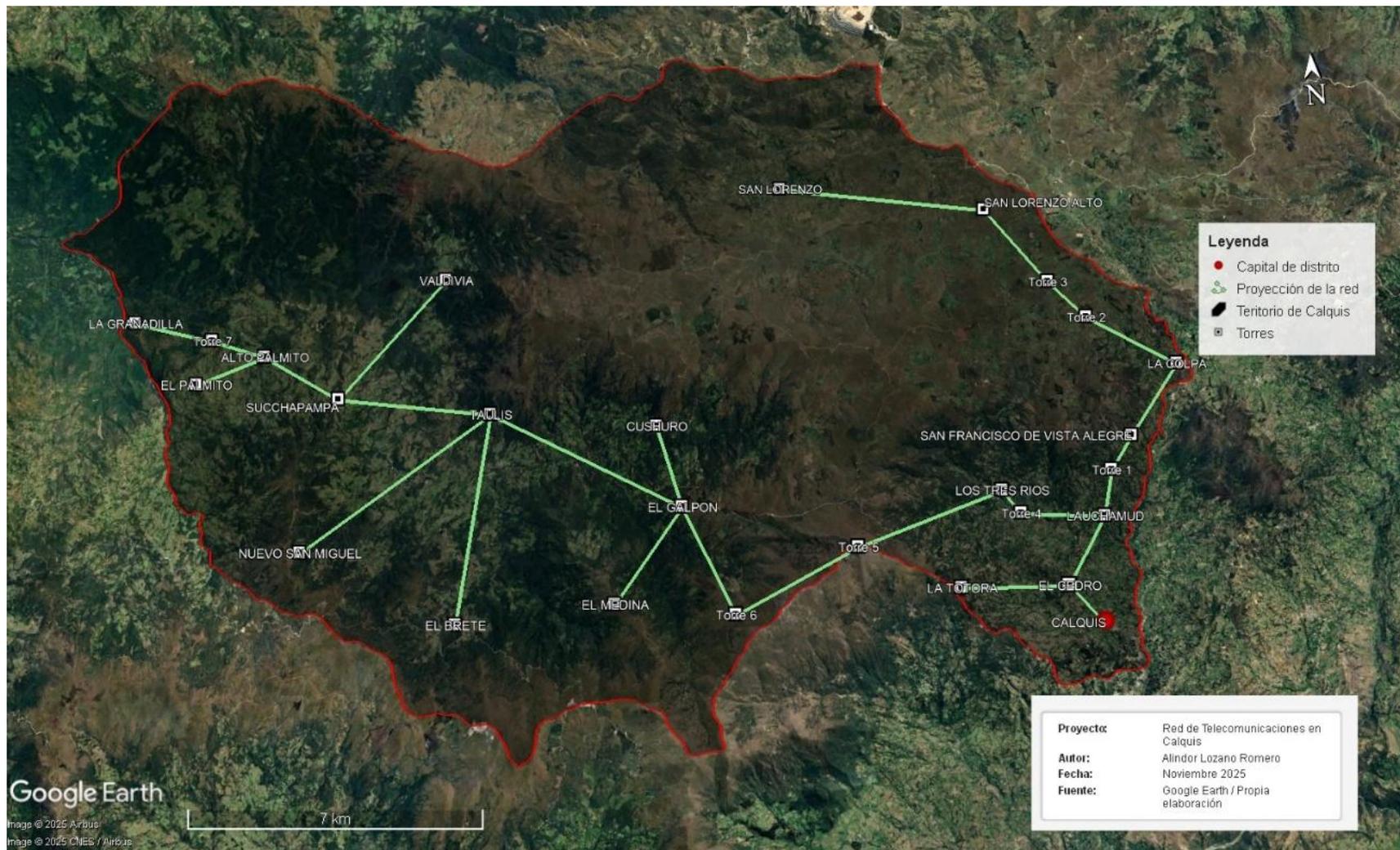


Fig. 16 Proyección de la red backhaul para el distrito de Calquis

A continuación, se presenta el diagrama de la red de transporte que se extiende dentro del perímetro del distrito de Calquis. La red inicia en la torre ubicada en la capital de distrito y se extiende hasta San Lorenzo bajo y por el otro extremo hasta el centro poblado de La Granadilla. Las conexiones están representadas por líneas verdes que vinculan las torres con los centros poblados, algunas de las cuales actúan como nodos centrales con múltiples enlaces, subrayando su importancia en la red. La escala del mapa, detallada en kilómetros, permite comprender la magnitud de la cobertura y facilita la planificación de futuras expansiones.

Este diagrama forma parte de un análisis de infraestructura de telecomunicaciones que permite la interconexión de 21 centros poblados mediante siete torres repetidoras. Estas torres han sido ubicadas estratégicamente para superar los desafíos topográficos del distrito y garantizar la comunicación con línea de vista (LOS) entre los distintos puntos.

Los centros poblados incluidos en esta red son: Alto Palmito, Calquis, Cushuro, El Brete, El Cedro, El Galpón, El Medina, El Palmito, La Colpa, La Granadilla, La Totorá, Lauchamud, Los Tres Ríos, Nuevo San Miguel, San Francisco de Vista Alegre, San Lorenzo, San Lorenzo Alto, Succhapampa, Taulis Calquis, Taulis Playa y Valdivia.

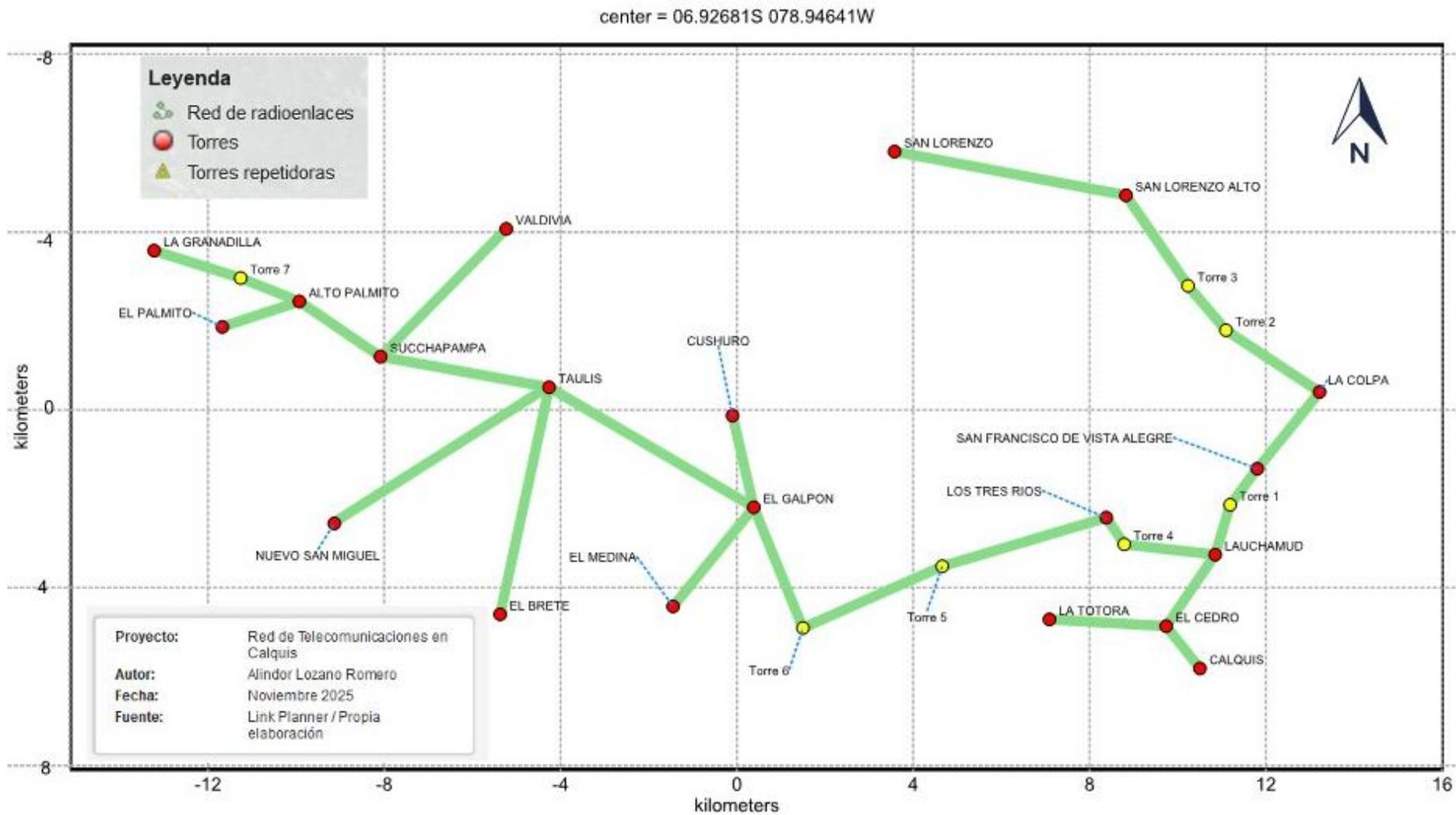


Fig. 17 Radioenlaces de la red de banda ancha para el distrito de Calquis

En la figura siguiente se presenta el detalle de cada uno de los radioenlaces, junto con la estimación del ancho de banda requerido según la cantidad de viviendas en cada centro poblado que recibirá el servicio de acceso a Internet. La estimación del ancho de banda se ha calculado considerando la totalidad de las viviendas, bajo el supuesto de que todos los usuarios soliciten acceso simultáneamente.

Este análisis es fundamental para dimensionar correctamente la infraestructura de telecomunicaciones y garantizar una distribución eficiente del ancho de banda, evitando saturaciones en los enlaces y asegurando una experiencia de conexión óptima para los usuarios.

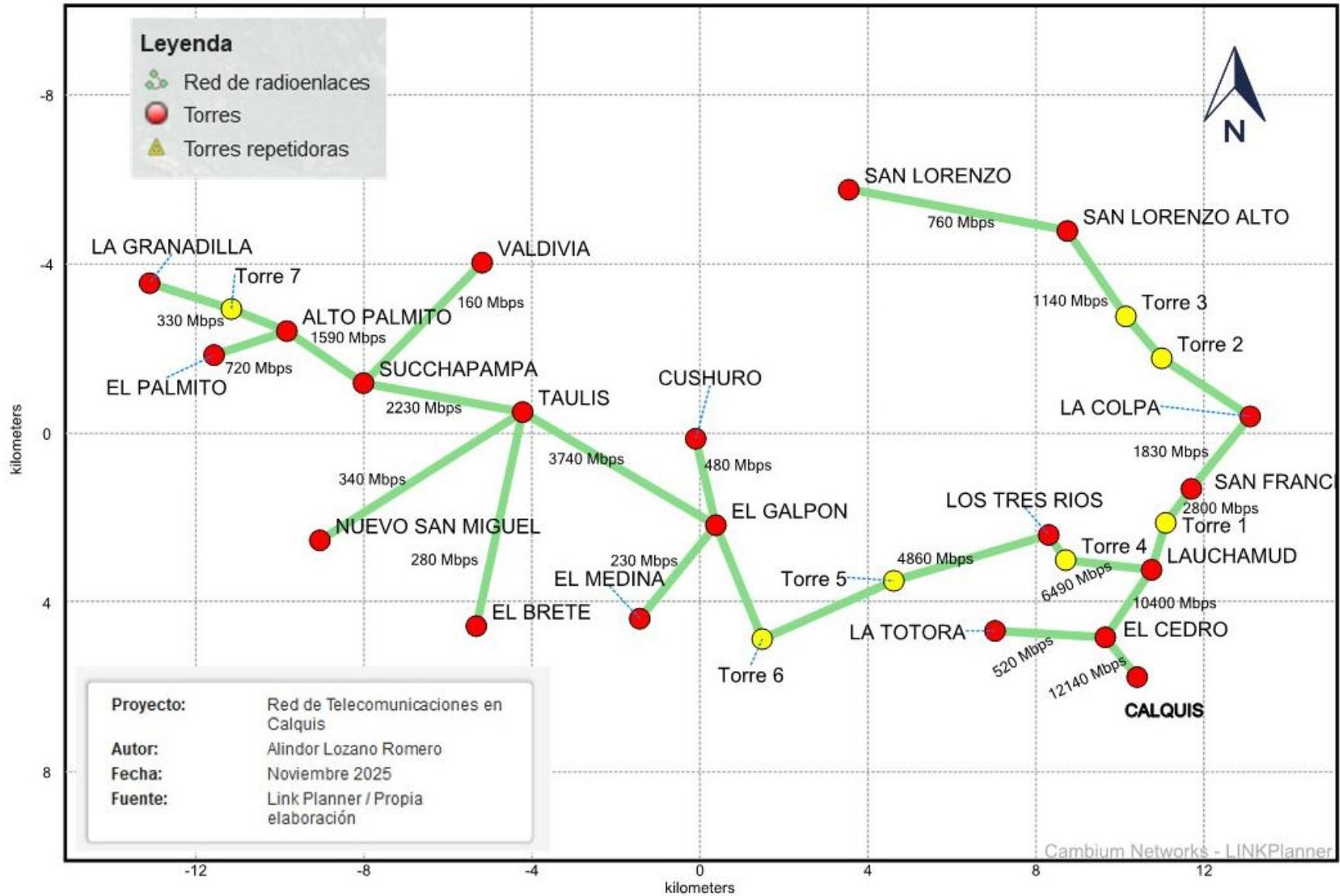


Fig. 18 Ancho de banda para cada centro poblado

Este diseño inicial fue sometido a un proceso de revisión ante un grupo de expertos especializados en desarrollo de redes de telecomunicaciones en ámbitos similares al distrito en estudio (ANEXO 5). El objetivo de este proceso fue validar el diseño, identificar posibles limitaciones y proponer mejoras que optimicen el rendimiento, la cobertura y la sostenibilidad del diseño propuesto.

Después de la revisión por parte de los expertos se elaboró un diseño final que integra de sistemática las recomendaciones técnicas del panel de expertos, logrando una propuesta mejor estructurada y con mayor alineación a las necesidades reales de conectividad del distrito.

Estas modificaciones no solo fortalecen la eficiencia técnica del sistema, sino que también amplían su capacidad de adaptación ante el crecimiento de la demanda y las particularidades geográficas del distrito, asegurando un servicio robusto, confiable y sostenible en el tiempo.

A continuación, se presenta el diseño final de red de telecomunicaciones para el distrito de Calquis.

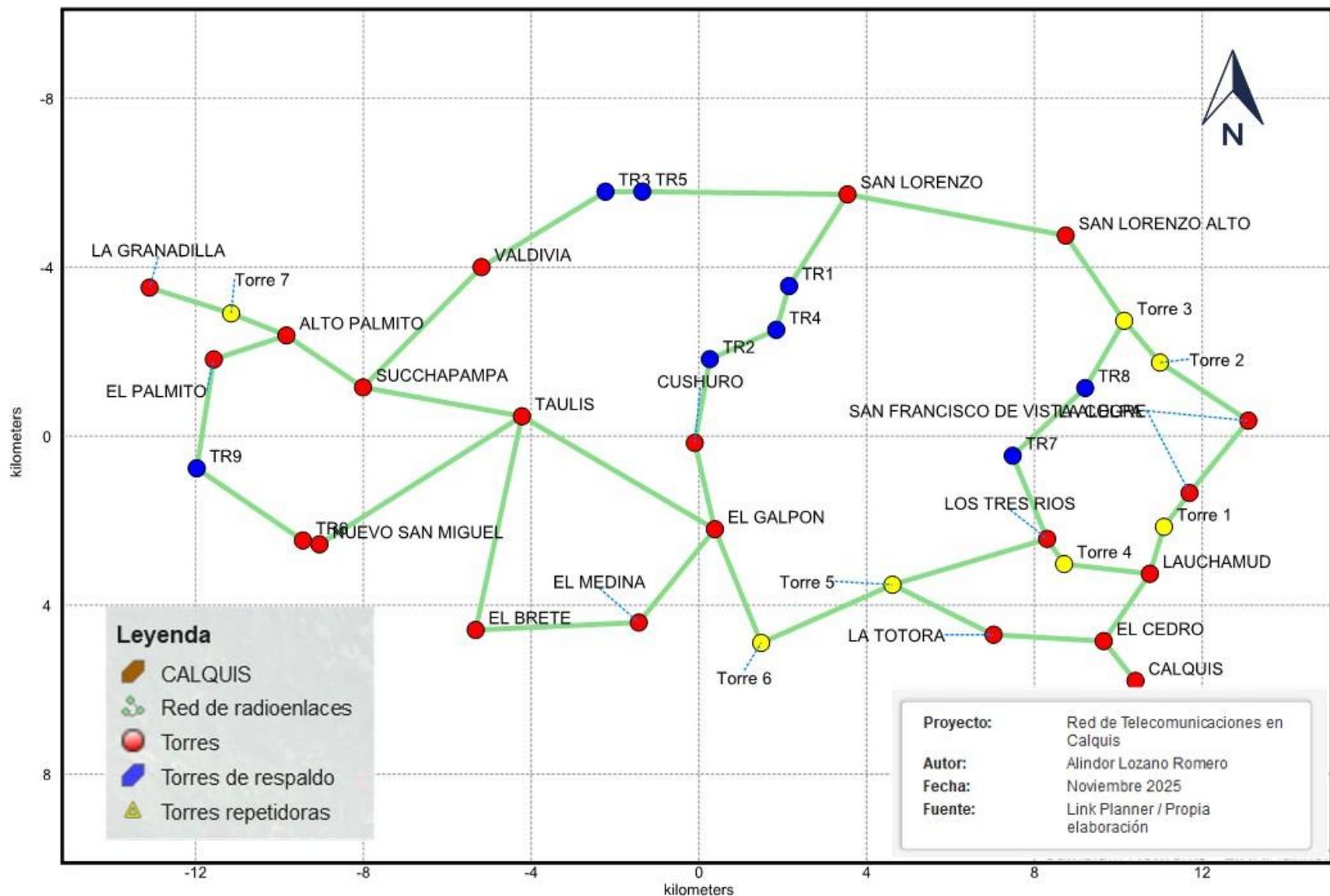


Fig. 19 Diseño final de la red de telecomunicaciones para el distrito de Calquis

3.1.4. Etapa 4: Simulación y evaluación técnica del desempeño

3.1.4.1. Configuración de los radioenlaces PTP

Cada radioenlace está configurado de acuerdo con las necesidades específicas de cada centro poblado, considerando factores como la cantidad de usuarios, la demanda de ancho de banda, la topografía del terreno y las condiciones ambientales. Para ello, se utilizará la herramienta LinkPlanner, que permitirá optimizar los parámetros técnicos de cada enlace.

Entre los aspectos clave de la configuración se encuentra la selección de antenas, cuyo tipo y tamaño dependerán de la distancia del enlace y de las condiciones de propagación de la señal. Asimismo, se definirá el ancho de banda del enlace, asegurando que la capacidad de transmisión sea suficiente para satisfacer la demanda del centro poblado. La selección del canal de transmisión será otro factor fundamental, permitiendo minimizar interferencias y optimizar el uso del espectro radioeléctrico.

Además, se determinará la altura de las antenas, con el objetivo de garantizar la línea de vista (LOS) y reducir la atenuación por obstáculos naturales. La elección de los equipos de radio se realizará en función de la capacidad de transmisión y la estabilidad del enlace, asegurando un rendimiento óptimo y una comunicación confiable.

En la figura siguiente, se observa los parámetros técnicos del radioenlace, incluyendo la potencia de transmisión, la calidad del enlace y la zona de Fresnel.

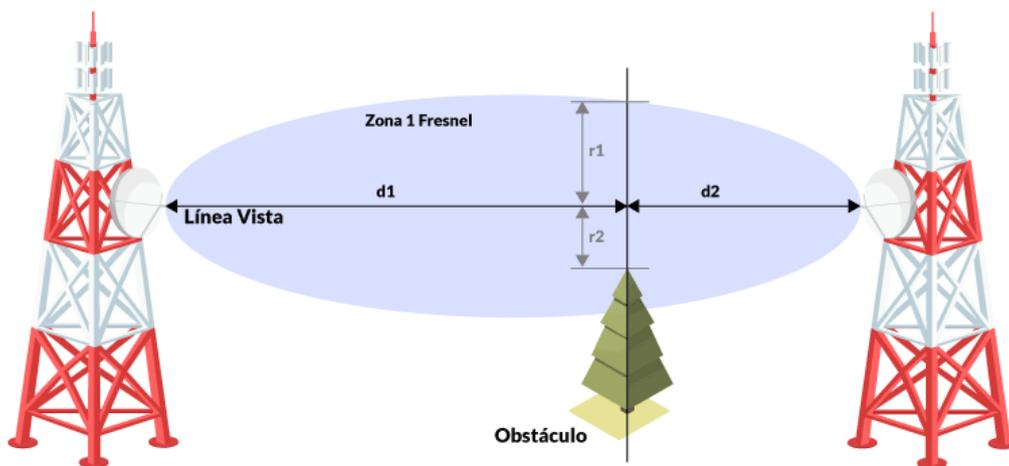


Fig. 20 Ilustración de un radioenlace

Fuente: Ingenieritica

3.1.4.2. Simulación de la red backhaul

En la simulación de los radioenlaces definidos en la red de transporte, nos aseguramos que cada uno cumpla con los requisitos de capacidad, disponibilidad y calidad de servicio. Para ello, se configurarán y evaluarán parámetros clave como potencia de transmisión, ganancia de antenas, altura de torres, atenuación por distancia y pérdidas atmosféricas, garantizando un rendimiento óptimo. Además, cada enlace será verificado para cumplir con los criterios de línea de vista (LOS), despeje de la zona de Fresnel y niveles de señal adecuados. La red opera en la banda de 6 GHz (ISM), utilizando un ancho de canal de 160 MHz dentro del segmento upper 6 GHz (6.425 GHz - 7.125 GHz), lo que permitirá una transmisión de datos estable y eficiente.

Además, este estudio se ha adoptado una distribución asimétrica del ancho de banda en una proporción de 75:25, ya que se prioriza la capacidad de descarga para satisfacer la mayor demanda de tráfico en esa dirección. Esta estrategia responde al comportamiento típico del tráfico en Internet, donde el consumo de datos en descarga es significativamente superior al de subida. Al garantizar una mayor capacidad en el downlink, se optimiza el rendimiento de la red sin afectar la eficiencia en la transmisión de datos.

3.1.4.3. Selección de enlaces relevantes para la evaluación de desempeño.

Durante el proceso de diseño y evaluación de los radioenlaces para la red propuesta para distrito de Calquis, se identificaron diversas condiciones técnicas que influyen directamente en la viabilidad y desempeño de la red. Estas condiciones están relacionadas principalmente con la capacidad de transmisión requerida, las distancias entre torres, la topografía del terreno y la altura de la infraestructura para mantener una conectividad estable y eficiente. A continuación, se detallan algunos de los desafíos más relevantes encontrados durante el análisis de campo y simulaciones realizadas.

Algunos radioenlaces evaluados presentan desafíos importantes, como la necesidad de soportar capacidades de transmisión superiores a 2 Gbps. Este nivel de demanda requiere equipos con tecnologías avanzadas como MU-MIMO y antenas de alta ganancia, para asegurar una conexión estable y con buen rendimiento incluso en condiciones exigentes.

Tabla XII Radioenlaces con más demanda de ancho de banda

| Enlace | Distancia (km) | Throughput (Mbps) |
|----------------------|----------------|-------------------|
| Calquis a El Cedro | 1.208 | 12140 |
| El Cedro a Lauchamud | 1.937 | 10400 |
| Lauchamud a Torre 4 | 2.057 | 6490 |
| El Galpon a Taulis | 5.318 | 3740 |

Además, se identificaron enlaces con distancias de hasta 4 kilómetros entre nodos. Aunque esta distancia no es excesiva, en zonas rurales con terreno irregular y posibles obstrucciones naturales, se convierte en un reto técnico. Para garantizar la visibilidad directa (LoS), se requiere una cuidadosa planificación de la elevación y alineación de las antenas.

Tabla XIII Radioenlaces con distancia mayor a 4 km.

| Enlace | Distancia (km) |
|--------------------------------|----------------|
| Taulis a Nuevo San Miguel | 5.697 |
| El Galpon a Taulis | 5.318 |
| San Lorenzo Alto a San Lorenzo | 5.289 |
| Alto Palmito a El Palmito | 5.175 |
| Succhapampa a Valdivia | 4.009 |

También se ha considerado la necesidad de instalar torres de hasta 30 metros de altura para mantener línea de vista despejada en ciertos tramos críticos. Estas estructuras no solo implican costos adicionales, sino también un trabajo estructural y logístico importante que debe contemplarse en el diseño final del sistema.

Tabla XIV Radioenlaces con torres de altura mayor a 30 metros.

| Enlace | Distancia (km) | Altura izquierda (m) | Altura derecha (m) |
|----------------------------|----------------|----------------------|--------------------|
| Lauchamud a Torre 4 | 2.057 | 40 | 40 |
| Succhapampa a Alto Palmito | 2.199 | 40 | 40 |
| Lauchamud a Torre 1 | 1.16 | 40 | 30 |
| Calquis a El Cedro | 1.208 | 30 | 40 |

A continuación, se presenta los perfiles de los radioenlaces antes mencionados:

3.1.4.4. Radioenlace Calquis a El Cedro

Los sitios de comunicación del radioenlace establecido entre Calquis a El Cedro se encuentran a altitudes de 2931 msnm y 3180 msnm, respectivamente; con una distancia entre estaciones de 1.208 kilómetros, la línea de vista está completamente despejada con 14.5 metros en la primera zona de Fresnel para evitar cualquier tipo de interferencias en la transmisión de la señal. Calquis cuenta con una estructura de 30 metros de altura mientras que en El Cedro hay una estructura de 40 metros, en el caso de Calquis la antena ha sido configurada con un grado de inclinación de 11.7° hacia arriba y está orientada a 321.12° en relación al norte. Por su parte, en El Cedro la antena presenta una inclinación descendente de -11.7° y esta alineada en dirección 141.12° al norte.

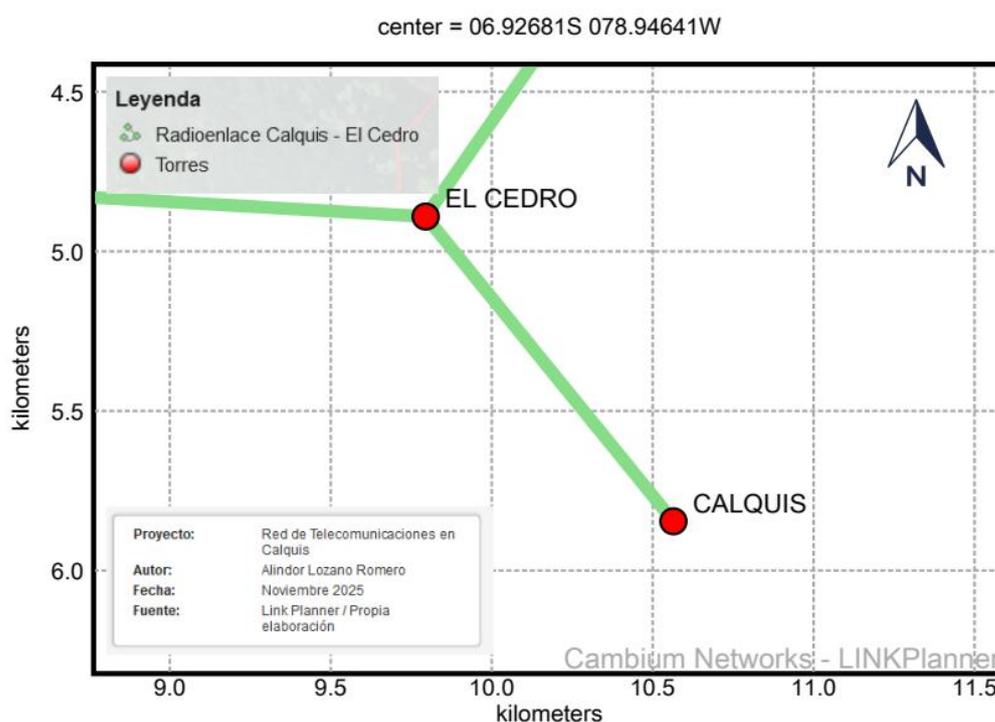


Fig. 21 Radioenlace Calquis a El Cedro

El enlace cuenta con línea de vista directa. La instalación emplea antenas Radio Waves 3ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6 con una ganancia de 33.8 dBi cada una. Se ha identificado una superficie reflectante a 0.1 km de Calquis a una altitud de 2901 msnm, por lo que se recomienda instalar las antenas a alturas entre 0.05 m y 0.45 m sobre las zonas identificadas para mitigar efectos de reflexión.

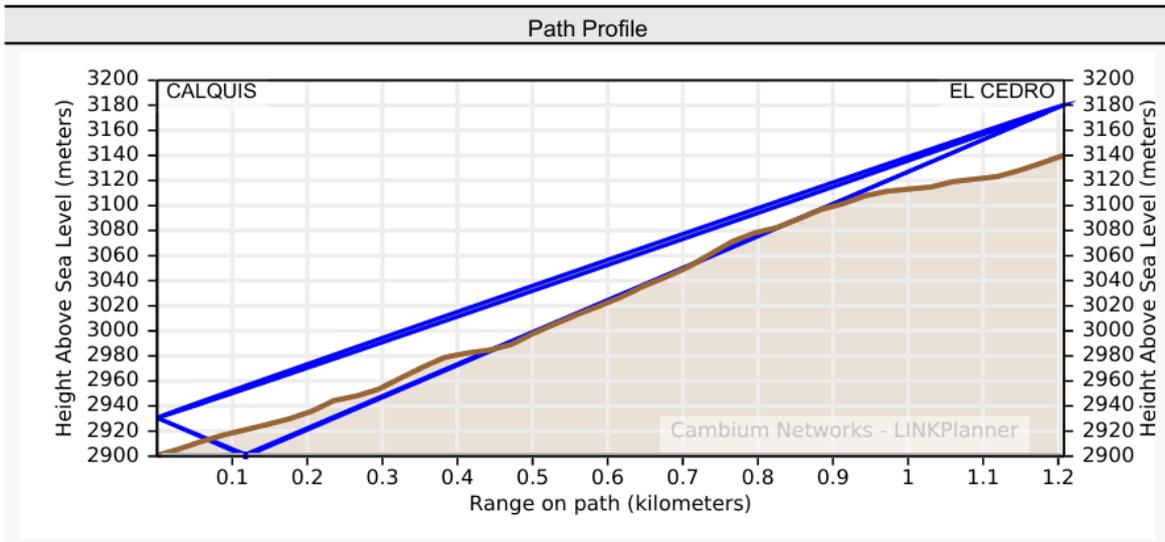


Fig. 22 Perfil del radioenlace Calquis a El Cedro

Características técnicas del radioenlace

Tabla XV Características técnicas del radioenlace Calquis – El Cedro

| Elemento | Valor |
|--------------------------|------------------------------|
| Tipo de Antena | SPD3-6 Parabólica Dual-Polar |
| Ganancia de Antena | 33.8 dBi |
| Pérdida de espacio libre | 110.70 dB |
| Despeje de zona Fresnel | 14.5 m |
| Superficie reflectante | 0.1 km desde Calquis |

Cálculo de la Relación Señal-Ruido (SNR)

Para evaluar la calidad del enlace entre Calquis y El Cedro, se calcula la Relación Señal-Ruido (SNR), indicador esencial para determinar la eficiencia y confiabilidad del enlace.

Datos técnicos del enlace:

- Potencia de transmisión (Ptx): 15.0 dBm
- Ganancia de antenas: 33.8 dBi (Tx) + 33.8 dBi (Rx) = 67.6 dB
- FSPL = 110.7 dB
- Pérdidas adicionales estimadas: 2 dB (condiciones atmosféricas)

Fórmula de potencia recibida:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - FSPL - \text{Pérdidas adicionales}$$

$$P_{Rx} = 15.0 + 33.8 + 33.8 - 110.7 - 2$$

$$P_{Rx} = -30.1 \text{ dBm}$$

Nivel de ruido estimado: $P_{ruido} = -90 \text{ dBm}$

Cálculo de SNR:

$$SNR = P_{Rx} - P_{ruido}$$

$$SNR = -30.1 - (-90)$$

$$SNR = 59.9 \text{ dB}$$

Este valor de SNR es excelente, permitiendo modulaciones de alta eficiencia como MCS13. A continuación, se compara con los valores mínimos requeridos por cada modulación.

Tabla XVI Comparación de SNR Calquis - El Cedro

| Modo MCS | Sensibilidad (dBm) | Potencia Recibida (dBm) | SNR (dB) |
|-----------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| MCS 1 | -87 | -30.1 | 59.9 |
| MCS 7 | -64 | -30.1 | 59.9 |
| MCS 9 | -58 | -30.1 | 59.9 |
| MCS 11 | -54 | -30.1 | 59.9 |
| MCS 13 | -53 | -30.1 | 59.9 |

Este análisis confirma que el enlace Calquis – El Cedro puede sostener los niveles más altos de modulación disponibles con una excelente reserva de margen.

El siguiente gráfico muestra cómo la sensibilidad mejora (se hace menos negativa) al aumentar el modo MCS.

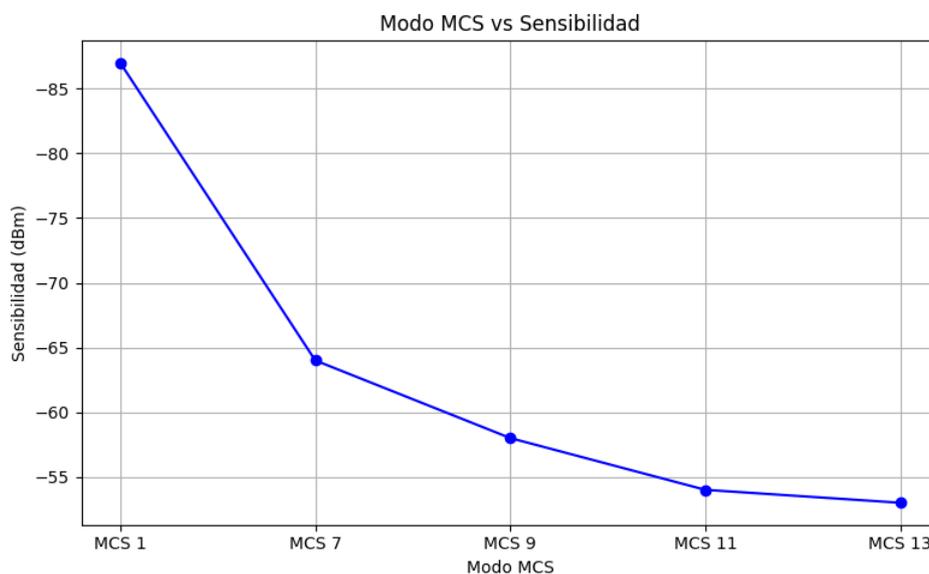


Fig. 23 Modo MSC vs sensibilidad Calquis – El Cedro

Parámetros de Transmisión y Modulación

El enlace opera en la banda alta de 6 GHz (6425 - 7125 MHz) con un ancho de canal de 160 MHz y una relación de división de tráfico 75% bajada / 25% subida. Se emplea la modulación 4096-QAM 0.83 Dual, que permite alcanzar los máximos valores de rendimiento.

Tabla XVII Parámetros de transmisión Calquis - El Cedro

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|--------------------|
| Banda de Frecuencia | 6425 - 7125 MHz |
| Ancho de Canal | 160 MHz |
| Modulación | 4096-QAM 0.83 Dual |
| Potencia de Transmisión | 15.0 dBm |
| Sensibilidad Recepción | -30 dBm |

A continuación, se presenta una tabla donde muestra Comparativa de Modos MCS: Modulación, Throughput, margen de desvanecimiento y disponibilidad del enlace:

Tabla XVIII Desempeño del enlace según modulación Calquis – El Cedro

| Modo | Modulación | Throughput Agregado (Mbps) | Margen Desvanecimiento (dB) | Disponibilidad (%) |
|-------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| MCS13 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2703.26 | 12.19 | 99.9995 |
| MCS12 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2431.23 | 15.89 | 99.9995 |
| MCS11 | 1024-QAM 0.83 Dual | 2244.21 | 19.19 | 99.9995 |
| MCS7 | 64-QAM 0.83 Dual | 1343.13 | 30.19 | 99.9995 |
| MCS1 | QPSK 0.5 Dual | 255.02 | 46.19 | 99.9995 |

En la siguiente figura que compara el Throughput Agregado (Mbps) y el Margen de Desvanecimiento (dB) para cada modo MCS. Se puede ver cómo a medida que aumenta el rendimiento (throughput), el margen de desvanecimiento disminuye, lo cual es típico en enlaces más exigentes en calidad de señal.

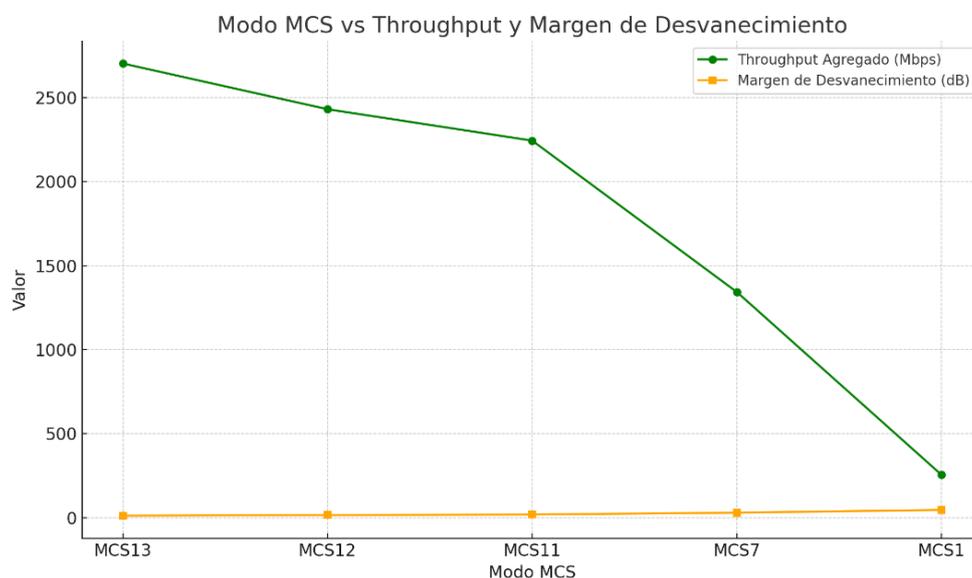


Fig. 24 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Calquis – El Cedro

En el gráfico se evidencia la relación inversa entre el throughput agregado y el margen de desvanecimiento. A medida que se incrementa la eficiencia espectral

utilizando modulaciones más altas (por ejemplo, 4096-QAM en MCS13 y MCS12), se obtiene un mayor rendimiento en Mbps, pero con una reducción en el margen de desvanecimiento, lo que implica menor tolerancia a condiciones adversas del canal.

En cambio, modos con modulaciones más robustas como MCS1 (QPSK) muestran márgenes de desvanecimiento significativamente más altos (46.19 dB), lo que indica una alta resistencia a la atenuación, pero sacrificando considerablemente la capacidad de transmisión (solo 255.02 Mbps).

MCS12 se presenta como un punto de equilibrio óptimo: mantiene un throughput elevado (2431.23 Mbps) con un margen de desvanecimiento moderado (15.89 dB), lo que lo convierte en una opción viable para escenarios donde se requiere buena capacidad de transmisión sin comprometer en exceso la robustez del enlace.

Throughput y Disponibilidad

La demanda total proyectada en El Cedro es de 12140 Mbps, considerando todos los centros poblados del distrito. Para atender esta demanda, se implementa una estrategia de multiplicación de enlaces, utilizando cinco enlaces paralelos configurados cada uno con un throughput de 2431.23 Mbps y un margen de desvanecimiento de 15.89 dB, lo que permite superar el requerimiento total.

Tabla XIX Throughput y disponibilidad del enlace Calquis - El Cedro

| Enlaces en Paralelo | Throughput por enlace (Mbps) | Disponibilidad (%) | Throughput Total (Mbps) | Margen de Desvanecimiento (dB) |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| 5 | 2431.23 | 99.9995 | 12156.15 | 15.89 |

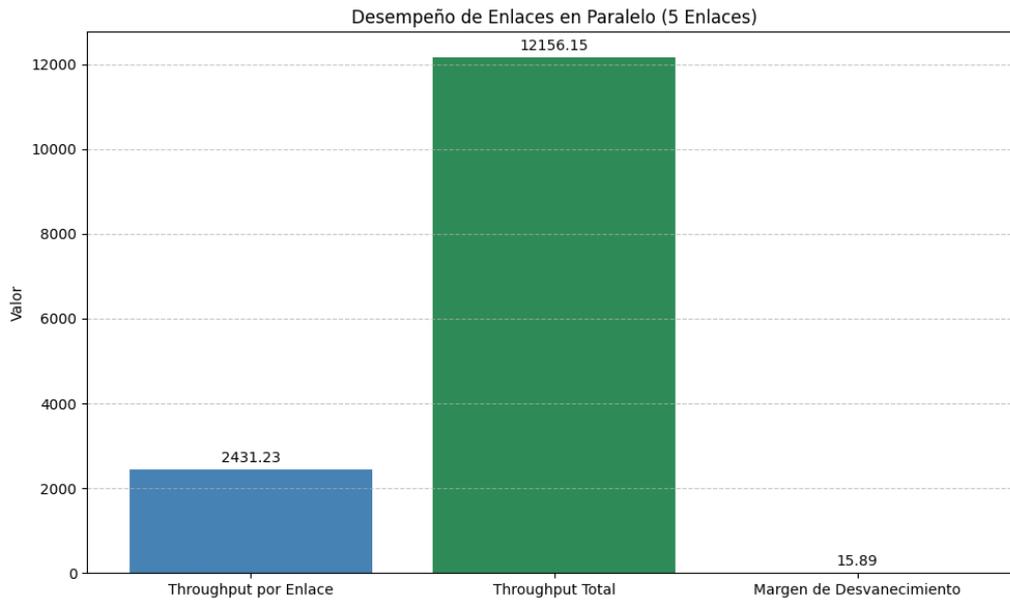


Fig. 25 Desempeño del enlace Calquis - El Cedro

El radioenlace Calquis - El Cedro demuestra un diseño técnico eficiente con alta disponibilidad, redundancia escalable y capacidad suficiente para soportar la demanda local. La aplicación de modos de modulación avanzados y una estrategia de paralelismo permiten cumplir con las exigencias del proyecto. Además, la excelente relación señal-ruido evidencia un entorno radioeléctrico favorable para enlaces de alta capacidad.

3.1.4.5. Radioenlace El Cedro a Lauchamud

Los puntos del radioenlace establecido entre El Cedro a Lauchamud se ubican a altitudes de 3160 msnm y 3020 msnm, respectivamente; con una separación entre estaciones de 1.937 kilómetros, por lo que se requiere un despeje mínimo de 9.2 metros en la primera zona de Fresnel para evitar cualquier tipo de interferencias en la transmisión de la señal. El Cedro cuenta con una estructura de 20 metros de altura mientras que en Lauchamud hay una estructura de 25 metros, en el caso de El Cedro la antena ha sido configurada con un grado de inclinación de -4.2° hacia abajo y está orientada a 34.63° en relación al norte. Por su parte, en Lauchamud la antena presenta una inclinación ascendente de 4.1° y esta alineada en dirección 214.63° al norte.

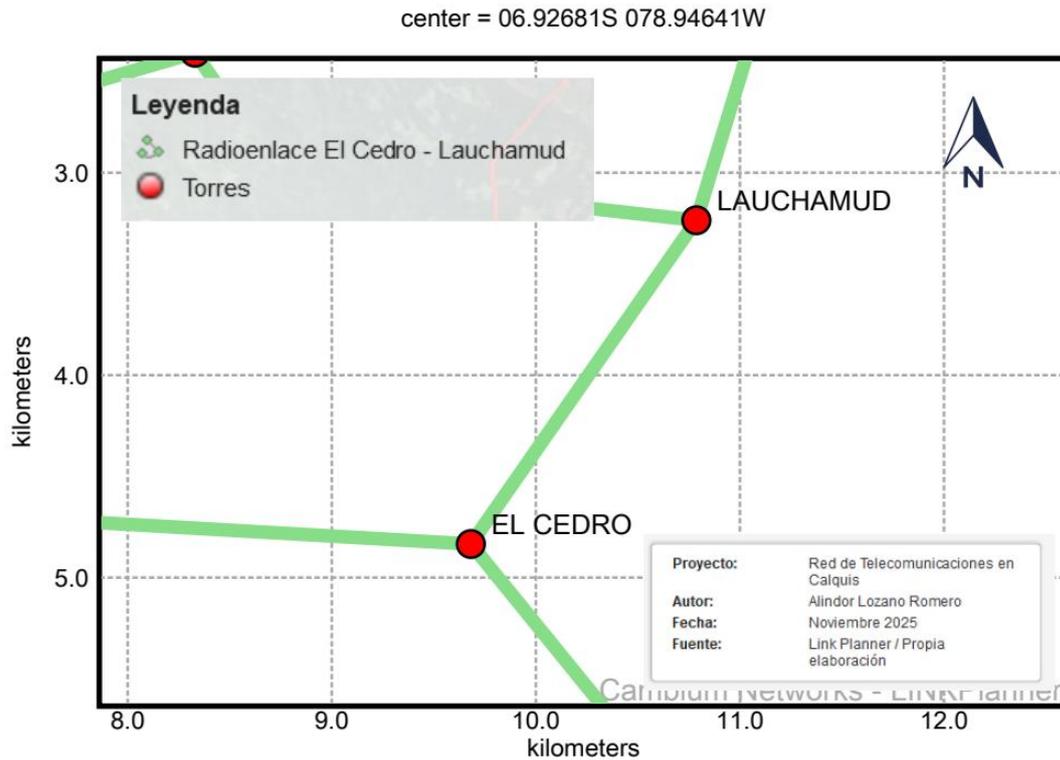


Fig. 26 Radioenlace El Cedro a Lauchamud

El enlace se establece mediante antenas Radio Waves 3ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6, cada una con una ganancia de 33.8 dBi. Se detectó una superficie reflectante a 1.25 km de El Cedro, a una altitud de 2846 msnm. Para evitar interferencias se recomienda posicionar las antenas a 0.12 m y 0.07 m respecto a los puntos identificados.

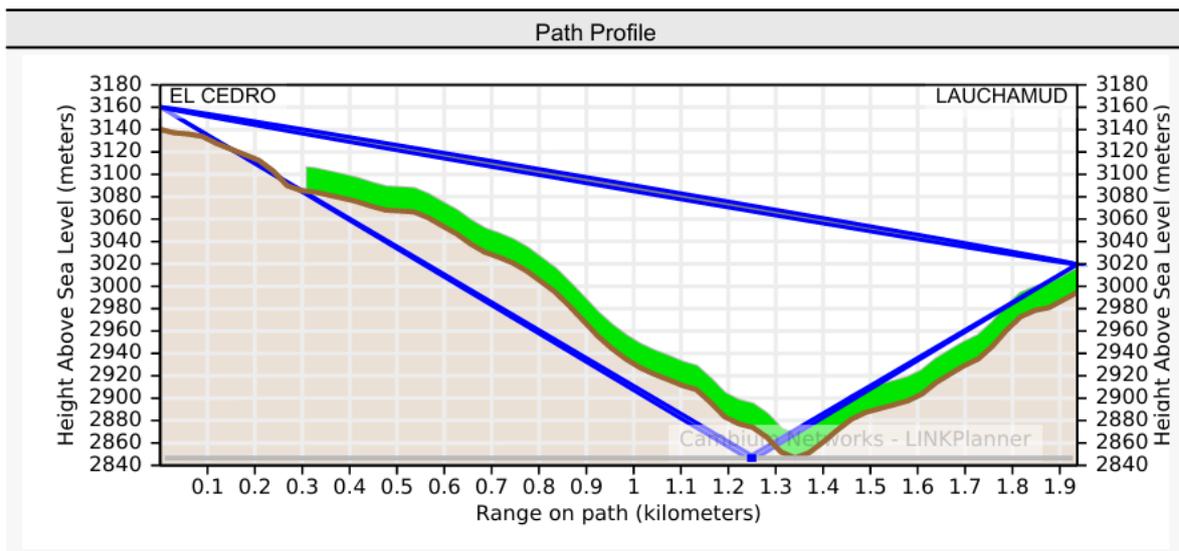


Fig. 27 Perfil del radioenlace El Cedro a Lauchamud

Características técnicas del radioenlace

Tabla XX Características técnicas del radioenlace El Cedro - Lauchamud

| Elemento | Valor |
|--------------------------|-----------------------------|
| Tipo de Antena | SPD3-6 Dual-Polar Parabolic |
| Ganancia de Antena | 33.8 dBi |
| Pérdida de espacio libre | 114.81 dB |
| Despeje de zona Fresnel | 9.2 m |
| Superficie reflectante | 1.25 km desde El Cedro |

Cálculo de la Relación Señal-Ruido (SNR)

Para evaluar la calidad del enlace entre El Cedro a Lauchamud, se calcula la Relación Señal-Ruido (SNR), indicador esencial para determinar la eficiencia y confiabilidad del enlace.

Datos técnicos del enlace:

- Potencia de transmisión (P_{Tx}): 19.0 dBm
- Ganancia de antenas: 33.8 dBi (Tx) + 33.8 dBi (Rx) = 67.6 dB
- FSPL = 114.81 dB
- Pérdidas adicionales estimadas: 2 dB (condiciones atmosféricas)

Fórmula de potencia recibida:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - FSPL - \text{Pérdidas adicionales}$$

$$P_{Rx} = 19.0 + 33.8 + 33.8 - 114.81 - 2$$

$$P_{Rx} = -30.21 \text{ dBm}$$

Nivel de ruido estimado: $P_{ruido} = -90 \text{ dBm}$

Cálculo de SNR:

$$SNR = P_{Rx} - P_{ruido}$$

$$SNR = -30.21 - (-90)$$

$$SNR = 59.79 \text{ dB}$$

Este valor de SNR es excelente, permitiendo modulaciones de alta eficiencia como MCS13. A continuación, se compara con los valores mínimos requeridos por cada modulación.

Tabla XXI Comparación de SNR El Cedro - Lauchamud

| Modo MCS | Sensibilidad (dBm) | Potencia Recibida (dBm) | SNR (dB) |
|----------|--------------------|-------------------------|----------|
| MCS 1 | -87 | -30.21 | 59.79 |
| MCS 7 | -64 | -30.21 | 59.79 |
| MCS 9 | -58 | -30.21 | 59.79 |
| MCS 11 | -54 | -30.21 | 59.79 |
| MCS 13 | -53 | -30.21 | 59.79 |

Este análisis confirma que el enlace El Cedro - Lauchamud puede sostener los niveles más altos de modulación disponibles con una excelente reserva de margen.

El siguiente gráfico muestra cómo la sensibilidad mejora (se hace menos negativa) al aumentar el modo MCS.

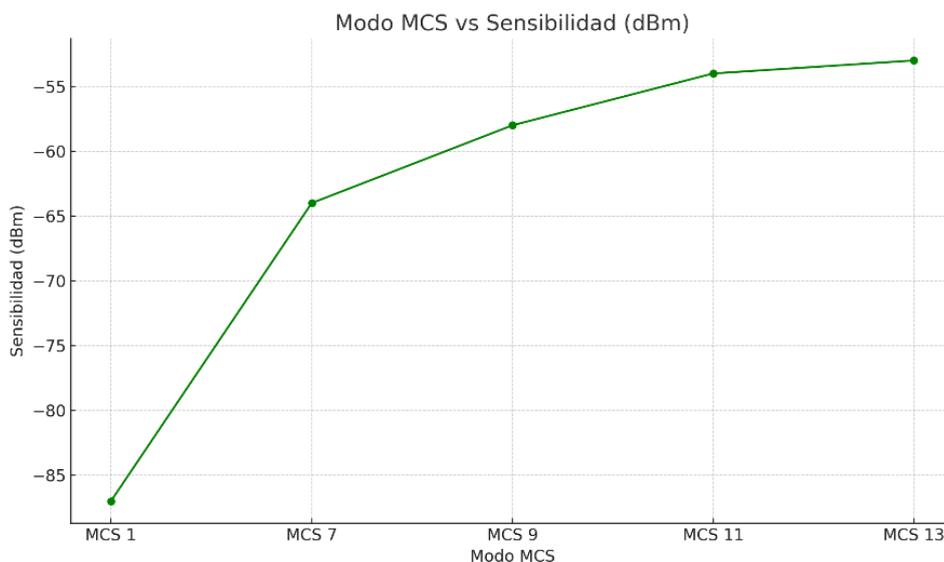


Fig. 28 Modo MSC vs sensibilidad El Cedro - Lauchamud

Parámetros de Transmisión y Modulación

Este enlace opera en la banda alta de 6 GHz (6425 - 7125 MHz) con un ancho de canal de 160 MHz y una relación de división de tráfico 75% bajada / 25% subida. Se emplea la modulación 4096-QAM 0.83 Dual, que permite alcanzar los máximos valores de rendimiento. Este tipo de modulación de alta eficiencia exige condiciones óptimas de SNR y baja tasa de errores. Además, el sistema utiliza una configuración TDD (Time Division Duplex), con marco de 5 ms y modo PTP (Punto a Punto), lo que maximiza la capacidad del canal en ambas direcciones de manera sincronizada.

Tabla XXII Parámetros de transmisión El Cedro - Lauchamud

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|--------------------|
| Banda de Frecuencia | 6425 - 7125 MHz |
| Ancho de Canal | 160 MHz |
| Modulación | 4096-QAM 0.83 Dual |
| Potencia de Transmisión | 19.0 dBm |
| Sensibilidad Recepción | -30 dBm |

A continuación, se presenta una tabla donde muestra Comparativa de Modos MCS: Modulación, Throughput, margen de desvanecimiento y disponibilidad del enlace:

Tabla XXIII Desempeño del enlace según modulación El Cedro - Lauchamud

| Modo | Modulación | Throughput Agregado (Mbps) | Margen Desvanecimiento (dB) | Disponibilidad (%) |
|-------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| MCS13 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2703.25 | 11.08 | 99.9995 |
| MCS12 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2414.22 | 14.78 | 99.9995 |
| MCS11 | 1024-QAM 0.83 Dual | 2227.21 | 19.08 | 99.9995 |
| MCS7 | 64-QAM 0.83 Dual | 1343.13 | 30.08 | 99.9995 |
| MCS1 | QPSK 0.5 Dual | 255.02 | 46.08 | 99.9995 |

En la siguiente figura que compara el Throughput Agregado (Mbps) y el Margen de Desvanecimiento (dB) para cada modo MCS. Se puede ver cómo a medida que aumenta el rendimiento (throughput), el margen de desvanecimiento disminuye, lo cual es típico en enlaces más exigentes en calidad de señal.

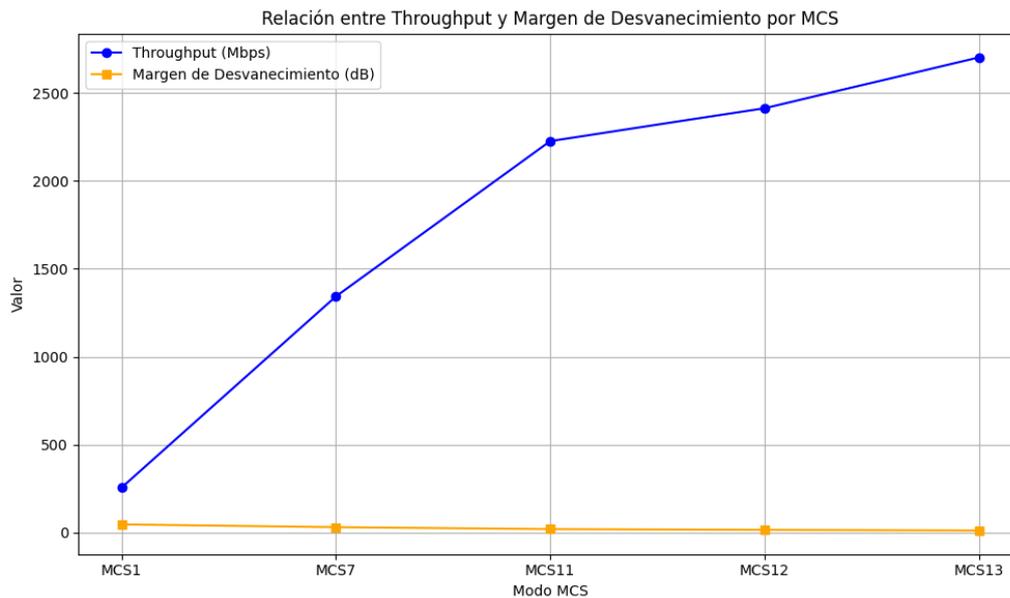


Fig. 29 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento El Cedro - Lauchamud

En el gráfico se evidencia la relación inversa entre el throughput agregado y el margen de desvanecimiento. A medida que se incrementa la eficiencia espectral utilizando modulaciones más altas (por ejemplo, 4096-QAM en MCS13 y MCS12), se obtiene un mayor rendimiento en Mbps, pero con una reducción en el margen de desvanecimiento, lo que implica menor tolerancia a condiciones adversas del canal.

En cambio, modos con modulaciones más robustas como MCS1 (QPSK) muestran márgenes de desvanecimiento significativamente más altos (46.08 dB), lo que indica una alta resistencia a la atenuación, pero sacrificando considerablemente la capacidad de transmisión (solo 255.02 Mbps).

MCS12 se presenta como un punto de equilibrio óptimo: mantiene un throughput elevado (2414.22 Mbps) con un margen de desvanecimiento moderado (14.78 dB), lo que lo convierte en una opción viable para escenarios donde se requiere buena capacidad de transmisión sin comprometer en exceso la robustez del enlace.

Throughput y Disponibilidad

La demanda total proyectada en Lauchamud es de 10,400 Mbps. Para atender esta demanda, se implementa una estrategia de multiplicación de enlaces, utilizando cinco enlaces paralelos configurados cada uno con un throughput de 2227.21 Mbps y un margen de desvanecimiento de 19.08 dB, lo que permite superar el requerimiento total.

Tabla XXIV Throughput y disponibilidad del enlace El Cedro - Lauchamud

| Enlaces en Paralelo | Throughput por enlace (Mbps) | Disponibilidad (%) | Throughput Total (Mbps) | Margen de Desvanecimiento (dB) |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 5 | 2431.23 | 99.9995 | 12156.15 | 15.89 |

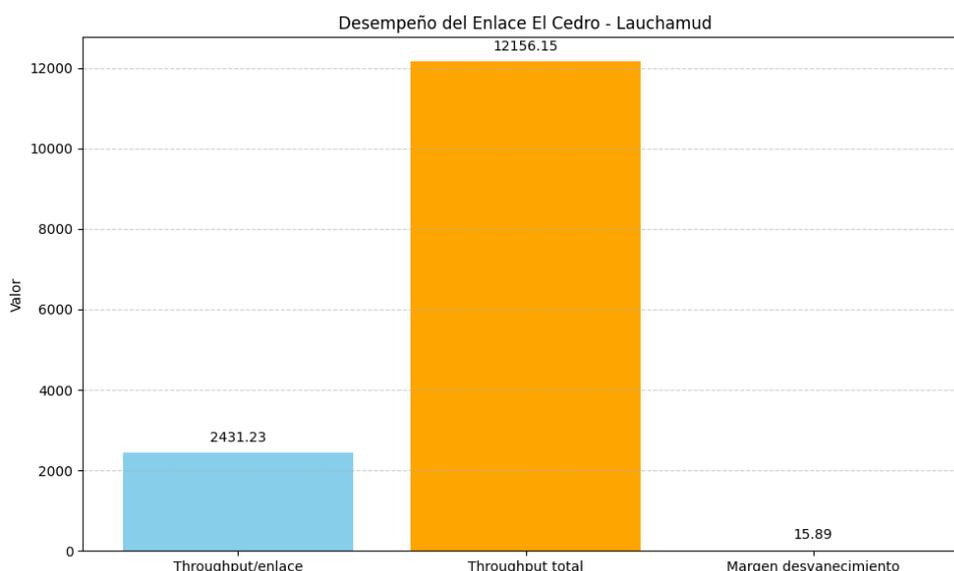


Fig. 30 Desempeño del enlace El Cedro - Lauchamud

El radioenlace El Cedro - Lauchamud presenta una arquitectura sólida y eficiente, caracterizada por su alta disponibilidad y una escalabilidad adaptable mediante enlaces paralelos. Su capacidad total supera los requerimientos de tráfico gracias a la implementación de esquemas de modulación avanzados, permitiendo así una operación estable incluso en condiciones de alta demanda. Asimismo, el excelente margen señal-ruido logrado evidencia condiciones favorables del entorno radioeléctrico, lo que refuerza su fiabilidad como enlace troncal de gran capacidad.

3.1.4.6. Radioenlace Lauchamud a Torre 4

Los puntos del radioenlace establecido entre Lauchamud a Torre 4 se encuentran a altitudes de 3035 msnm y 3085 msnm, respectivamente; con una separación entre estaciones de 2.057 kilómetros, por lo que se requiere un despeje mínimo de 0.2 metros en la primera zona de Fresnel para evitar cualquier tipo de interferencias en la transmisión de la señal. En Lauchamud como en la Torre 4 se cuenta con una infraestructura de 40 metros, en el caso de Lauchamud la antena ha sido configurada con un grado de inclinación de 1.4° hacia arriba y está orientada a 276.42° en relación al norte. Por su parte, en la Torre 4 la antena presenta una inclinación descendente de -1.4° y esta alineada en dirección 96.42° al norte.

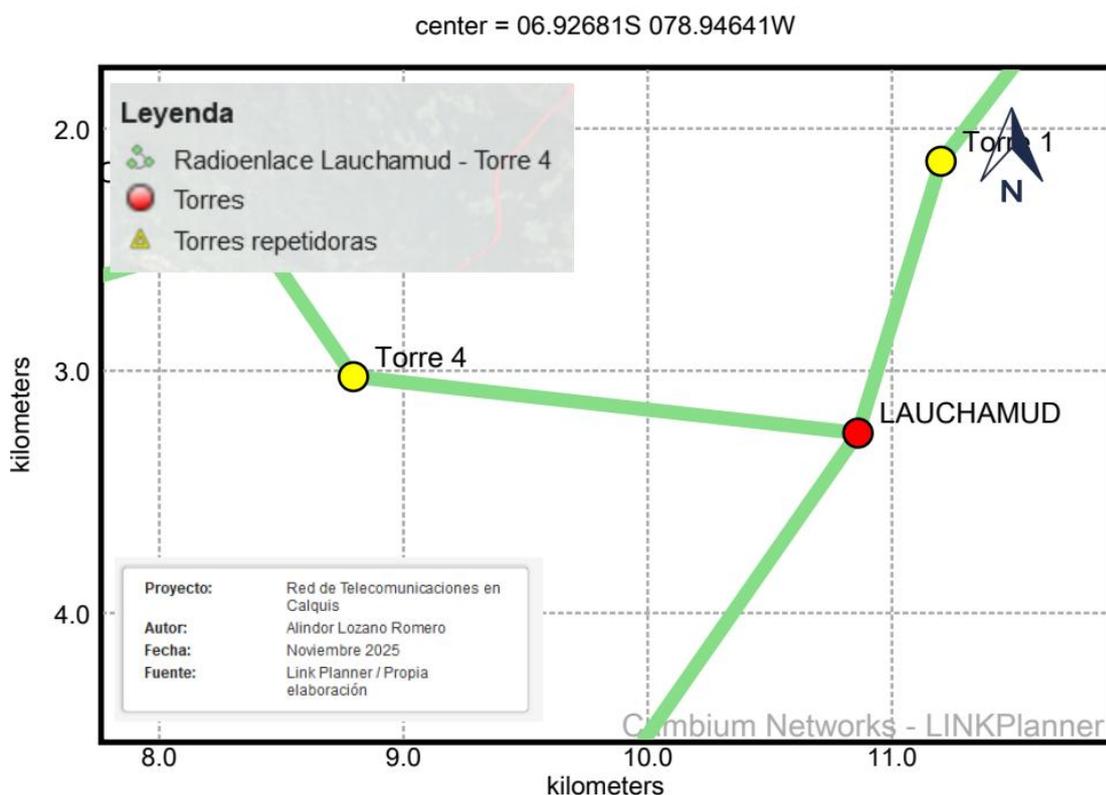


Fig. 31 Radioenlace Lauchamud a Torre 4

El enlace tiene línea de vista clara. Se utilizan antenas Radio Waves 3ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6 con una ganancia de 33.8 dBi. Se identificó una superficie reflectante a 0.75 km de Lauchamud a una altitud de 2967 msnm, por lo que se recomienda instalar las antenas entre 0.19 m y 0.34 m sobre dichos puntos para minimizar los efectos de reflexión.

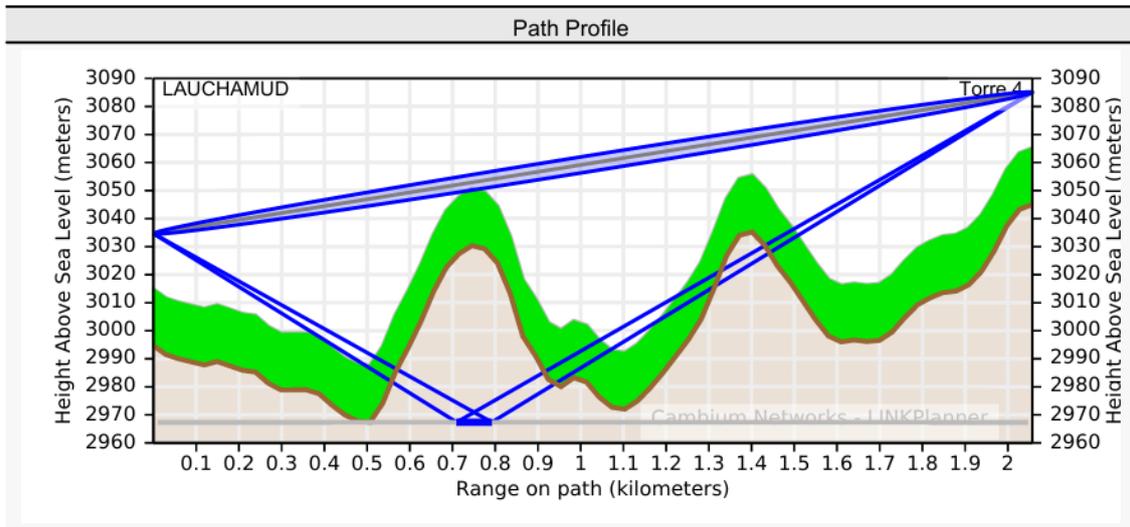


Fig. 32 Perfil del radioenlace Lauchamud a Torre 4

Características técnicas del radioenlace

Tabla XXV Características técnicas del radioenlace Lauchamud - Torre 4

| Elemento | Valor |
|--------------------------|------------------------------|
| Tipo de Antena | SPD3-6 Parabólica Dual-Polar |
| Ganancia de Antena | 33.8 dBi |
| Pérdida de espacio libre | 115.33 dB |
| Despeje zona Fresnel | 0.2 m |
| Superficie reflectante | 0.75 km desde Lauchamud |

Cálculo de la Relación Señal-Ruido (SNR)

Para determinar la calidad del enlace, se realiza el cálculo de la relación señal-ruido (SNR), parámetro fundamental en el análisis de capacidad y confiabilidad del enlace.

Parámetros técnicos:

- Potencia de transmisión (P_{tx}): 19.0 dBm
- Ganancia total del sistema: 33.8 dBi (Tx) + 33.8 dBi (Rx) = 67.6 dB
- Pérdida por espacio libre (FSPL): 115.33 dB
- Pérdidas adicionales: 2 dB (por condiciones atmosféricas)

Fórmula de potencia recibida:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - FSPL - \text{Pérdidas adicionales}$$

$$P_{Rx} = 19.0 + 33.8 + 33.8 - 115.33 - 2$$

$$P_{Rx} = -30.73 \text{ dBm}$$

Nivel de ruido estimado: $P_{ruido} = -90 \text{ dBm}$

Cálculo de SNR:

$$SNR = P_{Rx} - P_{ruido}$$

$$SNR = -30.73 - (-90)$$

$$SNR = 59.27 \text{ dB}$$

Este nivel de SNR es excelente, y permite operar el enlace con modulaciones avanzadas como MCS13, garantizando un rendimiento superior.

Tabla XXVI Comparación de SNR Lauchamud - Torre 4

| Modo MCS | Sensibilidad (dBm) | Potencia Recibida (dBm) | SNR (dB) |
|-----------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| MCS 1 | -87 | -30.73 | 59.27 |
| MCS 7 | -64 | -30.73 | 59.27 |
| MCS 9 | -58 | -30.73 | 59.27 |
| MCS 11 | -54 | -30.73 | 59.27 |
| MCS 13 | -53 | -30.73 | 59.27 |

Este análisis demuestra que el enlace entre Lauchamud – Torre 4 es capaz de mantener los modos de modulación más altos disponibles, contando además con un excelente margen de reserva.

El gráfico a continuación ilustra cómo la sensibilidad mejora (es decir, su valor negativo disminuye) a medida que se incrementa el modo MCS.

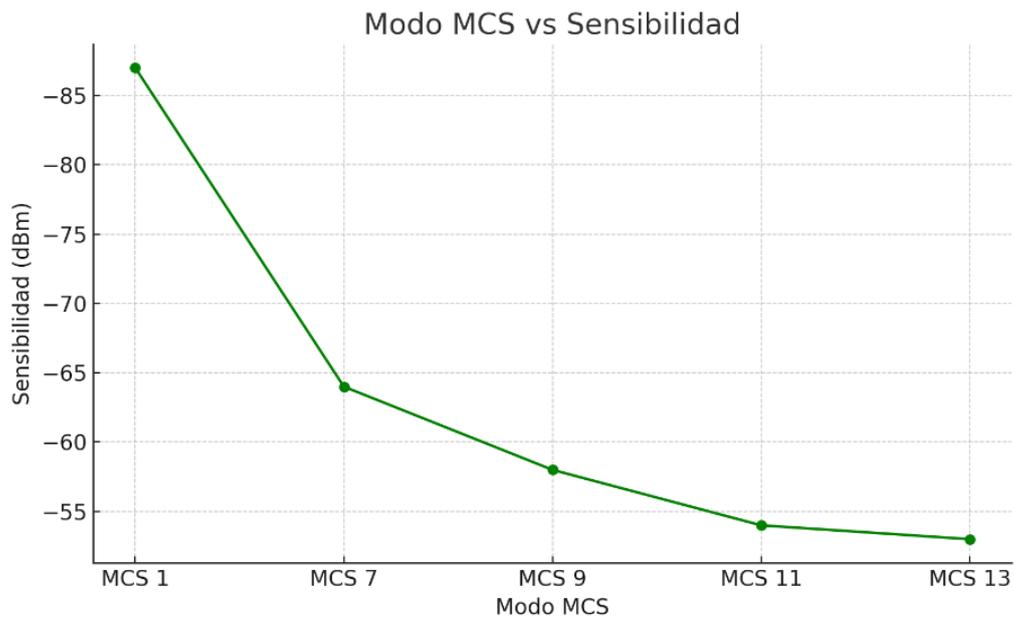


Fig. 33 Modo MSC vs sensibilidad Lauchamud - Torre 4

Parámetros de Transmisión y Modulación

El radioenlace opera en la banda alta de 6 GHz (6425 - 7125 MHz) con un ancho de canal de 160 MHz y configuración de tráfico 70% de bajada y 30% de subida. Utiliza modulación 4096-QAM 0.83 Dual, lo que permite alcanzar un throughput agregado máximo de 2686.24 Mbps.

Tabla XXVII Parámetros de transmisión Lauchamud - Torre 4

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|--------------------|
| Banda de Frecuencia | 6425 - 7125 MHz |
| Ancho de Canal | 160 MHz |
| Modulación | 4096-QAM 0.83 Dual |
| Potencia de Transmisión | 19.0 dBm |
| Sensibilidad Recepción | -31 dBm |

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los modos MCS, en la que se detallan aspectos como la modulación, el throughput, el margen frente al desvanecimiento y la disponibilidad del enlace.

Tabla XXVIII Desempeño del enlace según modulación Lauchamud - Torre 4

| Modo | Modulación | Throughput Agregado (Mbps) | Margen Desvanecimiento (dB) | Disponibilidad (%) |
|-------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| MCS13 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2686.24 | 10.50 | 99.9994 |
| MCS12 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2431.23 | 14.20 | 99.9995 |
| MCS11 | 1024-QAM 0.83 Dual | 2244.21 | 18.50 | 99.9995 |
| MCS7 | 64-QAM 0.83 Dual | 1326.13 | 29.50 | 99.9995 |
| MCS1 | QPSK 0.5 Dual | 255.03 | 45.50 | 99.9995 |

La siguiente figura compara el Throughput Agregado (Mbps) con el Margen de Desvanecimiento (dB) para cada modo MCS. Se observa que, conforme incrementa el rendimiento, el margen de desvanecimiento tiende a reducirse, lo cual es una característica común en enlaces que requieren mayor calidad de señal.

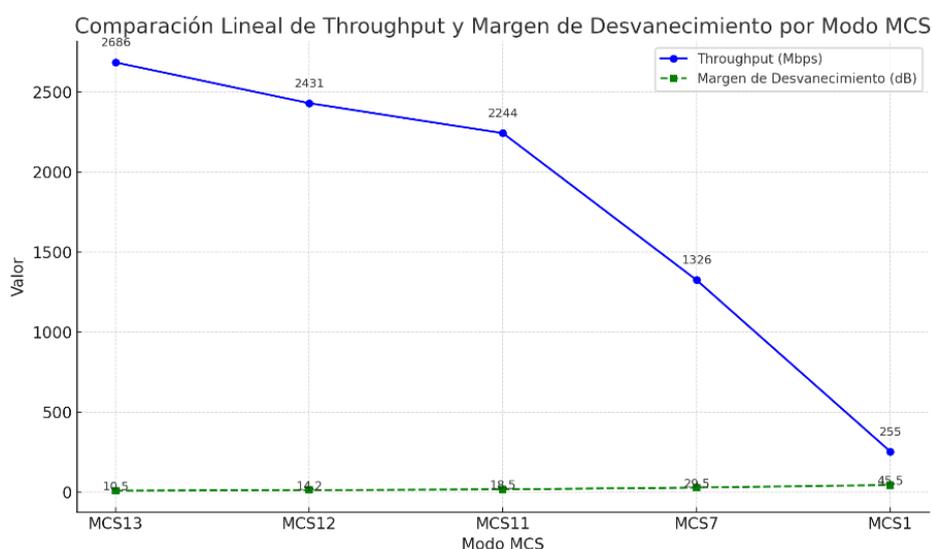


Fig. 34 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Lauchamud - Torre 4

El gráfico correspondiente revela una relación inversa entre throughput y margen de desvanecimiento: a mayor eficiencia espectral, menor tolerancia a condiciones adversas. Por ende, MCS12 representa un balance adecuado entre rendimiento y estabilidad.

Throughput y Disponibilidad

Este radioenlace está diseñado para cubrir una demanda de 6490 Mbps hacia la Torre 4, que concentra el tráfico de los centros poblados del este del distrito. Para cumplir con esta demanda, se aplica la estrategia de duplicación de enlace usando tres líneas paralelas, cada una con un throughput estimado de 2244.21 Mbps y un margen de desvanecimiento de 18.50 dB, alcanzando un rendimiento total superior al requerido.

Tabla XXIX Throughput y disponibilidad del enlace Lauchamud - Torre 4

| Enlaces en Paralelo | Throughput por enlace (Mbps) | Disponibilidad (%) | Throughput Total (Mbps) | Margen de Desvanecimiento (dB) |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 3 | 2244.21 | 99.9995 | 6732.63 | 18.50 |

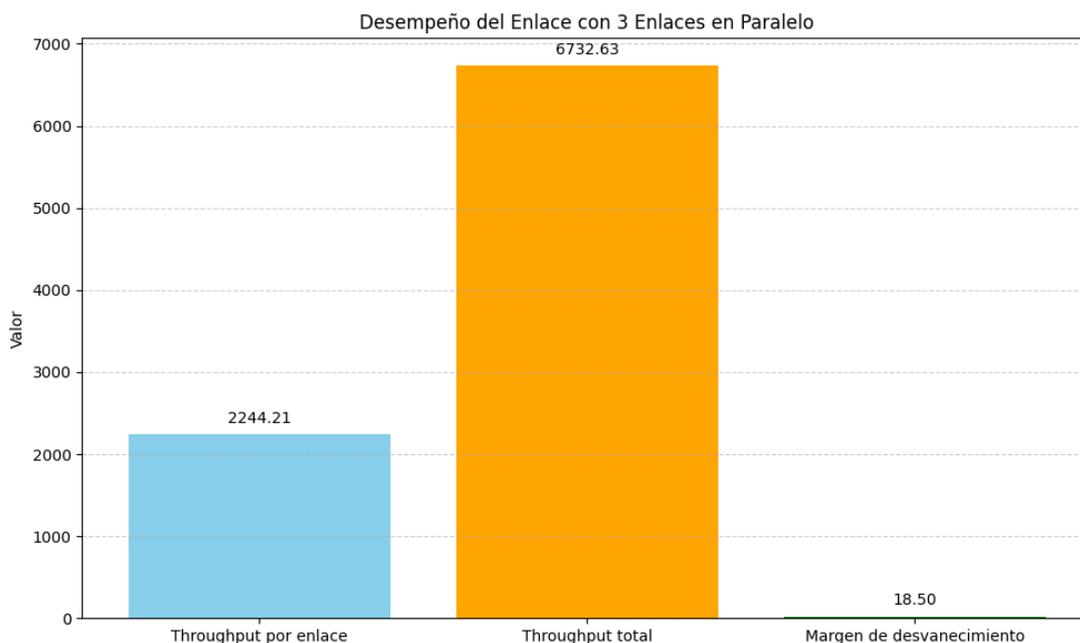


Fig. 35 Desempeño del enlace Lauchamud - Torre 4

Este diseño garantiza un rendimiento robusto y adaptable, superando la demanda proyectada mediante una solución escalable y confiable respaldada por un entorno radioeléctrico favorable.

3.1.4.7. Radioenlace El Galpon a Taulis

El radioenlace establecido entre El Galpon a Taulis se encuentran a altitudes de 3410 msnm y 3096 msnm, respectivamente; con una separación entre estaciones de 5.318 kilómetros, por lo que se requiere un despeje mínimo de 13 metros en la primera zona de Fresnel para evitar cualquier tipo de interferencias en la transmisión de la señal. El Galpon cuenta con una estructura de 40 metros de altura mientras que en Taulis hay una estructura de 26 metros, en el caso de El Galpon la antena ha sido configurada con un grado de inclinación de 3.4° hacia arriba y está orientada a 120.16° en relación al norte. Por su parte, en Taulis la antena presenta una inclinación descendente de 3.4° y esta alineada en dirección 120.16° al norte.

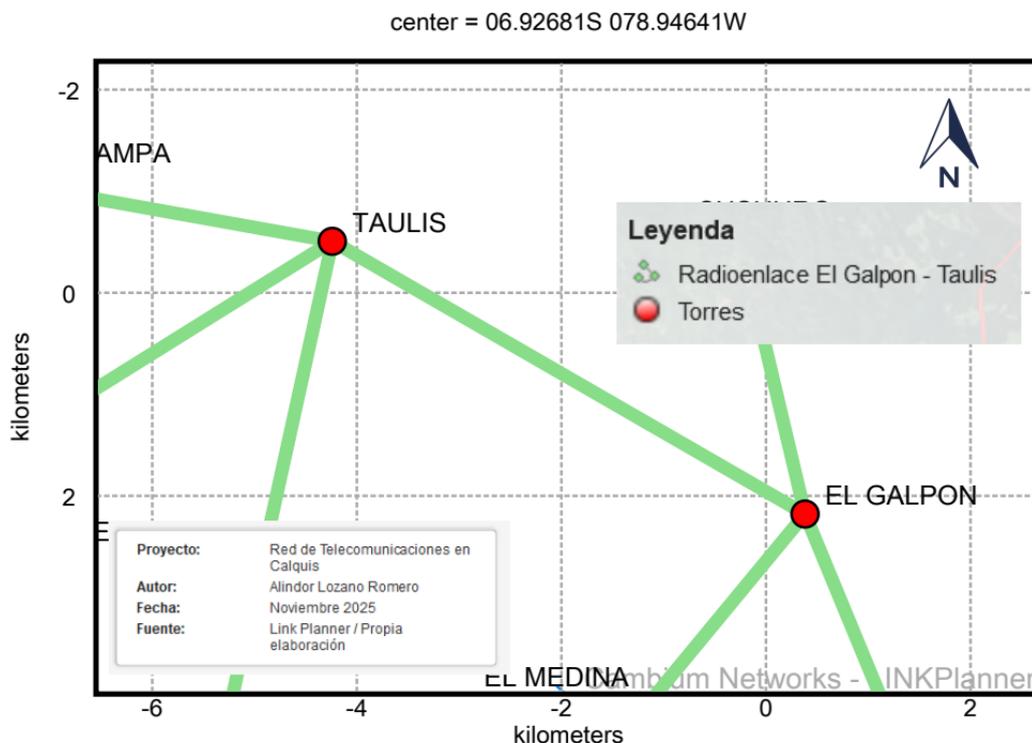


Fig. 36 Radioenlace El Galpon a Taulis

El enlace se instala con antenas Radio Waves 3ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6 de 33.8 dBi de ganancia. Se identificó una superficie reflectante a 3.5 km de El Galpon, a una altitud de 2754 msnm, por lo que se recomienda posicionar las antenas entre 0.17 m y 0.09 m de las zonas de reflexión para garantizar la integridad del enlace.

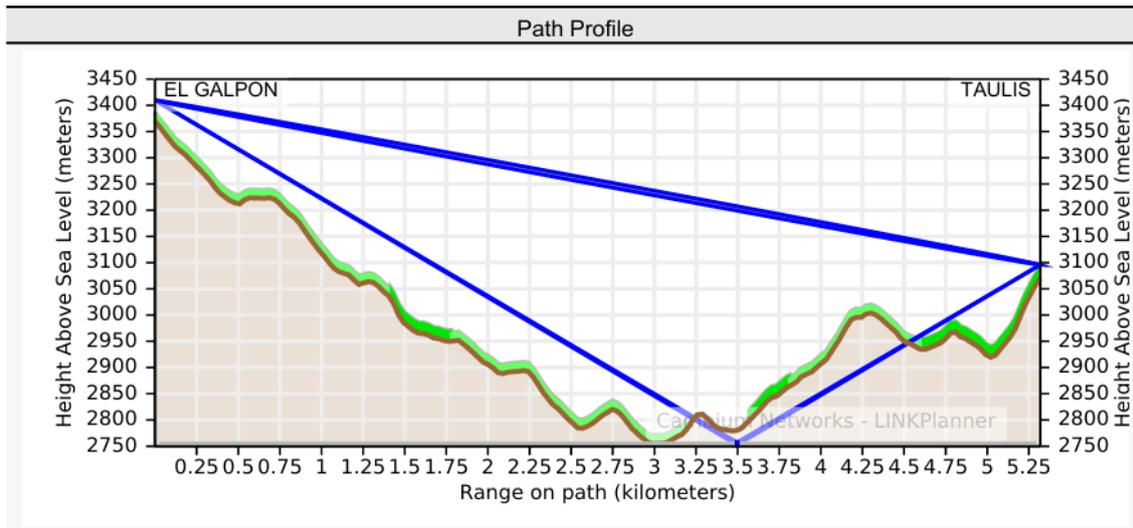


Fig. 37 Perfil del radioenlace El Galpon a Taulis

Características técnicas del radioenlace

Tabla XXX Características técnicas del radioenlace El Galpon - Taulis

| Elemento | Valor |
|--------------------------|------------------------------|
| Tipo de Antena | SPD3-6 Dual-Polar Parabólica |
| Ganancia de Antena | 33.8 dBi |
| Pérdida de espacio libre | 123.58 dB |
| Despeje zona Fresnel | 13.0 m |
| Superficie reflectante | 3.5 km desde El Galpon |

Cálculo de la Relación Señal-Ruido (SNR)

Para determinar la calidad del enlace, se realiza el cálculo de la relación señal-ruido (SNR), parámetro fundamental en el análisis de capacidad y confiabilidad del enlace.

Parámetros técnicos:

- Potencia de transmisión (Ptx): 27.0 dBm
- Ganancia total del sistema: 33.8 dBi (Tx) + 33.8 dBi (Rx) = 67.6 dB
- Pérdida de espacio libre (FSPL): 123.58 dB
- Pérdidas adicionales: 2 dB (por condiciones atmosféricas)

Fórmula de potencia recibida:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - FSPL - \text{Pérdidas adicionales}$$

$$P_{Rx} = 27.0 + 33.8 + 33.8 - 123.58 - 2$$

$$P_{Rx} = -31.0 \text{ dBm}$$

Nivel de ruido estimado: $P_{ruido} = -90 \text{ dBm}$

Cálculo de SNR:

$$SNR = P_{Rx} - P_{ruido}$$

$$SNR = -31.0 - (-90)$$

$$SNR = 59.0 \text{ dB}$$

Este nivel de SNR es excelente, y permite operar el enlace con modulaciones avanzadas como MCS13, garantizando un rendimiento superior.

Tabla XXXI Comparación de SNR El Galpon - Taulis

| Modo MCS | Sensibilidad (dBm) | Potencia Recibida (dBm) | SNR (dB) |
|----------|--------------------|-------------------------|----------|
| MCS 1 | -87 | -31.0 | 59.0 |
| MCS 7 | -64 | -31.0 | 59.0 |
| MCS 9 | -58 | -31.0 | 59.0 |
| MCS 11 | -54 | -31.0 | 59.0 |
| MCS 13 | -53 | -31.0 | 59.0 |

Este análisis confirma que el enlace entre El Galpon a Taulis puede operar con los modos de modulación más elevados disponibles, manteniendo además un amplio margen de reserva.

El siguiente gráfico muestra cómo la sensibilidad mejora (se vuelve menos negativa) a medida que aumenta el modo MCS.

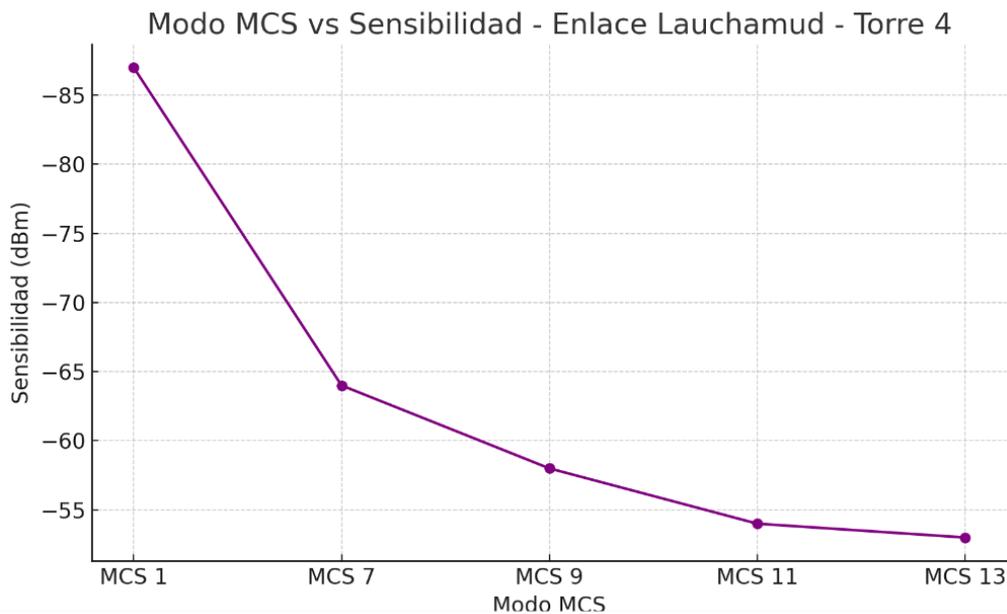


Fig. 38 Modo MSC vs sensibilidad El Galpon - Taulis

Parámetros de Transmisión y Modulación

Este radioenlace opera en la banda alta de 6 GHz (6425 - 7125 MHz), utilizando un ancho de canal de 160 MHz y una asignación de tráfico 75% descarga / 25% subida. Se aplica modulación 4096-QAM 0.83 Dual, que ofrece un throughput total de 2658.71 Mbps.

Tabla XXXII Parámetros de transmisión El Galpon - Taulis

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|--------------------|
| Banda de Frecuencia | 6425 - 7125 MHz |
| Ancho de Canal | 160 MHz |
| Modulación | 4096-QAM 0.83 Dual |
| Potencia de Transmisión | 27.0 dBm |
| Sensibilidad Recepción | -31 dBm |

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los modos MCS, en la que se detallan aspectos como la modulación, el throughput, el margen frente al desvanecimiento y la disponibilidad del enlace.

Tabla XXXIII Desempeño del enlace según modulación El Galpon - Taulis

| Modo | Modulación | Throughput Agregado (Mbps) | Margen Desvanecimiento (dB) | Disponibilidad (%) |
|-------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| MCS13 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2658.71 | 2.29 | 95.8711 |
| MCS12 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2414.22 | 5.99 | 99.9957 |
| MCS11 | 1024-QAM 0.83 Dual | 2227.21 | 12.29 | 99.9995 |
| MCS10 | 1024-QAM 0.75 Dual | 2006.19 | 15.99 | 99.9995 |
| MCS7 | 64-QAM 0.83 Dual | 1326.13 | 26.29 | 99.9995 |

Como se muestra, al aumentar la modulación, se incrementa el rendimiento, pero disminuye el margen de desvanecimiento. MCS10 ofrece un equilibrio adecuado para soportar condiciones adversas sin comprometer significativamente la capacidad.

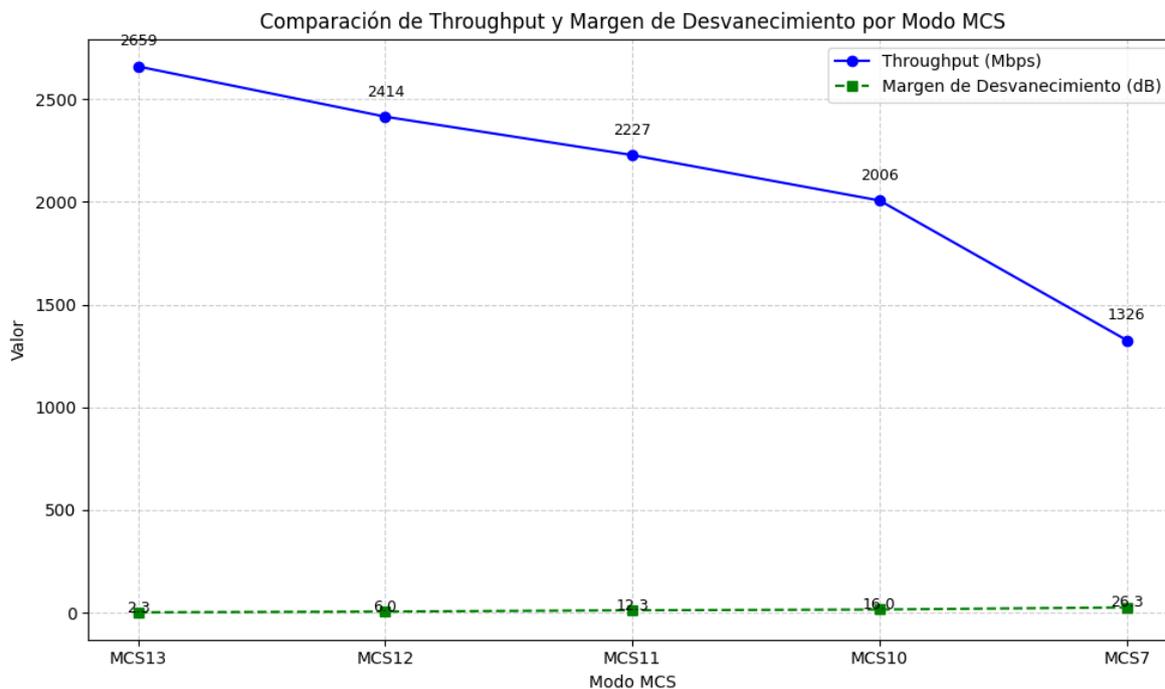


Fig. 39 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento El Galpon - Taulis

Throughput y Disponibilidad

La demanda proyectada en Taulis es de 3740 Mbps. Para cumplir esta exigencia se emplea una duplicación del enlace con dos líneas paralelas, cada una configurada para alcanzar 2006.19 Mbps con un margen de desvanecimiento de 15.99 dB.

Tabla XXXIV Throughput y disponibilidad del enlace El Galpon - Taulis

| Enlaces en Paralelo | Throughput por enlace (Mbps) | Disponibilidad (%) | Throughput Total (Mbps) | Margen de Desvanecimiento (dB) |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 2 | 2006.19 | 99.9995 | 4012.38 | 15.99 |

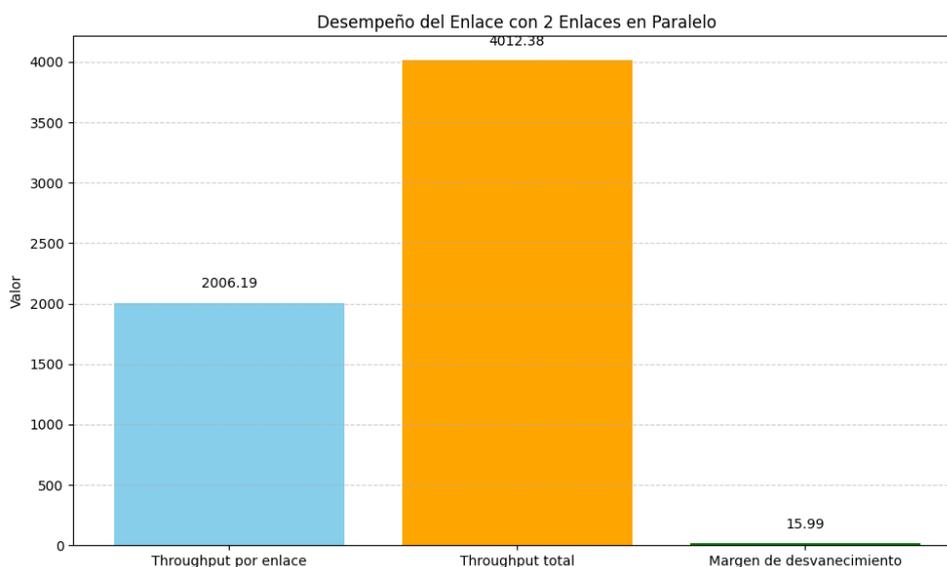


Fig. 40 Desempeño del enlace El Galpon - Taulis

Este enlace demuestra una arquitectura sólida y eficiente, capaz de superar la demanda mediante técnicas avanzadas de modulación y redundancia. Su elevada relación señal-ruido y disponibilidad lo convierten en una solución confiable para enlaces de alta capacidad.

3.1.4.8. Radioenlace Taulis a Nuevo San Miguel

Los puntos del radioenlace establecido entre Taulis a Nuevo San Miguel se encuentran a altitudes de 3096 msnm y 3321 msnm, respectivamente; con una separación entre estaciones de 5.697 kilómetros, por lo que se requiere un despeje mínimo de 6 metros en la primera zona de Fresnel para evitar cualquier

tipo de interferencias en la transmisión de la señal. Taulis cuenta con una estructura de 26 metros de altura mientras que en Nuevo San Miguel hay una estructura de 40 metros, en el caso de Taulis la antena ha sido configurada con un grado de inclinación de 2.2° hacia arriba y está orientada a 237.87° en relación al norte. Por su parte, en Nuevo San Miguel la antena presenta una inclinación descendente de -2.3° y esta alineada en dirección 57.87° al norte.

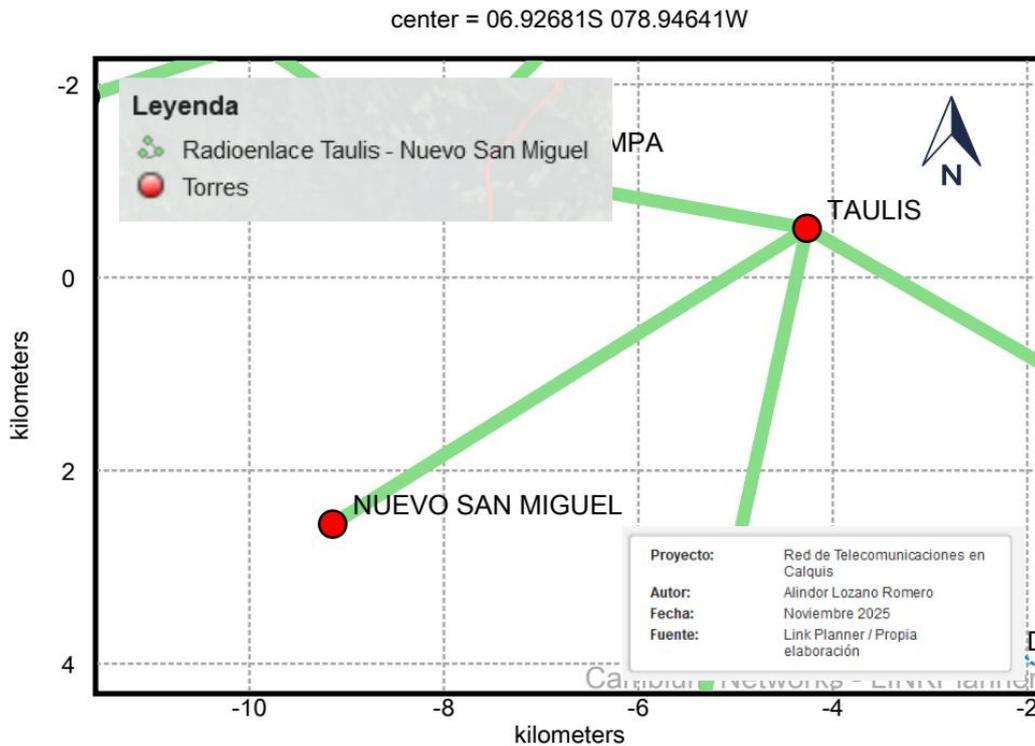


Fig. 41 Radioenlace Taulis a Nuevo San Miguel

Este enlace cuenta con línea de vista directa. Se utilizan antenas Radio Waves 3ft HP Parabolic HPD3-6 con una ganancia de 33.6 dBi. Se identificó una superficie reflectante a 2.3 km desde Taulis, ubicada a una altitud de 2649 msnm. Para evitar los efectos de reflexión, se recomienda ubicar las antenas entre 0.09 m y 0.14 m respecto a dichos puntos.

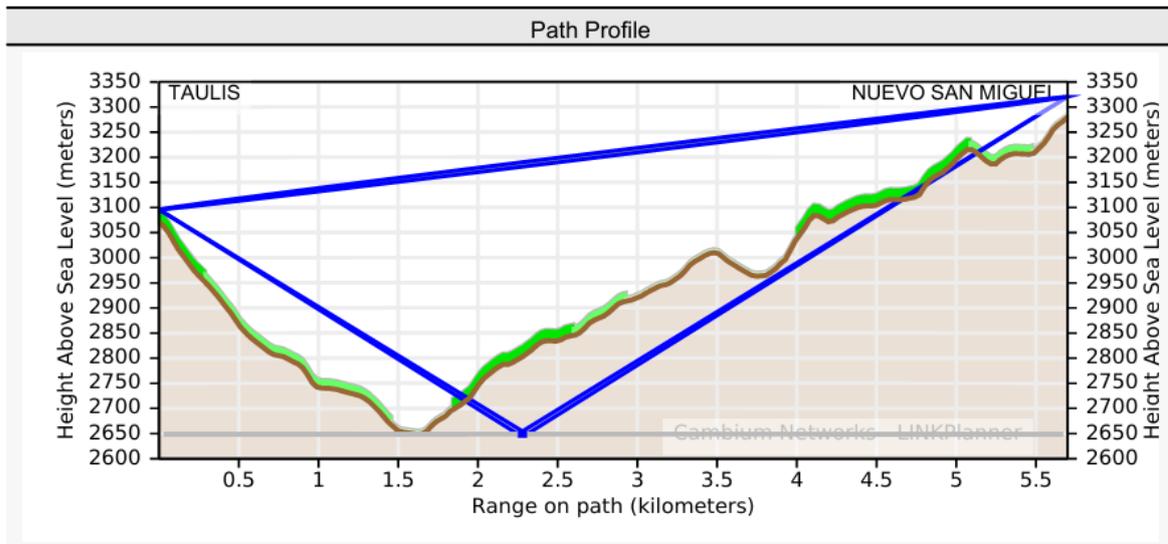


Fig. 42 Perfil del radioenlace Taulis a Nuevo San Miguel

Características técnicas del radioenlace

Tabla XXXV Características técnicas del radioenlace Taulis - Nuevo San Miguel

| Elemento | Valor |
|--------------------------|------------------------------|
| Tipo de Antena | HPD3-6 Parabólica Dual-Polar |
| Ganancia de Antena | 33.6 dBi |
| Pérdida de espacio libre | 124.18 dB |
| Despeje zona Fresnel | 6.0 m |
| Superficie reflectante | 2.3 km desde Taulis |

Cálculo de la Relación Señal-Ruido (SNR)

Para determinar la calidad y eficiencia del enlace, se calcula el valor de la relación señal-ruido (SNR).

Parámetros técnicos:

- Potencia de transmisión (P_{tx}): 27.0 dBm
- Ganancia total del sistema: 33.6 dBi (Tx) + 33.6 dBi (Rx) = 67.2 dB
- Pérdida por espacio libre (FSPL): 124.18 dB
- Pérdidas adicionales: 2.0 dB (por condiciones atmosféricas)

Fórmula de potencia recibida:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - FSPL - \text{Pérdidas adicionales}$$

$$P_{Rx} = 27.0 + 33.6 + 33.6 - 124.18 - 2$$

$$P_{Rx} = -32.0 \text{ dBm}$$

Nivel de ruido estimado: $P_{ruido} = -90 \text{ dBm}$

Cálculo de SNR:

$$SNR = P_{Rx} - P_{ruido}$$

$$SNR = -32.0 - (-90)$$

$$SNR = 58.0 \text{ dB}$$

Este nivel de SNR es excelente, y permite operar el enlace con modulaciones avanzadas como MCS13, garantizando un rendimiento superior.

Tabla XXXVI Comparación de SNR Taulis - Nuevo San Miguel

| Modo MCS | Sensibilidad (dBm) | Potencia Recibida (dBm) | SNR (dB) |
|-----------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| MCS 1 | -87 | -32.0 | 58.0 |
| MCS 7 | -64 | -32.0 | 58.0 |
| MCS 9 | -58 | -32.0 | 58.0 |
| MCS 11 | -54 | -32.0 | 58.0 |
| MCS 13 | -53 | -32.0 | 58.0 |

Este análisis confirma que el enlace entre Taulis a Nuevo San Miguel puede operar con los modos de modulación más elevados disponibles, manteniendo además un amplio margen de reserva.

El siguiente gráfico muestra cómo la sensibilidad mejora (se vuelve menos negativa) a medida que aumenta el modo MCS.

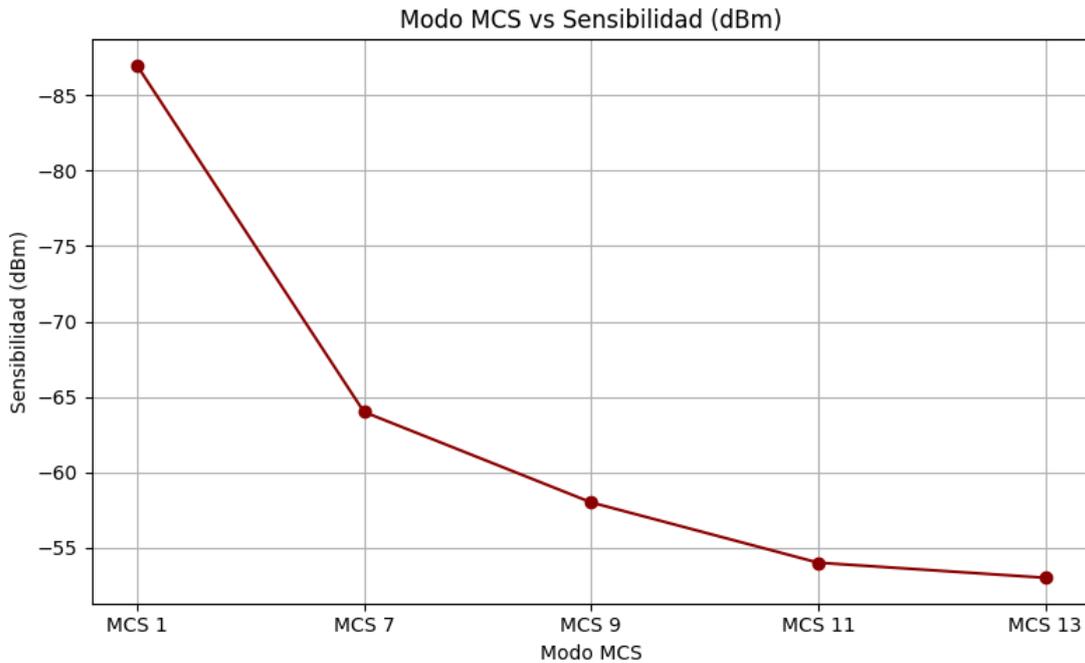


Fig. 43 Modo MSC vs sensibilidad Taulis - Nuevo San Miguel

Parámetros de Transmisión y Modulación

Este enlace opera en la banda alta de 6 GHz (6425 - 7125 MHz) utilizando un ancho de canal de 40 MHz con una asignación de tráfico 60% bajada / 40% subida. Se aplica una modulación 4096-QAM 0.83 Dual, alcanzando un throughput total de 626.63 Mbps en modo agregado.

Tabla XXXVII Parámetros de transmisión Taulis - Nuevo San Miguel

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|--------------------|
| Banda de Frecuencia | 6425 - 7125 MHz |
| Ancho de Canal | 40 MHz |
| Modulación | 4096-QAM 0.83 Dual |
| Potencia de Transmisión | 27.0 dBm |
| Sensibilidad Recepción | -32 dBm |

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los modos MCS, en la que se detallan aspectos como la modulación, el throughput, el margen frente al desvanecimiento y la disponibilidad del enlace.

Tabla XXXVIII Desempeño del enlace según modulación Taulis - Nuevo San Miguel

| Modo | Modulación | Throughput Agregado (Mbps) | Margen Desvanecimiento (dB) | Disponibilidad (%) |
|-------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| MCS13 | 4096-QAM 0.83 Dual | 626.63 | 8.29 | 99.9991 |
| MCS12 | 4096-QAM 0.83 Dual | 563.48 | 12.69 | 99.9995 |
| MCS11 | 1024-QAM 0.83 Dual | 522.19 | 18.69 | 99.9995 |
| MCS9 | 256-QAM 0.83 Dual | 417.75 | 26.69 | 99.9995 |
| MCS1 | QPSK 0.5 Dual | 60.72 | 51.99 | 99.9995 |

A medida que se incrementa la eficiencia espectral con modulaciones más complejas, el throughput aumenta, pero disminuye el margen de desvanecimiento. MCS9 se selecciona como configuración óptima, logrando 417.75 Mbps con un margen de 26.69 dB.

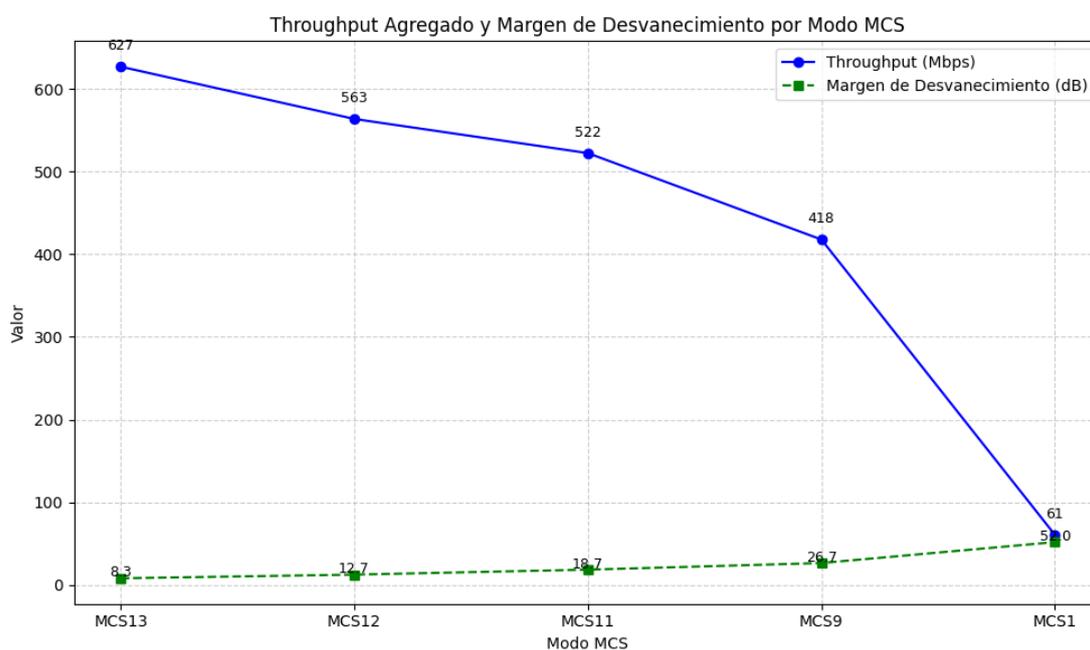


Fig. 44 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Taulis - Nuevo San Miguel

Throughput y Disponibilidad

Este radioenlace fue diseñado para satisfacer una demanda proyectada de 340 Mbps en Nuevo San Miguel. A pesar de operar con un ancho de canal reducido

(40 MHz), logra un rendimiento eficiente. Se selecciona una configuración de modulación en MCS9 para asegurar un margen de desvanecimiento seguro y rendimiento suficiente.

Tabla XXXIX Throughput y disponibilidad del enlace Taulis - Nuevo San Miguel

| Enlaces en Paralelo | Throughput por enlace (Mbps) | Disponibilidad (%) | Throughput Total (Mbps) | Margen de Desvanecimiento (dB) |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | 417.75 | 99.9995 | 417.75 | 26.69 |

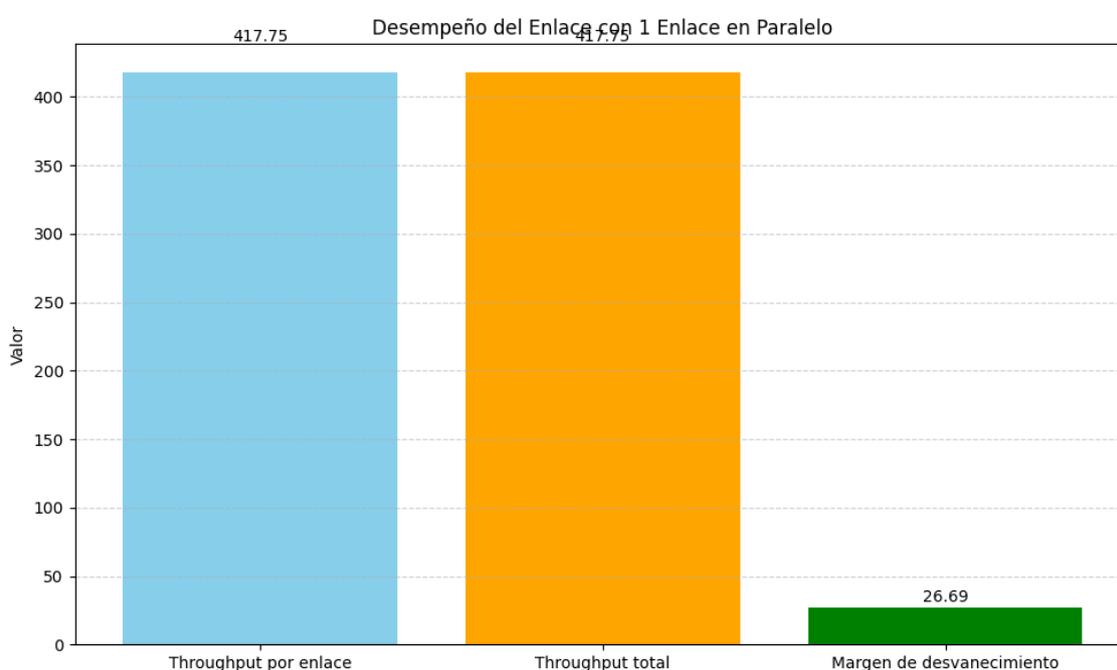


Fig. 45 Desempeño del enlace Taulis - Nuevo San Miguel

Este enlace cumple con los requisitos de ancho de banda del sitio destino con una configuración eficiente y un rendimiento estable, incluso ante condiciones adversas.

3.1.4.9. Radioenlace San Lorenzo Alto a San Lorenzo

Este radioenlace establecido entre San Lorenzo Alto a San Lorenzo se encuentra a altitudes de 3630 msnm y 3390 msnm, respectivamente; con una separación entre estaciones de 5.289 kilómetros, por lo que se requiere un despeje mínimo de 1.6 metros en la primera zona de Fresnel para evitar cualquier tipo de interferencias en la transmisión de la señal. En ambas estaciones se cuenta con

una infraestructura de 35 metros de altura, en el caso de San Lorenzo Alto la antena ha sido configurada con un grado de inclinación de -2.6° hacia abajo y está orientada a 280.60° en relación al norte. Por su parte, en San Lorenzo la antena presenta una inclinación ascendente de 2.6° y esta alineada en dirección 100.61° al norte.

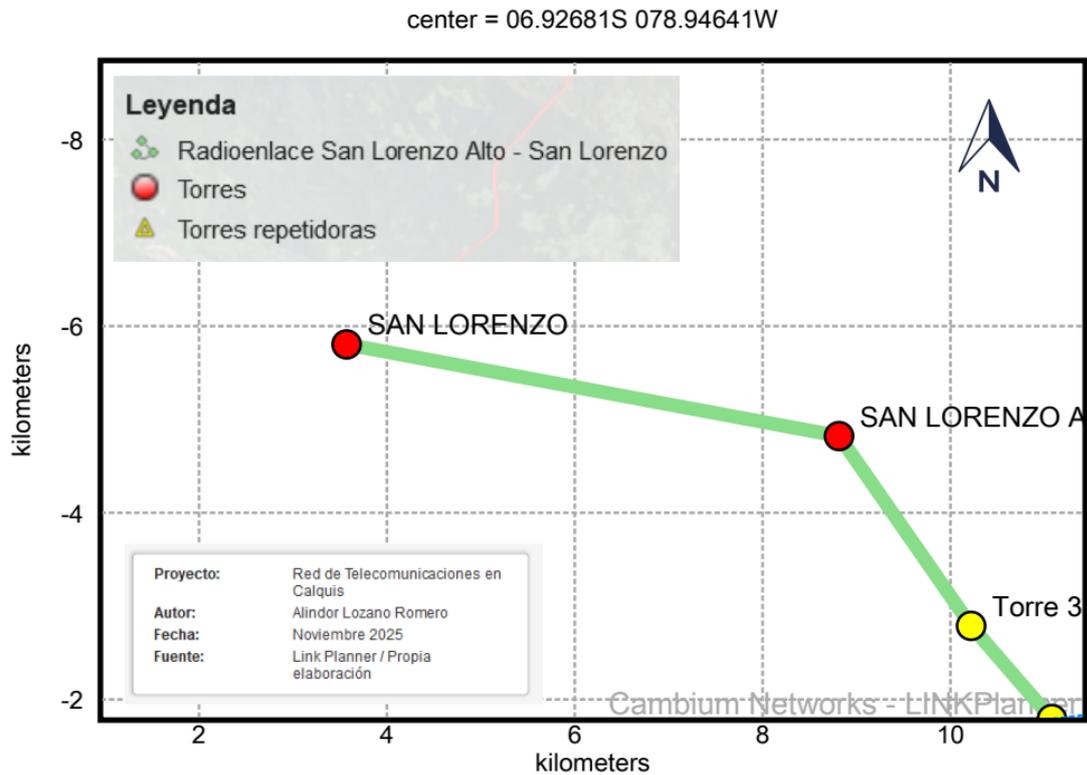


Fig. 46 Radioenlace San Lorenzo Alto a San Lorenzo

El enlace cuenta con línea de vista directa y se está utilizando antenas Radio Waves 2ft Dual-Polar Parabolic SPD2-6, con una ganancia de 30.65 dBi. Se identificó una superficie reflectante a 4.6 kilómetros de San Lorenzo Alto, a una altitud de 3350 msnm. Se recomienda instalar las antenas a alturas específicas de 1.48 m y 0.21 m sobre los puntos detectados para evitar reflexiones indeseadas.

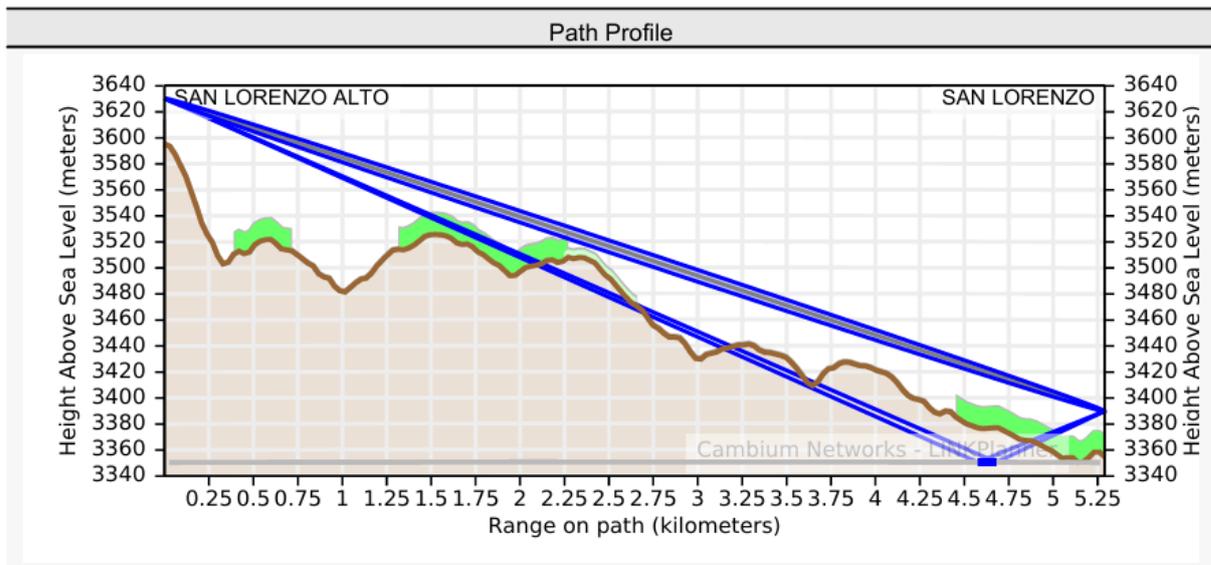


Fig. 47 Perfil del radioenlace San Lorenzo Alto a San Lorenzo

Características técnicas del radioenlace

Tabla XL Características técnicas del radioenlace San Lorenzo Alto - San Lorenzo

| Elemento | Valor |
|--------------------------|-------------------------------|
| Tipo de Antena | SPD2-6 Parabólica Dual-Polar |
| Ganancia de Antena | 30.65 dBi |
| Pérdida de espacio libre | 123.53 dB |
| Despeje zona Fresnel | 1.6 m |
| Superficie reflectante | 4.6 km desde San Lorenzo Alto |

Cálculo de la Relación Señal-Ruido (SNR)

Para determinar la calidad y eficiencia del enlace, se calcula el valor de la relación señal-ruido (SNR).

Parámetros técnicos:

- Potencia de transmisión (P_{tx}): 27.0 dBm
- Ganancia total del sistema: 30.65 dBi (Tx) + 30.65 dBi (Rx) = 61.3 dB
- Pérdida por espacio libre (FSPL): 123.53 dB
- Pérdidas adicionales: 2.0 dB (por condiciones atmosféricas)

Fórmula de potencia recibida:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - FSPL - \text{Pérdidas adicionales}$$

$$P_{Rx} = 27.0 + 30.65 + 30.65 - 123.53 - 2$$

$$P_{Rx} = -37.23 \text{ dBm}$$

Nivel de ruido estimado: $P_{ruido} = -90 \text{ dBm}$

Cálculo de SNR:

$$SNR = P_{Rx} - P_{ruido}$$

$$SNR = -32.0 - (-90)$$

$$SNR = 52.77 \text{ dB}$$

Este nivel de SNR es excelente, y permite operar el enlace con modulaciones avanzadas como MCS13, garantizando un rendimiento superior.

Tabla XLI Comparación de SNR San Lorenzo Alto - San Lorenzo

| Modo MCS | Sensibilidad (dBm) | Potencia Recibida (dBm) | SNR (dB) |
|-----------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| MCS 1 | -87 | -37.2 | 52.8 |
| MCS 7 | -64 | -37.2 | 52.8 |
| MCS 9 | -58 | -37.2 | 52.8 |
| MCS 11 | -54 | -37.2 | 52.8 |
| MCS 13 | -53 | -37.2 | 52.8 |

Este análisis demuestra que el enlace entre San Lorenzo Alto a San Lorenzo es capaz de funcionar utilizando los modos de modulación más altos disponibles, conservando al mismo tiempo un margen de reserva significativo.

En la siguiente figura nos permite visualizar cómo mejora la sensibilidad (se vuelve menos negativa) conforme aumenta el modo MCS, lo cual es característico de enlaces que operan con mayor eficiencia y calidad de señal.

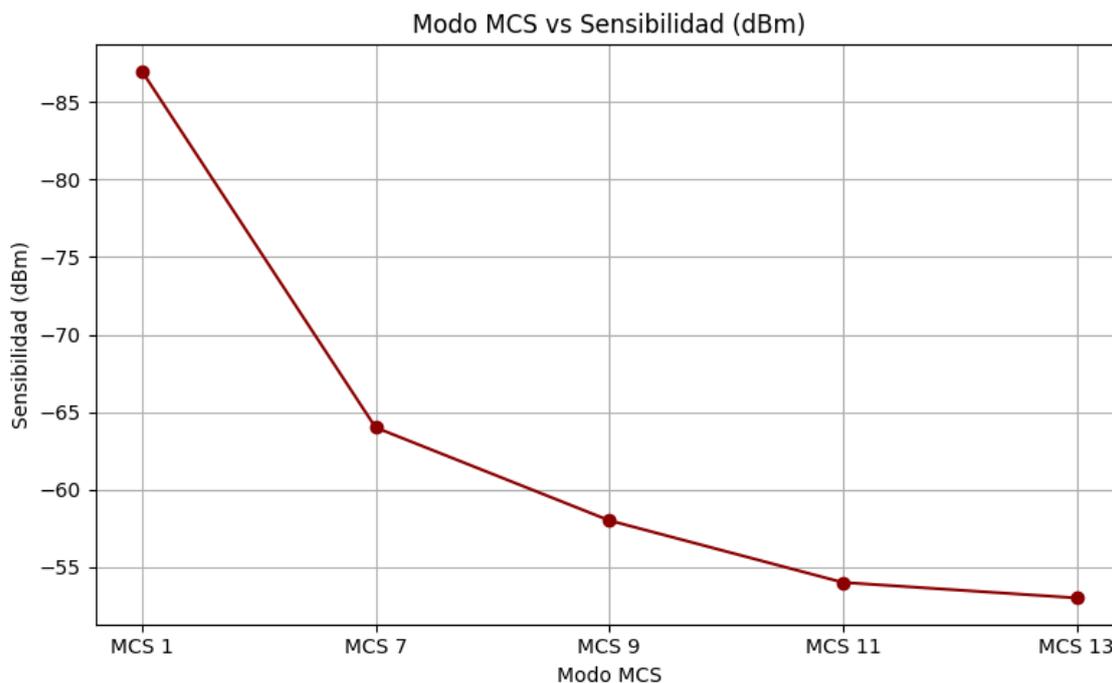


Fig. 48 Modo MSC vs sensibilidad San Lorenzo Alto - San Lorenzo

Parámetros de Transmisión y Modulación

Este enlace opera en la banda alta de 6 GHz (6425 - 7125 MHz), con un ancho de canal de 160 MHz y asignación de tráfico 70% bajada / 30% subida. La modulación aplicada es 4096-QAM 0.83 Dual, alcanzando un throughput agregado de 1256.13 Mbps, con potencias de transmisión de 27.0 dBm.

Tabla XLII Parámetros de transmisión San Lorenzo Alto - San Lorenzo

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|--------------------|
| Banda de Frecuencia | 6425 - 7125 MHz |
| Ancho de Canal | 160 MHz |
| Modulación | 4096-QAM 0.83 Dual |
| Potencia de Transmisión | 27.0 dBm |
| Sensibilidad Recepción | -37 dBm |

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los modos MCS, donde se especifican características como el tipo de modulación, el throughput, el margen ante el desvanecimiento y la disponibilidad del enlace.

Tabla XLIII Desempeño del enlace según modulación San Lorenzo Alto - San Lorenzo

| Modo | Modulación | Throughput Agregado (Mbps) | Margen Desvanecimiento (dB) | Disponibilidad (%) |
|-------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| MCS13 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2686.25 | -3.96 | 0.0073 |
| MCS12 | 4096-QAM 0.83 Dual | 2414.22 | -0.26 | 39.0596 |
| MCS11 | 1024-QAM 0.83 Dual | 2227.21 | 6.04 | 99.9959 |
| MCS9 | 256-QAM 0.83 Dual | 1785.17 | 14.74 | 99.9995 |
| MCS5 | 64-QAM 0.67 Dual | 1071.10 | 24.44 | 99.9995 |

Se aprecia que el rendimiento máximo se logra con modulaciones altas, pero con bajo margen de desvanecimiento. Se opta por MCS5, el cual alcanza 1071.10 Mbps con un margen de 24.44 dB, superando la demanda y garantizando robustez.

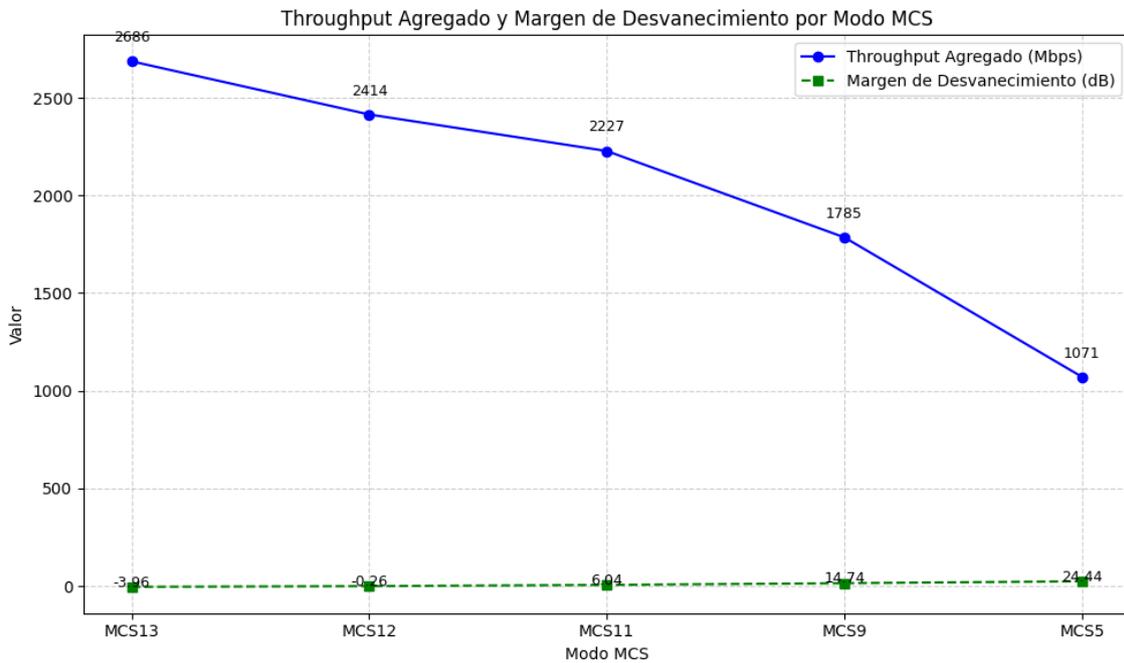


Fig. 49 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento San Lorenzo Alto - San Lorenzo

Throughput y Disponibilidad

La demanda en San Lorenzo es de 760 Mbps. Con un solo enlace utilizando MCS5 se obtiene un throughput de 1071.10 Mbps y margen de desvanecimiento de 24.44 dB, excediendo holgadamente los requerimientos.

Tabla XLIV Throughput y disponibilidad del enlace San Lorenzo Alto - San Lorenzo

| Enlaces en Paralelo | Throughput por enlace (Mbps) | Disponibilidad (%) | Throughput Total (Mbps) | Margen de Desvanecimiento (dB) |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | 1071.10 | 99.9995 | 1071.10 | 24.44 |

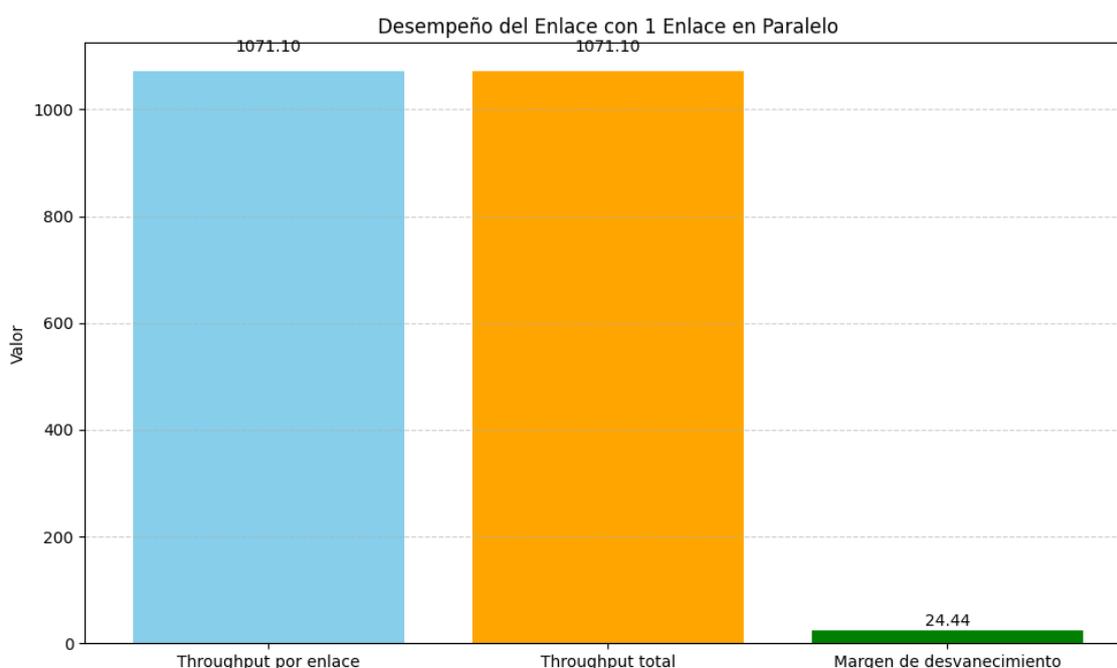


Fig. 50 Desempeño del enlace San Lorenzo Alto a San Lorenzo

En conclusión, este enlace ofrece una solución confiable y eficiente, superando ampliamente la demanda mediante una configuración adecuada de modulación, garantizando alta disponibilidad y baja susceptibilidad a interferencias.

3.1.4.10. Radioenlace Alto Palmito a El Palmito

Los puntos del radioenlace establecido entre Alto Palmito a El Palmito se encuentran a altitudes de 2712 msnm y 2754 msnm, respectivamente; con una separación entre estaciones de 1.822 kilómetros, por lo que se requiere un despeje mínimo de 2.3 metros en la primera zona de Fresnel para evitar

cualquier tipo de interferencias en la transmisión de la señal. Alto Palmito cuenta con una estructura de 25 metros de altura mientras que en El Palmito hay una estructura de 26 metros, en el caso de Alto Palmito la antena ha sido configurada con un grado de inclinación de 1.3° hacia arriba y está orientada a 251.89° en relación al norte. Por su parte, en El Palmito la antena presenta una inclinación descendente de -1.3° y esta alineada en dirección 71.90° al norte.

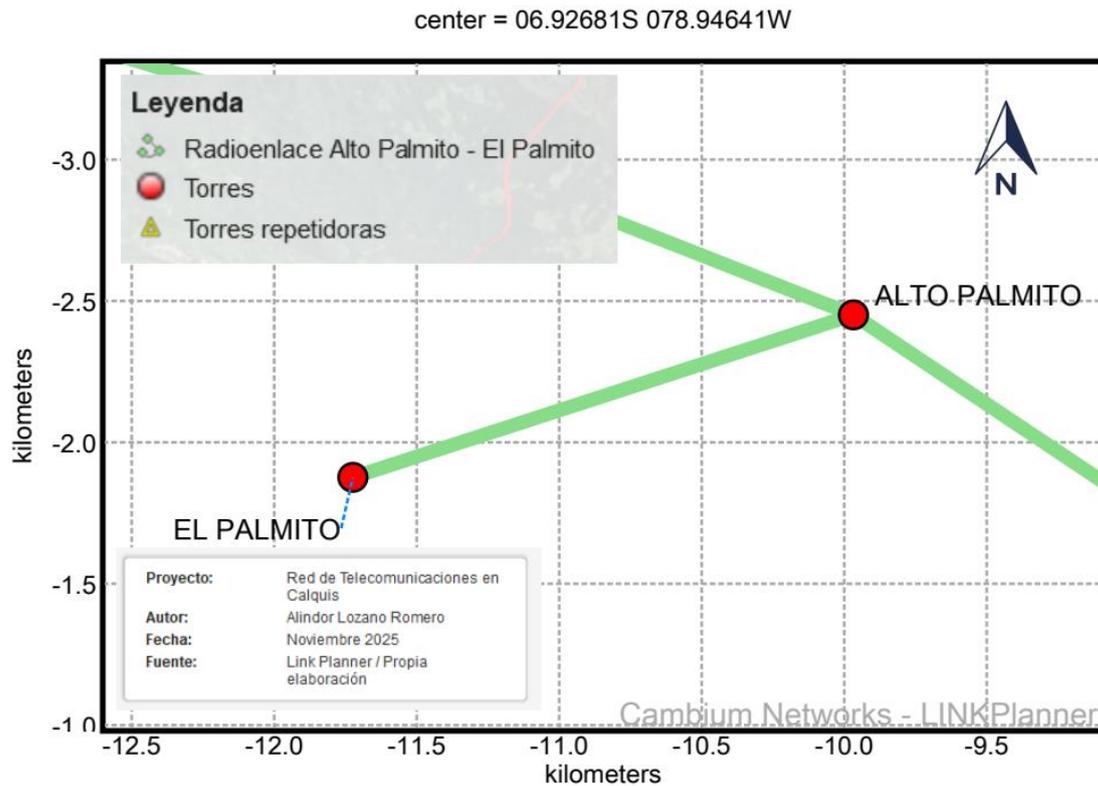


Fig. 51 Radioenlace entre Alto Palmito a El Palmito

Este enlace cuenta con línea de vista y ambas estaciones utilizan antenas Radio Waves 3ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6, con una ganancia de 33.8 dBi. Se detectó una superficie reflectante a 0.5 km de Alto Palmito, ubicada a 2685 msnm, por lo cual se recomienda instalar las antenas a 0.29 m y 0.76 m de altura sobre los puntos de reflexión.

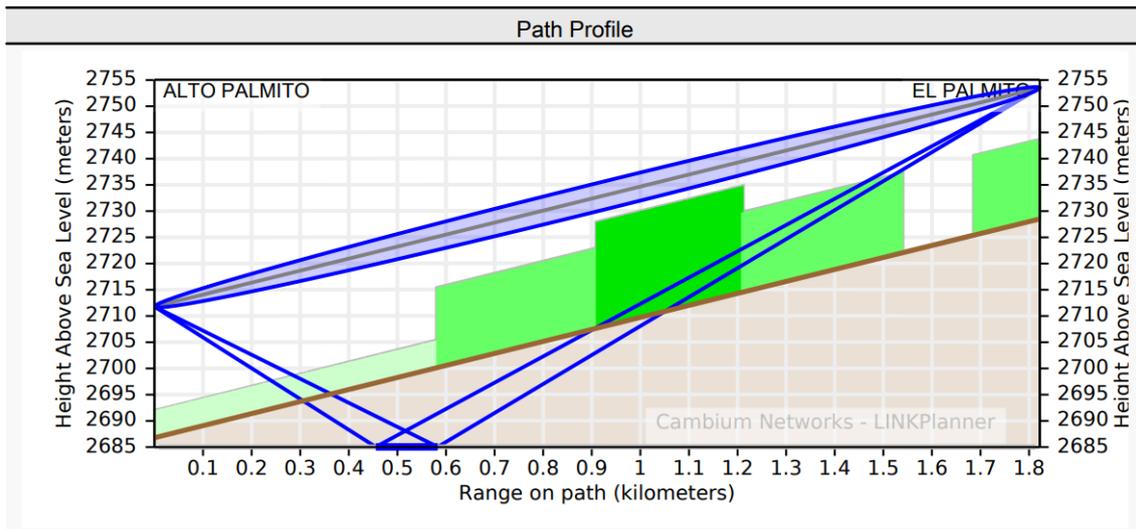


Fig. 52 Perfil del radioenlace Alto Palmito a El Palmito

Características técnicas del radioenlace

Tabla XLV Características técnicas del radioenlace Alto Palmito - El Palmito

| Elemento | Valor |
|--------------------------|------------------------------|
| Tipo de Antena | SPD3-6 Parabólica Dual-Polar |
| Ganancia de Antena | 33.8 dBi |
| Pérdida de espacio libre | 114.28 dB |
| Despeje zona Fresnel | 2.3 m |
| Superficie reflectante | 0.5 km desde Alto Palmito |

Cálculo de la Relación Señal-Ruido (SNR)

Para determinar la calidad y eficiencia del enlace, se calcula el valor de la relación señal-ruido (SNR).

Parámetros técnicos:

- Potencia de transmisión (Ptx): 18.0 dBm
- Ganancia total del sistema: 33.8 dBi (Tx) + 33.8 dBi (Rx) = 67.6 dB
- Pérdida por espacio libre (FSPL): 114.28 dB
- Pérdidas adicionales: 2.0 dB (por condiciones atmosféricas)

Fórmula de potencia recibida:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - FSPL - \text{Pérdidas adicionales}$$

$$P_{Rx} = 18.0 + 33.8 + 33.8 - 114.28 - 2$$

$$P_{Rx} = -30.68 \text{ dBm}$$

Nivel de ruido estimado: $P_{ruido} = -90 \text{ dBm}$

Cálculo de SNR:

$$SNR = P_{Rx} - P_{ruido}$$

$$SNR = -30.68 - (-90)$$

$$SNR = 59.32 \text{ dB}$$

Este nivel de SNR es excelente, y permite operar el enlace con modulaciones avanzadas como MCS13, garantizando un rendimiento superior.

Tabla XLVI Comparación de SNR Alto Palmito - El Palmito

| Modo MCS | Sensibilidad (dBm) | Potencia Recibida (dBm) | SNR (dB) |
|-----------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| MCS 1 | -87 | -30.7 | 59.3 |
| MCS 7 | -64 | -30.7 | 59.3 |
| MCS 9 | -58 | -30.7 | 59.3 |
| MCS 11 | -54 | -30.7 | 59.3 |
| MCS 13 | -53 | -30.7 | 59.3 |

Este análisis evidencia que el enlace entre Alto Palmito y El Palmito puede operar con los modos de modulación más avanzados, manteniendo además un margen de reserva considerable.

En la siguiente figura nos permite visualizar cómo mejora la sensibilidad (se vuelve menos negativa) conforme aumenta el modo MCS, lo cual es característico de enlaces que operan con mayor eficiencia y calidad de señal.

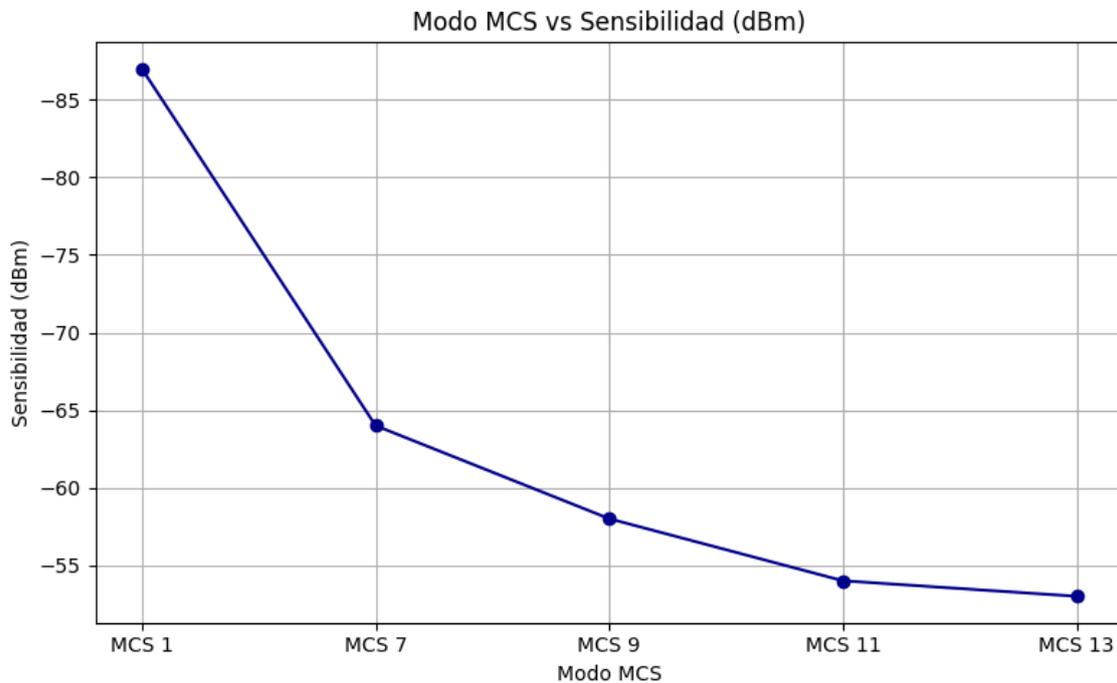


Fig. 53 Modo MSC vs sensibilidad Alto Palmito - El Palmito

Parámetros de Transmisión y Modulación

Este enlace opera en la banda alta de 6 GHz (6425 - 7125 MHz) con un ancho de canal de 80 MHz y una relación de tráfico 70% bajada / 30% subida. La modulación utilizada es 4096-QAM 0.83 Dual, logrando un rendimiento total de 1262.97 Mbps.

Tabla XLVII Parámetros de transmisión Alto Palmito - El Palmito

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|--------------------|
| Banda de Frecuencia | 6425 - 7125 MHz |
| Ancho de Canal | 80 MHz |
| Modulación | 4096-QAM 0.83 Dual |
| Potencia de Transmisión | 18.0 dBm |
| Sensibilidad Recepción | -31 dBm |

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los modos MCS, donde se especifican características como el tipo de modulación, el throughput, el margen ante el desvanecimiento y la disponibilidad del enlace.

Tabla XLVIII Desempeño del enlace según modulación Alto Palmito - El Palmito

| Modo | Modulación | Throughput Agregado (Mbps) | Margen Desvanecimiento (dB) | Disponibilidad (%) |
|-------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| MCS13 | 4096-QAM 0.83 Dual | 1262.97 | 14.61 | 99.9995 |
| MCS12 | 4096-QAM 0.83 Dual | 1136.68 | 18.61 | 99.9995 |
| MCS11 | 1024-QAM 0.83 Dual | 1058.96 | 22.61 | 99.9995 |
| MCS9 | 256-QAM 0.83 Dual | 845.22 | 29.01 | 99.9995 |
| MCS5 | 64-QAM 0.67 Dual | 505.19 | 37.01 | 99.9995 |

Se evidencia que, con la configuración actual, el enlace opera eficientemente incluso en escenarios de mayor exigencia. La elección de MCS13 con 14.61 dB permite un rendimiento superior a 1262.67 Mbps. Alternativamente, se puede usar MCS11, que aún con 22.61 dB de margen logra más de 1058.96 Mbps, lo que garantiza estabilidad ante condiciones adversas.

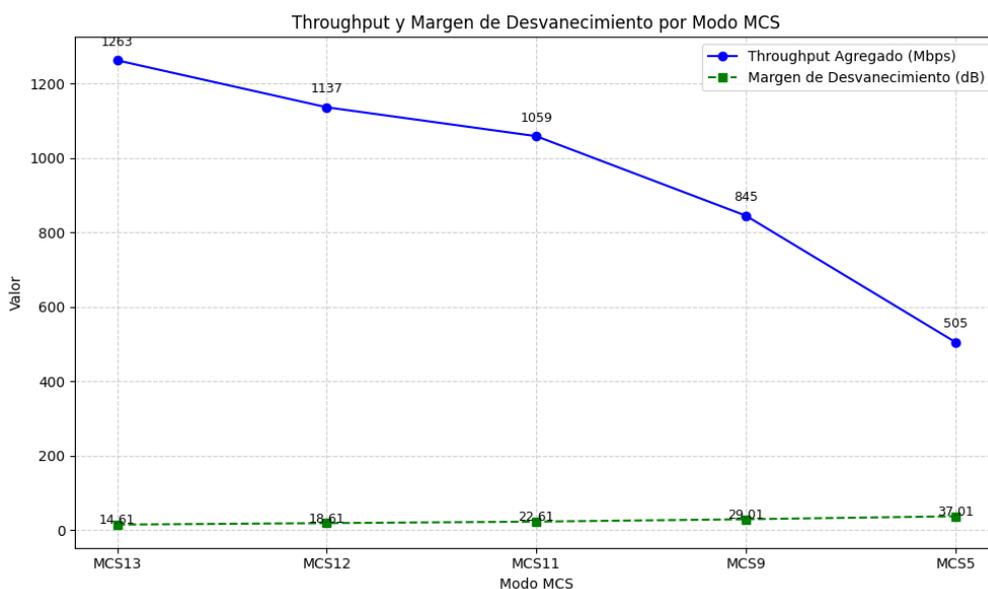


Fig. 54 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Alto Palmito - El Palmito

Throughput y Disponibilidad

El enlace fue diseñado para soportar una demanda de 720 Mbps en El Palmito. Con una sola línea configurada en MCS11, se logra un throughput de 1058.96 Mbps con un margen de 22.61 dB, lo que permite operar con eficiencia y confiabilidad.

Tabla XLIX Throughput y disponibilidad del enlace Alto Palmito - El Palmito

| Enlaces en Paralelo | Throughput por enlace (Mbps) | Disponibilidad (%) | Throughput Total (Mbps) | Margen de Desvanecimiento (dB) |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | 1058.96 | 99.9995 | 1058.96 | 22.61 |

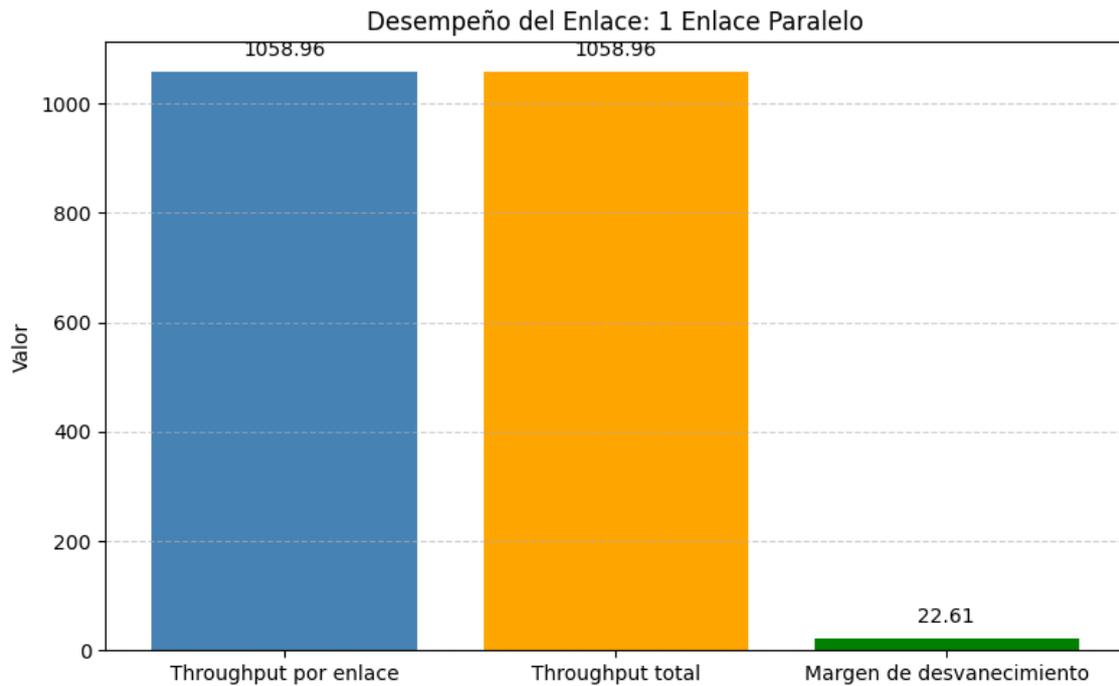


Fig. 55 Desempeño del enlace Alto Palmito - El Palmito

En conclusión, este enlace supera ampliamente la demanda establecida de 720 Mbps con un diseño técnico robusto, excelente disponibilidad y margen de desvanecimiento, asegurando un servicio estable y escalable.

3.1.4.11. Radioenlace Taulis a El Brete

Este radioenlace establecido entre Taulis a El Brete se encuentran a altitudes de 3070 msnm y 3187 msnm, respectivamente; con una separación entre estaciones de 5.175 kilómetros, por lo que se requiere un despeje mínimo de 6.0 metros en la primera zona de Fresnel para evitar cualquier tipo de interferencias en la transmisión de la señal. Taulis cuenta con una estructura de 26 metros de altura mientras que en El Brete hay una estructura de 40 metros, en el caso de Taulis la antena ha sido configurada con un grado de inclinación de 1.4° hacia arriba y está orientada a 192.29° en relación al norte. Por su parte, en El Brete la antena presenta una inclinación ascendente de -1.5° y esta alineada en dirección 12.29° al norte.

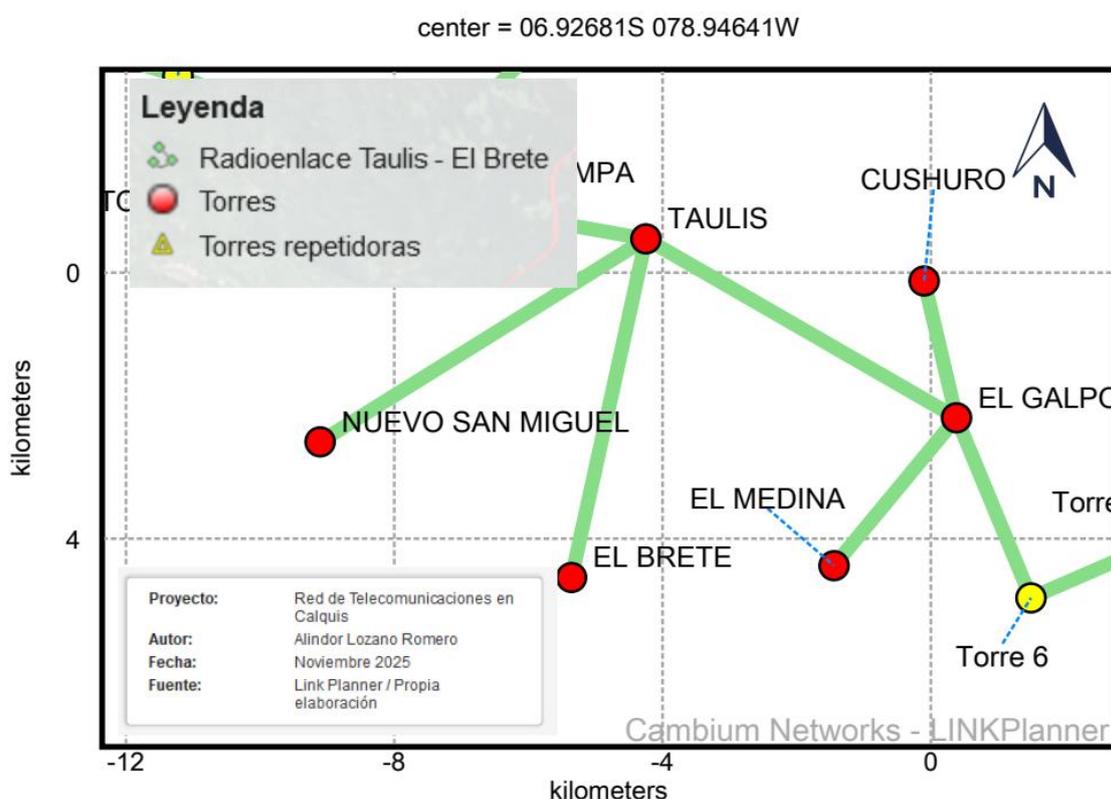


Fig. 56 Radioenlace Taulis a El Brete

Este enlace cuenta con línea de vista y emplean antenas Radio Waves 3ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6 con una ganancia de 33.8 dBi. Se identificó una superficie reflectante a 2.25 km de Taulis a una altitud de 2679 msnm, por lo que se recomienda posicionar las antenas a 0.10 m y 0.14 m respecto a los puntos críticos.

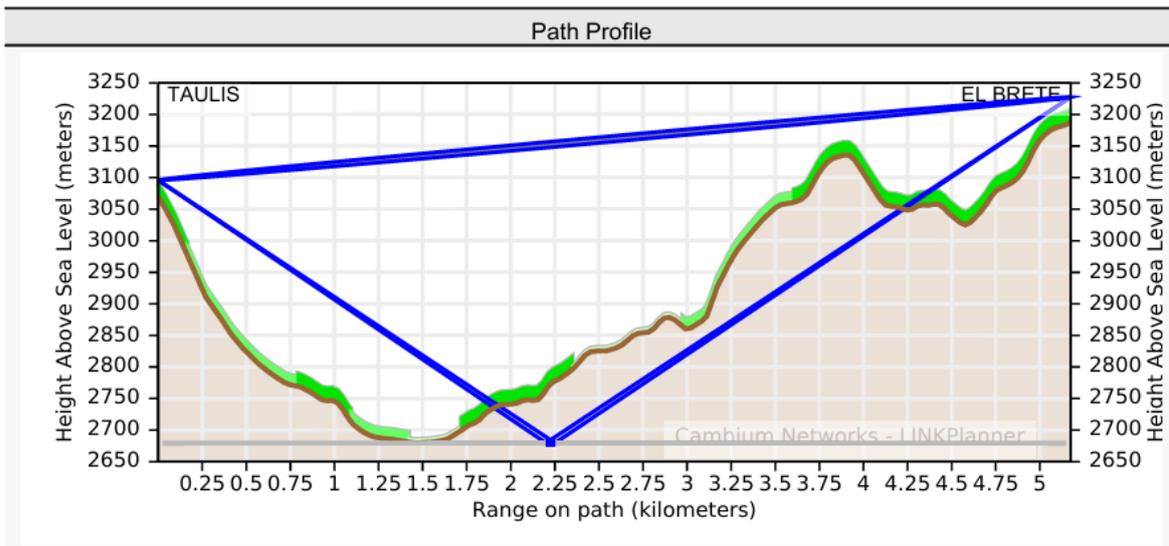


Fig. 57 Perfil del radioenlace Taulis a El Brete

Características técnicas del radioenlace

Tabla L Características técnicas del radioenlace Taulis - El Brete

| Elemento | Valor |
|--------------------------|------------------------------|
| Tipo de Antena | SPD3-6 Parabólica Dual-Polar |
| Ganancia de Antena | 33.8 dBi |
| Pérdida de espacio libre | 123.34 dB |
| Despeje zona Fresnel | 6.0 m |
| Superficie reflectante | 2.25 km desde Taulis |

Cálculo de la Relación Señal-Ruido (SNR)

Para determinar la calidad y eficiencia del enlace, se calcula el valor de la relación señal-ruido (SNR).

Parámetros técnicos:

- Potencia de transmisión (P_{tx}): 27.0 dBm
- Ganancia total del sistema: 33.8 dBi (Tx) + 33.8 dBi (Rx) = 67.6 dB
- Pérdida por espacio libre (FSPL): 123.34 dB
- Pérdidas adicionales: 2.0 dB (por condiciones atmosféricas)

Fórmula de potencia recibida:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - FSPL - \text{Pérdidas adicionales}$$

$$P_{Rx} = 27.0 + 33.8 + 33.8 - 123.34 - 2$$

$$P_{Rx} = -30.74 \text{ dBm}$$

Nivel de ruido estimado: $P_{ruido} = -90 \text{ dBm}$

Cálculo de SNR:

$$SNR = P_{Rx} - P_{ruido}$$

$$SNR = -30.74 - (-90)$$

$$SNR = 59.26 \text{ dB}$$

Este nivel de SNR es excelente, y permite operar el enlace con modulaciones avanzadas como MCS13, garantizando un rendimiento superior.

Tabla LI Comparación de SNR Taulis - El Brete

| Modo MCS | Sensibilidad (dBm) | Potencia Recibida (dBm) | SNR (dB) |
|-----------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| MCS 1 | -87 | -30.7 | 59.3 |
| MCS 7 | -64 | -30.7 | 59.3 |
| MCS 9 | -58 | -30.7 | 59.3 |
| MCS 11 | -54 | -30.7 | 59.3 |
| MCS 13 | -53 | -30.7 | 59.3 |

Este análisis evidencia que el enlace entre Taulis y El brete puede operar con los modos de modulación más avanzados, manteniendo además un margen de reserva considerable.

En la siguiente figura nos permite visualizar cómo mejora la sensibilidad (se vuelve menos negativa) conforme aumenta el modo MCS, lo cual es característico de enlaces que operan con mayor eficiencia y calidad de señal.

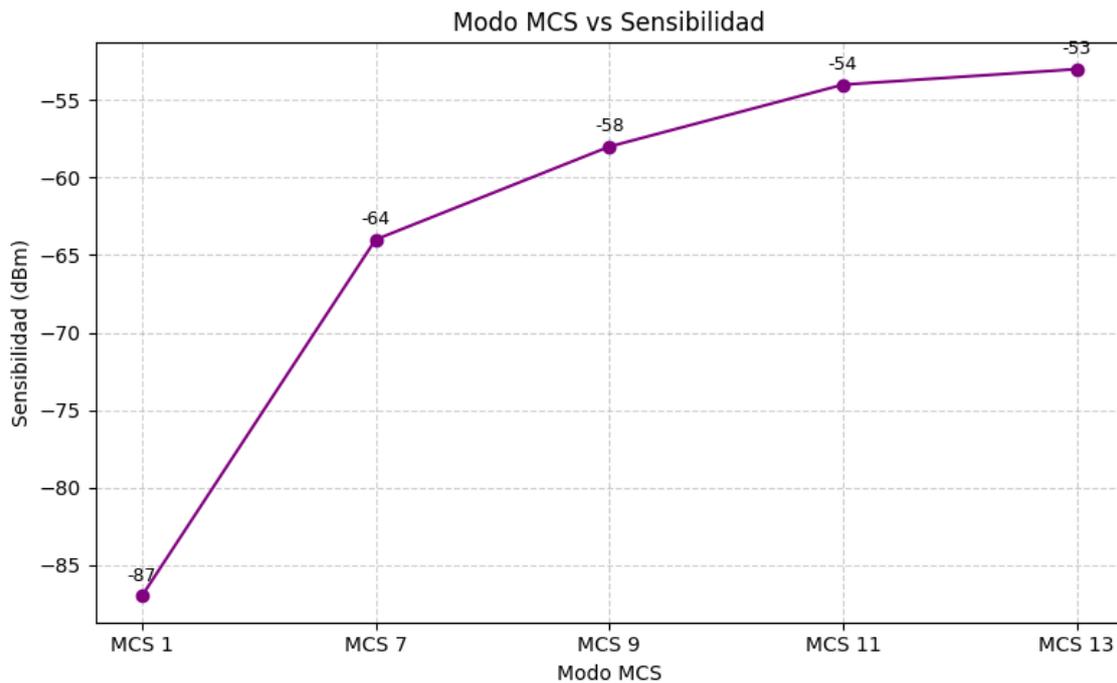


Fig. 58 Modo MSC vs sensibilidad Taulis - El Brete

Parámetros de Transmisión y Modulación

Este enlace opera en la banda alta de 6 GHz (6425 - 7125 MHz) con un ancho de canal de 80 MHz y relación 50/50 entre bajada y subida. Se utiliza modulación 4096-QAM 0.83 Dual con una potencia de transmisión de 27.0 dBm y sensibilidad de recepción de -31 dBm.

Tabla LII Parámetros de transmisión Taulis - El Brete

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|--------------------|
| Banda de Frecuencia | 6425 - 7125 MHz |
| Ancho de Canal | 80 MHz |
| Modulación | 4096-QAM 0.83 Dual |
| Potencia de Transmisión | 27.0 dBm |
| Sensibilidad Recepción | -31 dBm |

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los modos MCS, donde se especifican características como el tipo de modulación, el throughput, el margen ante el desvanecimiento y la disponibilidad del enlace.

Tabla LIII Desempeño del enlace según modulación Taulis - El Brete

| Modo | Modulación | Throughput Agregado (Mbps) | Margen Desvanecimiento (dB) | Disponibilidad (%) |
|-------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| MCS13 | 4096-QAM 0.83 Dual | 621.78 | 9.53 | 99.9994 |
| MCS12 | 4096-QAM 0.83 Dual | 565.91 | 13.93 | 99.9995 |
| MCS11 | 1024-QAM 0.83 Dual | 524.62 | 19.93 | 99.9995 |
| MCS9 | 256-QAM 0.83 Dual | 420.19 | 27.93 | 99.9995 |
| MCS8 | 256-QAM 0.75 Dual | 376.47 | 29.23 | 99.9995 |

Se observa que a mayor rendimiento (MCS13), el margen de desvanecimiento es más bajo, lo cual aumenta el riesgo de interferencias. Por ello, se elige operar con MCS8, que ofrece un throughput de 376.47 Mbps con un margen de 29.23 dB, lo que garantiza mayor estabilidad.

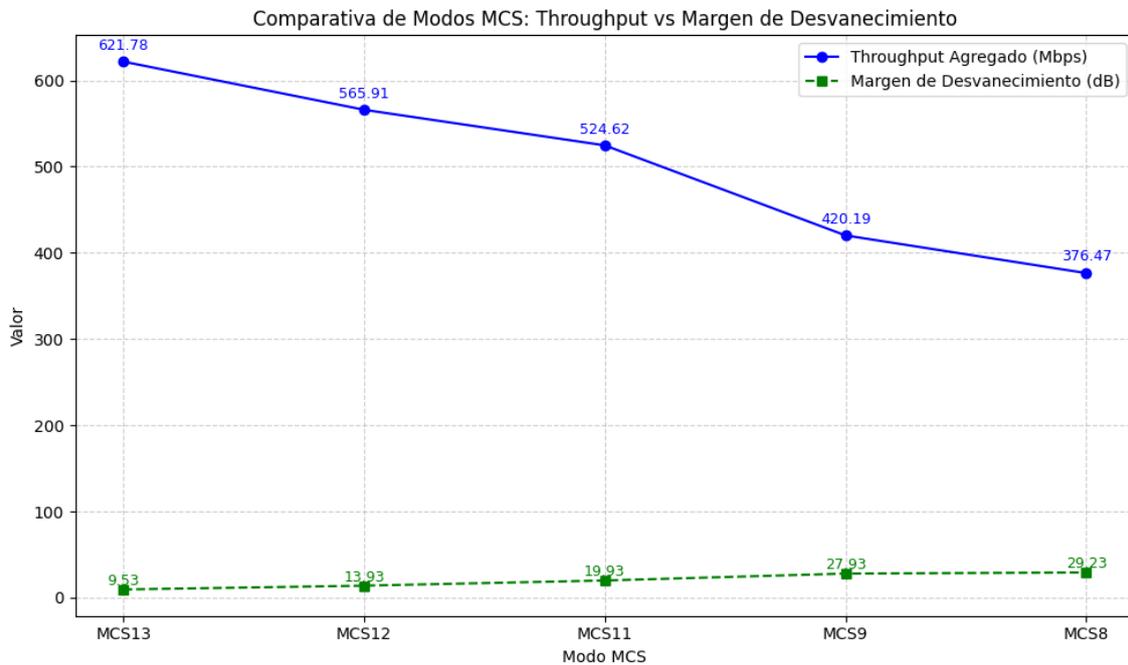


Fig. 59 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Taulis - El Brete

Throughput y Disponibilidad

Con un throughput requerido de 280 Mbps, el enlace proporciona suficiente capacidad con una sola línea de transmisión operando en MCS8.

Tabla LIV Throughput y disponibilidad del enlace Taulis - El Brete

| Enlaces en Paralelo | Throughput por enlace (Mbps) | Disponibilidad (%) | Throughput Total (Mbps) | Margen de Desvanecimiento (dB) |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | 376.47 | 99.9995 | 376.47 | 29.23 |

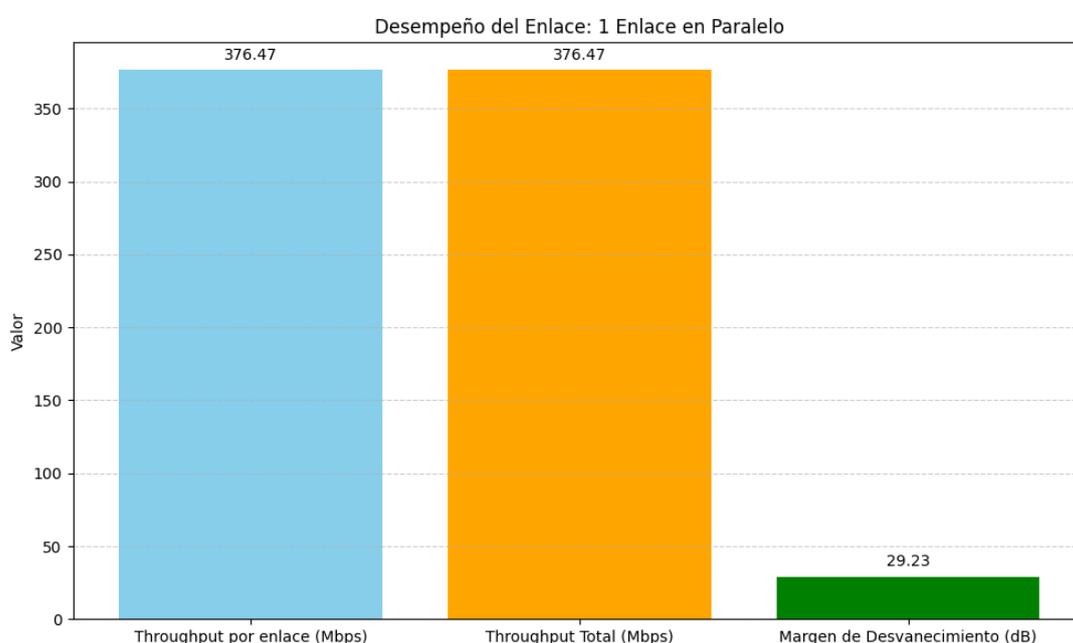


Fig. 60 Desempeño del enlace Taulis - El Brete

En conclusión, este radioenlace demuestra ser técnicamente eficiente, garantizando más del 34% de capacidad adicional respecto a la demanda estimada. La elección de un margen de desvanecimiento elevado favorece la estabilidad y minimiza riesgos por condiciones adversas.

3.1.4.12. Radioenlace Succhapampa a Valdivia

Las bases del radioenlace establecido entre Succhapampa a Valdivia se encuentran a altitudes de 3018 msnm y 3115 msnm, respectivamente; con una separación entre estaciones de 4.009 kilómetros, por lo que se requiere un despeje mínimo de 10 metros en la primera zona de Fresnel para evitar cualquier

tipo de interferencias en la transmisión de la señal. Succhapampa cuenta con una estructura de 25 metros de altura mientras que en Valdivia hay una estructura de 40 metros, en el caso de Succhapampa la antena ha sido configurada con un grado de inclinación de 1.4° hacia arriba y está orientada a 44.78° en relación al norte. Por su parte, en Valdivia la antena presenta una inclinación descendente de -1.4° y esta alineada en dirección 224.78° al norte.

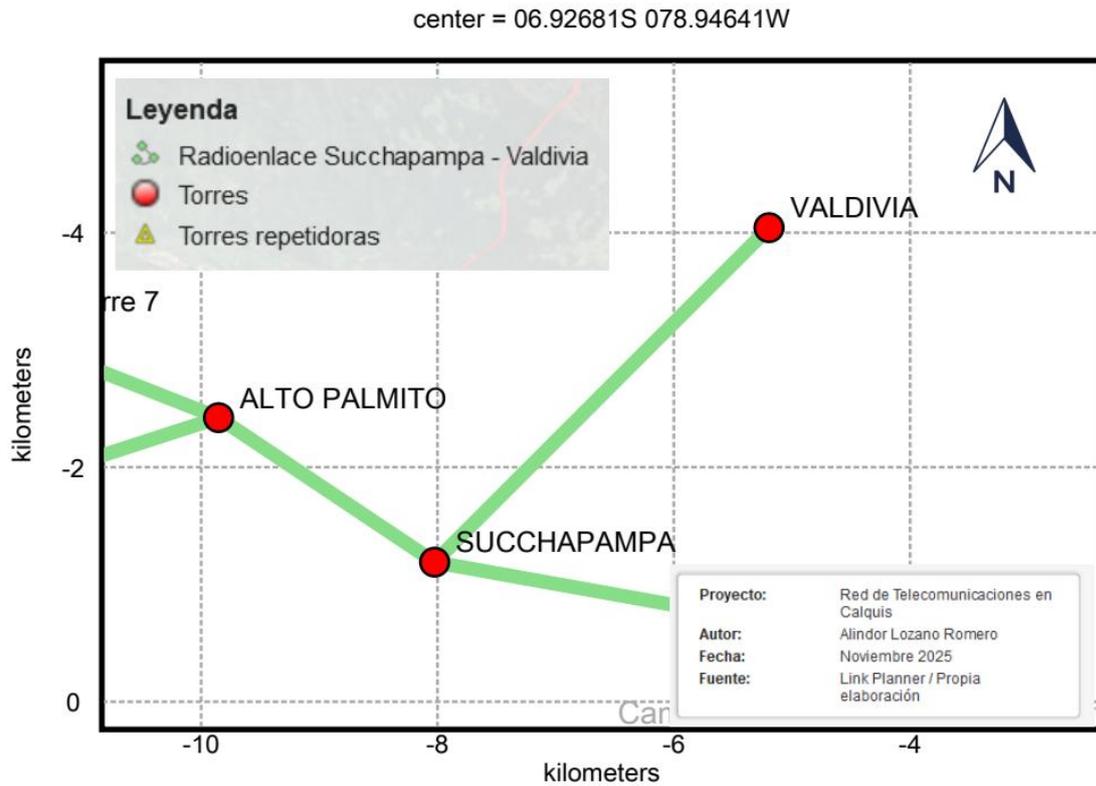


Fig. 61 Radioenlace Succhapampa a Valdivia

Este enlace cuenta con línea de vista y la conexión se establece mediante antenas SPD2-6 Dual-Polar Parabolic de 2 ft con una ganancia de 30.65 dBi. Se identificó una superficie reflectante a 1.8 km desde Succhapampa a una altitud de 2554 msnm. Se recomienda instalar las antenas a 0.08 m y 0.10 m por encima de los puntos identificados para evitar reflexiones.

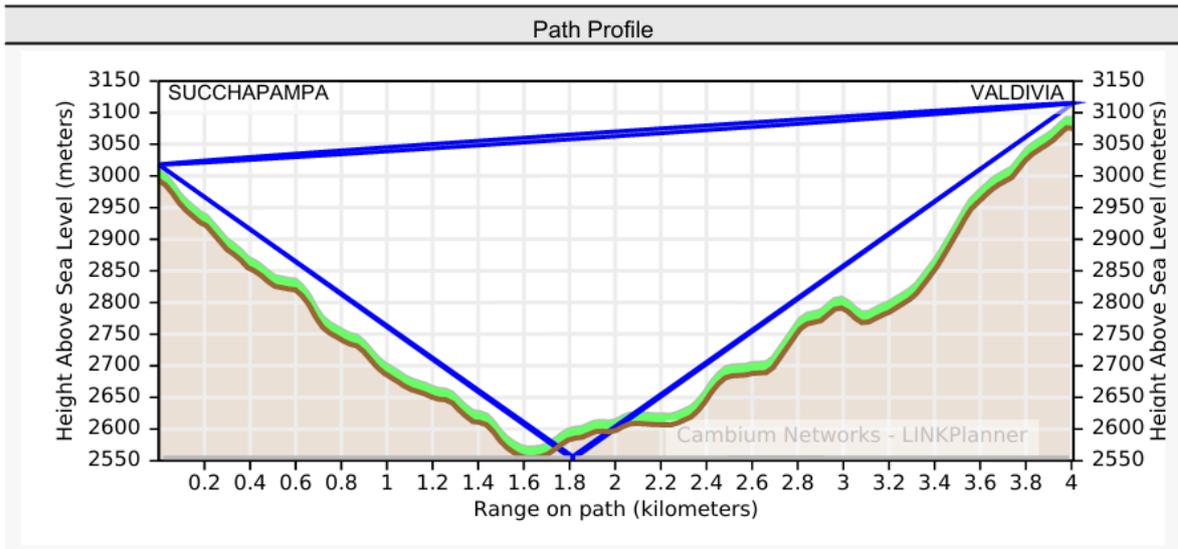


Fig. 62 Perfil del radioenlace Succhapampa a Valdivia

Características técnicas del radioenlace

Tabla LV Características técnicas del radioenlace Succhapampa - Valdivia

| Elemento | Valor |
|--------------------------|------------------------------|
| Tipo de Antena | SPD2-6 Parabólica Dual-Polar |
| Ganancia de Antena | 30.65 dBi |
| Pérdida de espacio libre | 121.13 dB |
| Despeje de zona Fresnel | 10.0 m |
| Superficie reflectante | 1.8 km desde Succhapampa |

Cálculo de la Relación Señal-Ruido (SNR)

Para determinar la calidad y eficiencia del enlace, se calcula el valor de la relación señal-ruido (SNR).

Parámetros técnicos:

- Potencia de transmisión (P_{tx}): 27.0 dBm
- Ganancia total del sistema: 30.65 dBi (Tx) + 30.65 dBi (Rx) = 61.3 dB
- Pérdida por espacio libre (FSPL): 121.13 dB
- Pérdidas adicionales: 2.0 dB (por condiciones atmosféricas)

Fórmula de potencia recibida:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - FSPL - \text{Pérdidas adicionales}$$

$$P_{Rx} = 27.0 + 30.65 + 30.65 - 121.13 - 2$$

$$P_{Rx} = -34.83 \text{ dBm}$$

Nivel de ruido estimado: $P_{ruido} = -90 \text{ dBm}$

Cálculo de SNR:

$$SNR = P_{Rx} - P_{ruido}$$

$$SNR = -34.83 - (-90)$$

$$SNR = 55.17 \text{ dB}$$

Este nivel de SNR es excelente, y permite operar el enlace con modulaciones avanzadas como MCS13, garantizando un rendimiento superior.

Tabla LVI Comparación de SNR Succhapampa - Valdivia

| Modo MCS | Sensibilidad (dBm) | Potencia Recibida (dBm) | SNR (dB) |
|----------|--------------------|-------------------------|----------|
| MCS 1 | -87 | -34.83 | 55.17 |
| MCS 7 | -64 | -34.83 | 55.17 |
| MCS 9 | -58 | -34.83 | 55.17 |
| MCS 11 | -54 | -34.83 | 55.17 |
| MCS 13 | -53 | -34.83 | 55.17 |

Este análisis evidencia que el enlace entre Succhapampa y Valdivia puede operar con los modos de modulación más avanzados, manteniendo además un margen de reserva considerable.

En la siguiente figura nos permite visualizar cómo mejora la sensibilidad (se vuelve menos negativa) conforme aumenta el modo MCS, lo cual es característico de enlaces que operan con mayor eficiencia y calidad de señal.

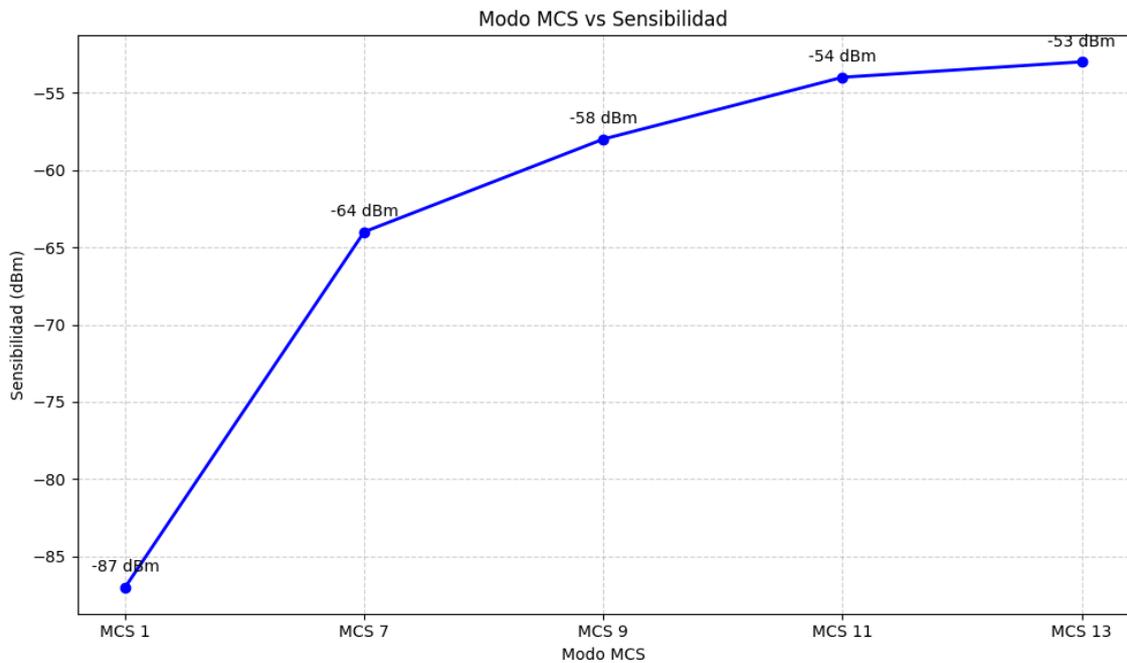


Fig. 63 Modo MSC vs sensibilidad Succhapampa - Valdivia

Parámetros de Transmisión y Modulación

Este enlace opera en la banda alta de 6 GHz (6425 - 7125 MHz) utilizando un ancho de canal de 40 MHz y relación de tráfico 50/50. La modulación empleada es 4096-QAM 0.83 Dual con potencia de transmisión de 27.0 dBm y sensibilidad de recepción de -35 dBm.

Tabla LVII Parámetros de transmisión Succhapampa - Valdivia

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|--------------------|
| Banda de Frecuencia | 6425 - 7125 MHz |
| Ancho de Canal | 40 MHz |
| Modulación | 4096-QAM 0.83 Dual |
| Potencia de Transmisión | 27.0 dBm |
| Sensibilidad Recepción | -35 dBm |

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los modos MCS, donde se especifican características como el tipo de modulación, el throughput, el margen ante el desvanecimiento y la disponibilidad del enlace.

Tabla LVIII Desempeño del enlace según modulación Succhapampa - Valdivia

| Modo | Modulación | Throughput Agregado (Mbps) | Margen Desvanecimiento (dB) | Disponibilidad (%) |
|-------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| MCS13 | 4096-QAM 0.83 Dual | 624.21 | 5.45 | 99.985 |
| MCS12 | 4096-QAM 0.83 Dual | 565.91 | 9.85 | 99.9994 |
| MCS11 | 1024-QAM 0.83 Dual | 524.62 | 15.85 | 99.9995 |
| MCS9 | 256-QAM 0.83 Dual | 420.19 | 23.85 | 99.9995 |
| MCS7 | 64-QAM 0.83 Dual | 313.31 | 29.45 | 99.9995 |

Se evidencia que con MCS7 se logra un throughput de 313.31 Mbps con un margen de desvanecimiento de 29.45 dB, lo cual proporciona una alta confiabilidad y estabilidad ante condiciones adversas.

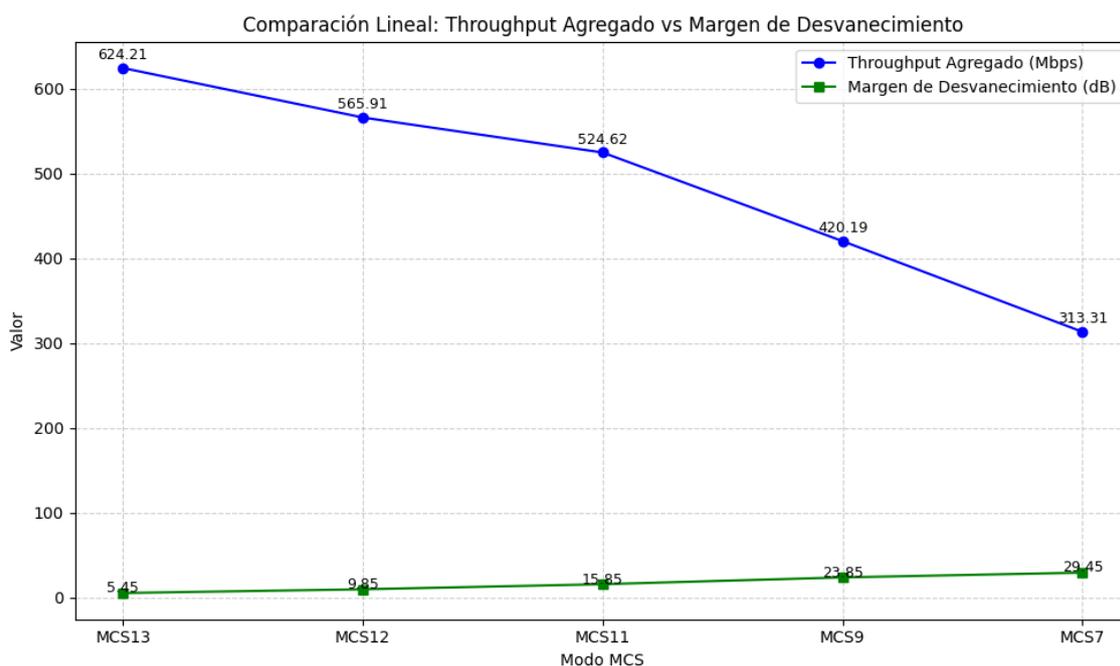


Fig. 64 Modo MCS vs throughput y margen de desvanecimiento Succhapampa - Valdivia

Throughput y Disponibilidad

a demanda proyectada para Valdivia es de 160 Mbps. Con la configuración seleccionada se alcanza 313.31 Mbps en una sola línea de enlace.

Tabla LIX Throughput y disponibilidad del enlace Succhapampa - Valdivia

| Enlaces en Paralelo | Throughput por enlace (Mbps) | Disponibilidad (%) | Throughput Total (Mbps) | Margen de Desvanecimiento (dB) |
|---------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | 313.31 | 99.9995 | 313.31 | 29.45 |

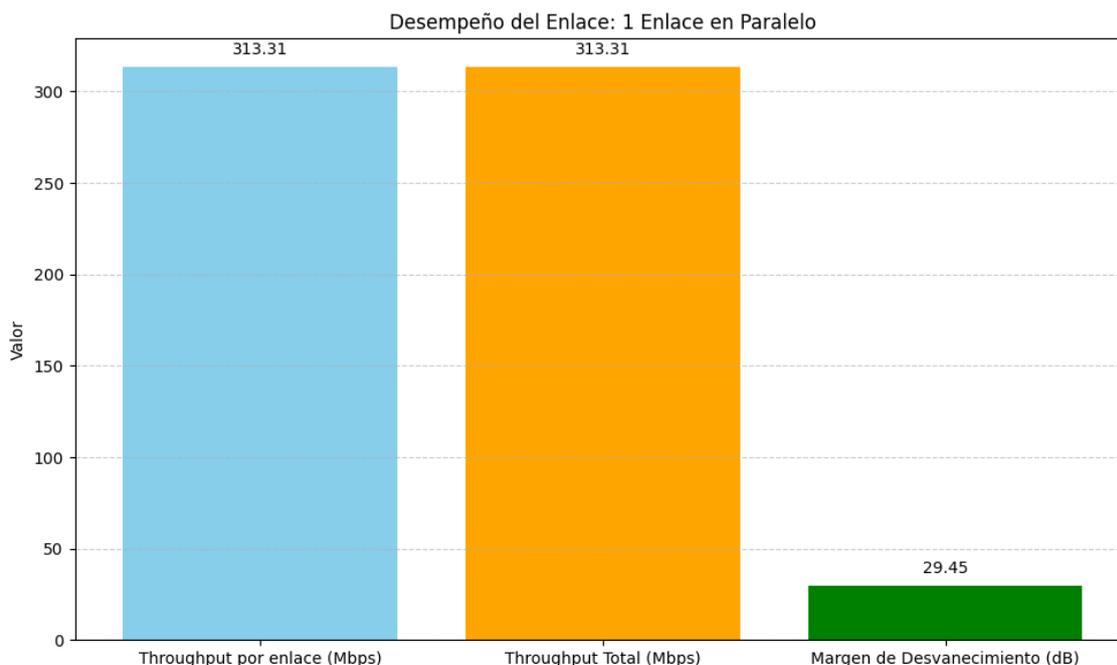


Fig. 65 Desempeño del enlace Succhapampa - Valdivia

El enlace demuestra ser altamente eficiente y confiable, proporcionando una capacidad ampliamente superior a la demanda requerida con un solo enlace operativo y un margen de desvanecimiento óptimo para minimizar el riesgo de cortes.

3.1.4.13. Mapa de cobertura de hogares en los centros poblados

El diseño efectivo de la red de transporte es esencial para garantizar una conectividad confiable y eficiente en todos los centros poblados del distrito de Calquis, ya que se adecua a la demanda de ancho de banda de la mayoría de los hogares. En la siguiente figura se muestra la cobertura estimada en todos los centros poblados del distrito en el marco del diseño de la red de telecomunicaciones basada en radioenlaces y refleja de forma clara la planificación de los puntos de acceso y su alcance sobre el territorio.

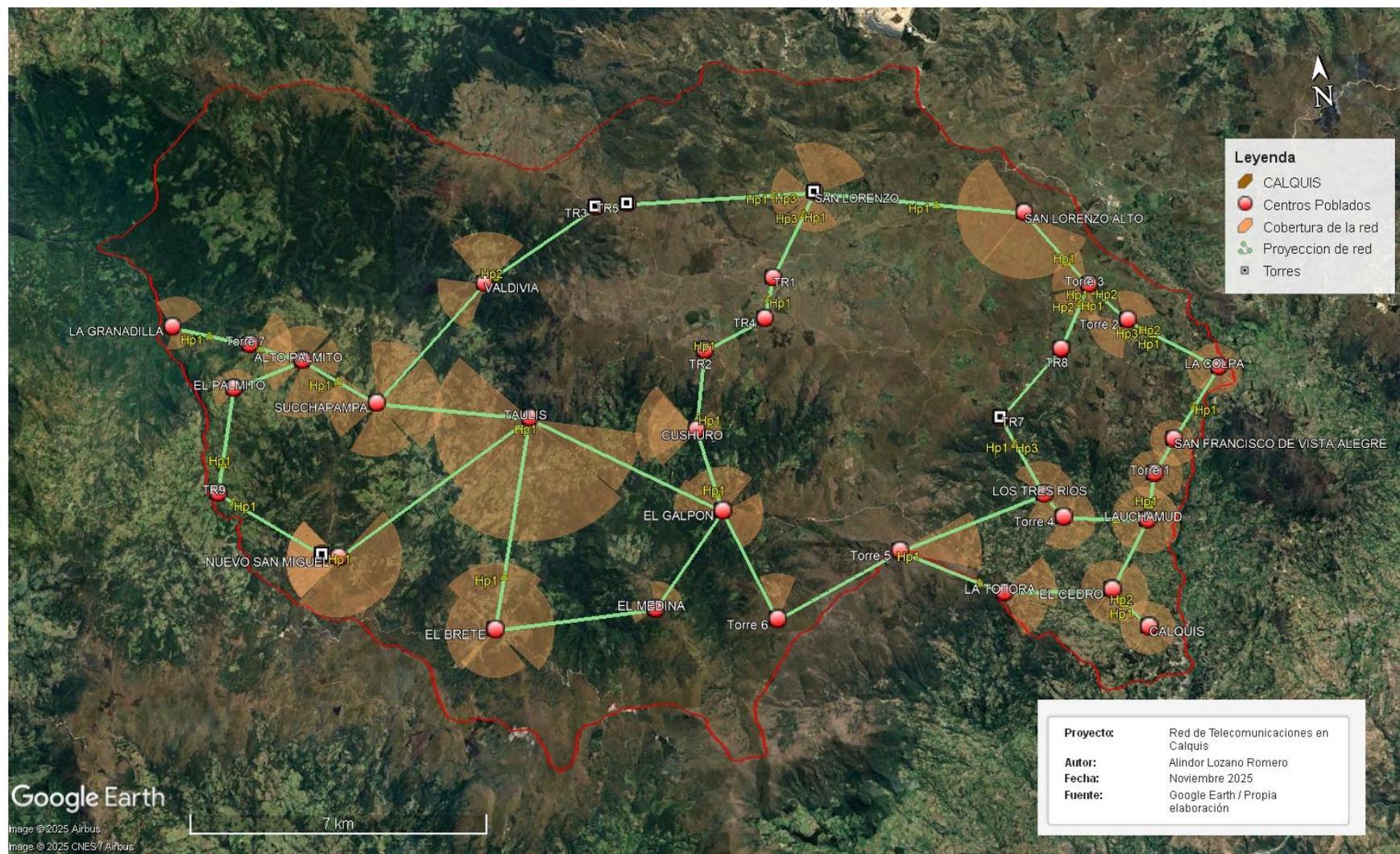


Fig. 66 Mapa de cobertura de la red de acceso a internet en los hogares de los CCPP del distrito de Calquis

Cada uno de los sectores sombreados de color naranja representa el área de cobertura de un punto de acceso inalámbrico (AP), instalados sobre las torres con línea de vista directa (LoS). Las zonas han sido determinadas en función de la dispersión de los hogares y criterios técnicos como el tipo de antena, la potencia de transmisión, la altitud del punto de instalación y la geografía del entorno.

Los hogares proyectados a ser beneficiados dentro de cada zona de cobertura están representados por un cuadro negro, distribuidos de manera dispersa en los centros poblados. Las líneas verdes y azules que conectan los nodos simbolizan los enlaces troncales y secundarios respectivamente, conformando una arquitectura de red en malla o en estrella.

En total, la red contempla la cobertura para aproximadamente 1416 hogares distribuidos en 21 centros poblados, lo que representa una estimación de cobertura del 90 % a 95 % del total de viviendas del distrito. Este valor puede variar según la disponibilidad energética, interferencias físicas o limitaciones de visibilidad en cada sitio.

De acuerdo a la densidad poblacional de cada centro poblado se ha instalado entre 1 a 4 antenas sectoriales para cubrir la mayor área posible y así brindar cobertura a todos los hogares de cada localidad.

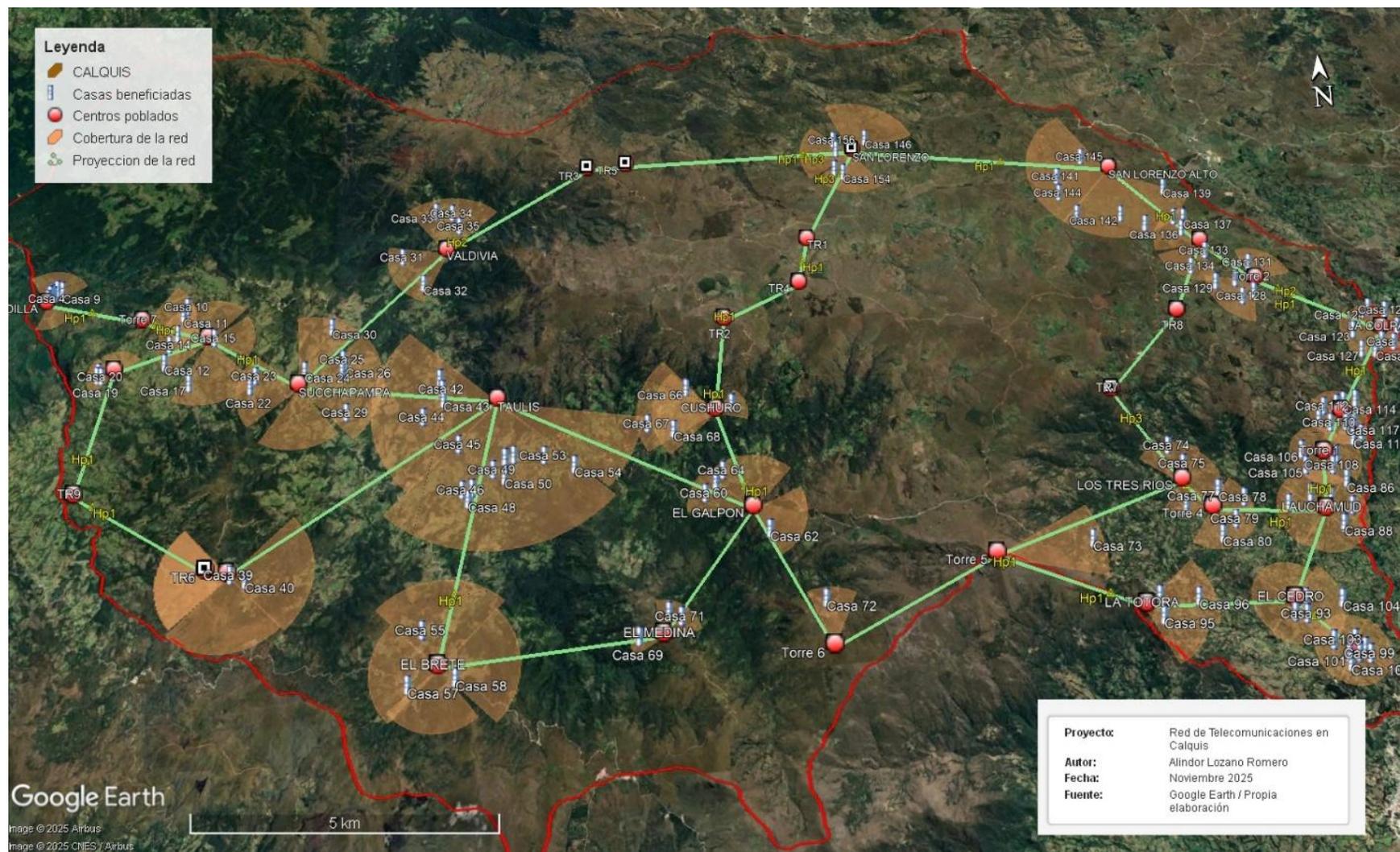


Fig. 67 Vista de hogares beneficiados por la cobertura de la red

3.1.5. Etapa 5: Análisis de costos.

3.1.5.1. Análisis de costos de red

El análisis de costos para la red de telecomunicaciones para el distrito de Calquis se calcula de acuerdo a las listas de materiales (BOM) arrojado por el software de simulación, incluyendo los componentes de implementación (CAPEX), operación (OPEX) y mantenimiento anual de red.

Para realizar un análisis de costos de la red de telecomunicaciones más a detalle se ha involucrado una serie de componentes técnicos distribuidos en varios cuadros presupuestales. Cada cuadro presenta las cantidades, precios unitarios y totales en dólares estadounidenses, así como las marcas y modelos de los equipos seleccionados. A continuación, se describe e interpreta la tabla en mención.

En la primera parte de la tabla se encuentra los costos de la lista de los dispositivos de transmisión y acceso inalámbrico necesarios para enlazar los distintos puntos de la red. Destacan los radios Cambium ePMP 4600L de 6 GHz con sus antenas parabólicas, los cuales constituyen la columna vertebral de la conectividad punto a punto y punto multipunto. Se incluyen también garantías extendidas para asegurar un periodo adicional de cobertura de fallas sin costo operativo extra en los dos primeros años. La selección de estos equipos busca un balance entre capacidad, cobertura y confiabilidad, ya que la topología probablemente requiera enlaces de alta disponibilidad entre los 36 sitios y el centro de control (NOC).

El presupuesto también incluye el costo de energía en corriente continua (48 VDC), bancos de baterías y el cableado asociado. Esto es crítico para mantener la continuidad del servicio ante cortes de energía comercial. El sistema está diseñado para que cada sitio pueda seguir operando temporalmente gracias a las baterías, mientras que el NOC cuenta con sistemas más robustos. Esta parte enfatiza la resiliencia: la red no sólo se implementa, sino que se planea con criterios de disponibilidad frente a fallos eléctricos, uno de los factores más frecuentes de interrupción en áreas rurales.

También se prevé el costo de los kits de alarmas y cámaras de seguridad para cada sitio, con el objetivo de proteger físicamente los equipos instalados. Esta inversión indica una preocupación no solo técnica sino también de seguridad, ya que las infraestructuras de telecomunicaciones suelen ser objeto de vandalismo o robo en áreas desoladas.

En la cuarta parte de tabla se detallan los costos de los elementos de soporte físico para la operación centralizada de la red: gabinetes exteriores (outdoor) para proteger equipos en campo, racks de montaje, servidores HP para el procesamiento y monitoreo de datos, así como licencias de software como SNMP/PRTG para la supervisión de la red. La presencia de un video wall de cuatro pantallas indica la intención de contar con un centro de monitoreo visual activo. Esta parte refleja la importancia de la gestión y supervisión en tiempo real como parte de la operación de la red, una práctica esencial para mantener calidad de servicio y responder con rapidez a incidencias.

En la siguiente parte se describen los costos de los metros de fibra óptica a tender hasta el NOC y las acometidas eléctricas requeridas en cada sitio donde se encuentran ubicadas las torres de soporte. Aunque representan un porcentaje menor del total, son elementos críticos para integrar cada punto de la red al suministro de energía y al backbone de datos

También se presupuesta la construcciones de estaciones que son las estructuras físicas necesarias: torres metálicas de 30 y 40 metros, cimentaciones, cercos, sistemas de puesta a tierra, montaje y sobre todo el traslado (acareo) de materiales hasta los sitios. El acareo representa uno de los costos unitarios más altos debido a la complejidad logística para zonas de difícil acceso. Esta parte de la tabla muestra que más de la mitad de la inversión total del proyecto está concentrada en esta tarea, lo que resalta la necesidad de una planificación detallada de obras civiles para optimizar recursos y tiempos de ejecución.

Finalmente, esta tabla resume los costos de instalación y puesta en marcha tanto del NOC como de los sitios y los enlaces de backhaul. El análisis de este apartado es que, más allá del costo del equipamiento, el valor agregado está en el despliegue técnico especializado, la alineación de enlaces, pruebas de

funcionamiento y la integración completa del sistema, asegurando que todos los componentes trabajen de forma conjunta desde el inicio de la operación.

Los costos a detalle se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla LX Detalle del costo de implementación de la red

| ANALISIS DE COSTOS DE LA IMPLEMENTACION, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE RED DATOS - CALQUIS | | | | | | | | | |
|--|-------------------|---|----------|------------------|------|------|-----------------|------------------|----------------------|
| ITEM | MODELO | DESCRIPCION | MARCA | SERVICIO / VENTA | CANT | unid | V.V. unid US \$ | V.V. TOTAL US \$ | |
| 1 | | EQUIPAMIENTO RED TRANSPORTE Y DATOS | | | | | | | |
| | | RED DE TRANSPORTE (CAMBIUM) | | | | | | | |
| 1.01 | C060940A251 | ePMP 4600L 6 GHz 2x2 Access Point Radio (ROW) | | VENTA | 82 | unid | \$ 761.30 | \$ 62,426.60 | |
| 1.02 | EW-E2EPAP4600L-WW | ePMP 4600L AP Extended Warranty, 2 Additional Years | CAMBIUM | VENTA | 82 | unid | \$ 67.50 | \$ 5,535.00 | |
| 1.05 | C060900D021A | ePMP 6 GHz 2x2 dish antenna 2-pack, priced per unit | CAMBIUM | VENTA | 30 | unid | \$ 181.90 | \$ 5,457.00 | |
| 1.06 | | Radio Waves 2ft Dual-Polar Parabolic SPD2-6 | CAMBIUM | VENTA | 8 | unid | \$ 658.80 | \$ 5,270.40 | |
| 1.07 | | Radio Waves 3ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6 | CAMBIUM | VENTA | 44 | unid | \$ 2,672.90 | \$ 117,607.60 | |
| 1.08 | C000000L033 | Gigabit Surge Suppressor (56V), 10/100/1000 BaseT | CAMBIUM | VENTA | 82 | unid | \$ 57.70 | \$ 4,731.40 | |
| 1.09 | RB4011iGS+RM | RB4011iGS+RM. Architecture, ARM 32bit. CPU, AL21400. CPU core count, 4. CPU nominal frequency, 1400 MHz | MIKROTIK | VENTA | 37 | unid | \$ 375.50 | \$ 13,893.50 | |
| | | | | | | | | | \$ 214,921.50 |
| | | ACCESORIOS | | | | | | | |
| 1.13 | | Clanes 1/2" 3T | LOCAL | VENTA | 432 | unid | \$ 5.40 | \$ 2,332.80 | |
| 1.14 | | Kit de tierra de 1/2" | LOCAL | VENTA | 82 | unid | \$ 6.20 | \$ 508.40 | |
| 1.15 | | Soporte de Antena | LOCAL | VENTA | 82 | unid | \$ 147.10 | \$ 12,062.20 | |
| 1.17 | | Conectores Apantallados RJ45 Cat 6A | LOCAL | VENTA | 492 | unid | \$ 10.20 | \$ 5,018.40 | |
| | | | | | | | | | \$ 19,921.80 |
| | | EQUIPAMIENTO RED TRANSPORTE Y DATOS | | | | | | | \$ 234,843.30 |

| ANALISIS DE COSTOS DE LA IMPLEMENTACION, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE RED DATOS - CALQUIS | | | | | | | | | |
|---|---|--|----------|------------------|------|------|-----------------|------------------|--|
| ITEM | MODELO | DESCRIPCION | MARCA | SERVICIO / VENTA | CANT | unid | V.V. unid US \$ | V.V. TOTAL US \$ | |
| 2 | EQUIPAMIENTO ENERGIA COMERCIAL | | | | | | | | |
| | ENERGIA / POWER 220 VAC & 48 VDC | | | | | | | | |
| 2.01 | SD-350C-24 | DC-DC Enclosed converter; Input 36-72Vdc; Output +24Vdc at 14;6A; Forced air cooling | LOCAL | VENTA | 36 | unid | \$ 141.20 | \$ 5,083.20 | |
| 2.02 | SRT192BP2 | UPS APC 10KW | LOCAL | VENTA | 1 | unid | \$ 4,117.60 | \$ 4,117.60 | |
| 2.03 | APTF10KW01 | Transformador de aislamiento APC APTF3KW01, 3kVA, 60A, 220V. | LOCAL | VENTA | 36 | unid | \$ 223.50 | \$ 8,046.00 | |
| 2.04 | PSX2401121F-001 | 1U MicroCompact System, c/w 3 x RM848 48V 800W rectifiers1x load, 1 x battery Mcbs, SM36 Controller. Front connected ETSI rack mouning | ENATEL | VENTA | 36 | unid | \$ 1,155.60 | \$ 41,601.60 | |
| 2.05 | VGG12-155 | Baterias Libre de Mantenimiento 12V155AH GEL FRONT I-M8 552*110*288 48KGS - BTS | Sunstone | VENTA | - | unid | \$ 294.10 | \$ - | |
| 2.06 | VGG12-55 | Baterias Libre de Mantenimiento 12V55AH GEL FRONT I-M8 | Sunstone | VENTA | 144 | unid | \$ 147.10 | \$ 21,182.40 | |
| 2.07 | | Wiring Kit - Baterias | LOCAL | VENTA | 144 | unid | \$ 17.60 | \$ 2,534.40 | |
| | | | | | | | | \$ 82,565.20 | |
| | EQUIPAMIENTO ENERGIA COMERCIAL | | | | | | | | |
| | | | | | | | | \$ 82,565.20 | |
| 3 | ALARMAS & VIDEO VIGILANCIA | | | | | | | | |
| | KIT SEGURIDAD REMOTA | | | | | | | | |
| 3.01 | KIT COMPLETO SP4000 - K636 | KIT COMPLETO panel spectra SP4000 04 zonas en placa expandible hasta 32 zonas INCLUYE: 01 SP4000-K-2NV5B - kit basico - 01 TRA-2A60 -Transformador - 01 K636 – Teclado- 02 BS-2033WH - Contactos magenticos - 01 BAT-12V4A - Bateria 12V-4 amperios- 01 ES-31 - Sirena 30Watts | PARADOX | VENTA | 37 | unid | \$ 294.10 | \$ 10,881.70 | |
| 3.02 | IPC-HDW2239T-AS-LED-0280B-S2 | IP Outdoor Camara | LOCAL | VENTA | 38 | unid | \$ 176.50 | \$ 6,707.00 | |
| | ALARMAS & VIDEO VIGILANCIA | | | | | | | | |
| | | | | | | | | \$ 17,588.70 | |

ANALISIS DE COSTOS DE LA IMPLEMENTACION, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE RED DATOS - CALQUIS

| ITEM | MODELO | DESCRIPCION | MARCA | SERVICIO / VENTA | CANT | unid | V.V. unid US \$ | V.V. TOTAL US \$ |
|----------|--------|--|-------|------------------|--------|------|-----------------|---------------------|
| 4 | | SERVIDORES RACKS & GABINETES Y ACCESORIO | | | | | | |
| | | RACKS & GABINETES | | | | | | |
| 4.01 | | Gabinete Outdoor 78"H X 25" W X 42 D | LOCAL | VENTA | 35 | unid | \$ 1,764.70 | \$ 61,764.50 |
| 4.02 | | Gabinete Indoor 78"H X 25" W X 42 D | LOCAL | VENTA | 1 | unid | \$ 882.40 | \$ 882.40 |
| 4.03 | | Gabinete Indoor Rack de 19 " 2.10 de altura | LOCAL | VENTA | 1 | unid | \$ 294.10 | \$ 294.10 |
| 4.04 | | Bandeja de Distribucion de Energia | LOCAL | VENTA | 36 | unid | \$ 352.90 | \$ 12,704.40 |
| | | | | | | | | \$ 75,645.40 |
| | | SERVIDORES | | | | | | |
| 4.05 | | Servidor HP Gen11 | LOCAL | VENTA | 3 | unid | \$ 4,117.60 | \$ 12,352.80 |
| 4.06 | | Sistema de Video Wal x 4 Pantallas de 65" | LOCAL | VENTA | 2 | | \$ 3,529.40 | \$ 7,058.80 |
| 4.07 | | Equipamiento de Oficina Noc Calquis | LOCAL | VENTA | 1 | | \$ 1,764.70 | \$ 1,764.70 |
| 4.08 | | Software SNMP y PRTG | LOCAL | VENTA | 1 | unid | \$ 1,411.80 | \$ 1,411.80 |
| 4.09 | | Aire Acondicionado 24BTU | LOCAL | VENTA | 2 | | \$ 705.90 | \$ 1,411.80 |
| | | | | | | | | \$ 23,999.90 |
| | | SERVIDORES RACKS & GABINETES Y ACCESORIO | | | | | | \$ 99,645.30 |
| 5 | | IMPLEMENTACION DE FO Y ACOMETIDA ELECTRICA | | | | | | |
| | | INSTALACION DE FO | | | | | | |
| 5.01 | | Tendido de FO (Incluye gestion y materiales) | LOCAL | SERVICIO | 300 | m | \$ 11.40 | \$ 3,420.00 |
| | | | | | | | | \$ 3,420.00 |
| | | INSTALACION DE ENERGIA COMERCIAL | | | | | | |
| 5.02 | | Tendido de Energia Monofasica (incluye gestion y materiales) | LOCAL | SERVICIO | 10,600 | m | \$ 7.10 | \$ 75,260.00 |
| | | | | | | | | \$ 75,260.00 |
| | | IMPLEMENTACION DE FO Y ACOMETIDA ELECTRICA | | | | | | \$ 78,680.00 |

| ANALISIS DE COSTOS DE LA IMPLEMENTACION, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE RED DATOS - CALQUIS | | | | | | | | | |
|---|--|--|-------|--------------------|------|------|-----------------|---------------------|--|
| ITEM | MODELO | DESCRIPCION | MARCA | SERVICIO/ VENTA | CANT | unid | V.V. unid US \$ | V.V. TOTAL US \$ | |
| 6 | IMPLEMENTACION DE OBRAS CIVILES | | | | | | | | |
| | CONSTRUCCION ESTACIONES | | | | | | | | |
| 6.01 | | Torre Ventada / Guide Tower 30 Mts (Incluye pintado norma internacional) | LOCAL | VENTA | 9 | unid | \$ 5,428.60 | \$ 48,857.40 | |
| 6.02 | | Torre Ventada / Guide Tower 40 Mts (Incluye pintado norma internacional) | LOCAL | VENTA | 27 | unid | \$ 6,000.00 | \$ 162,000.00 | |
| 6.03 | | Cimentacion Torre Ventada / Foundation Guide Tower 30 Mts | LOCAL | VENTA | 9 | unid | \$ 2,857.10 | \$ 25,713.90 | |
| 6.04 | | Cimentacion Torre Ventada / Foundation Guide Tower 40Mts | LOCAL | VENTA | 27 | unid | \$ 4,000.00 | \$ 108,000.00 | |
| 6.05 | | Montaje Torre Ventada / Mounting Guide Tower 30 Mts | LOCAL | SERVICIO | 9 | unid | \$ 2,142.90 | \$ 19,286.10 | |
| 6.06 | | Montaje Torre Ventada / Mounting Guide Tower 40 Mts | LOCAL | SERVICIO | 27 | unid | \$ 2,571.40 | \$ 69,427.80 | |
| 6.07 | | Acareo de Materiales Tipo 1 | LOCAL | SERVICIO | 36 | unid | \$ 5,000.00 | \$ 180,000.00 | |
| 6.08 | | Acareo de Materiales Tipo 2 | LOCAL | SERVICIO | - | unid | \$ 3,571.40 | \$ - | |
| 6.09 | | Acareo de Materiales Tipo 3 | LOCAL | SERVICIO | - | unid | \$ 1,428.60 | \$ - | |
| | | | | | | | | \$ 613,285.20 | |
| | SISTEMA DE PUESTA A TIERRA | | | | | | | | |
| 6.10 | | Cerco Perimetrico 7 x 7 x 2.5mts | LOCAL | VENTA | 1 | unid | \$ 6,428.60 | \$ 6,428.60 | |
| 6.11 | | Cerco Perimetrico 4 x 4 x 2.5mts | LOCAL | VENTA | 35 | unid | \$ 2,857.10 | \$ 99,998.50 | |
| 6.12 | | Pozo a tierra Horizontal < 20Ohm | LOCAL | VENTA | 35 | unid | \$ 714.30 | \$ 25,000.50 | |
| 6.13 | | Pozo a tierra Horizontal < 20Ohm + kit Pararrayos | LOCAL | VENTA | 1 | unid | \$ 1,071.40 | \$ 1,071.40 | |
| | | | | | | | | \$ 132,499.00 | |
| | IMPLEMENTACION DE OBRAS CIVILES | | | | | | | | |
| 7 | IMPLEMENTACION DE INFRAESTRUCTURA | | | | | | | | |
| | CENTRO DE CONTROL | | | | | | | | |
| 7.01 | | NOC Installation and commissioning | LOCAL | SERVICIO | 1 | unid | \$ 6,428.60 | \$ 6,428.60 | |
| | | | | | | | | \$ 6,428.60 | |
| | SITE IMPLEMENTACION | | | | | | | | |
| 7.02 | | Site Installation and commissioning | LOCAL | SERVICIO | 36 | unid | \$ 3,571.40 | \$ 128,570.40 | |
| 7.03 | | Link Backhaul Installation and commissioning per | LOCAL | SERVICIO | 82 | unid | \$ 714.30 | \$ 58,572.60 | |
| | | | | | | | | \$ 58,572.60 | |
| | IMPLEMENTACION DE INFRAESTRUCTURA | | | | | | | | |
| | TOTAL IMPLEMENTACION (SIN IGV) | | | | | | | | |
| | | | | | | - | \$ 1,324,107.90 | | |

A continuación, en la siguiente tabla se resume de manera consolidada los costos de los distintos componentes necesarios para desplegar la red de telecomunicaciones en Calquis obteniendo un total para la implementación de USD 1.324.107,90 sin contar el IGV.

Los rubros con mayor peso son las obras civiles con un costo de USD 745.784,20, que incluyen torres, cimentaciones, montaje, cercos, pozos a tierra y logística de transporte de materiales. Este es el componente más crítico por su impacto económico y por ser el soporte físico de toda la red.

Le siguen el equipamiento de red de transporte y datos con un costo de USD 234.843,30, que comprende radios, antenas, routers y accesorios para habilitar la conectividad inalámbrica de los sitios; y los servidores, racks y gabinetes con un costo de USD 99.645,30, necesarios para el alojamiento seguro y la gestión técnica del sistema, tanto en los sitios como en el NOC.

El equipamiento de energía comercial también un costo importante con un total de USD 82.565,20, que cubre rectificadores, baterías y UPS, garantizando la continuidad del servicio ante cortes de energía, mientras que la implementación de fibra óptica y acometida eléctrica tiene un costo de USD 78.680,00, y asegura la integración física y energética de los puntos de la red.

Los sistemas de alarmas y videovigilancia tienen un costo de USD 17.588,70, y refuerzan la seguridad física del equipamiento, y la instalación y puesta en marcha del NOC, los sitios y los enlaces suma USD 65.001,20, reflejando la mano de obra especializada para convertir los equipos y estructuras en una red funcional.

Tabla LXI Presupuesto de implementación infraestructura - Calquis

| Nº | Descripción | Total (sin IGV) |
|----------|---|-----------------------|
| 1 | Equipamiento red transporte y datos | \$234,843.30 |
| | red de transporte (cambuim) | 214,921.50 |
| | accesorios | 19,921.80 |
| 2 | Equipamiento energía comercial | \$82,565.20 |
| | Energía / power 220 vac & 48 vdc | 82,565.20 |
| 3 | Alarmas y video vigilancia | \$17,588.70 |
| | Kit seguridad remota | 17,588.70 |
| 4 | Servidores racks & gabinetes y accesorio | \$99,645.30 |
| | Racks & gabinetes | 75,645.40 |
| | Servidores | 23,999.90 |
| 5 | Implementación de FO y acometida eléctrica | \$78,680.00 |
| | Instalación de fo | 3,420.00 |
| | Instalación de energía comercial | 132,499.00 |
| 6 | Implementación de obras civiles | \$745,784.20 |
| | Construcción estaciones | 613,285.20 |
| | Sistema de puesta a tierra | 132,499.00 |
| 7 | Implementación de infraestructura | \$65,001.20 |
| | Centro de control | 6,428.60 |
| | Site implementación | 58,572.60 |
| | Total, implementación (sin IGV) | \$1,324,107.90 |

La siguiente tabla detalla el costo previsto para la supervisión técnica de la implementación de la red, una actividad indispensable para garantizar el cumplimiento de estándares, plazos y especificaciones técnicas durante la ejecución.

El presupuesto considera dos ingenieros especializados: uno civil y otro en telecomunicaciones o de sistemas. Ellos representan el control directo de calidad y la verificación de los avances de obra tanto en la infraestructura física como en los sistemas de comunicaciones.

Se incluye además un componente de movilización, compuesto por el uso de una camioneta 4x4 y el combustible y otros insumos asociados, necesarios para el traslado del personal de supervisión a los distintos sitios, que en este proyecto se ubican en áreas rurales dispersas.

El costo directo asciende a USD 37.870,00, sobre el cual se aplican gastos generales y utilidad, sumando USD 5.680,50 adicionales. De este modo, el total del presupuesto de supervisión se fija en USD 43.550,50.

Tabla LXII Presupuesto supervisión de obra implementación – Calquis

| Nº | Descripción | Total (sin IGV) |
|-----------|--|------------------------|
| 1 | Personal | |
| | Ing. Supervisor civil (zonal) | \$ 12,000.00 |
| | Ing. Supervisor telecomunicaciones o de sistemas (zonal) | \$ 11,200.00 |
| 2 | Movilización | |
| | Camioneta 4 x4 | \$ 9,780.00 |
| | Combustible y otros | \$ 4,890.00 |
| | Costo directo | \$ 37,870.00 |
| | G. Generales (10%) | \$ 3,787.00 |
| | Utilidad (5%) | \$ 1,893.50 |
| | Total (sin IGV) | \$ 43,550.50 |

La siguiente tabla presenta el presupuesto destinado a la elaboración del expediente técnico, es decir, el conjunto de estudios y documentos que respaldan y autorizan la ejecución del proyecto. Su objetivo es garantizar que el despliegue de la red cuente con diseños validados, cálculos correctos y criterios normativos antes del inicio de las obras.

Se incluyen distintos estudios especializados: Topografía, fundamental para ubicar con precisión las torres y el NOC; estudio mecánico de suelos, necesario para definir las cimentaciones; Arquitectura para la distribución y adecuación de espacios; Estructura para garantizar la estabilidad de torres y gabinetes; Eléctrico que define acometidas y respaldo energético; y Telecomunicaciones que diseña el esquema de enlaces, frecuencias y dimensionamiento de la red.

Asimismo, se consideran costos de movilización como el uso de camioneta 4x4 y combustible/otros para el personal que realiza los levantamientos en campo. Ascendiendo el costo a USD 17.698,50.

Tabla LXIII Presupuesto expediente técnico implementación – Calquis

| Nº | Descripción | TOTAL (Sin IGV) |
|----------|----------------------------------|---------------------|
| 1 | Documentación | |
| | Topografía | \$ 5,400.00 |
| | EMS (Estudio mecánico de suelos) | \$ 8,100.00 |
| | Arquitectura | \$ 10,800.00 |
| | Estructura | \$ 9,450.00 |
| | Eléctrico | \$ 8,100.00 |
| | Telecom | \$ 9,450.00 |
| 2 | Movilización | |
| | Camioneta 4 x4 | \$ 1,260.00 |
| | combustible y otros | \$ 630.00 |
| | Costo directo | \$ 15,390.00 |
| | G. Generales (10%) | \$ 1,539.00 |
| | Utilidad (5%) | \$ 769.50 |
| | Total (sin IGV) | \$ 17,698.50 |

La tabla siguiente presenta el estimado de costos anuales asociados al mantenimiento preventivo y correctivo de la red de telecomunicaciones implementada en el proyecto Calquis. Se incluyen los principales componentes que, por su naturaleza y criticidad, requieren inspecciones periódicas, ajustes, limpieza o reposición a lo largo de la vida útil del sistema.

En primer lugar, las torres metálicas de 30 y 40 metros concentran el mayor peso del mantenimiento, debido a la necesidad de inspecciones estructurales, ajustes de vientos y protección anticorrosiva anual, asegurando su estabilidad mecánica y seguridad operativa.

Las baterías, fundamentales para el respaldo energético, exigen verificaciones semestrales de estado y una reposición completa cada 3 a 5 años, lo que se traduce en un fondo anual destinado a reemplazos planificados.

Los radios ePMP 4600L, componentes electrónicos clave de los enlaces de microondas, cuentan con garantía extendida en los primeros dos años, pero a partir del tercero se debe prever una tasa de fallas que obligue a reemplazos puntuales para mantener la disponibilidad del servicio.

Las antenas parabólicas también requieren tareas preventivas, como limpieza, verificación de alineación y revisión de soportes, así como la reposición eventual en caso de daños por condiciones ambientales extremas.

Finalmente, el sistema de videovigilancia y alarmas necesita mantenimientos menores como limpieza de cámaras, pruebas de sensores y reemplazo de componentes, garantizando la protección física de los sitios y del equipamiento activo.

En conjunto, estos costos estimados proporcionan una referencia del gasto recurrente necesario para preservar la calidad, continuidad y seguridad del servicio, asegurando que la inversión inicial de la red conserve su valor funcional a lo largo de su ciclo de vida operativo. Obteniendo un costo total de USD 34.500,00.

Tabla LXIV Presupuesto el mantenimiento anual - Calquis

| Nº | Descripción | Total (sin IGV) |
|-----------|---------------------------|------------------------|
| 1 | Componente | |
| | Torres metálicas | \$ 20,000.00 |
| | Baterías 12 v-55 ah | \$ 5,000.00 |
| | Radios ePMP 4600I | \$ 2,000.00 |
| | Antenas parabólicas | \$ 2,000.00 |
| | Videovigilancia y alarmas | \$ 4,000.00 |
| 2 | Movilización | |
| | Camioneta 4 x4 | \$ 1,000.00 |
| | Combustible y otros | \$ 500.00 |
| | Total (sin IGV) | \$ 34,500.00 |

En la tabla LXVI se presenta el resumen del costo global del proyecto de implementación de la red de telecomunicaciones en Calquis, integrando tanto los costos iniciales como los costos anuales estimados de mantenimiento. En ella se consolidan los principales componentes presupuestales necesarios para llevar a cabo el despliegue, control y sostenibilidad del sistema.

La suma de estos componentes determina un costo total sin IGV de USD 1.419.856,90, cifra que refleja de manera integral la inversión inicial y los recursos necesarios para mantener en condiciones óptimas la red de telecomunicaciones.

Tabla LXV Gasto total de implementación

| Nº | Descripción | Sub total (sin IGV) |
|------------------------|--|------------------------|
| 1 | Presupuesto expediente técnico implementación - Calquis | \$ 17,698.50 |
| 2 | Presupuesto supervisión de obra implementación - Calquis | \$ 43,550.50 |
| 3 | Presupuesto de implementación infraestructura - Calquis | \$ 1,324,107.90 |
| 4 | Presupuesto el mantenimiento anual - Calquis | \$ 34,500.00 |
| Total (sin IGV) | | \$ 1,419,856.90 |

3.2. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados

Esta investigación fue de tipo aplicada [47], ya que buscó la aplicación de conocimientos tecnológicos sobre el diseño de redes de telecomunicaciones basada en radioenlaces en el distrito de Calquis, región Cajamarca. El nivel estudio fue es descriptivo [48], permitiendo detallar la estructura y funcionamiento de la red, además de evaluar su viabilidad económica. Emplea un enfoque mixto [49], combinando métodos cuantitativos para analizar demanda de ancho de banda, throughput y costos, y cualitativos para la selección de antenas y transmisores. Su diseño es no-experimental, recopilando datos sin manipular variables y utilizando estudios de caso para examinar aspectos técnicos y geográficos de la infraestructura.

La técnica principal de recolección de datos fue la revisión documental y técnica, que incluyó el análisis de informes previos, estadísticas gubernamentales, bases de datos cartográficas como Google Earth, mapas topográficos del IGN, reportes del MTC, proyectos similares y normativas de la UIT-R. Como instrumento se utilizó una ficha de recopilación estructurada, en la cual se organizaron los datos geográficos como altitud, relieve, coordenadas, y técnicos como distancias, frecuencias, potencia de transmisión y socioeconómicos como número de usuarios proyectados. Este procedimiento permitió contextualizar el diseño propuesto y evaluar la infraestructura existente, asegurando que la información recopilada fuera pertinente y alineada con los objetivos de la investigación. La validez de los datos se garantizó mediante el uso de fuentes oficiales y la triangulación entre documentos institucionales, software especializado y

literatura científica, mientras que la confiabilidad se fortaleció con el empleo de herramientas reconocidas internacionalmente para las simulaciones y cálculos de desempeño.

El tratamiento de datos se realizó en dos fases: en primer lugar, los datos geográficos se procesaron en herramientas de georreferenciación y simulación como Link Planner y Google Earth Pro, lo que permitió identificar perfiles de enlace y líneas de vista. En segundo lugar, los datos técnicos fueron modelados para calcular throughput, relación señal/ruido (SNR), márgenes de desvanecimiento y disponibilidad, aplicando los criterios establecidos por la UIT-R. Para el análisis económico se utilizaron cálculos de estadística descriptiva en Excel, estimando los costos de implementación, operación y mantenimiento.

Finalmente, la presentación de resultados se realizó mediante tablas y gráficos que exponen comparativamente el desempeño de los enlaces, los costos proyectados y la cobertura lograda. Asimismo, se incluyen mapas de los perfiles de enlace que ilustran la ubicación de las torres y repetidoras propuestas, asegurando claridad en la interpretación. El análisis inferencial no fue aplicable debido a la naturaleza no experimental del estudio, sin embargo, la validez del diseño se respaldó mediante la validación de expertos en telecomunicaciones, quienes confirmaron la pertinencia y factibilidad técnica del diseño propuesto.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Tras haber desarrollado el diseño de la red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para el distrito de Calquis, es momento de evaluar los resultados obtenidos de acuerdo a los objetivos planteados. Este análisis considera no solo los parámetros técnicos obtenidos en las simulaciones y cálculos, sino también la evaluación económica y la validación del diseño por parte de especialistas en telecomunicaciones.

Esta evaluación se fundamenta en indicadores técnicos como el throughput, la disponibilidad, el margen de desvanecimiento y la modulación utilizada, así como en indicadores económicos vinculados a los costos de implementación, operación y mantenimiento.

De acuerdo con los objetivos planteados, a continuación, se discute los resultados; en relación al primer objetivo específico: Identificar la ubicación óptima de torres y repetidoras asegurando un alcance adecuado y una conectividad eficiente entre los centros poblados.

En primera instancia, se determinó la ubicación estratégica de las torres considerando la topografía accidentada del distrito de Calquis con la ayuda de Google Earth. A través del análisis de perfiles de enlace y la simulación de cobertura en Linkplanner, se identificaron puntos más adecuados para la instalación de torres, maximizando la línea de vista y reduciendo pérdidas por obstrucciones geográficas.

Asimismo, luego de consultar el diseño con expertos se validaron las ubicaciones y se optimizó la cantidad de torres a implementar, evitando redundancias innecesarias y reduciendo costos asociados a infraestructura. Este aspecto es clave, pues en zonas rurales con recursos limitados resulta indispensable equilibrar eficiencia técnica con viabilidad económica. En este sentido, la propuesta asegura no solo conectividad eficiente, sino también un despliegue sostenible a lo largo del tiempo.

Los resultados obtenidos demuestran que las ubicaciones seleccionadas permiten una cobertura integral a los centros poblados, garantizando que la señal llegue con un nivel adecuado de potencia y calidad.

Adicionalmente, se observó que las ubicaciones estratégicas permiten considerar futuras expansiones de la red, lo que asegura que la infraestructura actual no quede obsoleta ante la creciente demanda de conectividad.

De acuerdo al segundo objetivo específico: Determinar las configuraciones técnicas óptimas, como modulaciones y parámetros de los radioenlaces que permitan un desempeño eficiente de la red teniendo en cuenta las condiciones geográficas y climáticas del distrito de Calquis; este análisis de desempeño técnico evidenció que los radioenlaces diseñados alcanzan niveles de throughput que garantizan un servicio estable y confiable. Los enlaces evaluados mostraron capacidades de transmisión superiores a los 2.5 GB por enlace, lo cual es suficiente para soportar las demandas actuales de los usuarios y brindar margen de escalabilidad futura para más demanda de usuarios. Asimismo, los márgenes de desvanecimiento obtenidos superiores a 20 dB en la mayoría de los casos asegura confiabilidad de los enlaces incluso frente a condiciones climáticas adversas que enfrenta el distrito, como lluvias, niebla o variaciones atmosféricas comunes en la zona.

En cuanto a la modulación, se validó que los equipos seleccionados pueden operar con modulaciones de alta eficiencia como es la 4096-QAM en condiciones óptimas, manteniendo un equilibrio entre capacidad de transmisión y robustez del enlace. Por otra lado todos los enlaces diseñados cuentan con una disponibilidad de 99.99 % para que casi siempre esté operativa la red y no tengan inconvenientes los usuarios. Esto garantiza que la red diseñada cumpla con los estándares internacionales de calidad en telecomunicaciones, permitiendo un desempeño eficiente incluso bajo escenarios de exigencia.

Un punto importante a resaltar es que, aunque la topografía montañosa y accidentada de Calquis representa un reto considerable, el diseño basado en enlaces en paralelo y el uso de equipos de última generación permiten mitigar estos inconvenientes, asegurando que la conectividad no se vea comprometida por limitaciones geográficas.

Por parte del tercer objetivo específico: Realizar un análisis de costos detallado que incluya la implementación, operación y el mantenimiento de la red de telecomunicaciones; se realizó un análisis de costos detallado que incluya la

implementación, operación y el mantenimiento de la red de telecomunicaciones sacando un costo total de USD 1.419.856,90 sin IGV, resultado de integrar la implementación de infraestructura, la supervisión técnica, la elaboración del expediente técnico y los costos de mantenimiento anual.

Este análisis dio como resultado que uno de los costos más significativos corresponde a las obras civiles con un valor de USD 745.784,20, lo que representa más del 52% del total y confirma que la geografía accidentada y la dispersión de los sitios en zonas rurales generan elevados costos en cimentaciones, torres, montaje y logística de transporte.

Mientras que el equipamiento de red de transporte y datos asciende a USD 234.843,30, destacando los radios Cambium ePMP 4600L con antenas parabólicas, que constituyen el eje de la conectividad. Estos equipos fueron seleccionados por su capacidad de throughput, alta disponibilidad y cobertura, características esenciales para garantizar la conectividad de los usuarios. Asimismo, el equipamiento energético tiene un costo de USD 82.565,20 y los servidores, racks y gabinetes un costo de USD 99.645,30; que aseguran la continuidad eléctrica y la gestión centralizada de la red, mientras que la fibra óptica y acometida eléctrica tienen un costo total de USD 78.680,00 y complementan la integración física de los sitios al backbone de datos.

Este análisis consideró los costos de adquisición de antenas parabólicas, radios ePMP de alta capacidad, protectores contra sobretensiones, torres y accesorios de instalación entre otros productos. Asimismo, se incluyeron gastos de operación y mantenimiento, contemplando mano de obra técnica.

Otros costos de los componentes complementarios del proyecto que consideran la seguridad, gestión técnica y respaldo normativo, incluyendo la videovigilancia y alarmas, los costos de instalación y puesta en marcha, la supervisión de obra y la elaboración del expediente técnico representan un costo total de USD 143,838.90. En conjunto, estos elementos aseguran la protección física de la infraestructura, la correcta operatividad desde el inicio, el cumplimiento de estándares técnicos durante la ejecución y la validación documental previa al despliegue de la red.

Finalmente, el mantenimiento anual se proyecta en USD 34.500,00, equivalente al 2,4% del CAPEX, cubriendo actividades preventivas y correctivas en torres, baterías, radios, antenas y sistemas de seguridad. Este monto garantiza la sostenibilidad y disponibilidad de la red a lo largo de su ciclo de vida.

Este análisis de costos refleja que el proyecto no solo optimiza el uso de recursos, sino que además resulta más accesible en comparación con alternativas como el tendido de fibra óptica en zonas montañosas, cuyo costo de instalación es significativamente mayor. En este sentido, el modelo basado en radioenlaces representa una solución eficiente y adaptable a las características geográficas y socioeconómicas del distrito.

Al evaluar el objetivo general, se confirma que el diseño propuesto de la red de telecomunicaciones mediante radioenlaces interconecta de manera eficiente los centros poblados del distrito de Calquis con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, cumpliendo con las necesidades de conectividad y optimizando la ubicación de torres y repetidoras. El diseño garantiza eficiencia técnica, reducción de costos frente a otras alternativas y ha sido validado por expertos, demostrando ser técnicamente robusto, económicamente viable y socialmente relevante. Su implementación generará beneficios directos en diversos sectores: en educación, facilitará el acceso a plataformas virtuales y recursos digitales; en salud, permitirá la telemedicina y la comunicación entre establecimientos [50]; en el ámbito económico, impulsará el comercio digital y la productividad local [51]; en el sector social, fomentará la inclusión digital y la participación comunitaria; y en el institucional, fortalecerá la gestión pública mediante una conectividad estable entre las instituciones, centros educativos y postas médicas [52]. En conjunto, el proyecto contribuye a reducir brechas digitales, mejorar la calidad de vida de los habitantes y promover un desarrollo sostenible y escalable en el distrito de Calquis.

4.1. Discusión de resultados según antecedentes

En concordancia con García [9], quien en su investigación en España demostró que los radioenlaces pueden garantizar niveles óptimos de señal en zonas rurales con pérdidas de propagación controladas y buena calidad de enlace, los resultados obtenidos en el distrito de Calquis confirman que una adecuada selección de ubicaciones estratégicas y configuraciones técnicas permite

alcanzar potencias y márgenes de desvanecimiento superiores a 20 dB, asegurando un desempeño confiable incluso en entornos montañosos. Ambos estudios coinciden en que la clave del éxito radica en la correcta configuración de los enlaces y la adaptación tecnológica al contexto geográfico.

De forma similar, Sansaloni [10] concluyó que el diseño de redes inalámbricas en áreas rurales resulta viable técnica y económicamente, logrando un throughput suficiente para cubrir las necesidades de los usuarios y un modelo sostenible en el tiempo. En Calquis, los resultados muestran capacidades de transmisión superiores a 2.5 Gbps por enlace y una disponibilidad del 99.99 %, lo que refuerza la idea de que las tecnologías basadas en radioenlaces representan una alternativa eficiente y escalable frente a soluciones más costosas como la fibra óptica en terrenos accidentados. Ambos trabajos evidencian que el equilibrio entre capacidad técnica y costos razonables constituye un factor decisivo para garantizar conectividad rural.

En relación con lo encontrado por Fernández et al. [11] en Colombia, donde se demostró que las tecnologías inalámbricas ofrecen una cobertura extensa y disponibilidad del 99.99 % en zonas rurales, el proyecto desarrollado en Calquis coincide en asegurar altos niveles de disponibilidad y confiabilidad en los enlaces, aún frente a condiciones climáticas adversas. Sin embargo, a diferencia del estudio colombiano, el diseño en Calquis incorpora el uso de equipos de última generación con modulaciones avanzadas como 4096-QAM, lo que permite optimizar el throughput y ampliar el potencial de crecimiento de la red. De este modo, se comparte la visión de que los sistemas inalámbricos son una solución efectiva, aunque en Calquis se propone una versión tecnológicamente más robusta.

En concordancia con lo encontrado por Mosquera [12], quien en Colombia evidenció la robustez de las redes WiMAX frente al incremento de usuarios y la baja pérdida de paquetes, los resultados en Calquis también demuestran que la red diseñada puede operar de manera estable incluso ante condiciones adversas, gracias a márgenes de desvanecimiento superiores a 20 dB y la disponibilidad de 99.99 %. Aunque se emplearon tecnologías distintas, ambos

estudios coinciden en que la estabilidad y resiliencia de la red son factores determinantes para garantizar la sostenibilidad del servicio.

En concordancia con Peña [13], quien identificó la necesidad de implementar redes de datos y radioenlaces para mejorar los servicios de conectividad en Piura, el análisis realizado en Calquis también evidencia que las comunidades rurales presentan una demanda insatisfecha que puede ser atendida mediante infraestructuras basadas en radioenlaces. No obstante, mientras en Piura se centró en diagnosticar la necesidad de conectividad, el presente proyecto va más allá al proponer un diseño validado técnica y económicamente, con costos de implementación de USD 1.419.856,90, lo cual confirma que esta alternativa es viable para cerrar la brecha digital y sostenible en el tiempo.

De acuerdo con Dongo [14], quien estableció una relación positiva entre la banda ancha y la inclusión tecnológica en comunidades rurales, los resultados en Calquis coinciden en mostrar que la red diseñada no solo es técnicamente eficiente, sino que además contribuye a mejorar la calidad de vida de la población al posibilitar acceso a servicios digitales como educación, telemedicina y comercio electrónico. De este modo, se refuerza la idea de que la conectividad es un factor clave de desarrollo social.

Finalmente, en comparación con lo expuesto por Silva [15], quien en Huaral evidenció la relación entre la disponibilidad de banda ancha y el desarrollo de competencias en los estudiantes, el caso de Calquis se orienta en la misma línea: la infraestructura propuesta permitirá que los centros educativos accedan a mejores recursos digitales, fomentando el aprendizaje y reduciendo la brecha digital. Aunque el enfoque de Silva fue más educativo y el presente trabajo más técnico, ambos coinciden en que la banda ancha representa una herramienta decisiva para el desarrollo humano y social en contextos rurales.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El diseño propuesto de la red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para el distrito de Calquis cumplió con los objetivos planteados, demostrando en el ámbito teórico y técnico ser una alternativa viable ya que la propuesta permite la interconexión de los centros poblados con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica. La optimización en el número de torres y repetidoras permitió garantizar cobertura integral y eficiencia en el desempeño, reduciendo costos de infraestructura y mantenimiento sin afectar la calidad del servicio. Los resultados de la simulación muestran que, con una infraestructura reducida pero estratégicamente planificada, es posible alcanzar una conectividad robusta, escalable y adaptada a las proyecciones de crecimiento. Asimismo, la validación de los parámetros técnicos respalda la pertinencia del diseño. Finalmente, al responder a las condiciones geográficas y socioeconómicas propias del distrito, el diseño se presenta como una solución aplicable y con alto potencial de implementación futura, contribuyendo al desarrollo digital del distrito.

El análisis geográfico y de perfiles de enlace demostró que la selección de torres y repetidoras fue adecuada para asegurar línea de vista y cobertura integral de los centros poblados. La reducción en el número de torres, respecto a proyectos similares en otras regiones, permitió optimizar costos de infraestructura y mantenimiento sin sacrificar calidad de servicio. Asimismo, las ubicaciones seleccionadas presentan potencial de expansión futura, lo que fortalece la sostenibilidad del diseño a lo largo del tiempo.

Las configuraciones técnicas propuestas demostraron un desempeño superior a los estándares mínimos recomendados por la UIT-R, con throughput superiores a 2500 Mbps por enlace, márgenes de desvanecimiento en su mayoría mayores a 20 dB y disponibilidad cercana al 99.999 %. Estos resultados garantizan una operación confiable incluso bajo condiciones climáticas adversas, lo que confirma que la red diseñada tiene la capacidad no solo de satisfacer la demanda actual, sino también de sostener un crecimiento en el número de usuarios largo plazo.

El análisis económico evidenció que la implementación de radioenlaces en Calquis es aproximadamente un 40 % más económica que el tendido de fibra óptica en un entorno geográfico accidentado. La inversión inicial resulta viable y los costos de operación y mantenimiento son bajos gracias a la selección de equipos robustos y eficientes. Además, se comprobó que este tipo de inversión tendría un efecto multiplicador en el desarrollo local, facilitando el acceso a educación en línea y otros servicios digitales, lo que la convierte en una alternativa estratégica tanto para el gobierno como para empresas privadas interesadas en expandir servicios en zonas rurales.

Se concluye que el diseño de la red de telecomunicaciones basada en radioenlaces en el distrito de Calquis genera un impacto integral en los ámbitos social, económico y educativo. En el aspecto social, contribuye a la inclusión digital y mejora la comunicación entre las comunidades rurales, fortaleciendo la cohesión y participación ciudadana. En el ámbito económico, impulsa el desarrollo local al fomentar nuevas oportunidades de emprendimiento, comercio electrónico y acceso a servicios en línea, optimizando así la productividad y competitividad del distrito. En el ámbito educativo, facilita el acceso a plataformas virtuales de aprendizaje, capacitaciones y recursos tecnológicos que elevan la calidad de la educación. En conjunto, la implementación de esta red representa una herramienta estratégica para mejorar la calidad de vida de los habitantes y promover un desarrollo sostenible y equitativo en Calquis.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda a las autoridades del distrito y entidades involucradas gestionar alianzas estratégicas con operadores de telecomunicaciones y programas estatales de inclusión digital, con el fin de buscar el financiamiento de la implementación de la red de telecomunicaciones de manera que se generen modelos sostenibles de inversión y gestión de la red, fortaleciendo la viabilidad del proyecto y asegurando su continuidad en el tiempo.

Se sugiere implementar programas de capacitación en operación y mantenimiento de la infraestructura para los residentes del distrito, con el objetivo de asegurar la sostenibilidad técnica del proyecto y promover la apropiación comunitaria de la red, evitando la dependencia total de actores externos.

Se recomienda proteger legalmente y físicamente los emplazamientos seleccionados para las torres, evitando invasiones o cambios de uso de suelo que comprometan su operación.

Se sugiere que al implementar el diseño consideren la redundancia en los enlaces principales y habilitar la modulación adaptativa para mantener la calidad del servicio ante variaciones climáticas extremas. Asimismo, es recomendable capacitar al personal local en operación básica de los equipos, para reducir tiempos de respuesta ante eventualidades y fortalecer la autonomía de la comunidad en la gestión tecnológica.

CAPÍTULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Hudson, «5G: Challenges for Rural and Developing Regions», The Mobile Century. Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://themobilecentury.com/5g-challenges-for-rural-and-developing-regions/>
- [2] C. Wood, «5G in Rural areas», GSMA 5G Transformation Hub. Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gsma.com/5GHub/ruralareas>
- [3] A. Ortega, «Al menos 77 millones de personas sin acceso a internet de calidad en áreas rurales». Accedido: 11 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iadb.org/es/noticias/al-menos-77-millones-de-personas-sin-acceso-internet-de-calidad-en-areas-rurales>
- [4] F. Yañez, «Una nueva tecnología que promete reducir la brecha digital e impulsar la conectividad en comunidades remotas | Microsoft». Accedido: 11 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://microsoft.diariofinanciero.cl/tv-whitespaces-una-nueva-tecnologia-que-promete-reducir-la-brecha-digital-e-impulsar-la-conectividad-en-comunidades-remotas/>
- [5] N. Boggio, «La brecha de la conectividad en el Perú». Accedido: 11 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://elperuano.pe/noticia/160292-la-brecha-de-la-conectividad-en-el-peru>
- [6] H. Aguirre, «América Latina encara el reto de impulsar la conectividad digital». Accedido: 11 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://elperuano.pe/noticia/115836-america-latina-encara-el-reto-de-impulsar-la-conectividad-digital>
- [7] GRC, «Nota de prensa N° 379 - 2019 - GR.CAJ/DC.RR.PP.» Accedido: 11 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://portal.regioncajamarca.gob.pe/noticias/77-de-la-poblacion-en-la-region-cajamarca-no-tiene-acceso-internet>
- [8] «Reporte regional de indicadores sociales del departamento de Cajamarca». Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sdv.midis.gob.pe/redinforma/Upload/regional/Cajamarca.pdf>
- [9] A. García, «Evaluación y diseño de un sistema de red para dar servicios de banda ancha en entornos rurales», 2023, Accedido: 20 de noviembre de

2024. [En línea]. Disponible en: <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/148382/1/agarciaatrujTFMargarciatrujTFM0623memoria2023.pdf>
- [10] S. Sansaloni, «Diseño y despliegue de una red WiMAX para entornos rurales en núcleos de población dispersos en el interior de la Comunidad Valenciana.», 2022, Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/199327/Sansaloni%20-%20Diseno%20y%20despliegue%20de%20una%20red%20WiMAX%20para%20entornos%20rurales%20en%20nucleos%20de%20poblacion%20di..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [11] M. Fernandez y D. Gaviria, «Diseño de una red inalámbrica con tecnología wimax para la vereda la Chacua del municipio de Soacha - Cundinamarca», 2022, Accedido: 24 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/077cf525-56b3-4c1b-a9e4-bb5d4fad1820/content>
- [12] H. B. Mosquera Amud, «Diseño y simulación de una arquitectura de red para mejorar la conexión a internet en una zona de baja densidad en Colombia, usando tecnología WiMAX», 2021, Accedido: 25 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/6199fed2-30fd-4764-b309-cacf5f6456f7/content>
- [13] A. F. Peña Nuñez, «Propuesta de implementación de una red de datos y radio enlaces para el Clas Canchaque – Piura; 2021.», 2022, Accedido: 10 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uladech.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13032/26705/RADIO_ENLACES_PENA_NUNEZ_ANDERSON.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [14] L. V. Dongo Guerrero, «Internet de banda ancha y la inclusión tecnológica de la población rural del distrito de Abancay, 2022.», 2022, [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/116330/Dongo_GLV-SD.pdf?sequence=1

- [15] D. M. Silva Gurrionero, «Banda ancha y TIC's en el desarrollo de competencias de estudiantes de instituciones educativas del distrito de Chancay, Huaral - Perú, primer semestre 2020», 2022, Accedido: 11 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/5908dc6d-0711-4e95-8432-af9d3ecf4488/content>
- [16] R. L. Freeman, *Fundamentals of telecommunications*. en Wiley series in telecommunications and signal processing. New York Weinheim: Wiley, 1999. doi: 10.1002/0471224162.
- [17] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, «Redes de Telecomunicaciones», MINTIC Colombia. Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mintic.gov.co/portal/715/w3-article-5235.html>
- [18] Vhngroup, «Radio enlaces: Que es PtP - PtMP y Backhaul - Vhngroup: Integramos Seguridad y Tecnología.» Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://vhngroup.com/tecnico/radio-enlaces-que-es-ptp-ptmp-y-backhaul/>
- [19] Tesswave, «¿Qué es una red mallada y cómo funciona?» Accedido: 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tesswave.com/es/what-is-mesh-network/>
- [20] T. S. Rappaport, «Wireless communications: principles and practice», 2025, [En línea]. Disponible en: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781009489829_A49239167/preview-9781009489829_A49239167.pdf
- [21] M. Aquino, «Administración y seguridad de redes». Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/admoysesgederedes/home/unidad-l/rendimiento>
- [22] A. Garza, «Disponibilidad de la red y su importancia en mi negocio», Quanti. Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://quanti.com.mx/articulos/disponibilidad-la-red-importancia-negocio/>
- [23] L. Escobar, «Propagación de ondas: margen de desvanecimiento», Propagación de ondas. Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en:

<http://propagaciondeondascom1.blogspot.com/2012/11/margen-de-desvanecimiento.html>

- [24] SISTELEC, «Radioenlaces: Guía Completa», Blog Sitelec. Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sistelec.es/blog/radioenlaces/>
- [25] K. Ortega, «¿Qué es el diseño de red?», Saint Leo University. Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://worldcampus.saintleo.edu/blog/que-es-el-diseno-de-red-diseno-de-red-de-computadoras>
- [26] R. L. Garcia Carpio, «Evaluación de Impacto de los Proyectos de Telecomunicaciones, relacionados con el acceso a internet de banda ancha en Perú.» Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.investinperu.pe/RepositorioAPS/0/1/JER/IMPACTO_PROY_T ELECOMUNICACIONES/Impacto-de-los-Proyectos-de-Telecomunicaciones.pdf
- [27] Yamamoto, «Conceptual framework for rural transport connectivity». Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.unescap.org/sites/default/files/Chapter%203%20-%20Conceptual%20framework%20for%20rural%20transport%20connectivity.pdf>
- [28] J. More, «Estado de la infraestructura de la red de transporte (backhaul) y efecto del despliegue de infraestructura de acceso en la velocidad de Internet móvil». Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.osiptel.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12630/823/documento-trabajo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [29] Javier More, «Estado de la infraestructura de la red de transporte (backhaul) y efecto del despliegue de infraestructura de acceso en la velocidad de Internet móvil». Accedido: 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.osiptel.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12630/823/documento-trabajo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [30] D. Liberto, «Bandwidth Definition: Overview and History», Investopedia. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.investopedia.com/terms/b/bandwidth.asp>
- [31] W. Stallings, *Wireless communications and networks*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf
- [32] J. C. Vesga, G. Granados, y M. F. Contreras, «Modelo empírico que permite evaluar el throughput de la red LAN basada en el estándar Homeplug AV para la transmisión de voz sobre el protocolo IP», 2024, [En línea]. Disponible en: https://unab.edu.co/sites/default/files/MemoriasGrabadas/papers/capitulo28_paper_16.pdf
- [33] L. J. Mavita Granillo, «Detección de intensidad y fase de luz visible utilizando placas zonales de Fresnel con dominios ferroeléctricos controlados por voltaje», 2018, [En línea]. Disponible en: https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2420/3/tesis_M%c3%a1vita%20Granillo_Luis%20Joel_13_ago_2018Ww.pdf
- [34] J. M. Torres, Á. Pinto-Mangones, M. R. Macea A, N. A. Pérez-García, y L. M. Rujano, «Modelo para la estimación de las pérdidas de propagación en redes WLAN operando en 2,4 ghz y 5,8 ghz, para ambientes interiores de edificios comerciales», *Univ. Cienc. Technol.*, vol. 20, n.º 78, pp. 42-53, mar. 2016, Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1316-48212016000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [35] J. F. P. Morales, «La Conectividad en el contexto rural», *Rev. Sci.*, vol. 7, n.º 26, Art. n.º 26, may 2022, doi: 10.29394/Scientific.issn.2542-2987.2022.7.26.3.53-73.
- [36] L. A. Mostacero Agama, «Análisis de la latencia del servicio de internet y su impacto en las aplicaciones de internet de las cosas (IoT)». Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5def1f72-c88a-47f0-b6da-b5b774329c39/content>

- [37] S. Sinche, «Guía para Evaluar la Fiabilidad en Redes de Comunicaciones». Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/24032/1/2018AJIEE-18.pdf>
- [38] T. Pozo y J. Luis, «Análisis de frecuencia de comunicaciones de emergencia con medios acuáticos utilizando equipos HF y VHF en la Isla San Cristóbal», 2023, [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/26352/1/UPS-GT004783.pdf>
- [39] Rodrigo Morocho, Nancy Magaly Loja Mora, y María Contenido Segarra, «Analysis of Methodologies of Data Networks LAN», *ResearchGate*, ago. 2025, doi: 10.22161/ijaers/3.9.9.
- [40] INEI, «Compendio Estadístico Cajamarca 2017». Accedido: 25 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1492/libro.pdf
- [41] H. P. M. Vasquez y J. J. Diaz, «Estudio de diagnostico y zonificacion para fines de demarcacion territorial de la provincia de San Miguel», 2025, [En línea]. Disponible en: https://dt.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/documentos/EDZ/san_miguel/doc/MemoriaDescriptivaEDZSanMiguel.pdf
- [42] Dirección Regional De Salud Cajamarca, «Plan Operativo Institucional Consistenciado 2025». Accedido: 25 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.diresacajamarca.gob.pe/media/portal/TUNGW/documento/73895/POI_2025_CONSISTENCIADO_.pdf
- [43] Municipalidad Provincial de San Miguel, «Plan de Desarrollo Concertado 2019-2029». Accedido: 25 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.muni-sanmiguel.gob.pe/phocadownload/Transparencia/NormasLegalesEmitidas/PlanesyPoliticasy2019/PDC-2019-2029.pdf>
- [44] Ministerio De Transportes Y Comunicaciones, «R. M. N° 1197-2022-MTC/01.03.- Aprueban la velocidad mínima para el acceso a internet de banda ancha», EDUCACIONENRED.PE. Accedido: 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en:

- <https://noticia.educacionenred.pe/2022/12/rm-1197-2022-mtc-01-03-aprueban-velocidad-minima-para-acceso-internet-banda-263951.html>
- [45] OSIPTEL, «OSIPTEL adecúa reglamento de calidad para garantizar el 70% de velocidad mínima en servicio de Internet de banda ancha». Accedido: 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.osiptel.gob.pe/portal-del-usuario/noticias/osiptel-adecua-reglamento-de-calidad-para-garantizar-el-70-de-velocidad-minima-en-servicio-de-internet-de-banda-ancha/>
- [46] DPL News, «Perú establece los nuevos umbrales de velocidad mínima de Internet». Accedido: 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dplnews.com/peru-establece-los-nuevos-umbrales-de-velocidad-minima-de-internet/>
- [47] R. Hernandez Sampieri, «Metodología de la Investigación SAMPIERI.pdf». Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://187.191.86.244/rceis/registro/Metodolog%C3%ADa%20de%20la%20Investigaci%C3%B3n%20SAMPIERI.pdf>
- [48] F. Arias, «El proyecto de investigación F.G. Arias 2012». Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://abacoenred.org/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigaci%C3%B3n-F.G.-Arias-2012-pdf-1.pdf>
- [49] R. Hernandez Sampieri, P. Baptista Lucio, y C. Fernandez Collado, «Metodología Investigación Científica 6ta ed.pdf». Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- [50] B. Crock Bauerly, R. F. McCord, R. Hulkower, y D. Pepin, «Broadband Access as a Public Health Issue», *J. Law Med. Ethics J. Am. Soc. Law Med. Ethics*, vol. 47, n.º 2 Suppl, pp. 39-42, jun. 2019, doi: 10.1177/1073110519857314. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1002.2134>
- [51] AscenderRural, «Wired for Rural Well-Being: How Broadband Unlocks Opportunity», AscendRural. Accedido: 25 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ascendrural.org/news/wired-for-rural-well-being>

[52] S. K. Nayak, S. B. Thorat, y N. V. Kalyankar, «Reaching the Unreached A Role of ICT in Sustainable Rural Development», 10 de febrero de 2010, *arXiv*: arXiv:1002.2134. doi: 10.48550/arXiv.1002.2134. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6661896/>

CAPÍTULO VII. ANEXOS

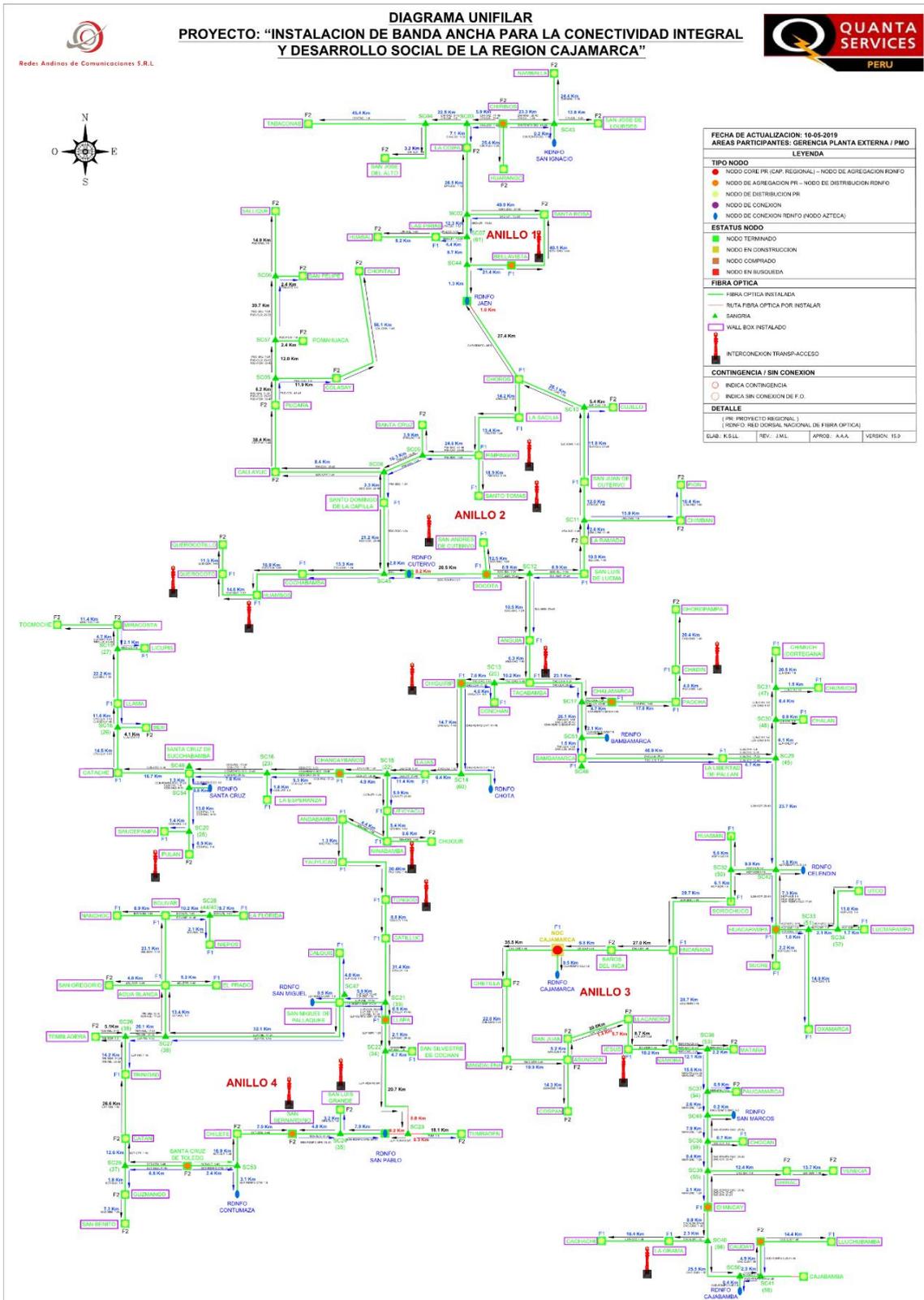
7.1. ANEXO 01: Operacionalización de variables

| Variables | Definición conceptual | Definición operativa | Dimensiones | Indicadores | Escala de medición |
|----------------------------|---|--|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Diseño de red | El diseño de red se refiere al proceso de planificación y estructuración de una red de telecomunicaciones, considerando diversos factores como la topología, la ubicación de los nodos (torre y repetidoras), la selección de tecnología (radioenlaces), y la asignación de recursos (frecuencia, ancho de banda). Y su objetivo es garantizar que la red cumpla con los requisitos de conectividad, capacidad y eficiencia, asegurando un funcionamiento adecuado y una cobertura completa en el distrito. | El diseño de red se mide y se evalúa a través de parámetros específicos como el número de torres y repetidoras, la distribución geográfica de estas, el tipo de modulación utilizada, los parámetros de los radioenlaces como frecuencia, potencia, etc., la capacidad de la red, y la cobertura esperada. La práctica, se lleva a cabo mediante simulaciones, análisis de tráfico y la optimización de recursos según los requerimientos y las necesidades de los centros poblados. | Cantidad de torres | Número de torres necesarias. | Escala numérica |
| | | | Cantidad de repetidoras | Número de repetidoras. | Escala numérica |
| | | | Tipo de modulación | Tipo de modulación elegida. | Categoría (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) |
| | | | Parámetros de los radioenlaces | Frecuencia, potencia, ancho de banda. | Escala continua (Hz, dBm, MHz) |
| Desempeño de la red | El desempeño de la red se refiere a la capacidad de una red de telecomunicaciones para entregar servicios de manera eficiente y confiable. Este desempeño incluye factores como la calidad de la señal, la capacidad de transmisión de datos, la latencia, la disponibilidad, la fiabilidad y la cobertura. El desempeño de la red refleja su habilidad para satisfacer las necesidades de los usuarios, mantener la conectividad y operar bajo condiciones óptimas en todo momento. | El desempeño de la red se evalúa a través de métricas cuantificables como el Throughput (rendimiento de transmisión de datos), el índice de disponibilidad (porcentaje de tiempo en que la red está disponible y el margen de desvanecimiento. Estas métricas se obtienen mediante pruebas de rendimiento, simulaciones y se utilizan para analizar la eficiencia de la red bajo condiciones de los centros poblados. | Throughput | Tasa de datos alcanzada. | Escala continua (Mbps). |
| | | | Disponibilidad | Porcentaje de disponibilidad | Escala porcentual (0-100%). |
| | | | Margen de desvanecimiento | Margen de desvanecimiento | Escala continua (dB). |

7.2. ANEXO 02: Matriz de consistencia

| Problema | Objetivo | Hipótesis | Variables | Dimensiones | Indicadores | Escala de medición |
|--|---|--|----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| ¿Cuál es el diseño de una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para interconectar los centros poblados del distrito de Calquis con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, optimizando el uso de torres, repetidoras y costos, pero garantizando una conectividad eficiente? | Diseñar una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para interconectar los centros poblados de Calquis con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, optimizando el uso de torres repetidoras y costos, garantizando una conectividad eficiente y adecuada a las necesidades del distrito. | Un diseño de una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para interconectar los centros poblados de Calquis con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, utilizando una cantidad optimizada de torres, repetidoras y costos, garantizará una conectividad eficiente y adecuada a las necesidades del distrito. | Diseño de red | Cantidad de torres | Número de torres necesarias. | Escala numérica |
| | | | | Cantidad de repetidoras | Número de repetidoras. | Escala numérica |
| | | | | Tipo de modulación | Tipo de modulación elegida. | Categorica (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) |
| Parámetros de los radioenlaces | Frecuencia, potencia, ancho de banda. | Escala continua (Hz, dBm, MHz) | | | | |
| ¿Qué configuraciones técnicas como modulaciones y parámetros de los radioenlaces son las óptimas para las condiciones geográficas y climáticas del distrito de Calquis? | Determinar las configuraciones técnicas óptimas, como modulaciones y parámetros de los radioenlaces que permitan un desempeño eficiente de la red teniendo en cuenta las condiciones geográficas y climáticas del distrito de Calquis. | La elección de configuraciones técnicas óptimas, como modulaciones y parámetros específicos de los radioenlaces, permitirá un desempeño adecuado de la red en las condiciones geográficas y climáticas del distrito. | | Throughput | Tasa de datos alcanzada. | Escala continua (Mbps). |
| | | | | Disponibilidad | Porcentaje de disponibilidad | Escala porcentual (0-100%). |
| ¿Cuál es el análisis de costos asociado a la implementación, operación y mantenimiento de la red en el distrito de Calquis? | Realizar un análisis de costos detallado que incluya la implementación, operación y el mantenimiento de la red de telecomunicaciones. | Un análisis detallado de costos que incluya CAPEX Y OPEX de la red de telecomunicaciones permitirá identificar las inversiones necesarias para motivar la participación de actores externos, como gobiernos y asociaciones privadas en la viabilidad del proyecto. | Desempeño de la red | Margen de desvanecimiento | Margen de desvanecimiento | Escala continua (dB). |

7.3. ANEXO 03: Diagrama de RDNFO Región Cajamarca



7.4. ANEXO 04 Preguntas a realizar en la entrevista al experto

ENTREVISTA SOBRE EL DISEÑO DE RED

Título de la tesis: “Diseño de una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces y evaluación de su desempeño en el distrito de Calquis”

Autor de la tesis: Alindor Lozano Romero

I. Datos generales del experto.

Nombres y apellidos:

Grado académico:

Título profesional:

Institución donde labora:

Áreas de experiencia profesional:

Tiempo de experiencia profesional en el área:

II. Guía de Preguntas para la Entrevista.

A. Evaluación General del Diseño

- ¿Cuál es su apreciación general sobre el diseño de la red de telecomunicaciones propuesto para el distrito de Calquis? (Aspectos que le parecen destacables, adecuados o deficientes)
- ¿Considera usted que el diseño propuesto responde adecuadamente a las necesidades de conectividad del distrito? ¿Por qué?

B. Evaluación Técnica

- ¿La selección de infraestructura (torres, enlaces, equipos) le parece adecuada para el contexto geográfico y técnico del distrito?
- ¿Cómo evalúa el ancho de banda estimado en relación con la demanda proyectada?

- ¿Considera que el diseño incluye suficiente redundancia para garantizar la continuidad del servicio ante fallos?
- ¿Qué le parece la elección de la tecnología de transmisión (modulación, frecuencias, ancho de canal)?
- ¿El diseño permite escalabilidad o expansión futura sin alterar significativamente su estructura base?

C. Evaluación Operativa y Económica

- ¿Considera viable la implementación, operación y mantenimiento de la red con los recursos humanos, técnicos y financieros disponibles en el distrito?

D. Preguntas Abiertas para Recomendaciones

- ¿Qué fortalezas destacaría del diseño presentado?
- ¿Qué aspectos del diseño técnico deberían mejorarse?
- ¿Qué recomendaciones específicas haría para optimizar el rendimiento, cobertura geográfica y sostenibilidad de la red?
- Desde su experiencia, ¿qué retos cree que podrían surgir durante la implementación del diseño?
- ¿Recomendaría este diseño como modelo replicable para otras zonas rurales similares? ¿Por qué?

7.5. ANEXO 05 Informe de opinión de expertos

- Ing. Carlos Alfonso Pérez Cerna

INFORME DE OPINION DE EXPERTO SOBRE EL DISEÑO DE RED

Título de la tesis: “Diseño de una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces y evaluación de su desempeño en el distrito de Calquis”

Autor de la tesis: Alindor Lozano Romero

I. Datos generales del experto.

Nombres y apellidos: Carlos Alfonso Pérez Cerna

Grado académico: Mag. Tecnologías, Sistemas y Redes de Comunicaciones

Título profesional: Ingeniero de Sistemas

Institución donde labora: Municipalidad Provincial de Cajamarca

Áreas de experiencia profesional: Redes de datos

Tiempo de experiencia profesional en el área: 10 años

II. Guía de Preguntas para la Entrevista.

A. Evaluación General del Diseño

- ¿Cuál es su apreciación general sobre el diseño de la red de telecomunicaciones propuesto para el distrito de Calquis? (Aspectos que le parecen destacables, adecuados o deficientes)

El diseño propuesto es sólido y bien estructurado. Destaca la utilización de radioenlaces en la banda de 6 GHz, la elección del simulador Link Planner para entornos montañosos, y el enfoque en cubrir la mayoría de los centros poblados del distrito con una topología escalonada de backhaul. El trabajo integra adecuadamente consideraciones técnicas, geográficas y socioeconómicas.

- ¿Considera usted que el diseño propuesto responde adecuadamente a las necesidades de conectividad del distrito? ¿Por qué?

Sí, el diseño responde adecuadamente. El análisis de cobertura, la estimación de ancho de banda por hogar e institución, y la propuesta de enlaces punto a punto aseguran una conectividad estable para zonas rurales con geografía accidentada. Se valora la alineación con la RDNFO para garantizar acceso a internet de mayor calidad.

B. Evaluación Técnica

- ¿La selección de infraestructura (torres, enlaces, equipos) le parece adecuada para el contexto geográfico y técnico del distrito?

Sí. Se han seleccionado radios Cambium ePMP 4600L y 4600C, adecuados para zonas rurales de baja y media densidad, con soporte para MIMO y sincronización GPS. La ubicación de torres ha sido optimizada mediante análisis topográficos y modelado de enlaces con visibilidad de línea (LOS) y zonas de Fresnel libres.

- ¿Cómo evalúa el ancho de banda estimado en relación con la demanda proyectada?

Correctamente dimensionado. La estimación de 10 Mbps por vivienda y 20 – 80 Mbps por institución pública se alinea con los requerimientos actuales de servicios digitales en zonas rurales, no obstante, se puede optimizar. El diseño contempla crecimiento futuro, aunque se recomienda prever upgrades tecnológicos para mayor throughput.

- ¿Considera que el diseño incluye suficiente redundancia para garantizar la continuidad del servicio ante fallos?

Es un punto para mejorar, ya que no enfatiza esquemas de redundancia activa, como enlaces alternativos o rutas backup. Sería ideal considerar topologías de anillo o enlaces redundantes en puntos críticos para aumentar la disponibilidad ante fallos.

- ¿Qué le parece la elección de la tecnología de transmisión (modulación, frecuencias, ancho de canal)?

Adecuada. Se utilizan bandas no licenciadas de hasta 6 GHz y modulaciones eficientes como QPSK, QAM y BPSK según condiciones del enlace. Se ha modelado con anchos de canal de hasta 160 MHz, lo cual permite alta capacidad de transmisión, optimizando el espectro disponible.

- ¿El diseño permite escalabilidad o expansión futura sin alterar significativamente su estructura base?

Sí. El uso de nodos intermedios (repetidores) y tecnología escalable como Cambium ePMP permite ampliar cobertura o capacidad agregando más radios o torres sin rediseñar completamente la red. La estructura es modular y replicable.

C. Evaluación Operativa y Económica

- ¿Considera viable la implementación, operación y mantenimiento de la red con los recursos humanos, técnicos y financieros disponibles en el distrito?

Viable, aunque con ciertas limitaciones. El diseño es económicamente razonable y adecuado para un proyecto piloto o con financiamiento

gubernamental. No obstante, se requiere capacitación técnica local para operación/mantenimiento y un esquema de soporte externo en fases iniciales.

D. Preguntas Abiertas para Recomendaciones

- ¿Qué fortalezas destacaría del diseño presentado?
 - Uso eficiente de recursos técnicos (Link Planner, radios Cambium).
 - Análisis detallado del terreno y visibilidad de enlaces.
 - Buena estimación de demanda.
 - Alineación con infraestructura de la RDNFO.
 - Aplicabilidad en contextos rurales similares.

- ¿Qué aspectos del diseño técnico deberían mejorarse?
 - Mayor énfasis en redundancia.
 - Estrategia clara para el mantenimiento a largo plazo.
 - Considerar mecanismos de protección contra condiciones climáticas extremas.
 - Posible inclusión de enlaces alternos en zonas críticas.

- ¿Qué recomendaciones específicas haría para optimizar el rendimiento, cobertura geográfica y sostenibilidad de la red?
 - Añadir redundancia en nodos troncales clave.
 - Evaluar tecnologías complementarias como enlaces ópticos FSO en puntos de alta visibilidad.
 - Incorporar energía solar en zonas sin red eléctrica estable.
 - Establecer alianzas con operadores regionales o gobiernos locales para sostenibilidad operativa.

- Desde su experiencia, ¿qué retos cree que podrían surgir durante la implementación del diseño?
 - Dificultades logísticas por la geografía montañosa.
 - Limitado personal técnico local capacitado.
 - Posibles interferencias en banda libre.
 - Mantenimiento correctivo por clima adverso.
 - Necesidad de financiamiento inicial para instalación.

- ¿Recomendaría este diseño como modelo replicable para otras zonas rurales similares? ¿Por qué?

Sí. El diseño es replicable en distritos rurales con similares características geográficas y socioeconómicas. El uso de radioenlaces en bandas no licenciadas, simuladores gratuitos y equipos de costo medio permite replicar la estrategia con adaptaciones mínimas.



Firma del experto

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN

Yo, Carlos Alfonso Pérez Cerna, identificado con DNI N° 43026777, Ingeniero de Sistemas especialista en el área de Redes de datos, con 10 años de experiencia profesional en el campo de las telecomunicaciones, por medio de la presente:

HAGO CONSTAR que he revisado y evaluado el documento titulado:

“DISEÑO DE UNA RED DE TELECOMUNICACIONES BASADA EN RADIOENLACES Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN EL DISTRITO DE CALQUIS”

El trabajo ha sido revisado bajo criterios técnicos, operativos y metodológicos, de acuerdo con los principios del juicio de expertos. En base a mi análisis, declaro que el diseño propuesto es técnicamente viable y pertinente en función de los criterios de infraestructura, tecnología, cobertura, sostenibilidad y operatividad para el contexto del distrito de Calquis.



Firmado digitalmente por PEREZ
CERNA Carlos Alfonso FAU
20143622042 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 03.06.2025 11:03:44 -05:00

Firma del experto

- Ing. Carlos Martin Cotrina Ruiz

INFORME DE OPINION DE EXPERTO SOBRE EL DISEÑO DE RED

Título de la tesis: "Diseño de una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces y evaluación de su desempeño en el distrito de Calquis"

Autor de la tesis: Alindor Lozano Romero

I. Datos generales del experto.

Nombres y apellidos: Carlos Martin Cotrina Ruiz

Grado académico: Magister

Título profesional: Ingeniero de Sistemas

Institución donde labora: Municipalidad Provincial de San Miguel.

Áreas de experiencia profesional: Telecomunicaciones, TI y Gestión de Proyectos

Tiempo de experiencia profesional en el área: 7 años

II. Guía de Preguntas para la Entrevista.

A. Evaluación General del Diseño

- ¿Cuál es su apreciación general sobre el diseño de la red de telecomunicaciones propuesto para el distrito de Calquis? (Aspectos que le parecen destacables, adecuados o deficientes)

El diseño propuesto está bien estructurado y refleja un análisis previo del entorno geográfico del distrito. El uso de radioenlaces es acertado, porque permite detallarse más el soporte técnico.

- ¿Considera usted que el diseño propuesto responde adecuadamente a las necesidades de conectividad del distrito? ¿Por qué?

Considero que si es adecuada ya que permite interconectar los centros poblados a través de una infraestructura eficiente. El vínculo con la Red Dorsal Nacional es una decisión técnica acertada para garantizar conectividad de largo plazo.

B. Evaluación Técnica

- ¿La selección de infraestructura (torres, enlaces, equipos) le parece adecuada para el contexto geográfico y técnico del distrito?

Si es adecuada, especialmente por la elección de equipos con buena tolerancia climática y facilidad de montaje, las torres seleccionadas responden bien al terreno montañoso y accidentado del distrito.

- ¿Cómo evalúa el ancho de banda estimado en relación con la demanda proyectada?
El ancho de banda proyectada cubre con holgura las necesidades actuales, no obstante se recomienda hacer una revisión a mediano plazo según el crecimiento poblacional y el aumento de dispositivos conectados.
- ¿Considera que el diseño incluye suficiente redundancia para garantizar la continuidad del servicio ante fallos?
El diseño no cuenta con redundancia por lo que se sugiere incluir enlaces secundarios en los tramos que conectan a las redes principales para evitar interrupciones en caso de fallos.
- ¿Qué le parece la elección de la tecnología de transmisión (modulación, frecuencias, ancho de canal)?
La elección de tecnologías de modulación y canales es moderna y eficiente. El uso de espectro no licenciado puede ayudar a reducir costos, pero también puede generar interferencias si no se gestiona correctamente.
- ¿El diseño permite escalabilidad o expansión futura sin alterar significativamente su estructura base?
Si está preparado para escalar. El diseño admite una expansión horizontal mediante nuevas redes lo que lo convierte en una solución adaptable para futuras demandas o inclusión de nuevas zonas pobladas.

C. Evaluación Operativa y Económica

- ¿Considera viable la implementación, operación y mantenimiento de la red con los recursos humanos, técnicos y financieros disponibles en el distrito?
Es viable siempre y cuando se gestionen adecuadamente los recursos financieros y se establezcan alianzas para el soporte continuo. Para la operación local se requiere personal capacitado y un plan de mantenimiento.

D. Preguntas Abiertas para Recomendaciones

- ¿Qué fortalezas destacaría del diseño presentado?

El enfoque modular, el uso de tecnologías con buen desempeño y el sistema de costo-eficiencia destacan como principales fortalezas.

- ¿Qué aspectos del diseño técnico deberían mejorarse?

La ausencia de redondez y el escaso detalle sobre soporte técnico a largo plazo son aspectos a mejorar.

- ¿Qué recomendaciones específicas haría para optimizar el rendimiento, cobertura geográfica y sostenibilidad de la red?

Recomiendo incorporar redundancia en algunas radioenlaces, dejar un plan claro de mantenimiento y contemplar una estrategia de energía alternativa en zonas críticas.

- Desde su experiencia, ¿qué retos cree que podrían surgir durante la implementación del diseño?

Los principales retos serían el acceso a los sitios de instalación, condiciones climáticas extremas y la posible rotación de personal capacitado.

- ¿Recomendaría este diseño como modelo replicable para otras zonas rurales similares? ¿Por qué?

Si lo recomendaría, su diseño flexible y costo accesible lo hacen replicable en otras áreas rurales con características similares.


 INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS
 INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS DE LA INFORMACIÓN
 Ing. Carlos Martín Cotrina Ruiz
 DIRECTOR

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN

Yo, Carlos Martín Cotrina Ruiz identificado con DNI N° 43453448
Ingeniero de Sistemas especialista en el área de redes, con 7 años
de experiencia profesional en el campo de las telecomunicaciones, por medio de
la presente:

HAGO CONSTAR que he revisado y evaluado el documento titulado:

"DISEÑO DE UNA RED DE TELECOMUNICACIONES BASADA EN
RADIOENLACES Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN EL DISTRITO DE
CALQUIS"

El trabajo ha sido revisado bajo criterios técnicos, operativos y metodológicos, de
acuerdo con los principios del juicio de expertos. En base a mi análisis, declaro
que el diseño propuesto es técnicamente viable y pertinente en función de los
criterios de configuración, infraestructura, tecnología, cobertura, sostenibilidad y
operatividad para el contexto del distrito de Calquis.


MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE SAN INGUEL
DISTRITO DE CALQUIS
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
Ing. Carlos Martín Cotrina Ruiz
DIRECTOR

- Ing. Daniel Alcides Almonacid Ascensión

INFORME DE OPINION DE EXPERTO SOBRE EL DISEÑO DE RED

Título de la tesis: "Diseño de una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces y evaluación de su desempeño en el distrito de Calquis"

Autor de la tesis: Alindor Lozano Romero

I. Datos generales del experto.

Nombres y apellidos: Almonacid Ascencion, Daniel Alcides

Grado académico: Bachiller

Título profesional: Ingeniero de Sistemas

Institución donde labora: Profesional independiente

Áreas de experiencia profesional: Redes y Telecomunicaciones

Tiempo de experiencia profesional en el área: 12

II. Guía de Preguntas para la Entrevista.

A. Evaluación General del Diseño

- **¿Cuál es su apreciación general sobre el diseño de la red de telecomunicaciones propuesto para el distrito de Calquis? (Aspectos que le parecen destacables, adecuados o deficientes)**

El diseño es técnicamente sólido y bien adaptado al entorno rural del distrito de Calquis. Destaco la adecuada selección de tecnología inalámbrica y el enfoque en reducir costos mediante la optimización de torres repetidoras. Sin embargo, sería importante detallar más los mecanismos de mantenimiento.

- **¿Considera usted que el diseño propuesto responde adecuadamente a las necesidades de conectividad del distrito? ¿Por qué?**

Sí, responde adecuadamente porque considera la dispersión geográfica de los centros poblados y propone una solución de conectividad que puede implementarse sin grandes infraestructuras costosas. Además, integra la red con la Red Dorsal, lo que permite acceso a servicios de mayor nivel.

B. Evaluación Técnica

- **¿La selección de infraestructura (torres, enlaces, equipos) le parece adecuada para el contexto geográfico y técnico del distrito?**

La selección de torres, equipos y enlaces es adecuada para la geografía del distrito. Se eligieron radios y antenas confiables y de bajo mantenimiento, lo cual es clave en entornos rurales donde el soporte técnico puede ser limitado.

- **¿Cómo evalúa el ancho de banda estimado en relación con la demanda proyectada?**

El ancho de banda estimado para el distrito, que alcanza un throughput de 12,140 Mbps, se considera adecuado frente a la demanda actual y proyectada a mediano plazo. Según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática, en distritos rurales como Calquis, el crecimiento anual en la demanda de servicios digitales oscila entre el 15% y 25%, impulsado principalmente por la expansión de la educación virtual, la digitalización de servicios públicos y el uso de plataformas de comunicación.

- **¿Considera que el diseño incluye suficiente redundancia para garantizar la continuidad del servicio ante fallos?**

Falta incluir una estrategia clara de redundancia en los enlaces principales. Sería recomendable contar con enlaces alternativos en al menos un 20–30% de la red, para evitar cortes en caso de falla o mantenimiento.

- **¿Qué le parece la elección de la tecnología de transmisión (modulación, frecuencias, ancho de canal)?**

La elección de tecnología es adecuada, especialmente por su flexibilidad ante condiciones ambientales variables. La modulación adaptable y los anchos de canal escalables permiten una operación estable.

- **¿El diseño permite escalabilidad o expansión futura sin alterar significativamente su estructura base?**

El diseño permite ampliar cobertura o capacidad sin rehacer toda la red. Solo se requeriría instalar nuevos nodos o actualizar equipos, lo cual es ideal para distritos en crecimiento.

C. Evaluación Operativa y Económica


- **¿Considera viable la implementación, operación y mantenimiento de la red con los recursos humanos, técnicos y financieros disponibles en el distrito?**

La implementación, operación y mantenimiento de la red en Calquis es viable, ya que se dispone de tecnología adecuada y opciones de

financiamiento como FONCOMUN, PRONATEL o alianzas con operadores como Gilat Perú. Aunque el personal técnico local necesita capacitación; esto puede resolverse mediante convenios y apoyo institucional. La red, basada en equipos eficientes como radios ePMP 4600L, es escalable y de fácil gestión, lo que asegura su sostenibilidad con una adecuada estrategia de soporte y gestión local.

D. Preguntas Abiertas para Recomendaciones

- **¿Qué fortalezas destacaría del diseño presentado?**
Buena planificación de enlaces, uso de tecnología de probada eficiencia, y conexión directa con la Red Dorsal, lo que garantiza escalabilidad.
- **¿Qué aspectos del diseño técnico deberían mejorarse?**
Un aspecto importante a incluir es la redundancia en los tramos críticos de la red y fortalecer la estrategia de soporte técnico.
- **¿Qué recomendaciones específicas haría para optimizar el rendimiento, cobertura geográfica y sostenibilidad de la red?**
Instalar enlaces de respaldo entre nodos principales y considerar energía solar en zonas sin red eléctrica estable.
- **Desde su experiencia, ¿qué retos cree que podrían surgir durante la implementación del diseño?**
Mantenimiento en zonas de difícil acceso, cortes de energía eléctrica y falta de personal técnico calificado en campo.
- **¿Recomendaría este diseño como modelo replicable para otras zonas rurales similares? ¿Por qué?**
Sí, porque es una solución costo-efectiva y puede adaptarse fácilmente a otros distritos rurales con características similares.



Firma del experto


CONSTANCIA DE VALIDACIÓN

Yo, Almonacid Ascencion, Daniel Alcides identificado con DNI N° 40140519 Ingeniero de Sistemas especialista en el área de redes y telecomunicaciones, con 12 años de experiencia profesional en el campo de las telecomunicaciones, por medio de la presente:

HAGO CONSTAR que he revisado y evaluado el documento titulado:

“DISEÑO DE UNA RED DE TELECOMUNICACIONES BASADA EN RADIOENLACES Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN EL DISTRITO DE CALQUIS”

El trabajo ha sido revisado bajo criterios técnicos, operativos y metodológicos, de acuerdo con los principios del juicio de expertos. En base a mi análisis, declaro que el diseño propuesto es técnicamente viable y pertinente en función de los criterios de infraestructura, tecnología, cobertura, sostenibilidad y operatividad para el contexto del distrito de Calquis.



Firma del experto