

**Optimización de redes inalámbricas mediante migración OSPF con tecnología Mikrotik y  
Mimosa**

Jerson Calderón Rondón

Asesor

Juan Carlos Vesga

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD  
Escuela de Ciencias básicas, Tecnología e Ingeniería -ECBTI  
Ingeniería de Telecomunicaciones

2026

## Resumen

El presente proyecto tiene como propósito diseñar, implementar y evaluar una solución basada en el protocolo de enrutamiento OSPF (Open Shortest Path First) sobre tecnología Mikrotik, con el fin de optimizar la eficiencia operativa de la red. Se realizó un diagnóstico detallado de la topología actual, identificando problemas de convergencia, administración, saturación de enlaces Mimososa y ausencia de una arquitectura escalable. Posteriormente, se desarrolló la propuesta técnica empleando metodologías de ingeniería de redes, incluyendo la segmentación lógica, redistribución de rutas y construcción de áreas OSPF. La implementación se ejecutó sobre equipos de la infraestructura existente, validando aspectos como estabilidad del enrutamiento, reducción de latencia y mejora en la respuesta ante fallos. Finalmente, se llevó a cabo la verificación operativa mediante pruebas de conectividad, trazas de enrutamiento y análisis de desempeño, confirmando que la solución propuesta fortalece la disponibilidad, escalabilidad y capacidad de gestión de la red.

***Palabras clave:*** OSPF, enrutamiento, ISP, redes, convergencia

### **Abstract**

This project aims to design, implement, and evaluate a solution based on the Open Shortest Path First (OSPF) routing protocol over Mikrotik technology to optimize network operational efficiency. A detailed diagnosis of the current topology was performed, identifying convergence, management, Mimoso link saturation, and the lack of a scalable architecture. Subsequently, the technical proposal was developed using network engineering methodologies, including logical segmentation, route redistribution, and the creation of OSPF areas. Implementation was carried out on existing infrastructure equipment, validating aspects such as routing stability, latency reduction, and improved fault response. Finally, operational verification was performed through connectivity tests, routing traces, and performance analysis, confirming that the proposed solution strengthens network availability, scalability, and manageability.

***Keywords:*** OSPF, routing, ISP, networks, convergence.

## Listado de Figuras

<b>Figura 1</b>	Secuencia OSPF Mikrotik.....	21
<b>Figura 2</b>	Topología General Red Mara.....	27
<b>Figura 3</b>	Distribución Cliente en Nodos.....	28
<b>Figura 4</b>	Listado Cliente Tipo 1 con Enlace Backup y Principal.....	28
<b>Figura 5</b>	Cientes con una sola ruta.....	29
<b>Figura 6</b>	Topología de Entrega de Servicios Configuración de Túnel EOIP.....	30
<b>Figura 7</b>	Diagrama ECP Flor Ppal, Caminos para Llegar a CCR-YO.....	31
<b>Figura 8</b>	Traceroute de Rutas Asimétricas Detectadas.....	38
<b>Figura 9.</b>	Pruebas Enlace RB-BUI Vs CCR-MO.....	39
<b>Figura 10.</b>	Relación Bandwidth Test entre Troncales.....	40
<b>Figura 11</b>	Análisis de Espectro, Enlace RB-BU-1 vs CCR.-MO.....	42
<b>Figura 12</b>	Comparativo Nivel de Recepción Enlace RB-BU-1 vs CCR.-MO.....	43
<b>Figura 13</b>	Comparativo Niveles CINR, Enlace RB-BU-1 vs CCR.-MO.....	43
<b>Figura 14</b>	Comparativa Parámetros (MCS) Enlace RB-BU-1 vs CCR.-MO.....	44
<b>Figura 15</b>	Comparativa Capacidad Throughput.....	45
<b>Figura 16</b>	Gráfica de Costos Cep-Man-Bck.....	47
<b>Figura 17</b>	Máquina Virtual (Virtual Box).....	49
<b>Figura 18</b>	Simulación Software GNS3.....	50
<b>Figura 19</b>	Pantallazo Mikrotik Guardado Backup.....	52
<b>Figura 20</b>	Pantallazo Winbox, Address List y Bridge.....	52
<b>Figura 21</b>	Pantallazo Configuración OSPF Instance.....	53

<b>Figura 22</b>	Pantallazo Configuración Área ID. ....	54
<b>Figura 23</b>	Pantallazo Mikrotik Interfaces Templates.....	54
<b>Figura 24</b>	Interfaces Template, Asignación Propagación de Red.....	55
<b>Figura 25</b>	Pantallazo Diagrama Conexiones a CCR-MO.....	56
<b>Figura 26</b>	Pantallazo Winbox Estado OSPF.....	57
<b>Figura 27</b>	Pantallazo Aprendizaje rutas por OPSF “DAo”.....	58
<b>Figura 28</b>	Diagrama y Pantallazo desde Cliente a Interconexión Final.....	59
<b>Figura 29</b>	Pantallazo Ping desde Cent-Por-Bck a CCR-GA.....	60
<b>Figura 30</b>	Diagrama Ruta Principal y Backup para ECP-FLOR-PPAL.....	61
<b>Figura 31</b>	Pantallazo Tracert ECP-FLOR-PPAL, Ruta Principal.....	62
<b>Figura 32</b>	Pantallazo Tracert ECP-FLOR-PPAL, Ruta Alterna. ....	63
<b>Figura 33</b>	Comparación Remote Address Interfaz Túnel EOIP.....	65

## Listado de Tablas

<b>Tabla 1</b>	Comparación Bidireccional de Saltos, (Subida y Bajada), Nodo VEN.....	37
<b>Tabla 2</b>	Parámetros de Medición y de Referencia .....	41
<b>Tabla 3.</b>	Resumen Post Comisionamiento. ....	45
<b>Tabla 4</b>	Listado direcciones Loopback RB Nodos.....	47
<b>Tabla 5.</b>	Fases y Resultados del Piloto.....	68
<b>Tabla 6.</b>	Matriz DOFA del rediseño de red MARA.....	69

## Tabla de Contenido

Listado de Figuras.....	4
Listado de Tablas .....	6
1. CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FUNDAMENTOS DEL ESTUDIO .....	11
<b>1.1 Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Planteamiento del Problema .....</b>	<b>12</b>
1.2.1. Contexto Operativo de la Empresa MARA. ....	12
1.2.2. Descripción de la Problemática Técnica. ....	12
1.2.3. Pregunta de Investigación. ....	13
<b>1.3. Justificación .....</b>	<b>14</b>
1.3.1. Justificación Técnica y Operativa. ....	14
1.3.2. Justificación Académica y Social. ....	14
1.3.3. Viabilidad y Sostenibilidad de la Propuesta. ....	15
<b>1.4. Objetivos. ....</b>	<b>15</b>
1.4.1 Objetivo General.....	15
1.4.2. Objetivos Específicos.....	16
<b>1.5. Delimitaciones del Estudio. ....</b>	<b>16</b>
1.5.1. Cobertura Geográfica y Temporal. ....	16
1.5.2. Equipos y Tecnologías Consideradas. ....	16
1.5.3. Alcance y Limitaciones Técnicas. ....	17

2. CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL Y METODOLÓGICO.....	18
<b>2.1. Estado del Arte.....</b>	<b>18</b>
2.1.1. Experiencias Internacionales en Redes Rurales Híbridas. ....	18
2.1.2. Investigaciones Aplicadas en Latinoamérica y Colombia. ....	19
2.1.3. Marco Regulatorio y Normativo Pertinente.....	19
<b>2.2. Marco Teórico. ....</b>	<b>20</b>
2.2.1. Infraestructura de Redes en Zonas Rurales.....	20
2.2.2. Protocolos de Enrutamiento: Estático vs Dinámico.....	20
2.2.3. Protocolo OSPF (Open Shortest Path First).....	21
2.2.4. Tecnologías MikroTik y Radios Mimosa. ....	21
2.2.5. Conceptos Técnicos Complementarios.....	22
<b>2.3. Marco Conceptual.....</b>	<b>24</b>
2.3.1. Glosario de Términos Técnicos. ....	24
<b>2.4. Marco Contextual. ....</b>	<b>25</b>
2.4.1. Localización geográfica de la red MARA. ....	26
2.4.2. Situación Actual de la Infraestructura.....	26
2.4.3. Oportunidades y Desafíos Técnicos Identificados.....	31
<b>2.5. Marco Metodológico. ....</b>	<b>33</b>
2.5.1. Tipo y Enfoque de Investigación. ....	33
2.5.2. Población y Muestra (Infraestructura Objeto de Estudio). ....	33
2.5.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos. ....	34
2.5.4. Técnicas de Análisis y Procesamiento de Datos.....	35

3. CAPÍTULO 3: DESARROLLO, IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA.....	36
<b>3.1. Fase 1: Análisis de la Topología de Red Actual.</b> .....	<b>36</b>
3.1.1. Reconocimiento de .Nodos y Enlaces Activos. ....	36
3.1.2. Inventario de Clientes y requerimientos de Ancho de Banda. ....	36
<b>3.2. Fase 2: Diagnóstico Técnico de la Red.</b> .....	<b>36</b>
3.2.1. Análisis de Configuraciones Estáticas y Rutas Asimétricas.....	36
3.2.2. Pruebas de Conectividad y Rendimiento (Throughput).....	38
3.2.3. Comisionamiento de Radioenlaces Mimosa. ....	40
<b>3.3. Fase 3: Diseño de la Arquitectura OSPF.</b> .....	<b>46</b>
3.3.1. Criterios de Diseño: Áreas, Router ID y Métricas de Costo.....	46
3.3.2. Plan de Direccionamiento con Interfaces Loopback. ....	47
3.3.3. Configuración de Interfaces: Activas vs. Pasivas. ....	48
<b>3.4. Fase 4: Simulación Preliminar en GNS3.</b> .....	<b>49</b>
3.4.1. Configuración del Entorno de Laboratorio Virtual.....	49
3.4.2. Validación de Adyacencias, Propagación de Rutas y Convergencia.....	50
<b>3.5. Fase 5: Implementación Gradual del Protocolo OSPF.</b> .....	<b>51</b>
3.5.1. Estrategia de Migración Progresiva y Respaldo de Configuraciones. ....	51
3.5.2. Pasos de Configuración en Equipos MikroTik. ....	52
3.5.3. Gestión de Riesgos y Continuidad del Servicio.....	55
<b>3.6. Fase 6: Verificación Operativa y Monitoreo.</b> .....	<b>56</b>
3.6.1. Validación de Vecinos OSPF y Tablas de Enrutamiento. ....	56
3.6.2. Pruebas de Conectividad Extremo a Extremo (Ping, Traceroute). ....	58

3.6.3. Pruebas de Conmutación Automática Ante Fallos Simulados. ....	61
<b>3.7. Fase 7: Optimización de Túneles EoIP y Evaluación Final. ....</b>	<b>64</b>
3.7.1. Migración de Extremos de Túnel a Direcciones Loopback.....	64
3.7.2. Impacto en la Estabilidad y Disponibilidad del Servicio.....	65
<b>4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CIERRE DEL ESTUDIO .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1. Análisis de Resultados. ....</b>	<b>66</b>
4.1.1. Resultados Cuantitativos: Métricas de Rendimiento Antes y Después. ....	66
4.1.2. Resultados cualitativos: percepción de estabilidad y gestión .....	67
4.1.3. Consolidado del Piiloto: Fases y Hallazgos Clave. ....	67
<b>4.2. Discusión. ....</b>	<b>68</b>
4.2.1. Contraste con el Marco Teórico y Experiencias Referentes. ....	68
4.2.2. Análisis Estratégico Mediante Matriz DOFA.....	69
4.2.3. Lecciones Aprendidas y Factores Críticos de Éxito. ....	69
<b>4.3. Conclusiones. ....</b>	<b>70</b>
4.3.1. Respuesta a la Pregunta de Investigación. ....	70
4.3.2. Cumplimiento de los Objetivos. ....	70
4.3.3. Contribuciones Técnicas y Académicas del Estudio. ....	71
<b>4.4. Recomendaciones. ....</b>	<b>71</b>
4.4.1. Para la Operación y Mantenimiento de la Red MARA. ....	71
4.4.2. Para la Replicabilidad del Modelo en otros Contextos Rurales.....	72
4.4.3. Para Futuras Líneas de Investigación y Mejora Tecnológica. ....	72
Referencias Bibliográficas .....	74

# 1. CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FUNDAMENTOS DEL ESTUDIO

## 1.1 Introducción

En la actualidad, los proveedores de Internet o datos que operan en zonas rurales enfrentan el reto de ofrecer servicios confiables y de calidad en entornos donde las condiciones geográficas, la disponibilidad de infraestructura y la demanda de conectividad cambian de forma constante. Para lograrlo, es fundamental contar con redes bien estructuradas, con procesos de enrutamiento capaces de adaptarse a variaciones operativas y a la incorporación progresiva de nuevos usuarios y tecnologías.

En este contexto, la empresa MARA ha venido ampliando su cobertura y fortaleciendo su infraestructura con el fin de responder a las necesidades de conectividad de las comunidades que atiende. Este crecimiento exige una revisión técnica que permita orientar la red hacia un modelo más organizado y eficiente, basado en estándares y buenas prácticas de ingeniería de telecomunicaciones.

El presente proyecto se desarrolla con el propósito de analizar la infraestructura existente y proponer el diseño e implementación de una solución de enrutamiento utilizando el protocolo Open Shortest Path First (OSPF), con la intención de construir una arquitectura más ordenada, escalable y alineada con las necesidades operativas de la compañía. Para ello, se contempla un proceso que incluye la revisión del estado actual de la red, el diseño de una estructura de enrutamiento acorde con los requerimientos de la empresa y la validación del funcionamiento mediante pruebas técnicas.

De esta manera, la introducción establece el punto de partida general del estudio y permite comprender la motivación que orienta este trabajo, cuyo objetivo principal es contribuir

al fortalecimiento de la red, mediante una solución técnica aplicable y ajustada a su realidad operativa.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

### ***1.2.1. Contexto Operativo de la Empresa MARA.***

La empresa está involucrada en la provisión de servicios de datos e internet en partes rurales del país de difícil acceso, en especial (Meta y Casanare). Para este propósito, cuenta con una red de nodos de comunicación interconectados a través de enlaces de radio microondas y fibra óptica que permiten la interconexión de canales de última milla conectados a sus diferentes clientes.

### ***1.2.2. Descripción de la Problemática Técnica.***

El aumento de la demanda a nivel de datos, el crecimiento en cantidad de usuarios ha revelado deficiencias en la red. A través de diagnósticos técnicos y pruebas de rendimiento, se ha evidenciado que enlaces troncales entre nodos operan cerca de su límite de capacidad, esta saturación resulta en latencias altas y pérdida de paquetes en horas pico, lo que degrada la calidad de Servicio (QoS).

Este fenómeno se alinea con la tendencia global descrita por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT, 2023), que señala un crecimiento sostenido del tráfico de internet impulsado por la migración masiva a servicios en la nube y el consumo de contenido multimedia de alta resolución.

La red hoy en día está configurada de manera estática, sin que se asignen direcciones de manera dinámica, y no hay protocolos de enrutamiento dinámico ni ningún tipo de prácticas de diseño escalables. Esto ha llevado a una interdependencia operativa, complejidad administrativa y baja resiliencia a fallos o cambios topológicos. Además, no hay segmentación lógica,

configuraciones en modo bridge sin separar dominios de broadcast y todo esto es una topología plana que ralentiza la capa 2.

Bajo este escenario, se requiere una reorganización de la red hacia una arquitectura más sólida, escalable y dinámica. Este cambio se caracteriza por una transición hacia un sistema de enrutamiento dinámico utilizando el protocolo OSPF, aprovechando la infraestructura híbrida y la tecnología ya implementada, (dispositivos Mikrotik), teniendo en cuenta procesos técnicos, como el comisionamiento de enlaces de radio, la automatización de tareas y la estandarización de la configuración, lo que permitirá aumentar el rendimiento y hacer que la red sea más estable.

### ***1.2.3. Pregunta de Investigación.***

¿De qué manera el diseño y la implementación de una arquitectura de red basada en el protocolo de enrutamiento dinámico OSPF, sobre infraestructura MikroTik y Mimosa, permite optimizar la convergencia, estabilidad y escalabilidad de los servicios de datos frente al incremento de tráfico en las zonas rurales atendidas por la empresa MARA.?

### **1.3. Justificación**

#### ***1.3.1. Justificación Técnica y Operativa.***

Desde el punto de vista técnico, las malas prácticas de configuración antes mencionadas han favorecido la congestión de la red, dificultando la detección de fallos. Estos factores se han traducido en pérdidas de conectividad, comprometiendo la calidad del servicio entregado tanto a usuarios finales como a clientes corporativos.

Ante este panorama, el proyecto se justifica por la necesidad de realizar un rediseño integral de la red, orientado hacia una arquitectura escalable, jerárquica y resiliente. Este rediseño contempla la migración hacia el protocolo de enrutamiento dinámico OSPF, la reorganización lógica de la red y la optimización de rutas para mejorar la convergencia y redundancia.

De forma complementaria, el proyecto incorpora procesos técnicos fundamentales como el comisionamiento de radioenlaces, la evaluación de acuerdos de nivel de servicio (SLA), la organización eficiente de dominios de broadcast y la automatización de tareas de configuración. Todo esto permitirá una administración más eficiente, segura y estandarizada, alineada con los retos actuales de crecimiento en la demanda de ancho de banda.

#### ***1.3.2. Justificación Académica y Social.***

El crecimiento sostenido de la demanda de conectividad en zonas rurales es una realidad técnica impulsada por la digitalización de los sectores productivos y el acceso masivo a servicios en la nube. Según el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC, 2026), la conectividad en Colombia ha experimentado un avance histórico, logrando que la cobertura en hogares rurales pase del 32,2 % al 41,9 %, lo que representa la incorporación de aproximadamente 4,9 millones de nuevos usuarios en el campo. Este fenómeno de expansión

se alinea con lo dispuesto por la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC, 2022) en su Resolución 6755, donde se establece la necesidad apremiante de fomentar infraestructuras rurales robustas para soportar este incremento en la densidad de tráfico.

Ante este panorama, el proyecto se justifica por la necesidad de realizar un rediseño integral de la red, orientado hacia una arquitectura escalable, jerárquica y resiliente. Este rediseño contempla la migración hacia el protocolo de enrutamiento dinámico OSPF, la reorganización lógica de la red y la optimización de rutas para mejorar la convergencia y redundancia.

Desde la perspectiva académica, este trabajo representa una contribución al estudio aplicado de redes de telecomunicaciones, en particular en lo relacionado con protocolos de enrutamiento dinámico, diseño jerárquico de redes, segmentación lógica, control de tráfico y buenas prácticas en redes inalámbricas. La propuesta puede servir como modelo replicable para operadores que prestan servicios de última milla, aportando valor tanto a nivel técnico como metodológico.

### ***1.3.3. Viabilidad y Sostenibilidad de la Propuesta.***

Un aspecto estratégico de esta propuesta es la reutilización de los equipos MikroTik ya existentes en la infraestructura de MARA, aprovechando sus capacidades de routing a un bajo costo, lo que permite implementar una solución técnica sostenible y económicamente viable.

## **1.4. Objetivos.**

### ***1.4.1 Objetivo General.***

Optimizar la arquitectura de red existente en la empresa MARA mediante un rediseño lógico basado en buenas prácticas de red, la migración a OSPF y la reutilización de equipos Mikrotik, en favor de la estabilidad, escalabilidad y administración eficiente de los servicio.

### ***1.4.2. Objetivos Específicos.***

Diagnosticar la red actual mediante pruebas de conectividad, análisis de topología y evaluación del rendimiento, identificando fallas estructurales y limitaciones técnicas.

Proponer un rediseño lógico de la red, incorporando segmentación, organización jerárquica y control de dominios de broadcast, conforme a buenas prácticas de ingeniería de redes.

Reconfigurar los túneles de interconexión para utilizar direcciones de loopback, garantizando estabilidad ante fallos físicos y compatibilidad con la nueva arquitectura.

Realizar pruebas de validación operativa, incluyendo simulación de fallos, análisis de rutas, evaluación de latencia, throughput y comportamiento de conmutación.

Documentar los hallazgos técnicos y las recomendaciones de mejora para la transferencia del modelo hacia otros operadores de telecomunicaciones en entornos rurales.

## **1.5. Delimitaciones del Estudio.**

### ***1.5.1. Cobertura Geográfica y Temporal.***

El estudio se limitó a la infraestructura de la empresa MARA, ubicada en zonas rurales específicas de operación, en los departamentos de Casanare y Meta. Por su parte, el alcance temporal se limitó al diseño, migración y validación inicial del protocolo OSPF, sin cubrir fases posteriores las cuales deben ser desarrolladas.

### ***1.5.2. Equipos y Tecnologías Consideradas.***

Se trabajó únicamente con los dispositivos MikroTik y radios Mimosa ya disponibles en la red, sin incluir la adquisición de nuevos equipos de otras marcas. Asimismo, el proyecto se centró exclusivamente en la implementación de OSPF como protocolo de enrutamiento.

### ***1.5.3. Alcance y Limitaciones Técnicas.***

Este proyecto presentó ciertas restricciones que acotan su alcance y se tuvieron en cuenta algunos puntos específicos : las validaciones se realizaron en condiciones reales de operación y en entornos simulados en GNS3, pero no se contemplan pruebas bajo escenarios de laboratorio con tráfico masivo real.

## 2. CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL Y METODOLÓGICO.

### 2.1. Estado del Arte.

Las investigaciones han abordado el problema de extender la conectividad eficiente a las áreas rurales, lo cual se lleva a cabo mediante redes híbridas, respaldadas por protocolos de enrutamiento dinámico que mejoran el rendimiento.

#### 2.1.1. *Experiencias Internacionales en Redes Rurales Híbridas.*

A nivel internacional, la literatura especializada consistentemente resalta la efectividad de OSPF en entornos de red complejos y dinámicos. Boyanov et al. (2023), en su estudio de simulación de seguridad en redes académicas, destacan la robustez del protocolo OSPF para garantizar estabilidad y convergencia rápida en topologías complejas de campus universitarios y entornos empresariales, un aspecto clave para la recuperación ante fallos. Complementariamente, la experiencia práctica documentada por Mimososa Networks (MN, 2016) sobre el operador Stealth Broadband en Estados Unidos validó el uso de radios inalámbricos de bajo costo en combinación con enlaces de fibra para desplegar servicios de banda ancha en comunidades rurales de Missouri.

Los estudios técnico-económicos internacionales respaldan este enfoque. Ioannou et al. (2020) evidencian que los despliegues híbridos (radio-fibra) resultan significativamente más rentables que las soluciones totalmente cableadas cuando la densidad de usuarios es baja. De igual forma, Prieto-Egido et al. (2018) destacan que los operadores rurales pueden ofrecer servicios sostenibles si utilizan infraestructura de bajo costo y aprovechan espectro no licenciado.

Las organizaciones internacionales también han documentado experiencias relevantes. La Asociación para el Progreso de las Comunicaciones (APC, 2018) ha impulsado redes

comunitarias que integran radioenlaces y fibra óptica, demostrando que la sostenibilidad depende tanto del diseño técnico como de la gobernanza local y la capacitación.

### ***2.1.2. Investigaciones Aplicadas en Latinoamérica y Colombia.***

En el contexto latinoamericano y específicamente colombiano, se han desarrollado investigaciones aplicadas que abordan problemáticas similares. Cortés et al. (2021) propusieron el diseño de una red backhaul autogestionables para el departamento de Sucre, publicado en la Revista UIS Ingenierías, subrayando la necesidad de migrar de configuraciones estáticas a protocolos dinámicos como OSPF para lograr escalabilidad y una gestión más eficiente. Adicionalmente, los lineamientos técnicos de Cisco Systems (2020) y MikroTik (2022) proporcionan mejores prácticas para la implementación de OSPF en redes de proveedores de servicios, validando su aplicabilidad en escenarios reales de conectividad rural.

### ***2.1.3. Marco Regulatorio y Normativo Pertinente.***

El marco regulatorio nacional sustenta este enfoque. La Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) de Colombia, en su Resolución 6755 de 2022, establece condiciones diferenciales para fomentar la conectividad rural, reconociendo explícitamente el uso de tecnologías inalámbricas y la importancia de redes eficientes.

La documentación técnica oficial aporta el sustento metodológico. MikroTik (2022), en su manual oficial de RouterOS, detalla procedimientos específicos para la implementación de OSPF, mientras que Cisco Systems (2020), en su OSPF Design Guide, proporciona mejores prácticas para la designación de áreas y cálculo de métricas.

Estas experiencias validadas demuestran que es posible contar con equipos de bajo costo (MikroTik y Mimosa) combinados con protocolos sólidos como OSPF, coincidiendo con el enfoque adoptado en este proyecto. Todas destacan el papel crucial de la puesta en marcha

técnica, los protocolos de comisionamiento y la evaluación del rendimiento como medios esenciales para lograr estabilidad y escalabilidad en redes no licenciadas.

## **2.2. Marco Teórico.**

El marco teórico recoge los fundamentos conceptuales y técnicos necesarios para el entendimiento de la propuesta, abordando desde la infraestructura de redes en zonas rurales hasta los protocolos, tecnologías y herramientas utilizadas en el desarrollo del proyecto.

### ***2.2.1. Infraestructura de Redes en Zonas Rurales.***

Existen barreras técnicas y económicas para el acceso a Internet en áreas rurales. Sobre todo, las condiciones geográficas adversas, los altos costos para el despliegue de infraestructura y la baja densidad de población crean problemas para ofrecer servicios de conectividad en estas regiones con la calidad requerida. Las redes híbridas, que consisten en segmentos inalámbricos de microondas y de fibra óptica, han surgido como alternativas potenciales para la cobertura de servicios en áreas de difícil acceso (Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT], 2021; Yang et al., 2014).

### ***2.2.2. Protocolos de Enrutamiento: Estático vs Dinámico.***

El direccionamiento estático consiste en configurar manualmente las rutas dentro de una red. Aunque resulta funcional en redes pequeñas o con una topología estable, se torna ineficiente a medida que la red crece, ya que requiere intervención constante ante cualquier modificación en la infraestructura (Forouzan, 2017).

Los protocolos dinámicos permiten a los routers intercambiar información topológica en tiempo real y actualizar su tabla de rutas de forma automática, mejorando la escalabilidad y reduciendo errores humanos. Entre los protocolos más comunes se encuentran RIP, EIGRP y

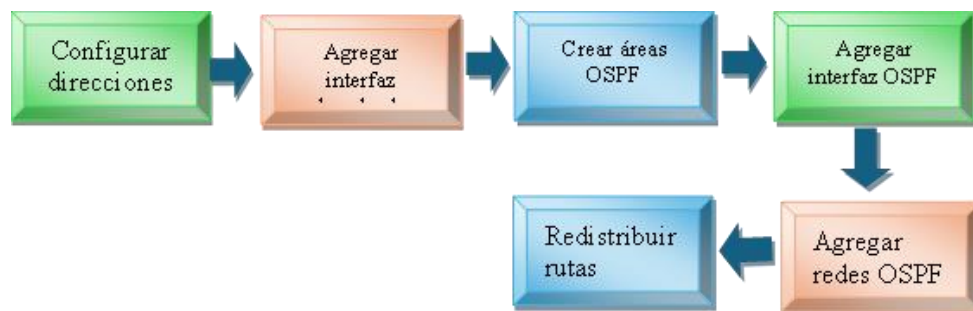
OSPF, siendo este último uno de los más robustos y eficientes para redes de tamaño medio y grande.

### 2.2.3. Protocolo OSPF (*Open Shortest Path First*).

Pertenece al grupo de protocolos de enrutamiento de estado de enlace dinámico, que están en la categoría de protocolos IGP (Interior Gateway Protocol). Utiliza el algoritmo de Dijkstra para determinar el camino más corto a cada destino en una red, basado en el costo acumulado (como el ancho de banda o la latencia) (Cisco Systems, 2021). En el caso de redes rurales como las de MARA, OSPF es el método más efectivo de mantener la conectividad estable incluso en malas condiciones o con enlaces intermitentes, y los caminos se reconectan automáticamente y se favorecen los segmentos más confiables, como se ilustra en la Figura 1.

**Figura 1**

*Secuencia OSPF Mikrotik.*



*Nota.* Descripción de los pasos a nivel de configuración para OPSF.

### 2.2.4. Tecnologías MikroTik y Radios Mimosa.

**MikroTik.** Es un fabricante que ofrece soluciones de red a bajo costo, ampliamente adoptadas por pequeños y medianos operadores de telecomunicaciones. Sus dispositivos soportan protocolos de enrutamiento avanzados, túneles, VLANs, control de ancho de banda, firewalls y gestión centralizada, lo que los convierte en una herramienta fundamental para el rediseño de la red de la empresa MARA.

**Radios Mimosa.** Implementados para tecnologías punto a punto (PTP) o punto a multipunto (PTMP) sobre espectro no licenciado en bandas de 4.9 a 6.4 GHz. Incorporan protocolos propietarios como Mimosa TDMA o Wi-Fi, dependiendo del modelo. Estas tecnologías permiten el uso de altas modulaciones y anchos de bandas hasta de 80 MHz con utilización de dos canales.

### ***2.2.5. Conceptos Técnicos Complementarios.***

A continuación, se presentan los conceptos de ingeniería de soporte que complementan el diseño e implementación de la nueva arquitectura lógica de la red.

**2.2.5.1. Throughput y Calidad de Servicio (QoS).** Es la tasa efectiva de transmisión de datos a través de un canal de comunicación, expresada generalmente en Mbps. Representa la velocidad real percibida por el usuario final, e incluye los efectos de latencia, jitter, interferencias y sobrecarga del protocolo (Tanenbaum & Wetherall, 2011). En redes rurales, maximizarlo es esencial debido a la limitación de recursos y la alta demanda. Para medirlo, se utilizan herramientas como *Bandwidth Test* de MikroTik, ya que un bajo throughput impacta directamente en la experiencia del usuario.

**2.2.5.2. VLSM y Diseño de Direccionamiento Jerárquico.** El Variable Length Subnet Mask (VLSM) es una técnica que permite subdividir un bloque de direcciones IP en subredes de diferentes tamaños, asignando a cada segmento únicamente la cantidad de direcciones que necesita. A diferencia del subnetting clásico, en el que todas las subredes tienen la misma máscara, el VLSM proporciona flexibilidad y optimización del espacio de direccionamiento (Forouzan, 2017). De esta forma, cada subred recibe únicamente el número de direcciones que requiere, evitando desperdicios. El uso de VLSM resulta especialmente relevante en proyectos de migración de redes bajo OSPF, ya que permite un direccionamiento jerárquico y escalable,

asimismo, reduce la probabilidad de conflictos por solapamiento de direcciones y facilita la integración de nuevas áreas de red sin afectar la estabilidad del enrutamiento.

**2.2.5.3. Broadcast y Segmentación Lógica.** El concepto de broadcast hace referencia a la transmisión de un paquete hacia todos los dispositivos que comparten el mismo segmento de red o dominio de broadcast (Tanenbaum & Wetherall, 2011). El uso de broadcast es esencial en protocolos como ARP, DHCP y OSPF, donde es necesario anunciar información a todos los nodos de un segmento. Sin embargo, el exceso de tráfico de broadcast puede provocar congestión y problemas de rendimiento conocidos como tormentas de broadcast, especialmente en redes planas sin segmentación. En entornos empresariales, se emplean técnicas como la segmentación mediante VLANs, la implementación de enrutadores y el uso de protocolos de routing sobre interfaces punto a punto para controlar su propagación. En el marco del presente proyecto, comprender el funcionamiento del broadcast permite diseñar un direccionamiento más eficiente y prever escenarios donde el tráfico de control pueda afectar la convergencia del enrutamiento.

**2.2.5.4. Comisionamiento de Radioenlaces.** Este proceso se utiliza para validar un enlace inalámbrico para determinar si ha cumplido con sus parámetros de diseño antes de iniciar la operación, a través de pruebas de alineación de antenas y nivel de señal (RSSI), relación señal-ruido (SNR), latencia y rendimiento (Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT], 2020). Un fallo en este proceso puede tener un impacto significativo en el rendimiento de la red.

**2.2.5.5. Solapamiento Espectral en Bandas no Licenciadas.** En comunicaciones inalámbricas, el solapamiento se produce cuando dos o más transmisiones comparten parcialmente la misma banda de frecuencias, lo que genera interferencia y disminuye el rendimiento del enlace. Este fenómeno es común en las bandas no licenciadas de 2.4 GHz y 5

GHz, donde los canales disponibles tienen un ancho de banda definido y no siempre están completamente aislados entre sí (Stallings, 2017). Por ejemplo, en 5 GHz, aunque existen más canales, muchos de ellos se solapan dependiendo del ancho de canal configurado (20, 40, 80 o 160 MHz), lo que puede impactar el rendimiento de los enlaces.

## **2.3. Marco Conceptual.**

### **2.3.1. Glosario de Términos Técnicos.**

El marco conceptual presenta las definiciones de los términos técnicos fundamentales utilizados en este proyecto, con el fin de establecer un lenguaje común y facilitar la comprensión de los resultados y la metodología aplicada:

**OSPF (Open Shortest Path First).** Protocolo de enrutamiento dinámico interior que utiliza el algoritmo de Dijkstra para calcular las rutas más cortas dentro de una red.

**Protocolo de Enrutamiento Dinámico.** Conjunto de reglas que permiten a los routers intercambiar información de topología y ajustar las rutas de manera automática según los cambios en la red.

**VLAN (Virtual LAN).** Red de área local virtual que segmenta lógicamente un dominio de broadcast dentro de una infraestructura física, permitiendo separar el tráfico de distintos servicios o clientes.

**Throughput.** Tasa efectiva de transmisión de datos a través de un canal de comunicación, expresada en Mbps. Es un parámetro clave para medir la capacidad real de la red.

**Latencia.** Tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde el origen hasta el destino. Es crítica en aplicaciones sensibles como voz y video.

**Traceroute.** Herramienta de diagnóstico que muestra la ruta de un paquete a través de la red, indicando cada salto intermedio y los tiempos de respuesta.

**EOIP (Ethernet Over IP).** Protocolo de MikroTik que permite crear túneles de capa 2 sobre una red IP, útil para transportar VLANs y extender redes locales como un canal transparente.

**QoS (Quality of Service).** Conjunto de mecanismos que priorizan o limitan el tráfico de red con el fin de garantizar un servicio estable en aplicaciones críticas.

**SLA (Service Level Agreement).** Acuerdo de nivel de servicio que define métricas como disponibilidad, latencia, pérdida de paquetes y ancho de banda mínimo garantizado.

**Comisionamiento de Radioenlaces.** Proceso de validación técnica de un enlace inalámbrico antes de su operación, que incluye pruebas de alineación de antenas, niveles de señal, SNR y throughput.

**MikroTik.** Fabricante de equipos de red de bajo costo que ofrece soluciones avanzadas de enrutamiento, ampliamente usado por pequeños y medianos operadores.

**Mimosa.** Fabricante de radios inalámbricos para enlaces de microondas en bandas no licenciadas, caracterizados por alta capacidad.

**The Dude.** Es una aplicación gratuita de monitoreo de red desarrollada por MikroTik, diseñada para descubrir, mapear y supervisar dispositivos y servicios en entornos de red de manera centralizada.

**Zabbix.** Es una plataforma de código abierto para la supervisión y monitoreo de infraestructuras de red, servidores, servicios y aplicaciones en tiempo real.

#### **2.4. Marco Contextual.**

El marco contextual describe el entorno específico en el que se desarrolla el proyecto, incluyendo la ubicación geográfica, la situación tecnológica actual de la empresa, los

instrumentos utilizados para obtener información preliminar y las principales oportunidades y desafíos que justifican el rediseño de la red.

#### ***2.4.1. Localización geográfica de la red MARA.***

La empresa concentra su operación en los departamentos de Casanare y Meta. Estas sedes funcionan como puntos estratégicos de concentración y distribución del tráfico hacia diferentes localidades, permitiendo el acceso a servicios de conectividad en áreas apartadas donde los grandes operadores no tienen presencia.

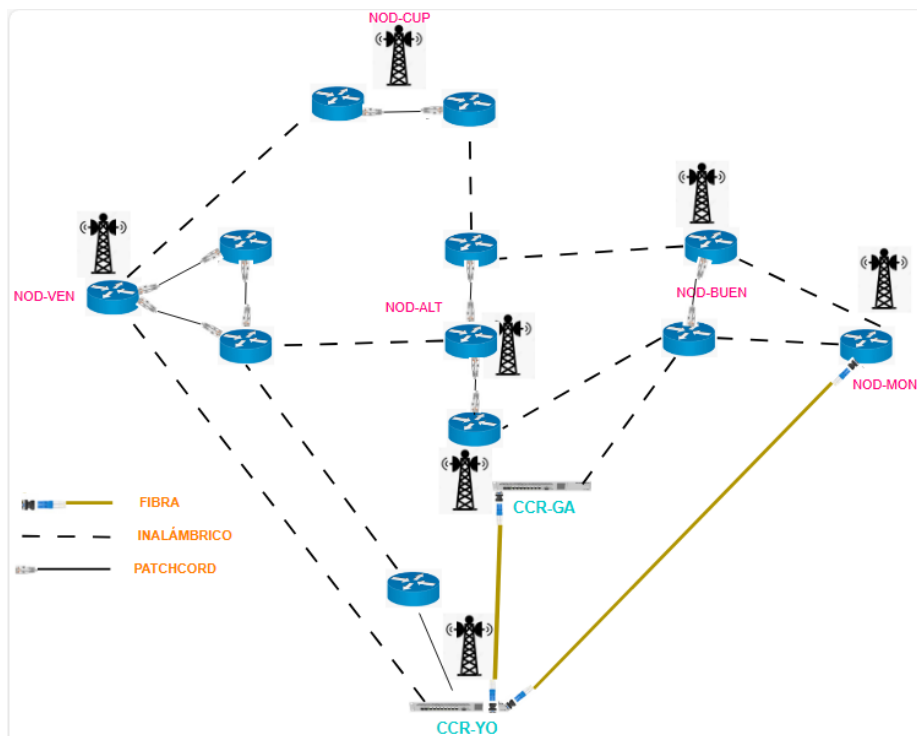
#### ***2.4.2. Situación Actual de la Infraestructura.***

La red está estructurada alrededor de dos nodos principales, ubicados en Gaitán y Yopal, que concentran y distribuyen el tráfico hacia los diferentes nodos.

**2.4.2.1. Topología Columna Vertebral y Nodos Principales.** La topología de la red está compuesta por una serie de nodos interconectados mediante radioenlaces y enlaces de fibra óptica. A continuación, se muestra la Figura 2 donde se describe esta red.

**Figura 2**

*Topología General Red Mara.*

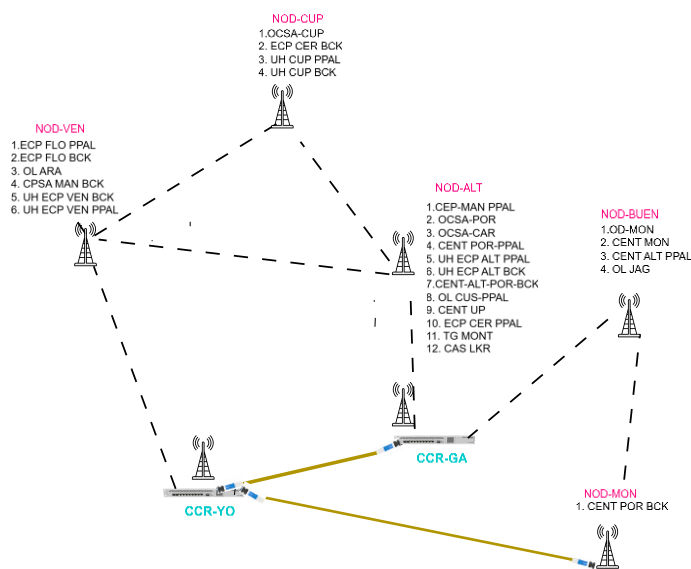


*Nota.* Se incluyen los nodos principales que conforman la estructura principal de la red.

**2.4.2.2. Distribución de Clientes y Tipos de Enlace.** En esta sección se detalla la ubicación lógica de los clientes según el nodo al cual están conectados, tal como se observa en la Figura 3. También se identifican tanto los clientes con enlaces simples como aquellos que cuentan con rutas de respaldo.

### Figura 3

#### Distribución Cliente en Nodos.



*Nota.* Listado clientes relacionados con el nombre del nodo.

Para la gestión de contingencias operativas, se ha diseñado un inventario de clientes de acuerdo con sus necesidades de redundancia, dividiéndose en clientes tipo 1 (con enlace de respaldo obligatorio) y clientes tipo 2 (con enlace único), como se detalla en las Figuras 4 y 5 de forma respectiva.

### Figura 4

#### Listado Cliente Tipo 1 con Enlace Backup y Principal.

CLIENTE	ANCHO DE BANDA (Mbps)
UH-VEN	2
UH-CUP	2
UH-ALT	2
CENT-ALT-POR	10
CENT-POR	10
ECP-FLOR	2
CPSA-MAN	10
ECP-CER	30

*Nota.* Listado de clientes tipo 1 con sus respectivos anchos de banda.

## Figura 5

*Clientes con una sola ruta.*

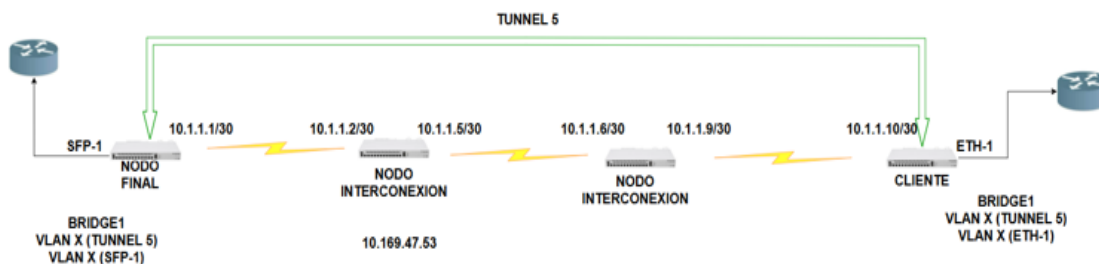
CLIENTE	ANCHO DE BANDA (Mbps)
OL-ARA	50
OCSA-CUP	20
OCSA-POR	20
CPSA-UP	10
OL-MON	40
CENT-MON	10
OL-CUS	30
OL-JAG	30
CAS-LKR	20
TG-MON	2

*Nota.* Listado de clientes tipo 2 con sus respectivos anchos de banda.

**2.4.2.3. Modelo de Entrega de Servicios (Túneles EoIP).** Se realiza mediante la implementación de túneles EoIP, los cuales transportan el tráfico de red a nivel de capa 2, entre los extremos de red. Esta técnica posibilita mantener configuraciones de red como si los dispositivos estuvieran dentro del mismo segmento Ethernet. El túnel establece utilizando las direcciones IP locales y remotas de los extremos; posteriormente, se configura un bridge en el que se agregan las VLAN o interfaces correspondientes a cada interfaz. En la Figura 6 se representa gráficamente el modelo de entrega de servicios, incluyendo la encapsulación mediante EoIP y las interfaces a través del bridge.

**Figura 6**

*Topología de Entrega de Servicios Configuración de Túnel EOIP.*



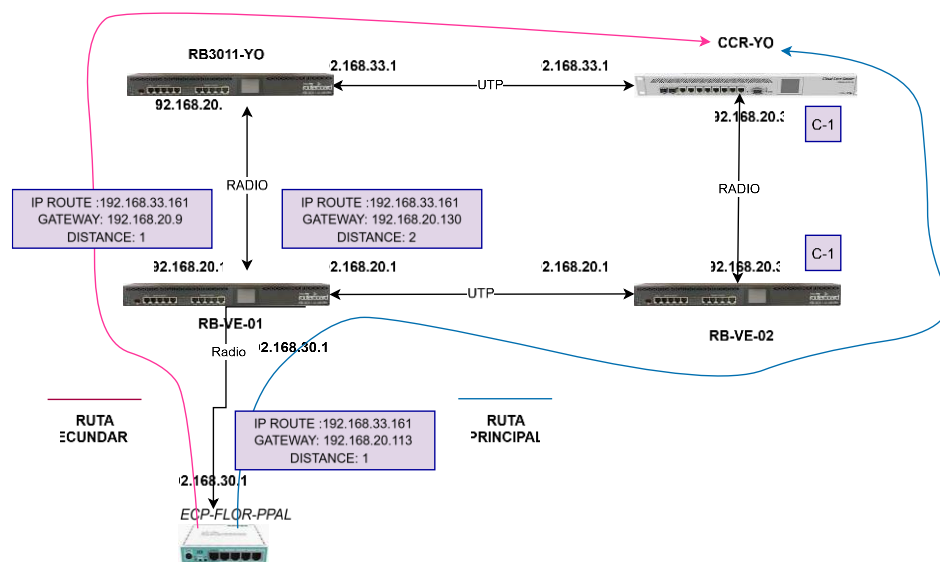
*Nota.* Se emplea redundancia mediante rutas estáticas.

El diagrama anterior detalla cómo se genera el túnel lógico sobre la infraestructura física IP. La encapsulación de capa 2 permite un transporte transparente de los paquetes de datos de los clientes residenciales y corporativos, aislando el tráfico mediante la asignación de puertos en la interfaz tipo bridge del router MikroTik emisor y receptor.

Para gestionar la disponibilidad del servicio en aquellos escenarios donde existe más de un camino físico o lógico hacia un mismo destino, el esquema estático actual emplea redundancia mediante rutas configuradas con diferentes distancias administrativas. Un ejemplo claro de esta arquitectura se ilustra en la Figura 7, donde se detalla el diagrama en ECP Flor Ppal.

**Figura 7**

*Diagrama ECP Flor Ppal, Caminos para Llegar a CCR-YO.*



*Nota.* Se representan la alternativa de caminos para un paquete el cuál tiene mas de una opción para llegar a su destino.

En esta ilustración se evidencia el comportamiento del flujo de paquetes bajo el direccionamiento estático actual. El enrutador de ECP Flor Ppal debe seleccionar la ruta de destino evaluando de forma manual el peso de la distancia administrativa configurada, lo que expone al sistema a pérdidas de conectividad prolongadas si los enlaces intermedios hacia el nodo CCR-YO experimentan fallas concurrentes sin intervención del operador.

### **2.4.3. Oportunidades y Desafíos Técnicos Identificados.**

A partir del análisis de la situación actual y la infraestructura descrita, se consolidaron los siguientes factores clave que direccionan la necesidad del rediseño tecnológico:

**Distribución de Servicios.** La red concentra el tráfico en dos nodos principales: CCR-GA y CCR-YO, que actúan como centros de distribución hacia el resto de la red.

**Nodos Secundarios.** Se identifican seis nodos intermedios antes mencionados que operan como distribuidores locales conectados mayoritariamente mediante radioenlaces de 5 GHz en bandas libres.

**Tipos de Enlaces.** Se emplean enlaces de fibra óptica y radioenlaces no licenciados punto a punto, dependiendo de las condiciones técnicas de cada zona. Este aspecto será relevante para la configuración del protocolo OSPF, particularmente en la asignación de métricas.

**Redundancia Interna en Nodos.** Algunos nodos intermedios cuentan con múltiples routers interconectados, lo que añade complejidad a la planeación del enrutamiento dinámico y requiere atención especial al implementar OSPF.

**Rutas Múltiples.** Existen rutas alternativas entre clientes y nodos principales. Si bien esto permite redundancia y tolerancia a fallos, también implica la necesidad de una correcta configuración del protocolo de enrutamiento para evitar bucles, rutas ineficientes o saturación de enlaces.

**Capacidad de Enlaces.** No todos los canales de respaldo tienen la misma capacidad que la ruta principal, por lo que es indispensable establecer métricas diferenciadas en OSPF, evitando degradaciones de servicio ante conmutaciones automáticas.

**Diseño de Rutas de Respaldo Efectivas.** Se recomienda que los enlaces de respaldo conecten con nodos distintos a los de la ruta principal y que no compartan tramos intermedios, para asegurar una verdadera diversificación ante fallos.

## **2.5. Marco Metodológico.**

El marco metodológico define el enfoque, los métodos y las técnicas que guían la ejecución del proyecto, garantizando la validez y coherencia de los resultados obtenidos. En esta sección se describe el tipo de investigación adoptado, la población objeto de estudio, los instrumentos de recolección de datos, las fases de implementación del piloto, así como el alcance, cronograma y presupuesto estimado.

### ***2.5.1. Tipo y Enfoque de Investigación.***

La metodología adoptada para este proyecto es de enfoque cuantitativo, aplicada y de tipo experimental. Se orienta a la resolución de un problema técnico real mediante la recopilación de datos objetivos, la simulación controlada de escenarios y la validación de soluciones mediante pruebas de rendimiento. La naturaleza aplicada responde a la necesidad de rediseñar y optimizar una red de telecomunicaciones operativa en un entorno rural, utilizando tecnologías y equipos existentes, sin requerir inversiones elevadas en nueva infraestructura.

### ***2.5.2. Población y Muestra (Infraestructura Objeto de Estudio).***

La población objeto de este proyecto corresponde a la infraestructura de red de la empresa MARA, conformada por nodos de comunicación ubicados en las zonas rurales de Gaitán y Yopal, interconectados mediante radioenlaces y enlaces de fibra óptica. Esta red integra tanto los equipos de acceso como los de distribución, que soportan el servicio de conectividad a clientes residenciales y corporativos en áreas de difícil acceso.

La muestra seleccionada para la implementación del piloto incluye un subconjunto representativo de la red, compuesto por los equipos MikroTik empleados como routers principales en los nodos estratégicos, así como los radioenlaces Mimosa utilizados para la interconexión de dichos nodos. Este segmento permite validar de manera controlada la

funcionalidad del protocolo OSPF y la reorganización lógica de la red, garantizando que los resultados puedan extrapolarse posteriormente al resto de la infraestructura.

### ***2.5.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.***

Para el diagnóstico de la red y la validación de la propuesta de rediseño, se aplicaron diversas técnicas apoyadas en instrumentos de análisis y monitoreo, tanto en la infraestructura real como en entornos simulados:

**2.5.3.1. Herramientas de Administración (Winbox, CLI).** Se realizó un levantamiento de la infraestructura actual de la empresa MARA mediante un análisis documental y topológico, identificando nodos, enlaces de radio y fibra, así como la arquitectura operativa. Además, se ejecutó una revisión de las tablas de enrutamiento y las configuraciones estáticas existentes en los equipos. Para esta labor técnica se utilizó el software de gestión Winbox y la interfaz de línea de comandos, empleados para la administración y monitoreo de las RouterBoards (RB) de MikroTik.

**2.5.3.2. Herramientas de Diagnóstico (Ping, Traceroute, Bandwidth Test).** Para realizar el diagnóstico de la red actual, se emplearon herramientas de gestión y monitoreo disponibles en los equipos MikroTik. Estas técnicas se dividieron en:

**Pruebas de Conectividad.** Se llevaron a cabo pruebas de ping extendido (1500 bytes) para medir latencia, pérdida de paquetes y problemas de MTU; y pruebas de traceroute para identificar rutas de tráfico, saltos intermedios y posibles rutas asimétricas en la red.

**Pruebas de Rendimiento (Throughput).** Se utilizó la herramienta Bandwidth Test, propietaria de MikroTik, para medir la capacidad real de transmisión y detectar cuellos de botella en la red.

**Comisionamiento de Radioenlaces.** Se recopilaron registros y se verificaron parámetros técnicos de los radios Mimosa a través de sus interfaces de análisis de espectro, evaluando niveles de señal (RSSI), relación señal-ruido (SNR), estabilidad de la comunicación y modulación.

**2.5.3.3. Simulación en Entorno Virtual (GNS3).** Previo al despliegue en campo, se recreó la topología de la red mediante el simulador GNS3. Este entorno de laboratorio virtual permitió probar la implementación del protocolo OSPF de forma controlada, validando el comportamiento de las herramientas de MikroTik y asegurando la viabilidad técnica antes de su aplicación en la infraestructura real.

#### ***2.5.4. Técnicas de Análisis y Procesamiento de Datos.***

El conjunto de estas técnicas e instrumentos garantizó la recolección de la información cuantitativa y cualitativa necesaria para diagnosticar el estado inicial de la red. Los datos extraídos de las pruebas de tráfico y los registros de los radioenlaces fueron procesados y contrastados con los resultados del entorno simulado en GNS3, lo que permitió evaluar de manera objetiva y técnica el impacto y la viabilidad del rediseño propuesto mediante OSPF.

### **3. CAPÍTULO 3: DESARROLLO, IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA**

#### **3.1. Fase 1: Análisis de la Topología de Red Actual.**

##### ***3.1.1. Reconocimiento de .Nodos y Enlaces Activos.***

Se identificaron los nodos activos, enlaces troncales y de acceso (radioenlaces y fibra óptica), así como las ubicaciones físicas de los equipos. A partir de este levantamiento físico, se generó un esquema actualizado de la topología de red y su arquitectura, diferenciando claramente los tramos de distribución y acceso tal como se documentó previamente en el marco contextual del proyecto (Figuras 2 y 3 del presente documento).

##### ***3.1.2. Inventario de Clientes y requerimientos de Ancho de Banda.***

Tomando como base la distribución de nodos ilustrada en las fases de reconocimiento, se detalló el ancho de banda de cada uno de los clientes y la disponibilidad de enlaces redundantes o de respaldo. Este inventario consolidado permitió clasificar la criticidad de los canales y dimensionar la carga de tráfico actual que debe soportar la nueva arquitectura lógica de red.

#### **3.2. Fase 2: Diagnóstico Técnico de la Red.**

##### ***3.2.1. Análisis de Configuraciones Estáticas y Rutas Asimétricas***

Para evaluar el estado inicial de la red, se realizaron mediciones de latencia, throughput, disponibilidad y congestión de enlaces. A continuación, se detallan los hallazgos obtenidos mediante el uso de herramientas de diagnóstico en los equipos MikroTik.

Se realizaron trazas de rutas hacia clientes y nodos remotos, analizando cada salto en ambos sentidos para confirmar la consistencia entre la topología real y la esperada. Estas pruebas permitieron validar que el tráfico siguiera los caminos diseñados. A manera de ejemplo, en la

Tabla 1 se documenta el recorrido bidireccional hacia los clientes que dependen de uno de los nodos (VEN), evidenciando los saltos exactos hasta alcanzar el punto de interconexión.

**Tabla 1**

*Comparación Bidireccional de Saltos, (Subida y Bajada), Nodo VEN.*

Cliente	Ruta	Salto 1	Salto 2	Salto 3	Salto 4	Nodo
ECP Flo	Subida	192.168.33.162	192.168.20.11	192.168.30.115	N/A	Yopal
Ppal	Bajada	192.168.30.113	192.168.20.9	192.168.33.161	N/A	
ECP Flo	Subida	10.169.47.37	192.168.20.35	192.168.30.75	N/A	Gaitan
Bck	Bajada	192.168.30.73	192.168.20.33	10.169.47.38	N/A	
OL Ara	Subida	192.168.33.162	192.168.20.11	192.168.31.11	N/A	Yopal
	Bajada	192.168.31.9	192.168.20.9	192.168.33.161	N/A	
Cpsa	Subida	10.169.47.37	192.168.33.162	192.168.20.11	192.168.20.91	Gaitan
Man Bc	Bajada	192.168.20.89	192.168.20.9	192.168.33.161	10.169.47.38	
ECP	Subida	10.169.47.37	192.168.20.35	N/A	N/A	Gaitan
Ven Bck	Bajada	192.168.20.33	10.169.47.38	N/A	N/A	
Ecp Ven	Subida	192.168.33.162	192.168.20.11	192.168.20.182	N/A	Yopal
Ppal	Bajada	192.168.20.181	192.168.20.9	192.168.33.161	N/A	

**Nota.** Comando traceroute para clientes que dependen de nodo VEN.

Durante el análisis de estos traceroutes, se detectó un problema crítico de asimetría en la red. Como se ilustra en la Figura 8, los paquetes tomaban un camino de ida diferente al camino de regreso, esta inconsistencia en las tablas de enrutamiento ocasiona los siguientes efectos técnicos.

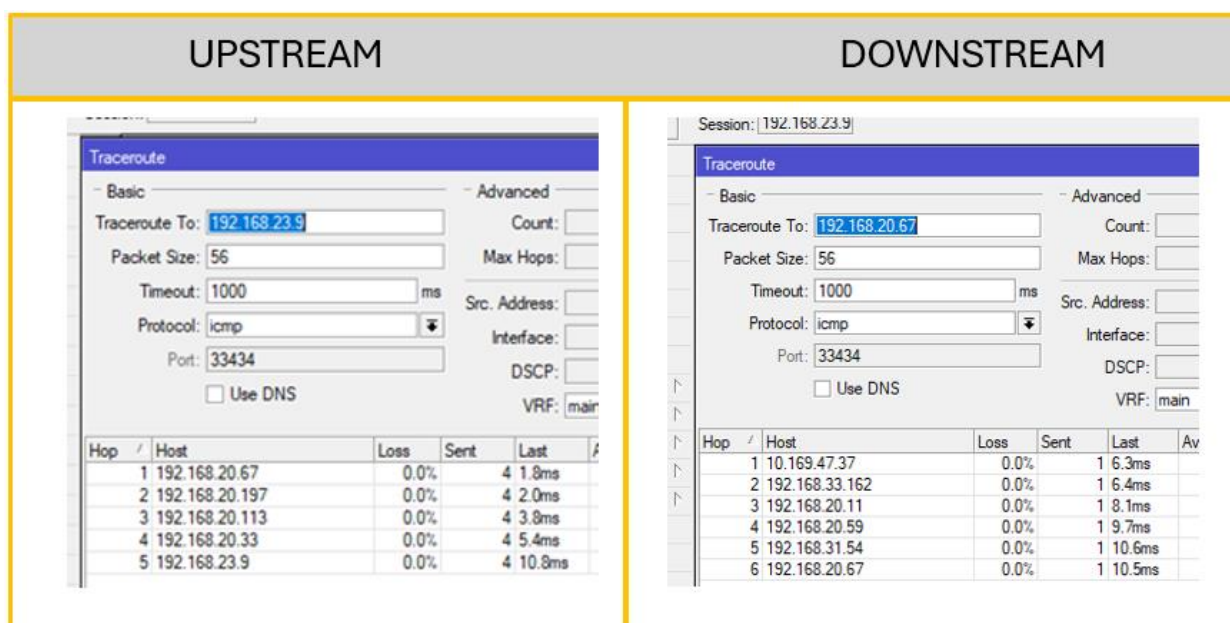
**Reducción del Rendimiento.** Como los flujos correspondientes a rutas aleatorias no siguen la misma ruta, las rutas pueden tener diferentes latencias y causar pérdida de paquetes.

**Limitaciones en los Medios de Diagnóstico.** Las herramientas de monitoreo y diagnóstico (es decir, ping y traceroute) no tiene la simetría correcta y puede ser difícil localizar perfectamente las fallas.

**Cuellos de Botella.** En algunos enlaces una dirección está cerca de saturarse y esta propiedad no se refleja bien en el monitoreo estándar.

**Figura 8**

*Traceroute de Rutas Asimétricas Detectadas.*



*Nota.* Las pruebas fueron efectuadas entre el Origen UH-Cup-Bck – Destino CCR-GA.

### 3.2.2. Pruebas de Conectividad y Rendimiento (Throughput).

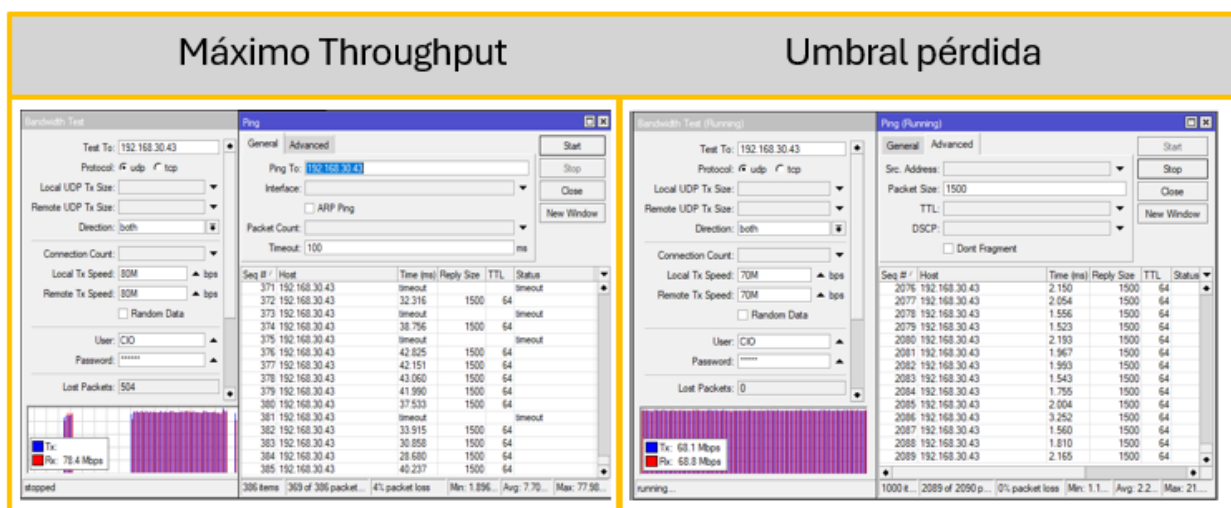
Para determinar el nivel de congestión real de los enlaces, se inyectó tráfico controlado utilizando la herramienta bandwidth test, las pruebas fueron efectuadas con el fin de validar que los enlaces soporten el tráfico agregado en escenarios de alta demanda, identificando posibles cuellos de botella o degradación del servicio, los datos tomados se basaron en pruebas ping con aumento paulatinamente de throughput, mediante la herramienta bandwidth test de MikroTik, generando tráfico UDP bidireccional, alienado con los estándares RFC 2544 y se esperaba que el

RTT (Round-Trip Time) promedio estuviera por debajo de 15 ms para enlaces con menos de 2 saltos, y entre 20–30 ms para enlaces de 3 a 6 saltos.

La Figura 9 muestra la prueba de ancho de banda realizada en uno de los segmentos principales (RB-BU-01 vs CCR-MO), donde se evidencia cómo el tráfico alcanza niveles críticos de saturación cercanos a los 70 Mbps antes de iniciar pérdidas superiores al 1 %.

**Figura 9.**

*Pruebas Enlace RB-BUI Vs CCR-MO.*



*Nota.* El máximo throughput full duplex del enlace es de 70M.

Al evaluar los enlaces troncales con las herramientas de Mikrotik, identificamos varios problemas que están afectando directamente la calidad del servicio. Básicamente, notamos que la latencia es muy inestable y los tiempos de respuesta varían demasiado. Además, cuando hay un alto volumen de tráfico, la red pierde datos importantes, y las rutas principales tienden a saturarse por estar a límite de capacidad, lo que en conjunto termina reduciendo notablemente el rendimiento general de todo el sistema.

El consolidado del estado actual de estas troncales, clasificado de acuerdo con los resultados de las pruebas de estrés, se ilustra en la Figura 10.

**Figura 10.**

*Relación Bandwidth Test entre Troncales.*

TRONCAL A	VS	TRONCAL B	BW ESPERADO	BW SOPORTAD O	ESTATUS
RB-CU-01	VS	RB-VE-01	100	130	PASA
RB-CU-02	VS	RB-AL-03	100	110	PASA
RB-AL-02	VS	RB-BU-02	90	120	PASA
RB-AL-01	VS	RB-VE-02	90	100	PASA
RB-BU-01	VS	CCR-MO	120	70	FALLA
RB-BU-02	VS	CCR-MO	120	150	PASA
RB-BU-01	VS	RB-RIO-01	100	70	PASA
CCR-YO	VS	RB-YO-01	150	160	PASA
RB-YO	VS	RB-VE-01	150	170	PASA

Nota. Al final se agrega el estatus de acuerdo con el resultado obtenido.

### **3.2.3. Comisionamiento de Radioenlaces Mimosa.**

En los casos donde un enlace no cumplió con los umbrales definidos de rendimiento (latencia, pérdida de paquetes, throughput mínimo), Este procedimiento, ejecutado de forma remota, permitió verificar las condiciones operativas, aplicar ajustes correctivos y garantizar que cada enlace cumpliera con los parámetros técnicos exigidos por la nueva arquitectura.

**3.2.3.1. Parámetros de Referencia y Umbrales Técnicos.** Los umbrales y métricas de referencia utilizados para diagnosticar la calidad de los enlaces se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2***Parámetros de Medición y de Referencia*

Parámetro	Descripción
RSL	Nivel de señal recibido. Valores óptimos típicos: entre -50 y -65 dBm.
CINR	Relación señal-interferencia-ruido. Mínimo aceptable: > 20 dB.
Modulación	Nivel de modulación. MCS bajos indican mala calidad del enlace.
Ancho canal	Se evalúa si el canal actual es apropiado o genera más ruido.
Retries	Aumento en retransmisiones indica enlaces inestables o mal alineados.
Firmware	Se valida que la versión esté actualizada a la recomendada.

*Nota.* Parámetros con base en Mimoso networks (2020).

Tomando como base estos parámetros, se ejecutaron las siguientes acciones técnicas sobre los nodos que presentaban bajo rendimiento:

Verificación de niveles de señal, contrastando los valores actuales de RSL frente a los umbrales recomendados por el fabricante.

Se utilizó la herramienta spectrum analyzer incluida en el sistema operativo de los radios para identificar interferencias activas en la banda de operación.

Reducción del ancho de canal (por ejemplo, de 80 MHz a 40 o 20 MHz) en función del nivel de ruido detectado.

Reconfiguración del esquema de Modulación (MCS), para lograr un equilibrio entre rendimiento y estabilidad, estos son automáticos y van relacionados con el nivel de RSL y SNR

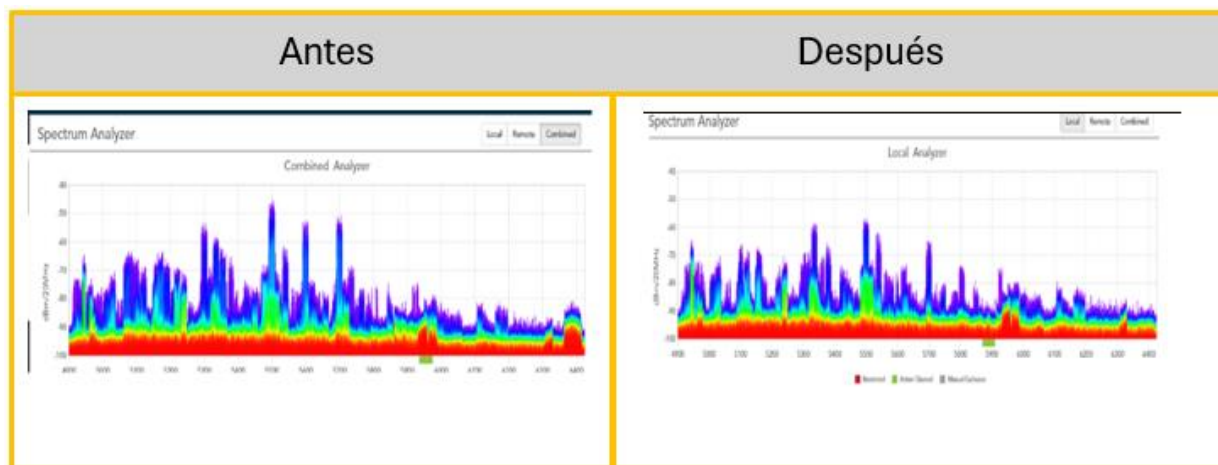
Se considera necesaria la instalación de versiones estables y actualizadas del firmware, disponibles en el portal oficial de Mimoso.

**3.2.3.2. Ajustes Aplicados y Resultados de Optimización.** La aplicación de este protocolo de comisionamiento permitió recuperar enlaces con degradación severa, facilitando su reutilización para la topología OSPF. A continuación, se presenta el impacto de estos ajustes en el enlace crítico RB-BU-1 vs CCR-MO.

El primer paso consistió en evaluar el entorno de RF. Como se observa en la Figura 11, la herramienta de análisis de espectro evidenció una alta ocupación en la frecuencia configurada inicialmente. Por consiguiente, se realizó un desplazamiento de la portadora hacia una zona de menor contaminación espectral, fijando el centro de frecuencia en 5890 MHz.

### Figura 11

*Análisis de Espectro, Enlace RB-BU-1 vs CCR.-MO*



*Nota.* Se realizó movimiento de portadora a un lugar de menor contaminación (5890MHz).

Este cambio de frecuencia tuvo un impacto técnico inmediato en la calidad del medio físico. La Figura 12 evidencia la mejora sustancial en el nivel de recepción de la señal (RSSI).

**Figura 12**

*Comparativo Nivel de Recepción Enlace RB-BU-1 vs CCR.-MO.*



*Nota.* El nivel mejora debido al cambio de frecuencia.

Del mismo modo, el impacto de aislar la portadora del ruido externo se vio reflejado en los indicadores de interferencia, donde la Figura 13 demuestra una recuperación favorable de casi 6 dB en la relación señal a interferencia y ruido (CINR).

**Figura 13**

*Comparativo Niveles CINR, Enlace RB-BU-1 vs CCR.-MO.*

<table border="1"> <thead> <tr> <th>Chain</th> <th>Rx Power (dBm)</th> <th>Rx Noise (dBm)</th> <th>Rx Noise Max (dBm)</th> <th>CINR (dB)</th> <th>Cent</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>-69.8</td> <td>-91.9</td> <td>-88.7</td> <td>19</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>-66.6</td> <td>-91.9</td> <td>-88.7</td> <td>22</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Chain	Rx Power (dBm)	Rx Noise (dBm)	Rx Noise Max (dBm)	CINR (dB)	Cent	1	-69.8	-91.9	-88.7	19		2	-66.6	-91.9	-88.7	22		<b>Antes 19-22 dB</b>
Chain	Rx Power (dBm)	Rx Noise (dBm)	Rx Noise Max (dBm)	CINR (dB)	Cent														
1	-69.8	-91.9	-88.7	19															
2	-66.6	-91.9	-88.7	22															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Chain</th> <th>Rx Power (dBm)</th> <th>Rx Noise (dBm)</th> <th>Rx Noise Max (dBm)</th> <th>CINR (dB)</th> <th>Cent</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>-64.0</td> <td>-92.3</td> <td>-89.5</td> <td>25</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>-64.6</td> <td>-92.3</td> <td>-89.5</td> <td>25</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Chain	Rx Power (dBm)	Rx Noise (dBm)	Rx Noise Max (dBm)	CINR (dB)	Cent	1	-64.0	-92.3	-89.5	25		2	-64.6	-92.3	-89.5	25		
Chain	Rx Power (dBm)	Rx Noise (dBm)	Rx Noise Max (dBm)	CINR (dB)	Cent														
1	-64.0	-92.3	-89.5	25															
2	-64.6	-92.3	-89.5	25															
		<b>Después 25 dB</b>																	

*Nota.* Aumento del margen de relación señal/ruido tras el comisionamiento.

Al contar con un medio inalámbrico más limpio y una señal más robusta, los algoritmos del radio lograron negociar y mantener esquemas de modulación (MCS) superiores, pasando de MCS6 a MCS9, tal como se aprecia en la Figura 14.

### Figura 14

*Comparativa Parámetros (MCS) Enlace RB-BU-1 vs CCR.-MO.*

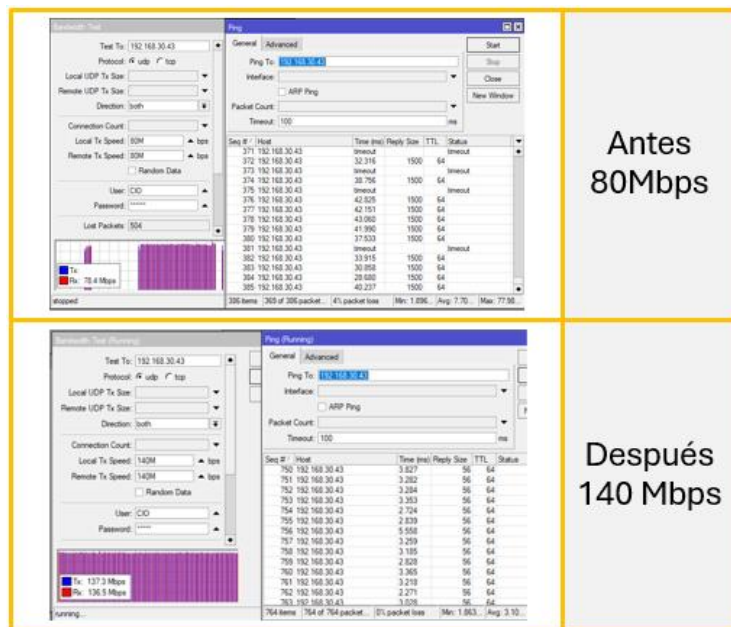
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Stream</th> <th>Tx MCS</th> <th>Tx Width (MHz)</th> <th>Tx PHY (Mbps)</th> <th>Rx MCS</th> <th>Rx Width (MHz)</th> <th>Rx PHY (Mbps)</th> <th>Rx SNR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>7</td> <td>40</td> <td>150</td> <td>6</td> <td>40</td> <td>141</td> <td>20.7</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>7</td> <td>40</td> <td>150</td> <td>6</td> <td>40</td> <td>141</td> <td>22.6</td> </tr> </tbody> </table>								Stream	Tx MCS	Tx Width (MHz)	Tx PHY (Mbps)	Rx MCS	Rx Width (MHz)	Rx PHY (Mbps)	Rx SNR	1	7	40	150	6	40	141	20.7	2	7	40	150	6	40	141	22.6	Antes 6 y 7
Stream	Tx MCS	Tx Width (MHz)	Tx PHY (Mbps)	Rx MCS	Rx Width (MHz)	Rx PHY (Mbps)	Rx SNR																									
1	7	40	150	6	40	141	20.7																									
2	7	40	150	6	40	141	22.6																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Stream</th> <th>Tx MCS</th> <th>Tx Width (MHz)</th> <th>Tx PHY (Mbps)</th> <th>Rx MCS</th> <th>Rx Width (MHz)</th> <th>Rx PHY (Mbps)</th> <th>Rx SNR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>9</td> <td>40</td> <td>199</td> <td>9</td> <td>40</td> <td>200</td> <td>26.9</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>9</td> <td>40</td> <td>199</td> <td>9</td> <td>40</td> <td>200</td> <td>27.9</td> </tr> </tbody> </table>								Stream	Tx MCS	Tx Width (MHz)	Tx PHY (Mbps)	Rx MCS	Rx Width (MHz)	Rx PHY (Mbps)	Rx SNR	1	9	40	199	9	40	200	26.9	2	9	40	199	9	40	200	27.9	Después 9
Stream	Tx MCS	Tx Width (MHz)	Tx PHY (Mbps)	Rx MCS	Rx Width (MHz)	Rx PHY (Mbps)	Rx SNR																									
1	9	40	199	9	40	200	26.9																									
2	9	40	199	9	40	200	27.9																									

*Nota.* Los MCS mejoraron al cambiar la portadora y tener mejores niveles.

En consecuencia, la capacidad real de transporte de datos (throughput) del enlace experimentó un aumento del 100 %, pasando de 70 Mbps a 140 Mbps (ver Figura 15).

Figura 15

Comparativa Capacidad Throughput.



*Nota.* Mejora casi el doble de la capacidad gracias al comisionamiento.

El consolidado de las métricas de rendimiento de este enlace, antes y después de la intervención técnica, se resume en la Tabla 3.

Tabla 3.

Resumen Post Comisionamiento.

Métrica	Antes	Después
RSSI	-69 dBm	-60 dBm
CINR	19 dB	25 dB
Throughput	70 Mbps	140 Mbps
Interferencia	Media	Baja
MCS alcanzada	MCS6	MCS9

*Nota.* Enlace RB-BU-1 vs CCR.-MO.

Este diagnóstico y posterior ajuste técnico sirvieron como base para asegurar una comprensión más profunda de la red actual, permitiendo que se solucionaran fallos físicos específicos antes de desarrollar la nueva arquitectura basada en OSPF. Con estos datos verificados, el diseño lógico se desarrolló sobre una infraestructura física optimizada, confiable y técnicamente respaldada.

### **3.3. Fase 3: Diseño de la Arquitectura OSPF.**

Durante esta fase, se identificaron los enlaces donde se sustituirá el direccionamiento estático por enrutamiento dinámico, priorizando el ancho de banda en cada troncal, redundancia real mediante rutas independientes, evitando compartir tramos, exclusión de router finales del proceso OSPF, (se utilizan interfaces pasivas en este caso).

#### ***3.3.1. Criterios de Diseño: Áreas, Router ID y Métricas de Costo.***

**Definición del Área OSPF.** Se definió una única Área 1, basada en una estrategia de crecimiento modular. Esta decisión se sustentó en la dimensión actual de la red (menos de 50 routers) y la localización geográfica concentrada, limitada a una región del departamento.

Está área funcionará como segmento inicial dentro de un esquema jerárquico más amplio, proyectado a futuro. Se prevé que otras áreas regionales se integren progresivamente a una área 0 central, que actuará como backbone del sistema OSPF, recomendado por el protocolo.

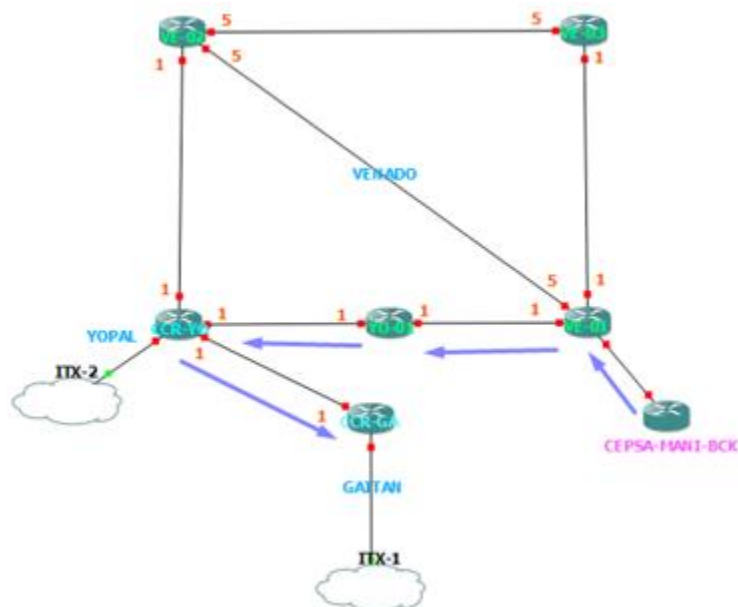
**Planeación de Métricas de Costo.** Se evaluaron los costos de cada enlace, tomando como referencia el comportamiento por defecto de mikrotik, donde se asigna un costo base de 1 para interfaces con velocidades de 100 Mbps o 1 Gbps.

En interfaces críticas se ajustarán métricas manualmente para forzar rutas preferidas,

utilizando el comando `cost=` sobre cada interfaz OSPF, esto permitió visualizar y ajustar los caminos deseados para tráfico primario y secundario, Un ejemplo de este diseño de métricas se ilustra en la Figura 16 para el nodo Cep-Man BCK.

**Figura 16**

*Gráfica de Costos Cep-Man-Bck.*



*Nota:* Ruta por el camino que tiene la sumatoria de los costos más bajos.

### 3.3.2. Plan de Direccionamiento con Interfaces Loopback.

Para asegurar estabilidad en la identificación de los routers, se definieron direcciones IP sobre interfaces loopback, únicas por equipo en cada equipo. El listado de direccionamiento se detalla en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Listado direcciones Loopback RB Nodos.*

Router	Id	Loopback
CCR-YO	10.1.1.1	255.255.255.255
RB-VE-02	10.1.1.2	255.255.255.255

Router	Id	Loopback
RB-VE-03	10.1.1.3	255.255.255.255
RB-VE-01	10.1.1.4	255.255.255.255
RB-YO	10.1.1.5	255.255.255.255
RB-CU-02	10.1.1.7	255.255.255.255
RB-AL-01	10.1.1.8	255.255.255.255
RB-CU-01	10.1.1.12	255.255.255.255
RB-AL-02	10.1.1.13	255.255.255.255
RB-BU-01	10.1.1.14	255.255.255.255
RB-BU-02	10.1.1.27	255.255.255.255
CCR-MO	10.1.1.28	255.255.255.255
RB-AL-03	10.1.1.32	255.255.255.255
CCR-GA	10.1.1.81	255.255.255.255
RB-RIO	10.1.1.110	255.255.255.255
RB-GA	10.1.1.111	255.255.255.255

*Nota.* Se asigna dentro del rango de 10.1.0.0.

### ***3.3.3. Configuración de Interfaces: Activas vs. Pasivas.***

En las plantillas de OSPF (Interface Templates), se preconfiguró el tipo de red en modo Point-to-Point (PTP). Al tratarse de enlaces directos uno a uno, este modo anula el proceso de negociación de Router Designado (DR) y Router Designado de Respaldo (BDR), acelerando el tiempo de convergencia de la red y minimizando los mensajes de control sobre los canales de radio. Las interfaces se clasificaron bajo dos comportamientos:

**Interfaces Pasivas (Passive: Yes).** Aplicadas en interfaces hacia clientes (puntos finales), donde se desea anunciar la red conectada sin intercambiar paquetes OSPF.

**Interfaces Activas (Passive: No).** Usadas en los enlaces entre nodos OSPF, donde sí se establece intercambio de información de enrutamiento.

### 3.4. Fase 4: Simulación Preliminar en GNS3.

Para validar el comportamiento del protocolo OSPF antes de su implementación en la red real, se utilizó el simulador de redes GNS3, una herramienta de laboratorio por su capacidad para emular redes mikrotik de forma controlada.

#### 3.4.1. Configuración del Entorno de Laboratorio Virtual.

Para soportar este entorno, se desplegó una máquina virtual cuyas características base se documentan en la Figura 17 y se detallan a continuación:

Nombre de la VM GNS3 VM.

Sistema operativo Ubuntu (64-bit).

Memoria RAM asignada. 2048 MB.

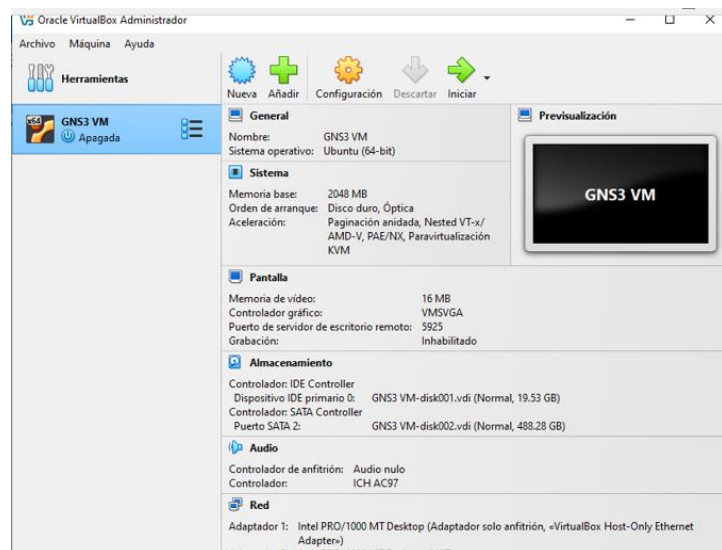
CPU. 1 vCore.

Aceleración habilitada. AMD-V, PAE/NX, para virtualización KVM.

Controlador gráfico VMSVGA.

**Figura 17**

*Máquina Virtual (Virtual Box).*



*Nota.* Máquina virtual necesaria para correr GNS3.



Asignación de métricas, se ajustaron manualmente los costos por interfaz, simulando enlaces de distintas capacidades para forzar rutas preferenciales.

**Pruebas de Conmutación y Convergencia.** Se simularon fallas en enlaces principales y se validó la conmutación automática hacia rutas secundarias junto con los tiempos de convergencia con herramientas como `/routing ospf neighbor` y `/ip route print`, esto permitió:

La formación de adyacencias estables entre todos los routers participantes.

Las rutas OSPF se propagaron correctamente.

Las interfaces loopback funcionaron como interface lógica.

La conmutación ante fallos fue inmediata y funcional, validando la lógica de redundancia planificada.

La simulación, aunque fundamental, no reemplaza la verificación real en red., por ello, el despliegue en la infraestructura real se documentó con pruebas técnicas y evidencias que consolidan los hallazgos encontrados a lo largo de todo el trabajo sobre los nodos de comunicación de la red.

### **3.5. Fase 5: Implementación Gradual del Protocolo OSPF.**

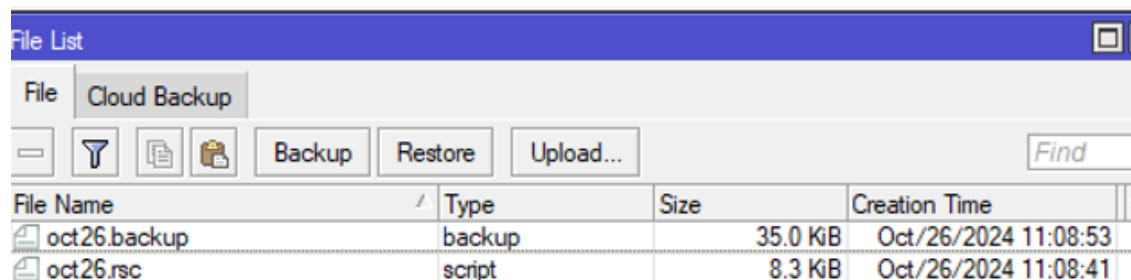
A continuación, se describen los pasos estructurados para el despliegue del protocolo de enrutamiento dinámico en la infraestructura de MARA.

#### ***3.5.1. Estrategia de Migración Progresiva y Respaldo de Configuraciones.***

Esta fase se desarrolló bajo una estrategia de integración progresiva, migrando zonas específicas de forma gradual. Antes de aplicar cualquier cambio, se ejecutó una copia de seguridad completa (backup) de la configuración existente en cada router mediante la herramienta Winbox. Este procedimiento preventivo garantizó la posibilidad de revertir los cambios ante cualquier eventualidad durante la migración (ver Figura 19).

**Figura 19**

*Pantallazo Mikrotik Guardado Backup.*



Nota. Ruta en Mikrotik: File list → Backup → Name → [apply].

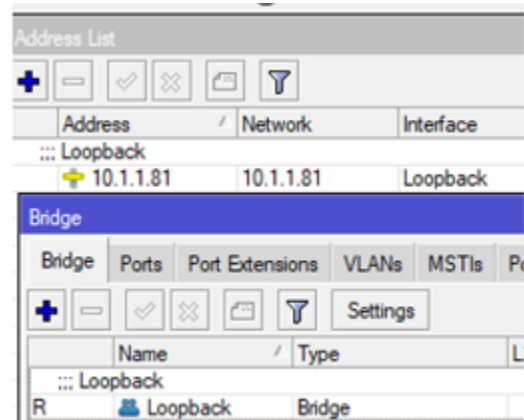
### 3.5.2. Pasos de Configuración en Equipos MikroTik.

El proceso de configuración se desarrolló en los siguientes pasos estructurados, aplicados de manera similar en todos los equipos involucrados.

**Creación de Interfaz Loopback.** En cada router se configuró un bridge virtual que operó como interfaz loopback. A esta interfaz se le asignó una dirección IP definida previamente en el plan de diseño, la cual sirvió como identificador del equipo en la red. Esto asegura la estabilidad lógica del dispositivo dentro del dominio OSPF (ver Figura 20).

**Figura 20**

*Pantallazo Winbox, Address List y Bridge.*

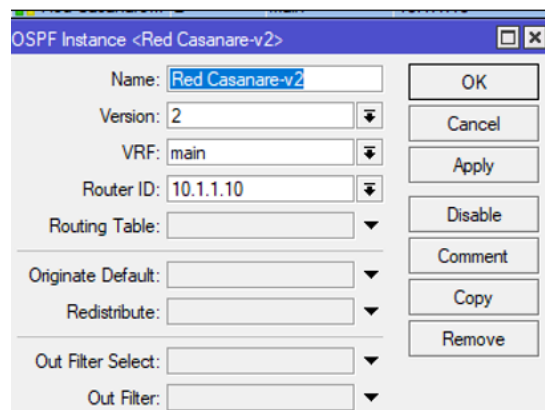


Nota. Ruta en winbox. Interfaces → Bridge → [+] → Crear Bridge Loopback → Apply.

**Configuración de la Instance.** Se mantuvo la redistribución de rutas en su estado predeterminado, ya que la red únicamente requiere intercambiar rutas OSPF entre routers. De esta forma se evita anunciar información de enrutamiento innecesaria y se mantiene un esquema más ordenado y fácil de administrar, sin embargo, este punto de la configuración queda disponible para futuras ampliaciones de la red, en caso de que sea necesario redistribuir otros tipos de rutas. Adicionalmente, se asignó la dirección IP de la interfaz loopback como Router ID en la instancia OSPF. Esto permite contar con un identificador lógico estable para el router, evitando que el enrutamiento dependa del estado de las interfaces físicas (ver Figura 21).

**Figura 21**

*Pantallazo Configuración OSPF Instance.*

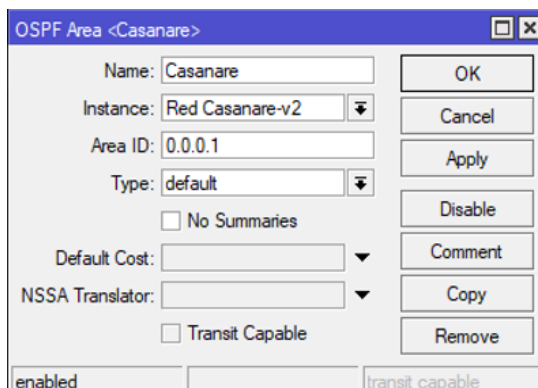


Nota: Elaboración propia. Ruta Mikrotik Routing → OSPF → Instances → [+].

**Definición del Área OSPF.** Se definió una única área denominada Área 1 (ID 0.0.0.1), como parte de la estrategia de crecimiento modular. Esta área está pensada para integrarse posteriormente a una Área 0 backbone, permitiendo escalar el dominio OSPF de forma jerárquica (ver Figura 22).

**Figura 22**

*Pantallazo Configuración Área ID.*



Nota. Ruta Mikrotik Routing → OSPF → Áreas → [+].

**Declaración de Interface Templates.** Para cada enlace se declararon las interfaces de red mediante templates y se definió el nombre de área (Casanare) y el tipo de red Point-to-Point (PTP), ya que acelera la convergencia al evitar el proceso de elección de DR (Designated Router) y BDR (Backup Designated Router) (ver Figura 23).

**Figura 23**

*Pantallazo Mikrotik Interfaces Templates.*

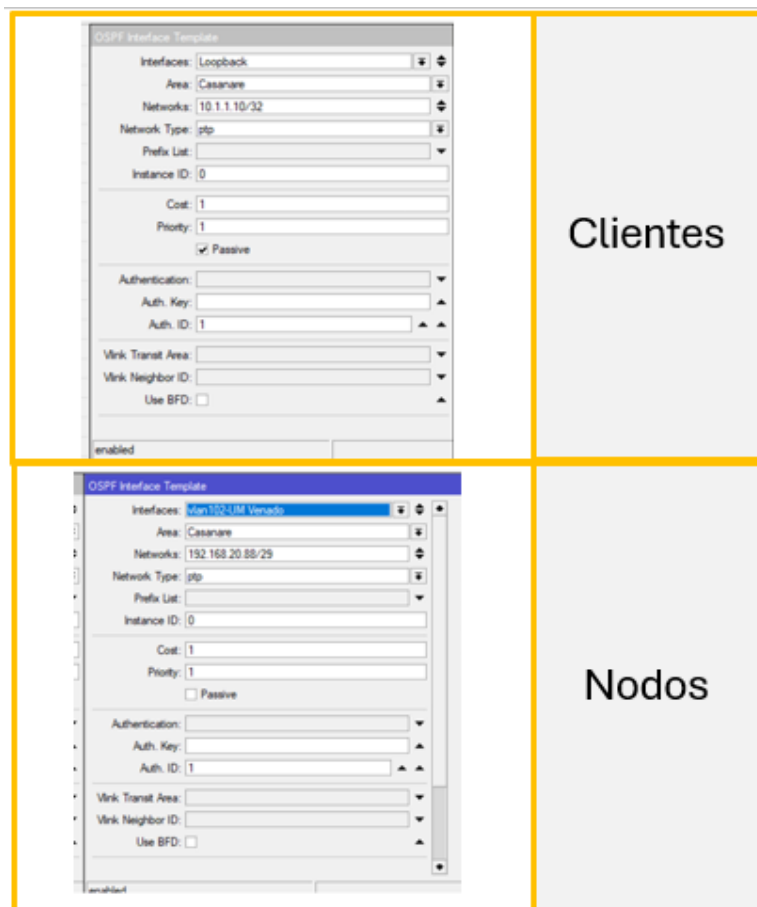
#	Interfaces	Area	Networks	Network Type	Cost	Priority	Auth
0	vlan102-UM Venado	Casanare-v2	192.168.20.88/29	ptp		1	1
1	Loopback	Casanare-v2	10.1.1.10/32	ptp		1	1

Nota: Ruta Mikrotik Routing → OSPF → Interface Templates → [+].

Adicionalmente, se configuraron interfaces en modo pasivo hacia los segmentos de los clientes finales ilustrado en la Figura 24. Esta técnica optimiza el rendimiento del router al evitar el envío de paquetes hello innecesarios y fortalece la seguridad en los bordes de la red, al no exponer el protocolo de enrutamiento hacia los usuarios.

**Figura 24**

*Interfaces Template, Asignación Propagación de Red.*



*Nota.* La interface passive yes solo anuncia la red, sin habilitar es activa en OSPF.

### **3.5.3. Gestión de Riesgos y Continuidad del Servicio.**

Para mitigar riesgos y evitar interrupciones en el servicio de cara al cliente final, durante el transcurso de la migración se mantuvieron temporalmente las rutas estáticas operando a la par de la convergencia OSPF. Con la implementación del protocolo dinámico confirmada en todos los routers de la red troncal, quedó completada la migración desde los esquemas estáticos. A continuación, se procede a validar la funcionalidad y estabilidad del enrutamiento dinámico mediante herramientas de monitoreo, pruebas de conectividad y verificación de tablas de rutas.

### 3.6. Fase 6: Verificación Operativa y Monitoreo.

Tras la implementación del protocolo OSPF en los 13 routers principales de la red troncal se estableció un plan de verificación técnica para asegurar la correcta propagación de rutas, la estabilidad de las adyacencias y la operatividad general del nuevo esquema de enrutamiento, las cuales fueron:

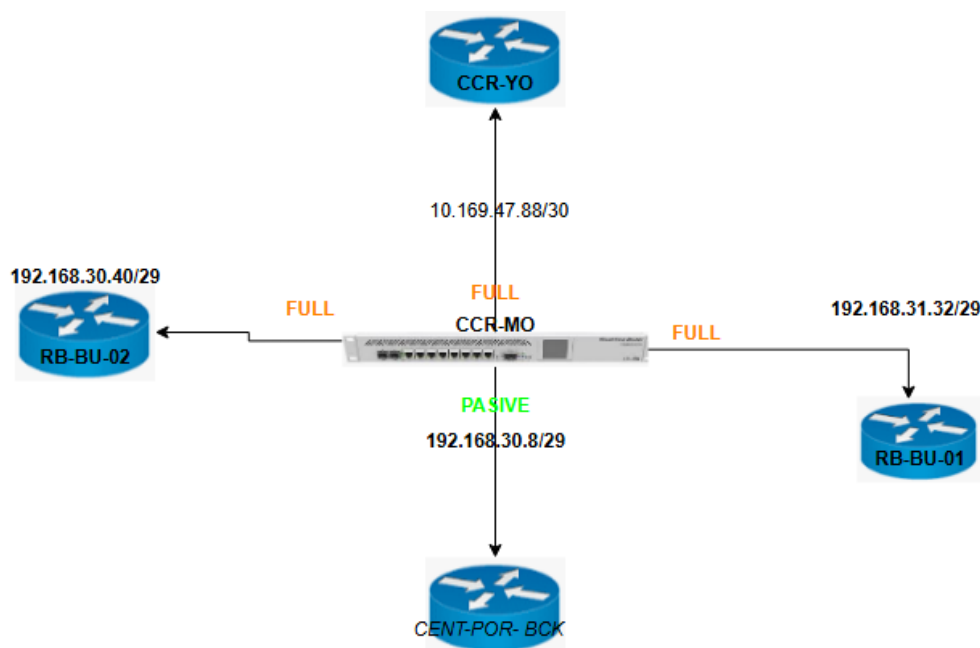
#### 3.6.1. Validación de Vecinos OSPF y Tablas de Enrutamiento.

**Verificación de Vecinos OSPF.** Se comprobó que cada router formara adyacencia únicamente con sus vecinos directos, según lo previsto por la topología PTP, Los parámetros verificados fueron dirección IP destino, estado interfaz y ID del router remoto.

La Figura 25 presenta el diagrama lógico del nodo CCR-MO, confirmando sus enlaces OSPF.

**Figura 25**

*Pantallazo Diagrama Conexiones a CCR-MO*

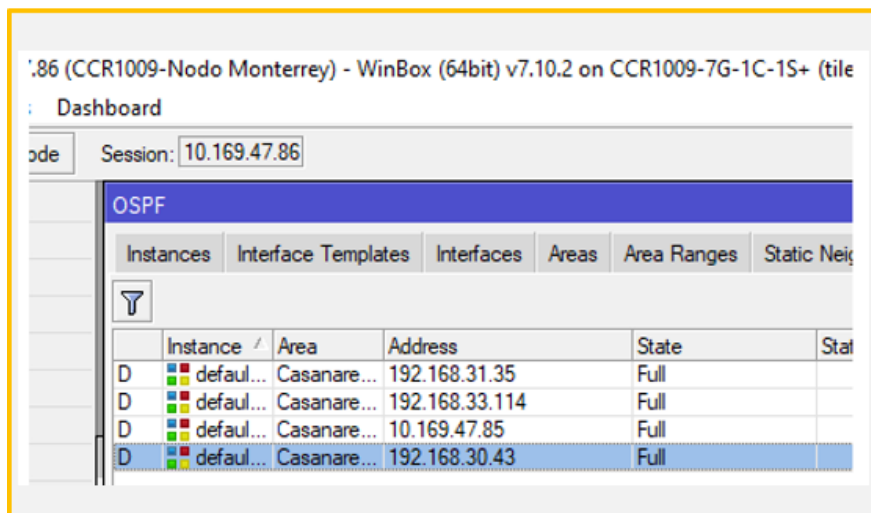


*Nota.* Diagrama de un CCR nodo con sus adyacencias a nivel de OSPF.

Este estado de adyacencia completa (Full) se constató operativamente en los equipos mediante la herramienta Winbox, como se evidencia en la Figura 26.

### Figura 26

*Pantallazo Winbox Estado OSPF.*



The screenshot shows the WinBox interface for OSPF configuration. The title bar indicates the device is CCR1009-7G-1C-1S+ and the software is WinBox (64bit) v7.10.2. The session ID is 10.169.47.86. The OSPF configuration page is active, showing a table of instances. All instances are in the 'Full' state.

Instance	Area	Address	State	Stat
D	defaul...	Casanare...	192.168.31.35	Full
D	defaul...	Casanare...	192.168.33.114	Full
D	defaul...	Casanare...	10.169.47.85	Full
D	defaul...	Casanare...	192.168.30.43	Full

*Nota.* Se confirma que OSPF aprende las rutas dinámicamente.

Como resultado de estas adyacencias, se confirmó el aprendizaje dinámico de la topología. La Figura 27 evidencia la tabla de enrutamiento, donde las redes aparecen marcadas con las banderas DAo (Dinámica, Activa, OSPF).

Figura 27

Pantallazo Aprendizaje rutas por OSPF “DAo”.

	Dest. Address	Gateway	Distance	Pref. Source
DAo	10.1.1.1/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.2/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.3/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.4/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.5/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.6/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.7/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.8/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.9/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.10/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.11/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.12/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.13/32	192.168.31.35%ether7-TR Buenavista-01	110	
DAo	10.1.1.14/32	192.168.30.43%ether4-TR Buenavista-02	110	
DAo	10.1.1.15/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.17/32	192.168.30.43%ether4-TR Buenavista-02	110	
DAo	10.1.1.18/32	192.168.31.35%ether7-TR Buenavista-01	110	
DAo	10.1.1.19/32	192.168.30.43%ether4-TR Buenavista-02	110	
DAo	10.1.1.20/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.21/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.23/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.24/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.25/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.26/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.27/32	192.168.31.35%ether7-TR Buenavista-01	110	
DAC	10.1.1.28/32	Loopback	0	
DAo	10.1.1.29/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.30/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.31/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.32/32	10.169.47.85%leop-tunnel43-EOIP CCR MC Yopal	110	
DAo	10.1.1.35/32	192.168.33.114%leop-tunnel3-EOIP CCR ODL Tome93	110	

*Nota.* Pantallazo winbox donde se observa las rutas aprendidas en OSPF.

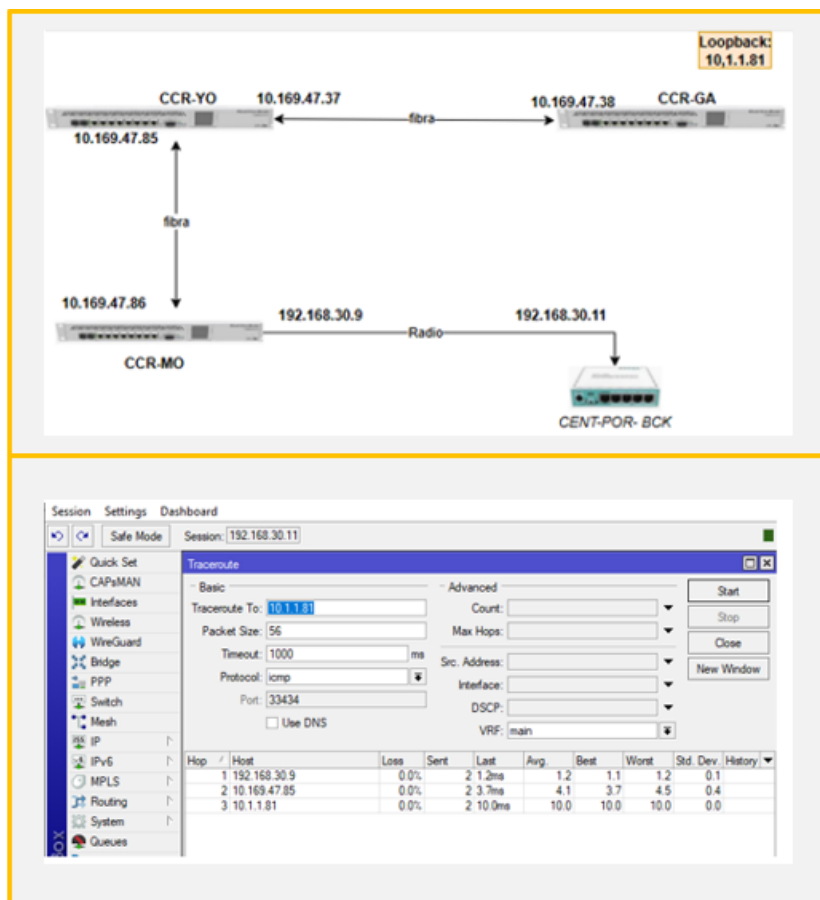
### 3.6.2. Pruebas de Conectividad Extremo a Extremo (Ping, Traceroute).

Con el comando traceroute, se certificó que el tráfico proveniente de cada cliente recorre los saltos definidos por el diseño, validando que el camino más corto efectivamente coincide con la menor sumatoria de costos OSPF configurados.

A manera de ejemplo, la Figura 28 muestra cómo la traza desde el cliente CENT-POR-BCK hasta CCR-GA sigue la ruta óptima aprendida dinámicamente, adaptándose a la topología.

Figura 28

Diagrama y Pantallazo desde Cliente a Interconexión Final.

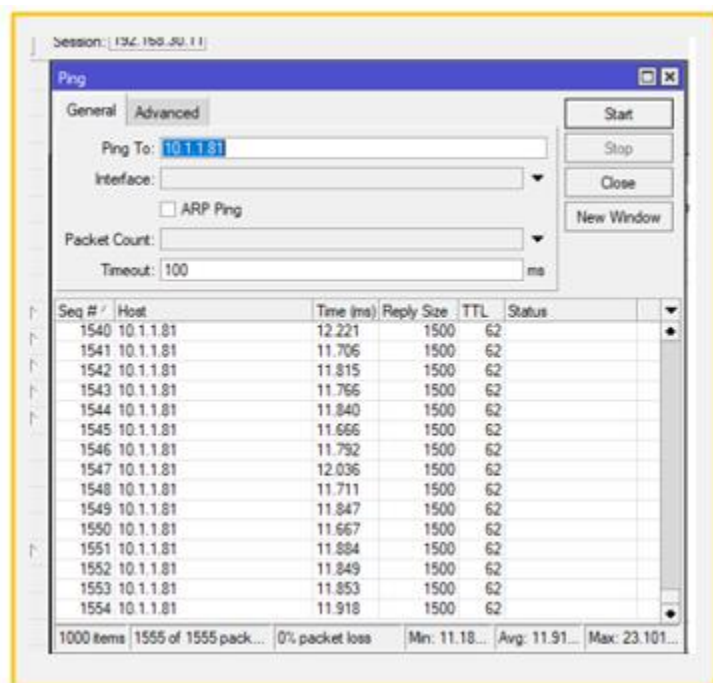


*Nota.* Cada salto corresponde a un router de la troncal, coincidiendo con el diseño.

Como parte de la validación técnica, se realizaron pruebas de estrés y conectividad (*ping* sostenido) desde los nodos de interconexión hacia múltiples routers. El propósito fue confirmar el alcance de las rutas, la ausencia de pérdida de paquetes y la estabilidad de la latencia en condiciones normales. La Figura 29 refleja el comportamiento hacia la IP 10.1.1.81 (nodo de interconexión CCR-GA).

**Figura 29**

*Pantallazo Ping desde Cent-Por-Bck a CCR-GA.*



*Nota.* Pantallazo winbox destino sin packet loss.

El análisis de esta prueba de estrés, basada en el envío de paquetes a través de una ruta híbrida (radioenlace y fibra óptica de 3 saltos), arrojó las siguientes métricas de rendimiento:

Pérdida de paquetes: 0%. El enlace muestra buena estabilidad; no se observó pérdida de paquetes de los 1000 paquetes enviados, lo cual es indicativo de la calidad de las rutas elegidas y de la modulación del enlace inalámbrico.

RTT promedio (Avg): 11.91 ms. Este valor es aceptable considerando que es un enlace híbrido (radio + fibra) y la cantidad de saltos. Se encuentra por debajo de los límites para redes WAN estables (Cisco, 2020; Bradner & McQuaid, 1999).

El RTT máximo registrado fue de 23.10 ms, mientras que el promedio se mantuvo alrededor de 11.91 ms.

RTT mínimo: 11.18 ms. Demuestra que en condiciones óptimas el canal tiene una latencia muy estable.

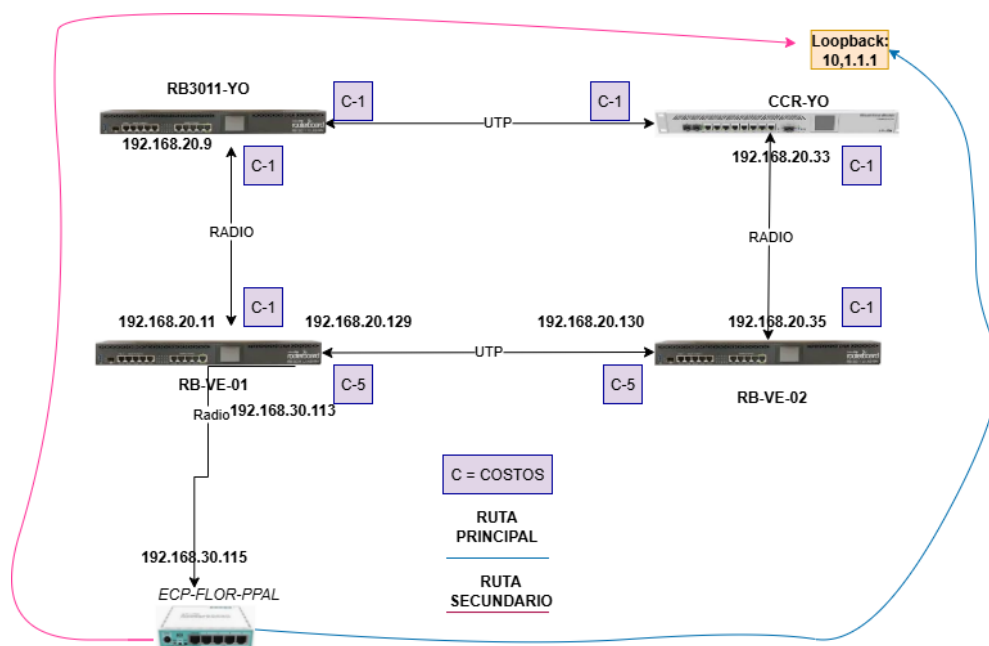
Estos resultados confirman que tenemos suficiente rendimiento y latencia, incluso en enlaces mixtos y de múltiples saltos. OSPF ha facilitado la configuración de caminos efectivos para asegurar la estabilidad en segmentos con enlaces de radio sin licencia que típicamente son más propensos a interferencias.

### 3.6.3. Pruebas de Conmutación Automática Ante Fallos Simulados.

Para validar el funcionamiento del diseño OSPF y su capacidad de recuperación ante fallos, se realizaron pruebas controladas de conmutación. Estas consistieron en la simulación de caídas de enlaces troncales, evaluando el comportamiento dinámico del enrutamiento ante cambios topológicos (ver Figura 30).

**Figura 30**

*Diagrama Ruta Principal y Backup para ECP-FLOR-PPAL.*

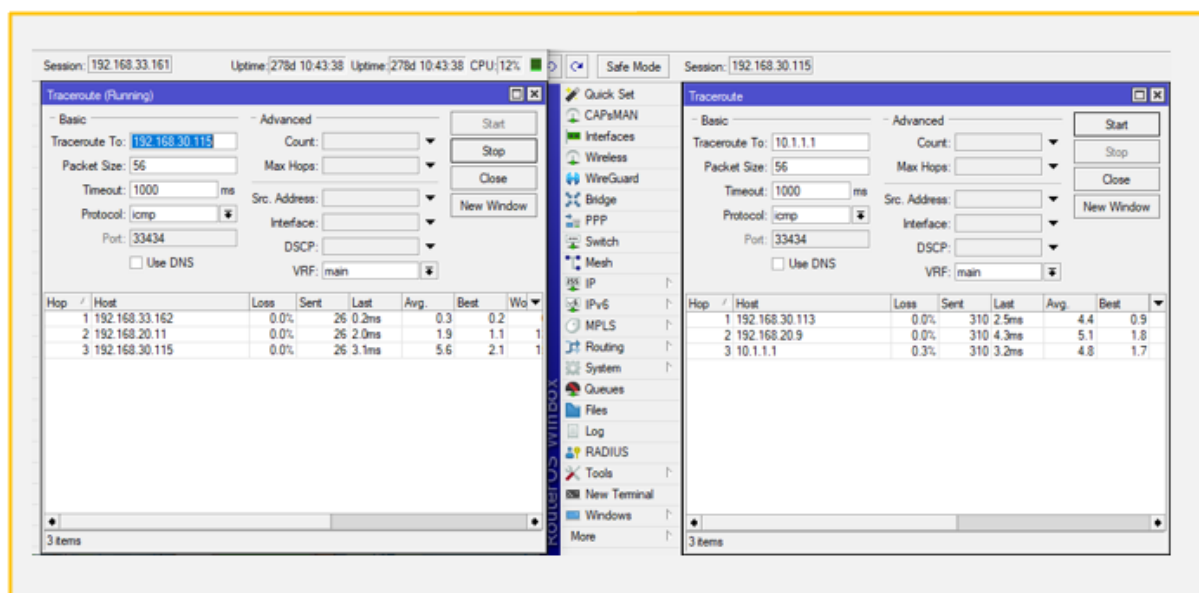


*Nota.* RB ECP-FLOR-PPAL muestra dos posibles caminos a CCR-YO.

En condiciones normales, la traza de paquetes confirmó que el tráfico fluía por la ruta principal (ver Figura 31).

**Figura 31**

*Pantallazo Tracert ECP-FLOR-PPAL, Ruta Principal.*

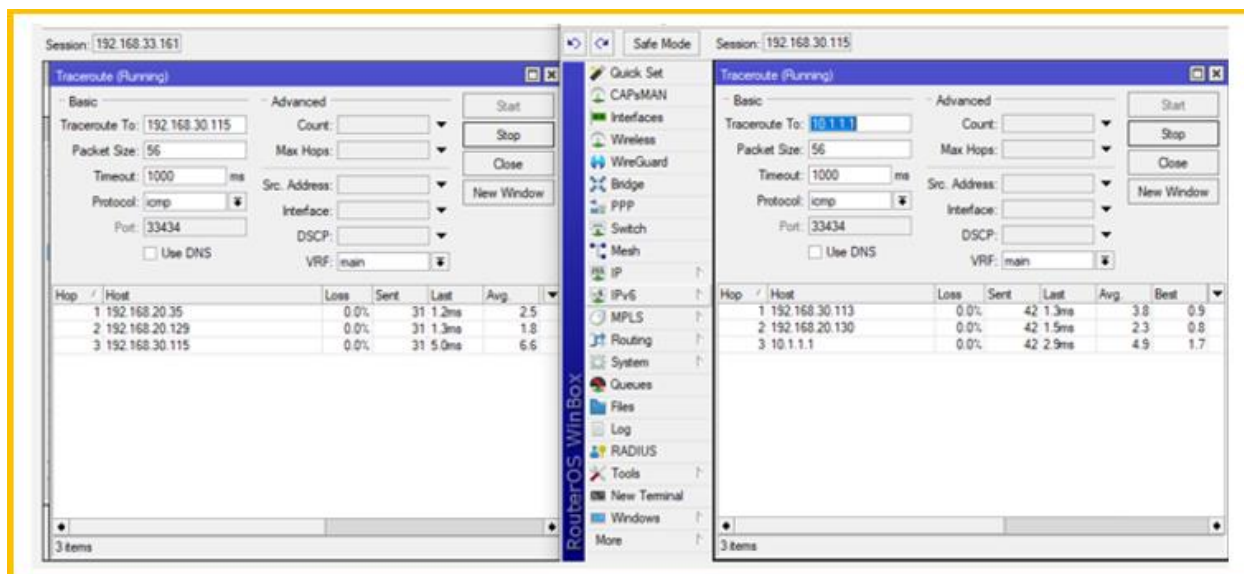


*Nota.* Pantallazos con tráfico en sentido bidireccional.

Al inducir la caída de la adyacencia principal, la salida del comando traceroute mostró un cambio inmediato en el orden de los saltos, comprobando que el tráfico fue redirigido automáticamente por la ruta de respaldo (ver Figura 32).

Figura 32

Pantallazo Tracert ECP-FLOR-PPAL, Ruta Alternativa.



*Nota.* Tráfico por ruta secundaria de forma automática al perder adyacencia por ruta principal.

La salida del comando traceroute mostró que el orden de los saltos cambió, lo que fue una prueba de que el tráfico se redirigió correctamente según la ruta de respaldo definida.

Ambos caminos confirman que la red se comportó en respuesta al evento como se esperaba, pasando el tráfico basado en las métricas tal como fueron configuradas con los siguientes resultados esperados.

OSPF percibió la pérdida de enlace, e inmediatamente comienza el proceso de recálculo de la topología interna en los routers afectados.

El router ejecuta el algoritmo SPF y selecciona automáticamente la ruta alternativa con la menor suma de costos disponibles, previamente definida en la planificación de métricas.

La reconvergencia típicamente toma unos pocos segundos, sin que los usuarios finales noten una interrupción del servicio.

No es necesario el soporte manual, ya que OSPF es capaz de adaptar la topología ante fallos, reduciendo la carga operativa y el tiempo de respuesta ante incidentes.

### **3.7. Fase 7: Optimización de Túneles EoIP y Evaluación Final.**

Una vez verificada la correcta operación del protocolo OSPF y estabilizados los enlaces principales, se realizaron ajustes orientados a mejorar la estabilidad y continuidad de la red.

#### ***3.7.1. Migración de Extremos de Túnel a Direcciones Loopback.***

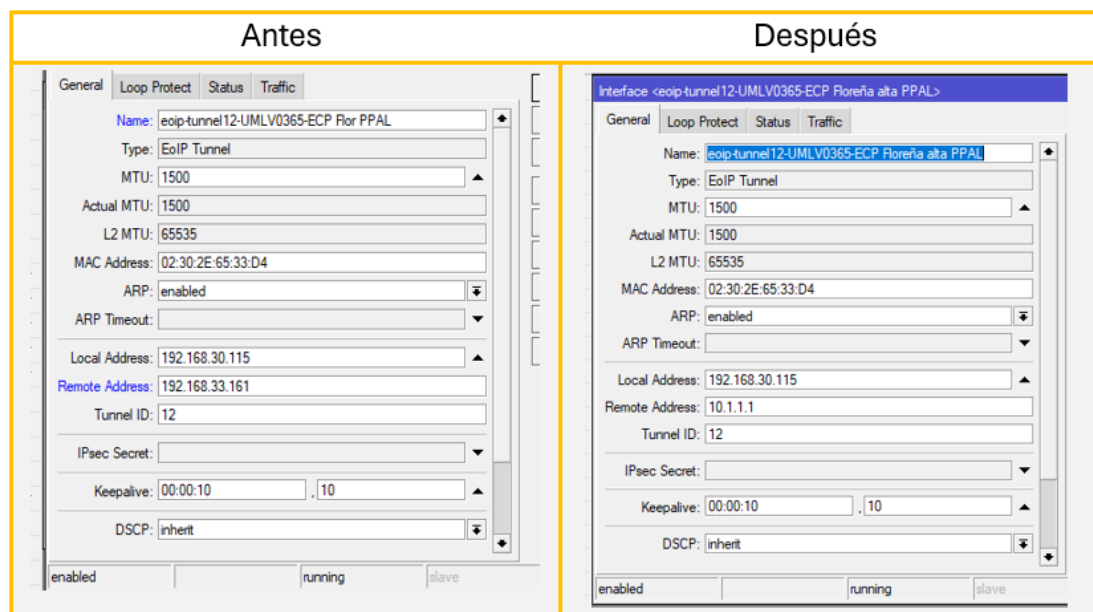
Inicialmente, los túneles estaban configurados utilizando direcciones IP de interfaces físicas como extremos, lo que provocaba su interrupción cuando alguno de los enlaces presentaba fallas.

Para corregir esta situación, se migraron los extremos de los túneles a direcciones IP estáticas configuradas en interfaces loopback de cada nodo y anunciadas mediante OSPF.

La Figura 33 ilustra el cambio realizado en la configuración del parámetro remote address de las interfaces de los túneles EoIP, evidenciando la transición desde una IP física hacia el direccionamiento lógico centralizado de la loopback.

**Figura 33**

Comparación Remote Address Interfaz Túnel EOIP.



*Nota.* Cambia el remote address por la dirección de loobpack.

### 3.7.2. Impacto en la Estabilidad y Disponibilidad del Servicio.

Con este cambio en la arquitectura de los túneles soportado sobre el nuevo enrutamiento OSPF, se lograron las siguientes mejoras operativas en la red.

**Flexibilidad en el Enrutamiento.** OSPF gestiona de manera automática la conmutación hacia enlaces alternativos disponibles, redirigiendo el tráfico sin necesidad de intervención manual.

**Estabilidad operativa.** Se reducen las interrupciones y la dependencia de configuraciones estáticas, optimizando la continuidad del servicio, al eliminar la dependencia de un único enlace físico,

**Mejor Administración.** Las interfaces lógicas permiten una mejor administración a nivel de rutas disminuyendo la caída de los túneles.

## 4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CIERRE DEL ESTUDIO

Este capítulo presenta los resultados obtenidos tras el rediseño de la red de la empresa MARA. La propuesta integró la implementación del protocolo OSPF, el comisionamiento de radioenlaces y la reorganización lógica de red. Estas acciones conjuntas garantizaron la reducción de intermitencias, la mejora en la estabilidad de los enlaces y una administración de infraestructura optimizada frente al esquema estático inicial.

### 4.1. Análisis de Resultados.

La información recolectada y procesada a lo largo del estudio permitió evidenciar mejoras tangibles en la operatividad de la red, agrupadas en las siguientes categorías:

#### 4.1.1. Resultados Cuantitativos: Métricas de Rendimiento Antes y Después.

El rediseño de la red permitió comprobar de manera objetiva los beneficios de migrar desde un esquema estático hacia una arquitectura dinámica basada en OSPF. Sin embargo, este proceso no se abordó de forma aislada, sino como parte de un conjunto de acciones complementarias que aseguraron la efectividad del resultado:

**Migración a OSPF.** La implementación de OSPF posibilitó una mejor gestión del enrutamiento, al automatizar la propagación de rutas, mejorar la convergencia ante fallos y reducir la dependencia de configuraciones manuales. Operativamente, esto permitió erradicar las rutas asimétricas, estabilizando los tiempos de tránsito bidireccionales de los paquetes, reduciendo el RTT promedio de la troncal a rangos óptimos de 11.91 ms y logrando un 0 % de pérdida de paquetes bajo pruebas de estrés.

**Comisionamiento y Mantenimiento de Radioenlaces.** Para garantizar la estabilidad de OSPF, se ejecutó un proceso exhaustivo de verificación en la capa física: ajustes de potencia, selección adecuada de canales, actualización de firmware y pruebas de rendimiento en radios

Mimosa. lo que permitió expandir la tasa de transferencia real (throughput) en nodos críticos, pasando de 70 Mbps a 140 Mbps estables, asegurando así la confiabilidad de los enlaces inalámbricos que constituyen la base del transporte de datos.

#### ***4.1.2. Resultados cualitativos: percepción de estabilidad y gestión***

Orientados a la percepción de mejoras en la estabilidad, facilidad de administración y organización de la red, se identificaron hallazgos cualitativos que refuerzan la efectividad del rediseño y complementan el análisis técnico:

**Facilidad de Gestión y Administración.** La migración a OSPF redujo la complejidad operativa asociada a la configuración estática, permitiendo que las rutas se ajusten automáticamente y se disminuyan tanto los tiempos de respuesta ante fallos, como la administración.

**Estabilidad Percibida en la Operación.** Los ajustes de comisionamiento en los radioenlaces contribuyeron a mejorar la confiabilidad del transporte de datos, reduciendo las interrupciones y manteniendo niveles de servicio más estables.

**Valor Replicable en Contextos Rurales.** Este proyecto ofrece una guía valiosa para pequeños emprendedores, demostrando cómo evolucionar de redes básicas a infraestructuras estables y escalables con recursos limitados.

#### ***4.1.3. Consolidado del Piloto: Fases y Hallazgos Clave.***

El piloto se ejecutó en tres etapas para validar el rediseño minimizando riesgos. La Tabla 5 resume este proceso, evidenciando que la simulación previa en GNS3 y la migración progresiva garantizaron la continuidad del servicio. Toda la documentación técnica (configuraciones, capturas de consola y pruebas de rendimiento) que sustenta estos resultados se encuentra detallada en el desarrollo metodológico del proyecto (Fases 4, 5 y 6).

**Tabla 5.***Fases y Resultados del Piloto.*

Fase	Descripción	Resultados Observados
Simulación en GNS3	Replicación de la topología con routers Mikrotik virtualizados, configuración de áreas y métricas OSPF.	Validación de propagación de rutas, formación de vecinos y reconvergencia automática ante fallos.
Migración progresiva en campo	Implementación gradual en segmentos de la red real, manteniendo rutas estáticas de respaldo.	Estabilidad en la transición, integración controlada de OSPF y rutas estáticas, reducción de riesgos de interrupción.
Despliegue en campo	Integración completa de OSPF en la red de MARA, con todos los nodos en operación.	Vecindades estables, redistribución correcta de rutas y conmutación ante fallos en pocos segundos, imperceptibles a los usuarios.

*Nota.* Elaboración propia.

## 4.2. Discusión.

### 4.2.1. Contraste con el Marco Teórico y Experiencias Referentes.

Los resultados obtenidos en la migración de la red confirman la importancia de implementar un protocolo de enrutamiento dinámico como OSPF en entornos rurales. Si comparamos como se encontraba la red al inicio, basado en rutas estáticas y segmentación limitada en algunas partes, con la red optimizada, se evidenció una reducción significativa en la latencia y la pérdida de paquetes, así como un incremento en el throughput y la confiabilidad de los enlaces.

Estas pruebas coinciden con lo expuesto en el marco teórico, donde OSPF se describe como un protocolo con la robustez y flexibilidad necesarias para responder a los cambios de la topología, asimismo, el comisionamiento de radioenlaces jugó un papel fundamental en la estabilidad general del sistema. permitiendo reducir las intermitencias, lo cual contribuyó el adecuado funcionamiento del protocolo.

#### 4.2.2. Análisis Estratégico Mediante Matriz DOFA.

El rediseño permitió crear una infraestructura más robusta. Para evaluar este impacto frente al entorno comercial y operativo, en la Tabla 6 se consolidan las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del proyecto.

**Tabla 6.**

*Matriz DOFA del rediseño de red MARA.*

Fortalezas	Oportunidades
Migración de rutas estáticas a OSPF, reduciendo carga administrativa y errores manuales.	Crecimiento sostenido de la demanda de conectividad en zonas rurales.
Comisionamiento de radioenlaces, mejorando la estabilidad y reduciendo caídas e intermitencias.	Posibilidad de integrar otros tipos de protocolos tales como MPLS.
Redundancia y rápida recuperación automática ante fallos de enlaces.	Creciente interés de pequeños ISPs por modelos replicables.
Debilidades	Amenazas
Dependencia de personal especializado para administrar OSPF.	Interferencias en radioenlaces por operar en bandas no licenciadas.
Presupuesto para renovar equipos con mejor tecnología.	Competencia de grandes operadores con infraestructura más robusta.
Ausencia de un sistema de gestión robusto para automatizar monitoreo y configuración.	Factores ambientales (lluvias intensas, tormentas eléctricas) que afectan la continuidad de los enlaces.

*Nota.* Elaboración propia basada en los resultados de la implementación y el diagnóstico técnico.

El análisis de esta matriz demostró que, aunque la red rediseñada ofrece fortalezas críticas como la escalabilidad, la redundancia y una mayor eficiencia operativa, persisten retos relacionados con la dependencia de personal técnico especializado y factores externos como las interferencias climáticas en bandas libres.

#### 4.2.3. Lecciones Aprendidas y Factores Críticos de Éxito.

En términos operativos, la simulación previa en GNS3 resultó estratégica, ya que permitió validar la formación de adyacencias OSPF, la propagación de rutas y la conmutación

ante fallos antes de su implementación. Esto minimizó riesgos y facilitó una transición gradual, alineada con buenas prácticas de ingeniería de redes.

La experiencia práctica dejó como lección fundamental que comenzar con un diseño estructurado, invertir tiempo en el comisionamiento técnico y aplicar buenas prácticas desde el principio (antes de encender un protocolo dinámico) evita problemas futuros de saturación y reduce drásticamente la complejidad operativa. De igual forma, se evidenció la necesidad imperativa de acompañar el diseño técnico con estrategias de formación continua para el personal operario de la red.

### **4.3. Conclusiones.**

#### ***4.3.1. Respuesta a la Pregunta de Investigación.***

Al iniciar el presente estudio, se planteó el interrogante de cómo el diseño e implementación de OSPF optimizaría la convergencia y estabilidad de los servicios en zonas rurales. El desarrollo de este proyecto permitió confirmar, teórica y operativamente, la respuesta a dicha interrogante: la migración desde un esquema estático hacia una arquitectura OSPF, respaldada por un exhaustivo comisionamiento físico, garantiza efectivamente la convergencia automática ante caídas, aísla los dominios de falla y dota a la red de la estabilidad técnica necesaria para soportar el incremento de tráfico.

#### ***4.3.2. Cumplimiento de los Objetivos.***

En relación con el diagnóstico de la red, se comprobó que la infraestructura inicial presentaba múltiples limitaciones: configuraciones estáticas, falta de segmentación, y revisión en el rendimiento de los radioenlaces.

La propuesta de una arquitectura con OSPF permitió implementar segmentación y control de dominios de broadcast. Esto redujo la carga administrativa, mejorando la eficiencia en el enrutamiento y fortaleció la red.

La reconfiguración de túneles hacia direcciones loopback contribuyó eficazmente a incrementar la disponibilidad, ya que garantizó la continuidad de la conectividad aun frente a fallas físicas en uno de los enlaces.

Las validaciones técnicas y las simulaciones en GNS3 (objetivo específico 4) ratificaron el funcionamiento óptimo de los caminos redundantes y las métricas de costo establecidas.

El comisionamiento y establecer un protocolo de comisionamiento, permitió identificar y establecer buenas prácticas para los enlaces que operan en bandas no licenciadas.

#### ***4.3.3. Contribuciones Técnicas y Académicas del Estudio.***

Como contribución al entorno académico e industrial, este trabajo no solo cumplió con los objetivos de mejorar la red de MARA, sino que también generó procedimientos y lecciones que otros pequeños proveedores rurales (ISPs) pueden usar como modelo de referencia. Migrar a OSPF prepara el escenario tecnológico para evolucionar en el futuro hacia arquitecturas avanzadas como MPLS (Multiprotocol Label Switching), siendo este proyecto la base conceptual y técnica para un crecimiento ordenado y escalable de los servicios de telecomunicaciones rurales en el país.

#### **4.4. Recomendaciones.**

##### ***4.4.1. Para la Operación y Mantenimiento de la Red MARA.***

**Mantenimiento Preventivo y Comisionamiento Periódico de Radioenlaces.** La estabilidad de OSPF depende en gran medida de la calidad de los enlaces. Por ello, se aconseja

realizar verificaciones periódicas de parámetros como RSL, latencia y throughput, aplicando protocolos técnicos que incluyan ajuste de potencias y optimización del espectro.

**Monitoreo Constante y Documentación.** Implementar sistemas de monitoreo centralizado (The Dude, Zabbix o similares) y rutinas de inspección periódica para detectar fallas tempranamente. Asimismo, es vital mantener la documentación técnica actualizada respecto a topologías, configuraciones y cambios aplicados.

**Actualización MikroTik.** Se recomienda que todos los equipos incorporados a la red cuenten con las versiones de firmware y sistema operativo más recientes. En el caso de MikroTik, se sugiere mantener RouterOS actualizado a versiones mayores a la v7, ya que es la rama que recibe soporte completo y parches de seguridad, a diferencia de la versión v6 que se considera obsoleta (MikroTik Ltd., 2023).

#### ***4.4.2. Para la Replicabilidad del Modelo en otros Contextos Rurales.***

**Diseño Estructurado Desde el Inicio.** Al abordar nuevos proyectos de red, es fundamental aplicar un modelo jerárquico con segmentación lógica, planificación de direccionamiento IP mediante VLSM y control de dominios de broadcast.

**Capacitación Continua del Personal Técnico.** Se recomienda fortalecer las competencias de los operarios en protocolos de enrutamiento dinámico, enrutamiento avanzado en MikroTik y herramientas de simulación, para agilizar la solución de incidencias en campo.

#### ***4.4.3. Para Futuras Líneas de Investigación y Mejora Tecnológica.***

**Adopción Gradual de Mejoras.** Para futuras expansiones, se recomienda aplicar siempre fases progresivas de implementación (pruebas en simuladores, pilotos controlados y despliegue escalonado).

**Crecimiento de la Red.** Para la proyección a mediano plazo, se recomienda planificar una expansión modular mediante la creación de nuevas áreas OSPF, integrándose a un "Área 0" central. Esto no solo mejora la eficiencia del enrutamiento de cara al futuro, sino que preparará la infraestructura para el despliegue de redes MPLS.

## Referencias Bibliográficas

- Asociación para el Progreso de las Comunicaciones [APC]. (2018). *Bottom-up connectivity strategies: community networks in the global South*.  
<https://www.apc.org/en/pubs/bottom-connectivity-strategies>
- Boyanov, P., Stoyanov, S., Hristov, H., Fetfov, O., & Trifonov, T. (2023). Security routing simulation in the local area network of academic departments using a link-state routing protocol – OSPF. *Journal Scientific and Applied Research*, 11(1), 47–58.  
<https://doi.org/10.46687/jsar.v11i1.212>.
- Bradner, S., & McQuaid, J. (1999). Benchmarking methodology for network interconnect devices (RFC 2544). Internet Engineering Task Force (IETF).  
<https://doi.org/10.17487/RFC2544>.
- Cisco Systems. (2020a). *Internetworking technology handbook*. Cisco Press.  
<https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/internetworking/technology/handbook>.
- Cisco Systems. (2020b). *OSPF design guide*. Cisco Systems.  
<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/open-shortest-path-first-ospf/7039-1.html>.
- Cisco Systems. (2020c). *Troubleshooting switch duplex and speed mismatches*. Cisco Systems.  
<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/ethernet/8225-10.html>.
- Cisco Systems. (2021, 7 de julio). *OSPF: Frequently asked questions*. Cisco Support Documentation. <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/open-shortest-path-first-ospf/13685-9.html>.
- Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC). (2022, 26 de mayo). Resolución 6755 de 2022: Por la cual se definen condiciones regulatorias diferenciales para promover la

conectividad a Internet en zonas rurales, apartadas y de difícil acceso en Colombia.

Diario Oficial de la República de Colombia.

[https://sidn.ramajudicial.gov.co/SIDN/NORMATIVA/TEXTOS\\_COMPLETOS/8\\_RESOLUCIONES/RESOLUCIONES%202022/CRC%20Resoluci%C3%B3n%206755%20de%202022.pdf](https://sidn.ramajudicial.gov.co/SIDN/NORMATIVA/TEXTOS_COMPLETOS/8_RESOLUCIONES/RESOLUCIONES%202022/CRC%20Resoluci%C3%B3n%206755%20de%202022.pdf)

Cortés, C. L., Montaña-Argote, M. A., Osorio, A. M., & Guerrero-González, N. (2021). Diseño de una red backhaul autogestionable para conectividad rural en Sucre — Colombia. *Revista UIS Ingeniería*, 20, 67–78. <https://doi.org/10.18273/0123456789>.

Forouzan, B. A. (2017). *Data communications and networking* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Ioannou, N., Ntranos, P., & Katsaros, D. (2020). *A comparative techno-economic evaluation of hybrid rural broadband architectures*. *Telecommunications Policy*, 44(8), 101978. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.101978>.

International Telecommunication Union (ITU). (2020). *Handbook on satellite communications* (3rd ed.). ITU. <https://www.itu.int/en/publications>.

MikroTik. (2022). *Bandwidth test*. MikroTik Documentation. <https://help.mikrotik.com/docs/display/ROS/Bandwidth+Test>.

MikroTik Ltd. (2023). *RouterOS: The operating system of MikroTik devices*. <https://mikrotik.com/software>.

Mimosa Networks. (2020). *Best practices for wireless backhaul alignment*. Mimosa Networks. <https://mimosa.co>.

Mimosa Networks. (s. f.). *Stealth Broadband connects rural communities* [Case study]. Mimosa Networks Inc. <https://mimosa.co/resources/case-studies>.

- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones [MinTIC]. (2026). Plan TIC 2022-2026: Conectividad y transformación digital para Colombia. Gobierno de Colombia. <https://www.mintic.gov.co>.
- Prieto-Egido, I., Martínez, A., & Robles, A. (2018). *Techno-economic analysis of small rural operators to bring broadband services to isolated communities*. *Telecommunications Policy*, 42(10), 810–823. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2018.08.005>.
- Stallings, W. (2017). *Data and computer communications* (10.<sup>a</sup> ed.). Pearson
- Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2011). *Computer networks* (5th ed.). Pearson.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT]. (2020). Handbook on satellite communications (3.<sup>a</sup> ed.). <https://www.itu.int/en/publications>.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT]. (2021). Telecommunications/ICTs for rural and remote areas (Output Report on ITU-D Question 5/1, 2018–2021). [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG01.05-2021-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG01.05-2021-PDF-E.pdf).
- Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT]. (2023). Measuring digital development: Facts and Figures 2023. <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/facts-figures-2023>.
- Yang, Y., Sung, K. W., Wosinska, L., & Chen, J. (2014). Hybrid fiber and microwave protection for mobile backhauling. *Journal of Optical Communications and Networking*, 6(10), 869–878. <https://doi.org/10.1364/JOCN.6.000869>.