

UNIVERSIDAD MARIANO GÁLVEZ DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
CURSO: TELECOMUNICACIONES - JORNADA PLAN SÁBADOS



PROYECTO FINAL
DISEÑO DE UNA SOLUCIÓN DE CONECTIVIDAD, MONITOREO Y DISTRIBUCIÓN
DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES PARA MAX-PRO2
(ZONA 10, CIUDAD DE GUATEMALA Y SAN MANUEL CHAPARRÓN, JALAPA)

INTEGRANTES DEL GRUPO Y PORCENTAJE DE TRABAJO

ELDER ESTUARDO GARCÍA PACHECO - 50 %

GABRIEL ENRIQUE PÉREZ MEZA - 50 %

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2026

2. Índice

La columna «Responsable» indica el integrante del grupo que desarrolló cada sección, conforme a lo solicitado en el planteamiento del proyecto final. La numeración de páginas inicia después de la carátula.

N.º	Sección	Responsable	Pág.
1	Carátula	Ambos	—
2	Índice	Ambos	1
3	Desarrollo del trabajo	Ambos	3
3.1	Solución de conectividad Punto A – Punto B	Elder Estuardo García Pacheco	3
3.1.1	Medio físico seleccionado	Elder Estuardo García Pacheco	3
3.1.2	Ruta física del enlace (plano)	Elder Estuardo García Pacheco	4
3.1.3	Puntos de repotencia de los tramos ópticos	Elder Estuardo García Pacheco	5
3.1.4	Routers seleccionados en los puntos A y B	Elder Estuardo García Pacheco	6
3.1.5	Costos de la interconexión	Elder Estuardo García Pacheco	7
3.1.6	Justificación técnica	Elder Estuardo García Pacheco	7
3.1.7	Esquema de ubicación de los equipos en el rack	Elder Estuardo García Pacheco	8
3.1.8	Servicios de monitoreo	Elder Estuardo García Pacheco	9
3.2	Solución de conectividad entre los edificios del Punto B	Gabriel Enrique Pérez Meza	10
3.2.1	Medio físico seleccionado	Gabriel Enrique Pérez Meza	10
3.2.2	Ruta física del cable (plano)	Gabriel Enrique Pérez Meza	10
3.2.3	Equipos utilizados en ambos edificios	Gabriel Enrique Pérez Meza	11
3.2.4	Costos de la interconexión	Gabriel Enrique Pérez Meza	12
3.2.5	Justificación técnica	Gabriel Enrique Pérez Meza	12
3.2.6	Esquema de ubicación de los equipos en el rack	Gabriel Enrique Pérez Meza	13
3.3	Planteamiento de solución de sitios Wireless	Ambos	15
3.3.1	Frecuencias seleccionadas	Elder Estuardo García Pacheco	15
3.3.2	Equipos seleccionados	Elder Estuardo García Pacheco	17
3.3.3	Planos de ubicación de los AP	Elder Estuardo García Pacheco	17
3.3.4	Costos de la solución Wireless	Elder Estuardo García Pacheco	21
3.3.5	Estrategia DFS en el Punto A	Gabriel Enrique Pérez Meza	21
3.4	Resumen consolidado de costos	Ambos	24
4	Conclusiones	Ambos	25
5	Reseña personal de cada integrante	Cada integrante	26
6	Referencias	Ambos	27

Índice de figuras y tablas

Figuras

N.º	Título	Pág.
1	Plano georreferenciado de la ruta de fibra óptica y del respaldo por microondas	4
2	Potencia óptica a lo largo del enlace, con y sin repotencia	5
3	Topología lógica de la solución (Punto A, red del carrier y Punto B)	6
4	Elevación de racks en el Punto A (42U) y en el Punto B, Edificio 1 (24U)	8
5	Alcance máximo a 10 Gb/s por medio de transmisión frente a la distancia requerida	10
6	Plano de conjunto de la interconexión entre edificios y corte transversal de la zanja	11
7	Elevación de los gabinetes del Punto B: Edificio 1 (24U) y Edificio 2 (12U)	13
8	Plan de canales en la banda de 5 GHz para los puntos A y B	16
9	Throughput estimado por cliente 2x2 según banda y ancho de canal frente al requisito	16
10	Ubicación de los AP y cobertura predictiva en 5 GHz, Punto A (Edificio Las Margaritas, zona 10)	18
11	Ubicación de los AP y cobertura predictiva en 5 GHz, Punto B, Edificio 1	19
12	Ubicación de los AP y cobertura predictiva en 5 GHz, Punto B, Edificio 2	20
13	Flujo de la estrategia DFS ante la detección de un radar en el Punto A	23
14	Distribución de costos del primer año por solución	24

Tablas

N.º	Título	Pág.
1	Ruta y tramos del enlace de fibra óptica Punto A – Punto B	4
2	Presupuesto óptico por tramo	5
3	Costos de la interconexión Punto A – Punto B (USD)	7
4	Asignación de unidades del rack de 42U en el Punto A	9
5	Costos de la interconexión entre los edificios del Punto B (USD)	12
6	Asignación de unidades del gabinete de 24U, Edificio 1	14
7	Asignación de unidades del gabinete de 12U, Edificio 2	14
8	Plan de canales y potencia de transmisión por Access Point	17
9	Ubicación y cobertura de los AP en el Punto A	19
10	Ubicación y cobertura de los AP en el Punto B, Edificio 1	20
11	Ubicación y cobertura de los AP en el Punto B, Edificio 2	21
12	Costos de la solución Wireless en ambos sitios (USD)	21
13	Resumen consolidado de costos del proyecto (USD)	24

3. Desarrollo del trabajo

3.1 Solución de conectividad Punto A – Punto B

Desarrollado por: Elder Estuardo García Pacheco.

El Punto A corresponde a las oficinas centrales de Max-Pro2, en el sexto nivel del Edificio Las Margaritas, zona 10 de la ciudad de Guatemala, donde se encuentra el centro de datos (nube de virtualización privada, SAN, SAN de respaldo, firewall, routers y switches). El Punto B corresponde a la planta de generación fotovoltaica ubicada en la cabecera municipal de San Manuel Chaparrón, Jalapa, en las coordenadas 14.521165, -89.764833. La distancia en línea recta entre ambos puntos es de aproximadamente 80 km; por carretera, siguiendo la CA-1 Oriente y la ruta El Progreso – Monjas, es de aproximadamente 175 km (EcuRed, s. f.), valor utilizado para dimensionar el enlace.

3.1.1 Medio físico seleccionado

Se selecciona **fibra óptica monomodo** (SMF, ITU-T G.652.D) arrendada a un carrier nacional (Tigo Business o Claro Empresas) bajo la modalidad de red privada virtual de capa 3 (**MPLS L3VPN**), con capacidad de 100 Mbps simétricos escalable a 1 Gbps y un acuerdo de nivel de servicio (SLA) de 99.9 % de disponibilidad y pérdida de paquetes inferior a 0.1 %. Para alcanzar el objetivo de 0 % de pérdida de paquetes, el enlace primario se complementa con un **radioenlace de microondas licenciado en 7 GHz**, provisto por el mismo carrier como ruta de respaldo, y con detección de falla por BFD e IP SLA en los routers, de modo que la conmutación al respaldo ocurra en menos de un segundo sin pérdida perceptible de sesiones.

Se descartó un radioenlace propio como medio primario porque los 175 km de trayecto, sobre el terreno montañoso de Santa Rosa, Jutiapa y Jalapa, requerirían al menos tres estaciones repetidoras con torre, energía y licencias de espectro propias. La fibra óptica ofrece una tasa de error de bit del orden de 10^{-12} , inmunidad a la interferencia electromagnética y a la lluvia, y un ancho de banda escalable, características críticas para los servicios del cliente: control de flujo eléctrico, bases de datos y monitoreo.

3.1.2 Ruta física del enlace

El carrier aprovecha la canalización existente a lo largo de la red vial. La ruta primaria sigue la CA-1 Oriente hasta Jutiapa (km 118), continúa hasta El Progreso, Jutiapa (km 128)

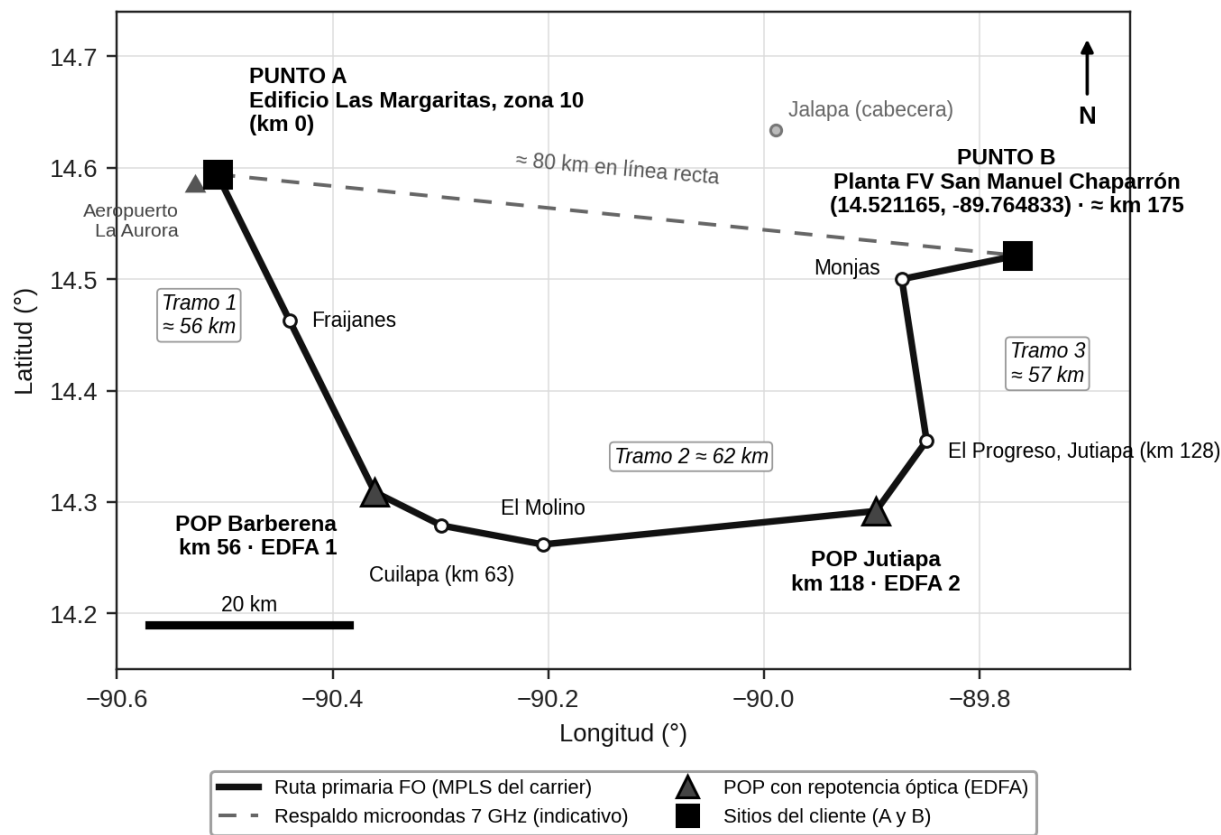
y toma la ruta departamental hacia Monjas y San Manuel Chaparrón (AGEXPORT, 2024). La Tabla 1 resume los tramos y la Figura 1 presenta el plano georreferenciado de la ruta.

Tabla 1. Ruta y tramos del enlace de fibra óptica Punto A – Punto B

Tramo	Desde	Hasta	Distancia	Observación
1	Punto A: Edificio Las Margaritas, zona 10 (km 0)	POP Barberena, Santa Rosa (km 56, CA-1 Oriente)	≈ 56 km	Pasa por el POP metropolitano del carrier (zona 9) y Fraijanes. Repotencia EDFA 1.
2	POP Barberena	POP Jutiapa (km 118, CA-1 Oriente)	≈ 62 km	Pasa por Cuilapa y El Molino. Repotencia EDFA 2.
3	POP Jutiapa	Punto B: planta FV, San Manuel Chaparrón (≈ km 175)	≈ 57 km	Ruta El Progreso – Monjas – San Manuel Chaparrón; última milla en fibra hasta la planta.
Longitud total aproximada de la ruta			≈ 175 km	

Fuente: elaboración propia con base en EcuRed (s. f.) y AGEXPORT (2024).

Figura 1. Plano georreferenciado de la ruta de fibra óptica y del respaldo por microondas



Fuente: elaboración propia con base en las coordenadas del planteamiento del proyecto, EcuRed (s. f.) y AGEXPORT (2024).

3.1.3 Puntos de repotencia de los tramos ópticos

Una fibra G.652.D presenta una atenuación típica de 0.20 a 0.25 dB/km en la ventana de 1550 nm (ITU-T, 2016). Si los 175 km se cubrieran en un solo tramo, la pérdida total

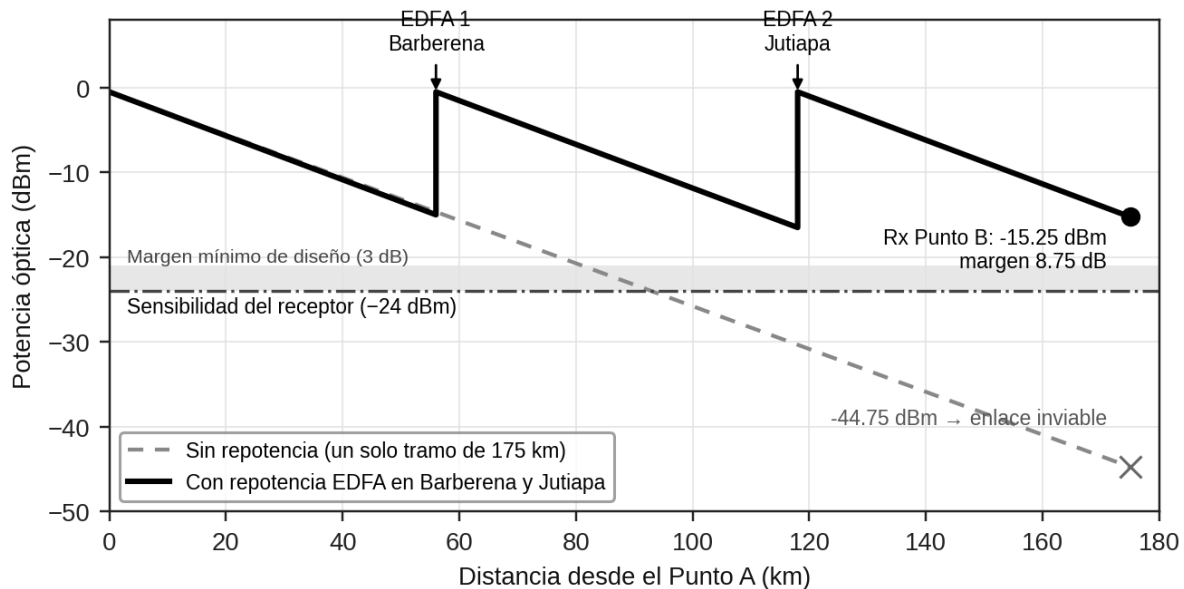
superaría los 44 dB y la potencia recibida quedaría muy por debajo de la sensibilidad de cualquier transceptor comercial (Figura 2). Por ello se definen **dos puntos de repotencia con amplificadores ópticos EDFA** (Erbium-Doped Fiber Amplifier) en los POP del carrier en **Barberena (km 56)** y **Jutiapa (km 118)**, lo que divide el enlace en tres tramos de 56, 62 y 57 km, todos dentro del alcance de la óptica de larga distancia clase ZR (80 km). La Tabla 2 resume el presupuesto óptico con criterios conservadores: 0.25 dB/km incluidos empalmes, 0.5 dB por conector, potencia de transmisión de 0 dBm, sensibilidad de -24 dBm y margen mínimo de 3 dB. Como el servicio se contrata administrado, los amplificadores forman parte de la infraestructura del carrier y no del CAPEX del cliente.

Tabla 2. Presupuesto óptico por tramo

Tramo	Longitud	Pérdida en fibra	Conectores	Potencia Tx	Potencia Rx	Margen
1: Punto A – Barberena	56 km	14.00 dB	1.0 dB	0 dBm	-15.00 dBm	9.00 dB
2: Barberena – Jutiapa	62 km	15.50 dB	1.0 dB	0 dBm	-16.50 dBm	7.50 dB
3: Jutiapa – Punto B	57 km	14.25 dB	1.0 dB	0 dBm	-15.25 dBm	8.75 dB
Sin repotencia (referencia)	175 km	43.75 dB	1.0 dB	0 dBm	-44.75 dBm	-20.75 dB

Fuente: elaboración propia con base en ITU-T (2016).

Figura 2. Potencia óptica a lo largo del enlace, con y sin repotencia



Fuente: elaboración propia con base en ITU-T (2016).

3.1.4 Routers seleccionados en los puntos A y B

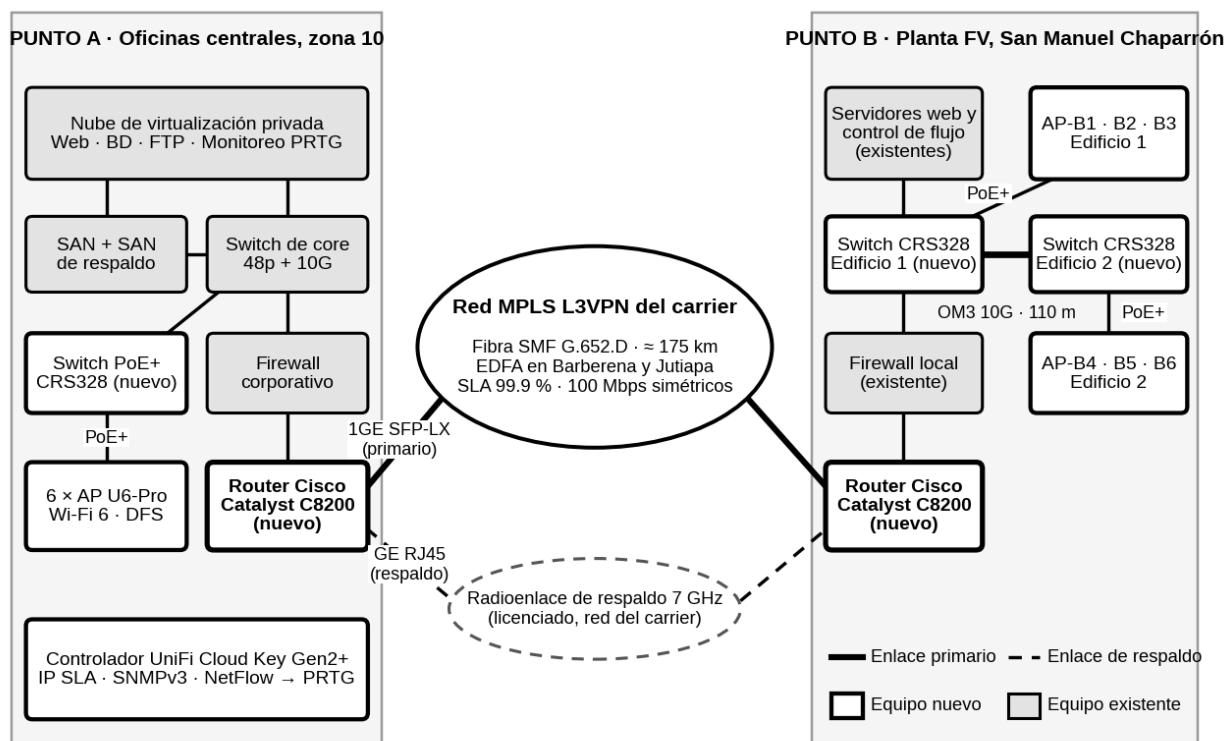
En ambos extremos se instala un router de borde que termina el servicio WAN del carrier y enruta hacia la LAN de cada sitio. Se selecciona el **Cisco Catalyst C8200-1N-4T**, equipo

vigente que sustituye a la serie ISR 4300, cuya fecha final de venta fue el 7 de noviembre de 2023 (Cisco Systems, 2024a). Sus características relevantes son (Cisco Systems, 2024b):

- Cuatro puertos WAN Gigabit Ethernet integrados, dos SFP para fibra y dos RJ45 para cobre, que permiten terminar el enlace primario de fibra y el de respaldo por microondas sin módulos adicionales.
- Hasta 3.8 Gbps de reenvío IPv4 y hasta 1 Gbps de tráfico cifrado IPsec, holgado para el enlace de 100 Mbps y su crecimiento a 1 Gbps.
- Firewall basado en zonas, VPN IPsec, QoS, BFD e IP SLA en Cisco IOS XE, necesarios para la conmutación rápida al respaldo y la medición del SLA.
- Administración por SNMPv3 y NetFlow, compatible con el servidor de monitoreo de red existente en la nube privada.

La Figura 3 presenta la topología lógica resultante entre ambos sitios.

Figura 3. Topología lógica de la solución (Punto A, red del carrier y Punto B)



Fuente: elaboración propia (2026).

3.1.5 Costos de la interconexión

Los precios son referenciales en dólares estadounidenses (USD), con base en precios de lista de los fabricantes y cotizaciones típicas del mercado guatemalteco; incluyen IVA e

importación cuando aplica. Para la referencia en quetzales se utiliza un tipo de cambio de Q7.65 por USD (Banco de Guatemala, 2026).

Tabla 3. Costos de la interconexión Punto A – Punto B (USD)

Concepto	Cantidad	Precio unit.	Subtotal
Router Cisco Catalyst C8200-1N-4T con licencia DNA Network Essentials (puntos A y B)	2	3,450	6,900
Transceptor SFP 1000BASE-LX/LH, LC (activo y repuesto por router)	4	176	704
Instalación y configuración de router, patch cords LC/UPC	2	255	510
Cargo único de activación del servicio MPLS	1	1,830	1,830
Subtotal CAPEX (inversión inicial)			9,944
Enlace MPLS L3VPN 100 Mbps simétrico (mensualidad)	12 meses	1,634	19,608
Radioenlace de respaldo 7 GHz del carrier (mensualidad)	12 meses	458	5,496
Cisco Smart Net Total Care (anual, 2 equipos)	1	732	732
Licencia PRTG Network Monitor 500 sensores (suscripción anual)	1	2,148	2,148
Subtotal OPEX primer año			27,984
Total primer año (≈ Q290,149)			37,928

Fuente: elaboración propia con precios referenciales de fabricantes y del mercado guatemalteco (2026).

3.1.6 Justificación técnica

Fiabilidad. La fibra óptica no se ve afectada por lluvia, neblina ni interferencia de radiofrecuencia, condiciones frecuentes en la ruta hacia Jalapa. El respaldo por microondas, con conmutación automática por BFD e IP SLA, elimina el punto único de falla ante un corte físico de la fibra; la combinación del SLA del carrier y la ruta redundante es lo que sostiene el requisito de 0 % de pérdida de paquetes.

Escalabilidad. El paso de 100 Mbps a 1 Gbps solo requiere un cambio contractual con el carrier, sin sustituir equipos, ya que los C8200 soportan hasta 3.8 Gbps de reenvío.

Costo total de propiedad. El servicio arrendado cuesta aproximadamente USD 93,900 en tres años (CAPEX más tres años de OPEX). Una red propia de microondas se estima en más de USD 165,000 en el mismo período: tres torres autosoportadas con obra civil (≈ USD 30,000 c/u), cuatro saltos de radio licenciado (≈ USD 6,000 c/u), energía y caseta por sitio (≈ USD 5,000 c/u) y mantenimiento, arrendamiento de terrenos y cánones de espectro (≈ USD 12,000 anuales). Además, con el servicio administrado el riesgo de operación y la reparación de fallas quedan a cargo del carrier.

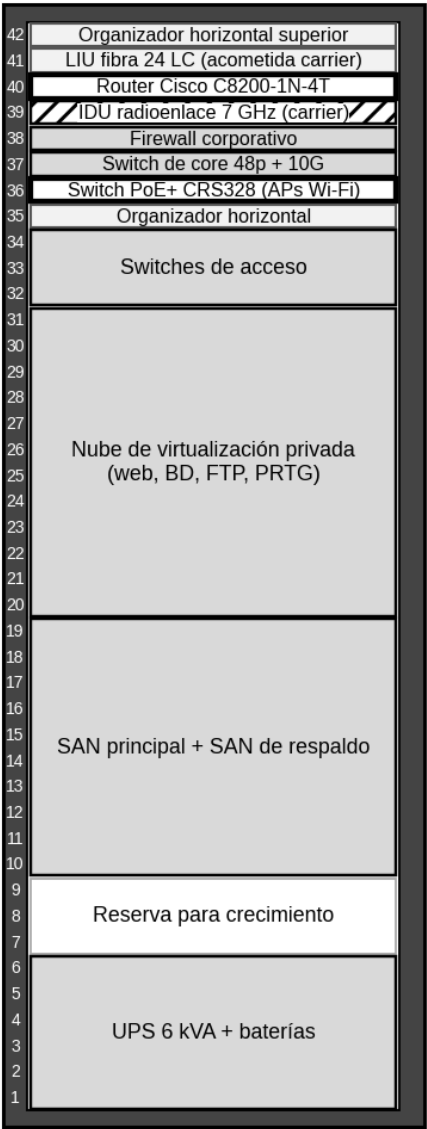
Vigencia tecnológica. El Catalyst C8200 está dentro de su ciclo de vida comercial, con soporte, actualizaciones de seguridad y refacciones disponibles, a diferencia del ISR 4331, que ya no se comercializa (Cisco Systems, 2024a).

3.1.7 Esquema de ubicación de los equipos en el rack

La Figura 4 muestra la elevación del rack de 42U del centro de datos del Punto A y del gabinete de 24U del Edificio 1 del Punto B, donde termina el enlace. La Tabla 4 detalla la asignación de unidades del Punto A; la del Punto B se detalla en la sección 3.2.6.

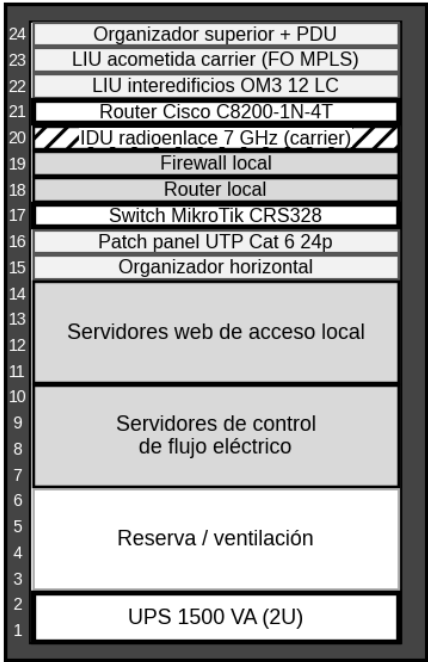
Figura 4. Elevación de racks en el Punto A (42U) y en el Punto B, Edificio 1 (24U)

Punto A · Rack 42U (centro de datos, 6.º nivel)



- Equipo nuevo del proyecto
- Equipo existente
- Equipo del carrier
- Pasivo / organización
- Espacio libre

Punto B · Edificio 1 · Gabinete 24U



Fuente: elaboración propia (2026).

Tabla 4. Asignación de unidades del rack de 42U en el Punto A

U	Equipo asignado	Estado
42	Organizador horizontal superior (PDU vertical lateral, 0U)	Pasivo
41	Bandeja de fibra (LIU) 24 puertos LC/UPC, acometida del carrier	Pasivo
40	Router Cisco Catalyst C8200-1N-4T (WAN primario y respaldo)	Nuevo
39	IDU del radioenlace de respaldo 7 GHz	Carrier
38	Firewall corporativo	Existente
37	Switch de core 48 puertos + uplinks 10G	Existente
36	Switch PoE+ MikroTik CRS328-24P-4S+RM (Access Points)	Nuevo
35	Organizador horizontal	Pasivo
34–32	Switches de acceso	Existente
31–20	Nube de virtualización privada (web, BD, FTP, monitoreo PRTG)	Existente
19–10	SAN principal y SAN de respaldo	Existente
9–7	Reserva para crecimiento	Libre
6–1	UPS 6 kVA + módulo de baterías	Existente

Fuente: elaboración propia (2026).

3.1.8 Servicios de monitoreo

Se selecciona **PRTG Network Monitor** (licencia PRTG 500), instalado en el servidor de monitoreo de red existente en la nube privada del Punto A (Paessler, 2026). PRTG cubre sensores SNMPv3, ICMP, NetFlow y de interfaz para routers, switches, firewalls, servidores y el controlador inalámbrico de ambos sitios.

Para medir la calidad del enlace A–B se configuran operaciones **Cisco IP SLA** (UDP jitter e ICMP echo) entre ambos C8200, que PRTG consulta mediante su sensor de IP SLA. Así se obtienen latencia, jitter y pérdida de paquetes extremo a extremo sin costo adicional de licencias, y se verifica el cumplimiento del SLA del carrier. Se configuran alertas por correo electrónico y SMS ante latencia mayor a 60 ms, pérdida sostenida mayor a 0.1 % durante 5 minutos o conmutación al enlace de respaldo. Como mejora opcional, sujeta a suscripción, puede alojarse el agente Cisco ThousandEyes en los routers C8200 para pruebas sintéticas desde Internet.

3.2 Solución de conectividad entre los edificios del Punto B

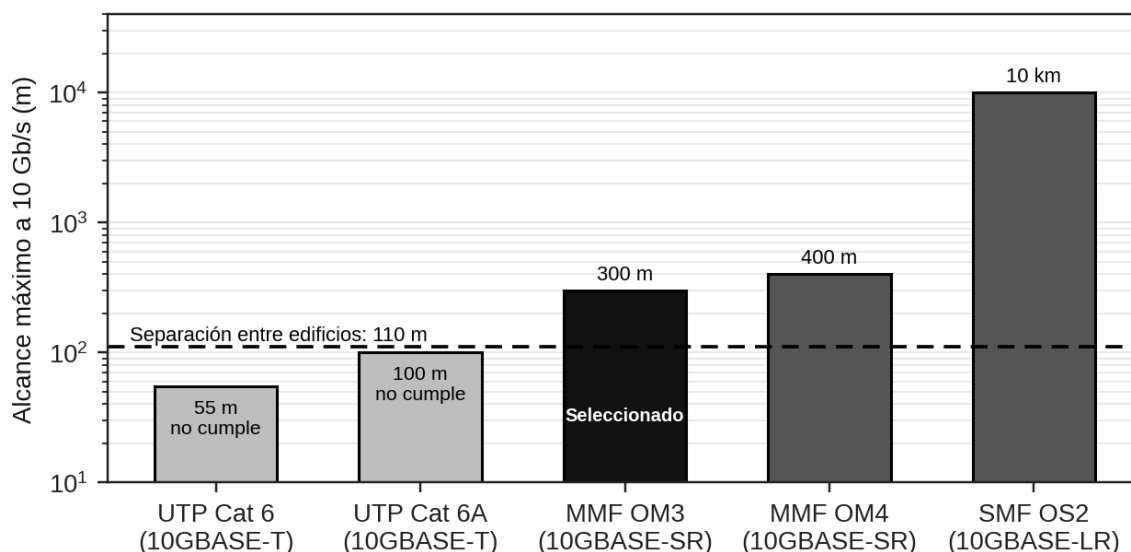
Desarrollado por: Gabriel Enrique Pérez Meza.

Dentro de la planta de generación de San Manuel Chaparrón existen dos edificaciones separadas 110 metros entre sí: el Edificio 1 alberga las oficinas administrativas y la sala de juntas, y el Edificio 2 las oficinas de mantenimiento, la sala de descanso y una sala de reuniones. Se requiere interconectarlos con 0 % de pérdida de paquetes.

3.2.1 Medio físico seleccionado

Se selecciona **fibra óptica multimodo OM3 de 12 hilos**, en cable para exterior tipo loose tube, totalmente dieléctrico y con armadura dieléctrica antirroedores, terminado en conectores LC/UPC en el gabinete de telecomunicaciones de cada edificio. Sobre ella se establece un enlace **10GBASE-SR (10 Gbps)**. La distancia de 110 m excede el límite de 100 m del canal de cobre de la norma ANSI/TIA-568.2-D para cableado UTP categoría 6/6A (ANSI/TIA, 2018), por lo que un enlace de cobre quedaría fuera de norma y expuesto a errores CRC y pérdida de paquetes. La fibra OM3 soporta 10GBASE-SR hasta 300 m (IEEE, 2022), con amplio margen para el trayecto requerido (Figura 5).

Figura 5. Alcance máximo a 10 Gb/s por medio de transmisión frente a la distancia requerida



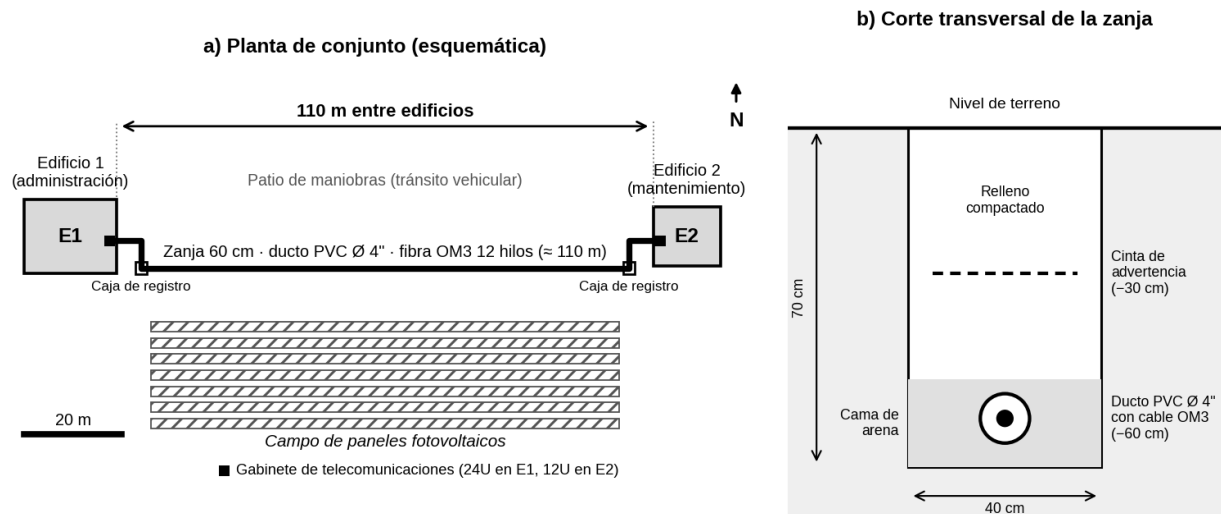
Fuente: elaboración propia con base en ANSI/TIA (2018) e IEEE (2022).

3.2.2 Ruta física del cable

El cable se tiende subterráneo dentro de un ducto de PVC eléctrico de 4 pulgadas, en una zanja de 40 cm de ancho por 70 cm de profundidad, con el ducto a 60 cm sobre cama de arena y cinta de advertencia a 30 cm (Figura 6). La ruta atraviesa el patio de maniobras bordeando el campo de paneles solares, lo que evita el tránsito pesado sobre el ducto y facilita el mantenimiento futuro; se instala una caja de registro junto a cada edificio. En cada

extremo el cable ingresa al gabinete por el piso, se fija a la bandeja de fibra (LIU) y se deja una reserva de 5 m enrollada en organizador. La longitud total del cable, incluidas reservas y subidas, es de aproximadamente 130 m.

Figura 6. Plano de conjunto de la interconexión entre edificios y corte transversal de la zanja



Fuente: elaboración propia (2026).

3.2.3 Equipos utilizados en ambos edificios

- **Switch MikroTik CRS328-24P-4S+RM** (uno por edificio): 24 puertos Gigabit PoE+ (802.3af/at) y 4 puertos SFP+ de 10 Gbps (MikroTik, 2024). Termina el enlace de fibra, distribuye la LAN del edificio y alimenta por PoE+ los Access Points.
- **Transceptor SFP+ 10GBASE-SR LC** (MikroTik S+85DLC03D), uno por extremo del enlace.
- **Bandeja de fibra (LIU)** de 12 puertos LC/UPC con pigtails y **patch panel UTP Cat 6** de 24 puertos, uno de cada uno por edificio.
- **Cable OM3 de 12 hilos** para exterior (≈ 130 m), **ducto PVC Ø 4"** (110 m) y dos cajas de registro.
- **Gabinete de piso de 24U** en el Edificio 1 y **gabinete de pared de 12U** en el Edificio 2, cada uno con UPS de 1500 VA.

3.2.4 Costos de la interconexión

Tabla 5. Costos de la interconexión entre los edificios del Punto B (USD)

Concepto	Cantidad	Precio unit.	Subtotal
Switch MikroTik CRS328-24P-4S+RM	2	693	1,386
Transceptor SFP+ 10GBASE-SR LC (MikroTik S+85DLC03D)	2	89	178
Cable de fibra OM3 12 hilos, exterior, dieléctrico con armadura	130 m	lote	700
Bandeja de fibra (LIU) 12 puertos LC/UPC con pigtails	2	98	196
Patch panel UTP Cat 6, 24 puertos	2	60	120
Ducto PVC eléctrico Ø 4" con accesorios	110 m	4.30	473
Obra civil: zanja, cama de arena, relleno y 2 cajas de registro	1	863	863
Instalación, fusión y certificación (OTDR y power meter)	1	562	562
Gabinete de piso 24U (Edificio 1)	1	480	480
Gabinete de pared 12U (Edificio 2)	1	240	240
UPS 1500 VA para rack, 2U	2	520	1,040
Total CAPEX (≈ Q47,721)			6,238

Fuente: elaboración propia con precios referenciales de fabricantes y del mercado guatemalteco (2026).

3.2.5 Justificación técnica

La fibra OM3 se prefiere sobre un enlace inalámbrico punto a punto (por ejemplo, Ubiquiti airFiber o MikroTik Wireless Wire) porque el requisito de 0 % de pérdida de paquetes no puede garantizarse en bandas no licenciadas de 5 GHz o 60 GHz, expuestas a interferencia, lluvia y obstrucciones temporales dentro de un patio de maniobras. En una planta fotovoltaica, los inversores y el cableado de potencia generan interferencia electromagnética; un cable totalmente dieléctrico es inmune a ella y, además, no conduce corrientes de falla ni sobretensiones por descargas atmosféricas entre edificios, riesgo que sí existiría con cobre al unir dos sistemas de tierra distintos.

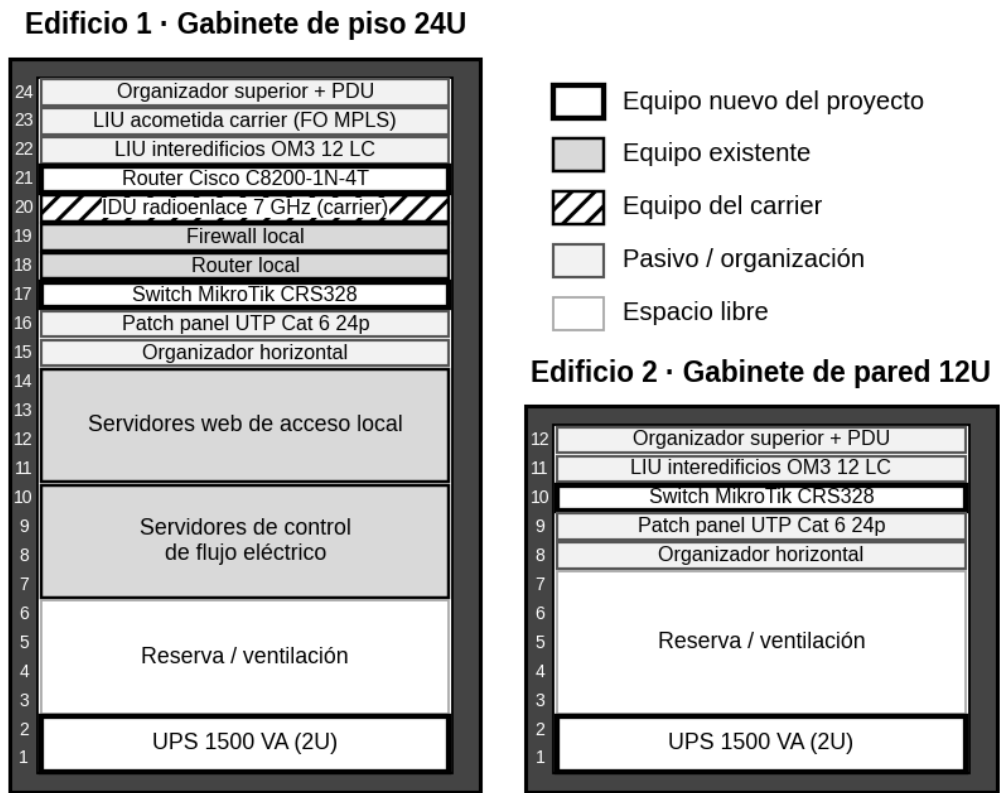
Se descarta la fibra monomodo OS2 porque la OM3 cubre con holgura los 110 m y sus transceptores SR son más económicos. Se descarta UTP Cat 6A porque incumple el límite de 100 m de la norma y la instalación quedaría fuera de especificación.

3.2.6 Esquema de ubicación de los equipos en el rack

El Edificio 1 concentra el enlace WAN hacia el Punto A y los servidores locales, por lo que se dimensiona un gabinete de piso de 24U. El Edificio 2 solo requiere la terminación

de fibra, el switch de acceso y respaldo eléctrico, por lo que se utiliza un gabinete de pared de 12U (Figura 7, Tablas 6 y 7).

Figura 7. Elevación de los gabinetes del Punto B: Edificio 1 (24U) y Edificio 2 (12U)



Fuente: elaboración propia (2026).

Tabla 6. Asignación de unidades del gabinete de 24U, Edificio 1

U	Equipo asignado	Estado
24	Organizador superior + PDU	Pasivo
23	Bandeja de fibra (LIU), acometida del carrier (fibra MPLS)	Pasivo
22	Bandeja de fibra (LIU) del enlace interedificios, OM3 12 LC	Nuevo
21	Router Cisco Catalyst C8200-1N-4T	Nuevo
20	IDU del radioenlace de respaldo 7 GHz	Carrier
19	Firewall local	Existente
18	Router local (enrutamiento interno)	Existente
17	Switch MikroTik CRS328-24P-4S+RM	Nuevo
16	Patch panel UTP Cat 6, 24 puertos	Nuevo
15	Organizador horizontal	Pasivo
14–11	Servidores web de acceso local	Existente
10–7	Servidores de control de flujo eléctrico	Existente
6–3	Reserva / ventilación	Libre
2–1	UPS 1500 VA (2U)	Nuevo

Fuente: elaboración propia (2026).

Tabla 7. Asignación de unidades del gabinete de 12U, Edificio 2

U	Equipo asignado	Estado
12	Organizador superior + PDU	Pasivo
11	Bandeja de fibra (LIU) del enlace interedificios, OM3 12 LC	Nuevo
10	Switch MikroTik CRS328-24P-4S+RM	Nuevo
9	Patch panel UTP Cat 6, 24 puertos	Nuevo
8	Organizador horizontal	Pasivo
7–3	Reserva / ventilación	Libre
2–1	UPS 1500 VA (2U)	Nuevo

Fuente: elaboración propia (2026).

3.3 Planteamiento de solución de sitios Wireless

Desarrollado por: Elder Estuardo García Pacheco (secciones 3.3.1 a 3.3.4) y Gabriel Enrique Pérez Meza (sección 3.3.5).

El diseño inalámbrico cubre las oficinas de ingeniería de la zona 10 (Punto A) y los dos edificios de oficinas de la planta de San Manuel Chaparrón (Punto B). Los objetivos son: cobertura sin puntos ciegos, throughput mínimo por usuario de 200 Mbps de descarga y 100 Mbps de subida, y una estrategia DFS en la zona 10 por su ubicación en el vector de aterrizaje del Aeropuerto Internacional La Aurora.

3.3.1 Frecuencias seleccionadas

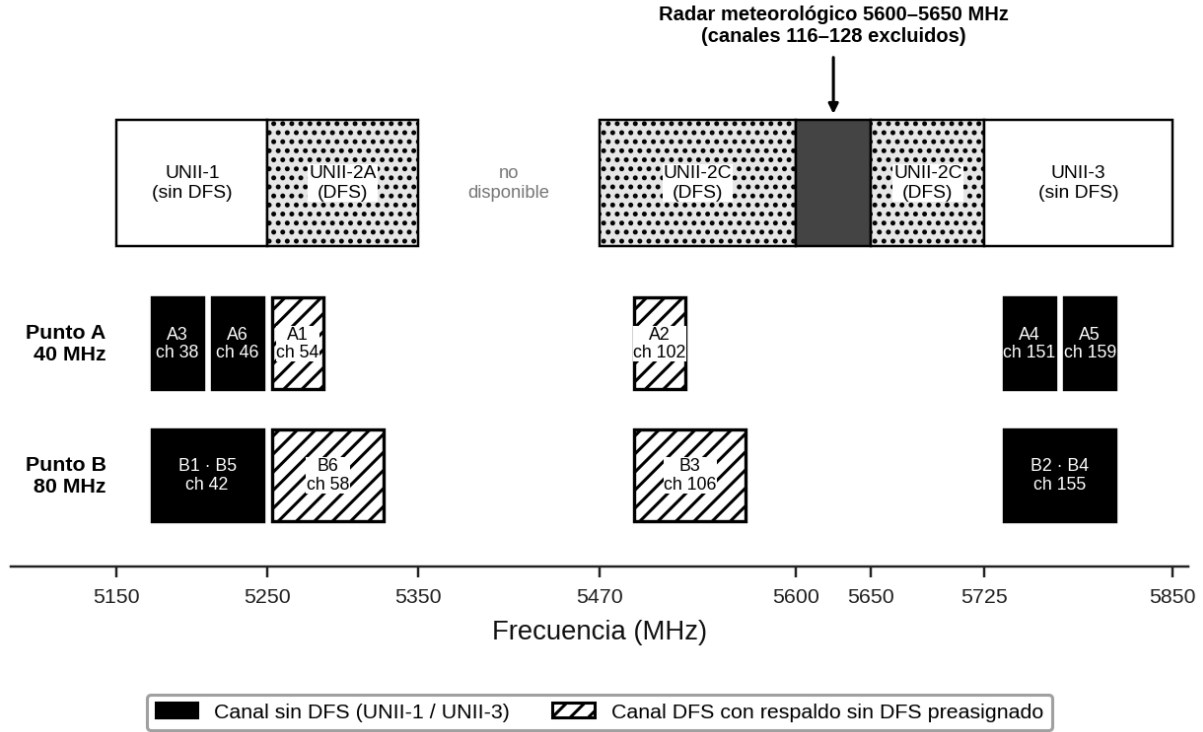
Se despliega **Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax)** en doble banda simultánea por Access Point (IEEE, 2021b):

- **5 GHz, banda principal:** sostiene el requisito de 200/100 Mbps. En el Punto A se usan canales de **40 MHz** y en el Punto B canales de **80 MHz**.
- **2.4 GHz, banda complementaria:** canales 1, 6 y 11 con 20 MHz y potencia reducida, para dispositivos heredados e IoT. Se habilita band steering para dirigir las laptops a 5 GHz.

Un cliente 2x2 en 2.4 GHz con 20 MHz alcanza una tasa física de 229 Mbps en MCS 9 (287 Mbps en MCS 11), equivalente a unos 150 Mbps reales de descarga, insuficiente para el requisito. En 5 GHz, con 40 MHz la tasa física es de 459 Mbps ($\approx$ 300 Mbps reales de descarga y 250 Mbps de subida) y con 80 MHz es de 961 Mbps ($\approx$ 625 y 528 Mbps), valores que cumplen el requisito con margen (Figura 9). Los cálculos consideran MCS 9 (256-QAM), alcanzable con una señal de -65 dBm o mejor, que es el criterio de cobertura del diseño (Coleman y Westcott, 2021).

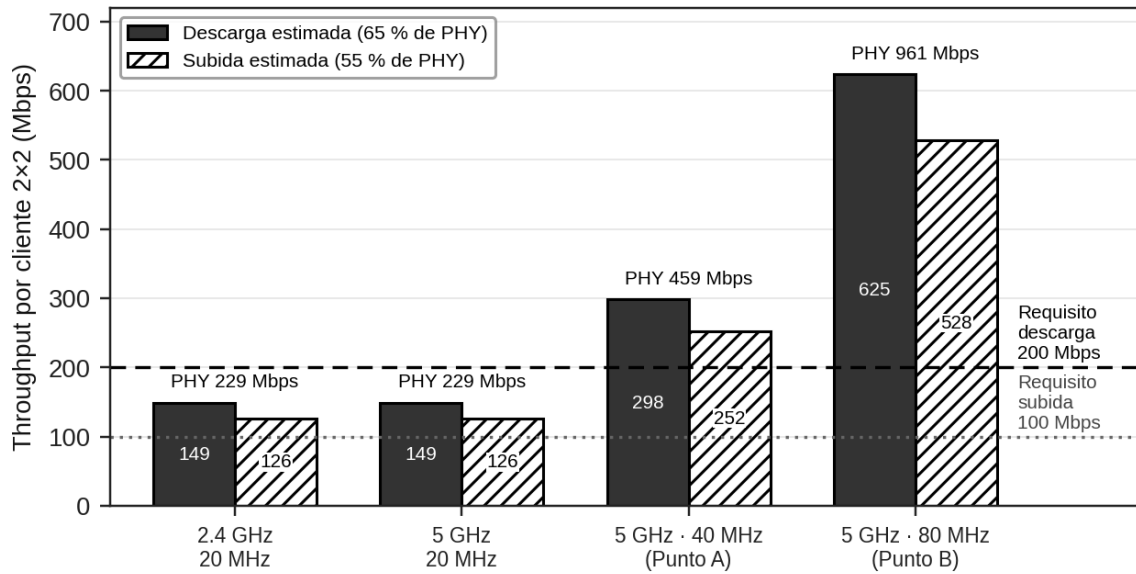
En el Punto A se eligen canales de 40 MHz por tres razones. Primero, solo existen dos canales de 80 MHz sin DFS (42 y 155), mientras que con 40 MHz hay cuatro (38, 46, 151 y 159), lo que permite que los cuatro APs de mayor densidad nunca operen en canales DFS. Segundo, un canal más angosto ocupa menos espectro y reduce la probabilidad de coincidir con un radar. Tercero, el U6-Pro tiene un puerto de 1 GbE, por lo que un canal de 80 MHz no aumenta de forma significativa la capacidad útil por AP. Se evitan los canales de 160 MHz porque obligan a operar en DFS. En el Punto B, lejos del aeropuerto, se usan 80 MHz para maximizar el rendimiento. En ambos sitios se excluyen los canales 116 a 128, que coinciden con la banda de 5600–5650 MHz de los radares meteorológicos (Figura 8 y Tabla 8).

Figura 8. Plan de canales en la banda de 5 GHz para los puntos A y B



Fuente: elaboración propia con base en FCC (2024) y ETSI (2017).

Figura 9. Throughput estimado por cliente 2×2 según banda y ancho de canal frente al requisito



Fuente: elaboración propia con base en IEEE (2021b) y Coleman y Westcott (2021).

Tabla 8. Plan de canales y potencia de transmisión por Access Point

AP	Sitio	Canal 5 GHz	Ancho	DFS	Respaldo sin DFS	Canal 2.4 GHz	Potencia 5 / 2.4 GHz
A1	Punto A	54	40 MHz	Sí	159	1	17 / 11 dBm
A2	Punto A	102	40 MHz	Sí	46	11	17 / 11 dBm
A3	Punto A	38	40 MHz	No	—	6	17 / 11 dBm
A4	Punto A	151	40 MHz	No	—	1	17 / 11 dBm
A5	Punto A	159	40 MHz	No	—	11	17 / 11 dBm
A6	Punto A	46	40 MHz	No	—	6	17 / 11 dBm
B1	B · Edificio 1	42	80 MHz	No	—	1	17 / 11 dBm
B2	B · Edificio 1	155	80 MHz	No	—	6	17 / 11 dBm
B3	B · Edificio 1	106	80 MHz	Sí	155	11	17 / 11 dBm
B4	B · Edificio 2	155	80 MHz	No	—	1	14 / 8 dBm
B5	B · Edificio 2	42	80 MHz	No	—	6	14 / 8 dBm
B6	B · Edificio 2	58	80 MHz	Sí	42	11	14 / 8 dBm

Fuente: elaboración propia (2026).

3.3.2 Equipos seleccionados

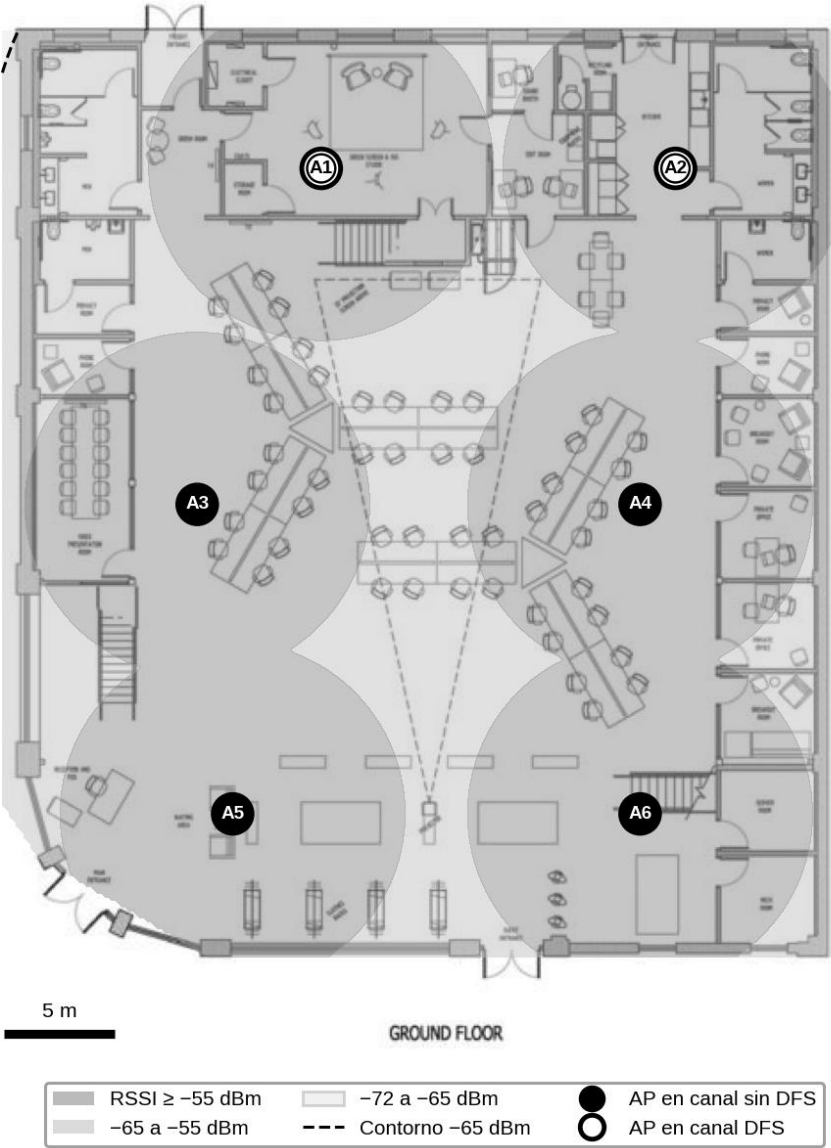
Se selecciona el Access Point **Ubiquiti UniFi U6-Pro**: Wi-Fi 6 de doble banda, 4×4 MU-MIMO en 5 GHz (hasta 4.8 Gbps) y 2×2 en 2.4 GHz (hasta 573.5 Mbps), OFDMA, soporte de canales DFS, puerto de 1 GbE y alimentación PoE+ (IEEE 802.3at) con consumo máximo de 13 W (Ubiquiti Inc., 2023). Se elige por su relación desempeño-costo, por el controlador centralizado UniFi (configuración, monitoreo, registro de eventos de radar y actualización de firmware) y por su soporte de roaming rápido 802.11k/v/r.

La alimentación se realiza por PoE+ desde switches MikroTik CRS328-24P-4S+RM: en el Punto B, los switches de cada edificio descritos en la sección 3.2; en el Punto A, un switch adicional instalado en el rack del centro de datos y conectado al switch de core por un enlace de 10 Gbps. El controlador **UniFi Cloud Key Gen2 Plus** se instala en el Punto A y administra también los APs del Punto B a través del enlace MPLS.

3.3.3 Planos de ubicación de los AP

Los APs se ubicaron sobre los planos proporcionados buscando que toda el área útil reciba -65 dBm o más en 5 GHz, nivel que permite MCS 9 y, por tanto, el throughput requerido. Las Figuras 10 a 12 muestran la ubicación de cada AP y el mapa de cobertura predictivo, calculado con un modelo log-distancia (exponente 3.5 en el Punto A y 3.3 en el Punto B, PIRE de 23 dBm y 20 dBm según el sitio). Las escalas del Punto A y del Edificio 1 se estimaron a partir del mobiliario ($\approx 37 \times 42$ m y $\approx 19 \times 16$ m); la del Edificio 2 se toma de las cotas del plano (13.78×12.00 m). El modelo es una predicción de diseño que se valida con un site survey durante la instalación. Se mantiene un solapamiento de 15 a 20 % entre celdas contiguas para roaming sin interrupciones.

Figura 10. Ubicación de los AP y cobertura predictiva en 5 GHz, Punto A (Edificio Las Margaritas, zona 10)



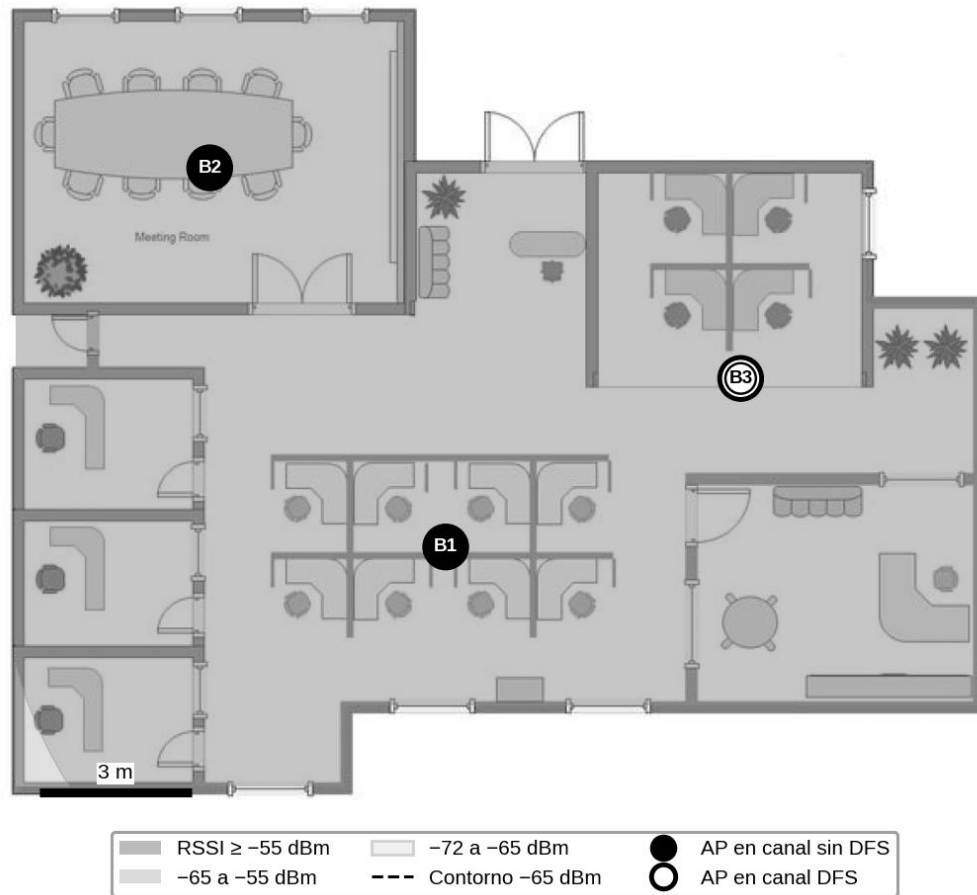
Fuente: elaboración propia sobre el plano proporcionado en el planteamiento del proyecto final.

Tabla 9. Ubicación y cobertura de los AP en el Punto A

AP	Ubicación en el plano	Zona de cobertura	Canal 5 GHz
A1	Ala norte-oeste, frente al estudio (green screen)	Estudio, sala de materiales, bodega, cuarto eléctrico y sanitarios oeste	54 (DFS)
A2	Ala norte-este, junto a la sala de edición	Sala de edición, cabina de audio, cocina, comedor y sanitarios este	102 (DFS)
A3	Zona abierta, bancadas del lado oeste	Escritorios oeste, sala de presentaciones y salas privadas del ala oeste	38
A4	Zona abierta, bancadas del lado este	Escritorios este, oficinas privadas y salas de descanso del ala este	151
A5	Recepción, ala sur-oeste	Recepción, sala de espera y entrada principal	159
A6	Sala lounge, ala sur-este	Lounge, entrada de visitas, server room y tech room	46

Fuente: elaboración propia (2026).

Figura 11. Ubicación de los AP y cobertura predictiva en 5 GHz, Punto B, Edificio 1



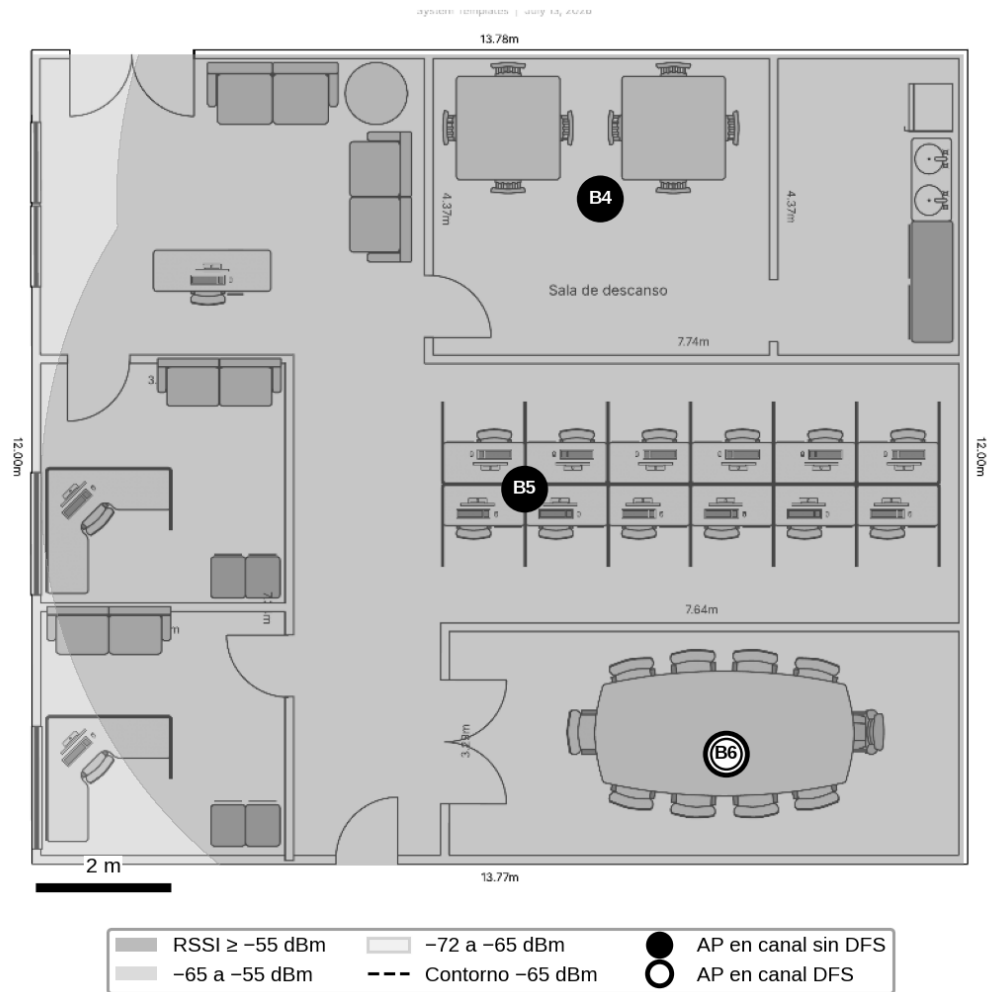
Fuente: elaboración propia sobre el plano proporcionado en el planteamiento del proyecto final.

Tabla 10. Ubicación y cobertura de los AP en el Punto B, Edificio 1

AP	Ubicación en el plano	Zona de cobertura	Canal 5 GHz
B1	Centro del área de cubículos	Cubículos y las tres oficinas privadas del ala oeste	42
B2	Sala de reuniones (Meeting Room)	Sala de reuniones y pasillo de acceso	155
B3	Oficina de cubículos del ala noreste	Lobby, oficina noreste y sala de estar del ala sureste	106 (DFS)

Fuente: elaboración propia (2026).

Figura 12. Ubicación de los AP y cobertura predictiva en 5 GHz, Punto B, Edificio 2



Fuente: elaboración propia sobre el plano proporcionado en el planteamiento del proyecto final.

Tabla 11. Ubicación y cobertura de los AP en el Punto B, Edificio 2

AP	Ubicación en el plano	Zona de cobertura	Canal 5 GHz
B4	Sala de descanso	Sala de descanso, cocina y recepción	155
B5	Área de cubículos	Doce estaciones de trabajo y las dos oficinas del ala oeste	42
B6	Sala de reuniones	Sala de reuniones (12 personas) y pasillo	58 (DFS)

Fuente: elaboración propia (2026).

3.3.4 Costos de la solución Wireless

Tabla 12. Costos de la solución Wireless en ambos sitios (USD)

Concepto	Cantidad	Precio unit.	Subtotal
Access Point Ubiquiti UniFi U6-Pro	12	193	2,316
Kit de montaje en techo	12	18	216
Cable UTP Cat 6 (bobina de 305 m)	2	154	308
Controlador UniFi Cloud Key Gen2 Plus	1	203	203
Switch PoE+ MikroTik CRS328-24P-4S+RM (Punto A)	1	693	693
Cable DAC SFP+ 10G de 1 m (uplink al switch de core, Punto A)	1	30	30
Instalación, calibración y site survey, Punto A	1	719	719
Instalación, calibración y site survey, Punto B (2 edificios)	1	915	915
Total CAPEX (≈ Q41,310)			5,400

Fuente: elaboración propia con precios referenciales de fabricantes y del mercado guatemalteco (2026).

3.3.5 Estrategia DFS en el Punto A

Desarrollado por: Gabriel Enrique Pérez Meza.

El Edificio Las Margaritas se encuentra en el vector de aterrizaje del Aeropuerto Internacional La Aurora. En la banda de 5 GHz, los canales 52 a 144 (UNII-2A y UNII-2C) se comparten con servicios de radiodeterminación, en particular radares meteorológicos en 5600–5650 MHz y otros sistemas de radiolocalización en banda C; los radares de vigilancia del aeropuerto operan en las bandas L y S, y los transpondedores en 1030/1090 MHz (ITU-R, 2011).

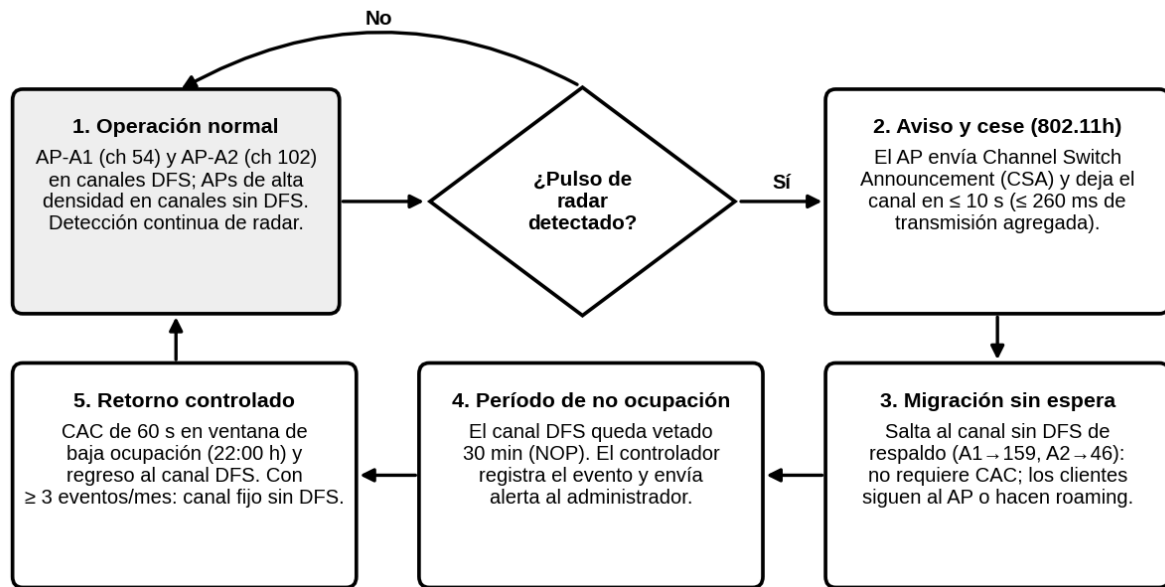
El protocolo **Dynamic Frequency Selection (DFS)**, definido en IEEE 802.11h y reglamentado en FCC 47 CFR §15.407 y ETSI EN 301 893, obliga a todo AP que opere en esos canales a: verificar el canal durante 60 s antes de usarlo (Channel Availability Check, CAC, que en ETSI es de 10 minutos en 5600–5650 MHz); detectar radar de forma continua; abandonar el canal en un máximo de 10 s tras una detección, con no más de 260 ms de transmisión acumulada; y no volver a usarlo durante 30 minutos (Non-Occupancy Period, NOP) (FCC, 2024; ETSI, 2017). Sin una estrategia, una detección dejaría a los usuarios del

AP sin servicio mientras este busca y valida otro canal. La estrategia propuesta, configurable desde el controlador UniFi, es la siguiente:

1. **Canales sin DFS para la alta densidad.** A3, A4, A5 y A6, que cubren la zona abierta de escritorios, la recepción y el lounge, operan en los canales 38, 151, 159 y 46 (UNII-1 y UNII-3). Un evento de radar nunca los obliga a cambiar de canal.
2. **Canales DFS solo en baja densidad y lejos del radar meteorológico.** A1 y A2 (ala norte: estudio, edición y cocina) operan en los canales 54 (5250–5290 MHz) y 102 (5490–5530 MHz). Se excluyen los canales 116 a 128 y cualquier ancho de 80 o 160 MHz que los incluya.
3. **Canal de respaldo sin DFS preasignado.** A1 migra al canal 159 y A2 al 46, que son los canales de los APs más alejados (≈ 29 m). Al pasar a un canal sin DFS no se requiere CAC, de modo que el AP continúa transmitiendo de inmediato.
4. **Aviso de cambio de canal y roaming.** El AP anuncia el cambio mediante Channel Switch Announcement (802.11h) y los clientes compatibles lo siguen sin reasociarse; los demás hacen roaming a un AP vecino gracias a 802.11k/v/r y al solapamiento de 15 a 20 % entre celdas (IEEE, 2021a). La banda de 2.4 GHz, que no está sujeta a DFS, queda como red de contingencia.
5. **Monitoreo continuo.** El controlador UniFi registra cada evento de radar (fecha, AP, canal y tiempo de recuperación) y notifica al administrador; PRTG consolida la estadística mensual.
6. **Retorno controlado y ajuste.** Tras el NOP de 30 minutos, el regreso al canal DFS, con su CAC de 60 s, se realiza en una ventana de baja ocupación, de forma manual o mediante la optimización nocturna de canales del controlador. Si un canal acumula tres o más eventos en un mes, el AP se fija permanentemente en un canal sin DFS.

La Figura 13 resume el flujo de operación ante un evento de radar.

Figura 13. Flujo de la estrategia DFS ante la detección de un radar en el Punto A



Resultado: el tráfico de alta densidad nunca opera en canales DFS y los APs DFS nunca quedan sin servicio, porque su canal de respaldo está libre de DFS y no exige el CAC de 60 s.

Fuente: elaboración propia con base en FCC (2024) e IEEE (2021a).

3.4 Resumen consolidado de costos

Desarrollado por: ambos integrantes.

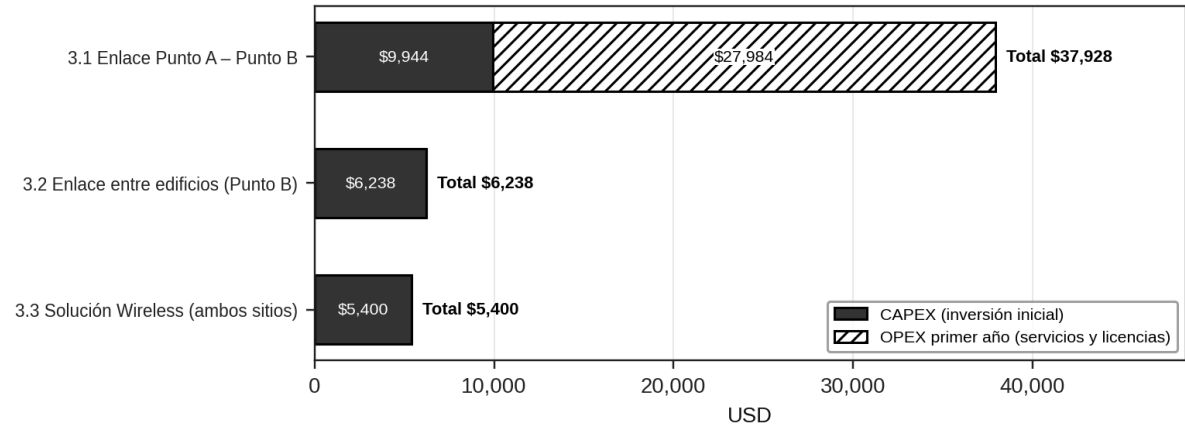
La Tabla 13 y la Figura 14 consolidan los costos de las tres soluciones. El OPEX recurrente anual estimado es de USD 27,984 y corresponde al servicio MPLS, al respaldo por microondas, a Cisco Smart Net y a la licencia de PRTG.

Tabla 13. Resumen consolidado de costos del proyecto (USD)

Solución	CAPEX	OPEX primer año	Total primer año
3.1 Enlace Punto A – Punto B	9,944	27,984	37,928
3.2 Enlace entre edificios del Punto B	6,238	—	6,238
3.3 Solución Wireless (ambos sitios)	5,400	—	5,400
Total en USD	21,582	27,984	49,566
Equivalente en quetzales (Q7.65 por USD)	Q165,102	Q214,078	Q379,180

Fuente: elaboración propia con precios referenciales de fabricantes y del mercado guatemalteco (2026).

Figura 14. Distribución de costos del primer año por solución



Fuente: elaboración propia (2026).

4. Conclusiones

1. La conexión entre el Punto A (zona 10) y el Punto B (San Manuel Chaparrón) mediante fibra óptica monomodo con servicio MPLS L3VPN, repotenciada con amplificadores EDFA en Barberena y Jutiapa y respaldada por un radioenlace de microondas con conmutación automática, cumple el requisito de 0 % de pérdida de paquetes. Con routers Cisco Catalyst C8200 vigentes, su costo a tres años ($\approx$ USD 93,900) es menor que el estimado para una red propia de repetidoras (más de USD 165,000).
2. La interconexión de los dos edificios de la planta con fibra OM3 dieléctrica sobre ducto subterráneo es la única alternativa que cumple simultáneamente la distancia de 110 m (fuera del límite normado del UTP), el requisito de 0 % de pérdida de paquetes y la inmunidad electromagnética y ante descargas atmosféricas que exige una planta fotovoltaica.
3. El despliegue Wi-Fi 6 con doce Access Points UniFi U6-Pro (seis en el Punto A y tres por edificio en el Punto B) cubre todas las áreas con -65 dBm o más en 5 GHz. Con canales de 40 MHz en el Punto A y de 80 MHz en el Punto B, un cliente 2x2 obtiene alrededor de 300/250 Mbps y 625/528 Mbps respectivamente, por encima del requisito de 200/100 Mbps.
4. La estrategia DFS del Punto A mantiene a los APs de alta densidad en canales sin DFS, limita los canales DFS a zonas de baja densidad alejadas de la banda de 5600–5650 MHz y preasigna canales de respaldo que no requieren CAC. Junto con el anuncio de cambio de canal 802.11h y el roaming 802.11k/v/r, esto evita la pérdida de conectividad ante eventos de radar.
5. El costo total del primer año asciende a USD 49,566 ($\approx$ Q379,180): USD 21,582 de inversión inicial y USD 27,984 de servicios y licencias, que se repiten anualmente. La inversión es congruente con los beneficios operativos para Max-Pro2 en monitoreo remoto de la generación, continuidad de servicio y productividad del personal.

5. Reseña personal de cada integrante

Elder Estuardo García Pacheco

El desarrollo del proyecto de Max-Pro2 me permitió integrar los conocimientos del curso de Telecomunicaciones con los conceptos de redes de computadoras vistos en cursos anteriores. En particular, el diseño del enlace zona 10 – Jalapa me obligó a estudiar en detalle el presupuesto óptico de un enlace de fibra monomodo, los criterios para elegir entre un servicio MPLS administrado y un enlace propio de microondas, y la importancia del SLA cuando el cliente exige 0 % de pérdida de paquetes. En la parte de Wi-Fi 6 aprendí a decidir entre anchos de canal de 40, 80 y 160 MHz según la disponibilidad de canales y las restricciones DFS, y por qué la densidad de usuarios influye más que la potencia de transmisión al garantizar throughput sostenido por cliente. Ubicar los APs sobre los planos proporcionados me dio criterio práctico para planificar futuros site surveys.

Gabriel Enrique Pérez Meza

Trabajar en la interconexión de los dos edificios de la planta y en la estrategia DFS de la zona 10 me obligó a profundizar en dos temas que en clase habíamos revisado a nivel teórico. Primero, el uso de fibra multimodo OM3 y sus transceptores SFP+ como alternativa correcta cuando la distancia excede el límite normado de 100 metros del cobre; entender la diferencia entre OM3 y OS2, y por qué el cobre categoría 6A no es opción a partir de esa distancia, cambió mi manera de pensar el cableado estructurado. Segundo, la estrategia DFS: descubrí que no basta con «habilitar DFS», sino que hace falta un diseño consciente de qué canales asignar a cada AP según la densidad de usuarios, qué bandas evitar por la presencia de radares meteorológicos, y cómo el anuncio de cambio de canal de 802.11h y los canales de respaldo sin DFS permiten cumplir el requisito de continuidad frente a eventos de radar. El proyecto me deja la certeza de que las decisiones de infraestructura deben justificarse siempre con datos técnicos y con el costo total de propiedad, no solo con el precio de compra inicial.

6. Referencias

- AGEXPORT. (2024, 28 de junio). *Comunicado No. 18: Socavamiento km 126, jurisdicción de El Progreso, Jutiapa. Ruta aduana San Cristóbal*. <https://prensalibre.com/wp-content/uploads/2024/06/Comunicado-no.-18-2024.pdf>
- ANSI/TIA. (2018). *ANSI/TIA-568.2-D: Balanced twisted-pair telecommunications cabling and components standard*. Telecommunications Industry Association.
- Banco de Guatemala. (2026). *Tipo de cambio de referencia*. https://www.banguat.gob.gt/tipo_cambio/
- Cisco Systems. (2024a). *End-of-sale and end-of-life announcement for the Cisco ISR4200, ISR4300 and select ISR4400 Series platform (EOL14896)*. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/4000-series-integrated-services-routers-isr/select-isr4k-series-platform-eol.html>
- Cisco Systems. (2024b). *Cisco Catalyst 8200 Series Edge Platforms data sheet*. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/catalyst-8200-series-edge-platforms/nb-06-cat8200-series-edge-plat-ds-cte-en.html>
- Coleman, D. D., y Westcott, D. A. (2021). *CWNA Certified Wireless Network Administrator study guide: Exam CWNA-108* (6.ª ed.). Sybex.
- Congreso de la República de Guatemala. (1996). *Decreto 94-96: Ley General de Telecomunicaciones*.
- EcuRed. (s. f.). *San Manuel Chaparrón*. https://www.ecured.cu/San_Manuel_Chaparr%C3%B3n
- ETSI. (2017). *ETSI EN 301 893 V2.1.1: 5 GHz RLAN; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU*. European Telecommunications Standards Institute.
- Federal Communications Commission. (2024). *47 CFR § 15.407: General technical requirements (U-NII devices)*. <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-15/subpart-E/section-15.407>
- IEEE. (2021a). *IEEE Std 802.11-2020: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications* (incluye 802.11h, 802.11k, 802.11r y 802.11v).
- IEEE. (2021b). *IEEE Std 802.11ax-2021: Enhancements for high-efficiency WLAN*.
- IEEE. (2022). *IEEE Std 802.3-2022: IEEE Standard for Ethernet* (incluye 10GBASE-SR y 10GBASE-LR).
- ITU-R. (2011). *Recomendación UIT-R M.1652-1: Selección dinámica de frecuencias en los sistemas de acceso inalámbrico, incluidas las redes radioeléctricas de área local, para proteger el servicio de radiodeterminación en la banda de 5 GHz*. Unión Internacional de Telecomunicaciones.

- ITU-T. (2016). *Recomendación UIT-T G.652: Características de las fibras y cables ópticos monomodo*. Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- MikroTik. (2024). *CRS328-24P-4S+RM: Product specifications*.
https://mikrotik.com/product/crs328_24p_4s_rm
- Paessler. (2026). *PRTG Network Monitor: Pricing*. <https://paessler.com/pricing>
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (4.^a ed.). Pearson Educación.
- Ubiquiti Inc. (2023). *UniFi U6-Pro: Technical specifications*.
<https://techspecs.ui.com/unifi/wifi/u6-pro>