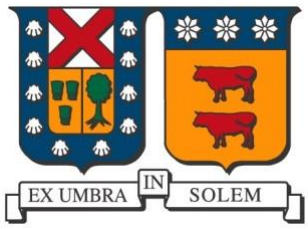
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
VALPARAÍSO - CHILE



"DISEÑO Y EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE REDES HÍBRIDAS DE ÚLTIMA MILLA MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA INCLUSIÓN DIGITAL RURAL: CASO PAN DE AZÚCAR"

ROGER HANS NUÑEZ VILLALOBOS

TESINA PARA OPTAR AL GRADO
DE MAGÍSTER EN TECNOLOGÍAS DE
LA INFORMACIÓN

Profesor Guía: MAURICIO SOLAR

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño y evaluación técnico-económica de redes híbridas de última milla mediante algoritmos genéticos para la inclusión digital rural: caso Pan de Azúcar

Nombre del candidato(a): Roger Núñez Villalobos

Carrera / Grado: Magíster en Tecnologías de la Información

Campus: San Joaquin **Departamento:** Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mauricio Solar, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 04-11-2026 **Firma:**

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04-11-2026 **Firma:**

Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Informática

Programa de Magíster en Tecnologías de la Información

Diseño y evaluación técnico-económica de redes híbridas de última milla mediante algoritmos genéticos para la inclusión digital rural: caso Pan de Azúcar

Roger Hans Núñez Villalobos

Magíster en Tecnologías de la Información

Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor guía: Mauricio Solar

roger.nunez@sansano.usm.cl, rogernez@gmail.com

Resumen: La brecha de conectividad rural exige diseños que combinen cobertura, calidad de servicio y sostenibilidad económica. Esta tesina desarrolla y evalúa una metodología reproducible para el diseño de prefactibilidad de una red híbrida de última milla en Pan de Azúcar, Chile, sobre un universo georreferenciado de 9.625 clientes. La metodología integra fibra óptica (FO), puntos de acceso (AP) y radioenlaces; emplea algoritmos genéticos, rutas sobre grafos y restricciones de alcance, capacidad, orientación, obstáculos, disponibilidad de equipos y conectividad con un punto de presencia (POP). Para contener la complejidad combinatoria, se construyó una línea base de FO y se dividió la optimización en etapas de acceso, transporte, aprovechamiento de capacidad y eliminación de AP de baja carga. Como resultado, se obtuvieron dos redes finales: D2, alternativa económica con 90,61 % de cobertura e inversión de capital (CAPEX) de USD 327.650, y G95, alternativa de mayor cobertura, con 95,00 % y CAPEX de USD 422.726. Ambas se contrastaron con siete emplazamientos de infraestructura móvil mediante dos escenarios geométricos aplicados sobre la misma infraestructura: TELCO-H, escenario híbrido conservador con 88,60 %, y TELCO-B, cota geométrica 4G con 100 %. D2 y G95 presentan menor valor presente por cliente, aunque los perfiles móviles de referencia conservan mejores valores estimados de descarga y latencia. El análisis de sensibilidad, la validación de cinco clientes representativos y el estudio de una mejora de troncal respaldan parcialmente la hipótesis: la optimización genera alternativas más focalizadas y eficientes, pero su superioridad técnica integral requiere mediciones de terreno e ingeniería radioeléctrica de detalle.

Palabras clave: última milla, algoritmo genético, red híbrida, brecha digital, evaluación técnico-económica.

1 Introducción

La conectividad digital es una infraestructura habilitante para la educación, la salud, la productividad y el acceso a servicios públicos. En Chile, el Plan Brecha Digital Cero busca extenderla con independencia del lugar de residencia [1], mientras que la Ley N.º 21.678 reconoce Internet como servicio público de telecomunicaciones y refuerza las obligaciones de acceso y continuidad [2]. Sin embargo, en las localidades rurales persisten dificultades asociadas a la baja densidad poblacional, la dispersión de la demanda, el relieve, la energía disponible y las distancias a la infraestructura de transporte.

Pan de Azúcar, en la Región de Coquimbo, constituye un caso representativo: dispone de sitios de instalación y caminos, pero presenta una demanda extensa y heterogénea. Una planificación basada solo en radios de cobertura o costos de equipos puede producir sobre cobertura, cuellos de botella o soluciones difíciles de sostener. Por ello, el diseño debe considerar conjuntamente acceso, transporte, cobertura, capacidad, calidad de servicio y costo durante el ciclo de vida.

Esta investigación propone una metodología de prefactibilidad para diseñar una red híbrida de última milla que combina fibra óptica, radioenlaces PTP y PMP, y puntos de acceso. La optimización utiliza información geográfica procesada en QGIS, catálogos técnico-económicos y un algoritmo genético basado en grafos, heurísticas y rutas de menor costo. Las redes obtenidas se comparan con escenarios móviles de referencia mediante indicadores comunes de cobertura, calidad de servicio y costo.

1.1 Problema de investigación

La pregunta que guía esta investigación es: ¿puede una metodología de optimización basada en algoritmos genéticos producir, para Pan de Azúcar, una red híbrida de última milla con cobertura definida y mayor eficiencia técnico-económica que una red móvil de referencia? El problema no consiste en reproducir el núcleo de un operador, sino en encontrar configuraciones físicamente factibles que conecten la demanda georreferenciada con el punto de presencia (POP), desde el cual se accede a la red de transporte o backhaul [7]. La metodología debe construir y validar estas configuraciones minimizando infraestructura y respetando las restricciones del diseño.

1.2 Hipótesis

Una metodología de planificación y optimización de prefactibilidad basada en algoritmos genéticos permite obtener, para Pan de Azúcar, al menos un diseño de red híbrida de última milla que mejore la focalización territorial y la eficiencia económica respecto de la infraestructura móvil de referencia alcance una cobertura igual o superior al 90 % y mantenga indicadores técnicos defendibles bajo los supuestos declarados.

La hipótesis se evalúa conjuntamente en cobertura, calidad de servicio y eficiencia económica; un resultado favorable en una sola dimensión no se considera suficiente. Para mantener la trazabilidad, se distinguen los datos observados o extraídos de archivos, los calculados por el modelo y los supuestos de escenario.

1.3 Objetivos

Objetivo general. Diseñar y evaluar una metodología de optimización para la planificación de prefactibilidad de redes híbridas de última milla en un entorno rural, aplicada a Pan de Azúcar y comparada con escenarios construidos a partir de la infraestructura móvil existente.

Objetivos específicos:

- Preparar y validar capas geográficas de clientes, caminos, sitios, obstáculos y zonas de baja prioridad.
- Construir una línea base de fibra óptica conectada al POP como punto de partida reproducible para la optimización.
- Optimizar por etapas los componentes de acceso y transporte, respetando las restricciones de cobertura, capacidad, disponibilidad de equipos, orientación, obstáculos y conectividad.
- Obtener dos alternativas finales factibles y económicamente evaluables, D2 y G95, con coberturas próximas al 90 % y al 95 %, respectivamente.
- Comparar las alternativas con los escenarios móviles de referencia mediante indicadores de cobertura, CAPEX, OPEX, TCO, valor presente, calidad de servicio y la validación de cinco clientes representativos.
- Evaluar el grado de respaldo de la hipótesis y formular recomendaciones para su validación en terreno e ingeniería de detalle.

1.4 Alcance y organización

El estudio corresponde a una evaluación de prefactibilidad y no reemplaza las mediciones de radiofrecuencia, el levantamiento topográfico, el diseño eléctrico ni la ingeniería de detalle requeridos para un despliegue. Las capas procesadas en QGIS y los registros de SUBTEL [4] permiten modelar el territorio; los costos corresponden a valores equivalentes de reposición y la calidad de servicio se estima mediante perfiles y supuestos declarados.

Los capítulos 2 y 3 presentan el marco teórico y el caso de estudio; el capítulo 4 describe la metodología; el capítulo 5 expone los resultados; el capítulo 6 analiza su validez y limitaciones; y el capítulo 7 evalúa el respaldo de la hipótesis y presenta las recomendaciones finales.

2 Marco teórico y estado del arte

2.1 Brecha digital y conectividad rural

La brecha digital comprende desigualdades en la disponibilidad, asequibilidad, calidad y capacidad de uso de la conectividad. El Plan Brecha Digital Cero organiza la respuesta pública chilena en torno a conectividad y acceso [1], [3]. A nivel internacional, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) propone evaluar soluciones de conectividad de última milla considerando simultáneamente demanda, tecnología, regulación, sostenibilidad financiera y condiciones locales [7]. Esta mirada es coherente con el enfoque de la tesina: no existe una solución tecnológica universalmente superior; la combinación adecuada depende de la densidad, la topografía, las distancias y los costos.

Un antecedente nacional relevante es el proyecto Fibra Óptica Austral (FOA), cuya construcción concluyó en 2022. La iniciativa habilitó infraestructura terrestre y submarina de transporte de acceso abierto en las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes, con el propósito de mejorar la conectividad de las zonas australes [29]. Esta experiencia muestra que la disponibilidad de una red troncal regional es una condición necesaria, pero no suficiente: para llegar a hogares y empresas se requieren redes locales de última milla que distribuyan la conectividad desde los puntos de presencia [7].

Entre las soluciones disponibles para sectores rurales, Starlink [35] ofrece conectividad satelital en zonas alejadas, aunque requiere adquirir un terminal y contratar una suscripción individual. En el ámbito regional, Intelcom (Inetworks) [36] despliega redes propias de fibra óptica y enlaces inalámbricos sujetos a factibilidad técnica. Ambas alternativas amplían la oferta existente, pero sus costos y cobertura no garantizan un acceso masivo y homogéneo en todo el territorio.

2.2 Arquitectura: acceso, agregación, backhaul y WAN

La última milla es el tramo que conecta al usuario con el primer punto de agregación. En esta investigación, el acceso está formado por puntos de acceso (AP) que atienden clientes; la agregación reúne tráfico en postes o sitios; y el backhaul transporta ese tráfico mediante fibra óptica (FO) y radioenlaces hasta el punto de presencia (POP). Desde allí, la red de área amplia (WAN) del proveedor conecta la localidad con servicios externos e Internet. Esta separación es esencial: la capacidad disponible para un cliente queda condicionada por el recurso más restrictivo de su ruta.

Tabla 1. Función de cada dominio de la red

Dominio	Función	Variables principales
Acceso	Cliente ↔ AP	alcance, azimut, apertura, usuarios máximos, throughput
Agregación	Concentración local	carga por AP/sitio, stock, soporte, energía
Backhaul	AP/sitio ↔ POP	ruta FO, radioenlaces, capacidad, latencia, disponibilidad
WAN/core	POP ↔ servicios	capacidad contratada, tránsito, resiliencia, operación

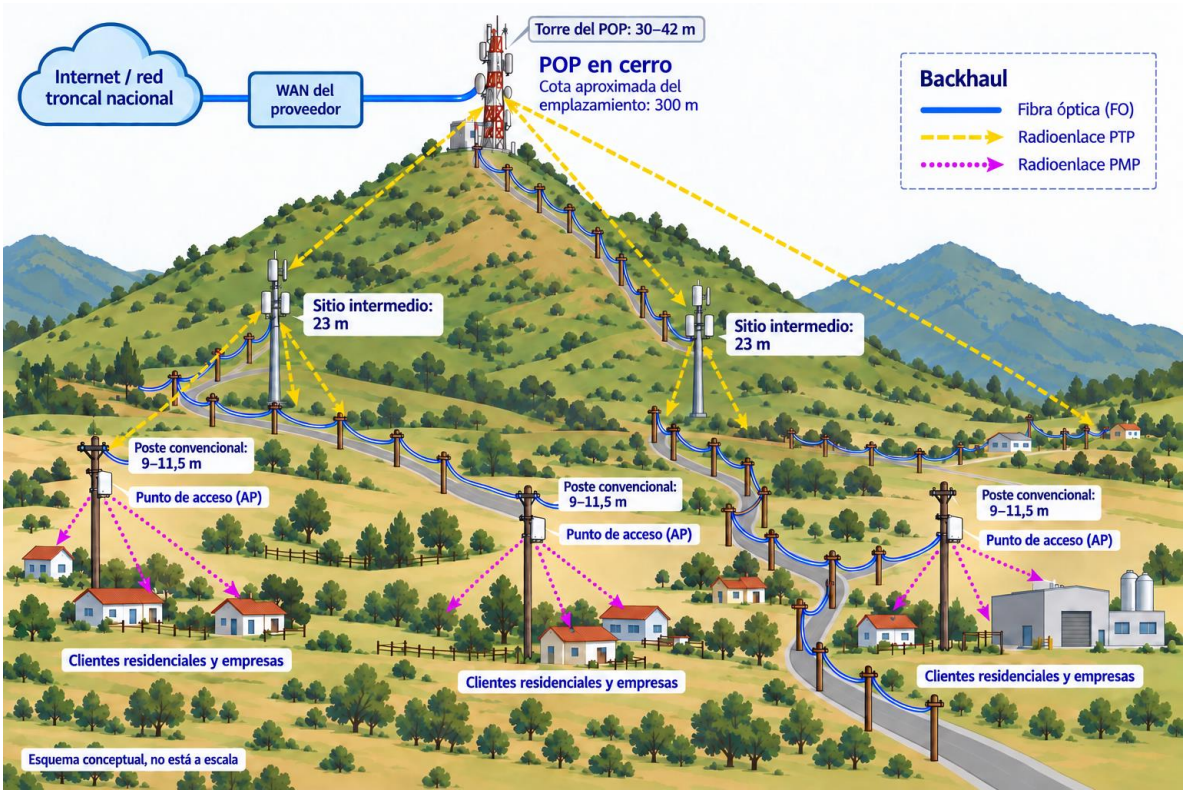


Figura 1. Esquema conceptual de la arquitectura de la red híbrida considerada. Fuente: elaboración propia.

2.3 Tecnologías híbridas

La fibra óptica (FO) ofrece alta capacidad y baja latencia, pero su costo aumenta con la longitud, la obra civil y la dispersión de los usuarios. En la red propuesta funciona como medio troncal entre el POP y los puntos de agregación, utilizando preferentemente corredores viales compartidos. Los radioenlaces punto a punto (PTP) permiten interconectar el POP, los sitios y determinados postes cuando extender la FO resulta difícil o costoso, mientras que los enlaces punto a multipunto (PMP) permiten que un punto de acceso atienda a varios clientes. Su factibilidad depende de la línea de vista, la zona de Fresnel, la distancia, la frecuencia, la interferencia y la disponibilidad de energía.

La fibra óptica (FO) ofrece alta capacidad y baja latencia, pero su costo aumenta con la longitud, la obra civil y la dispersión de los usuarios. En la red propuesta funciona como medio troncal entre el POP y los puntos de agregación, utilizando preferentemente corredores viales compartidos. Los radioenlaces punto a punto (PTP) permiten interconectar el POP, los sitios y determinados postes cuando extender la FO resulta difícil o costoso, mientras que los enlaces punto a multipunto (PMP) permiten que un punto de acceso atienda a varios clientes. Su factibilidad depende de la línea de vista, la zona de Fresnel, la distancia, la frecuencia, la interferencia y la disponibilidad de energía.

Las redes móviles proporcionan cobertura y movilidad, pero la información pública no incluye todos sus parámetros de sectorización, potencia, carga y backhaul. Por ello, la arquitectura híbrida combina FO en los tramos compartidos o con mayor concentración de tráfico y radioenlaces cuando permiten extender la cobertura o sustituir un tramo cableado de manera técnica y económicamente conveniente [7], [9].

La zona de Fresnel es el volumen elipsoidal que rodea la trayectoria directa entre dos antenas. Aunque exista línea de vista, la presencia de obstáculos en esta zona puede causar difracción, pérdida de señal y menor capacidad. Su verificación definitiva requiere un perfil del terreno y un presupuesto de enlace [28].

2.4 Grafos y algoritmos genéticos

Una red de telecomunicaciones puede representarse mediante un grafo (G=(V,E)), donde los vértices corresponden al POP, sitios, postes, puntos de acceso y clientes, mientras que las aristas representan tramos de fibra óptica, radioenlaces PTP y conexiones de acceso PMP. Cada enlace contiene atributos técnicos y económicos, como distancia, tecnología, compatibilidad, capacidad y costo. Debido a que la selección conjunta de ubicaciones, equipos, enlaces y rutas produce un espacio combinatorio elevado, el diseño no puede resolverse únicamente mediante caminos mínimos. Para explorar este espacio se utiliza un algoritmo genético (GA), en el que cada individuo representa una posible configuración de la red y se evalúa según su factibilidad, cobertura y costo.

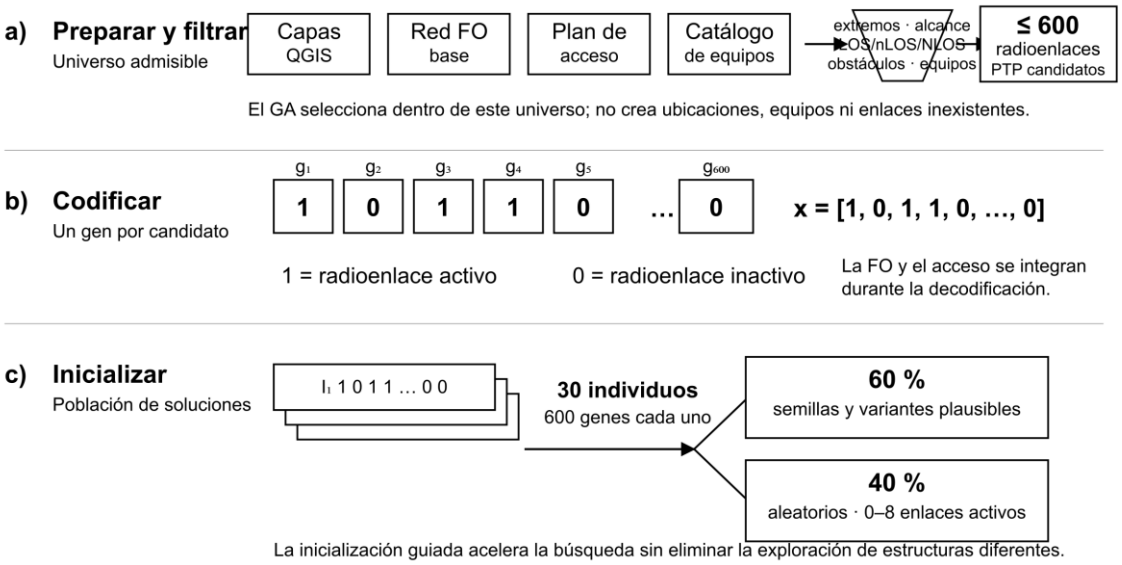


Figura 2. Preparación, codificación e inicialización del algoritmo genético. Fuente: elaboración propia.

La Figura 2 resume la preparación de las entradas y la construcción de la población inicial. Antes de ejecutar el GA se combinan las capas geográficas, la red base de fibra óptica, el plan de acceso previamente optimizado y el catálogo de equipos. El preprocesamiento genera radioenlaces PTP y descarta aquellos que incumplen condiciones de distancia, tipos de extremos, obstáculos, propagación LOS, nLOS o NLOS, compatibilidad de equipos o soporte de instalación. El conjunto resultante se acotó a un máximo de 600 candidatos, límite alcanzado en las ejecuciones finales.

Cada candidato ocupa una posición fija en el cromosoma binario (x=(x_1,\ldots,x_{600})), con (x_i\in{0,1}). El valor 1 activa el radioenlace asociado y el valor 0 lo mantiene inactivo. Por lo tanto, cada gen representa un enlace específico entre dos ubicaciones y no un registro individual del catálogo. La fibra óptica que no es reemplazada válidamente y los enlaces PMP del plan de acceso se incorporan posteriormente durante la decodificación.

La población inicial contiene 30 individuos. Su generación combina variaciones de soluciones semilla técnicamente plausibles, utilizadas con una probabilidad del 60 %, e individuos aleatorios para mantener diversidad. Estos últimos comienzan con entre cero y ocho radioenlaces activos, evitando configuraciones iniciales innecesariamente densas y costosas.

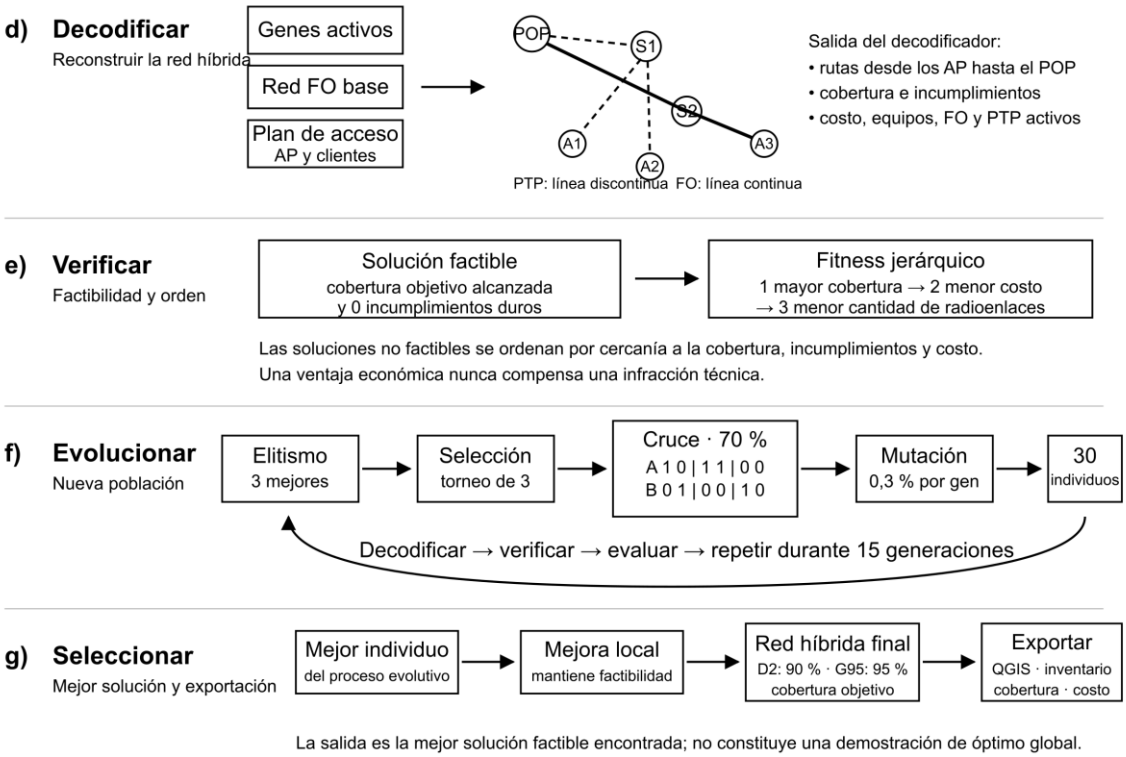


Figura 3. Evaluación, evolución y selección de la red híbrida. Fuente: elaboración propia.

La Figura 3 presenta la evaluación y evolución de la población. Para evaluar un cromosoma, el decodificador incorpora los radioenlaces activos, conserva la fibra óptica no reemplazada y agrega los puntos de acceso y las asignaciones de clientes. A partir de la red híbrida resultante reconstruye las rutas hacia el POP y calcula cobertura, costo, equipamiento e incumplimientos técnicos.

Las reglas duras utilizadas para determinar la factibilidad se detallan en la Tabla 4. En conjunto, verifican la cobertura y unicidad de las asignaciones, la conectividad al POP, la coherencia topológica, la admisibilidad geométrica de los enlaces, la compatibilidad y disponibilidad de equipos y la sustitución válida de los tramos de fibra óptica.

Una solución se considera factible cuando alcanza la cobertura objetivo y no presenta incumplimientos duros. El fitness utiliza un ordenamiento jerárquico: entre las soluciones factibles se priorizan la mayor cantidad de clientes servidos, el menor costo y, finalmente, la menor cantidad de radioenlaces. Las soluciones no factibles se ordenan según su cercanía a la cobertura objetivo, el número de incumplimientos y el costo. De este modo, una ventaja económica no puede compensar una infracción técnica. El throughput y la latencia se conservan como indicadores referenciales, pero no intervienen directamente en la función de aptitud.

Después de la evaluación, los tres mejores individuos pasan sin cambios a la siguiente generación mediante elitismo. Los progenitores se seleccionan por torneos de tres individuos, se aplica cruce de dos puntos con una

probabilidad del 70 % y una mutación efectiva del 0,3 % por gen. Cada descendiente se decodifica y evalúa nuevamente, repitiendo el proceso durante 15 generaciones.

Finalmente, se conserva el individuo con mejor fitness y se aplica una mejora local destinada a eliminar enlaces innecesarios o reducir el costo sin perder factibilidad ni cobertura. La red seleccionada se reconstruye y exporta en tablas y capas geográficas para su revisión en QGIS. El mismo procedimiento se utiliza para D2 y G95, con metas de cobertura del 90 % y 95 %, respectivamente. Al tratarse de un método heurístico, la salida corresponde a la mejor solución factible encontrada en el espacio explorado y no constituye una demostración de óptimo global.

2.5 Calidad de servicio y evaluación económica

La calidad de servicio se expresa mediante descarga, subida, latencia, disponibilidad y capacidad en hora cargada. La Ley N.º 20.453 protege la neutralidad de red [5], y la Ley N.º 21.046 y sus normas técnicas introducen medición de velocidad y calidad del acceso a Internet [6]. La Recomendación UIT-T Y.1540 provee conceptos para medir desempeño de redes IP [10]. En consecuencia, la comparación no se limita a 'cubierto/no cubierto': un cliente cubierto puede recibir un servicio reducido por agregación o congestión.

En economía, CAPEX representa la inversión inicial; OPEX, los costos recurrentes de operación; TCO, el costo total de propiedad; y valor presente (VP), la actualización de flujos futuros. El costo por cliente y por punto porcentual permite comparar alternativas de distinta escala. Estos indicadores son estimaciones de prefactibilidad y no cotizaciones de obra. La separación entre inversión inicial, gasto operativo y viabilidad de proyectos rurales es coherente con la Guía de soluciones de conectividad de última milla de la UIT y con el marco de viabilidad de proyectos Partner2Connect [7], [17].

2.6 Regulación e infraestructura de referencia

El inventario de sitios móviles se obtuvo del portal público de antenas y del Registro Nacional de Conectividad de SUBTEL [4]. Debido al carácter referencial de estos antecedentes, las ubicaciones publicadas se utilizaron exclusivamente para construir los escenarios TELCO-H y TELCO-B; no representan la ingeniería de una red comercial ni certifican su cobertura efectiva. Las variables no disponibles, como sectorización, cantidad de usuarios, carga de tráfico, potencia y capacidad del backhaul, se representaron mediante supuestos homogéneos y explícitos para comparar las cuatro alternativas sobre una base común.

La Tabla 2 sintetiza los antecedentes normativos y técnicos utilizados para contextualizar el problema y definir los principales criterios de comparación.

Tabla 2. Antecedentes normativos y técnicos utilizados en la tesina

Fuente o marco de referencia	Utilización en la tesina
Plan Brecha Digital Cero y Ley N.º 21.678 [1],[2],[3]	Fundamentan la relevancia de ampliar la conectividad en sectores rurales o insuficientemente atendidos. No constituyen reglas directas de diseño.
Registro Nacional de Conectividad, portal público de antenas y Ley N.º 20.599 [4], [14]	Permiten construir los escenarios móviles de referencia y reconocer que una instalación debe someterse a revisión territorial, estructural y regulatoria.
Leyes N.º 20.453 y N.º 21.046 y Recomendación UIT-T Y.1540 [5], [6], [10]	Sustentan los indicadores referenciales de cobertura, velocidad, latencia y disponibilidad empleados en la comparación.
Guía de conectividad de última milla y Recomendaciones UIT-T Y.4218 y L.250 [7],[8],[9]	Respaldan la selección tecnológica, la arquitectura híbrida y la construcción progresiva de redes de acceso y transporte.

Fuente o marco de referencia	Utilización en la tesina
Marco Partner2Connect de la UIT [17]	Fundamenta el uso de CAPEX, OPEX, TCO y valor presente para evaluar la sostenibilidad económica de las alternativas.

Estos antecedentes orientan la formulación y evaluación técnico-económica, pero no convierten las redes modeladas en proyectos de ingeniería de detalle ni certifican su cumplimiento regulatorio. Antes de una eventual implementación se requerirían levantamientos en terreno, mediciones RF, comprobación de línea de vista y zona de Fresnel, validación del backhaul y de las capacidades eléctricas y estructurales, cotizaciones, permisos y diseños constructivos específicos.

2.7 Trabajos relacionados

En la Universidad Técnica Federico Santa María se han desarrollado trabajos sobre redes de transporte para servicios 5G [18], monitoreo remoto mediante LoRa en lugares sin infraestructura de telecomunicaciones [19] y desempeño de enlaces inalámbricos de largo alcance basados en IEEE 802.11 [20]. LoRa (Long Range) se orienta a comunicaciones de largo alcance, bajo consumo y baja velocidad para telemetría e Internet de las cosas; por ello, constituye un antecedente de conectividad especializada, pero no una alternativa de banda ancha comparable con D2, G95 o las redes móviles.

Estos trabajos abordan separadamente el transporte, la propagación, el monitoreo y el desempeño inalámbrico. La contribución de esta tesina es integrar, en un mismo caso de estudio, información geográfica, demanda georreferenciada, catálogos de equipos, restricciones físicas, optimización mediante un algoritmo genético, validación técnica y comparación económica con escenarios móviles construidos a partir de información pública.

3 Caso de estudio y datos

3.1 Pan de Azúcar

El área de estudio corresponde a Pan de Azúcar, comuna de Coquimbo, y presenta características rurales y periurbanas, con actividad agrícola, asentamientos residenciales y unidades productivas distribuidas de manera heterogénea [30]. El territorio combina cultivos, caminos secundarios, viviendas agrupadas y propiedades dispersas, además de elevaciones (cerros), árboles y plantaciones que pueden dificultar la línea de vista, lo que lo convierte en un caso apropiado para estudiar redes de última milla.

La investigación no supone que el sector carezca completamente de conectividad, sino que evalúa soluciones alternativas y las compara con escenarios móviles construidos a partir de información pública. La demanda comprende 9.625 puntos georreferenciados correspondientes a viviendas o empresas. El diseño considera un POP ubicado en infraestructura existente, caminos, postes, sitios potenciales, obstáculos y zonas de baja prioridad. La cartografía se procesó en QGIS [34] y el análisis de redes se implementó mediante grafos y rutas de menor costo [11], [15].



Figura 4. Delimitación del área de estudio de Pan de Azúcar y su relación con el entorno de Coquimbo. Fuente: elaboración propia en QGIS.

3.2 Fuentes de entrada

El modelo utiliza dos grupos de datos. El primero corresponde a las capas geográficas preparadas en QGIS [34], que representan la demanda, los caminos y postes, los sitios de instalación, los obstáculos, las zonas de baja prioridad y el límite del área de estudio. El segundo reúne los catálogos técnicos y económicos de equipos de acceso, transporte y soporte, con atributos de función, tecnología, alcance, capacidad, compatibilidad, disponibilidad, costo y throughput referencial. La Figura 5 presenta las capas geográficas**,** la Figura 6 muestra extractos de los catálogos de equipamiento y la Tabla 3 resume la función de los grupos de datos.

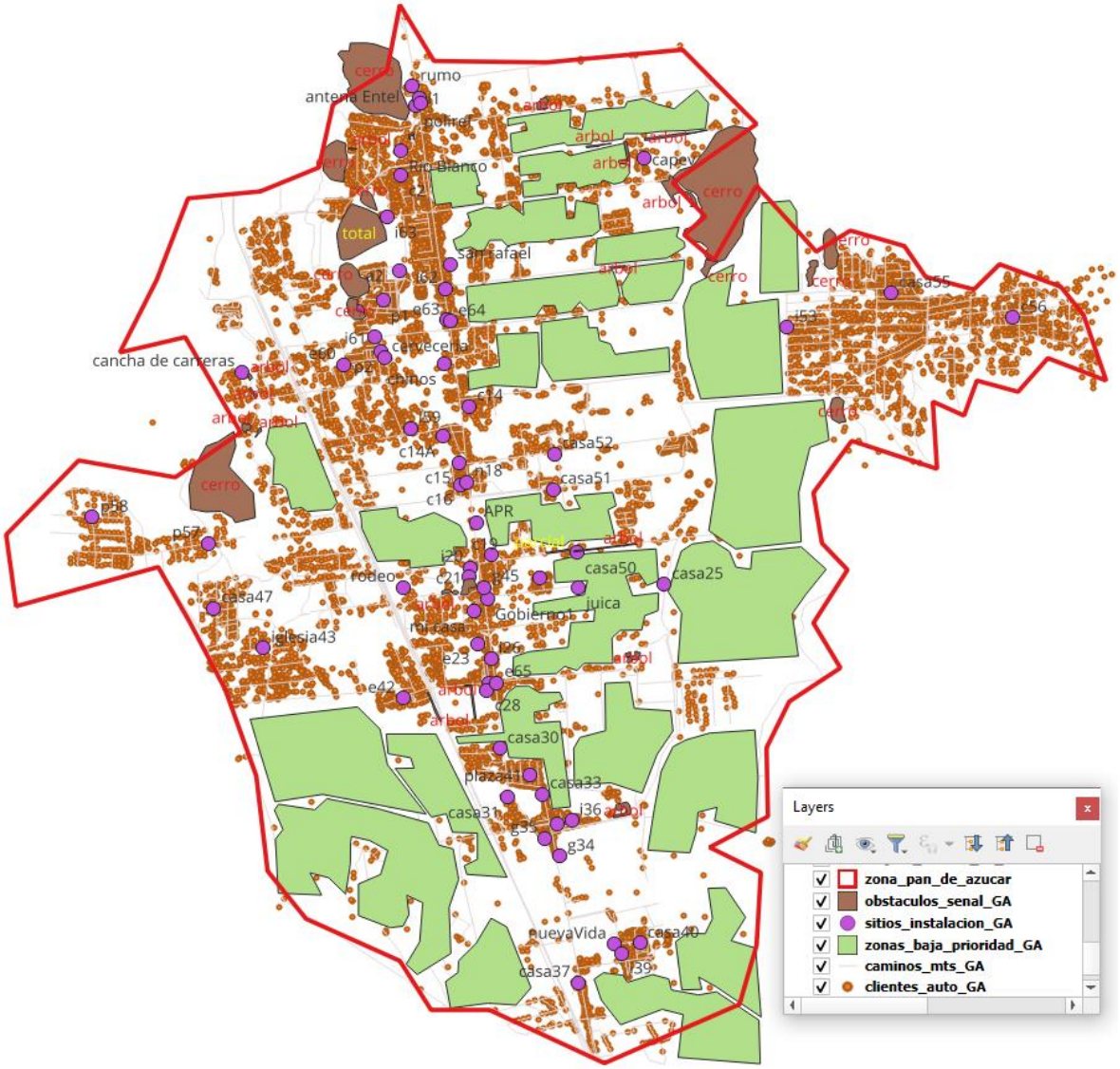
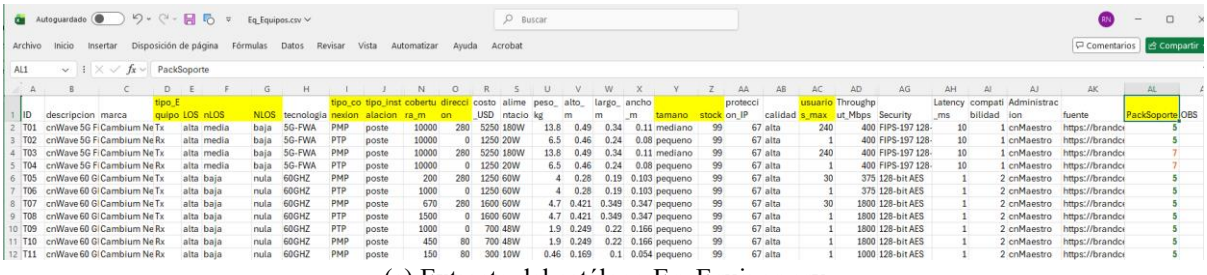
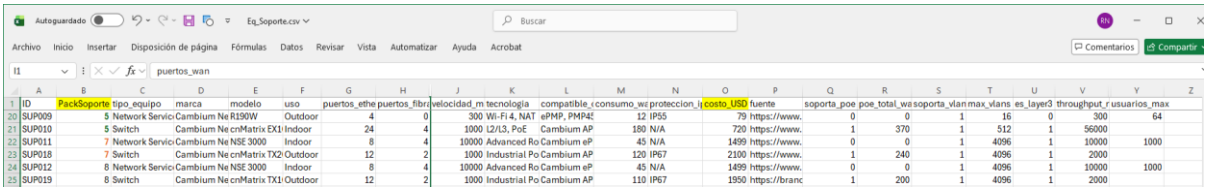


Figura 5. Capas geográficas de entrada del área de estudio: clientes, caminos, sitios, obstáculos y zonas de baja prioridad. Fuente: elaboración propia en QGIS.



ID	descripcion	marca	tipo_Equipo	LOS	nLOS	NLOS	tecnologia	tipo_conexion	tipo_instalacion	cobertura_m	direccion	costo_USD	alimentacion	peso_kg	alto_m	largo_m	ancho_m	tamano	stock	proteccion_IP	calidad	usuarios_max	Throughput_Mbps	Security	Latency_ms	compatibilidad	Administracion	fuente	PackSoporte	OBS
T01	cnWave 5G Fi	Cambium Ne	Tx	alta	media	baja	5G-FWA	PMP	poste	10000	280	5250	180W	13.8	0.49	0.34	0.11	mediano	99	67	alta	240	400	FIPS-197 128-	10	1	cnMaestro	https://brandc	5	
T02	cnWave 5G Fi	Cambium Ne	Rx	alta	media	baja	5G-FWA	PTP	poste	10000	0	1250	20W	6.5	0.46	0.24	0.08	pequeno	99	67	alta	1	400	FIPS-197 128-	10	1	cnMaestro	https://brandc	5	
T03	cnWave 5G Fi	Cambium Ne	Tx	alta	media	baja	5G-FWA	PMP	poste	10000	280	5250	180W	13.8	0.49	0.34	0.11	mediano	99	67	alta	240	400	FIPS-197 128-	10	1	cnMaestro	https://brandc	7	
T04	cnWave 5G Fi	Cambium Ne	Rx	alta	media	baja	5G-FWA	PTP	poste	10000	0	1250	20W	6.5	0.46	0.24	0.08	pequeno	99	67	alta	1	400	FIPS-197 128-	10	1	cnMaestro	https://brandc	7	
T05	cnWave 60 G	Cambium Ne	Tx	alta	baja	nula	60GHZ	PMP	poste	200	280	1250	60W	4	0.28	0.19	0.103	pequeno	99	67	alta	30	375	128-bit AES	1	2	cnMaestro	https://brandc	5	
T06	cnWave 60 G	Cambium Ne	Rx	alta	baja	nula	60GHZ	PTP	poste	1000	0	1250	60W	4	0.28	0.19	0.103	pequeno	99	67	alta	1	375	128-bit AES	1	2	cnMaestro	https://brandc	5	
T07	cnWave 60 G	Cambium Ne	Tx	alta	baja	nula	60GHZ	PMP	poste	670	280	1600	60W	4.7	0.421	0.349	0.347	pequeno	99	67	alta	30	1800	128-bit AES	1	2	cnMaestro	https://brandc	5	
T08	cnWave 60 G	Cambium Ne	Rx	alta	baja	nula	60GHZ	PTP	poste	1500	0	1600	60W	4.7	0.421	0.349	0.347	pequeno	99	67	alta	1	1800	128-bit AES	1	2	cnMaestro	https://brandc	5	
T09	cnWave 60 G	Cambium Ne	Rx	alta	baja	nula	60GHZ	PTP	poste	1000	0	700	48W	1.9	0.249	0.22	0.166	pequeno	99	67	alta	1	1800	128-bit AES	1	2	cnMaestro	https://brandc	5	
T10	cnWave 60 G	Cambium Ne	Rx	alta	baja	nula	60GHZ	PMP	poste	450	80	700	48W	1.9	0.249	0.22	0.166	pequeno	99	67	alta	1	1800	128-bit AES	1	2	cnMaestro	https://brandc	5	
T11	cnWave 60 G	Cambium Ne	Rx	alta	baja	nula	60GHZ	PMP	poste	150	80	300	10W	0.46	0.169	0.1	0.054	pequeno	99	67	alta	1	1000	128-bit AES	1	2	cnMaestro	https://brandc	5	

(a) Extracto del catálogo Eq_Equipos.csv.



	ID	PackSoporte	tipo_equipo	marca	modelo	uso	puertos_ethe	puertos_fibr	velocidad_m	tecnologia	compatible_	consumo_wa	proteccion_i	costo_USD	fuente	soporta_poe	poe_total_wa	soporta_vlan	max_vlans	es_layer3	throughput_r	usuarios_max
20	SUP009	5	Network Servic	Cambium Ne	R190W	Outdoor	4	0	300	Wi-Fi 4, NAT	ePMP, PMP4	12	IP55	79	https://www.	0	0	1	16	0	300	64
21	SUP010	5	Switch	Cambium Ne	cnMatrix EX1	Indoor	24	4	1000	L2/L3, PoE	Cambium AP	180	N/A	720	https://www.	1	370	1	512	1	56000	
22	SUP011	7	Network Servic	Cambium Ne	NSE 3000	Indoor	8	4	10000	Advanced Ro	Cambium eP	45	N/A	1499	https://www.	0	0	1	4096	1	10000	1000
23	SUP018	7	Switch	Cambium Ne	cnMatrix TX2	Outdoor	12	2	1000	Industrial Po	Cambium AP	120	IP67	2100	https://www.	1	240	1	4096	1	2000	
24	SUP012	8	Network Servic	Cambium Ne	NSE 3000	Indoor	8	4	10000	Advanced Ro	Cambium eP	45	N/A	1499	https://www.	0	0	1	4096	1	10000	1000
25	SUP019	8	Switch	Cambium Ne	cnMatrix TX1	Outdoor	12	2	1000	Industrial Po	Cambium AP	110	IP67	1950	https://branc	1	200	1	4096	1	2000	

(b) Extracto del catálogo Eq_Soporte.csv.

Figura 6. Extractos de los catálogos técnicos utilizados como datos de entrada: (a) equipos de acceso y transporte; y (b) equipos de soporte de red. Fuente: elaboración propia a partir de los catálogos entregables.

Tabla 3. Archivos geográficos y catálogos técnicos utilizados como entradas del modelo

Grupo de entrada	Contenido y función en el modelo
Área de estudio	Polígono utilizado para la delimitación y el control espacial. 0_zona_estudio.geojson
Demanda	9.625 clientes georreferenciados, clasificados como hogares o empresas, utilizados para calcular la cobertura sobre clientes únicos. 1_clientes_GA.csv
Corredores y sitios	767 geometrías de caminos con presencia de postes y 68 sitios candidatos, utilizados para definir corredores de FO y ubicaciones de instalación o agregación. 2_camino_mts_GA.csv, 3_sitios_instalacion_GA.csv
Restricciones territoriales	32 polígonos de obstáculos y 26 zonas de baja prioridad, utilizados para validar trayectorias o penalizar ubicaciones menos convenientes. 4_obstaculos_senal_GA.csv, 5_zonas_baja_prioridad_GA.csv
Catálogos técnicos	Equipos de acceso, transporte y soporte utilizados para validar compatibilidad, capacidad, disponibilidad, costo y generación de la lista de materiales. Eq_Equipos.csv, Eq_Soporte.csv

Antes de ingresar al algoritmo, ambos grupos se someten a un preprocesamiento que valida archivos, campos obligatorios, coordenadas, identificadores, geometrías, unidades, dominios y valores nulos. Esta etapa se implementó en Google Colab [31] mediante el cuaderno PREprocesamientoGA.ipynb [22]. La aptitud de propagación permanece nula para la fibra óptica, porque las condiciones LOS, nLOS y NLOS solo corresponden a enlaces inalámbricos.

No todos los atributos de los catálogos intervienen en el fitness. La implementación utiliza principalmente función, cobertura, compatibilidad, capacidad, disponibilidad, transporte y costo; los campos de seguridad, protección IP y administración se conservan para futuras ampliaciones. El preprocesamiento no diseña la red ni calcula el fitness: evita que datos inválidos se interpreten como decisiones del algoritmo.

3.3 Red móvil de referencia

La red móvil de referencia se construyó utilizando el Portal de Antenas Autorizadas y en Servicio [4], el Registro Nacional de Conectividad [32] y su Anexo 1 sobre cobertura e infraestructura móvil [33]. Estas fuentes permitieron identificar siete sitios físicos con registros de tecnologías 3G, 4G y 5G. Como la información pública no contiene todos los parámetros necesarios para reproducir la propagación radioeléctrica real, se definieron dos escenarios geométricos de cobertura sobre esos mismos emplazamientos.

TELCO-H, escenario híbrido conservador, combina 3G Base, 4G Low y 5G Base, y cubre 8.528 clientes, equivalentes al 88,60 % del total. TELCO-B utiliza 4G Base como cota geométrica superior y alcanza los 9.625 clientes, equivalentes al 100 % de cobertura geométrica. Las denominaciones Base y Low son categorías internas y no corresponden a clasificaciones oficiales de SUBTEL; asimismo, el resultado de TELCO-B no constituye una medición en terreno ni acredita cobertura efectiva. Ambos escenarios utilizan los mismos siete

sitios y reciben igual CAPEX y OPEX; únicamente cambia la hipótesis de cobertura. Las Figuras 7 y 8 representan los escenarios TELCO-H y TELCO-B, respectivamente.

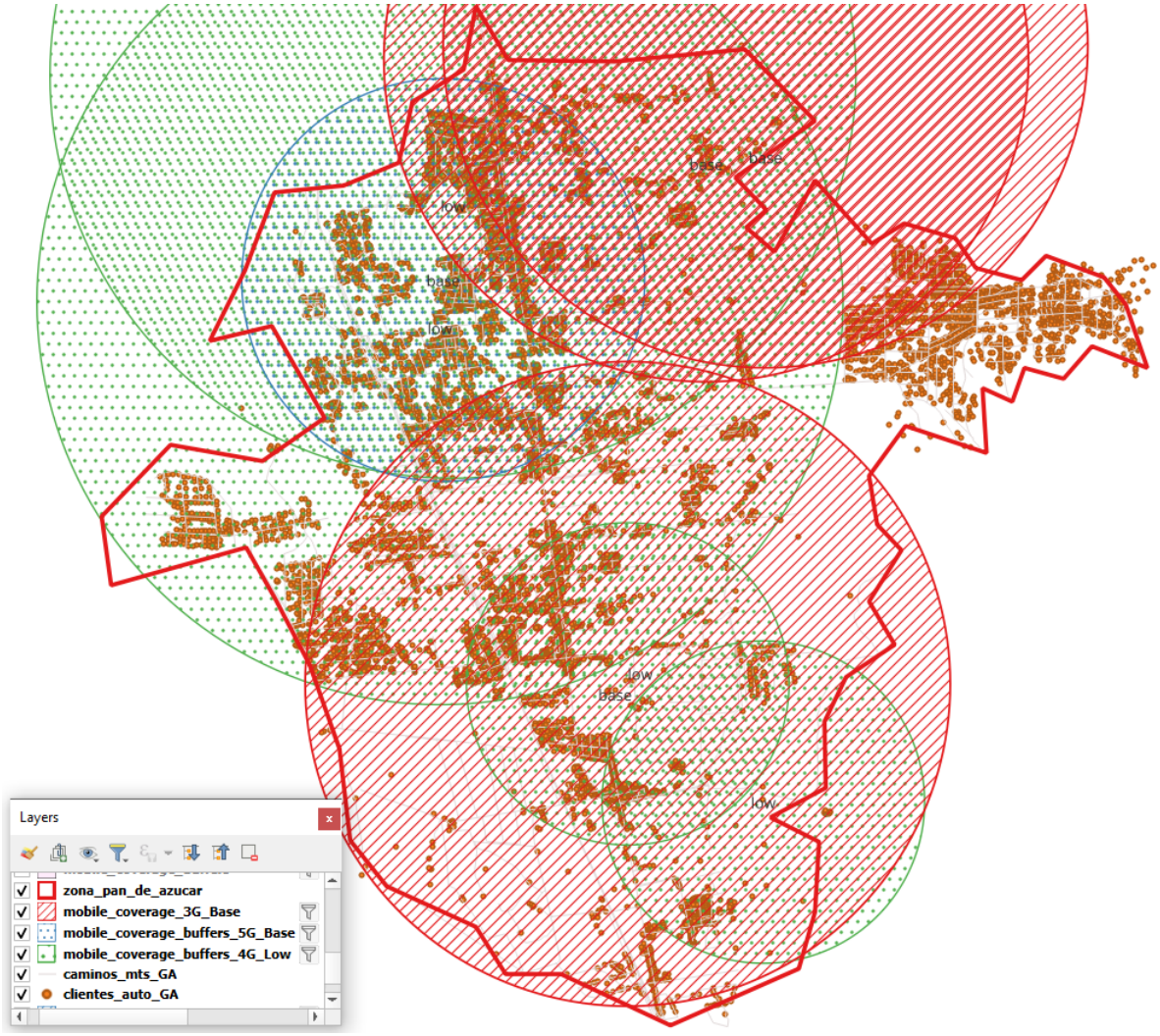


Figura 7. Cobertura geométrica modelada para el escenario TELCO-H. Fuente: elaboración propia en QGIS a partir de datos públicos de SUBTEL [4], [32], [33].

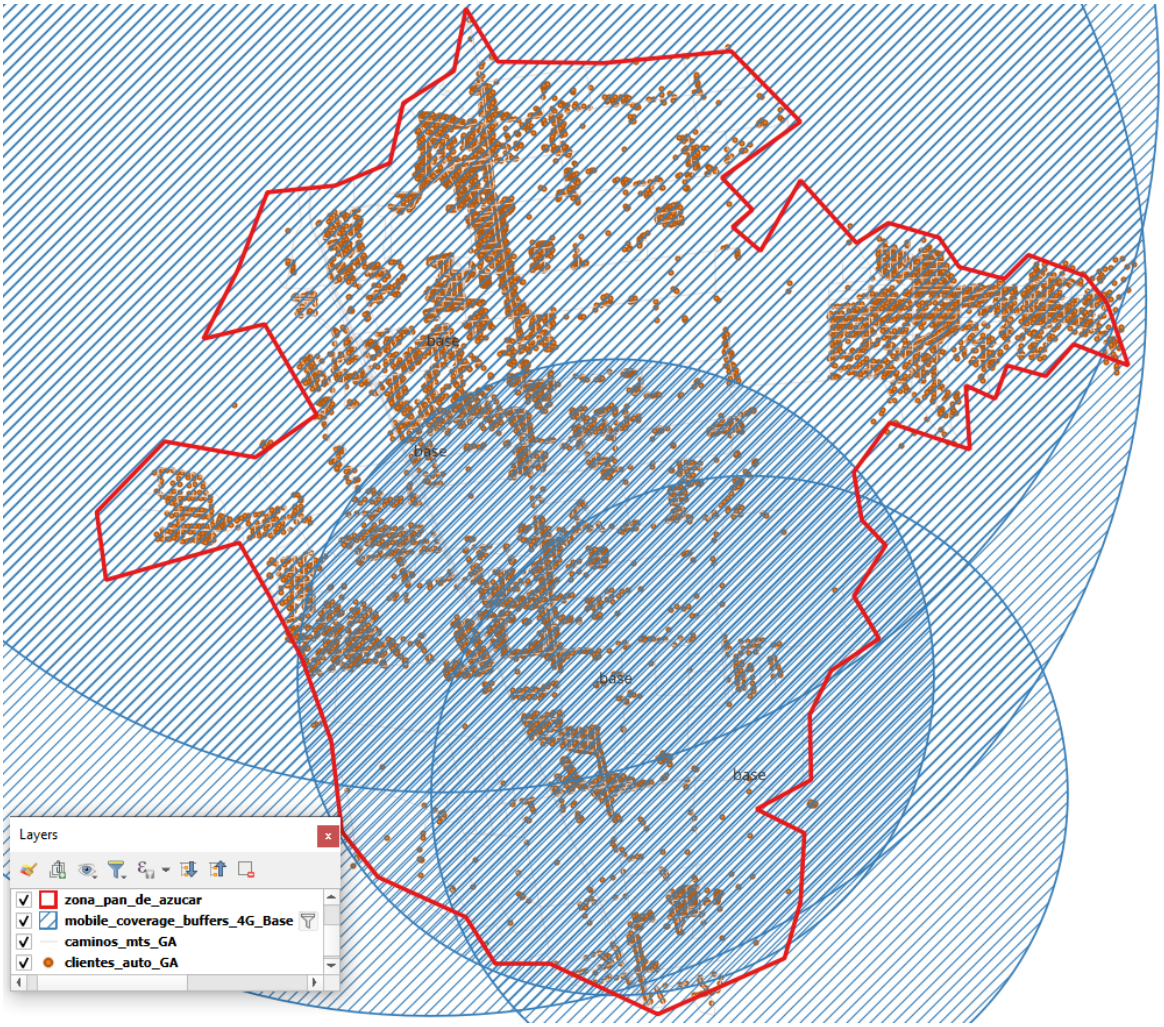


Figura 8. Cobertura geométrica modelada para el escenario TELCO-B. Fuente: elaboración propia en QGIS a partir de datos públicos de SUBTEL [4], [32], [33].

4 Metodología

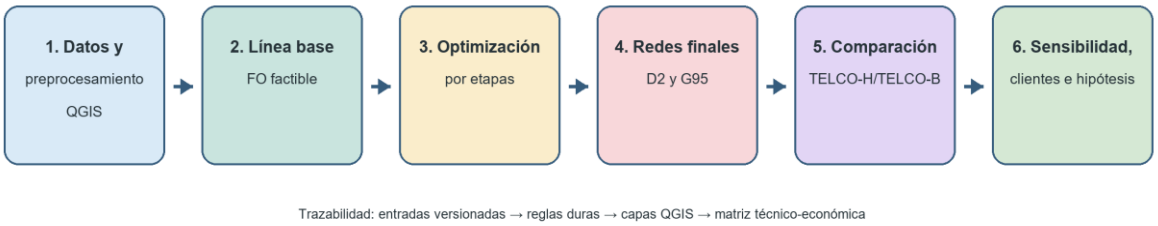


Figura 9. Esquema metodológico de la investigación. Fuente: elaboración propia.

4.1 Principio de descomposición

Las primeras aproximaciones intentaron optimizar simultáneamente ubicaciones, puntos de acceso, equipos, azimuts, fibra óptica, radioenlaces, sitios y clientes. El número de combinaciones produjo un consumo excesivo de memoria y, en algunas pruebas, ejecuciones superiores a doce horas sin obtener una solución utilizable. Por ello, el problema se reformuló mediante una estrategia de descomposición, representada en la Figura 9.

Primero se validan las entradas y se construye una línea base de FO factible. Luego se aplican mejoras verificables sobre el acceso y el transporte: reasignación de clientes, ajuste de equipos y azimuts, sustitución selectiva de FO por radioenlaces, consolidación de AP y utilización de capacidad residual. A partir de la alternativa económica D2 se amplía la cobertura hasta obtener G95. En cada etapa se comprueban las reglas duras, las capas geográficas, los costos y la trazabilidad antes de conservar la red resultante.

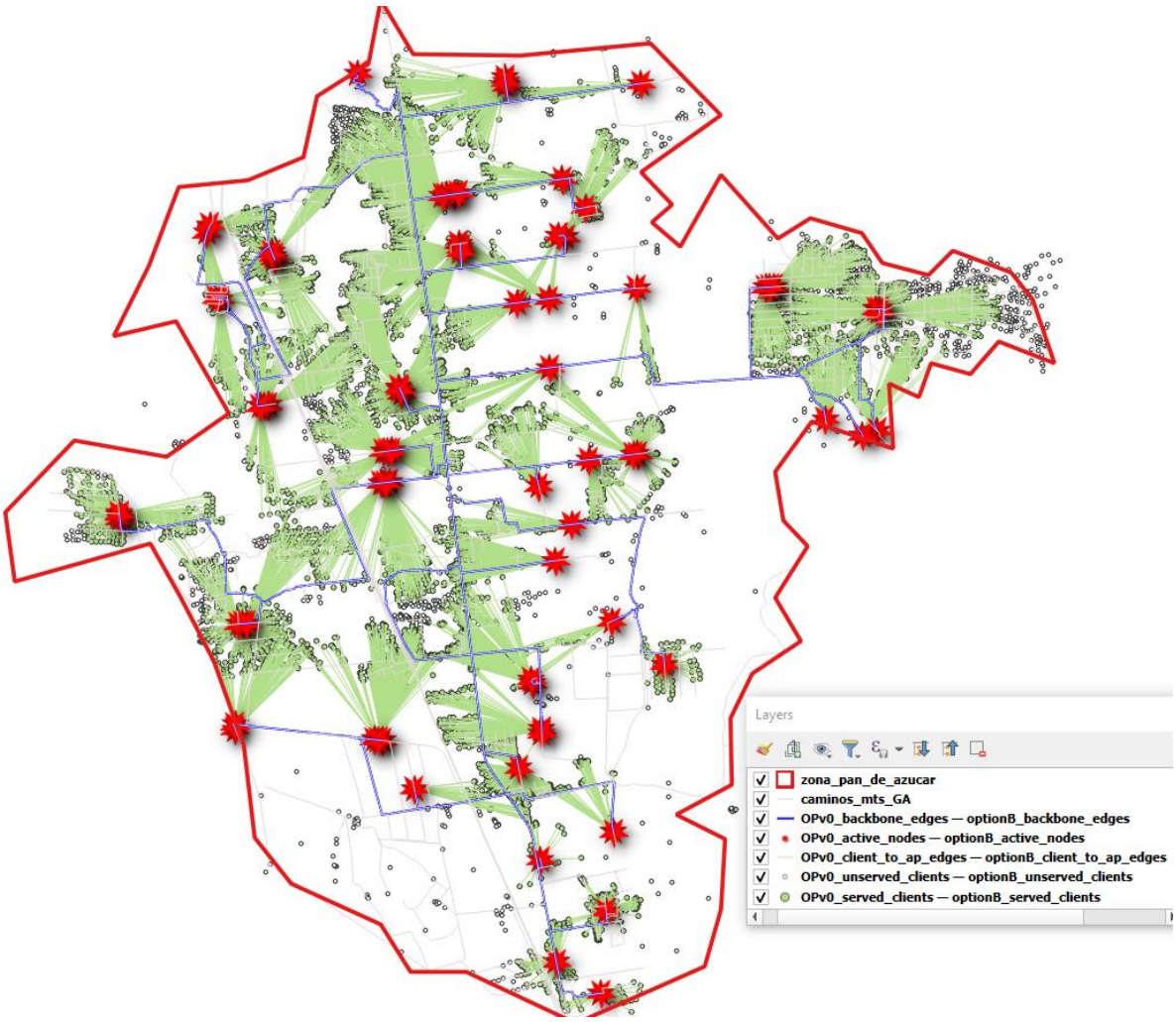


Figura 10. Línea base FO utilizada como solución inicial: FO activa en azul, AP en rojo, asignaciones en verde y clientes no atendidos en negro. Fuente: elaboración propia en QGIS [23].

4.2 Línea base FO

La línea base FO es una red inicial factible construida antes de la optimización. Utiliza fibra óptica exclusivamente en el transporte, siguiendo corredores habilitados por caminos y postes para conectar el punto

de presencia (POP) con los puntos de acceso (AP). La conexión entre cada AP y sus clientes es inalámbrica; por tanto, la FO no llega directamente a los usuarios finales (véase Anexo B). Esta estructura es coherente con las topologías de acceso óptico descritas en [9].

Las capas de caminos y postes se representaron mediante un grafo ponderado, donde los nodos corresponden a ubicaciones admisibles, las aristas a tramos disponibles para desplegar FO y el peso a su longitud. Sobre este grafo se aplicó el algoritmo de Dijkstra [11] para obtener rutas de menor longitud entre el POP y los AP [22], [23]. La unión de estas rutas produjo una red con 77 AP, 75.758,33 m de FO y 8.667 clientes atendidos, equivalentes al 90,0468 % de cobertura.

Con costos de USD 1/m para material y USD 2/m para instalación, la FO representa USD 227.274,99; los AP, USD 163.616; y la línea base alcanza un costo total de USD 390.890,99 [23]. La expresión “FO mínima” se utiliza en sentido operacional: identifica una red focalizada en rutas de menor longitud, pero no demuestra un mínimo global. Su función es proporcionar una solución inicial factible, reproducible y comparable para las optimizaciones posteriores. La Figura 10 presenta su configuración geográfica.

4.3 Representación, decodificación y ciclo del algoritmo genético

En la implementación final, el algoritmo genético no diseña toda la red desde cero. Las ubicaciones, caminos, obstáculos, costos y características de los equipos se determinan previamente mediante el preprocesamiento geográfico y los catálogos técnicos [22]. A partir de estas entradas se generan y filtran hasta 600 alternativas de radioenlace, cada una representada por una posición de un cromosoma binario.

Cada individuo se aplica sobre el plan de acceso optimizado y la línea base FO. El decodificador reconstruye la red física, identifica la FO activa y retirada, incorpora los radioenlaces y conectores seleccionados, activa los sitios necesarios, establece las rutas entre los AP y el POP y recalcula el inventario y el costo. La factibilidad se determina mediante las reglas duras de la Tabla 4.

Las soluciones se ordenan jerárquicamente: primero deben cumplir las reglas y la cobertura objetivo; entre las factibles se priorizan la mayor cantidad de clientes atendidos, el menor costo y, finalmente, la menor cantidad de radioenlaces. La selección, el cruce y la mutación siguen el ciclo descrito en 2.4, con ejecuciones reproducibles documentadas en [24] y [25]. La mejor solución se exporta como capas geográficas, inventario de materiales, infraestructura activa y retirada, clientes atendidos, costos y validaciones. Los indicadores exploratorios de capacidad y latencia se calculan posteriormente, como se describe en 4.6, y no intervienen en el *fitness*.

Tabla 4. Reglas duras utilizadas para aceptar una solución del algoritmo genético

Regla dura	Validación aplicada
Cobertura y unicidad	Cumplir la meta y asignar cada cliente una sola vez a un AP existente.
Geometría de acceso	Respetar alcance, azimut y apertura del AP para cada cliente asignado.
Obstáculos	No atravesar bloqueos totales, salvo la salida controlada del polígono del POP.
Conectividad al POP	Mantener cada AP conectado físicamente al POP mediante FO o radioenlaces.
Topología de transporte	Permitir POP–SITE, POP–POLE, SITE–SITE y SITE–POLE; prohibir POLE–POLE y ciclos
Compatibilidad de equipos	Utilizar pares Tx–Rx o TRx–TRx con tecnología, alcance y soporte compatibles.
Capacidad, stock e instalación	Respetar usuarios_max, el stock y los límites de instalación en postes y sitios.

Regla dura	Validación aplicada
Sustitución de FO	Retirar FO solo si los radioenlaces activos conservan la conectividad afectada.
Consistencia económica	Contabilizar una vez cada componente activo y conciliarlo con el inventario exportado.

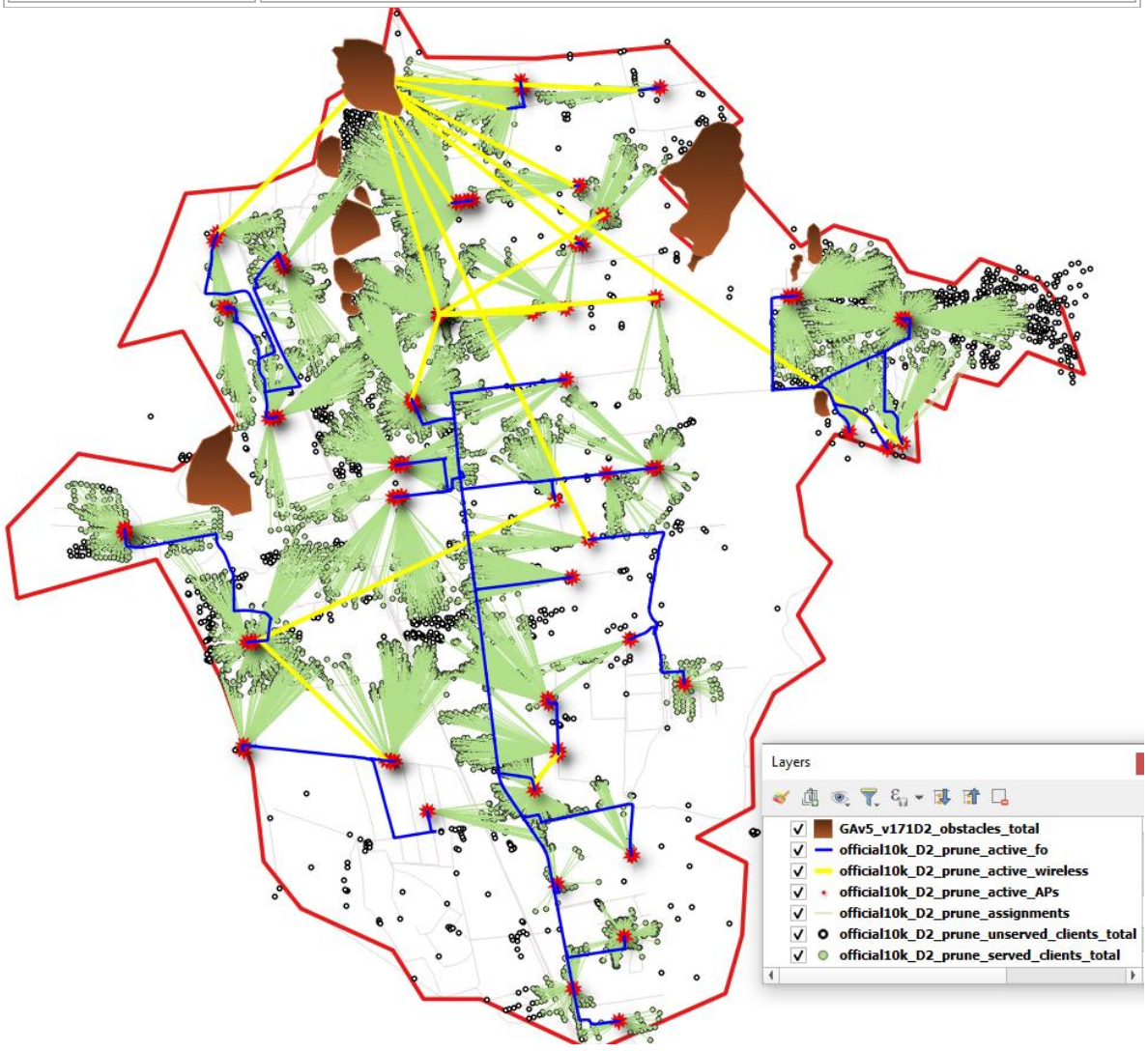


Figura 11. Red final D2: FO activa, radioenlaces, AP, asignaciones y obstáculos considerados por el modelo. Fuente: elaboración propia en QGIS [24].

4.4 Formación de D2 y G95

Las denominaciones D, D1 y D2 representan refinamientos consecutivos de una misma solución. Cada etapa conserva el resultado factible anterior y aplica una mejora acotada, evitando reevaluar simultáneamente todas las combinaciones de clientes, AP, sitios, FO y radioenlaces.

Etapa D: consolidación y optimización del transporte. Se conservaron los 8.667 clientes de la línea base y se consolidó infraestructura alrededor del sitio 35, reemplazando tres AP distribuidos por ocho AP sectorizados. La reoptimización redujo la FO activa de 75.758,33 m a aproximadamente 45.582 m, incorporó 17 radioenlaces

y utilizó tres sitios. El costo disminuyó de USD 390.890,99 a USD 329.964,53, equivalente a un ahorro de 15,59 %.

Etapa D1: utilización de capacidad residual. Se evaluaron los 958 clientes no atendidos y se incorporaron 54 que cumplían las restricciones de alcance, azimut, obstáculos y capacidad. Sin agregar infraestructura ni costo, la cobertura aumentó de 8.667 a 8.721 clientes, equivalente al 90,6078 %.

Etapa D2: eliminación de AP de baja carga. Se examinaron 24 AP con menos de 50 clientes y fue posible retirar dos, reasignando sus 77 usuarios sin modificar la FO, los radioenlaces ni los sitios. La red quedó conformada por 80 AP y alcanzó un CAPEX de USD 327.649,53. D2 fue seleccionada como la mejor alternativa económica factible encontrada para el objetivo cercano al 90 %, sin atribuirle optimalidad global [24]. La activación forzada de un sitio central también fue evaluada, pero no mejoró simultáneamente la factibilidad y el costo.

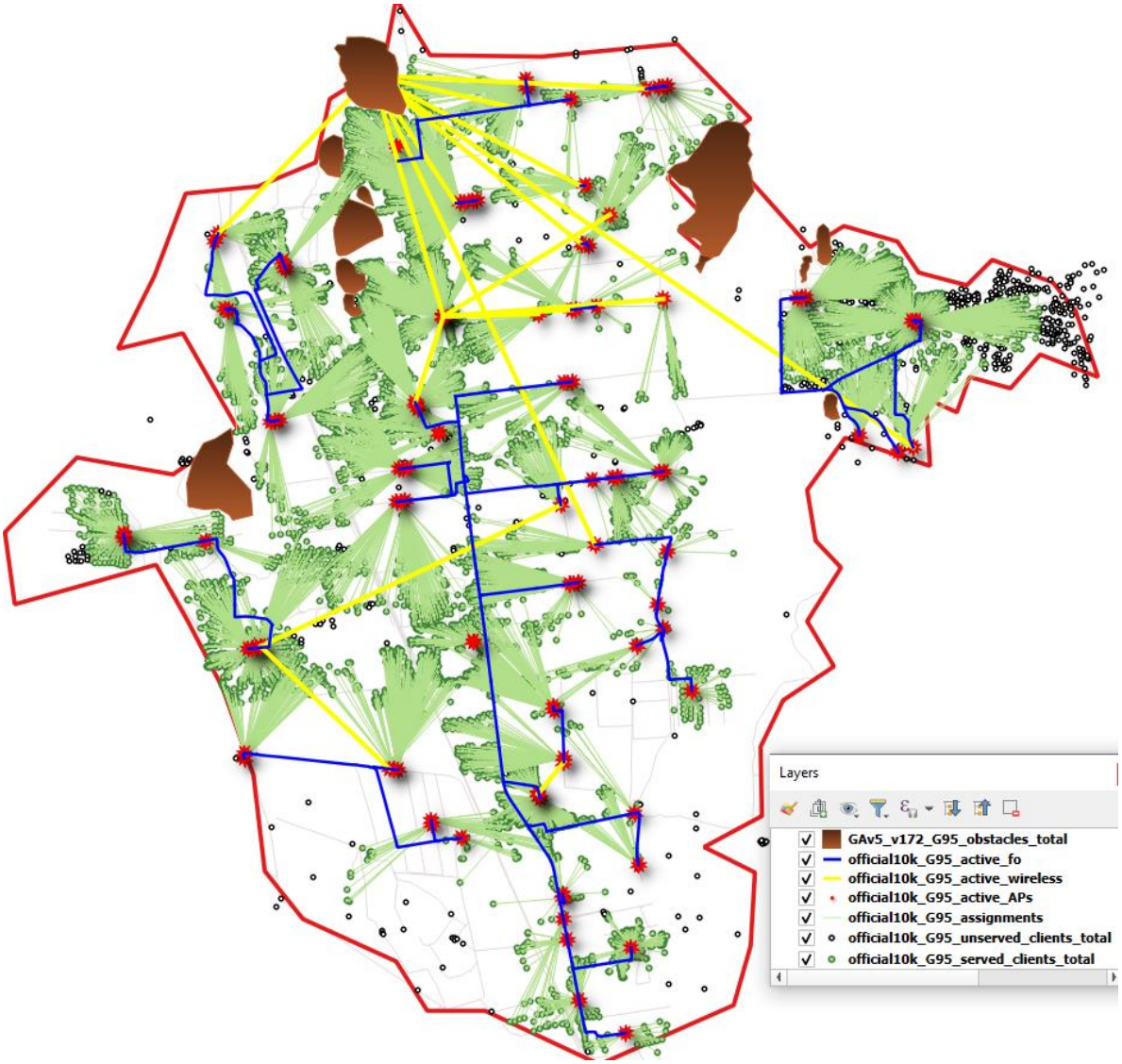


Figura 12. Red final G95 con la misma simbología aplicada a D2. Fuente: elaboración propia en QGIS [25].

Formación de G95. A partir de D2 se incorporaron 423 clientes para alcanzar 9.144 usuarios atendidos, equivalentes al 95,0026 % de cobertura. La búsqueda agregó 31 AP y reoptimizó el transporte. La red final contiene 111 AP, siete sitios, 17 radioenlaces, aproximadamente 48,55 km de FO y un CAPEX de USD

422.726,01 [25]. El incremento respecto de D2 es de USD 95.076,48, aproximadamente USD 225 por cada cliente adicional, lo que evidencia un costo marginal creciente. D2 y G95 se conservaron como las alternativas finales de menor costo y mayor cobertura, respectivamente.

4.5 Indicadores de cobertura y costo

La comparación considera clientes únicos: cada cliente se contabiliza una sola vez, aunque disponga de varios AP o alternativas de acceso.

$$\text{Cobertura (\%)} = 100 \times |C_{serv}| / |C_{total}| \quad (1)$$

En (1), C_serv es el conjunto de clientes atendidos, |C_total| = 9.625 y N_serv = |C_serv|.

$$\text{Costo por cliente cubierto} = CAPEX / N_{serv} \quad (2)$$

$$\text{Costo por punto porcentual} = CAPEX / \text{Cobertura (\%)} \quad (3)$$

En (3), la cobertura se expresa entre 0 y 100; para D2 se utiliza 90,6078 y no 0,906078.

$$TCO_n = CAPEX + n \times OPEX_{anual} \quad (4)$$

El TCO_n representa el costo nominal acumulado del CAPEX y el OPEX durante n años, sin aplicar descuento financiero.

$$VP_n = CAPEX + OPEX_{anual} \times [1 - (1 + r)^{(-n)}] / r \quad (5)$$

En (5), VP_n corresponde al valor presente para un horizonte de n años y r a la tasa de descuento anual. Se utilizaron una tasa del 8 % y horizontes de cinco y diez años [26].

$$VP_n \text{ por cliente cubierto} = VP_n / N_{serv} \quad (6)$$

Para TELCO se definió un escenario de reposición de siete sitios, con USD 585.000 de CAPEX y USD 77.000 de OPEX anual. Estos valores se basan en órdenes de magnitud de la UIT para estaciones 4G rurales, ajustados al caso de estudio, y no corresponden a costos informados por los operadores [17]

$$OPEX_{GA} = CAPEX_{GA} \times (77.000 / 585.000) = CAPEX_{GA} \times 13{,}1624\ \%$$

Esta estimación agrega energía, mantenimiento y operación. Los valores deberán sustituirse por cotizaciones y costos reales durante la ingeniería de detalle; por ello, la comparación corresponde a una evaluación de prefactibilidad bajo supuestos comunes.

4.6 Modelo exploratorio de capacidad y latencia

Después de generar D2 y G95, la matriz técnico-económica estima su capacidad y latencia bajo supuestos comunes. Este análisis no interviene en el fitness ni constituye una validación comercial; su propósito es identificar posibles cuellos de botella y los datos que deberán comprobarse durante la ingeniería de detalle [26].

4.6.1 Estimación de descarga

Para cada cliente simultáneo, la descarga estimada corresponde al menor valor entre la cuota disponible en su AP y las cuotas de los radioenlaces recorridos hasta el POP:

$$q(i) = \min \{ T_a \cdot \eta_a \cdot s_{DL} / \max(1, n_a \cdot \alpha), \min[e \in Ruta(i)] T_e \cdot \eta_e \cdot s_{DL} / \max(1, n_e \cdot \alpha) \} \quad (7)$$

En (7), (T_a) y (T_e) representan los throughputs nominales del AP y del radioenlace; (\eta_a) y (\eta_e), sus eficiencias; (s_{DL}), la fracción destinada a descarga; (n_a) y (n_e), los clientes asignados o transportados; y (\alpha), la proporción concurrente. El escenario base utiliza una eficiencia del 50 %, una fracción de descarga del 80 % y una concurrencia del 20 % [26].

Los resultados se resumen mediante el promedio y los percentiles P10 y P90. El P10 es igualado o superado por el 90 % de los clientes y representa el extremo más exigido; el P90 es superado por el 10 % y representa el extremo favorable. Ninguno corresponde al mínimo o máximo.

4.6.2 Estimación de latencia

La latencia exploratoria de cada cliente se calcula como:

$$L(i) = L_backhaul + L_AP + \Sigma[e \in Ruta(i)]\ L_e + L_FO \qquad (8)$$

En (8), (L_{backhaul}) representa el retardo entre el POP y la red del proveedor; (L_{AP}), el retardo de acceso; (L_e), la latencia de cada radioenlace; y (L_{FO}), la propagación en la fibra óptica. El escenario base considera 10 ms de *backhaul*, 5 ms de acceso y las latencias declaradas para los equipos inalámbricos [26].

4.6.3 Alcance y supuestos de la estimación

La capacidad agregada de descarga del escenario base, estimada en 3.121,2 Mbps, resulta de aplicar eficiencia, fracción de descarga, concurrencia y cuellos de botella; no corresponde a la suma de los throughputs nominales. La disponibilidad anual del 98,5 % también constituye un supuesto de sensibilidad.

La FO se considera no limitante porque las salidas del GA no especifican la capacidad efectiva de todos los puertos y equipos ópticos; únicamente se incorpora su retardo de propagación. Por ello, las estimaciones no demuestran que D2 o G95 soporten demanda comercial en hora cargada. Antes de una implementación deberán verificarse la demanda simultánea, las velocidades de los puertos, la interferencia, el balance de los enlaces y el tráfico real.

4.7 Validación

La metodología utiliza seis niveles complementarios para verificar la consistencia del modelo e interpretar sus resultados y limitaciones:

- **Validación computacional:** comprueba reglas duras, unicidad y preservación de clientes, capacidad, stock, conectividad al POP y concordancia entre costos e inventario. D2 y G95 finalizaron sin infracciones de las reglas evaluadas [24], [25].
- **Validación geográfica:** contrasta en QGIS las capas de AP, FO, radioenlaces, sitios, obstáculos, asignaciones y clientes, cuyos conteos deben coincidir con los archivos de resultados.
- **Validación comparativa:** aplica a TELCO-H, TELCO-B, D2 y G95 las mismas definiciones de cobertura, CAPEX, OPEX, TCO y valor presente, distinguiendo resultados del modelo y supuestos [26].
- **Análisis de sensibilidad:** evalúa escenarios bajo, base y alto para costos, capacidad y latencia, sin sustituir mediciones reales de calidad de servicio.
- **Casos representativos:** examina cinco clientes de distintos sectores para verificar la trazabilidad individual y comparar las alternativas, sin reemplazar la evaluación de los 9.625 clientes.
- **Intervención focalizada:** analiza hipotéticamente la sustitución o el refuerzo de un radioenlace troncal para observar la respuesta del modelo ante una mejora localizada.

En conjunto, estas validaciones demuestran que D2 y G95 son soluciones internamente consistentes, geográficamente trazables y comparables bajo los supuestos definidos. No acreditan desempeño comercial, cobertura radioeléctrica medida ni capacidad agregada real, aspectos que requieren levantamientos en terreno, mediciones RF, pruebas de tráfico y un piloto de implementación.

5 Resultados

5.1 Diseños finales

D2 supera a TELCO-H en 193 clientes y 2,01 puntos porcentuales de cobertura, mientras que G95 incorpora 616 clientes adicionales y aumenta la cobertura en 6,40 puntos. Frente a TELCO-B, D2 y G95 atienden 904 y

481 clientes menos, respectivamente. Sin embargo, el 100 % de TELCO-B corresponde a una cota geométrica superior y no constituye una medición ni certificación de cobertura efectiva.

Tabla 5. Configuración física y cobertura final de las alternativas. Fuente: elaboración propia a partir del inventario público SUBTEL, los resultados finales D2 y G95 y la matriz técnico-económica [4], [24]–[26], [32], [33]

Alternativa	Interpretación	Clientes cubiertos	Cobertura de clientes	Sitios físicos	AP activos	FO activa (km)	Radioenlaces activos
TELCO-H	Escenario geométrico conservador	8.528	88,60 %	7	N/M	N/M	N/M
TELCO-B	Cota geométrica superior 4G Base	9.625	100,00 %	7	N/M	N/M	N/M
D2	Red híbrida económica	8.721	90,61 %	3	80	45,58	17
G95	Red híbrida de mayor cobertura	9.144	95,00 %	7	111	48,55	17

Nota de la Tabla 5. N/M significa “no modelado” y no implica ausencia de infraestructura. Los antecedentes públicos permiten identificar los siete sitios TELCO, pero no su cantidad de AP, longitud de FO ni radioenlaces de backhaul. TELCO-H y TELCO-B utilizan los mismos emplazamientos y difieren únicamente en la hipótesis geométrica de cobertura.

5.1.1 Composición del equipamiento de las redes D2 y G95

Ambas redes utilizan el mismo transporte inalámbrico: 34 equipos que conforman 17 radioenlaces PTP. La diferencia se concentra en el acceso, donde G95 utiliza 111 AP frente a los 80 de D2 para aumentar la cobertura desde 90,61 % hasta 95,00 %.

Tabla 6. Equipamiento final utilizado en las alternativas D2 y G95. Fuente: elaboración propia a partir del catálogo de equipamiento y de los inventarios finales generados por D2 y G95 [24], [25].

(a) Equipos de acceso PMP

ID	Equipo	Tipo	Tecnología	Cobertura y apertura	Throughput nominal	Costo unitario (USD)	D2 (unid.)	G95 (unid.)
T333	XV2-2T1 Outdoor	AP/PMP	5 GHz	800 m; 120°	1.201 Mbps	470	3	15
T335	XE3-4TN + ANT-OM-1X1-05	AP/PMP	6 GHz	500 m; 360°	4.804 Mbps	1.795	10	12
T336	XE3-4TN + ANT-OM-1X1-06	AP/PMP	5 GHz	500 m; 360°	1.201 Mbps	1.795	3	3
T338	XE3-4TN + ANT-D35-4X4-01	AP/PMP	6 GHz	1.500 m; 30°	4.804 Mbps	2.095	44	58
T340	XE3-4TN + ANT-D60-2X2-02	AP/PMP	6 GHz	1.000 m; 60°	4.804 Mbps	2.095	19	22
T352	U7-Pro Outdoor	AP/PMP	6 GHz	465 m; 90°	5.800 Mbps	220	1	1
Total							80	111

El equipamiento de acceso cuesta USD 156.950 en D2 y USD 201.795 en G95. El incremento se concentra principalmente en los equipos T338, T340 y T333 utilizados para ampliar la cobertura.

(b) Equipos de transporte PTP

ID	Equipo	Tipo	Tecnología	Alcance referencial	Throughput nominal	Costo unitario (USD)	D2 (unid.)	G95 (unid.)
T225	RG-AirMetro550G-B + antena CPE Metro	TRx/PTP	5 GHz	15.000 m	867 Mbps	260	4	4
T274	RG-EST450G Station	Tx/PTP	5 GHz	5.000 m	867 Mbps	100	14	14
T275	RG-EST450G Station	Tx/PTP	2,4 GHz	5.000 m	300 Mbps	100	1	1
T276	RG-EST350G	Rx/PTP	5 GHz	5.000 m	867 Mbps	132	3	3
T278	RG-EST330F-P	Rx/PTP	5 GHz	3.000 m	867 Mbps	80	11	11
T281	RG-EST100-E	Rx/PTP	2,4 GHz	500 m	867 Mbps	50	1	1
Total							34	34

Los equipos PTP se instalan en postes y presentan aptitud alta para LOS, baja para nLOS y nula para NLOS. Estas categorías corresponden a restricciones simplificadas de admisibilidad; los valores de alcance y *throughput* son referencias de catálogo, no mediciones en terreno ni variables del *fitness*.

El transporte PTP cuesta USD 3.866 en ambas redes. En consecuencia, el inventario de equipos totaliza USD 160.816 para D2 y USD 205.661 para G95. Estos valores no representan el CAPEX completo, que también incorpora FO, soportes y otros componentes de red.

5.2 Resultados económicos

Tabla 7. Comparación económica de las alternativas en el escenario base. Fuente: elaboración propia a partir de la matriz técnico-económica [26].

Indicador	TELCO-H	TELCO-B	D2	G95
CAPEX (USD)	585.000	585.000	327.649,53	422.726,01
OPEX anual (USD)	77.000	77.000	43.126,52	55.640,86
CAPEX/cliente (USD)	68,60	60,78	37,57	46,23
CAPEX/punto porcentual (USD)	6.602,52	5.850,00	3.616,13	4.449,63
TCO nominal 5 años (USD)	970.000	970.000	543.282,13	700.930,31
TCO nominal 10 años (USD)	1.355.000	1.355.000	758.914,72	979.134,60
VP10 (USD)	1.101.676,27	1.101.676,27	617.031,99	796.080,71
VP10/cliente (USD)	129,18	114,46	70,75	87,06

D2 minimiza el costo por cliente y G95 ofrece un compromiso entre cobertura y costo. Respecto de TELCO-H, G95 incrementa la cobertura en 6,40 puntos porcentuales y reduce el valor presente a diez años por cliente (VP10/cliente; véase Anexo B) desde USD 129,18 hasta USD 87,06. Respecto de TELCO-B, G95 no iguala el 100 % de cobertura geométrica, pero reduce el VP10/cliente en 23,94 %.

5.3 Indicadores modelados de calidad de servicio

En el escenario base, los perfiles TELCO presentan mayor descarga y menor latencia que las estimaciones de D2 y G95. La comparación es orientativa, porque los valores TELCO provienen de perfiles regionales de

experiencia móvil, mientras que D2 y G95 se evalúan mediante un modelo simplificado basado en las rutas de cada cliente.

G95 incorpora 423 clientes y 31 AP adicionales respecto de D2 (véase Anexo B), pero conserva los mismos 17 radioenlaces. Al compartir el transporte entre una demanda mayor, la descarga promedio estimada disminuye de 1,79 a 1,71 Mbps. Por tanto, estos resultados caracterizan alternativas económicas y ampliables, pero no demuestran una mejor experiencia de usuario que TELCO.

Tabla 8. Indicadores de calidad en el escenario base

Indicador	TELCO-H	TELCO-B	D2	G95
Descarga promedio (Mbps)	63,51	30,00	1,79	1,71
Subida promedio (Mbps)	13,20	10,00	0,45	0,43
Descarga P10 (Mbps)	n/d	n/d	0,33	0,31
Latencia promedio (ms)	41,66	40,00	120,67	121,37
Disponibilidad anual	98,4 %	98,5 %	98,5 %*	98,5 %*
Capacidad DL de referencia en hora cargada	n/d	n/d	3.121,2 Mbps	3.121,2 Mbps
Concurrencia	implícita	implícita	20 %	20 %

Nota de la Tabla 8. Supuesto común del escenario, no correspondiente a una medición en terreno. n/d: información no disponible en las fuentes consultadas. Los valores de D2 y G95 son estimaciones referenciales obtenidas mediante el modelo simplificado de la sección 4.6; no representan mediciones de desempeño ni variables optimizadas por el algoritmo genético.

5.4 Validación geográfica mediante cinco clientes representativos

Para verificar la trazabilidad espacial se seleccionaron cinco clientes ubicados en la entrada norte, el centro, el extremo oriental, el extremo sur y el poniente crítico. La selección es intencional y no estadística; permite observar en QGIS cómo cambia su cobertura entre TELCO-H, TELCO-B, D2 y G95.

Los cuatro primeros clientes son atendidos por todas las alternativas. El caso C5 queda fuera de D2, pero es incorporado por G95 mediante infraestructura adicional, lo que ilustra la ampliación hacia sectores periféricos. Estos casos complementan la evaluación de los 9.625 clientes y no la sustituyen.

Tabla 9. Comparación de la cobertura modelada para cinco clientes representativos

Caso	ID	Criterio de selección espacial.	TELCO-H	TELCO-B	D2	G95
C1 Entrada norte	cliente_372	extremo norte.	Sí (4G)	Sí (4G)	Sí	Sí
C2 Centro	cliente_6801	cercano al centro espacial	Sí (5G)	Sí (4G)	Sí	Sí
C3 Sector oriental	cliente_289	extremo oriental.	Sí (3G)	Sí (4G)	Sí	Sí
C4 Extremo sur	cliente_546	extremo sur.	Sí (4G)	Sí (4G)	Sí	Sí
C5 Poniente crítico	cliente_4346	no cubierto D2, recuperado G95	Sí (4G)	Sí (4G)	No	Sí

Nota de la Tabla 9: “Sí” y “No” indican la condición de cobertura obtenida en cada escenario modelado y no una medición efectuada en terreno. En TELCO-H y TELCO-B, la tecnología entre paréntesis corresponde a la capa geométrica que cubre al cliente.

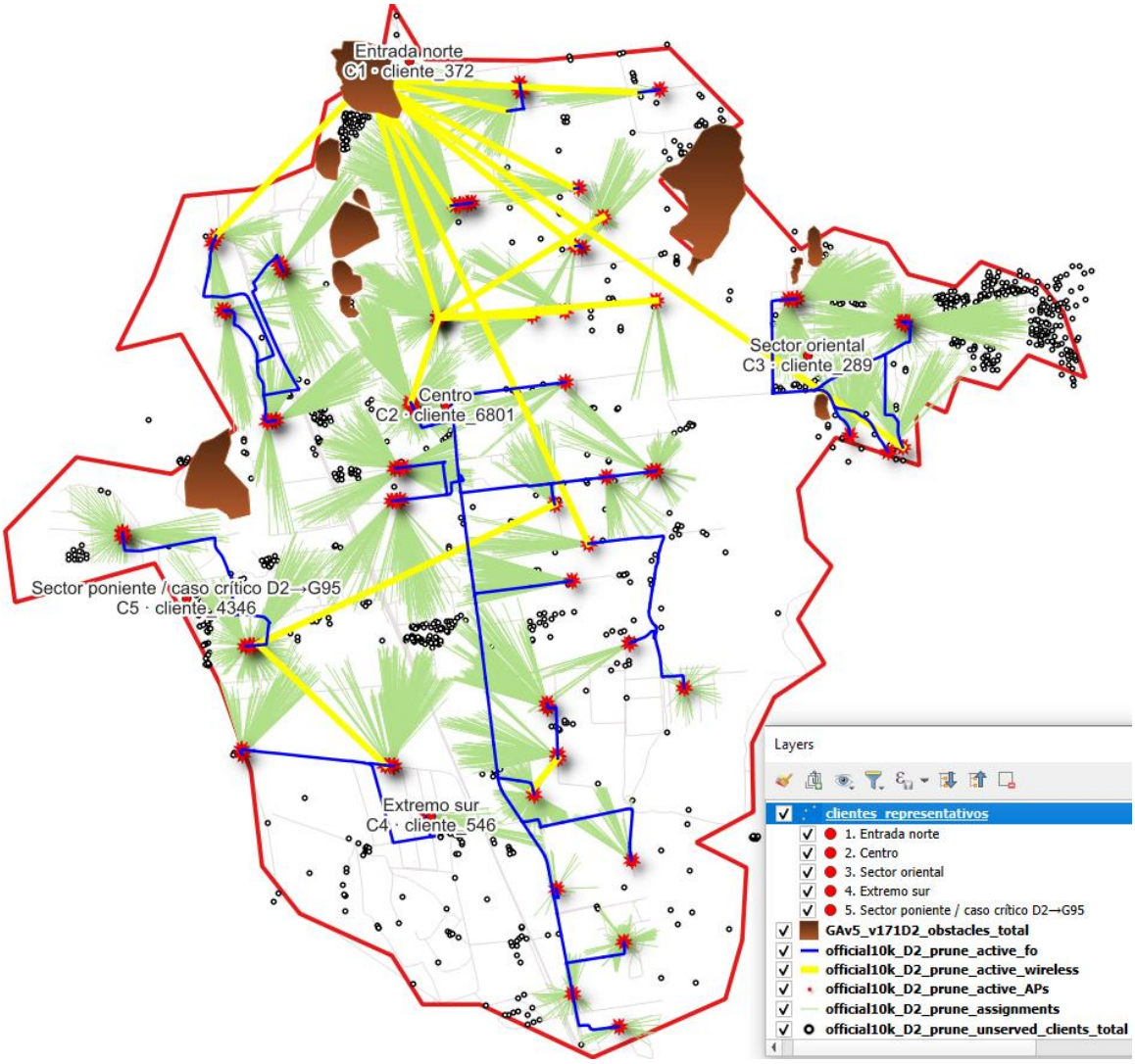


Figura 13. Localización y nombre de los cinco clientes representativos. El caso C5 no es atendido por D2 y es recuperado por G95. Fuente: elaboración propia en QGIS.

5.5 Sensibilidad

El análisis recalcula los indicadores económicos y referenciales de calidad bajo tres escenarios —bajo, base y alto— sin modificar la topología, la cobertura, los equipos ni volver a ejecutar el algoritmo genético. Para TELCO se consideraron, respectivamente, CAPEX/OPEX anual de USD 425.000/59.000, USD 585.000/77.000 y USD 820.000/108.000. Las mismas razones de variación se aplicaron a D2 y G95, con un horizonte de diez años y una tasa de descuento del 8 %.

D2 mantiene el menor VP10 por cliente en los tres escenarios, aproximadamente un 38,19 % inferior al de TELCO-B. G95 permanece un 23,94 % por debajo de TELCO-B y alcanza una cobertura del 95,00 %. Por tanto, la elección se mantiene estable: D2 resulta preferible bajo una mayor restricción presupuestaria, mientras que G95 ofrece más cobertura a un costo superior.

D2 mantiene el menor VP10 por cliente en los tres escenarios, aproximadamente un 38,19 % inferior al de TELCO-B. G95 permanece un 23,94 % por debajo de TELCO-B y alcanza una cobertura del 95,00 %. Por tanto, la elección se mantiene estable: D2 resulta preferible bajo una mayor restricción presupuestaria, mientras que G95 ofrece más cobertura a un costo superior.

En la sensibilidad de calidad, la descarga promedio estimada varía entre 0,72 y 5,01 Mbps para D2 y entre 0,68 y 4,78 Mbps para G95; la latencia varía entre 115,67 y 130,67 ms, y entre 116,37 y 131,37 ms, respectivamente. Los perfiles TELCO mantienen mayor descarga y menor latencia, aunque la comparación sigue siendo referencial: TELCO utiliza perfiles regionales, mientras D2 y G95 emplean un modelo simplificado por rutas. Estos valores no son mediciones en terreno ni resultados optimizados por el algoritmo genético.

La ventaja económica de D2 y G95 es estable frente a variaciones proporcionales generales, pero el análisis no representa cambios específicos en precios tecnológicos, fallas de equipos o costos particulares de instalación.

Tabla 10. Sensibilidad del VP10 por cliente. Fuente: elaboración propia a partir de la matriz técnico-económica [26].

Alternativa	Cobertura	Bajo (USD/cliente)	Base (USD/cliente)	Alto (USD/cliente)
TELCO-H	88,60 %	96,26	129,18	181,13
TELCO-B	100,00 %	85,29	114,46	160,49
D2	90,61 %	52,72	70,75	99,20
G95	95,00 %	64,87	87,06	122,07

5.6 Ejemplo de mejora del troncal

El enlace wl_00081 conecta el POP con el sitio 35 mediante un tramo PTP de 2,98 km y transporta 5.244 clientes en D2 y 5.549 en G95. Por su concentración de tráfico, constituye un punto relevante para evaluar mejoras posteriores.

5.6.1 Configuración y alternativas evaluadas

La configuración actual utiliza un equipo Ruijie T274 RG-EST450G en el POP y un equipo T278 RG-EST330F-P en el sitio 35. en el POP y un T278 en el sitio 35. Se evaluaron dos alternativas: sustituir el enlace por un par Cambium T42 PTP 550 o mantenerlo y agregar tres pares Ruijie en paralelo.

Tabla 11. Comparación de alternativas para reforzar el enlace wl_00081. Fuente: elaboración propia a partir de la matriz técnico-económica [26].

Indicador	Configuración actual	Sustitución Cambium	Cuatro pares Ruijie en paralelo
Pares PTP instalados	1	1	4
Equipos adicionales	0	2 T42	3 T274 + 3 T278
Throughput nominal agregado	867 Mbps	1.360 Mbps	3.468 Mbps
Aumento nominal respecto del enlace actual	—	493 Mbps	2.601 Mbps
Latencia de catálogo por trayecto	60 ms	3 ms	60 ms
Costo total de equipos	USD 180	USD 1.700	USD 720
Costo incremental	—	USD 1.520	USD 540
Costo incremental por Mbps nominal añadido	—	USD 3,08/Mbps	USD 0,21/Mbps
Capacidad DL efectiva bajo los supuestos base	346,8 Mbps	544,0 Mbps	1.387,2 Mbps

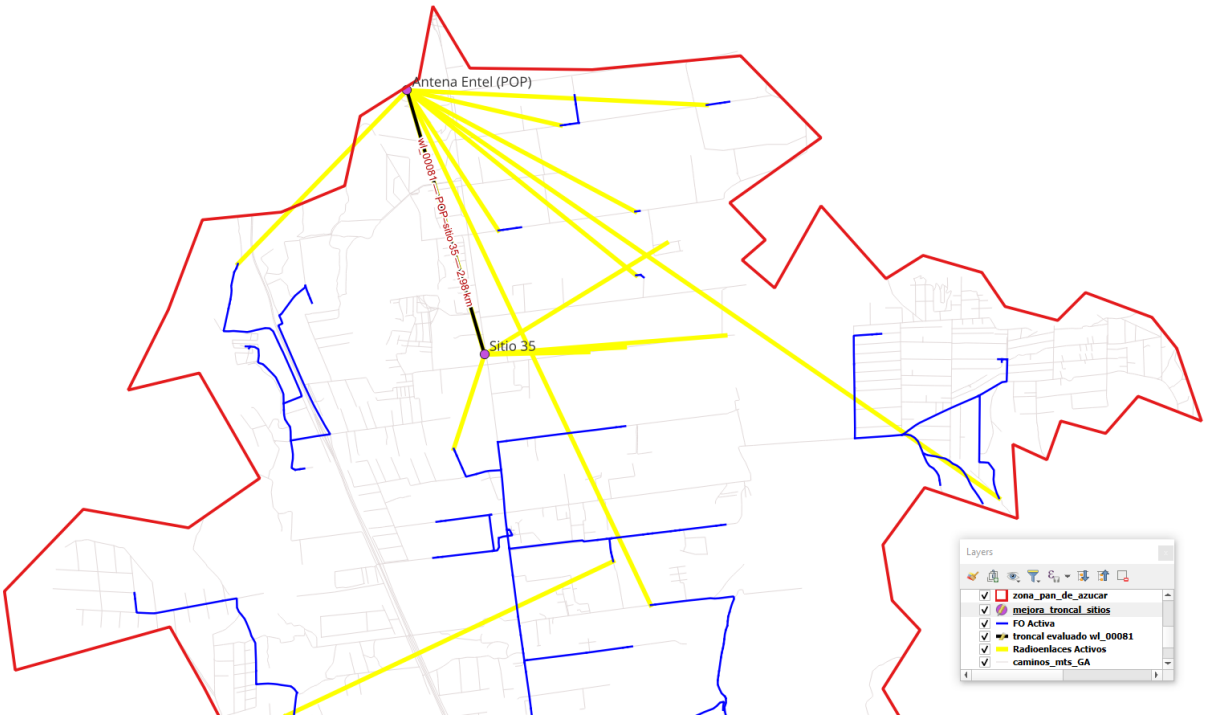


Figura 14. Enlace troncal wl_00081 entre el POP y el sitio 35, con una longitud aproximada de 2,98 km, evaluado para sustitución o refuerzo. Fuente: elaboración propia en QGIS a partir de los resultados del algoritmo genético.

5.6.2 Resultado de la sustitución

La alternativa Cambium aumenta moderadamente la capacidad nominal, pero su principal ventaja es reducir la latencia de catálogo. La descarga promedio estimada aumenta de 1,79 a 1,84 Mbps en D2 y de 1,71 a 1,76 Mbps en G95; la latencia disminuye de 120,67 a 86,39 ms y de 121,37 a 86,78 ms, respectivamente.

5.6.3 Resultado del refuerzo en paralelo

Agregar tres pares Ruijie presenta un menor costo incremental y eleva la capacidad nominal conjunta a 3.468 Mbps. Su aprovechamiento requiere balanceo o agregación de tráfico, interfaces suficientes y coordinación de canales o polarizaciones para evitar autointerferencia. Como la latencia por trayecto permanece en 60 ms, esta alternativa mejora principalmente la capacidad.

Los 3.468 Mbps representan una capacidad nominal máxima y no un throughput garantizado. Para estimar su efecto sobre los clientes sería necesario volver a ejecutar el modelo incorporando los cuatro enlaces. El ejemplo muestra que las redes del GA pueden reforzarse mediante sustitución de equipos, enlaces paralelos o redundancia sin modificar necesariamente su cobertura..

5.6.4 Validaciones necesarias

Antes de implementar alguna alternativa deben verificarse la línea de vista, la zona de Fresnel, el presupuesto de enlace, los canales y la interferencia, la capacidad de los puertos, el montaje, la alimentación PoE y el consumo energético. Los costos comparados incluyen únicamente los radios y excluyen soportes, cableado, licencias, impuestos, energía, instalación y OPEX.

6 Discusión

6.1 Interpretación y aportes

Los resultados respaldan parcialmente la hipótesis. Frente a TELCO-H, D2 y G95 aumentan la cobertura y reducen el CAPEX, el TCO y el VP10 por cliente. Frente a TELCO-B no alcanzan la cobertura geométrica del 100 %, pero conservan una ventaja económica y emplean infraestructura más focalizada. Los escenarios TELCO presentan mayores tasas estimadas de descarga y menores latencias; por ello, las alternativas obtenidas mediante el GA no los superan en todas las dimensiones. La metodología sí demuestra capacidad para generar diseños factibles según las restricciones del modelo, trazables, de menor costo y ampliables.

El principal aporte consiste en integrar información geográfica, catálogos, costos y reglas de conectividad en un flujo reproducible y auditable, aplicado a dos objetivos: D2, orientado al menor costo, y G95, a una cobertura del 95 %. La comparación con TELCO-H y TELCO-B mediante indicadores comunes, junto con el análisis de mejora de un enlace troncal, muestra cómo estas redes pueden evaluarse y ampliarse en una etapa posterior de ingeniería. Los supuestos, cálculos e indicadores se documentan en Matriz_tecnico_economica_MTI_8_Cierre_Paso7_v2.xlsx, inventariada en el Anexo C.

6.2 Alcance y limitaciones del estudio

Las alternativas deben interpretarse dentro del alcance de los datos, supuestos y modelos empleados. Estas condiciones delimitan su aplicación y definen las verificaciones necesarias antes de una implementación en terreno en futuros trabajos. La Tabla 12 resume las principales limitaciones y sus medidas de validación o mejora.

Tabla 12. Limitaciones del modelo y medidas de validación propuestas

Limitación	Efecto	Medida
Cobertura mediante áreas geométricas	Puede sobreestimar o subestimar la cobertura real.	Modelar elevación, sectorización y propagación; validar con mediciones RF.
Perfiles TELCO de referencias regionales	No corresponden a mediciones locales de Pan de Azúcar.	Realizar pruebas por operador, ubicación y horario.
Calidad de servicio simplificada	Depende de supuestos de eficiencia, concurrencia y tráfico.	Incorporar trazas de tráfico y simulación de paquetes.
Fibra óptica considerada no limitante	Puede omitir límites de interfaces, puertos o capacidad contratada.	Verificar interfaces, velocidades y capacidad por tramo.
OPEX proporcional al CAPEX	Simplifica los costos de energía, mantenimiento y operación.	Incorporar consumo, tarifas, mantenimiento y niveles de servicio.
Una ejecución principal por diseño	No caracteriza la variabilidad del algoritmo genético.	Ejecutar múltiples semillas y analizar estabilidad e intervalos.
Costos obtenidos de catálogos	Excluyen instalación, obra civil, logística, impuestos y contingencias.	Solicitar cotizaciones y elaborar un presupuesto de detalle.
Evaluación simplificada de LOS y Fresnel	Un radioenlace podría no ser viable en terreno.	Validar elevación, Fresnel, presupuesto de enlace e inspección.

7 Conclusiones y recomendaciones

La investigación demuestra que es posible integrar datos territoriales, catálogos de equipos y restricciones técnicas mediante un algoritmo genético para generar alternativas de redes híbridas trazables y reproducibles. D2 alcanza una cobertura del 90,61 % y presenta el menor costo, mientras que G95 alcanza el 95,00 %, atiende 423 clientes adicionales y mantiene un VP10 por cliente inferior al de los escenarios TELCO. Sin embargo, estos conservan mayores tasas estimadas de descarga y menores latencias, y TELCO-B alcanza el 100 % de cobertura geométrica. Por ello, la hipótesis queda respaldada parcialmente: la metodología genera alternativas factibles y económicamente competitivas, pero no superiores en todas las dimensiones.

D2 y G95 deben entenderse como alternativas complementarias. D2 constituye una base económica ampliable cuando predomina la restricción presupuestaria, mientras que G95 resulta apropiada cuando se prioriza una mayor cobertura inicial. La selección dependerá del presupuesto, la cobertura requerida y la estrategia de ampliación; cualquier modificación posterior deberá evaluarse nuevamente mediante indicadores de cobertura, costo y factibilidad técnica.

Estas alternativas corresponden a diseños avanzados de prefactibilidad y no están preparadas para una implementación inmediata. Antes de su despliegue se requieren mediciones RF y de experiencia móvil, modelación detallada del terreno y la zona de Fresnel, dimensionamiento eléctrico, validación del backhaul y de la capacidad de los puertos, cotizaciones, permisos y una prueba piloto. La metodología puede reproducirse en otros sectores rurales o semirrurales, siempre que se adapten los datos territoriales, la demanda, los equipos, los costos y las restricciones normativas.

Como líneas de investigación y desarrollo futuro, se propone ejecutar múltiples semillas para estudiar la estabilidad y variabilidad de los resultados, e incorporar como criterios de decisión, restricciones o componentes del fitness variables que en este estudio fueron solo informativas: demanda y tráfico por tipo de cliente, simulación de paquetes, seguridad y protección IP, elevación, alturas y obstáculos, condiciones LOS, nLOS y NLOS, resiliencia, consumo energético y costos asociados a fallas. Estas extensiones, complementadas con mediciones RF y una prueba piloto, permitirían aumentar la representatividad del modelo y evaluar su evolución hacia diseños implementables.

Agradecimientos

Este es un gran logro personal, pero también es fruto del apoyo de personas que me acompañaron durante este proceso.

Agradezco a Dios, a mis amores Lore e Isa y a mi querida madre, Eliana Villalobos, por su amor y apoyo incondicional.

También agradezco a mi profesor guía, Mauricio Solar, por su orientación y acompañamiento durante todo el desarrollo de esta tesina, y al profesor Manuel Yáñez, por su buena disposición para escuchar y ayudar a un antiguo alumno.

Muchas gracias :)

Referencias

[1] Gobierno de Chile, “Plan Brecha Digital Cero”, 2022. [En línea]. Disponible: https://www.gob.cl/noticias/lanzamos-el-plan-brecha-digital-cero-para-que-todas-y-todos-tengan-acceso-conectividad-independiente-del-lugar-en-que-viven/

[2] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Ley N.º 21.678, "Establece Internet como servicio público de telecomunicaciones", 2024. [En línea]. Disponible: https://www.bcn.cl/balance-legislativo/detalle/ficha_LEY_21678_2024-07-03

[3] Subsecretaría de Telecomunicaciones, "Plan Brecha Digital Cero". [En línea]. Disponible: https://www.subtel.gob.cl/plan-brecha-digital-cero/

[4] Subsecretaría de Telecomunicaciones, "Portal de antenas autorizadas y Registro Nacional de Conectividad". [En línea]. Disponible: https://antenas.subtel.gob.cl/leydetorres/mapaAntenasAutorizadas.html

[5] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Ley N.º 20.453, "Consagra el principio de neutralidad en la red", 2010. [En línea]. Disponible: https://www.bcn.cl/leychile/Navegar?idNorma=1016570

[6] Subsecretaría de Telecomunicaciones, "Velocidad Mínima Garantizada y normativa técnica de calidad de acceso a Internet". [En línea]. Disponible: https://www.subtel.gob.cl/velocidad-minima-garantizada/

[7] International Telecommunication Union, The Last-mile Internet Connectivity Solutions Guide: Sustainable Connectivity Options for Unconnected Sites, 2020. Disponible: https://www.itu.int/pub/D-TND-01-2020

[8] ITU-T, Recommendation Y.4218, Internet of things and information and communication technology requirements for deployment of smart services in rural communities, 2023.

[9] ITU-T, Recommendation L.250, Topologies for optical access network, 2024.

[10] ITU-T, Recommendation Y.1540, Internet protocol data communication service — IP packet transfer and availability performance parameters, 2019.

[11] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs", Numerische Mathematik, vol. 1, pp. 269–271, 1959. doi: 10.1007/BF01386390.

[12] S. Pierre and G. Legault, "A genetic algorithm for designing distributed computer network topologies", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, vol. 28, no. 2, 1998. doi: 10.1109/3477.662766.

[13] A. Konak and A. E. Smith, "Designing resilient networks using genetic algorithms", INFORMS Journal on Computing, vol. 22, 2010. doi: 10.1287/ijoc.1100.0409.

[14] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Ley N.º 20.599, "Regula la instalación de antenas emisoras y transmisoras de servicios de telecomunicaciones", 2012. Disponible: https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idLey=20599

[15] QGIS Project, "Network analysis library", PyQGIS Developer Cookbook, versión 3.44. Disponible: https://doc.qgis.org/3.44/en/docs/pyqgis_developer_cookbook/network_analysis.html

[16] Opensignal, "Chile Mobile Network Experience Report", marzo de 2026. Disponible: https://insights.opensignal.com/reports/2026/03/chile/mobile-network-experience

[17] International Telecommunication Union, "Partner2Connect Action Framework — Project viability", 2022. Disponible: https://www.itu.int/itu-d/reports/partner2connect-action-framework/2022/03/12/fa-4-project-viability/

[18] Universidad Técnica Federico Santa María, "Diseño de red de transporte exclusivo para servicios 5G", repositorio institucional. Disponible: https://repositorio.usm.cl/server/api/core/bitstreams/cf23d015-eff7-46db-819f-fd648418ba6b/content

[19] Universidad Técnica Federico Santa María, "Prototipo de solución basada en LoRa para zonas sin conectividad", repositorio institucional. Disponible: https://repositorio.usm.cl/entities/tesis/f9817811-f5e7-4d17-8eee-718fed3bf78c

[20] Universidad Técnica Federico Santa María, "Evaluación de desempeño de una red WiLL con IEEE 802.11 modificado de largo alcance", repositorio institucional. Disponible: https://repositorio.usm.cl/entities/tesis/b315a98b-a35f-42cd-b3bb-0c0a0f2b19ca

[21] R. Núñez Villalobos, Propuesta de tesina: Redes de última milla para la inclusión digital rural en Chile, documento no publicado, UTFSM, 2024.

[22] R. Núñez Villalobos, PREprocesamientoGA.ipynb, cuaderno de validación de entradas, 2026.

[23] R. Núñez Villalobos, Red_Base_Optimizada_v1_review_Estable.ipynb y registros asociados, 2026.

[24] R. Núñez Villalobos, GAv5_hybrid_FO_wireless_v1_7_1_D2_prune_low_load_LOG_RED FINAL 90.ipynb, etiqueta gav5-v1.7.1-d2-candidate90, commit 89ab53d, 2026.

[25] R. Núñez Villalobos, GAv5_hybrid_FO_wireless_v1_7_2_G95_LOG.ipynb, etiqueta gav5-v1.7.2-g95-candidate95, commit d9dcb13, 2026.

[26] R. Núñez Villalobos, Matriz_tecnico_economica_MTI_8_Cierre_Paso7_v2.xlsx, libro de cálculo complementario, 2026.

[27] nPerf, Barómetro de conexiones móviles en Chile 2025, 2026. Disponible: https://media.nperf.com/files/publications/CL/CL-Barometre-Mobile-connections-nPerf-2025_7887.pdf

[28] Unión Internacional de Telecomunicaciones, Recomendación UIT-R P.526-16, Propagación por difracción, 2025. Disponible: https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526-16-202511-I/es

[29] Subsecretaría de Telecomunicaciones, "Gobierno completa el despliegue de la totalidad de la Fibra Óptica Austral", 9 de marzo de 2022. Disponible: https://www.subtel.gob.cl/gobierno-completa-el-despliegue-de-la-totalidad-de-la-fibra-optica-austral-beneficiara-a-mas-de-536-mil-usuarios-de-15-comunas-de-la-zona-austral-de-chile/

[30] Instituto Nacional de Estadísticas, "En salida a terreno en la Región de Coquimbo se refuerza invitación a agricultores para participar del VIII Censo Agropecuario y Forestal", 2021. Disponible: https://www.ine.gob.cl/censoagropecuario/detalle-noticia/en-salida-a-terreno-en-la-regi%C3%B3n-de-coquimbo-se-refuerza-invitaci%C3%B3n-a-agricultores-para-participar-del-viii-censo-agropecuario-y-forestal

[31] Google, "Preguntas frecuentes de Google Colab". Disponible: https://research.google.com/colaboratory/intl/es/faq.html

[32] Subsecretaría de Telecomunicaciones, "Registro Nacional de Conectividad". Disponible: https://rnc.subtel.gob.cl/

[33] Subsecretaría de Telecomunicaciones, Registro Nacional de Conectividad, Anexo 1. Disponible: https://www.subtel.gob.cl/rnc/RNC_ANEXO_01.pdf

[34] QGIS.org, QGIS Geographic Information System, QGIS Association, 2026. Disponible: https://qgis.org/

[35] Starlink, "Internet satelital de alta velocidad para hogares". [En línea]. Disponible: https://starlink.com/cl

[36] Intelcom, "Proyectos de conectividad e infraestructura de red". [En línea]. Disponible: https://www.intelcom.cl/proyectos

Anexo A. Trazabilidad de redes finales

Tabla A.1. Identificación reproducible

Elemento	D2	G95
Nombre	Red económica 90,61 %	Red de mayor cobertura 95,0 %
Etiqueta	gav5-v1.7.1-d2-candidate90	gav5-v1.7.2-g95-candidate95
Commit	89ab53d	d9dcb13
Rama	main	feature/ga-v5-v172-g95
Corrida Colab	GAv5_v171d2_20260821_023113	GAv5_v172_g95_20260821_024629
Reglas duras	aprobadas	aprobadas
Protected	no utilizado	no utilizado

Anexo B. Glosario de términos e indicadores

Término	Definición y uso en la tesina
FO	Fibra óptica; medio cableado usado principalmente en el transporte troncal.
AP	Punto de acceso que entrega conectividad inalámbrica a uno o más clientes.
POP	Punto de presencia; nodo raíz local donde la red de transporte del proveedor entrega conectividad hacia la red de última milla.
WAN	Red de área amplia que conecta la localidad con redes externas e Internet.

Término	Definición y uso en la tesina
Backhaul	Red de transporte que enlaza AP, sitios y nodos de agregación con el POP.
PTP	Enlace inalámbrico punto a punto entre dos extremos definidos.
PMP	Enlace punto a multipunto en el que un AP atiende a varios clientes.
GA	Algoritmo genético utilizado para explorar combinaciones factibles de transporte y seleccionar alternativas según cobertura y costo.
Gen	Posición binaria que activa o desactiva una alternativa de radioenlace previamente filtrada.
Cromosoma	Vector binario que representa una solución candidata del algoritmo genético.
Fitness	Ordenamiento jerárquico que prioriza factibilidad y cobertura, luego costo.
CAPEX	Inversión inicial de infraestructura y equipamiento.
OPEX	Gasto recurrente de energía, mantenimiento y operación.
TCO	Costo total de propiedad: CAPEX más OPEX nominal acumulado durante el horizonte analizado.
VP / VP10	Valor presente de los costos; VP10 corresponde al horizonte de diez años.
QoS	Calidad de servicio, descrita mediante descarga, subida, latencia, disponibilidad y capacidad en hora cargada.
Throughput	Tasa de transferencia nominal o estimada. En esta tesina no forma parte del fitness final.
DL	Tráfico o tasa de descarga desde la red hacia el cliente.
Latencia	Retardo de extremo a extremo estimado para la ruta del cliente.
LOS	Línea de vista despejada entre los extremos de un radioenlace.
nLOS	Línea de vista parcial con obstrucciones moderadas; su admisibilidad depende del equipo y del escenario.
NLOS	Ausencia de línea de vista directa. Solo es admisible cuando el equipo es compatible y no existe bloqueo total.
Zona de Fresnel	Volumen alrededor de la trayectoria directa cuya obstrucción puede producir pérdidas por difracción [28].
TELCO-H	Escenario geométrico móvil conservador construido sobre siete sitios públicos.
TELCO-B	Cota geométrica superior 4G Base construida sobre los mismos siete sitios; no equivale a medición real.
D2	Alternativa híbrida económica final, con 90,61 % de cobertura.
G95	Alternativa híbrida final de mayor cobertura, con 95,00 %.
QGIS	Sistema de información geográfica utilizado para preparar, revisar y visualizar capas territoriales [34].
SUBTEL	Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile.
BOM	Lista de materiales o inventario de equipos y componentes requeridos por una alternativa.
Cable ADSS	Cable óptico autosoportado totalmente dieléctrico, apto para tendido aéreo sin mensajero metálico.
Cable figura 8 monomodo	Cable óptico aéreo con elemento portante integrado y fibra monomodo.
N/M y n/d	N/M indica no modelado; n/d indica información no disponible en las fuentes consultadas.

Anexo C. Inventario de archivos de respaldo

El paquete electrónico que acompaña a la tesina contiene únicamente los insumos, resultados y archivos reproducibles utilizados en la versión final. Los apuntes de desarrollo, propuestas iniciales y borradores obsoletos no forman parte del entregable.

- Capas geográficas de entradas GA y QGIS: 0_zona_estudio.geojson, 1_clientes_GA.csv; 2_camino_mts_GA.csv; 3_sitios_instalacion_GA.csv; 4_obstaculos_senal_GA.csv; 5_zonas_baja_prioridad_GA.csv; zona_pan_de_azucar.shp; caminos_mts.shp; clientes_auto.shp; obstaculos_senal.shp; sitios_instalacion.shp; zonas_baja_prioridad.shp;
- Catálogos y planillas: Eq_Equipos.csv; Eq_Soporte.csv; Excel_Equipamiento_Red_Actualizado_v6.xlsx; ExcelAntenasPA.xlsx.
- Cuadernos reproducibles: PREprocesamientoGA.ipynb; Red_Base_Optimizada_v1_review_Estable.ipynb; GAv5_hybrid_FO_wireless_v1_7_1_D2_prune_low_load_LOG_RED FINAL 90.ipynb; GAv5_hybrid_FO_wireless_v1_7_2_G95_LOG.ipynb.
- Capas de resultados QGIS (Capas finales D2 y G95, además, mejora_troncal_wl_00081): RedBaseOptimizadaFO.rar; GAv5_1.7D_2 Final GA95.rar; GAv5_1.7D_2.rar; mejora_troncal_wl_00081.geojson y mejora_troncal_wl_00081.qml.
- Evaluación técnico-económica: Matriz_tecnico_economica_MTI_8_Cierre_Paso7_v2.xlsx.

Para preservar la trazabilidad, los archivos deben entregarse con estos nombres y acompañarse, cuando el medio de entrega lo permita, de un manifiesto de sumas de verificación SHA-256.