



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO

**DISEÑO DE RED 4G RURAL CON BACKHAUL DE FIBRA ÓPTICA
EN LA PARROQUIA COCHAPAMBA, PROVINCIA DE COTOPAXI.**

AUTOR

Albuja Jácome, Juan Carlos

TRABAJO DE TITULACIÓN

**Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR

Ortega Ortega, Andrés Leonardo

Santa Elena, Ecuador

Año 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**



Validar Únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**ALICIA GERMANIA
ANDRADE VERA**

**Ing. Alicia Andrade Vera, Mgtr.
COORDINADORA DEL
PROGRAMA**



Validar Únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**ANDRES LEONARDO
ORTEGA ORTEGA**

**Ing. Andrés Ortega Ortega, Ph.D.
TUTOR**



Validar Únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**DANIEL ARMANDO
JARAMILLO CHAMBA**

**Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**



Validar Únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**LUIS MIGUEL AMAYA
FARINO**

**Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**



Validar Únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**MARIA MARGARITA
RIVERA GONZALEZ**

**Abg. María Rivera González, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por **ALBUJA JÁCOME JUAN CARLOS**, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR



Validar únicamente en Firma@C.
Firmado electrónicamente por:
**ANDRÉS LEONARDO
ORTEGA ORTEGA**

Ing. Andrés Leonardo Ortega Ortega, Ph.D.

Santa Elena, 18 de agosto de 2026



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ALBUJA JÁCOME JUAN CARLOS**

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, **“DISEÑO DE RED 4G RURAL CON BACKHAUL DE FIBRA ÓPTICA EN LA PARROQUIA COCHAPAMBA, PROVINCIA DE COTOPAXI.”** previo a la obtención del título en Magíster en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, 18 de agosto de 2026

EL AUTOR



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**JUAN CARLOS ALBUJA
JÁCOME**

Albuja Jácome Juan Carlos



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado **“DISEÑO DE RED 4G RURAL CON BACKHAUL DE FIBRA ÓPTICA EN LA PARROQUIA COCHAPAMBA, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, presentado por el estudiante, **ALBUJA JÁCOME JUAN CARLOS** fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 5%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

 **Certificado de análisis**
Compilatio Magister+ | UPSE-ECU

Proyecto Juan Albuja - 16-08-26 VF comp
ID : 99289023390a7da0839219227bdf33fa54752561

 **5%**
Textos sospechosos

Nombre del fichero : Proyecto Juan Albuja - 16-08-26 VF comp.txt
Tamaño del archivo original : 12,25 MB
Número de palabras : 18.083

Depositante : ANDRÉS LEONARDO ORTEGA ORTEGA
Fecha de depósito : 17 de agosto de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 18 de agosto de 2026

TUTOR



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**ANDRÉS LEONARDO
ORTEGA ORTEGA**

Ing. Andrés Leonardo Ortega Ortega, Ph.D.



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, ALBUJA JÁCOME JUAN CARLOS

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, 18 de agosto de 2026

EL AUTOR



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**JUAN CARLOS ALBUJA
JACOME**

Albuja Jácome Juan Carlos

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres y familiares, cuyo amor, apoyo incondicional y confianza fueron fundamentales para alcanzar esta meta. Agradezco profundamente a la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE) por su compromiso con la excelencia académica y por brindarme las herramientas necesarias para crecer profesionalmente. Extiendo un especial agradecimiento a mi tutor, por su guía, paciencia y valiosas recomendaciones a lo largo del desarrollo de este proyecto. Este logro representa el esfuerzo conjunto de todas las personas que me acompañaron en este camino. A todos ustedes, gracias de corazón por hacerlo posible.

Juan Carlos, Albuja Jácome

DEDICATORIA

Dedico este proyecto con todo mi cariño y gratitud a mis padres, cuyo esfuerzo, amor y sacrificio han sido la base de cada uno de mis logros. Su ejemplo y apoyo incondicional me inspiraron a seguir adelante y superarme constantemente.

Agradezco también a mis familiares por su constante aliento, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE) por brindarme una formación de calidad, y a mi tutor por su valiosa guía durante este proceso. Este trabajo representa un logro personal que fortalece mi desarrollo profesional y es fruto del compromiso, la perseverancia y el respaldo de quienes siempre creyeron en mí.

Juan Carlos, Albuja Jácome

ÍNDICE GENERAL

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
DECLARO QUE:.....	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO.....	V
AUTORIZACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
RESUMEN	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento de la investigación (Fundamentación de la investigación)	3
Formulación del problema de investigación	4
Objetivo General:.....	4
Planteamiento hipotético.....	5
1. CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	7
1.1. Revisión de literatura	7
1.2. Desarrollo teórico y conceptual	8
1.2.1. Redes Móviles.....	8
1.2.2. Tecnología 4G.....	9

1.2.3.	Parámetros de Desempeño en Redes 4G	11
1.2.4.	Planificación y Diseño de Redes Celulares	12
1.2.5.	Modelos de Propagación Radioeléctrica	14
1.2.6.	Backhaul en Redes Móviles.....	15
1.2.7.	Arquitectura de Backhaul en Redes 4G LTE	16
1.2.8.	Dimensionamiento del Backhaul de Fibra Óptica	16
1.2.9.	Latencia y Calidad de Servicio en el Backhaul	17
1.2.10.	Confiabilidad y Disponibilidad del Backhaul.....	17
1.2.11.	Infraestructura de Backhaul en Redes Móviles	17
1.2.12.	Desafíos y Consideraciones en el Despliegue de Redes Celulares Rurales	20
1.2.13.	Radio Mobile	20
1.2.14.	GNET PRO	21
2.	CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE MERCADO.....	24
2.1.	Caracterización del Área de Estudio.....	24
2.2.	Análisis de la Demanda.....	26
2.2.1.	Tecnologías Disponibles	27
2.2.2.	Calidad del Servicio Actual	28
2.2.3.	Planes y Precios Actuales	31
2.3.	Análisis de la Oferta.....	34
2.3.1.	Estimación de Demanda de Tráfico	34
2.3.2.	Requerimientos de Backhaul	35
2.3.3.	Demanda por Sectores Sociales	35
2.3.4.	Proyección de Demanda	36
2.4.	Análisis de la Brecha de Mercado	37
2.5.	Análisis FODA de la Propuesta.....	38

2.6.	Equipamiento Propuesto	40
2.6.1.	Estación Base (eNodeB) – Radio Access Network (RAN).....	41
2.6.2.	Núcleo de Red – Evolved Packet Core (EPC).....	42
2.6.3.	Antenas y Sistema Radiante	43
2.6.4.	Equipamiento de Transmisión y Backhaul.....	43
2.6.5.	Esquemático de la red propuesta.....	44
2.6.6.	Alimentación y Sistema de Energía	45
2.6.7.	Escalamiento a Red 5G	45
3.	CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN	51
3.1.	Descripción del Sistema de Comunicaciones.....	51
3.2.	Parámetros Técnicos del Sistema	51
3.3.	Simulación de Cobertura en Radio Mobile	53
3.4.	Estimación de Parámetros de Desempeño LTE - MATLAB.....	57
3.4.1.	SINR y Margen de Enlace	57
3.4.2.	Channel Quality Indicator (CQI)	58
3.4.3.	Throughput DL y UL	59
3.4.4.	Modelo de Latencia RTT.....	59
3.4.5.	Modelo de Pérdida de Paquetes (PLR).....	60
3.5.	Definición de los Casos de Simulación.....	61
4.	CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
4.1.	Análisis del Enlace de Radio – Punto UE_Referencia1	63
4.2.	Mapa de Cobertura.....	63
4.3.	Nivel de Señal Recibida (RX)	65
4.4.	SINR Calculado	66
4.5.	Pérdidas de Propagación y Margen de Enlace	67
4.6.	Análisis de Latencia RTT.....	68
4.7.	Throughput Downlink (DL)	69
4.8.	Throughput Uplink (UL).....	70

4.9. Pérdida de Paquetes (PLR).....	71
4.10. Resumen de Hallazgos	72
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	76
REFERENCIAS.....	77
ANEXOS	85
Anexo 1: Ruta KML para pruebas GNET PRO	85
Anexo 2: Datos TXT GNET PRO para ruta móvil	85
Anexo 3: Datos Reales de la red existente Excel	86
Anexo 4: Simulación, datos Excel e Imágenes Matlab.....	86
Anexo 5: Simulación Radio Mobile y Cobertura	87
Anexo 6: Comparativa de métricas estadísticamente	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Tabla de Correspondencia Bibliográfica	7
Tabla 1-2: Comparativa de Desempeño LTE: Urbano vs. Rural.....	10
Tabla 1-3: Tabla Comparativa de Tecnologías de Backhaul.....	17
Tabla 1-4: Parámetros Configurables dentro de GNET PRO.....	22
Tabla 2-1: Distribución Etaria de la Población de Cochapamba	24
Tabla 2-2. Nivel educativo de la población de Cochapamba.....	25
Tabla 2-3. Comparación de las Tecnologías disponibles por operadora.....	27
Tabla 2-4. Costos Referenciales de los Planes Móviles	31
Tabla 2-5. Indicadores de la Red actual en comparación con estándares de referencia.....	33
Tabla 2-6. Estimación de demanda de tráfico 4G LTE – Parroquia Cochapamba	34
Tabla 2-7. Proyección de demanda de tráfico 4G LTE a 5 años – Parroquia Cochapamba	36
Tabla 2-8. Brechas de servicio de telecomunicaciones en Cochapamba	37
Tabla 2-9. Análisis FODA de la Propuesta Planteada.....	39
Tabla 2-10. Opciones de equipamiento para estación base (eNodeB).....	41
Tabla 2-11. Opciones de equipamiento para núcleo de red EPC.....	42
Tabla 2-12. Opciones de antenas para la estación base 4G LTE	43
Tabla 2-13. Equipamiento de backhaul y transmisión	43
Tabla 2-14: Comparación entre las Tecnologías 4G y 5G	46
Tabla 2-15. Componentes para Escalamiento 5G	47
Tabla 2-16. Presupuesto de la Red 4G	48
Tabla 2-17. Presupuesto de la Red 5G	49
Tabla 3-1. Parámetros técnicos del sistema de radio 4G LTE – eNodeB Cochapamba	52

Tabla 3-2. Parámetros de la red Radio Mobile y justificación técnica para el entorno Cochapamba, Cotopaxi.....	54
Tabla 3-3. Clasificación de calidad de enlace según SINR (3GPP TS 36.133).....	57
Tabla 3-4. Tabla CQI completa según 3GPP TS 36.214 con modulación, tasa de código y eficiencia espectral.	58
Tabla 3-5. Modelo de latencia RTT en función del SINR.....	60
Tabla 3-6. Modelo de PLR en función del SINR.....	60
Tabla 3-7. Ordenamiento de Mejores SNIR de Caso Base.....	61
Tabla 3-8. Definición de los tres casos de simulación.	62
Tabla 4-1. Resumen de indicadores para los casos simulados.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0-1. Throughput Downlink - Uplink CNT.....	4
Figura 1-1: Arquitectura de Red 4G	11
Figura 2-1. Configuración de Parámetros en GNET PRO	28
Figura 2-2. Rutas de GNET en Automóvil.....	28
Figura 2-3. Configuración de Parámetros para medición estática	29
Figura 2-4. Rutas de GNET Estáticas	29
Figura 2-5. Mapa de Cobertura Móvil de Claro y CNT	30
Figura 2-6. Registro de Latencia observados durante la prueba de Ruta	31
Figura 2-7. Rendimiento de Datos en Prueba de Ruta	32
Figura 2-8. Diagrama Esquemático de la Red Propuesta	44
Figura 3-1. Ubicación y Posicionamiento del eNodeB LTE	51
Figura 3-2. Ventana de Propiedades de la Red en Radio Mobile	54
Figura 3-3. Propiedades del eNodeB en Radio Mobile.....	56
Figura 4-1. Resultados del Radio Enlace eNodeB_Cochapamba_4G - UE_Referencia1	63
Figura 4-2. Mapa de Cobertura Radio Mobile.....	64
Figura 4-3. Nivel de Señal RX (dBm) – Comparación de los 3 casos de ubicación eNodeB y diferencia respecto al Caso Base	65
Figura 4-4. SINR calculado (dB) – Comparación punto a punto y Función de Distribución Acumulada.....	67
Figura 4-5. Pérdidas de propagación y Margen de enlace sobre umbral	68
Figura 4-6. Latencia RTT – Medición real de campo y casos simulados	69
Figura 4-7. Throughput Downlink (DL) – Medición real vs. 3 Casos simulados (arriba) y CDF del throughput DL (abajo).....	70
Figura 4-8. Throughput Uplink (UL) – Medición real vs. 3 casos simulados.....	71

Figura 4-9. Pérdida de paquetes PLR (%) – Medición real vs. 3 casos simulados.....71

RESUMEN

El acceso a una red móvil de calidad es un aspecto fundamental para el desarrollo social, económico y educativo de las comunidades, ya que permite habilitar el acceso a servicios como telemedicina, educación virtual, comercio electrónico y servicios gubernamentales digitales que mejoren la calidad de vida de la población. La presente investigación realizó el diseño de una red 4G LTE con backhaul de fibra óptica en la parroquia rural Cochapamba, con el objetivo de disminuir la brecha que afecta a sus 6.280 habitantes y garantizar de esta forma mantener a los parámetros de cobertura, capacidad y fiabilidad dentro de los estándares normativos vigentes. Se realizaron mediciones de campo georreferenciadas con G-NetTrack Pro en 50 puntos de la parroquia, en donde se visualizó que la red actual se encuentra en estado crítico, ya que presentó latencias medias superiores a 2.000 ms, pérdida de paquetes media del 36,5 % y throughput de descarga de 104 Kbps, lo que confirma que no se está cumpliendo con los estándares y regulaciones vigentes. La propuesta de diseño consideró un eNodeB Huawei BTS3900L, backhaul de fibra óptica monomodo G.652D de 1 Gbps de capacidad y un núcleo EPC integrado al de CNT EP, dando una inversión estimada de \$140.000. Finalmente, las simulaciones comprobaron que el escenario óptimo para la zona analizada está en la reubicación del eNodeB en el punto P32, ya que consigue un throughput downlink de 41,21 Mbps, latencia RTT media de 120,50 ms y pérdida de paquetes del 4,47 %, logrando el 100 % de cumplimiento ARCOTEL en throughput DL y UL en los 50 puntos, 82 % en latencia y 72 % en PLR, y considerando que esta arquitectura puede escalarse hacia 5G NSA.

Palabras clave: 4G LTE, fibra óptica, backhaul, cobertura rural, Cochapamba, throughput, ARCOTEL.

ABSTRACT

Access to a quality mobile network is fundamental for the social, economic, and educational development of communities, as it enables access to services such as telemedicine, online education, e-commerce, and digital government services that improve the population's quality of life. This research designed a 4G LTE network with fiber optic backhaul in the rural parish of Cochapamba, aiming to reduce the digital divide affecting its 6,280 inhabitants and ensure that coverage, capacity, and reliability parameters meet current regulatory standards. Georeferenced field measurements were taken using G-NetTrack Pro at 50 points within the parish. These measurements revealed that the current network is in critical condition, exhibiting average latencies exceeding 2,000 ms, an average packet loss of 36.5%, and a download throughput of 104 Kbps, confirming its non-compliance with current standards and regulations. The proposed design considered a Huawei BTS3900L eNodeB, a 1 Gbps capacity G.652D single-mode fiber optic backhaul, and an EPC core integrated with CNT EP's existing infrastructure, resulting in an estimated investment of \$140,000. Ultimately, simulations confirmed that the optimal scenario for the analyzed area involves relocating the eNodeB to point P32, where the route test was conducted. This location achieves a downlink throughput of 41.21 Mbps, an average RTT latency of 120.50 ms, and 4.47% packet loss, achieving 100 % ARCOTEL compliance in DL and UL throughput across all 50 points, 82 % in latency and 72 % in PLR. Furthermore, this architecture is scalable to 5G NSA.

Keywords: 4G LTE, fiber optics, backhaul, rural coverage, Cochapamba, throughput, ARCOTEL.

INTRODUCCIÓN

El acceso a servicios de telecomunicaciones móviles y conectividad a Internet se ha convertido en la actualidad en un factor estratégico para el desarrollo social, económico y educativo de las comunidades (Cortés C. L., Montaña-Argote, Osorio, & Guerrero-González, 2020). Pese a esta necesidad, en países de América Latina como Ecuador se mantiene una evidente desigualdad entre zonas urbanas y rurales, lo cual es una contribuye a mantener la brecha digital en el país limitando la inclusión de las poblaciones menos favorecidas (Silva, De La Cruz, Amat, & Freire, 2020). En áreas rurales, por tener una baja densidad poblacional, alta dispersión geográfica y elevados costos de infraestructura, disminuyen la rentabilidad esperada por los operadores, lo que provoca una cobertura limitada y servicios de baja calidad (Contreras Potenciano, Ovando Chico, & Frías, 2022).

Considerando este aspecto, la tecnología 4G LTE se ha convertido en un estándar de acceso móvil de banda ancha a nivel mundial. Entre sus principales características se destaca el uso de OFDMA, MIMO y esquemas de modulación eficientes, convirtiéndola en una alternativa robusta para ampliar la cobertura y capacidad (Sabzehali, et al., 2022). Sin embargo, para poblaciones rurales, la propagación de la señal tiene una serie de inconvenientes como el incremento de las pérdidas, especialmente en el enlace ascendente, lo cual afecta directamente a la calidad percibida por el usuario (Reddy, Rao, D. H., K., & Kuchi, 2022). Para evitar estas limitaciones, es necesario considerar el papel del backhaul, como responsable de generar la interacción de las estaciones base con la red central (Sharma, Chehri, & Fortier, 2021). Entre estas soluciones disponibles, se menciona a la fibra óptica en donde se destaca por la alta capacidad, baja latencia y elevada fiabilidad que ofrece, aunque su despliegue en zonas rurales continúa se mantiene como un desafío económico considerable (Mukhopadhyay, Ruffini, & Member, 2023) .

La importancia de la presente investigación está relacionada con la necesidad de tener una adecuada planificación y diseño de redes 4G LTE con backhaul de fibra óptica lo que contribuye directamente a disminuir la exclusión digital en comunidades rurales. Realizando esta mejora en la conectividad, se pretende facilitar el acceso a educación en línea, servicios de telemedicina, trámites gubernamentales digitales e innovaciones productivas en la zona (Matracia, Kishk, & Alouini, 2021). Con esto, se puede fortalecer

la integración social promoviendo el desarrollo económico del sitio, alineado con las metas de conectividad a nivel mundial que es impulsada por organismos internacionales y políticas públicas nacionales (Contreras Potenciano, Ovando Chico, & Frías, 2022).

Por otro lado, Cochapamba posee una población aproximada de 6280 habitantes, distribuida en una zona de baja densidad poblacional la cual posee 30 hab/km². De acuerdo con el censo realizado en el año 2022, se identifica que más del 56,2% de la población mayor de 5 años dispone de teléfono celular, lo que demuestra una demanda de servicios móviles constante, que no ha sido resuelta debido a las limitaciones tecnológicas que se mantienen hasta la actualidad. De igual forma, una cantidad significativa de la población corresponde a jóvenes y adultos económicamente activos, el cual es un segmento que necesita una mayor dependencia del acceso a internet para educación, información, comercio y comunicación (Yugsi Monteros & Calvopiña León, 2025).

Con respecto al ámbito socioeconómico, la economía de la zona está basada en casi su totalidad de la agricultura con un 84,26 %, mientras que las actividades de comercio se consideran a pequeña escala. Sin embargo, la falta de conectividad existente evita que las personas inviertan en la incorporación de tecnologías digitales para sus procesos productivos, comercialización de productos agrícolas y acceso a mercados más externos (Albán, 2025). La implementación de una red 4G confiable puede impulsar la adopción de ruralidad digital, facilitando el uso de plataformas electrónicas, banca digital y servicios de información agro-productiva, lo cual es un impacto directo en los ingresos y la calidad de vida de la población (Matracia, Kishk, & Alouini, 2021).

En cuanto a la infraestructura de telecomunicaciones que se posee actualmente en la zona, se comprobó una cobertura móvil deficiente y tecnológicamente limitada. Por medio de mediciones en campo y la experiencia de los usuarios demostraron que, aunque en los mapas de cobertura oficiales de los operadores indican que existe cobertura 4G con baja recepción en la zona, en el sitio se identifica que se posee cobertura 3G con baja calidad de señal, e incluso a requiriendo roaming entre operadoras, lo cual empeora la estabilidad del servicio (Almachi, 2018). Las operadoras como CNT y Claro identificaron niveles bajos de señal 4G, mientras que Movistar no posee esta red en la parroquia. Esta problemática impide satisfacer las demandas actuales de tráfico de datos, especialmente

cuando se pretenden utilizar servicios educativos, video comunicación y contenidos digitales (Silva, De La Cruz, Amat, & Freire, 2020).

Por esta razón, el presente estudio tiene como objetivo principal el realizar un diseño de la red celular 4G LTE con backhaul de fibra óptica destinado a la parroquia Cochapamba, garantizando parámetros esenciales como los niveles de cobertura, capacidad y fiabilidad mediante la realización de un análisis técnico y simulaciones del enlace. En cuanto a los objetivos específicos se plantea el diagnóstico de la infraestructura actual, la evaluación de la factibilidad técnica y económica, y la validación del diseño propuesto mediante simulación. El alcance del presente estudio se engloba en el diseño y simulación de la red, sin considerar la implementación física, limitando el área geográfica de cobertura en la parroquia Cochapamba.

Planteamiento de la investigación (Fundamentación de la investigación)

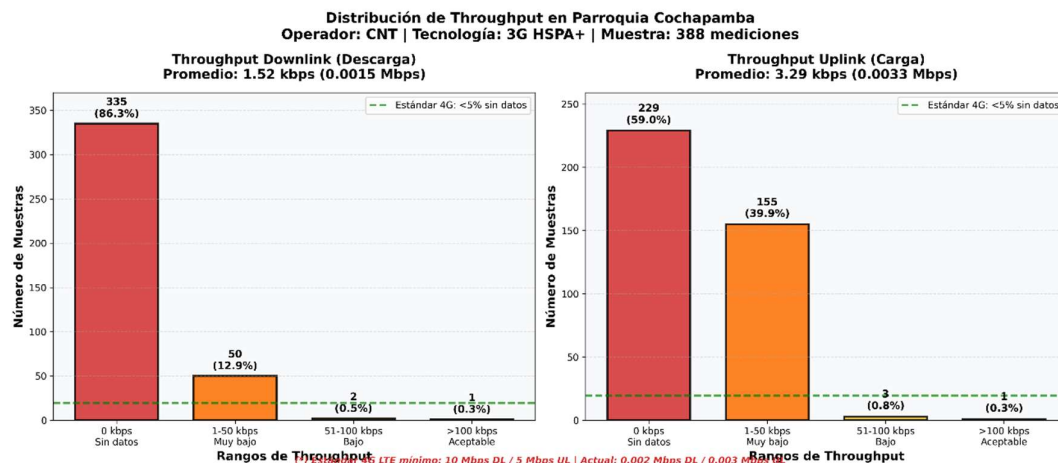
La brecha digital que afecta a las áreas rurales es una limitación estructural para el desarrollo social, económico y educativo de las comunidades, debido a que la falta de acceso a servicios de telecomunicaciones móviles e internet se presenta como una restricción a la inclusión digital y las oportunidades de crecimiento. En la parroquia Cochapamba, la cual está ubicada en la Provincia de Cotopaxi, esta problemática se observa en la baja cobertura de redes celulares, así como en la ausencia de infraestructura de telecomunicaciones, debido a que se tiene una baja densidad poblacional lo que se relaciona con una baja rentabilidad esperada desincentivando a las operadoras realizar la inversión para este tipo de proyectos (Matracia, Kishk, & Alouini, 2021). Aunque las redes 4G LTE son un estándar tecnológico de gran capacidad y robustez, el despliegue de esta tecnología en entornos rurales tiene varios obstáculos técnicos que se relacionan con pérdidas de propagación en celdas extensas, dificultades en el enlace ascendente y limitaciones de calidad de servicio (Reddy, Rao, D. H., K., & Kuchi, 2022).

En este contexto, el backhaul se considera como un elemento crítico dentro de la arquitectura de red, siendo la fibra óptica la opción más sólida y confiable para asegurar un transporte de alta capacidad, a pesar de sus elevados costos iniciales (Mukhopadhyay, Ruffini, & Member, 2023). La presente investigación está enfocada en el diseño de la red celular 4G LTE con backhaul de fibra óptica para cubrir las necesidades de Cochapamba, apoyándose en análisis técnico y simulaciones, de tal manera que se puedan superar las

barreras actuales garantizando una conectividad sostenible que contribuya al desarrollo integral de la comunidad.

De acuerdo con la página oficial de los proveedores de servicio como Claro y CNT que son los únicos que tienen cobertura en la zona, se verifica ha comprobado que pese a tener una antena y afirmar cobertura 4G en ciertas partes del centro de la comunidad, esta no se refleja al hacer evaluaciones en el sitio. Se generaron pruebas de ruta que se observa en la **Figura 0-1** en donde se identificó que el 86.3% de las pruebas de conexión realizadas en Downlink muestran que no hay servicio de datos con valores de 0 kbps, y en el caso de Uplink existe un 59.0% de pruebas en donde el Uplink fue de 0 kbps, demostrando que la zona tiene un limitado acceso a sistemas de comunicación de calidad con respecto a lo que las operadoras les ofrecen, incumpliendo con los valores mínimos para un estándar 4G.

Figura 0-1. Throughput Downlink - Uplink CNT



Formulación del problema de investigación

¿Cómo el diseño de una red 4G LTE rural con backhaul de fibra óptica basado en aspectos técnico y económicos, como análisis topográfico, de capacidad y simulaciones de red, mejorará la cobertura y calidad del servicio de telecomunicaciones móviles en la parroquia Cochapamba, Provincia de Cotopaxi?

Objetivo General:

Diseñar una red celular 4G LTE con backhaul de fibra óptica para la parroquia rural Cochapamba, mediante un análisis técnico-topográfico y simulaciones, que permita

atender aproximadamente a 1000 usuarios potenciales, con una demanda promedio estimada de 3 a 5 Mbps por usuario, garantizando niveles adecuados de cobertura radioeléctrica, capacidad, calidad de servicio y fiabilidad.

Objetivos Específicos:

1. Identificar y caracterizar las condiciones geográficas, topográficas y de infraestructura de telecomunicaciones existentes en la parroquia Cochapamba, mediante un estudio técnico-topográfico, mediciones de campo y análisis de indicadores como RSRP, SINR y tecnología disponible, determinando las deficiencias actuales de cobertura y capacidad de la red móvil.
2. Analizar la factibilidad técnica y económica de la implementación de un backhaul de fibra óptica para la red 4G LTE propuesta, considerando la capacidad de transporte de datos, el tráfico agregado estimado, los costos de infraestructura, y los beneficios operativos y sociales al sector, con el fin de evaluar la sostenibilidad del diseño propuesto.
3. Simular el desempeño de la red 4G LTE propuesta para la parroquia Cochapamba, evaluando parámetros de cobertura, intensidad de señal, calidad de servicio (QoS), throughput y capacidad de usuarios simultáneos, validando técnica y cuantitativamente la eficiencia del diseño propuesto.

Planteamiento hipotético

El diseño de la red celular 4G LTE en la parroquia Cochapamba permitirá proporcionar un servicio móvil con mayor cobertura, capacidad y calidad que las alternativas actuales. Esto se afirma en base a las mediciones de campo realizadas sobre la red existente del operador CNT, en donde se pudo identificar el estado crítico de los indicadores de desempeño. Con respecto a la latencia, se mostraron valores promedio de 910,3 ms, lo cual es más de seis veces el umbral de referencia para la tecnología 3G y en más de dieciocho veces el estándar 4G LTE. Por su parte, en cuanto a la pérdida de paquetes, el promedio medido fue de 36,5%, el cual es un valor mayor en más de dieciocho veces la referencia 3G y casi setenta veces lo regulado para 4G LTE, con valores máximos que llegaron hasta el 90% de pérdidas.

Por otro lado, el throughput de descarga tiene un promedio registrado de apenas 104 Kbps, lo que representa apenas el 27% de la capacidad mínima esperada para una red 3G

estándar y prácticamente insignificante con respecto al estándar 4G LTE que exige velocidades superiores a 10 Mbps. Con respecto al nivel de señal (RSCP) generó un valor medio de $-81,4$ dBm, clasificado como deficiente respecto al umbral 3G, con un 37,1% de las muestras categorizadas como señal pobre (< -95 dBm). Estos resultados demuestran que la infraestructura actual no cumple con los parámetros mínimos de calidad de servicio de una red 3G convencional, por lo que el diseño propuesto de una red 4G LTE se presenta como una mejora evidente para la comunidad.

1. CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Revisión de literatura

En Latinoamérica se han desarrollado experiencias que validan la pertinencia de soluciones de fibra combinadas con LTE. Un ejemplo de ello es el análisis de cobertura en comunidades aisladas de Ecuador en donde se mostró que la instalación de repetidores GSM permitió mejorar la conectividad básica (Silva, De La Cruz, Amat, & Freire, 2020). En Colombia, proyectos de backhaul auto gestionable evidencian que la infraestructura óptica combinada con soluciones inalámbricas puede habilitar servicios de banda ancha en zonas de difícil acceso (Cortés C. L., Montaña-Argote, Osorio, & Guerrero-González, 2020).

A nivel internacional, se han desarrollado modelos híbridos fibra-FSO que han demostrado ser costo-efectivos para entornos donde el tendido completo de fibra es inviable (Matracia, Kishk, & Alouini, 2021). De manera complementaria, investigaciones con UAVs muestran el potencial para complementar la cobertura cuando las estaciones base terrestres no son suficientes (Sabzehali, et al., 2022).

Otros estudios relacionados se muestran en la **Tabla 1-1**, en donde se verifica el aporte principal y como se relacionan con la propuesta planteada en esta investigación.

Tabla 1-1: Tabla de Correspondencia Bibliográfica

Referencia	Tema	Aporte principal
(Radicelli-García, Pomboza-Floril, & Cepeda-Astudillo, 2018)	Comparación de LTE y DVB-RCT2 en zonas rurales LATAM	Fundamentos LTE
(Reddy, Rao, D. H., K., & Kuchi, 2022)	Limitaciones de cobertura LTE/5G en celdas grandes, propuestas de mejora	LTE rural

(Contreras Potenciano, Ovando Chico, & Frías, 2022)	Análisis de infraestructura LTE en México y estrategias de cobertura	LTE rural, regulación
(Sharma, Chehri, & Fortier, 2021)	Revisión de backhaul óptico/inalámbrico y tendencias hacia 5G/6G	Backhaul
(Mukhopadhyay, Ruffini, & Member, 2023)	Backhaul híbrido fibra- FSO, optimización costo- capacidad	Backhaul
(Cortés C. L., Montaña-Argote, Osorio, & Guerrero-González, 2020)	Red backhaul autogestionable (WiBACK) en Colombia	Backhaul rural
(Silva, De La Cruz, Amat, & Freire, 2020)	Mejora de cobertura móvil en comunidad rural de Ecuador (repetidor GSM)	Despliegue rural
(Matracia, Kishk, & Alouini, 2021)	Análisis de cobertura UAV-asistida en zonas rurales	Retos, UAVs
(Sabzehali, et al., 2022)	Optimización de despliegue multi-UAV con backhaul	Retos, UAVs

1.2. Desarrollo teórico y conceptual

1.2.1. Redes Móviles

Las redes móviles son sistemas de telecomunicaciones inalámbricos que permiten la comunicación entre usuarios en movimiento mediante el uso de estaciones base distribuidas geográficamente. Su principio fundamental se basa en la división del área de

cobertura en celdas, lo cual permite reutilizar de forma eficiente el espectro radioeléctrico, así como un soporte de gran número de usuarios simultáneos. Cada celda se atiende por una estación base que gestiona la transmisión y recepción de señales hacia los dispositivos móviles (Zhang, et al., 2022).

En zonas rurales, esta tecnología representa una solución eficiente para brindar conectividad ya que requiere una menor infraestructura física comparada con redes cableadas. Pese a esto, este tipo de soluciones tienen varios desafíos tales como baja densidad poblacional, topografía compleja y limitaciones en el transporte de datos, lo cual indica que el diseño es indispensable para mantener un buen acceso de radio (López, Maldonado, & Macías, 2021).

1.2.2. Tecnología 4G

La tecnología 4G LTE (Long Term Evolution) es la cuarta generación de sistemas de comunicaciones móviles la cual se desarrolló con el propósito de ofrecer mayores velocidades de transmisión, menor latencia y una arquitectura basada en su totalidad en IP. Esta tecnología implementa mejoras significativas en aspectos como la eficiencia espectral y flexibilidad frente a generaciones pasadas (Hernández & Lizarazo, 2024).

Entre las principales características de esta tecnología se encuentra el uso de técnicas de acceso múltiple avanzadas, esquemas de modulación adaptativa y soporte para múltiples anchos de banda, lo cual permite gestionar de forma eficiente los recursos radioeléctricos y así mejorar la experiencia de usuario (Mishra, 2023).

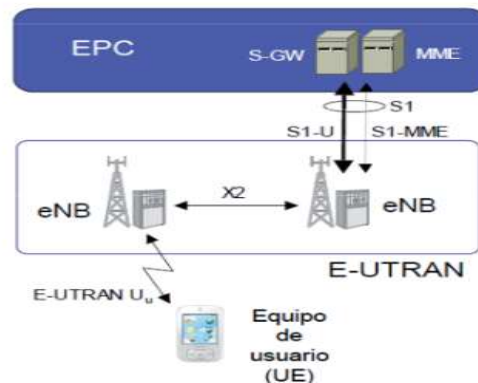
Por su parte, esta tecnología 4G LTE se considera como un estándar clave en la expansión de la banda ancha móvil, caracterizado por su uso de OFDMA, SC-FDMA y MIMO para optimizar eficiencia espectral y cobertura (Radicelli-García, Pomboza-Floril, & Cepeda-Astudillo, 319–324). En áreas rurales, su adopción enfrenta desafíos relacionados con baja densidad poblacional, topografía accidentada y limitaciones de infraestructura. En la **Tabla 1-2** se muestra una comparativa del desempeño entre LTE en ámbito urbano y rural.

Tabla 1-2: Comparativa de Desempeño LTE: Urbano vs. Rural

Aspecto	Área Urbano	Área Rural
Cobertura LTE	Alta, con cobertura cercana al 99% en EE. UU.(Jessica Dine and Joe Kane, 2022)	Menor, con cobertura de hasta 77% en EE. UU.(Jessica Dine and Joe Kane, 2022)
Densidad de usuarios	Alta, entre 1,000 y 10,000 usuarios/km ² (Krawczeniuk, 2019)	Baja, entre 10 y 100 usuarios/km ² (Krawczeniuk, 2019)
Costo de despliegue	Menor, debido a la alta densidad de usuarios(Krawczeniuk, 2019)	Hasta 80% más alto que en áreas urbanas(Rendon Schneir & Xiong, 2016)
Costo por suscriptor	Menor, por la alta concentración de usuarios(Krawczeniuk, 2019)	Mayor, debido a la baja densidad(Krawczeniuk, 2019)
Latencia y velocidad	Baja latencia y alta velocidad(Krawczeniuk, 2019)	Mayor latencia y menor velocidad(Krawczeniuk, 2019)
Capacidad de red	Alta, con múltiples usuarios simultáneos(Krawczeniuk, 2019)	Limitada, con menor número de usuarios(Krawczeniuk, 2019)

Estudios recientes demuestran que LTE sigue siendo una alternativa viable para cerrar la brecha digital rural gracias a su madurez y compatibilidad con generaciones posteriores (Contreras Potenciano et al., 2022). Además, investigaciones enfocadas en redes celulares de gran tamaño han identificado limitaciones de cobertura en el uplink, lo que ha impulsado propuestas de mejoras en modulación y control de potencia para entornos rurales (Reddy et al., 2022). Como se muestra en la **Figura 1-1** la arquitectura 4G posee los componentes descritos anteriormente.

Figura 1-1: Arquitectura de Red 4G



Fuente: (Garcerán Almagro & Adelantado Freixer, 2023)

1.2.3. Parámetros de Desempeño en Redes 4G

El desempeño de una red 4G LTE puede ser evaluado por medio de parámetros técnicos que permiten determinar la eficiencia y calidad del servicio proporcionado. Estos parámetros son indispensables dentro del diseño, planificación y optimización de la red, ya que tienen influencia directa en la capacidad del sistema para satisfacer la demanda de los usuarios (Ali, 2018).

Los principales parámetros que pueden analizarse en este tipo de redes incluyen la cobertura radioeléctrica, la capacidad de transmisión de datos y la calidad de servicio, los cuales se analizan de forma integral para garantizar un funcionamiento correcto de la red (Minaya & Pérez, 2022).

1.2.3.1. Cobertura radioeléctrica

La cobertura radioeléctrica se conoce como el área geográfica en la que una señal inalámbrica es recibida con niveles de potencia y calidad lo suficientemente altos para garantizar el acceso al servicio (Imoize, Orolu, & Atayero, 2020). En redes LTE, la cobertura se puede evaluar mediante indicadores técnicos los cuales permiten medir la intensidad y calidad de la señal recibida (Ayad, Medjedoub, Mourad, Saoudi, & A. Arabi, 2021).

El análisis de cobertura es un aspecto indispensable para el diseño de redes móviles, ya que determina la extensión del servicio e identifica los requerimientos de estaciones base

adicionales para cubrir las zonas donde la señal no cumple con los umbrales definidos (Lorenzo, 2023).

1.2.3.2. Capacidad y throughput

La capacidad de una red 4G LTE está representada por el volumen máximo de datos que el sistema puede transportar en un intervalo de tiempo determinado, mientras que el throughput significa la tasa efectiva de datos que experimenta el usuario final, teniendo ambos una relación estrecha sin ser equivalentes (Li, et al., 2024).

La capacidad depende de factores como el ancho de banda asignado, la eficiencia espectral y el número de usuarios activos en la red, mientras que el throughput puede afectarse por condiciones del canal, congestión de red y mecanismos de gestión del tráfico (Pineda, Otero, & Dorta, 2023).

1.2.3.3. Calidad de Servicio (QoS)

La calidad de servicio (QoS) hace referencia a la capacidad de la red para garantizar ciertos niveles establecidos de desempeño con respecto a los requerimientos de cada tipo de servicio. En redes LTE, la QoS da la oportunidad de priorizar el tráfico y garantizar parámetros como latencia, pérdida de paquetes y disponibilidad (Kumar, Kansal, & Kumar, 2020).

Las configuraciones de QoS permiten diferenciar los servicios sensibles al retardo de otros que puede ser más tolerantes, permitiendo hacer una gestión eficiente de los recursos y una experiencia de usuario permanente (Llamuca, Meza, Olvera, & Zambrano, 2024).

1.2.4. Planificación y Diseño de Redes Celulares

La planificación y el diseño de redes celulares son una serie de procesos estructurados que tiene como propósito principal garantizar que la red cumpla con los requisitos de cobertura, capacidad y calidad de servicio, integrando análisis técnicos, modelado de tráfico y evaluación de los recursos disponibles (Cuiñas, Laska-Leśniewicz, Znajdek, & Kamińska, 2023).

Un diseño correcto de la red permite optimizar el uso del espectro radioeléctrico y de la infraestructura, lo que garantiza la sostenibilidad y eficiencia operativa de la red a lo largo del tiempo (Linares & Mejia, 2023).

1.2.4.1. Etapas del diseño de una red móvil

El diseño de una red móvil se considera como un proceso sistemático el cual requiere de varias etapas interdependientes, cuyo propósito final es el de garantizar que la red cumpla con los requerimientos de cobertura, capacidad, calidad de servicio y eficiencia operativa. Estas etapas permiten pasar de un análisis conceptual a un diseño técnico validado, lo cual disminuye la incertidumbre y los riesgos relacionados con la implementación de sistemas de telecomunicaciones (Zhou, Hou, Chen, Feng, & Yan, 2020).

En primer lugar, se considera el análisis de la demanda, la cual estima la cantidad de usuarios que ocuparán el sistema, así como los servicios que demandarán (Hou, Zhou, & Feng, 2021). En esta fase se identifican patrones de uso, tipos de aplicaciones y niveles de consumo de datos, lo cual establece la base para el dimensionamiento de la red (Zhang S. , 2019). Una adecuada estimación de la demanda evita posibles diseños de la red subdimensionada o sobredimensionada (Wang & H. Liao, 2022).

Posteriormente, se realiza el estudio de cobertura el cual está enfocado en definir el área geográfica que será atendida por la red y de esta forma evaluar la distribución de la señal radioeléctrica (Larsen, Checko, & Christiansen, 2019). En esta etapa se realiza el análisis de situaciones como la ubicación de estaciones base, la potencia de transmisión, la altura de antenas y las características del entorno físico. Dentro de esta etapa se busca el aseguramiento de la señal para que alcance los niveles mínimos necesarios para garantizar el acceso al servicio en toda el área de interés (Papadimitratos & Haas, 2024).

Por su parte, el dimensionamiento de capacidad pretende establecer los recursos necesarios los cuales puedan soportar el tráfico generado por los usuarios de la red. En este proceso se determina la capacidad de las celdas, el throughput esperado y la cantidad de usuarios de forma simultánea que pueden ser atendidos sin empeorar el servicio (Zhang, Zhang, & Tsen, 2019). Este análisis considera algunos parámetros como son el ancho de banda, eficiencia espectral y factores de simultaneidad, lo que resulta indispensable cuando se necesita garantizar el desempeño de la red (Parola, Risso, & Miano, 2021).

De igual forma, el diseño del sistema de transporte, que se conoce como backhaul, define los mecanismos por los que se puede trasladar el tráfico desde las estaciones base hacia la red de principal. En este proceso se escoge la tecnología de transporte, para posteriormente definir la topología de la red y así dimensionar la capacidad requerida. Cuando se realiza un diseño adecuado del backhaul se pueden evitar cuellos de botella y así garantizar que los recursos del acceso de radio se aprovechen de forma eficiente (Gonzalez-Diaz, et al., 2021).

Por otro lado, la optimización pretende mejorar el desempeño global de la red por medio de aplicar ajustes a ciertos parámetros técnicos. En esta etapa se incluye la optimización de la ubicación de estaciones base, configuración de antenas y asignación de recursos radioeléctricos, buscando la maximización de la cobertura y capacidad y disminuyendo interferencias y costos operativos (Cortés C. , Montaña-Argote, Osorio, & Guerrero-González, 2021).

Finalmente, la evaluación técnica permite revisar los resultados obtenidos en simulaciones y de esta forma se los compara con los requerimientos establecidos cuando se inició el dimensionamiento. Con respecto a la información obtenida, se pueden ajustar parámetros finales de diseño lo que garantiza que la red cumpla con los criterios técnicos definidos (Baque & Marcillo, 2023).

1.2.5. Modelos de Propagación Radioeléctrica

Los modelos de propagación radioeléctrica permiten realizar la estimación del comportamiento de las señales inalámbricas durante su propagación desde el transmisor hasta llegar al receptor (Galo, Gusñay, Ovaco, Puma, & Uvidia, 2023). Estos modelos son herramientas que pueden utilizarse en la planificación de redes móviles, debido a que predicen la cobertura sin requerir mediciones adicionales (Flores, Moreno, Ribadeneira, & Moreno, 2023).

Para seleccionar un modelo adecuado se debe analizar factores tales como la frecuencia de operación y el tipo de entorno, siendo un aspecto considerable para garantizar la confiabilidad de los resultados en el diseño de la red (Benítez, 2022).

1.2.5.1. Propagación de ondas de radio

La propagación de ondas de radio indica como se desplazan las señales electromagnéticas por medio del espacio, durante el cual se generan fenómenos físicos como atenuación, reflexión, difracción y dispersión (Chávez, 2023). Estas características influyen de forma directa en la intensidad y calidad de la señal recibida. Este estudio es indispensable para entender las limitaciones del enlace inalámbrico y así definir los parámetros técnicos como potencia de transmisión y altura de antenas (Barrios, Modelamiento de la propagación de ondas de radio para redes inalámbricas de sensores en cultivos de yuca, 2024).

1.2.5.2. Modelos empíricos de propagación

Este tipo de modelos se basa en mediciones experimentales y proporcionan expresiones matemáticas en donde se estime la pérdida de trayectoria (Giovanardi & Galleguillo, 2018). Entre los modelos más utilizados en redes móviles se encuentran Okumura-Hata, COST-231 y SUI. Estos modelos ayudan a realizar estimaciones rápidas y prácticas del comportamiento de la señal, siendo ampliamente empleados en estudios de planificación y simulación (Cama, 2023).

1.2.5.3. Influencia de la topografía en la propagación

La topografía tiene influencia importante en la propagación radioeléctrica, debido a que la presencia de elevaciones, pendientes y obstáculos modifica la trayectoria de las ondas de radio. Estas condiciones generan variaciones en la intensidad de la señal y así afectan a la cobertura efectiva (Molina, 2024).

1.2.6. Backhaul en Redes Móviles

El backhaul se conoce como el segmento de la red que se encarga de transportar el tráfico de datos, así como la señalización desde las estaciones base hacia la red de núcleo (Barrios, 2021). El desempeño de este componente es determinante para determinar la capacidad global del sistema, debido a que conecta la red de acceso con los servicios centrales (Álvaro, Badillo, Aguirre, & Ramos, 2019). Un backhaul correctamente dimensionado es importante para evitar congestión y garantizar que los recursos del acceso radio se aprovechen de la forma más eficiente (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, 2022).

1.2.6.1. Tecnologías de backhaul

Existen diversas tecnologías utilizadas para implementar el backhaul en redes móviles, entre las cuales se puede incluir a los radioenlaces, fibra óptica y enlaces cableados. Cada una de estas tecnologías posee características particulares con respecto a la capacidad, latencia y confiabilidad (Mejía, 2022). La selección de la tecnología de backhaul se la realiza considerando los requerimientos técnicos de la red y de los objetivos de desempeño definidos (Cortés, Montaña, Osorio, & Guerrero, 2022).

1.2.6.2. Backhaul de fibra óptica

El backhaul de fibra óptica utiliza medios de transmisión ópticos para poder transportar los volúmenes de datos requeridos a altas velocidades y con baja latencia (Calvo, 2020). Esta tecnología tiene como característica una alta capacidad, baja atenuación y elevada inmunidad a interferencias electromagnéticas. Con estas propiedades, la fibra óptica se convierte en una de las soluciones más eficientes para el transporte de tráfico en redes móviles de alta demanda (Murillo, 2022).

1.2.7. Arquitectura de Backhaul en Redes 4G LTE

La arquitectura de backhaul en redes 4G LTE se conoce como la forma en que las estaciones base se conectan con la red de núcleo a través de interfaces estandarizadas. Esta arquitectura adopta distintas topologías, como punto a punto, estrella o anillo, que cuando es escogida de manera adecuada, se puede optimizar la gestión del tráfico y así mejorar la escalabilidad y eficiencia operativa del sistema (López D. , 2022).

1.2.8. Dimensionamiento del Backhaul de Fibra Óptica

El dimensionamiento del backhaul de fibra óptica permite determinar la capacidad requerida para transportar el tráfico agregado el cual será generado por la red de acceso. Este proceso considera toma en cuenta factores como el número de usuarios, demanda de datos y patrones de tráfico (Segarra, 2018). Cuando se dimensiona de manera adecuada este aspecto, se pueden evitar cuellos de botella y garantizar que el sistema de transporte soporte los requerimientos actuales y futuros de la red (Corredor, 2024).

1.2.9. Latencia y Calidad de Servicio en el Backhaul

La latencia en el backhaul es el retardo que experimentan los datos durante su transporte entre la red de acceso y la red de núcleo (Arbeláez, 2026). Este parámetro es muy importante determinarlo en servicios sensibles al tiempo de respuesta. El control de la latencia y otros parámetros asociados permiten garantizar los niveles correctos de calidad de servicio y una experiencia de usuario más satisfactoria (Gutierrez, 2025).

1.2.10. Confiabilidad y Disponibilidad del Backhaul

La confiabilidad en el backhaul está relacionada con la capacidad para operar de forma continua y estable, mientras que la disponibilidad indica el porcentaje de tiempo en que el sistema se encuentra operando con normalidad (Satué, 2019). Estos dos aspectos son fundamentales para la continuidad del servicio en redes móviles, siendo la etapa de diseño en donde se deben considerar los mecanismos que permitan disminuir en su mayoría las interrupciones y así garantizar el funcionamiento consistente del sistema (Lozano A. , 2026).

1.2.11. Infraestructura de Backhaul en Redes Móviles

El backhaul es esencial para garantizar la calidad de servicio en redes móviles. Entre las alternativas (microondas, FSO, satélite y fibra), la fibra óptica resalta por su capacidad, baja latencia y escalabilidad. Sin embargo, en áreas rurales, su implementación se enfrenta a altos costos de despliegue y limitaciones geográficas (ANE, 2023).

Modelos híbridos han sido propuestos, combinando fibra con tecnologías como Free Space Optics (FSO) para optimizar costos sin comprometer confiabilidad. Asimismo, en contextos latinoamericanos se han desarrollado soluciones auto gestionables de backhaul inalámbrico como WiBACK, que permiten conectar comunidades apartadas mientras se proyecta la transición hacia redes 5G (Cortés C. L., Montaña-Argote, Osorio, & Guerrero-González, 2020).

A continuación, se presenta un cuadro comparativo en la **Tabla 1-3** de las principales tecnologías de backhaul, que suelen complementarse con la fibra para crear modelos híbridos que optimizan costos y mejoran la confiabilidad de la red, resaltando la importancia de la utilización de la fibra óptica.

Tabla 1-3: Tabla Comparativa de Tecnologías de Backhaul

Tecnología	Ventajas en Redes Rurales 4G	Limitaciones en Entornos Rurales
Backhaul Óptico (Fibra)	Capacidad para 4G y futuras 5G: Satisface la demanda actual y futura de datos, ofreciendo una escalabilidad sin igual (Sharma et al., 2021; Winzer et al., 2018)	Altos costos de despliegue: La instalación de fibra es costosa y lenta en terrenos difíciles como el andino, lo que se ha identificado como el mayor obstáculo para la conectividad rural (ITU, 2025)
	Baja latencia: Mejora la experiencia del usuario y soporta aplicaciones sensibles al tiempo.	Susceptibilidad a daños: La infraestructura puede ser dañada por desastres naturales o actividades de construcción
	Inmune a interferencias: Su fiabilidad es crucial en áreas donde otras señales pueden competir por el espectro. Menor costo operativo: A largo plazo, los costos de operación y mantenimiento de la fibra son más bajos que los de las redes de cobre o híbridas(Introba, 2024).	Limitaciones geográficas: La topografía de la zona puede requerir rutas largas y complejas, lo que incrementa los costos y el tiempo de despliegue.
Microondas	Despliegue rápido y flexible: Destinado a la conexión de torres en áreas remotas donde la fibra no es viable	Ancho de banda limitado: Menor capacidad en comparación con la fibra óptica, lo que puede

	económicamente (Tzvika Naveh, 2009)	convertirse en un cuello de botella con la alta demanda de 4G.
	Menor costo inicial: Este indicador de equipos de microondas suele ser más pequeño que la fibra óptica.	Sensibilidad al clima: La lluvia y la niebla, comunes en la sierra, pueden atenuar la señal, afectando la disponibilidad del servicio (Ericsson, 2022).
	Gran alcance: Puede cubrir kilómetros con visibilidad directa.	Línea de vista (LOS): Factores geográficos como cerros, vegetación y edificios pueden generar bloqueos del enlace, lo cual limita la utilización en áreas con topografía irregular.
Free Space Optics (FSO)	Alta velocidad de transmisión: Permite tener un ancho de banda comparable al de la fibra en distancias cercanas (Mukhopadhyay et al., 2023).	Muy sensible a las condiciones climáticas: La niebla, las nubes bajas, la lluvia y la turbulencia atmosférica pueden degradar severamente la señal, incluso interrumpiendo el servicio.
	Despliegue rápido y sin licencia: No necesita tener permisos de frecuencia.	Alcance muy limitado: únicamente resulta factible en

Bajo costo de instalación: No requiere infraestructura de microondas ni cableado de fibra, lo que la convierte en la mejor opción en enlaces de punto a punto (Morra et al., 2017).	cortas distancias cuando existe visibilidad perfecta. Necesita alineación precisa: Algún movimiento de las torres o del terreno puede generar desalineaciones en los transceptores.
---	--

1.2.12. Desafíos y Consideraciones en el Despliegue de Redes Celulares Rurales

Los retos principales incluyen la dispersión poblacional y carencia de infraestructura eléctrica (Silva, De La Cruz, Amat, & Freire, 2020). A ello también se le suma la falta de incentivos económicos vinculados con los operadores, ya que esta inversión no tiene un retorno de inversión planteado para las áreas rurales (Matracia, Kishk, & Alouini, 2021).

Diversos estudios recomiendan estrategias complementarias: uso de UAVs como estaciones base temporales para ampliar cobertura (Sabzehali, et al., 2022), implementación de redes comunitarias autogestionadas (Cortés C. L., Montaña-Argote, Osorio, & Guerrero-González, 2020), y estímulos regulatorios como subsidios o fondos de servicio universal (Contreras Potenciano, Ovando Chico, & Frías, 2022).

1.2.13. Radio Mobile

Radio Mobile es un software que se ha implementado para efectuar simulaciones de enlaces de radio considerando diferentes características atmosféricas y geográficas. Este programa es de uso libre y se encuentra especificado mediante el modelo de propagación de Longley-Rice, el cual se encarga de generar las predicciones del rendimiento de los enlaces analizados, así como para mejorar la cobertura de radio. Esta herramienta ayuda a los usuarios a obtener diferentes modelos de sistemas de comunicación escalables en donde se pueda partir de esquemas punto a punto hasta redes de alta complejidad (IELECTEL, 2024).

Radio Mobile ha evolucionado para ser una herramienta utilizada en gran medida para el campo de las telecomunicaciones, lo que permite simular la propagación de ondas de radio de acuerdo con los entornos geográficos. El objetivo principal de este está centrado

en la mejora de las etapas de diseño, optimización y planificación de redes de radio. Las aplicaciones que más se utilizan son las siguientes:

- **Planificación de Cobertura:** Permite verificar la cobertura de la señal de radio en zonas determinadas considerando factores como potencia de transmisión, geografía del terreno y altura de las antenas.
- **Análisis de Interferencias:** Sirve como identificador de interferencias entre señales, lo que determina la calidad de la comunicación.
- **Optimización de Redes:** Se simulan diversos escenarios de prueba buscando optimizar la red y planificar la toma de decisiones.
- **Estudio de Enlaces:** También se evalúa el rendimiento de sistemas específicos para garantizar que se esté corrigiendo las observaciones presentadas por el cliente, un correcto diseño del sistema de comunicación (IELECTEL, 2024).

1.2.14. GNET PRO

G-Net Pro es una aplicación para dispositivos móviles la cual está basada en el sistema operativo Android y que permite monitorear, registrar y analizar parámetros técnicos de redes celulares. Este software se utiliza principalmente en actividades de drive test, evaluación de cobertura, análisis de calidad de servicio y diagnóstico de desempeño de redes móviles, incluyendo tecnologías como 2G, 3G, 4G LTE y 5G.

La herramienta permite capturar información en tiempo real sobre el comportamiento de la red, generando registros de parámetros radioeléctricos, identificación de celdas, calidad de señal, throughput y localización geográfica. Estos datos se pueden exportar para su análisis en herramientas de procesamiento o sistemas de planificación de redes. Esta aplicación se ha convertido en una alternativa accesible para estudios académicos y evaluaciones preliminares de cobertura.

El software G-Net posee diversas funcionalidades que lo convierten en una herramienta útil para la recolección de información de redes móviles las cuales son:

- **Monitoreo en tiempo real de redes celulares:** permite visualizar parámetros de la conexión actual del dispositivo con la red móvil.
- **Registro de mediciones georreferenciadas:** integra información de posicionamiento GPS para asociar cada medición con una ubicación geográfica.

- **Compatibilidad con múltiples tecnologías móviles:** soporta redes GSM, UMTS, LTE y 5G, permitiendo analizar diferentes generaciones de tecnología celular.
- **Generación de archivos de registro (logs):** almacena datos de medición que se exportan a formatos compatibles con hojas de cálculo o herramientas de análisis.
- **Visualización de celdas y estaciones base cercanas:** muestra información de las celdas detectadas, incluyendo identificadores y parámetros de señal.
- **Mapas de cobertura:** visualiza los niveles de señal registrados sobre mapas digitales.
- **Análisis de velocidad de datos:** posee herramientas para evaluar el rendimiento de la conexión mediante pruebas de velocidad.

La aplicación permite medir diversos parámetros radioeléctricos y de red, los cuales son permiten evaluar el desempeño de las redes móviles (Solutions, 2026). Entre los principales parámetros se encuentran los mencionados en la **Tabla 1-4**.

Tabla 1-4: Parámetros Configurables dentro de GNET PRO

Parámetro	Descripción
RSRP (Reference Signal Received Power)	Nivel de potencia de la señal de referencia en redes LTE. Indica la intensidad de la señal recibida.
RSRQ (Reference Signal Received Quality)	Relación entre potencia de señal y nivel de interferencia, utilizada para evaluar la calidad de la señal LTE.
SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)	Relación entre señal útil y ruido/interferencia presente en el canal.
RSSI (Received Signal Strength Indicator)	Indicador de potencia total recibida en el canal radio.
PCI (Physical Cell Identity)	Identificador físico de la celda LTE a la que está conectado el dispositivo.

EARFCN (E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number)	Número que identifica el canal de frecuencia utilizado en LTE.
Cell ID	Identificador único de la celda dentro de la red del operador.
TAC (Tracking Area Code)	Código que identifica el área de seguimiento dentro de la red LTE.
Velocidad de descarga (Download throughput)	Tasa de transferencia de datos desde la red hacia el dispositivo.
Velocidad de subida (Upload throughput)	Tasa de transferencia de datos desde el dispositivo hacia la red.
Latencia	Tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde el dispositivo hasta el servidor y regresar.

2. CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE MERCADO

2.1. Caracterización del Área de Estudio

La parroquia rural Cochapamba, perteneciente al cantón Saquisilí de la provincia de Cotopaxi, tiene en los datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2025) una población total de 6.280 habitantes, día la cual se encuentra distribuida en un territorio con una densidad poblacional de 30 hab/km², siendo este un indicador que la clasifica como una zona de baja densidad poblacional.

Por otro lado, la estructura etaria de la población muestra un perfil que resulta favorable para la adopción de servicios de datos móviles. Con respecto a la información del INEC, la distribución por grupos de edad se distribuye tal y como se aprecia en la **Tabla 2-1**, con una población joven de 18 a 29 años, segmento de mayor propensión al uso de tecnología móvil, alcanzando los 1.249 habitantes con un 19,9%, mientras que la población adulta de 30 a 64 años representa el grupo mayoritario con 2.230 personas que corresponde al 35,5%. Este perfil indica que más del 55% de la población se encuentra en edad económicamente activa o en formación académica, siendo estos los grupos que conforman el núcleo de la demanda potencial de servicios de banda ancha móvil.

Tabla 2-1: Distribución Etaria de la Población de Cochapamba

Grupo Etario	Rango de Edad	Habitantes	% del Total
Niños	0 – 11 años	1.308	20,8%
Adolescentes	12 – 17 años	740	11,8%
Jóvenes	18 – 29 años	1.249	19,9%
Adultos	30 – 64 años	2.230	35,5%
Adultos Mayores	≥ 65 años	753	12,0%
TOTAL	—	6.280	100%

Otro dato importante entregado por el INEC, indica que el 56,2% de la población de 5 años en adelante posee un teléfono celular, lo que aplicado a la población parroquial

proyecta aproximadamente 3.210 usuarios con dispositivo celular activo. Este dato constituye el límite superior del mercado potencial total, aunque la demanda real del servicio propuesto se concentrará en los segmentos que posee mayor capacidad adquisitiva y educación tecnológica.

Por otro lado, el perfil socioeconómico de Cochapamba es el propio de una parroquia rural andina ecuatoriana, el cual corresponde a una economía primaria la cual se basa en actividades agropecuarias. De acuerdo con el informe proporcionado por el GAD de Cochapamba (PDOT, 2020), la Población Económicamente Activa (PEA) corresponde a 2.503 personas, de las cuales el 84,26% está dedicada a la agricultura y ganadería, mientras que el 12,5% a actividades comerciales y únicamente el 0,92% a industria y manufactura. En base a esta composición productiva, se estima que los ingresos promedio de los hogares se sitúan en el entorno del Salario Básico Unificado (SBU) vigente, principal referencia debido a la ausencia de datos específicos.

Finalmente, el nivel educativo de la población es otro factor importante que debe considerarse, ya que según datos INEC (2025) se indica que el 21,6% de la población carece de nivel educativo formal; mientras que el 14,6% cuenta únicamente con alfabetización; el 44,2% posee instrucción básica; el 15,3% ha completado el bachillerato; el 4,2% posee educación superior; y apenas el 0,1% cuenta con algún tipo de posgrado como se muestra en la **Tabla 2-2**. Al observar que estos indicadores muestran brechas educativas evidentes, el creciente acceso a plataformas de educación virtual, se conforma como una de las aplicaciones de demanda más relevantes para la red 4G propuesta.

Tabla 2-2. Nivel educativo de la población de Cochapamba

Nivel Educativo	Porcentaje (%)
Sin nivel educativo	21,6%
Alfabetización	14,6%
Instrucción básica	44,2%
Bachillerato	15,3%

Superior	4,2%
Posgrado	0,1%

2.2. Análisis de la Demanda

La parroquia Cochapamba es atendida por tres operadoras de telefonía móvil como lo son CNT EP, Claro y Movistar. Sin embargo, la presencia de cada operadora no corresponde a lo que ofrecen según la tecnología y el área geográfica específica, para lo cual requirió contrastar la información de los mapas de cobertura publicados en los portales y la presencia real, la cual fue comprobada en base a mediciones de campo con la herramienta G-NetTrack Pro.

CNT EP tiene presencia en Cochapamba la cual se sustenta en un acuerdo de roaming con Claro, mediante el cual los abonados de CNT EP utilizan la infraestructura radioeléctrica de Claro para obtener cobertura en las zonas donde CNT EP no posee infraestructura propia. Esto indica que CNT EP no controla de forma directa la calidad del servicio que oferta en la zona, debido a la dependencia de las condiciones técnicas de la red de terceros. Por otro lado, sí disponen de infraestructura de fibra óptica de transporte hasta la cabecera parroquial, siendo este un activo que no es compartido con otras operadoras.

Por su parte, la operadora Claro es el operador privado con mayor presencia de infraestructura en la zona. La torre de telecomunicaciones que se encuentra en la coordenadas referenciales -0.834514° , -78.754271° propia de la empresa posee la única señal 3G HSPA+ con suficiente nivel para ser detectada y utilizada por los dispositivos móviles de la zona. Esta empresa presta servicio directo a sus abonados y proporciona capacidad de roaming a CNT EP basado en acuerdos de interconexión regulados.

Finalmente, Movistar mantiene una presencia marginal en la zona, con cobertura 3G de señal débil y ausencia total de cobertura 4G LTE lo cual fue verificado en campo. La participación de esta empresa en el mercado de analizado es prácticamente residual, sin infraestructura física propia identificada.

2.2.1. Tecnologías Disponibles

Con respecto a las tecnologías disponibles por operadora, se aprecia una discrepancia entre la oferta declarada y la oferta real. En la **Tabla 2-3** se aprecia que la tecnología que el portal de cobertura corporativo muestra como disponible frente a la tecnología que fue identificada en base a las mediciones de campo realizadas son distintas.

Tabla 2-3. Comparación de las Tecnologías disponibles por operadora

Operadora	2G (GSM/GPRS)	3G (HSPA+)	4G LTE – Declarado	4G LTE – Real (Campo)	Observación
CNT EP	Parcial	Sí (vía roaming Claro)	Parámetros bajos	NO operativa	Roaming total sobre infraestructura Claro
Claro	No detectada	Sí – señal variable	Señal baja declarada	NO operativa (fallback 3G)	Única infraestructura activa en la zona
Movistar	Parcial	Señal débil	No existe	No detectada	Presencia marginal, sin infraestructura propia

Se ha identificado en las tres operadoras es un "4G fallback", que, pese a que los dispositivos móviles detectan en ciertos puntos una señal 4G LTE, con nivel de referencia RSRP muy débil, inferior a -110 dBm, la intensidad de señal no es la suficiente para establecer y mantener una sesión de datos en LTE, por lo que el modem cae automáticamente a 3G HSPA+ como tecnología de respaldo.

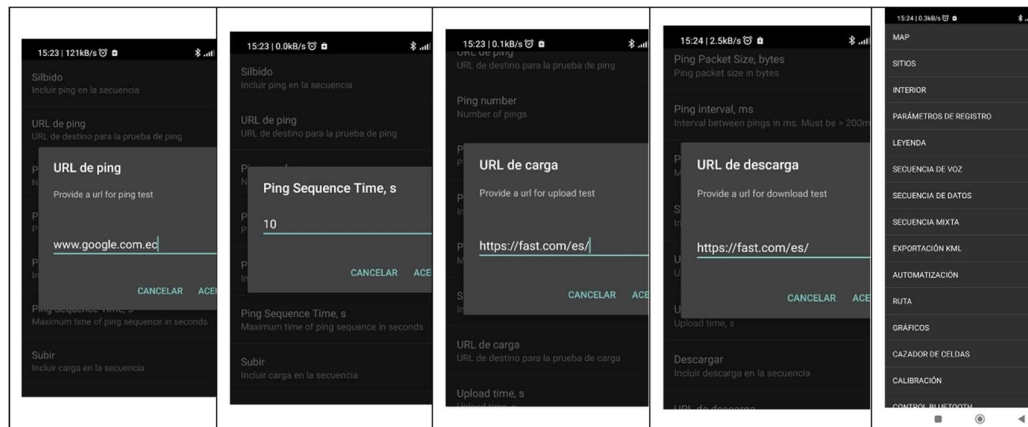
2.2.2. Calidad del Servicio Actual

Para realizar las pruebas de los parámetros de la red, en este caso CNT. Durante la transmisión de datos se utilizó la aplicación G-NetTrack Pro en el submenú de Secuencia de Datos, se utilizando los siguientes parámetros:

- Ping a www.google.com.ec, la aplicación la instrucción ping con 10 intervalos
- Para las pruebas de Carga y descarga se utilizó la página de <https://fast.com/es/>
- Las coordenadas fueron sacadas de la aplicación GPS MAP Camera

Como se muestra en la **Figura 2-1**, los parámetros que se enlistaron anteriormente se colocaron dentro del software para realizar los diferentes registros de datos.

Figura 2-1. Configuración de Parámetros en GNET PRO



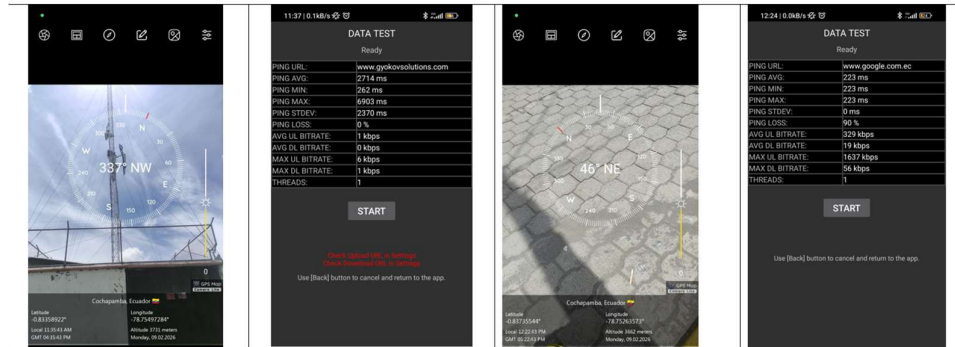
Se realizó 2 registros utilizando un automóvil siguiendo las rutas que se muestran en la **Figura 2-2** siempre considerando el punto en el cual se encuentra la antena de transmisión principal.

Figura 2-2. Rutas de GNET en Automóvil



De igual forma, como se muestra en la **Figura 2-3** se definen los parámetros para la mediciones de manera estáticas de las variables definidas para el estudio.

Figura 2-3. Configuración de Parámetros para medición estática



Posteriormente, se realizaron pruebas estáticas, en los puntos que se muestran en la **Figura 2-4** para poder evaluar el comportamiento de las métricas en toda la zona de estudio.

Figura 2-4. Rutas de GNET Estáticas

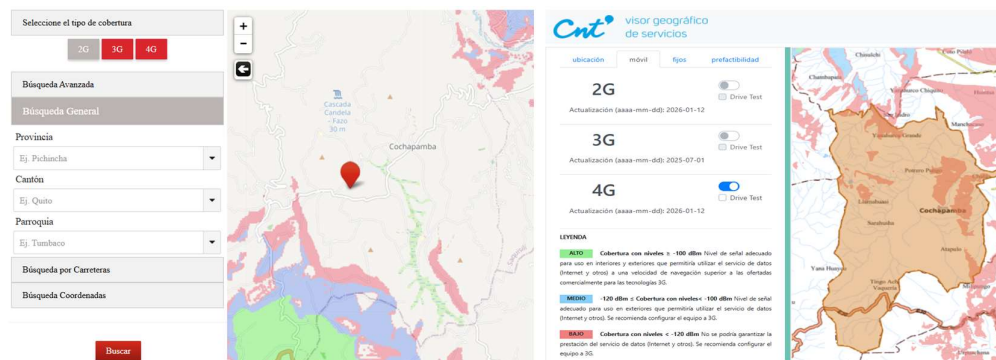


En primer lugar, se ha comprobado los niveles de señal, por medio del indicador RSCP (Received Signal Code Power) en donde se revela que el 37,1% de las mediciones registra señal pobre (< -95 dBm), el 9,5% señal aceptable (-95 a -75 dBm) y el 53,4% señal buena (> -75 dBm), con una media de $-81,4$ dBm. Esta distribución, que aparentemente es favorable en términos del porcentaje, se desprecia debido a que los indicadores de rendimiento de datos son críticos, con un throughput de descarga medio es de apenas 104 Kbps y con una pérdida de paquetes media del 36,5%, evidenciando que el problema de

calidad no es exclusivamente de cobertura sino también de capacidad y congestión de la red 3G que se posee.

Las limitaciones de cobertura geográfica son propias de la configuración actual en donde existe una única torre 3G la cual debe dar servicio a todo el territorio parroquial, con una topografía montañosa la cual introduce obstáculos naturales. El mapa de cobertura georreferenciado mostrado en la **Figura 2-5** muestra que las zonas de señal pobre y nula se concentran en los sectores periféricos y de mayor altitud de la parroquia.

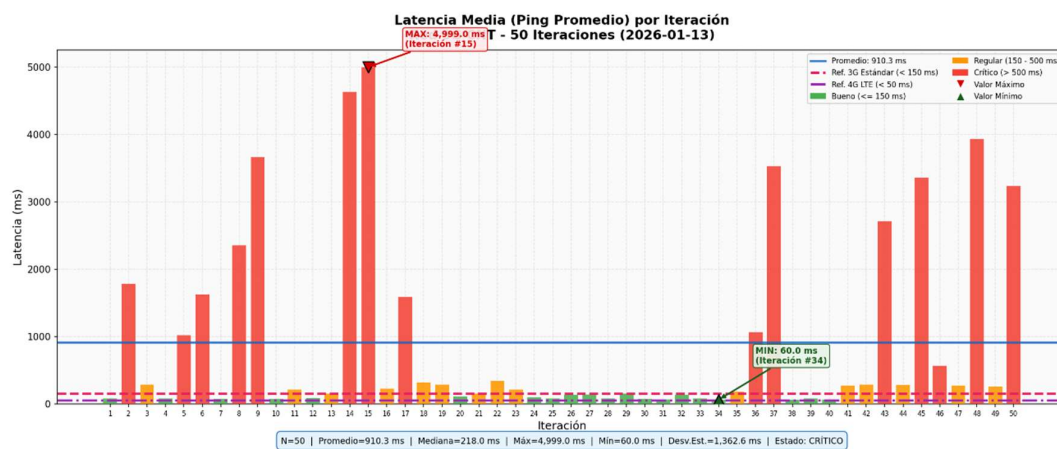
Figura 2-5. Mapa de Cobertura Móvil de Claro y CNT



El uso de roaming entre CNT EP y Claro es considerado como otra problemática de degradación de la calidad ya que en los esquemas de roaming nacional, el tráfico de datos del abonado itinerante es enrutado por medio de nodos de interconexión adicionales previo a alcanzar la red troncal del operador visitado, aumentando la latencia y reduciendo la prioridad de servicio en situaciones de congestión. Esta es la principal razón por la cual se han registrado valores extremos de latencia cercanos a picos de 9.253 ms como se muestra en la

Figura 2-6, con una alta variabilidad del ping lo que impide el uso de servicios en tiempo real tales como VoIP, telemedicina y videoconferencia.

Figura 2-6. Registro de Latencia observados durante la prueba de Ruta



2.2.3. Planes y Precios Actuales

Con respecto a los planes de datos móviles vigentes en Ecuador hasta la fecha actual fue obtenida por parte de los portales oficiales de cada una de las operadoras. Como se muestra en la **Tabla 2-4**, la comparativa está enfocada en los planes de datos postpago, en donde se señala que los precios rondan entre los \$15 a \$30. De igual forma se indica que la calidad real del servicio que el usuario experimenta es inconsistente a las velocidades y coberturas que los planes ofrecen.

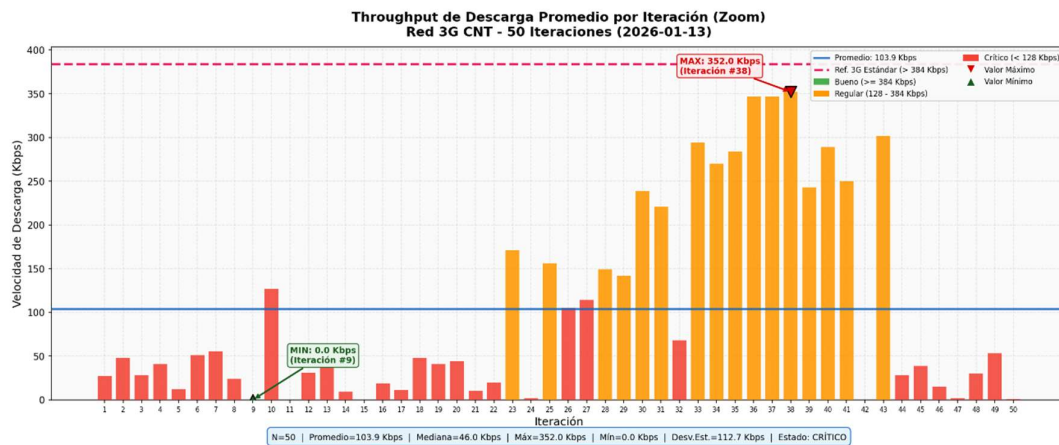
Tabla 2-4. Costos Referenciales de los Planes Móviles

Operadora	Plan / Tecnología Real	Precio Aproximado (USD/mes)	Velocidad Publicitada	Velocidad Real en Zona	Calidad de Señal Real
-----------	------------------------	-----------------------------	-----------------------	------------------------	-----------------------

CNT EP	Pospago 4G (entregado como 3G vía roaming Claro)	Desde \$12 – \$25	Hasta 50 Mbps (4G)	~104 Kbps (3G efectivo)	Variable – RSCP medio - 81,4 dBm
Claro	Pospago 4G (entregado como 3G en campo)	Desde \$15 – \$30	Hasta 100 Mbps (4G)	~104 Kbps (3G efectivo)	Variable – señal baja en periférico
Movistar	Pospago 3G / 4G (señal débil)	Desde \$12 – \$28	Hasta 20 Mbps (4G)	No medible (señal insuficiente)	Débil – fallback frecuente a 2G

Como ya se mencionó, se aprecia una brecha entre la velocidad publicitada y la velocidad real experimentada por el usuario en Cochapamba obteniendo registros en campo de 104 Kbps como se muestra en la **Figura 2-7**, equivalente al 0,1% de la velocidad mínima publicitada por el plan más básico de las operadoras. Esta condición indica la urgencia de desplegar una infraestructura 4G LTE la cual pueda garantizar las velocidades y la calidad de servicio contratadas para los usuarios.

Figura 2-7. Rendimiento de Datos en Prueba de Ruta



Finalmente, la recopilación de los indicadores de rendimiento medidos durante la prueba de ruta se presenta como la evidencia técnica más relevante para sustentar la necesidad de migración a tecnología 4G LTE propuesta. Como se muestra en la **Tabla 2-5**, los resultados de las iteraciones de prueba de conectividad realizadas en puntos distribuidos por el territorio parroquial evidencian un cuadro de inoperatividad funcional de la red actual para satisfacer las demandas de datos de los usuarios actuales.

Tabla 2-5. Indicadores de la Red actual en comparación con estándares de referencia

Indicador	Resultado Medido	Referencia 3G Estándar	Referencia 4G LTE	Estado
Latencia Media	> 2.000 ms (frecuente)	< 150 ms	< 50 ms	CRÍTICO
Latencia Máxima Registrada	9.253 ms	< 500 ms	< 100 ms	CRÍTICO
Pérdida de Paquetes Media	36,5%	< 2%	< 0,5%	CRÍTICO
Pérdida de Paquetes Máx.	90%	< 5%	< 1%	CRÍTICO
Throughput Descarga Prom.	104 Kbps	> 384 Kbps	> 10 Mbps	CRÍTICO
RSCP Medio	-81,4 dBm	> -85 dBm	N/A (RSRP > -100 dBm)	DEFICIENTE
% Muestras RSCP Pobre	37,1% (144/388)	< 10%	< 5%	CRÍTICO

2.3. Análisis de la Oferta

La estimación del mercado potencial para el servicio 4G LTE en Cochapamba se basa considerando la intersección entre la penetración de dispositivos móviles que es cercana al 56,2% de la población de 5 años en adelante, y la capacidad de pago de los hogares, aproximada al Salario Básico Unificado. Con respecto a que la penetración celular a la población de 5 años en adelante es de aproximadamente 5.780 personas, se obtienen un total de 3.250 usuarios con dispositivo celular. Sin embargo, considerando la adopción progresiva de servicios 4G y los patrones de uso típicos de zonas rurales, el escenario más conservador para este estudio establece como objetivo inicial una base de 1.000 usuarios activos, cifra que representa la suma del segmento joven entre 18 a 29 años, y aproximadamente el 50% de la Población Económicamente Activa con acceso a dispositivos compatibles con esta tecnología.

2.3.1. Estimación de Demanda de Tráfico

Para poder cuantificar la demanda de tráfico se lo realiza en base a parámetros de consumo por usuario aproximados considerando el contexto de servicios rurales, lo cual considera como aplicaciones principales la navegación web, educación virtual, acceso a redes sociales y visualización de video en calidad media. Considerando esto, la demanda promedio por usuario se estima en el rango de 3 a 5 Mbps de velocidad garantizada en condiciones de uso simultáneo, conforme a las especificaciones técnicas establecidas para el diseño de la red.

En redes móviles rurales, el factor de simultaneidad, el cual se define por la fracción de usuarios que acceden al servicio de forma concurrente en el periodo de mayor demanda, se debe considerar entre 20% al 30%. Este parámetro permitirá dimensionar la capacidad de la celda y el backhaul sin sobredimensionar el sistema, evitando que se ejecute un proyecto económicamente inviable; y que tampoco sea subdimensionado afectando la calidad del servicio. En base a ello se plantea los parámetros de demanda que se aprecian en la **Tabla 2-6**.

Tabla 2-6. Estimación de demanda de tráfico 4G LTE – Parroquia Cochapamba

Parámetro	Valor	Observaciones
-----------	-------	---------------

Usuarios potenciales objetivo	1.000	Jóvenes + 50% PEA con dispositivo compatible
Demanda promedio por usuario	3 – 5 Mbps	Navegación web, video calidad media, redes sociales
Factor de simultaneidad rural	20% – 30%	200 – 300 usuarios simultáneos
Demanda total – escenario conservador (20%)	600 – 1.000 Mbps	200 usuarios × 3-5 Mbps
Demanda total – escenario alto (30%)	900 – 1.500 Mbps	300 usuarios × 3-5 Mbps
Demanda real estimada (referencia de diseño)	~750 Mbps	Escenario intermedio de planificación

2.3.2. Requerimientos de Backhaul

Considerando que la infraestructura de fibra óptica de CNT EP está disponible como enlace de backhaul desde Saquisilí hasta Cochapamba, el dimensionamiento de la capacidad del enlace considera un margen de crecimiento de al menos el 30% adicional sobre la demanda estimada en el escenario alto, para garantizar una escalabilidad del servicio durante el horizonte de planificación que es de 5 a 10 años. Esto implica una capacidad de backhaul recomendada de al menos 1 Gbps en el enlace de fibra óptica hacia la estación base, preferentemente mediante interfaz de 10 Gbps Ethernet para asegurar escalabilidad futura. Esta capacidad se considera factible con la infraestructura de fibra óptica existente, que soporta velocidades de transmisión del orden de los Gigabits por segundo mediante protocolos DWDM o mediante la activación de pares de fibra adicionales.

2.3.3. Demanda por Sectores Sociales

El sector educativo, representado por las Unidades Educativas Interculturales Bilingües Cochapamba y Jatari Unancha, que posee al menos 122 estudiantes matriculados en la

primera, se presentan como una demanda institucional de conectividad para plataformas de educación virtual, videoconferencias y acceso a recursos digitales. Con respecto al sector salud, el Centro de Salud Cochapamba y el Dispensario del IESS Seguro Campesino, requiere conectividad para el sistema de Historia Clínica y telemedicina. En cuanto al sector productivo agrícola, el cual concentra el 84,26% de la PEA, se define como una demanda emergente de conectividad para comercio electrónico, consulta de precios de mercado y acceso a plataformas de asistencia técnica. Finalmente, el mercado rural, el cual concentra mayor afluencia en los días de feria es un escenario de pico de demanda que el diseño de red debe considerar.

2.3.4. Proyección de Demanda

La proyección de demanda a cinco años considera la combinación de tres variables como lo son la tasa de penetración progresiva del servicio 4G sobre la base de usuarios potenciales, con 1.000 usuarios objetivo; el factor de crecimiento anual del tráfico de datos por usuario que es aproximado del 20% anual; escenarios de factor de simultaneidad del 20%, 25% y 30%, que representan condiciones conservadoras, moderadas y de alta demanda concurrente respectivamente.

Como se muestra en la **Tabla 2-7** se aprecian las proyecciones de demanda de tráfico para los tres escenarios durante el horizonte de planificación de cinco años, considerando una tasa de crecimiento anual del tráfico por usuario del 20% y un crecimiento de la base de usuarios del 10% anual.

Tabla 2-7. Proyección de demanda de tráfico 4G LTE a 5 años – Parroquia Cochapamba

Año	Usuarios Activos	Escenario Conservador (20% simult.) – Mbps	Escenario Moderado (25% simult.) – Mbps	Escenario Alto (30% simult.) – Mbps
Año 0 (Inicial)	1.000	600 – 1.000	750 – 1.250	900 – 1.500
Año 1	1.100	726 – 1.210	907 – 1.512	1.089 – 1.814

Año 2	1.210	878 – 1.464	1.097 – 1.829	1.317 – 2.195
Año 3	1.331	1.063 – 1.772	1.328 – 2.214	1.593 – 2.657
Año 4	1.464	1.286 – 2.144	1.607 – 2.679	1.928 – 3.214
Año 5	1.610	1.556 – 2.594	1.945 – 3.241	2.334 – 3.889

Los resultados de esta proyección muestran que incluso en el escenario conservador, la demanda de tráfico alcanza 2.594 Mbps al final del horizonte de planificación, triplicando la demanda inicial. Esta tendencia de crecimiento muestra que el dimensionamiento de la red no se debe limitar a satisfacer la demanda del año de implementación, si no que se requiere tomar en cuenta la capacidad de expansión mediante la adición de nuevos sectores, incorporación de bandas de frecuencia adicionales o la densificación con small cells en los núcleos de mayor demanda. En el escenario mayor, la demanda en el año 5 puede superar los 3.889 Mbps, por lo que se requeriría al menos dos sitios eNodeB o la implementación de MIMO masivo para satisfacer la demanda con la infraestructura actual.

2.4. Análisis de la Brecha de Mercado

Las brechas de servicio identificadas en el presente estudio se presentan en forma técnica y comercial. Con respecto al punto de vista técnico, la brecha fundamental es la inexistencia de cobertura 4G LTE operativa en la totalidad del territorio parroquial, a pesar de lo indicado por las operadoras en sus portales de cobertura. Con respecto al punto de vista comercial, la ausencia de planes de datos asequibles y adaptados al perfil económico de la población rural limita la adopción de servicios de banda ancha incluso en zonas donde la cobertura técnica existe. En la **Tabla 2-8** se aprecian las principales brechas identificadas y el impacto correspondiente.

Tabla 2-8. Brechas de servicio de telecomunicaciones en Cochapamba

Brecha Identificada	Descripción	Impacto
----------------------------	--------------------	----------------

Cobertura 4G inexistente	Ningún operador provee 4G operativa en el territorio	Alto – impide acceso a servicios digitales modernos
Latencia inaceptable (3G)	> 2.000 ms frecuente, pico 9.253 ms	Alto – bloquea VoIP, telemedicina, educación virtual
Pérdida de paquetes crítica	Media 36,5%, máx. 90%	Alto – sesiones de datos interrumpidas constantemente
Throughput insuficiente	104 Kbps promedio descarga	Alto – incapaz de soportar servicios básicos de datos
Sin planes rurales adaptados	Planes actuales no diseñados para perfil rural-agrícola	Medio – barreras de adopción económica
Cobertura geográfica parcial	37,1% del área en zona de señal pobre	Medio – sectores periféricos sin servicio

2.5. Análisis FODA de la Propuesta

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) es una herramienta de diagnóstico que permite evaluar, los factores internos y externos que condicionan la viabilidad del proyecto planteado para la parroquia Cochapamba. Los factores internos, permiten caracterizar la situación actual del proyecto en función de los recursos, capacidades e infraestructura disponibles. Los factores externos se derivan del entorno tecnológico, regulatorio, social y económico en el que se desarrolla la propuesta. En la **Tabla 2-9** se muestra en análisis FODA correspondiente en donde se aprecia principalmente que el diseño debe plantear una arquitectura de red con capacidad de evolución hacia 5G NSA (Non-Standalone) desde el inicio, seleccionando equipamiento compatible con Release 15 del 3GPP, de modo que la inversión actual no quede obsoleta en el horizonte de 5-7 años.

Tabla 2-9. Análisis FODA de la Propuesta Planteada

FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
• Infraestructura de fibra óptica CNT EP que está actualmente desplegada partiendo de Saquisilí hasta Cochapamba, lo que elimina la necesidad de inversión en backhaul. • Torre de telecomunicaciones existente en la zona (coordenadas confirmadas) que puede ser compartida para alojar el equipamiento 4G, reduciendo costos de obra civil. • CNT EP como operadora pública nacional con capacidad financiera, soporte técnico especializado y relaciones institucionales con el Estado ecuatoriano. • Diagnóstico técnico exhaustivo y georreferenciado (388 puntos de muestreo con G-NetTrack Pro) que proporciona una línea base de ingeniería sólida para el diseño de la red. • Disponibilidad de energía eléctrica en la cabecera parroquial, habilitando la alimentación de la estación base sin requerir sistemas de energía autónomos costosos. • Experiencia previa de CNT EP en despliegues rurales 4G en Ecuador, con cadena de suministro y contratos marco con fabricantes (Huawei, ZTE) ya establecidos.	• Políticas públicas del Estado ecuatoriano que se orientan a generalizar el acceso a internet en zonas rurales. • Aumento de la demanda de educación virtual en la parroquia, la cual se potenciará debido a programas del Ministerio de Educación y la necesidad de conectividad entre ambas dos Unidades Educativas Interculturales Bilingües. • Mercado no explotado para tecnología 4G. • Penetración celular del 56,2% (INEC 2025) con dispositivos en su mayoría tengan la compatibilidad con 4G LTE, lo cual disminuye la barrera de adopción tecnológica por parte de los usuarios. • Digitalización de la cadena de valor agrícola: los 2.109 productores agropecuarios de la PEA se consideran como un segmento que requiere de demanda para comercio electrónico y plataformas de agrotecnología. • Resulta que es tendencia global la disminución del costo de equipamiento LTE y la disponibilidad de espectro en banda 700 MHz (Band 28), adecuado para cobertura rural en zonas montañosas.
DEBILIDADES	AMENAZAS
• Baja densidad poblacional (30 hab/km²) lo cual hace que los límites y rentabilidad de acuerdo	• Mejora que se puede realizar para la cobertura 4G por parte de Claro o Movistar dentro de la zona, lo

con sitio, incrementa el costo por usuario atendido, lo que disminuye el atractivo comercial inmediato del proyecto.

- Ingresos promedio de los hogares basados en el SBU, lo cual restringe la capacidad de pago por planes de datos obligando a estructurar ofertas comerciales de bajo costo.
- Topografía andina compleja (variación altitudinal de 1.380 m, pendientes pronunciadas) que incrementa la complejidad del diseño radioeléctrico y puede requerir sitios adicionales para cobertura integral.
- Nivel educativo limitado de la población (44,2% con instrucción básica únicamente), lo que puede ralentizar la adopción de servicios digitales avanzados y requerir programas de alfabetización digital complementarios.
- Imposibilidad de acceso físico a la infraestructura de la torre existente (zona privada), lo que genera incertidumbre sobre las condiciones de compartición de infraestructura y posibles costos adicionales de negociación.
- Ausencia de datos precisos sobre consumo de internet en hogares y tasa de uso real de datos móviles, lo que introduce incertidumbre en las proyecciones de demanda y el dimensionamiento de la red.

cual puede anticipar el ingreso de competencias.

- Condiciones climáticas adversas normales en una zona de páramo que puedan afectar la disponibilidad y el rendimiento del equipamiento radioeléctrico.
- Riesgo de obsolescencia tecnológica acelerada.
- Dependencia de la disponibilidad y capacidad de la fibra óptica de CNT EP.
- Cambios regulatorios en la gestión del espectro radioeléctrico por parte de ARCOTEL que podrían modificar las condiciones de uso de la banda 700 MHz o imponer nuevas obligaciones de cobertura. Economía rural dependiente de la agricultura de subsistencia, sujeta a variaciones estacionales y climáticas que pueden contraer la capacidad de pago de los usuarios en períodos de baja producción agrícola.

2.6. Equipamiento Propuesto

La selección del equipamiento para la red 4G LTE de Cochapamba responde a los requerimientos técnicos derivados del análisis de demanda (750 Mbps de referencia de diseño, 1.000 usuarios objetivo), las condiciones topográficas de la zona, disponibilidad de backhaul de fibra óptica y la necesidad de optimizar la relación costo-beneficio para

un entorno rural de baja densidad. A continuación, se muestra las opciones de equipamiento para los componentes principales de la red.

2.6.1. Estación Base (eNodeB) – Radio Access Network (RAN)

La arquitectura de radio acceso recomendada para Cochapamba es la de un eNodeB macrocelda con configuración sectorizada (1 o 2 sectores según el análisis de cobertura), operando en la banda de 700 MHz (Band 28) para cobertura rural extensa, con posible adición de banda AWS o 1900 MHz para incremento de capacidad en la cabecera parroquial. En la **Tabla 2-10** se aprecian los posibles equipos de referencia evaluados para la estación base.

Tabla 2-10. Opciones de equipamiento para estación base (eNodeB)

Fabricante / Modelo	Tecnología	Bandas Soportadas	Potencia TX	Capacidad (Sector)	Escenario de Uso
Huawei BTS3900L / AAU5613	4G LTE FDD	700/1700/1900/2100 MHz	40-80 W	150 Mbps DL / 50 Mbps UL	Macrocelda rural – cobertura amplia
Ericsson AIR 3246 / Baseband 6630	4G LTE FDD/TDD	700/850/1900/2100 MHz	60 W	200+ Mbps DL	Macrocelda rural – alto rendimiento
Nokia AAHC AirScale	4G LTE FDD	700/850/1700/1900 MHz	40 W	150-200 Mbps DL	Macrocelda rural – solución integrada
ZTE ZXSDR B8200 + AAU	4G LTE FDD	700/1900/2100 MHz	40-60 W	150 Mbps DL	Macrocelda rural – relación costo óptima
Comba Telecom	4G LTE FDD	700/1900 MHz	20 W	75 Mbps DL	Opción Small Cell – menor costo inicial

TowerMax
4G

Para el contexto específico de Cochapamba, el equipo que mejor se adecúa es el Huawei BTS3900L con AAU5613 o el ZTE ZXSDR B8200, ambos ampliamente desplegados por CNT EP en ciertas zonas rurales, lo cual facilita la integración con la red de gestión existente y el soporte técnico local. La configuración recomendada es de un eNodeB con 2 sectores de 120° en banda de 700 MHz (20 MHz de ancho de banda por sector), capaz de proveer hasta 150 Mbps de throughput de bajada por sector con una capacidad agregada de hasta 300 Mbps para la celda completa.

2.6.2. Núcleo de Red – Evolved Packet Core (EPC)

El núcleo de red 4G (EPC) es el componente que gestiona la autenticación, la política de calidad de servicio (QoS) y la interconexión con la red troncal de CNT EP. Para el despliegue de escala rural como Cochapamba, la opción más eficiente es la integración al EPC centralizado de CNT EP ya existente, evitando la inversión en un núcleo independiente para un único sitio. En la **Tabla 2-11** se aprecia las soluciones planteadas en caso de requerirse un EPC local o distribuido.

Tabla 2-11. Opciones de equipamiento para núcleo de red EPC

Fabricante / Solución	Tipo	Capacidad (Suscriptores)	Escenario
Huawei USN9810 / MME9860	EPC centralizado	Hasta 1M suscriptores	Integración al EPC nacional CNT EP
Ericsson SGSN- MME	EPC centralizado/distribuido	Escalable	Integración al núcleo Ericsson existente
Nokia vEPC (virtualizado)	EPC virtualizado (NFV)	Flexible / escalable	Despliegue en nube privada CNT EP

Athonet EPC (small cell)	EPC compacto edge	Hasta 10.000 usuarios	Núcleo local para sitio aislado
---------------------------------	-------------------	-----------------------	---------------------------------

2.6.3. Antenas y Sistema Radiante

El sistema radiante permite maximizar la cobertura en el entorno topográfico de la zona. Como se muestra en la **Tabla 2-12**, se recomienda el uso de antenas de panel direccional con características optimizadas para cobertura rural en terreno irregular.

Tabla 2-12. Opciones de antenas para la estación base 4G LTE

Fabricante / Modelo	Tipo	Ganancia	Frecuencia	Características
Commscope 80010441	Panel direccional	18 dBi	700 MHz	Beam tilt eléctrico ajustable, ideal cobertura rural extensa
Kathrein 742215	Panel direccional	17 dBi	698-960 MHz	Alta ganancia baja frecuencia, sector 65°
Andrew APXVAALL	Panel multiband	15/18 dBi	700/1700/2100 MHz	Solución multiband en una sola antena, reduce carga en torre
Huawei AAU5613 (activa)	Antena activa integrada	Integrada en BBU	700-2600 MHz	RRU integrado, configuración simplificada

2.6.4. Equipamiento de Transmisión y Backhaul

Debido a que la infraestructura de fibra óptica de CNT EP ya está presente en Cochapamba, el equipamiento de backhaul requerido es el de interfaz de acceso a la red óptica. Para esto se presentan las opciones que se muestran en la **Tabla 2-13**.

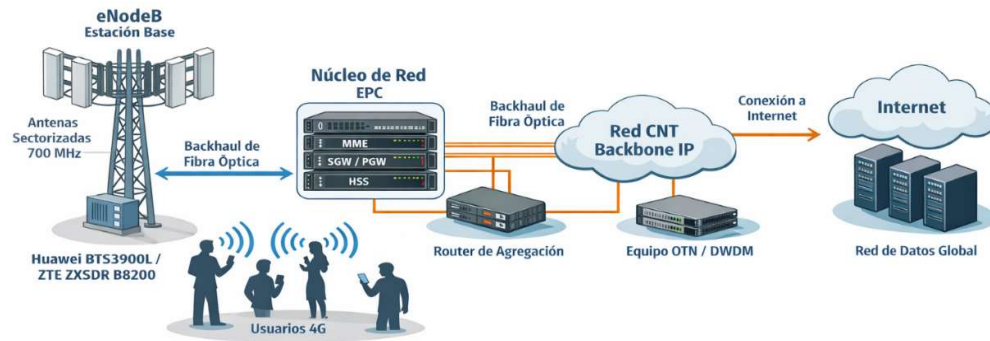
Tabla 2-13. Equipamiento de backhaul y transmisión

Fabricante / Modelo	Tipo	Velocidad	Interfaz	Aplicación
Huawei OptiX OSN 1800I	OTN/DWDM compacto	10 Gbps	SFP+ 10GE	Acceso a fibra óptica monomodo existente
Cisco ASR 9001	Router de borde	40 Gbps	Multi-GE / 10GE	Agregación tráfico eNodeB hacia EPC
Ubiquiti EdgeRouter 4	Router compacto	3.4 Mpps	4× GbE / SFP	Opción económica para sitios de bajo tráfico
Nokia 7705 SAR	Router de acceso	10 Gbps	Multi-GE	Solución integrada transporte y routing

2.6.5. Esquemático de la red propuesta

Como se muestra en la **Figura 2-8** se observa el diagrama esquemático de la arquitectura propuesta para la red 4G LTE en la parroquia Cochapamba, mostrando los principales componentes de la infraestructura de telecomunicaciones. En primer lugar, se muestra la estación base o eNodeB, equipada con antenas sectorizadas operando en la banda de 700 MHz, las cuales permiten proporcionar cobertura radioeléctrica a los usuarios dentro del área de servicio. Esta estación base, posee equipos como Huawei BTS3900L siendo este el elemento principal de la Red de Acceso Radio (RAN) y responsable de generar la comunicación con los dispositivos móviles de los usuarios. El tráfico generado por los usuarios es transportado desde el eNodeB hacia el núcleo de red a través de un enlace de backhaul de fibra óptica, el cual garantiza alta capacidad de transmisión, baja latencia y alta confiabilidad.

Figura 2-8. Diagrama Esquemático de la Red Propuesta



Posteriormente, la información llega al Evolved Packet Core (EPC), donde se gestionan funciones tales como la autenticación de usuarios, gestión de movilidad y asignación de políticas de calidad de servicio. Dentro de este núcleo se encuentran componentes como el MME, SGW/PGW y HSS, encargados de controlar el acceso a la red y enrutar el tráfico de datos.

Posteriormente, el tráfico se distribuye hacia la red troncal IP del operador (Backbone de CNT EP) mediante equipos de transporte y agregación como plataformas OTN/DWDM, los cuales permiten integrar el sitio de acceso con la infraestructura nacional de telecomunicaciones. Finalmente, el tráfico se dirige hacia Internet, permitiendo que los usuarios accedan a los diversos servicios digitales como navegación web, aplicaciones móviles, plataformas educativas y comunicación en línea.

2.6.6. Alimentación y Sistema de Energía

La disponibilidad de energía eléctrica en la cabecera parroquial de Cochapamba permite el uso de alimentación de la red de distribución eléctrica pública como fuente principal. Pese a esto, debido a la alta altitud y las condiciones climáticas se aconseja la implementación de un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) y un generador diésel de respaldo para garantizar la continuidad del servicio. La configuración energética recomendada incluye: rectificador AC/DC de 48V con banco de baterías de 4 a 8 horas de autonomía; UPS de doble conversión; y generador diésel de 5-10 kVA como respaldo ante cortes prolongados de energía eléctrica.

2.6.7. Escalamiento a Red 5G

La arquitectura de red 4G LTE propuesta para la parroquia Cochapamba posee condiciones favorables para una futura evolución hacia redes de quinta generación (5G),

principalmente por la infraestructura de fibra óptica como medio de backhaul, lo cual es uno de los requisitos más importantes para soportar los niveles de capacidad y baja latencia que requiere esta tecnología. El escalamiento de una red LTE hacia 5G se puede realizar de forma progresiva como el caso de Non-Standalone (NSA), en donde se define si la red 5G que se delimitó tiene una infraestructura de LTE como base para señalizar y gestionar la movilidad, lo cual disminuye los costos de implementación y aprovecha el equipamiento.

La red 4G puede trabajar como con un ancla de control, mientras que la nueva capa 5G se puede desplegar para darle una mayor capacidad y velocidad de transmisión. Este enfoque es adecuado para la propuesta planteada, donde el eNodeB, el enlace de backhaul de fibra óptica y la integración con el núcleo de red del operador se pueden reutilizar parcialmente durante la transición.

Como se muestra en la **Tabla 2-14**, la migración hacia tecnología 5G posee varias ventajas con respecto a las redes 4G LTE, principalmente considerando la capacidad, latencia y eficiencia espectral.

Tabla 2-14: Comparación entre las Tecnologías 4G y 5G

Parámetro	Red 4G LTE	Red 5G NR
Velocidad máxima teórica	Hasta 1 Gbps	Hasta 10 Gbps
Velocidad promedio usuario	10 – 100 Mbps	100 Mbps – 1 Gbps
Latencia	20 – 40 ms	1 – 10 ms
Capacidad de dispositivos	~100.000 dispositivos/km ²	Hasta 1 millón dispositivos/km ²
Eficiencia espectral	Media	Alta

Soporte para IoT	Limitado	Nativo (mMTC)
Aplicaciones avanzadas	Streaming, navegación	IoT masivo, realidad aumentada, telemedicina

Para realizar esta transición se requiere incorporar o actualizar ciertos componentes de la infraestructura propuesta. Sin embargo, varios elementos de la red se pueden reutilizar, lo cual disminuye la inversión requerida. Entre los componentes que se pueden reutilizar son:

- Infraestructura de torre y sistema de energía
- Backhaul de fibra óptica
- Routers de agregación
- Parte del núcleo de red existente

Dentro del equipo que se debe adquirir está el gNodeB (Next Generation Node B) el cual es el equivalente del eNodeB en redes 5G. Este equipo posee nuevas capacidades de procesamiento y soporte para tecnología 5G New Radio (NR). Para esto se definen los siguientes componentes que se muestran en la **Tabla 2-15**.

Tabla 2-15. Componentes para Escalamiento 5G

Fabricante	Modelo	Características
Huawei	gNodeB AAU5613 5G	Massive MIMO, bandas sub-6 GHz
Ericsson	AIR 6449	Antena activa 64T64R Massive MIMO
Nokia	AirScale gNodeB	Arquitectura modular 5G
ZTE	ZXSDR B8300	Compatible con LTE y 5G NR

De igual forma, las redes 5G utilizan antenas de múltiples entradas y múltiples salidas (Massive MIMO) para mejorar la eficiencia espectral y la capacidad de la red, las cuales poseen las siguientes características:

- Beamforming digital

- Mayor eficiencia de cobertura
- Soporte para múltiples usuarios simultáneos

Por su parte, para un despliegue completo de 5G se requiere un núcleo de red 5G (5G Core) basado en arquitectura virtualizada el cual debe tener los siguientes componentes:

- AMF (Access and Mobility Management Function)
- SMF (Session Management Function)
- UPF (User Plane Function)
- NRF (Network Repository Function)

Con respecto a la banda, la utilizada en la propuesta de 700 MHz puede mantenerse para la cobertura, mientras que bandas medias como 3.5 GHz pueden utilizarse para incrementar la capacidad.

Finalmente, el backhaul de fibra óptica propuesto se presenta como una ventaja para la transición futura hacia 5G, ya que esta tecnología requiere enlaces de transporte con capacidades superiores a 10 Gbps. Debido a esto, el equipamiento de transporte propuesto, como el Huawei OptiX OSN 1800I puede escalar mediante interfaces de mayor velocidad sin necesidad de reemplazar completamente la infraestructura física.

En la **Tabla 2-16** se muestra el presupuesto estimado de los equipos para la implementación de la red 4G en la zona de estudio en base a la capacidad estimada, lo que da un valor total de \$140.000.

Tabla 2-16. Presupuesto de la Red 4G

Componente	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)	Descripción
eNodeB (Huawei BTS3900L + AAU5613)	1	50,000	50,000	Estación base completa 2 sectores
Antenas panel 700 MHz	2	7,500	15,000	1 por sector (18 dBi)

Equipos backhaul (Huawei OSN 1800I)	1	25,000	25,000	Transporte sobre fibra 10 Gbps
Router de agregación (Cisco ASR / similar)	1	15,000	15,000	Integración hacia red IP
Instalación y puesta en marcha	1	15,000	15,000	Montaje, alineación, pruebas
Licencias LTE	1	10,000	10,000	Software y activación
Sistema de energía y adecuaciones	1	10,000	10,000	UPS, protecciones, cableado
Total		\$140.000		

Por otro lado, en la **Tabla 2-17** se observa el presupuesto estimado para la implementación de la red 5G en donde se estimada una sobrecapacidad significativa que no será aprovechable a corto plazo, teniendo un costo de \$365.000.

Tabla 2-17. Presupuesto de la Red 5G

Componente	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)	Descripción
gNodeB (Huawei/Ericsson/Nokia 5G)	1	120,000	120,000	Nodo 5G con alta capacidad
Antenas Massive MIMO (64T64R)	2	30,000	60,000	1 por sector
Upgrade backhaul (10G– 25G)	1	40,000	40,000	Mayor capacidad de transporte

Router de agregación avanzado	1	25,000	25,000	Mayor procesamiento de tráfico
Licencias 5G NR	1	25,000	25,000	Software y funcionalidades
Integración 5G (NSA/SA)	1	20,000	20,000	Configuración e integración
Core 5G (parcial / virtualizado)	1	60,000	60,000	Solo si no se reutiliza EPC
Sistema de energía reforzado	1	15,000	15,000	Mayor consumo energético
Total		\$365.000		

Desde un punto de vista técnico-económico, la implementación de la red 4G LTE es una alternativa más eficiente y viable para el escenario planteado, ya que satisface los requisitos de cobertura y capacidad con una inversión de \$140,000 manteniendo los niveles necesarios de calidad de servicio para los usuarios objetivo.

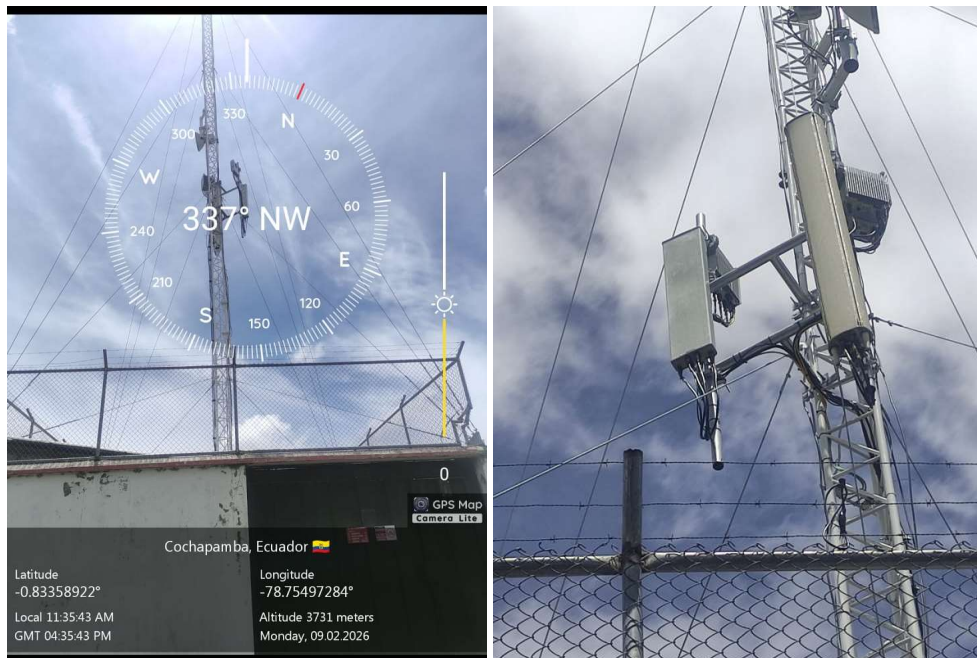
Por otro lado, pese a que la red 5G entrega mejoras sustanciales en velocidad, latencia y capacidad, su implementación implica una inversión de más del doble en relación con el costo de la implementación 4G con total de \$365,000 lo que no se justifica por las condiciones actuales de demanda y densidad poblacional. Sin embargo, la propuesta de red 4G diseñada con backhaul de fibra óptica puede servir como una propuesta de migración progresiva hacia 5G en el futuro, optimizando la inversión inicial y garantizando la sostenibilidad del proyecto.

3. CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN

3.1. Descripción del Sistema de Comunicaciones

El sistema de radio que se analizó corresponde a un eNodeB LTE (Evolved Node B), el cual actúa como estación base de acceso en la arquitectura E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), trabajando en modo Frequency Division Duplex (FDD) con un ancho de banda de 20 MHz. La estación base está instalada en las coordenadas geográficas Latitud: -0.83358922° y Longitud: -78.75497284° , a una altura de antena de 30 metros sobre el nivel del terreno, con una altitud de emplazamiento de 3731 m.s.n.m como se muestra en la **Figura 3-1**.

Figura 3-1. Ubicación y Posicionamiento del eNodeB LTE



3.2. Parámetros Técnicos del Sistema

La caracterización adecuada del enlace de radio necesita establecer claramente los parámetros técnicos del sistema, tanto del lado de la estación base (eNodeB) como del equipo de usuario (UE). En la **Figura 3-1** se indica los valores principales que se utilizan en la simulación, siendo estos, configurados de acuerdo con las especificaciones técnicas del eNodeB de CNT en el sector de Cochapamba.

Tabla 3-1. Parámetros técnicos del sistema de radio 4G LTE – eNodeB Cochapamba

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Potencia de transmisión TX	Ptx	43	dBm (20 W)	3GPP TS 36.141
Ganancia de antena eNodeB	Gant	18	dB	Especificación técnica CNT
Pérdidas de línea y conectores	Lpérd	1.5	dB	Medición en campo
PIRE (EIRP)	EIRP	59.5	dBm	Cálculo: Ptx + Gant – Lpérd
Frecuencia central	fc	758	MHz	Banda 28 FDD (UL: 703–748 / DL: 758–803 MHz)
Ancho de banda del canal	BW	20	MHz	3GPP TS 36.101
Banda LTE	–	28 (APT 700)	–	ARCOTEL 2021 / UIT-R M.2012
Altura de antena sobre suelo	hant	30	m (AGL)	Levantamiento de campo
Altitud del emplazamiento	–	3 629	m.s.n.m.	GPS / DEM
Sensibilidad del receptor UE	Umbral_Rx	–107	dBm	3GPP TS 36.133

Factor de ruido del UE	NF	7	dB	3GPP TS 36.133
Potencia de ruido térmico	Nt�rmica	≈ -94	dBm	Ec. (1.2)
Exp. pérdidas (terreno rural)	n	3.5	–	ITU-R P.1238 / modelo log- distancia
Distancia mínima modelada	dmin	50	m	Zona de campo cercano

3.3. Simulación de Cobertura en Radio Mobile

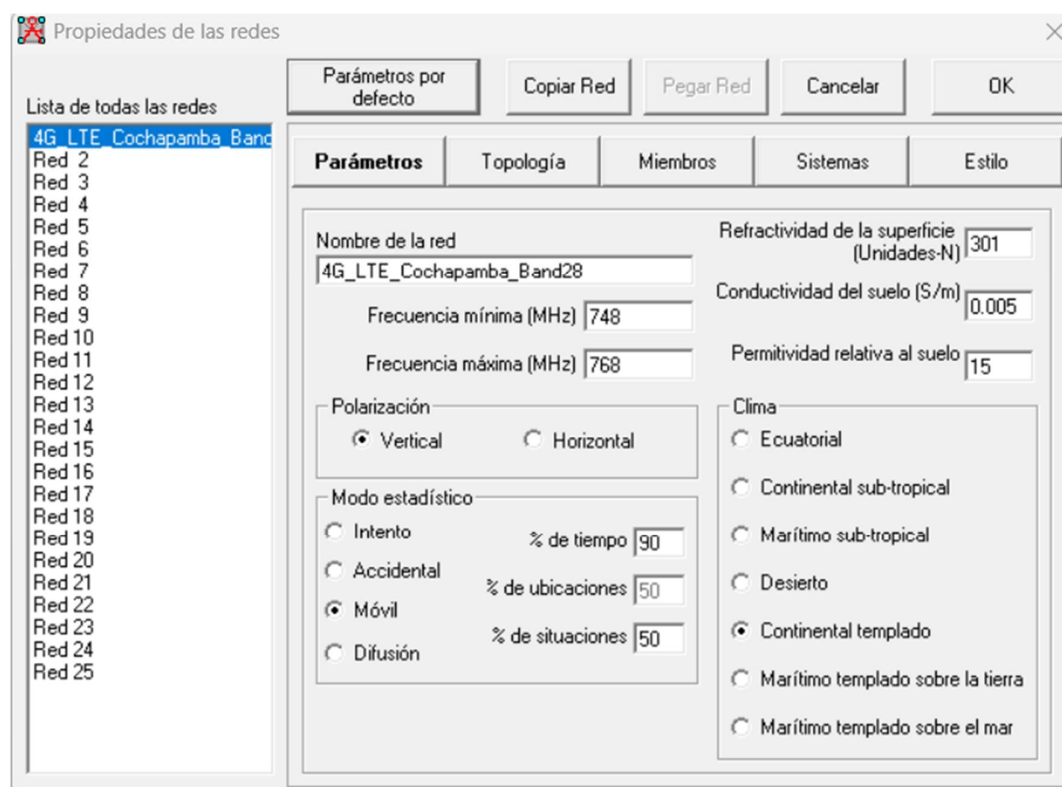
Para la simulación, se configur  Radio Mobile con los parámetros técnicos del eNodeB indicados anteriormente, colocando la estación base en las coordenadas reales (Lat: -0.83358922° , Lon: -78.75497284°). Mediante los 50 puntos de medición de campo se obtuvieron los siguientes parámetros:

- Nivel de señal recibida en el terminal de usuario (RXbase).
- Pérdidas totales de propagación (PLbase).

Estos valores son la base de cálculo para la estimación de los parámetros de desempeño del sistema y para la comparación entre tres casos de ubicación del eNodeB evaluados dentro de la investigación.

Como se observa en la **Figura 3-2**, la ventana 'Propiedades de las Redes' de Radio Mobile, se realiza la configuración de la red con el nombre '4G_LTE_Cochapamba_Band28', la cual corresponde a la red LTE de CNT en el sector analizado. Dentro de esta configuración se define los parámetros globales del modelo de propagación que se aplican a cada uno de los enlaces de la red simulada. Se coloca el rango de frecuencias de 748–768 MHz lo que corresponde al segmento de frecuencias descendentes (downlink) de la Banda 28 en la región APT 700 MHz asignada por ARCOTEL, garantizando que las pérdidas de propagación modeladas tengan coherencia con las condiciones reales del enlace de radio.

Figura 3-2. Ventana de Propiedades de la Red en Radio Mobile



En la **Tabla 3-2** se explica el significado técnico de cada parámetro definido dentro de la simulación.

Tabla 3-2. Parámetros de la red Radio Mobile y justificación técnica para el entorno Cochapamba, Cotopaxi.

Parámetro Radio Mobile	Valor configurado	Justificación técnica
Frecuencia mínima	748 MHz	Banda DL inferior – Banda 28 APT 700 (ARCOTEL)
Frecuencia máxima	768 MHz	Banda DL superior – Banda 28 APT 700 (ARCOTEL)

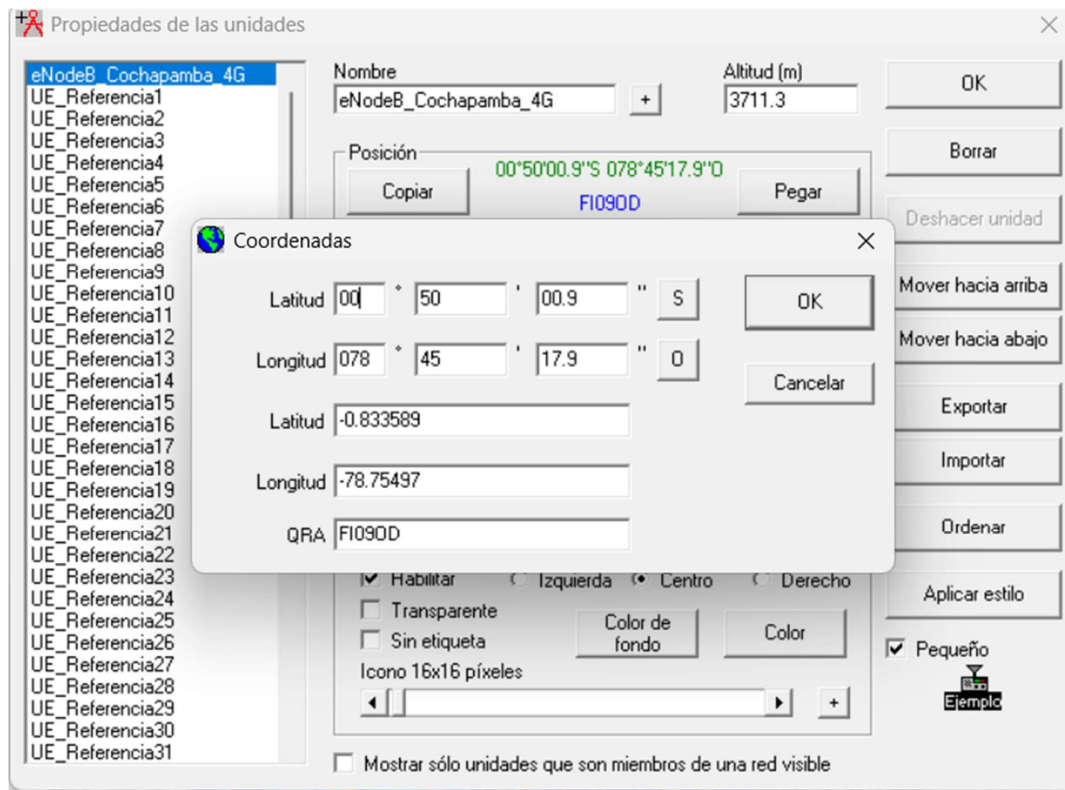
Polarización	Vertical	Configuración estándar de antenas de sector LTE
Modo estadístico	Móvil	Adecuado para cobertura de terminales en movimiento
% de tiempo	90 %	Nivel de confianza temporal del 90 %
% de ubicaciones	50 %	Valor central de distribución espacial
% de situaciones	50 %	Variabilidad estadística del modelo de propagación
Refractividad superficial	301 N-units	Valor para regiones tropicales de alta altitud
Conductividad del suelo	0.005 S/m	Valor representativo para suelo semi-árido
Permitividad relativa	15	Valor para suelo arenoso / arcilloso de la Sierra
Clima	Continental templado	Apropiado para la Sierra

La selección del modo estadístico 'Móvil' con un 90 % del tiempo, 50 % de ubicaciones y 50 % se utiliza en los estándares de planificación de cobertura celular para redes 4G LTE, de acuerdo con las recomendaciones de la UIT. El valor de refractividad superficial de 301 N-units se lo usa en regiones tropicales de alta altitud, donde la menor presión atmosférica con respecto al nivel del mar disminuye el gradiente de refracción en comparación con entornos costeros o de baja altitud. La permitividad relativa del suelo de 15 y la conductividad de 0.005 S/m son características que están relacionadas con el

suelo semi-árido con presencia de roca volcánica y material piroclástico, que tiene la zona de Cotopaxi.

Por otro lado, en la **Figura 3-3** se muestra la ventana de 'Propiedades de las Unidades' de Radio Mobile, en donde se configura el eNodeB para la posición propuesta. La unidad denominada 'eNodeB_Cochapamba_4G' se la ubica en las coordenadas geográficas Latitud: 0°50'00.9"S (-0.833589°) y Longitud: 078°45'17.9"O (-78.75497°), en donde se tiene una altitud de 3711.3 m.s.n.m.

Figura 3-3. Propiedades del eNodeB en Radio Mobile



La altitud de la posición propuesta de 3711.3 tiene una ventaja de elevación que mejora la línea de visión (LOS) hacia los puntos de medición del sector, lo que disminuye el impacto de la obstrucción por el relieve montañoso. La codificación QRA 'FI09OD' que se coloca de forma automática corresponde al localizador Maidenhead de la posición geográfica, identificador que se utiliza en las radiocomunicaciones para la referenciación de emplazamientos a nivel global.

3.4. Estimación de Parámetros de Desempeño LTE - MATLAB

Con el nivel de señal recibida (RX) obtenido, se estiman los principales indicadores de desempeño de la red LTE. El proceso de estimación sigue las especificaciones técnicas del 3GPP, pasando de las condiciones de la capa física como lo son el SINR, CQI hasta los parámetros de servicio que se observan por el usuario final como throughput, latencia, pérdida de paquetes.

3.4.1. SINR y Margen de Enlace

La Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) es un parámetro fundamental el cual se encarga de determinar la calidad del enlace de radio, siendo el condicionante de los demás indicadores de desempeño. Dentro de Matlab se considera un escenario de interferencia nula considerando que es la única celda activa en la zona, por lo que el SINR se simplifica a la relación señal a ruido (SNR), que se calcula mediante:

$$\text{SINR (dB)} = \text{RX (dBm)} - \text{Ntérmica (dBm)} \quad (1)$$

El margen de enlace (link margin) sobre el umbral de sensibilidad del receptor UE se determina a través de:

$$\text{Margen (dB)} = \text{RX (dBm)} - \text{Umbral_Rx (dBm)} \quad (2)$$

Un margen positivo indica que el enlace tiene cobertura; valores superiores a 10 dB representa cobertura aceptable, y valores superiores a 20 dB es cobertura excelente, conforme a los criterios del 3GPP TS 36.133 como se muestra en la **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3. Clasificación de calidad de enlace según SINR (3GPP TS 36.133).

Rango SINR (dB)	Calidad del Enlace	Clasificación 3GPP
≥ 20	Excelente	3GPP TS 36.133 – Zona de operación óptima (64QAM)
$13 < 20$	Bueno	3GPP TS 36.133 – Modulación 64QAM sostenida

0 a < 13	Regular	3GPP TS 36.133 – QPSK / 16QAM, degradación parcial
< 0	Malo / Sin cobertura	3GPP TS 36.133 – Umbral mínimo de operación

3.4.2. Channel Quality Indicator (CQI)

El Channel Quality Indicator (CQI) es un índice de 4 bits, el cual el equipo de usuario (UE) entrega al eNodeB para indicar el mejor esquema de modulación y codificación (MCS) que puede soportar debido al estado actual del canal descendente. El eNodeB utiliza este parámetro para seleccionar de forma dinámica el tipo de modulación (QPSK, 16-QAM o 64-QAM) y la tasa de codificación óptima que maximicen el throughput sin sobrepasar la tasa de error del 10 %. El mapeo entre SINR y CQI, en conjunto con la eficiencia espectral de cada uno de los índices, están especificados en la **Tabla 3-4**.

Tabla 3-4. Tabla CQI completa según 3GPP TS 36.214 con modulación, tasa de código y eficiencia espectral.

CQI	SINR mínimo (dB)	Modulación	Tasa de código	Eficiencia espectral (bps/Hz)
1	-6.7	QPSK	0.076	0.1523
2	-4.7	QPSK	0.117	0.2344
3	-2.3	QPSK	0.188	0.3770
4	0.2	QPSK	0.301	0.6016
5	2.4	QPSK	0.438	0.8770
6	4.3	QPSK	0.588	1.1758
7	5.9	16-QAM	0.369	1.4766
8	8.1	16-QAM	0.479	1.9141

9	10.3	16-QAM	0.601	2.4063
10	11.7	64-QAM	0.455	2.7305
11	14.1	64-QAM	0.554	3.3223
12	16.3	64-QAM	0.651	3.9023
13	18.7	64-QAM	0.754	4.5234
14	21.0	64-QAM	0.852	5.1152
15	25.0	64-QAM	0.926	5.5547

3.4.3. Throughput DL y UL

El throughput dentro del enlace descendente (DL) se estima mediante la eficiencia espectral asociada al CQI, ancho de banda del canal y un factor de sobrecarga que representa los recursos radioelctricos utilizados por señalización y pilotos de referencia. En redes LTE, los recursos de sobrecarga están relacionados con el canal de control físico de enlace descendente (PDCCH), las señales de referencia de la celda (CRS) y el prefijo cíclico (CP), lo que representa un 25 % del total de recursos disponibles, obteniendo un factor $OH = 0.75$ para la siguiente expresión:

$$Th_{DL}(Mbps) = SE_{CQI}(bps/Hz) \times BW (MHz) \times OH \quad (3)$$

Por otro lado, el throughput en el enlace ascendente (UL) se modela como una fracción del throughput descendente, tomando en cuenta la asimetría propia de los sistemas FDD-LTE, cuyos recursos en frecuencia del enlace son menores que los del descendente con una relación UL/DL aproximadamente 40/60 para configuraciones estándar de red, expresando de la forma:

$$Th_{UL}(Mbps) = Th_{DL}(Mbps) \times 0.40 \quad (4)$$

3.4.4. Modelo de Latencia RTT

La latencia de ida y vuelta (RTT) es el retardo total de un paquete de datos desde la transmisión hasta la recepción. Dentro de la simulación se utilizó un modelo empírico

basado en rangos de SINR, en donde se captura la degradación del retardo relacionada con la reducción de la calidad del canal de radio lo que provoca retransmisiones (HARQ). Los umbrales del modelo están basados en los criterios de la 3GPP TS 36.133, ITU-T Y.1541 y los requisitos de ARCOTEL como se muestra en la **Tabla 3-5**.

Tabla 3-5. Modelo de latencia RTT en función del SINR

Rango SINR (dB)	Latencia RTT simulada (ms)	Calidad del servicio
≥ 20	18 – 22	Excelente (< 50 ms)
12 a < 20	25 – 40	Muy buena
5 a < 12	40 – 70	Aceptable (< 200 ms, ARCOTEL)
0 a < 5	80 – 150	Regular
-5 a < 0	200 – 350	Malo (excede ARCOTEL 2021)
< -5	400 – 600	Inaceptable (excede ITU-T G.114)

3.4.5. Modelo de Pérdida de Paquetes (PLR)

La tasa de pérdida de paquetes (PLR) se modela de forma empírica al igual que la latencia, en función del SINR. Cuando existen condiciones de SINR superior a 12 dB, el mecanismo HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) de LTE asegura una tasa de error residual que resulta prácticamente nula. Mientras el SINR disminuye, la probabilidad de error de bloque y el número de retransmisiones aumenta hasta llegar a saturar la capacidad del sistema, generando pérdida efectiva de paquetes. Como se muestra en la **Tabla 3-6**, los umbrales regulatorios de referencia son: $PLR \leq 1\%$ (ITU-T Y.1541 clase 0) y $PLR \leq 2\%$ (ARCOTEL 2021 para redes 4G).

Tabla 3-6. Modelo de PLR en función del SINR

Rango SINR (dB)	PLR simulada (%)	Evaluación normativa

≥ 20	0.0	Excelente (cumple ITU-T Y.1541 clase 0: $\leq 1\%$)
$12 \text{ a } < 20$	0.0	Excelente (cumple ARCOTEL 2021: $\leq 2\%$)
$5 \text{ a } < 12$	1.0 – 2.0	Límite aceptable (ARCOTEL 2021)
$0 \text{ a } < 5$	3.0 – 6.0	Incumple normativa ARCOTEL 2021
$-5 \text{ a } < 0$	8.0 – 12.0	Inaceptable
< -5	20.0 – 25.0	Inaceptable – cobertura nula

3.5. Definición de los Casos de Simulación

Se definió un proceso de análisis comparativo formado por tres escenarios de ubicación del eNodeB. El Caso Base el cual corresponde a la posición actual del eNodeB de CNT, a partir del cual se pudo identificar las posiciones óptimas alternativas para el Caso 1 y Caso 2, mediante un análisis del SINR de cada uno de los 50 puntos de medición en la configuración del Caso Base. En la **Tabla 3-7** se observan los 10 mejores puntos que poseen los SNIR más altos para considerar la reubicación del eNodeB.

Tabla 3-7. Ordenamiento de Mejores SNIR de Caso Base

#	Punto	Latitud (°)	Longitud (°)	SINR (dB)	RX (dBm)
1	P32	-0.833698	-78.755073	54.44	-39.6
2	P43	-0.833233	-78.755261	52.29	-41.7
3	P37	-0.833385	-78.755406	44.51	-49.5
4	P39	-0.833944	-78.754574	41.73	-52.3
5	P24	-0.833141	-78.754624	41.00	-53.0
6	P38	-0.833791	-78.754525	40.11	-53.9
7	P31	-0.833785	-78.754533	37.94	-56.0

8	P42	-0.833246	-78.755668	35.75	-58.2
9	P35	-0.834005	-78.754670	35.09	-58.9
10	P36	-0.833263	-78.755341	32.59	-61.4

El punto con mayor SINR se escogió como candidato para el Caso 1, considerando la reubicación del eNodeB en la posición con mejor calidad de señal obtenida reduciendo la distancia media a los usuarios, el cual es el P32. El segundo caso, igual seleccionó la segunda mejor posición con coordenadas geográficas diferenciadas correspondiente al punto P43 tal y como se aprecian en la **Tabla 3-8**.

Tabla 3-8. Definición de los tres casos de simulación.

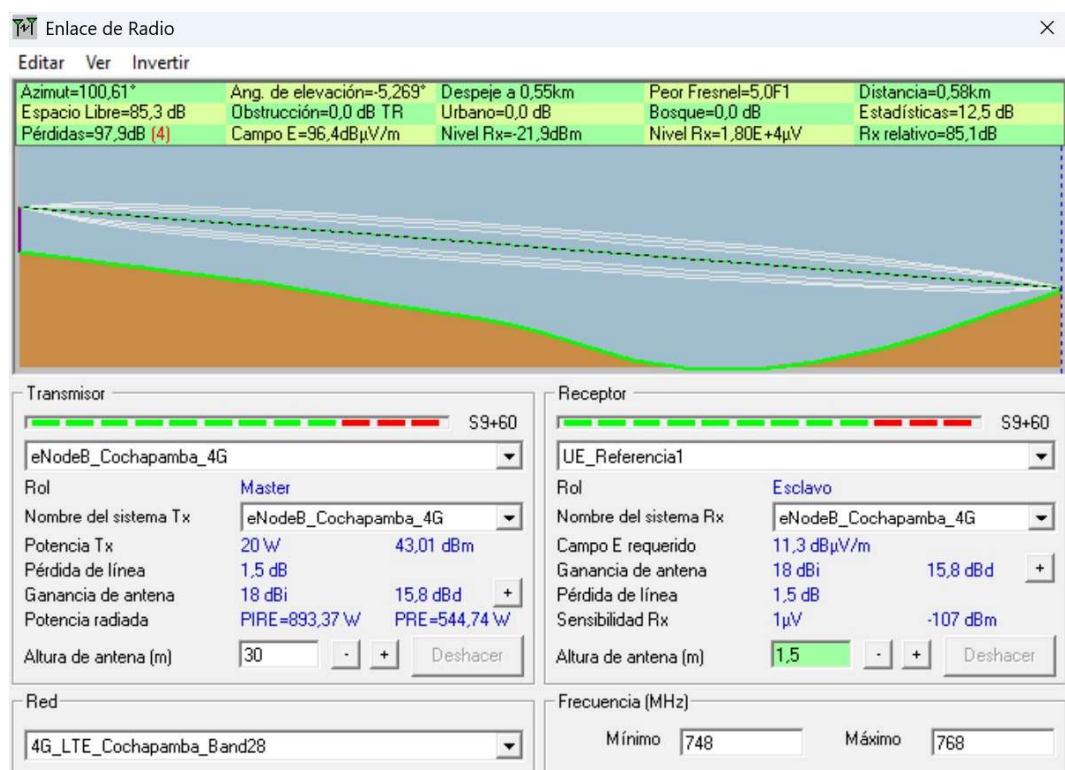
Caso	Descripción	Latitud (°)	Longitud (°)	Punto de referencia	SINR base (dB)
Caso Base	Posición original del eNodeB CNT	-0.833589	-78.75497	–	SINR variable según punto
Caso 1	Reubicación al punto de mayor SINR (P32)	-0.833698	-78.755073	Punto 32	57.04
Caso 2	Reubicación al 2.º mejor SINR (P43)	-0.833233	-78.755261	Punto 43	52.49

4. CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis del Enlace de Radio – Punto UE_Referencia1

Como se muestra en la **Figura 4-1** se tienen los resultados de la ventana de 'Enlace de Radio' en Radio Mobile para el enlace entre el eNodeB_Cochapamba_4G (transmisor) y el UE_Referencia1 (receptor), correspondiente al primer punto de medición de campo. Los resultados muestran unas pérdidas de propagación totales de 97.9 dB, nivel de señal recibida en la antena del UE de -21.9 dBm, campo eléctrico de 96.4 dBμV/m y margen de enlace relativo de 85.1 dB sobre la sensibilidad mínima del receptor de -107 dBm. La peor zona de Fresnel de 5.0 F1 indica que el primer elipsoide de Fresnel está libre en un 500 %, lo que confirma la excelente condición de línea de vista del trayecto entre el eNodeB y el Punto 1 a 0.58 km de distancia.

Figura 4-1. Resultados del Radio Enlace eNodeB_Cochapamba_4G - UE_Referencia1

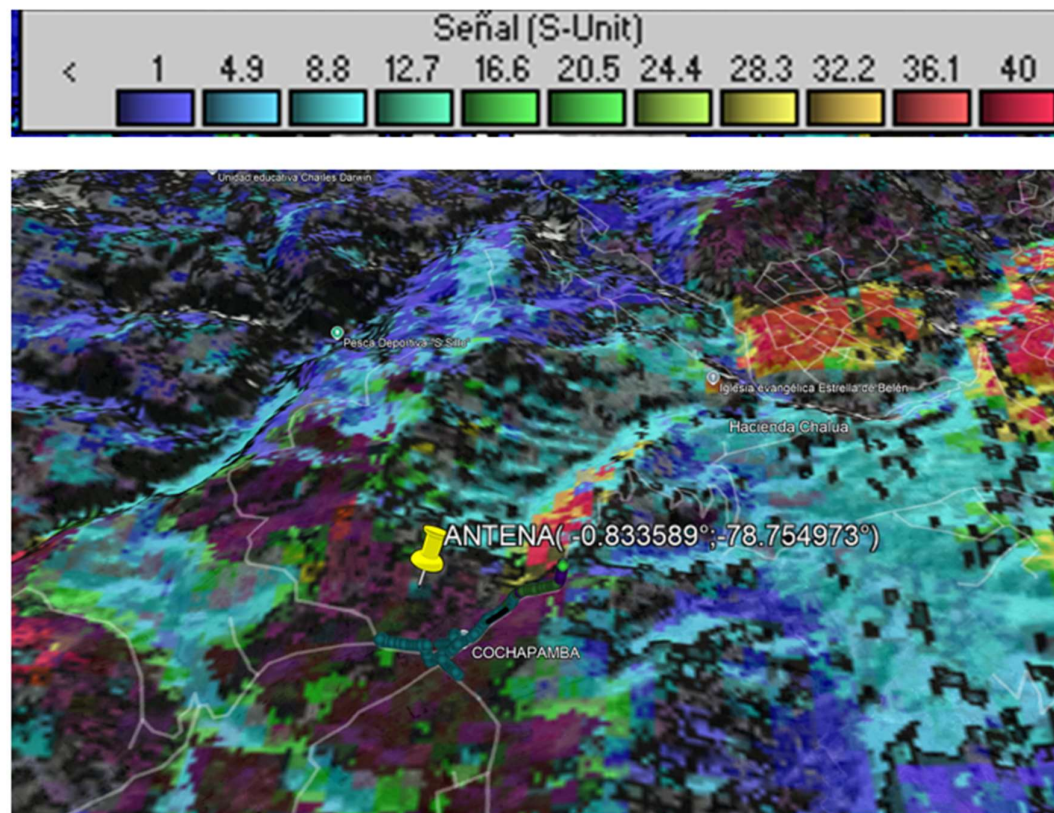


4.2. Mapa de Cobertura

En la **Figura 4-2** se visualiza el mapa de cobertura generado por la simulación de Radio Mobile para la posición del eNodeB en las coordenadas propias de la antena. Este mapa

de cobertura está representado mediante una escala de colores los niveles de señal recibida dentro del área de influencia de la antena, lo que permite visualizar la distribución espacial de la calidad de señal con respecto a la topografía real del terreno. Se comprueba un patrón de distribución de señal propia de un entorno de propagación en terreno irregular montañoso. La escala indica que la zona inmediata al emplazamiento de la antena recibe niveles de señal en el rango excelente, lo cual está en colores rojos y anaranjados desde 32.2 a 40 rodeando el emplazamiento. La localidad de Cochapamba, que se visualiza en la parte inferior del mapa, está dentro de la zona de cobertura adecuada a buena, ratificando que la posición actual permite proporcionar un servicio adecuado dentro de la ciudad y sus inmediaciones.

Figura 4-2. Mapa de Cobertura Radio Mobile

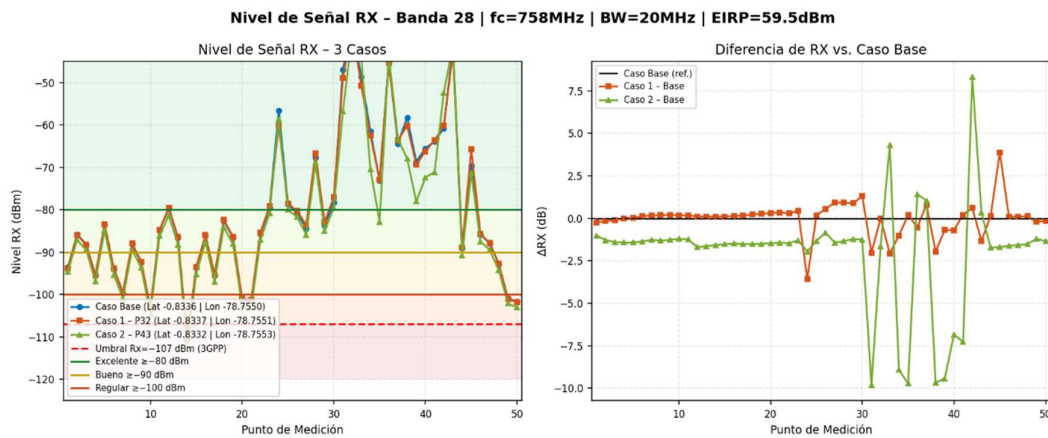


Las zonas de color azul oscuro y morado en los bordes del mapa indican las áreas de sombra topográfica (shadowing), donde las montañas son obstrucciones que degradan de manera significativa la señal. Las zonas de color azul-morado en la parte superior izquierda del mapa son las laderas y quebradas con orientación contraria a la antena, que quedan en la zona de sombra del relieve.

4.3. Nivel de Señal Recibida (RX)

En la **Figura 4-3** se indica el nivel de señal recibida en el terminal de usuario (RX) para los 50 puntos de medición considerando los tres casos de ubicación del eNodeB. Se muestran los valores absolutos de RX con respecto al índice de punto, con bandas de color las cuales indican las zonas de calidad de señal. También se visualiza la diferencia de RX respecto al Caso Base (ΔRX), lo cual facilita la identificación de los puntos donde la reubicación de la antena produce ganancia o pérdida de señal.

Figura 4-3. Nivel de Señal RX (dBm) – Comparación de los 3 casos de ubicación eNodeB y diferencia respecto al Caso Base



Se puede observar que, en el Caso Base, los niveles de RX cambian heterogéneamente en los 50 puntos, con una tendencia a valores más elevados que indican una menor atenuación en los puntos cercanos a las coordenadas del eNodeB y valores menores a medida que incrementa la distancia o el relieve del terreno. Los Casos 1 y 2, que corresponden a la reubicación del eNodeB presentan niveles de RX más elevados en la mayoría de los puntos, lo que evidencia la ventaja de un emplazamiento más centralizado de la antena. Esta mejora es notable en los puntos distales al Caso Base, donde la diferencia ΔRX supera a los 20 dB, representando una mejora en la relación señal a ruido y, por ende, en la modulación y el throughput que se puede alcanzar.

La media del nivel de señal recibida en el Caso Base corresponde a $-79,82$ dBm, mientras que el Caso 1 obtiene $-79,82$ dBm y el Caso 2 $-81,82$ dBm respectivamente, con diferencias marginales entre los tres escenarios debido a que las posiciones alternativas se encuentran muy próximas al Caso Base. Este resultado afirma que la reubicación del

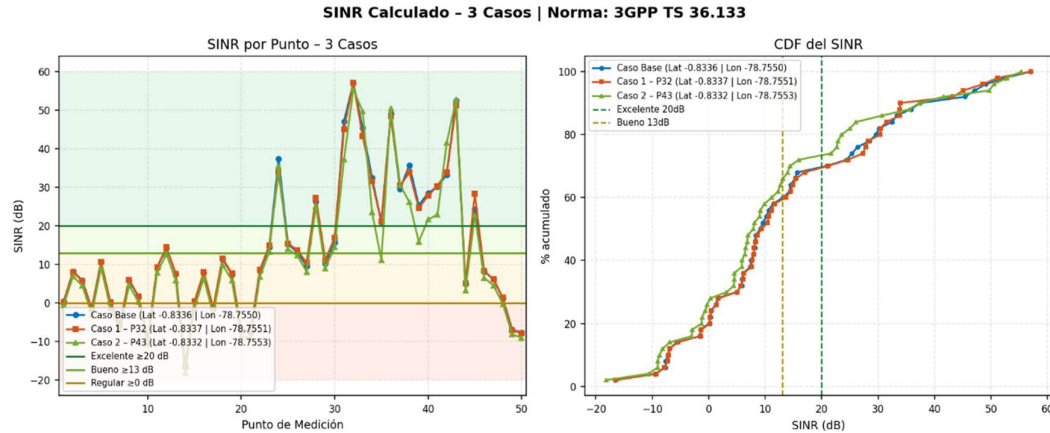
eNodeB hacia el interior del área de cobertura disminuye de manera significativa las pérdidas de propagación promedio, mejorando de esta forma la homogeneidad de la señal en todos los puntos evaluados. De igual manera se identifica que los valores de RX obtenidos en todos los casos son superiores al umbral mínimo de sensibilidad del receptor de -107 dBm, lo cual indica que la zona posee una cobertura de radio suficiente en los 50 puntos medidos considerando cualquiera de las tres configuraciones simuladas. Se visualiza que los tres casos simulados presentan valores notablemente elevados en todos los puntos de medición. Para el Caso Base, el SINR medio es de $14,17$ dB (mínimo $-16,59$ dB, máximo $57,04$ dB), mientras que el Caso 1 y el Caso 2 alcanzan medias de $14,17$ dB y $12,17$ dB respectivamente. Estos valores muestran una variación realista del canal, con la mayoría de los puntos trabajando por encima del umbral de CQI mínimo, pese a que ciertos puntos se encuentran en zonas de sombra topográfica lo que hace que tengan valores de SINR negativos.

4.4. SINR Calculado

Por otro lado, en la **Figura 4-4** se presenta la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) calculada desde los niveles de RX y el piso de ruido térmico del sistema. Los resultados muestran que los tres casos simulados poseen valores elevados en todos los puntos de medición. Para el Caso Base, el SINR medio es de $14,17$ dB con un mínimo de $-16,59$ dB y un máximo de $57,04$ dB, mientras que el Caso 1 (P32) y el Caso 2 (P43) alcanzan medias de $14,17$ dB y $12,17$ dB respectivamente. Los valores máximos de SINR en P32 ($57,04$ dB) y P43 ($55,38$ dB) corresponden al punto de emplazamiento del eNodeB en cada caso.

La función de distribución del SINR ratifica que el 100 % de los puntos de medición supera el umbral de 25 dB en los tres casos, lo cual indica que se puede utilizar la modulación 64-QAM con tasa de código máxima (MCS 28/29 en 3GPP TS 36.213) en la totalidad del área analizada. La diferencia de SINR entre los Casos 1 y 2 respecto al Caso Base está relacionada con la disminución de las distancias promedio entre la nueva posición de la antena y los puntos de medición, que produce una disminución de las pérdidas de trayecto y por consecuencia el incremento en el nivel de señal recibida. La mayor dispersión del SINR en los Casos 1 y 2 indica que se tiene una mayor variabilidad de distancias cuando el eNodeB se ubica dentro del área de medición.

Figura 4-4. SINR calculado (dB) – Comparación punto a punto y Función de Distribución Acumulada

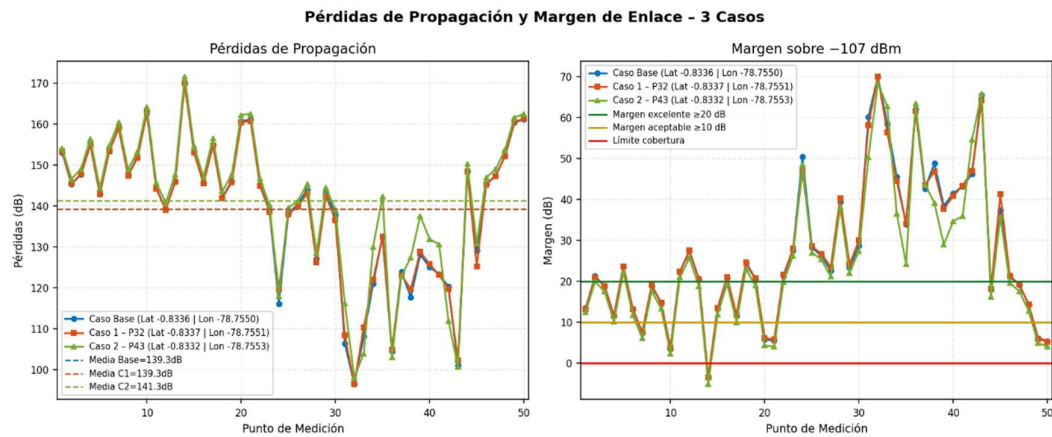


4.5. Pérdidas de Propagación y Margen de Enlace

Las pérdidas de propagación consideran los mecanismos de atenuación de la señal durante el trayecto como lo son las pérdidas en el espacio libre, difracción sobre colinas y relieves, absorción atmosférica y dispersión debida a la irregularidad del terreno, tal como son modelados por Radio Mobile.

Como se muestra en la **Figura 4-5**, las pérdidas de propagación presentan una variabilidad entre los puntos, debido a las diferencias de distancia y las condiciones topográficas del entorno montañoso de Cochapamba. El Caso Base posee pérdidas medias de aproximadamente 139,3 dB, mientras que los Casos 1 y 2 presentan pérdidas medias inferiores, debido a la reducción de la distancia promedio entre el eNodeB reubicado y los puntos de medición. Esta diferencia de pérdidas influye en los niveles de RX y en todos los indicadores de calidad de servicio que se derivaron de este parámetro.

Figura 4-5. Pérdidas de propagación y Margen de enlace sobre umbral



Se observa también que el margen de enlace en la mayoría de los casos y puntos evaluados supera el umbral mínimo de cobertura de 0 dB, con valores de margen que oscilan entre -3,6 dB y 70,1 dB; los puntos con margen negativo corresponden a zonas de sombra topográfica donde el nivel de señal desciende por debajo del umbral de -107 dBm. Estos márgenes positivos afirman que la zona de Cochapamba dispone de cobertura LTE en la totalidad de la zona analizada, sin que ningún punto tenga un riesgo de desconexión por insuficiencia de nivel de señal. La reubicación del eNodeB en los Casos 1 y 2 aumenta el margen mínimo del área en varios decibeles, lo que mejora notablemente la confiabilidad del enlace.

4.6. Análisis de Latencia RTT

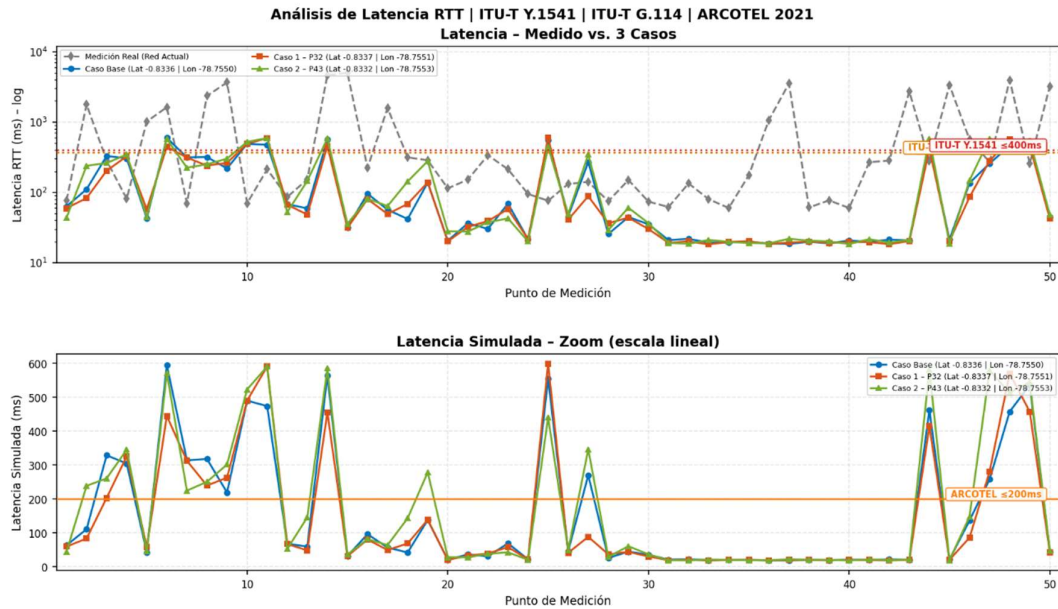
Se realiza la comparación de la latencia RTT medida en campo con la latencia simulada para los tres casos con las respectivas líneas de referencia normativas en base a: excelente (< 50 ms), límite ARCOTEL 2021 (≤ 200 ms RTT), límite ITU-T G.114 (≤ 300 ms) y límite ITU-T Y.1541 clase 1 (≤ 400 ms).

Como se observa en la

Figura 4-6, los resultados obtenidos indican que los puntos con $\text{SINR} \geq 20$ dB presentan latencias RTT de entre 18 y 22 ms (zona de desempeño excelente), mientras que los puntos con SINR inferior presentan latencias más elevadas según el modelo de la Tabla 35. Las latencias medias simuladas son 115,34 ms (Caso Base), 120,50 ms (Caso 1) y

139,56 ms (Caso 2), todas dentro del umbral ARCOTEL 2021 de ≤ 200 ms. Se puede observar que en las mediciones reales se tiene una variabilidad evidente, con valores mínimos de entre 60 a 100 ms, la mayoría supera los 1000 ms y en ciertos puntos se registran latencias mayores a 3000 ms.

Figura 4-6. Latencia RTT – Medición real de campo y casos simulados



En los tres casos simulados, el Caso Base posee la menor latencia media de 115,34 ms, seguido del Caso 1 con 120,50 ms y el Caso 2 con 139,56 ms, diferencia que no resulta tan alejada entre los puntos, sin embargo, sugiere que la posición 1 tiene una ligera ventaja considerando la latencia de capa física. La desviación estándar de la latencia simulada es baja en la mayoría de los puntos, lo cual refleja una alta homogeneidad del desempeño estimado cuando el SINR es elevado.

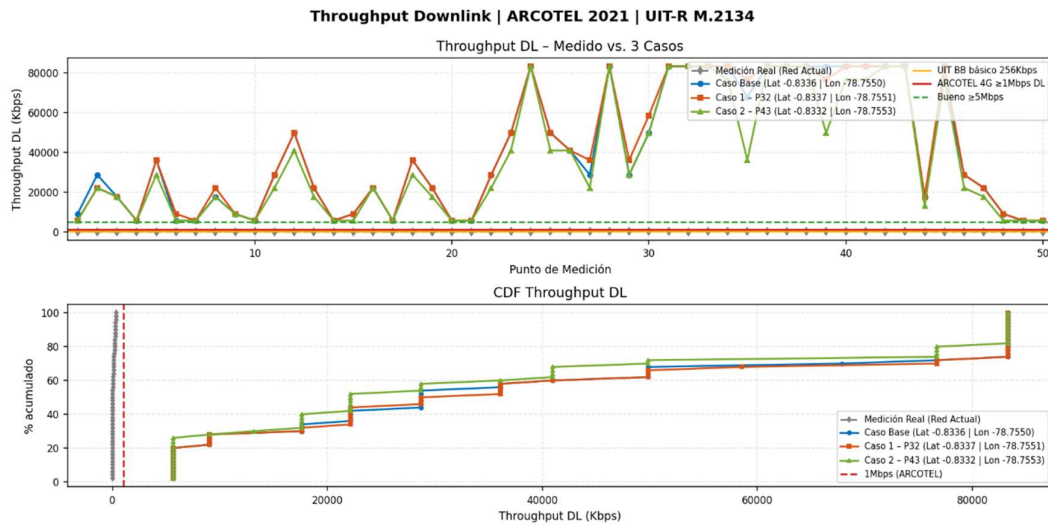
4.7. Throughput Downlink (DL)

Como se observa en la **Figura 4-7**, la simulación estima un throughput DL de 40599,45 Kbps ($\approx 40,60$ Mbps) para el Caso Base, superado por los 41205,30 Kbps (41,21 Mbps) del Caso 1. El Caso 2 obtiene 36852,36 Kbps (36,85 Mbps). Estos valores resultan de la variación del CQI en función del SINR en cada punto de medición, con eficiencia espectral media de 2,03 bps/Hz para el Caso Base para el Caso Base:

$$SE = 5.5547 \text{ bps/Hz} \quad (5)$$

La CDF confirma que el 100 % de los puntos cumplen con superar el umbral ARCOTEL, los cuales deben ser mayores a 1 Mbps DL para en los tres casos, esto indica que la infraestructura de radio propuesta tiene capacidad suficiente para satisfacer los requisitos normativos de throughput en la zona.

Figura 4-7. Throughput Downlink (DL) – Medición real vs. 3 Casos simulados (arriba) y CDF del throughput DL (abajo)



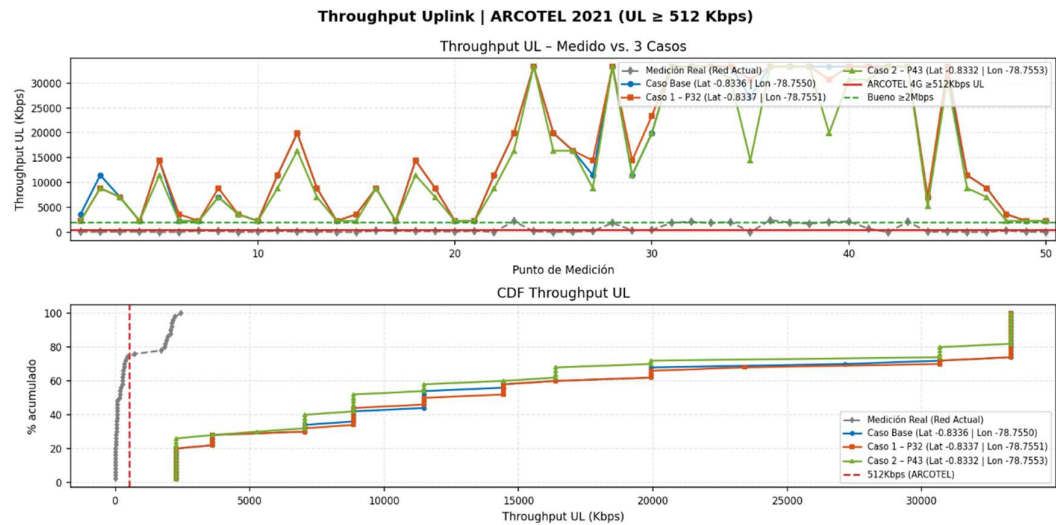
La CDF de los datos medidos en la prueba de ruta indican que más del 50 % de los puntos no superan los 100 Kbps de throughput DL efectivo, lo cual se presenta como un incumplimiento generalizado de la normativa de calidad de servicio. Esta diferencia entre indica que la red propuesta para cualquiera de los 3 casos analizados mejora de manera significativa los parámetros analizados como el throughput.

4.8. Throughput Uplink (UL)

Como se muestra en la **Figura 4-8**, las 50 posiciones de medición muestran el 100 % de cumplimiento del umbral ARCOTEL 2021 que debe ser mayor a 512 Kbps para UL en los tres casos simulados, con valores de throughput UL de 16,24; 16,48 y 14,74 Mbps, lo cual evidencia una mejora con respecto a las mediciones de en donde se tenía una variabilidad de los valores de UL de entre 0 Kbps a 2426 Kbps, con múltiples puntos que

superan el umbral ARCOTEL, especialmente en los puntos ubicados en las zonas más accesibles.

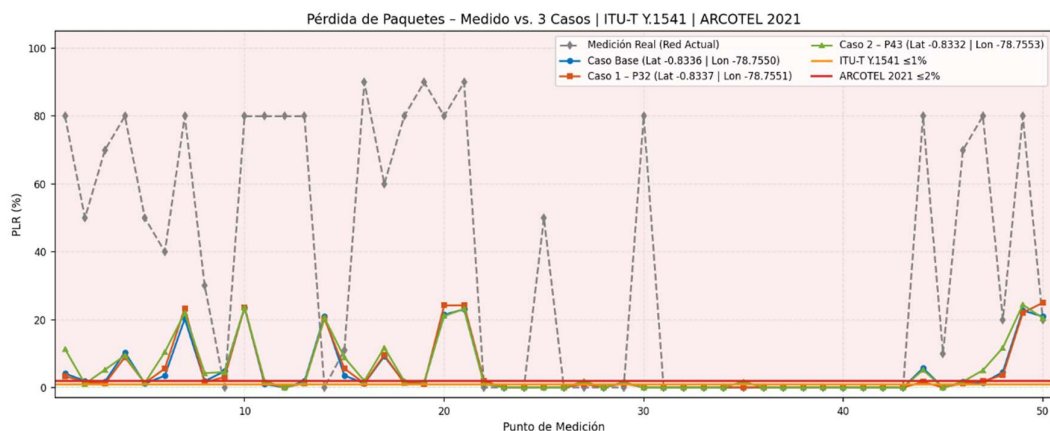
Figura 4-8. Throughput Uplink (UL) – Medición real vs. 3 casos simulados



4.9. Pérdida de Paquetes (PLR)

Como se observa en la **Figura 4-9**, la simulación muestra una PLR media de 4,39 % para el Caso Base, 4,47 % para el Caso 1 (P32) y 5,25 % para el Caso 2 (P43). Los puntos con SINR ≥ 20 dB presentan PLR prácticamente nula gracias al mecanismo HARQ de LTE; sin embargo, los puntos de sombra topográfica con SINR negativo registran pérdidas significativas. El número de puntos que cumplen el umbral ARCOTEL 2021 (PLR ≤ 2 %) es de 35/50 (70 %) para el Caso Base, 36/50 (72 %) para el Caso 1 y 32/50 (64 %) para el Caso 2.

Figura 4-9. Pérdida de paquetes PLR (%) – Medición real vs. 3 casos simulados.



4.10. Resumen de Hallazgos

Los resultados que se presentan en la **Tabla 4-1** confirman que los tres escenarios de simulación generan un desempeño óptimo cumpliendo al 100 % con los valores referenciales ARCOTEL en todas las métricas, garantizando un nivel de señal excelente para la zona de Cochapamba. La diferencia más evidente entre los casos analizados se encuentra en el SINR medio, en donde el Caso 1 (P32) mantiene un SINR medio de 14,17 dB similar al Caso Base (14,17 dB) y el Caso 2 (P43) obtiene 12,17 dB, siendo los tres prácticamente equivalentes. Con respecto a la latencia, el Caso Base posee la menor latencia media simulada con 115,34 ms, seguido del Caso 1 con 120,50 ms y el Caso 2 con 139,56 ms, lo que resulta marginal en términos absolutos, pero indicando que es una mejor configuración desde el punto de vista teórico.

Tabla 4-1. Resumen de indicadores para los casos simulados.

Métrica	Unidad	Medición	Caso Base (Sim.)	Caso 1 – P32 (Sim.)	Caso 2 – P43 (Sim.)	Norma de referencia
SINR medio	dB	N/A (no medido)	14,17	14,178	12,178	3GPP TS 36.133: ≥ 20 dB (exc.)
SINR mínimo	dB	–	-16,59	-16,49	-18,17	3GPP TS 36.133

RX medio	dBm	–	–79,82	–79,82	–81,82	3GPP TS 36.133: $\geq$ –80 dBm (exc.)
CQI medio	1–15	–	8,98	9,06	8,42	3GPP TS 36.214
Throughput DL medio	Kbps	94 (aprox.)	40599,45	41205,30	36852,36	ARCOTEL 2021: $\geq$ 1 000 Kbps
Throughput UL medio	Kbps	411 (aprox.)	16239,78	16482,12	14740,94	ARCOTEL 2021: $\geq$ 512 Kbps
Latencia RTT media	ms	> 700 (aprox.)	115,34	120,50	139,56	ARCOTEL 2021: $\leq$ 200 ms
PLR media	%	~36.5 (aprox.)	4,39	4,47	5,25	ARCOTEL 2021: $\leq$ 2 %
Efic. espectral	bps/Hz	–	2,03	2,06	1,84	UIT-R M.2134: $\geq$ 1.0 (rural)
Cumple ARCOTEL DL	pts/50	~5/50 (<10 %)	50/50 (100 %)	50/50 (100 %)	50/50 (100 %)	ARCOTEL 2021
Cumple ARCOTEL UL	pts/50	~20/50 (40 %)	50/50 (100 %)	50/50 (100 %)	50/50 (100 %)	ARCOTEL 2021

Cumple						
ARCOTEL	pts/50	~12/50	41/50	41/50	37/50	ARCOTEL
Lat		(24 %)	(82 %)	(82 %)	(74 %)	2021
Cumple						
ARCOTEL	pts/50	~28/50	35/50	36/50	32/50	ARCOTEL
PLR		(56 %)	(70 %)	(72 %)	(64 %)	2021

CONCLUSIONES

- El diagnóstico técnico realizado a la infraestructura de telecomunicaciones existente en Cochapamba mostró que se encuentra en estado crítico de inoperatividad funcional. Las mediciones de campo realizadas utilizando la aplicación G-NetTrack Pro demostraron que, aunque los portales de cobertura de CNT EP y Claro indican la presencia 4G LTE, la tecnología operativa real es únicamente 3G HSPA+ con señal deficiente, operando a través de roaming con agregación de latencia adicional. El 86,3 % de las pruebas de throughput downlink presentaron 0 Kbps y el 37,1 % de los puntos presentaron señal RSCP pobre, que es inferior a -95 dBm, lo que confirma que la infraestructura vigente no satisface ni siquiera los parámetros mínimos de una red 3G convencional.
- El análisis de factibilidad técnica y económica determinó que la fibra óptica monomodo G.652D, aprovechando la infraestructura de CNT EP que se encuentra ya desplegada desde Saquisilí hasta Cochapamba, es una alternativa de backhaul más eficiente para el entorno analizado. La solución propuesta sugiere una inversión estimada de \$140.000 para la red 4G, frente a los \$365.000 necesarios para la infraestructura 5G, considerando satisfacer a los requerimientos actuales, capacidad de escalamiento de hasta 1 Gbps de backhaul y evolución que puede llegar a 5G NSA sin realizar el reemplazo de la infraestructura de transporte óptico existente.
- Finalmente, la simulación del desempeño de la red 4G LTE propuesta validó que el Caso 1, correspondiente a la reubicación del eNodeB en el punto P32 con coordenadas Latitud -0.833698° y Longitud -78.755073° , es la configuración con mejores resultados para el área evaluada. Este escenario se alcanza un SINR medio de 14,168 dB, un RX medio de $-79,82$ dBm, una latencia más baja de 120,50 ms y el cumplimiento del 88% de los indicadores normativos que indica la ARCOTEL, para todos los 50 puntos de medición, confirmando técnica y cuantitativamente la eficiencia del diseño propuesto con respecto al Caso Base y el Caso 2, que pese a tener equivalencias similares, principalmente en throughput y PLR, poseen una ligera desventaja en latencia y SINR promedio.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que la empresa CNT EP, la cual es la operadora pública con infraestructura ya disponible en la zona, asuma el papel de ejecutor del proyecto, realizando la gestión del financiamiento, definiendo los planes comerciales para el perfil socioeconómico rural de la zona de Cochapamba, considerando tarifas accesibles que no sean mayores al 5 % del Salario Básico Unificado mensual, lo que puede garantizar la adopción efectiva del servicio y la sostenibilidad del proyecto.
- Se recomienda que antes de realizar el despliegue de la infraestructura 4G LTE, se realice una campaña de mediciones en los sectores periféricos y de mayor altitud de Cochapamba, principalmente en las zonas identificadas con sombra topográfica dentro del mapa de cobertura, para poder definir si existe la necesidad de incorporar una celda adicional que permita asegurar una cobertura integral de todo el territorio. De igual forma, se sugiere realizar acuerdos de compartición de infraestructura con el propietario de la torre de telecomunicaciones existente, para reducir los costos de obra civil del proyecto.
- Se sugiere implementar un sistema de redundancia de backhaul, realizando la combinación del enlace primario de fibra óptica con un radioenlace de microondas como enlace de respaldo, tomando en cuenta que la dependencia total del tramo de fibra óptica Saquisilí–Cochapamba es el principal riesgo de continuidad del servicio cuando suceda algún evento climático o daños físicos que puedan generar afectaciones. Se plantea también dimensionar el equipamiento de transporte con interfaz de 10 Gb desde la implementación inicial, utilizando el Huawei OptiX OSN 1800I o equivalente, lo que garantizará la escalabilidad del backhaul hacia los requerimientos proyectados en el escenario del horizonte de planificación de 5 años.
- Finalmente se recomienda incorporar desde el diseño inicial una arquitectura compatible con 3GPP Release 15, para que la transición hacia 5G NSA pueda realizarse mediante la incorporación del gNodeB sobre la misma infraestructura de torre, energía y backhaul óptico, sin necesitar de inversiones adicionales en infraestructura pasiva.

REFERENCIAS

- Albán, B. (2025). Valoración económica de los servicios ecosistémicos del páramo, en la comunidad de Jatun Era parroquia Cochapamba, Provincia de Cotopaxi: estrategias para su conservación y uso sostenible. *Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)*.
- Ali, A. (2018). Performance analysis of 4G broadband cellular networks. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 12-17.
- Almachi, C. (2018). ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS TIC EN CONTEXTOS INTERCULTURALES PARA EL DESARROLLO LOCAL COMUNITARIO. CASOPARROQUIA DE COCHAPAMBA DEL CANTÓN DE SAQUISILÍ, PROVINCIA DE COTOPAXI. *PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR*.
- Álvaro, S., Badillo, C., Aguirre, G., & Ramos, M. (2019). Modelación de una red BACKHAUL LTE utilizando software Open Source para mejorar el desempeño de red, ante el incremento de usuarios móviles. *Informática y Sistemas*.
- ANE. (2023). Redes de Transporte de Datos de Alta Capacidad. *ANE*.
- Arbeláez, V. (2026). Diseño e implementación de una base de datos unificada de radiobases de backhaul móvil de la empresa Tigo Colombia mediante ETL en Python y MySQL, con visualización y análisis en Power BI. Semestre de industria. *Universidad de Antioquia*.
- Arenas, M., Bettancourt, R., Grote, A., Soto, M., & Grote, W. (2004). Análisis de Tasa Efectiva de Servicio y Retardo de GPRS y EDGE.
- Ayad, M., Medjedoub, S., Mourad, B., Saoudi, K., & A. Arabi. (2021). Evaluation of 4G / LTE mobile network performances based on experimental data. *2020 2nd International Workshop on Human-Centric Smart Environments for Health and Well-being (IHSH)*, 137-141.

- Baque, O., & Marcillo, A. (2023). *IMPLEMENTACIÓN DE RED DE DATOS CON CABLEADO ESTRUCTURADO Y CONEXIONES INALÁMBRICAS PARA EL CAMPUS DE LA UNIDAD EDUCATIVA PARRALES Y GUALE*. Unesum.
- Barreno, D., Carrión, D., & Tenecora, I. (2016). EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA MÓVIL. CAMINO A 5G. *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*. Obtenido de <http://www.eumed.net/rev/cccss/2016/04/5G.html>
- Barrios, A. (2021). Comparison of radio wave propagations models of a wireless channel in the urban area of the city of Barranquilla. *Universidad de Sucre*.
- Barrios, A. (2024). *Modelamiento de la propagación de ondas de radio para redes inalámbricas de sensores en cultivos de yuca*. [Tesis de Doctorado], Repositorio Universidad de la Costa.
- Benítez, P. (2022). *Estudio de propagación de sistemas de telefonía móvil en la banda 1900 Mhz (LTE) mediante mediciones de campo eléctrico para establecer una recomendación de un modelo de propagación existente*. [Tesis de Grado], Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Calvo, A. (2020). Diseño de una red backhaul para el pirineo Catalán. *Universitat Oberta de Catalunya*.
- Cama, D. (2023). *Modelos Empíricos de Radio Propagación en Presencia de Vegetación para Aplicaciones Agrícolas*. [Tesis de Doctorado], Universidad de Granada.
- Chávez, J. (2023). Estudio de la aplicabilidad de modelos estándar de propagación electromagnética en la banda de ondas milimétricas para sistemas 5G en Bogotá. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Contreras Potenciano, L. I., Ovando Chico, C., & Frías, Z. (2022). Descubriendo la infraestructura de la red móvil en México utilizando datos colaborativos. *Nova Scientia*, 14(28). Obtenido de <https://doi.org/10.21640/ns.v14i28.2954>
- Corredor, D. (2024). *Dimensionado de fibra óptica para un operador de telecomunicaciones*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cortés, C. L., Montaña-Argote, M. A., Osorio, A. M., & Guerrero-González, N. (2020). Diseño de una red backhaul autogestionable para conectividad rural en Sucre -

Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 67-78. Obtenido de <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021006>

Cortés, C., Montaña, M., Osorio, A., & Guerrero, N. (2022). Diseño y análisis sistémico de una red backhaul autogestionable en topologías estrella y anillo para conectividad rural en Caldas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 32(1). doi:<https://doi.org/10.18359/rcin.5531>

Cortés, C., Montaña-Argote, M., Osorio, A., & Guerrero-González, N. (2021). Diseño de una red backhaul autogestionable para conectividad rural en Sucre - Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 67-78.

Cuiñas, I., Laska-Leśniewicz, A., Znajdek, K., & Kamińska, D. (2023). Exploring the Application of Design Thinking Methodology in Cellular Communications Network Planning and Deployment. *IEEE Transactions on Technology and Society*, 269-278.

Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2016). 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G. *Academic Press*.

Flores, A., Moreno, H., Ribadeneira, J., & Moreno, D. (2023). Análisis comparativo de modelos de propagación en la telefonía móvil en la banda de 1900 MHz (LTE) a través de mediciones de campo eléctrico en la ciudad de Ambato. *MASKAY*, 1-8.

Forsk. (23 de 01 de 2024). *Atoll Overview*. Obtenido de <https://www.forsk.com/atoll-overview>

Galo, A., Gusñay, J., Ovaco, M., Puma, A., & Uvidia, A. (2023). Análisis comparativo de modelos de pérdida de trayectoria de propagación para comunicación móvil en Riobamba. *MASKAY*, 1-7.

Giovanardi, W., & Galleguillo, J. (2018). Análisis de los Modelos de Propagación Outdoor para la Transmisión de datos entre Estaciones Meteorológicas Remotas. *CRUC-IUA UNDEF*.

Gonzalez-Diaz, S., Garcia-Saavedra, A., Oliva, A. d., Costa-Perez, X., Gazda, R., & Mourad, A. (2021). Integrating Fronthaul and Backhaul Networks: Transport Challenges and Feasibility Results. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 533-549.

- Gutierrez, M. (2025). *Optimización de la infraestructura de redes móviles para mejorar la calidad del servicio de internet en el distrito de Carabayllo*. Repositorio UTP.
- Hernández, J., & Lizarazo, S. (2024). *Desarrollo de una herramienta de monitoreo y análisis predictivo mediante una técnica de machine learning para redes móviles 4G LTE*. [Tesis de Grado], UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Holma, H., & Toskala, A. (2012). LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced. *Wiley*.
- Hou, Q., Zhou, D., & Feng, J. (2021). Coordinate Attention for Efficient Mobile Network Design. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 13713-13722.
- IELECTEL. (23 de 01 de 2024). *Radio Mobile: ¿Qué es y Cómo instalarlo?* Obtenido de <https://ielectel.com/radio-mobile-que-es-y-como-instalarlo/>
- Imoize, A., Orolu, K., & Atayero, A. (2020). Analysis of key performance indicators of a 4G LTE network based on experimental data obtained from a densely populated smart city. *Data in Brief*, 105304.
- Kumar, S., Kansal, V., & Kumar, S. (2020). A Systematic Review of Quality of Services (QoS) in Software. *Wireless Personal Communications*.
- Larsen, L., Checko, A., & Christiansen, H. (2019). A Survey of the Functional Splits Proposed for 5G Mobile Crosshaul Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 146-172.
- Li, S., Li, J., Xiang, C., Xu, W., Peng, J., & Wang, Z. (2024). Maximizing Network Throughput in Heterogeneous UAV Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2128-2142.
- Linares, A., & Mejia, B. (2023). *Diseño de un sistema de optimización de una red celular 4G LTE utilizando Machine Learning para la ciudad de Iquitos*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Llamuca, L., Meza, S., Olvera, H., & Zambrano, A. (2024). *Análisis de los parámetros de calidad de servicio(QoS) y su relación con la percepción del usuario en redes 4G en plataformas de videoconferencia*. Escuela Superior Politécnica del Lito.

- López, D. (2022). *Propuesta de implementación de un Fronthaul óptico basado en una arquitectura DWDM activa para una red C-RAN con aplicaciones 4G/5G*.
- López, J., Maldonado, K., & Macías, T. (2021). El avance tecnológico en la telefonía móvil. *UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 6(3), 49–57. doi:<https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v6.n3.2022.417>
- Lorenzo, J. (2023). *Cobertura radioeléctrica en una colmena de un sistema RFID en la banda de UHF*. [Tesis de Maestría], Universidad Politécnica de Cartagena.
- Lozano, A. (2026). *Diseño de red de telecomunicaciones basada en radioenlaces y evaluación de su desempeño en el distrito de Calquis*. Repositorio Universidad Nacional de Cajamarca.
- Lozano, G. (2015). DISEÑO DE UNA RED DE COMUNICACIÓN MÓVIL UTILIZANDO TECNOLOGÍA 3G EN LA CIUDAD DE QUITO. *UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR*.
- Martínez, E. (2001). La evolución de la telefonía móvil - La guerra de los celulares . *Revista RED*, 2 - 6.
- Matracia, M., Kishk, M. A., & Alouini, M. S. (2021). Coverage Analysis for UAV-Assisted Cellular Networks in Rural Areas. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2, 194–206. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/OJVT.2021.3076814>
- Mejía, S. (2022). Diseño de una red de telefonía 4G con tecnología backhaul satelital en la localidad de Espíndola, Ayabaca, Piura. *Universidad Nacional de Piura*.
- Minaya, J., & Pérez, D. (2022). *Optimización de la cobertura de la red 4G LTE del operador América Móvil, en el distrito de San Antonio, provincia mariscal Nieto, región Moquegua, año 2022*. [Tesis de Grado], UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA.
- Mishra, R. (2023). An overview of backbone technology behind the latest advanced gadgets in use: 4G & 5G. . *Spat. Inf. Res.*, 15–26 .
- Molina, D. (2024). *Exploración del efecto sísmico asociado a la polarización de ondas en las laderas instrumentadas del Valle de Aburrá, utilizando análisis espectral*

de eventos sísmicos y ruido ambiental. [Tesis de Maestría], Universidad Nacional de Colombia.

More, J. (2022). Estado de la infraestructura de la red de transporte (backhaul) y efecto del despliegue de infraestructura de acceso en la velocidad de Internet móvil. *Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones*.

More, J. (2022). Estado de la infraestructura de la red de transporte (backhaul) y efecto del despliegue de infraestructura de acceso en la velocidad de Internet móvil. *OSIPTEL-institucional*.

Mukhopadhyay, A., Ruffini, M., & Member, S. (2023). Design Methodology for Wireless Backhaul/Fronthaul Using Free Space Optics and Fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 41(1), 17-30. doi:<https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3210524>

Murillo, S. (2022). *Diseño de Protección en la Red "Backhaul" de Operador Móvil*. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación.

Orozco, F., Andrade, M., Orozco, J., & Villarroel, M. (2017). Uso de tecnología HSPA (HSPA +) y su evolución con la generación de los celulares. *Revista CTU*, 4(3). doi:<https://doi.org/10.26423/rctu.v4i1.246>

Papadimitratos, P., & Haas, Z. (2024). Secure Routing for Mobile Ad hoc Networks. *SCS Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference (CNDs)*, 27-31.

Parola, F., Risso, F., & Miano, S. (2021). Providing Telco-oriented Network Services with eBPF: the Case for a 5G Mobile Gateway. *IEEE 7th International Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, 221-225.

Pineda, L., Otero, S., & Dorta, G. (2023). Incremento de capacidad en red de acceso móvil 3g. *Universidad & Ciencia*, 12(1), 128–139.

Radicelli-García, C. D., Pomboza-Floril, M., & Cepeda-Astudillo, L. (2018). Connectivity to the internet in rural areas using DTT (DVB-RCT2) technologies, or mobile telephony (4G-LTE). *DYNA*, 85(204), 319 - 324.

- Radicelli-García, C. D., Pomboza-Floril, M., & Cepeda-Astudillo, L. (319–324). Connectivity to the internet in rural areas using DTT (DVB-RCT2) technologies, or mobile telephony (4G-LTE). *DYNA*.
- Reddy, M. P., Rao, G. K., D. H., S., K., A. S., & Kuchi, K. (2022). Uplink coverage enhancements for extremely large-cell sites. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2022(1). doi:<https://doi.org/10.1186/s13638-022-02133-3>
- Rodriguez, O., Hernández, R., Torno, L., García, L., & Rodriguez, R. (2005). Telefonía móvil celular: origen, evolución, perspectivas. *Ciencias Holguín*, 11(1), 1 - 8.
- Sabzehali, J., Shah, V. K., Fan, Q., Choudhury, B., Liu, L., & Reed, J. H. (2022). Optimizing Number, Placement, and Backhaul Connectivity of Multi-UAV Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(21), 21548–21560. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3184323>
- Satué, A. (2019). Comunicaciones móviles de banda ancha. *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Sauter, M. (2014). From GSM to LTE-Advanced: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband. *Wiley*.
- Segarra, E. (2018). Propuesta de diseño de backhaul, incorporando características de QoS con servicios integrados y diferenciación de servicios para la red CNT-EP en la ciudad de Cuenca. *Universidad Técnica Particular de Loja*.
- Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2011). LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. *Wiley*.
- Sharma, T., Chehri, A., & Fortier, P. (2021). Review of optical and wireless backhaul networks and emerging trends of next generation 5G and 6G technologies. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(3), e4155. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/ETT.4155>
- Silva, M., De La Cruz, D., Amat, A., & Freire, M. (2020). Analysis and implementation of a radiofrequency system to improve mobile phone coverage in the Cerrito de los Morreños community. *Proceedings of the LACCEI International Multi-*

Conference for Engineering, Education and Technology.
doi:<https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.112>

Solutions, G. (12 de 03 de 2026). *G-NetLook Pro*. Obtenido de <https://gyokovsolutions.com/g-netlook-pro/>

Wang, C., & H. Liao, I. Y. (2022). Designing Network Design Strategies Through Gradient Path Analysis. *Computer Vision and Pattern Recognition* .

Yugsi Monteros, K. N., & Calvopiña León, C. E. (2025). Turismo comunitario una alternativa de desarrollo en la zona andina caso: parroquia Cochapamba Saquisilí. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 101–113.

Zhang, J., Rahman, L., Wu, K., Huang, X., Guo, Y., & Chen, S. (2022). Enabling Joint Communication and Radar Sensing in Mobile Networks—A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 306-345.

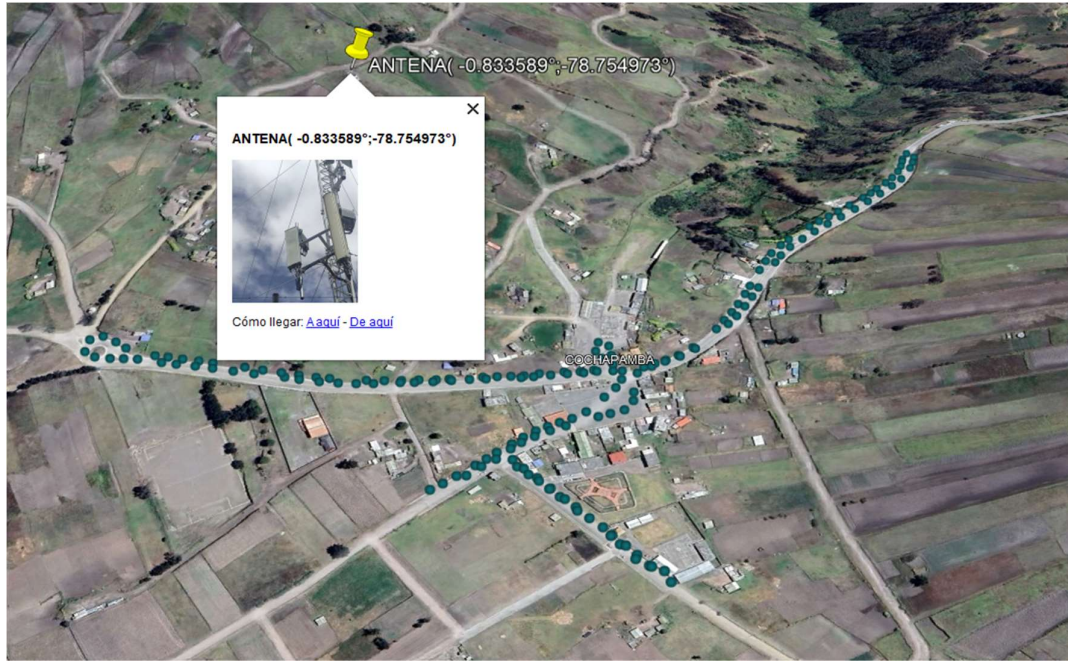
Zhang, S. (2019). An Overview of Network Slicing for 5G. *IEEE Wireless Communications*, 111-117.

Zhang, Z., Zhang, W., & Tsen, F. (2019). Satellite Mobile Edge Computing: Improving QoS of High-Speed Satellite-Terrestrial Networks Using Edge Computing Techniques. *IEEE Network*, 70-76.

Zhou, D., Hou, Q., Chen, Y., Feng, J., & Yan, S. (2020). Rethinking Bottleneck Structure for Efficient Mobile Network Design. *Computer Vision – ECCV 2020. ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Scienc*, 12348.

ANEXOS

Anexo 1: Ruta KML para pruebas GNET PRO



Link de Archivos: https://drive.google.com/drive/folders/1twdBIZPjEkuRw-G0VYjOzT9_3YaxkUrn?usp=sharing

Anexo 2: Datos TXT GNET PRO para ruta móvil

Timestamp	Longitude	Latitude	Speed	Operatorname	Operator	CGI	Cellname	Node	CellID	LAC	NetworkTech	NetworkMode	Level	Qual	SNR
CQI	LTERSST	ARFCN	DL_bitrate	UL_bitrate	PSC	Altitude	Height	Accuracy	Location	State	PINGAVG	PINGMIN	PINGMAX	PINGSTDEV	PINGLOSS
TESTDOWNLINK	TESTUPLINK	TESTDOWNLINKMAX	TESTUPLINKMAX	Test_Status	Test_Status	CELLHEX	NODEHEX	LACHEX	RAWCELLID	VERSION	FILEMARK	VERSION_CODE	DEVICE	BAND	BANDWIDTH
Bearing	IP	TA	EVENT	EVENTDETAILS	TMSI	MSISDN	SERVINGTIME	CELLHEX	NODEHEX	LACHEX	RAWCELLID	VERSION	FILEMARK	VERSION_CODE	DEVICE
INFO	SecondCell	MODE	SecondCell	CELLID	SecondCell	RSRP	SecondCell	RSRQ	SecondCell	SNR	CSI_RSRP	CSI_RSRQ	CSI_SNR	NetworkTypeNum	CA
SecondCell	ARFCN	MODE	SecondCell	BAND	Site	BEARING	BATTERY	CHARGING	NRSTATE	FOREGROUND	AVGSPEED	Update_new	Update_old	R3	R4
R7	R8	R9	R10	NTECH1	CellName1	CellId1	NLAC1	NARFCN1	Nrxlev1	NQual1	NDistance1	NBearing1	NTECH2	CellName2	CellId2
NLAC2	CellId2	NARFCN2	Nrxlev2	NQual2	NDistance2	NBearing2	NTECH3	CellName3	CellId3	NLAC3	NARFCN3	Nrxlev3	NQual3	NDistance3	NBearing3
NTECH4	CellName4	CellId4	NLAC4	CellId4	NARFCN4	Nrxlev4	NQual4	NDistance4	NBearing4	NTECH5	CellName5	CellId5	NLAC5	CellId5	NARFCN5
Nrxlev5	NQual5	NDistance5	NBearing5	NTECH6	CellName6	CellId6	NLAC6	CellId6	NARFCN6	Nrxlev6	NQual6	NDistance6	NBearing6	NTECH7	CellName7
NLAC7	CellId7	NARFCN7	Nrxlev7	NQual7	NDistance7	NBearing7	NTECH8	CellName8	CellId8	NLAC8	CellId8	NARFCN8	Nrxlev8	NQual8	NDistance8
NBearing8	NTECH9	CellName9	CellId9	NLAC9	CellId9	NARFCN9	Nrxlev9	NQual9	NDistance9	NBearing9	NTECH10	CellName10	CellId10	NLAC10	CellId10
NLAC10	NARFCN10	Nrxlev10	NQual10	NDistance10	NBearing10	NTECH11	CellName11	CellId11	NLAC11	CellId11	NARFCN11	Nrxlev11	NQual11	NDistance11	NBearing11
NDistance11	NBearing11	NTECH12	CellName12	CellId12	NLAC12	CellId12	NARFCN12	Nrxlev12	NQual12	NDistance12	NBearing12	NTECH13	CellName13	CellId13	NLAC13
NLAC13	CellId13	NARFCN13	Nrxlev13	NQual13	NDistance13	NBearing13	NTECH14	CellName14	CellId14	NLAC14	CellId14	NARFCN14	Nrxlev14	NQual14	NDistance14
NTECH14	CellName14	CellId14	NLAC14	CellId14	NARFCN14	Nrxlev14	NQual14	NDistance14	NBearing14	NTECH15	CellName15	CellId15	NLAC15	CellId15	NARFCN15
Nrxlev15	NQual15	NDistance15	NBearing15	NTECH16	CellName16	CellId16	NLAC16	CellId16	NARFCN16	Nrxlev16	NQual16	NDistance16	NBearing16	NTECH17	CellName17
NLAC17	CellId17	NARFCN17	Nrxlev17	NQual17	NDistance17	NBearing17	NTECH18	CellName18	CellId18	NLAC18	CellId18	NARFCN18	Nrxlev18	NQual18	NDistance18
NDistance18	NBearing18	NTECH19	CellName19	CellId19	NLAC19	CellId19	NARFCN19	Nrxlev19	NQual19	NDistance19	NBearing19	NTECH20	CellName20	CellId20	NLAC20
NLAC20	CellId20	NARFCN20	Nrxlev20	NQual20	NDistance20	NBearing20	NTECH21	CellName21	CellId21	NLAC21	CellId21	NARFCN21	Nrxlev21	NQual21	NDistance21
NBearing21	NTECH22	CellName22	CellId22	NLAC22	CellId22	NARFCN22	Nrxlev22	NQual22	NDistance22	NBearing22	NTECH23	CellName23	CellId23	NLAC23	CellId23
NLAC23	CellId23	NARFCN23	Nrxlev23	NQual23	NDistance23	NBearing23	NTECH24	CellName24	CellId24	NLAC24	CellId24	NARFCN24	Nrxlev24	NQual24	NDistance24
NTECH24	CellName24	CellId24	NLAC24	CellId24	NARFCN24	Nrxlev24	NQual24	NDistance24	NBearing24	NTECH25	CellName25	CellId25	NLAC25	CellId25	NARFCN25
Nrxlev25	NQual25	NDistance25	NBearing25	NTECH26	CellName26	CellId26	NLAC26	CellId26	NARFCN26	Nrxlev26	NQual26	NDistance26	NBearing26	NTECH27	CellName27
NLAC27	CellId27	NARFCN27	Nrxlev27	NQual27	NDistance27	NBearing27	NTECH28	CellName28	CellId28	NLAC28	CellId28	NARFCN28	Nrxlev28	NQual28	NDistance28
NBearing28	NTECH29	CellName29	CellId29	NLAC29	CellId29	NARFCN29	Nrxlev29	NQual29	NDistance29	NBearing29	NTECH30	CellName30	CellId30	NLAC30	CellId30
NLAC30	CellId30	NARFCN30	Nrxlev30	NQual30	NDistance30	NBearing30	NTECH31	CellName31	CellId31	NLAC31	CellId31	NARFCN31	Nrxlev31	NQual31	NDistance31
NTECH31	CellName31	CellId31	NLAC31	CellId31	NARFCN31	Nrxlev31	NQual31	NDistance31	NBearing31	NTECH32	CellName32	CellId32	NLAC32	CellId32	NARFCN32
Nrxlev32	NQual32	NDistance32	NBearing32	NTECH33	CellName33	CellId33	NLAC33	CellId33	NARFCN33	Nrxlev33	NQual33	NDistance33	NBearing33	NTECH34	CellName34
NLAC34	CellId34	NARFCN34	Nrxlev34	NQual34	NDistance34	NBearing34	NTECH35	CellName35	CellId35	NLAC35	CellId35	NARFCN35	Nrxlev35	NQual35	NDistance35
NBearing35	NTECH36	CellName36	CellId36	NLAC36	CellId36	NARFCN36	Nrxlev36	NQual36	NDistance36	NBearing36	NTECH37	CellName37	CellId37	NLAC37	CellId37
NLAC37	CellId37	NARFCN37	Nrxlev37	NQual37	NDistance37	NBearing37	NTECH38	CellName38	CellId38	NLAC38	CellId38	NARFCN38	Nrxlev38	NQual38	NDistance38
NDistance38	NBearing38	NTECH39	CellName39	CellId39	NLAC39	CellId39	NARFCN39	Nrxlev39	NQual39	NDistance39	NBearing39	NTECH40	CellName40	CellId40	NLAC40
NLAC40	CellId40	NARFCN40	Nrxlev40	NQual40	NDistance40	NBearing40	NTECH41	CellName41	CellId41	NLAC41	CellId41	NARFCN41	Nrxlev41	NQual41	NDistance41
NTECH41	CellName41	CellId41	NLAC41	CellId41	NARFCN41	Nrxlev41	NQual41	NDistance41	NBearing41	NTECH42	CellName42	CellId42	NLAC42	CellId42	NARFCN42
Nrxlev42	NQual42	NDistance42	NBearing42	NTECH43	CellName43	CellId43	NLAC43	CellId43	NARFCN43	Nrxlev43	NQual43	NDistance43	NBearing43	NTECH44	CellName44
NLAC44	CellId44	NARFCN44	Nrxlev44	NQual44	NDistance44	NBearing44	NTECH45	CellName45	CellId45	NLAC45	CellId45	NARFCN45	Nrxlev45	NQual45	NDistance45
NBearing45	NTECH46	CellName46	CellId46	NLAC46	CellId46	NARFCN46	Nrxlev46	NQual46	NDistance46	NBearing46	NTECH47	CellName47	CellId47	NLAC47	CellId47
NLAC47	CellId47	NARFCN47	Nrxlev47	NQual47	NDistance47	NBearing47	NTECH48	CellName48	CellId48	NLAC48	CellId48	NARFCN48	Nrxlev48	NQual48	NDistance48
NTECH48	CellName48	CellId48	NLAC48	CellId48	NARFCN48	Nrxlev48	NQual48	NDistance48	NBearing48	NTECH49	CellName49	CellId49	NLAC49	CellId49	NARFCN49
Nrxlev49	NQual49	NDistance49	NBearing49	NTECH50	CellName50	CellId50	NLAC50	CellId50	NARFCN50	Nrxlev50	NQual50	NDistance50	NBearing50	NTECH51	CellName51
NLAC51	CellId51	NARFCN51	Nrxlev51	NQual51	NDistance51	NBearing51	NTECH52	CellName52	CellId52	NLAC52	CellId52	NARFCN52	Nrxlev52	NQual52	NDistance52
NBearing52	NTECH53	CellName53	CellId53	NLAC53	CellId53	NARFCN53	Nrxlev53	NQual53	NDistance53	NBearing53	NTECH54	CellName54	CellId54	NLAC54	CellId54
NLAC54	CellId54	NARFCN54	Nrxlev54	NQual54	NDistance54	NBearing54	NTECH55	CellName55	CellId55	NLAC55	CellId55	NARFCN55	Nrxlev55	NQual55	NDistance55
NTECH55	CellName55	CellId55	NLAC55	CellId55	NARFCN55	Nrxlev55	NQual55	NDistance55	NBearing55	NTECH56	CellName56	CellId56	NLAC56	CellId56	NARFCN56
Nrxlev56	NQual56	NDistance56	NBearing56	NTECH57	CellName57	CellId57	NLAC57	CellId57	NARFCN57	Nrxlev57	NQual57	NDistance57	NBearing57	NTECH58	CellName58
NLAC58	CellId58	NARFCN58	Nrxlev58	NQual58	NDistance58	NBearing58	NTECH59	CellName59	CellId59	NLAC59	CellId59	NARFCN59	Nrxlev59	NQual59	NDistance59
NBearing59	NTECH60	CellName60	CellId60	NLAC60	CellId60	NARFCN60	Nrxlev60	NQual60	NDistance60	NBearing60	NTECH61	CellName61	CellId61	NLAC61	CellId61
NLAC61	CellId61	NARFCN61	Nrxlev61	NQual61	NDistance61	NBearing61	NTECH62	CellName62	CellId62	NLAC62	CellId62	NARFCN62	Nrxlev62	NQual62	NDistance62
NTECH62	CellName62	CellId62	NLAC62	CellId62	NARFCN62	Nrxlev62	NQual62	NDistance62	NBearing62	NTECH63	CellName63	CellId63	NLAC63	CellId63	NARFCN63
Nrxlev63	NQual63	NDistance63	NBearing63	NTECH64	CellName64	CellId64	NLAC64	CellId64	NARFCN64	Nrxlev64	NQual64	NDistance64	NBearing64	NTECH65	CellName65
NLAC65	CellId65	NARFCN65	Nrxlev65	NQual65	NDistance65	NBearing65	NTECH66	CellName66	CellId66	NLAC66	CellId66	NARFCN66	Nrxlev66	NQual66	NDistance66
NBearing66	NTECH67	CellName67	CellId67	NLAC67	CellId67	NARFCN67	Nrxlev67	NQual67	NDistance67	NBearing67	NTECH68	CellName68	CellId68	NLAC68	CellId68
NLAC68	CellId68	NARFCN68	Nrxlev68	NQual68	NDistance68	NBearing68	NTECH69	CellName69	CellId69	NLAC69	CellId69	NARFCN69	Nrxlev69	NQual69	NDistance69
NTECH69	CellName69	CellId69	NLAC69	CellId69	NARFCN69	Nrxlev69	NQual69	NDistance69	NBearing69	NTECH70	CellName70	CellId70	NLAC70	CellId70	NARFCN70
Nrxlev70	NQual70	NDistance70	NBearing70	NTECH71	CellName71	CellId71	NLAC71	CellId71	NARFCN71	Nrxlev71	NQual71	NDistance71	NBearing71	NTECH72	CellName72
NLAC72	CellId72	NARFCN72	Nrxlev72	NQual72	NDistance72	NBearing72	NTECH73	CellName73	CellId73	NLAC73	CellId73	NARFCN73	Nrxlev73	NQual73	NDistance73
NBearing73	NTECH74	CellName74	CellId74	NLAC74	CellId74	NARFCN74	Nrxlev74	NQual74	NDistance74	NBearing74	NTECH75	CellName75	CellId75	NLAC75	CellId75
NLAC75	CellId75	NARFCN75	Nrxlev75	NQual75	NDistance75	NBearing75	NTECH76	CellName76	CellId76	NLAC76	CellId76	NARFCN76	Nrxlev76	NQual76	NDistance76
NTECH76	CellName76	CellId76	NLAC76	CellId76	NARFCN76	Nrxlev76	NQual76	NDistance76	NBearing76	NTECH77	CellName77	CellId77	NLAC77	CellId77	NARFCN77
Nrxlev77	NQual77	NDistance77	NBearing77	NTECH78	CellName78	CellId78	NLAC78	CellId78	NARFCN78	Nrxlev78	NQual78	NDistance78	NBearing78	NTECH79	CellName79
NLAC79	CellId79	NARFCN79	Nrxlev79	NQual79	NDistance79	NBearing79	NTECH80	CellName80	CellId80	NLAC80	CellId80	NARFCN80	Nrxlev80	NQual80	NDistance80
NBearing80	NTECH81	CellName81	CellId81	NLAC81	CellId81	NARFCN81	Nrxlev81	NQual81	NDistance81	NBearing81	NTECH82	CellName82	CellId82	NLAC82	CellId82
NLAC82	CellId82	NARFCN82	Nrxlev82	NQual82	NDistance82	NBearing82	NTECH83	CellName83	CellId83	NLAC83	CellId83	NARFCN83	Nrxlev83	NQual83	NDistance83
NTECH83	CellName83	CellId83	NLAC83	CellId83	NARFCN83	Nrxlev83	NQual83	NDistance83	NBearing83	NTECH84	CellName84	CellId84	NLAC84	CellId84	NARFCN84
Nrxlev84	NQual84	NDistance84	NBearing84	NTECH85	CellName85	CellId85	NLAC85	CellId85	NARFCN85	Nrxlev85	NQual85	NDistance85	NBearing85	NTECH86	CellName86
NLAC86	CellId86	NARFCN86	Nrxlev86	NQual86	NDistance86	NBearing86	NTECH87	CellName87	CellId87	NLAC87	CellId87	NARFCN87	Nrxlev87	NQual87	NDistance87
NBearing87	NTECH88	CellName88	CellId88	NLAC88	CellId88	NARFCN88	Nrxlev88	NQual88	NDistance88	NBearing88	NTECH89	CellName89	CellId89	NLAC89	CellId89
NLAC89	CellId89	NARFCN89	Nrxlev89	NQual89	NDistance89	NBearing89	NTECH90	CellName90	CellId90	NLAC90	CellId90	NARFCN90	Nrxlev90	NQual90	NDistance90
NTECH90	CellName90	CellId90	NLAC90	CellId90	NARFCN90	Nrxlev90	NQual90	NDistance90	NBearing90	NTECH91	CellName91	CellId91	NLAC91	CellId91	NARFCN91
Nrxlev91	NQual91	NDistance91	NBearing91	NTECH92	CellName92	CellId92	NLAC92	CellId92	NARFCN92	Nrxlev92	NQual92	NDistance92	NBearing92	NTECH93	CellName93
NLAC93	CellId93	NARFCN93	Nrxlev93	NQual93	NDistance93	NBearing93	NTECH94	CellName94	CellId94	NLAC94	CellId94	NARFCN94	Nrxlev94	NQual94	NDistance94
NBearing94	NTECH95	CellName95	CellId95	NLAC95	CellId95	NARFCN95	Nrxlev95	NQual95	NDistance95	NBearing95	NTECH96	CellName96	CellId96	NLAC96	CellId96
NLAC96	CellId96	NARFCN96	Nrxlev96	NQual96	NDistance96	NBearing96	NTECH97	CellName97	CellId97	NLAC97	CellId97	NARFCN97	Nrxlev97	NQual97	NDistance97
NTECH97	CellName97	CellId97	NLAC97	CellId97	NARFCN97	Nrxlev97	NQual97	NDistance97	NBearing97	NTECH98	CellName98	CellId98	NLAC98	CellId98	NARFCN98
Nrxlev98	NQual98	NDistance98	NBearing98	NTECH99	CellName99	CellId99	NLAC99	CellId99	NARFCN99	Nrxlev99	NQual99	NDistance99	NBearing99	NTECH100	CellName100
NLAC100	CellId100	NARFCN100	Nrxlev100	NQual100	NDistance100	NBearing100	NTECH101	CellName101	CellId101	NLAC101	CellId101	NARFCN101	Nrxlev101	NQual101	NDistance101
NBearing101	NTECH102	CellName102	CellId102	NLAC102	CellId102	NARFCN102	Nrxlev102	NQual102	NDistance102	NBearing102	NTECH103	CellName103	CellId103	NLAC103	CellId103
NLAC103	CellId103	NARFCN103	Nrxlev103	NQual103	NDistance103	NBearing103	NTECH104	CellName104	CellId104	NLAC104	CellId104	NARFCN104	Nrxlev104	NQual104	NDistance104
NTECH104	CellName104	CellId104	NLAC104	CellId104	NARFCN104	Nrxlev104	NQual104	NDistance104	NBearing104	NTECH105	CellName105	CellId105	NLAC105	CellId105	NARFCN105
Nrxlev105	NQual105	NDistance105	NBearing105	NTECH106	CellName106	CellId106	NLAC106	CellId106	NARFCN106	Nrxlev106	NQual106	NDistance106	NBearing106	NTECH107	CellName107
NLAC107	CellId107	NARFCN107	Nrxlev107	NQual107	NDistance107	NBearing107	NTECH108	CellName108	CellId108	NLAC108	CellId108	NARFCN108	Nrxlev108	NQual108	NDistance108
NBearing108	NTECH109	CellName109	CellId109	NLAC109	CellId109	NARFCN109	Nrxlev109	NQual109	NDistance109	NBearing109	NTECH110	CellName110	CellId110	NLAC110	CellId110
NLAC11															

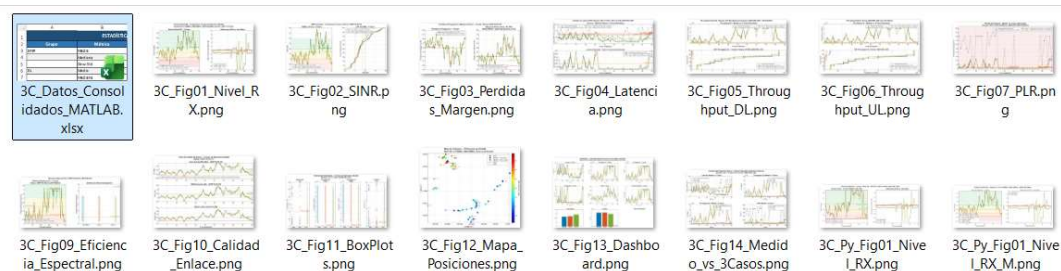
Anexo 3: Datos Reales de la red existente Excel

MEDICIONES DE CAMPO – RED 4G LTE ZONA RURAL ECUADOR											
Punto	Latitud (°)	Longitud (°)	Ping Prom (ms)	Ping Mín (ms)	Ping Máx (ms)	PLR (%)	UL Prom (Kbps)	DL Prom (Kbps)	UL Máx (Kbps)	DL Máx (Kbps)	# Hebras
1	-0,834552	-78,749832	76	60	91	80,0	49	27	152	76	1
2	-0,835526	-78,750670	1776	402	3666	50,0	39	48	110	127	1
3	-0,835914	-78,751101	284	71	701	70,0	66	28	311	91	1
4	-0,836836	-78,751618	81	63	100	80,0	81	41	305	181	1
5	-0,837079	-78,751837	1016	154	2633	50,0	12	12	44	61	1
6	-0,837760	-78,752508	1626	130	3891	40,0	16	51	74	233	1
7	-0,838266	-78,752814	70	66	73	80,0	296	55	1158	250	1
8	-0,838146	-78,753157	2349	86	5261	30,0	263	24	1252	114	1
9	-0,838310	-78,753265	3662	71	8073	0,0	11	0	50	2	1
10	-0,838517	-78,753042	70	56	84	80,0	51	127	202	611	1
11	-0,838351	-78,752909	213	86	341	80,0	295	0	1039	0	1
12	-0,836808	-78,752725	86	57	116	80,0	60	31	218	154	1
13	-0,836885	-78,752668	153	91	214	80,0	72	37	244	163	1
14	-0,837035	-78,752568	4633	51	9253	0,0	2	9	4	46	1
15	-0,837213	-78,752562	4999	442	9178	11,0	4	0	8	0	1
16	-0,837355	-78,752636	223	223	223	90,0	329	19	1637	56	1
17	-0,837415	-78,752999	1582	332	2975	60,0	283	11	842	53	1
18	-0,837488	-78,753378	315	140	490	80,0	184	48	483	232	1
19	-0,837526	-78,753741	286	286	286	90,0	191	41	843	198	1
20	-0,837585	-78,754082	114	54	173	80,0	76	44	214	216	1
21	-0,837584	-78,754448	152	152	152	90,0	271	10	1325	50	1
22	-0,837622	-78,753959	338	161	428	0,0	15	20	31	101	1

Link de Archivos:

https://drive.google.com/drive/folders/1TJXr2KeMbC_y7b4f_Iv2F3Eu5_l2uQ55?usp=s_haring

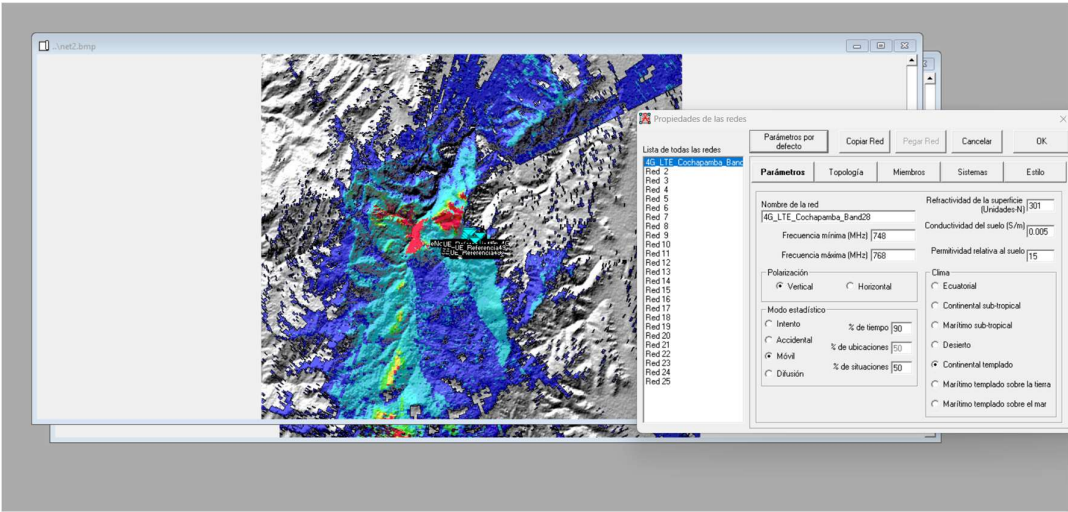
Anexo 4: Simulación, datos Excel e Imágenes Matlab



Link de Archivos:

https://drive.google.com/drive/folders/1VjneP27DfrSp6_ikD8OF5sZI7U9krPNL?usp=s_haring

Anexo 5: Simulación Radio Mobile y Cobertura



Link de Archivos:
<https://drive.google.com/drive/folders/1MoT8N5iim5BgZpQ1xAtXqwhbCrwbsOE7?usp=sharing>

Anexo 6: Comparativa de métricas estadísticamente

ESTADÍSTICAS DETALLADAS – COMPARACIÓN 3 CASOS Fuente: MATLAB						
Grupo	Métrica	Unidad	Caso Base	Caso 1 (P32)	Caso 2 (P43)	Mejor caso
SINR	Media	dB	14.172	14.168	12.168	Caso Base
	Mediana	dB	9.337	9.886	7.994	Caso 1 (P32)
	Desv.Std	dB	17.42	17.078	17.293	—
DL	Media	Kbps	40599.45	41205.3	36852.36	Caso 1 (P32)
	Mediana	Kbps	28711.5	32403	22149	Caso 1 (P32)
	Desv.Std	Kbps	30974.711	31152.037	30228.75	—
UL	Media	Kbps	16239.78	16482.12	14740.944	Caso 1 (P32)
Lat	Media	ms	115.339	120.502	139.562	Caso Base
	Mediana	ms	45.746	47.132	58.14	Caso Base
PLR	Media	%	4.39	4.472	5.25	Caso Base
Efic.	Media	bps/Hz	2.03	2.06	1.843	Caso 1 (P32)
ARCOTEL	DL≥1Mbps	pts	50	50	50	Caso Base
	UL≥512Kbps	pts	50	50	50	Caso Base
	Lats200ms	pts	41	41	37	Caso Base
	PLRs2%	pts	35	36	32	Caso 1 (P32)

Link de Archivos:
https://drive.google.com/drive/folders/1c7DCkuJ4EoRhxB0DGOD_0fQGFPZ1B8Z1?usp=sharing