

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**TESIS**

**Propuesta de Diseño de un Sistema de Comunicación para asegurar la  
Conectividad en una empresa agroindustrial, Olmos - Lambayeque**

**Para Optar por el Título Profesional de Ingeniero Electrónico**

**ELABORADA POR:**

**Bach. Guevara Paz, Luis Enrique**

**Bach. Camizan Guerrero Elvis Neison**

**ASESOR:**

**M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla**

**ORCID: 0000-0002-9620-5056**

**LAMBAYEQUE - PERÚ**

**2025**

**TESIS**

**“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN  
PARA ASEGURAR LA CONECTIVIDAD EN UNA EMPRESA  
AGROINDUSTRIAL, OLMOS - LAMBAYEQUE”**

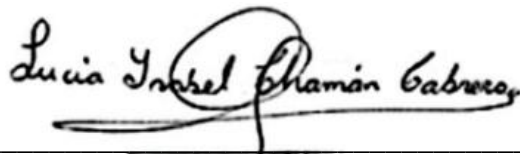
**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:**



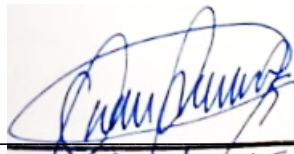
---

**MG. ING. MANUEL JAVIER RAMIREZ CASTRO  
PRESIDENTE**



---

**DRA. ING. LUCIA ISABEL CHAMAN CABRERA  
SECRETARIO**



---

**MG. ING. JUAN CARLOS NÁÑEZ AGUILAR  
VOCAL**

TESIS

**“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN  
PARA ASEGURAR LA CONECTIVIDAD EN UNA EMPRESA  
AGROINDUSTRIAL, OLMOS - LAMBAYEQUE”**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

**AUTORES:**



---

**Bach. Guevara Paz, Luis Enrique**



---

**Bach. Camizan Guerrero Elvis Neison**

**ASESOR:**



---

**M. Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla**



**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DECANATO**



0075



Ciudad Universitaria - Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD

**ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 40-2026-D/FACFyM**

Siendo las 10:00 horas del día 28 de abril del 2026 se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN PARA ASEGURAR LA CONECTIVIDAD EN UNA EMPRESA AGROINDUSTRIAL OLMOF - LAMBAYEQUE

Designados por Resolución N° 700-2025 D/FACFyM de fecha 4 de agosto de 2025 Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

Mg. Ing. <u>Manuel Javier Ramírez Castro</u>	Presidente
Dra. Ing. <u>Lucía Isabel Chama Cabrera</u>	Secretario
Mp. Ing. <u>Juan Carlos Muñoz Apuiter</u>	Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) Msc. Ing. Hugo Javier Chichayo Padilla nombrado por Resolución N° 700-2025 D/FACFyM de fecha 4 de agosto de 2025

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 320-2026 D/FACFyM de fecha 16 de abril de 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es) Guevara Paz Luis Enrique y Camilar Guerrero Elvis Neison y tuvo una duración de 30 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de Dieciséis (16) en la escala vigesimal, mención (Buena).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Ingeniera Electrónica de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 11:00 horas se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Manuel Ramírez Castro  
 Manuel Ramírez Castro  
 Presidente

Lucía Isabel Chama Cabrera  
 Secretario  
 LUCIA ISABEL CHAMA CABRERA

Juan Carlos Muñoz Apuiter  
 Vocal

Hugo Javier Chichayo Padilla  
 Asesor

## **CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL ASESOR**

M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla, usuario revisor del documento titulado:  
**“Propuesta de Diseño de un Sistema de Comunicación para asegurar la Conectividad en una empresa agroindustrial, Olmos - Lambayeque”**

Cuyos autores son:

Bach. Guevara Paz, Luis Enrique

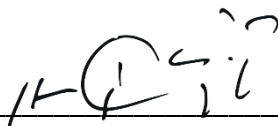
Bach. Camizan Guerrero Elvis Neison

Identificado con Documento de Identidad 16703734; declaro que la evaluación realizada por el Programa Informático Turnitin, ha arrojado un porcentaje de similitud de 04 %, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 02 de marzo del 2026



---

**M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla**  
**DNI N° 16703734**

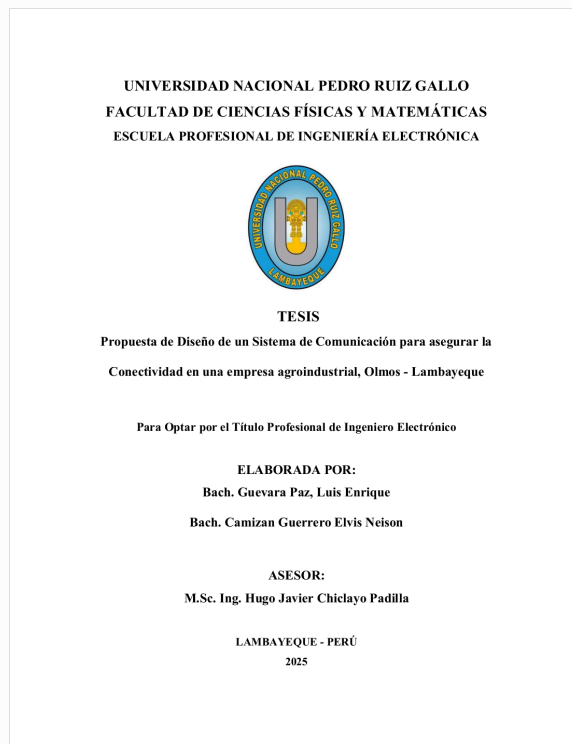


## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Guevara Paz Camizan Guerrero  
Título del ejercicio: Quick Submit  
Título de la entrega: Propuesta de Diseño de un Sistema de Comunicación para as...  
Nombre del archivo: GUEVARA-CAMIZAN.docx  
Tamaño del archivo: 5.83M  
Total páginas: 88  
Total de palabras: 14,706  
Total de caracteres: 81,732  
Fecha de entrega: 01-mar-2026 05:06p. m. (UTC-0500)  
Identificador de la entrega: 2891502500



# Propuesta de Diseño de un Sistema de Comunicación para asegurar la Conectividad en una empresa agroindustrial, Olmos - Lambayeque

## INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	1%
2	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	de.slideshare.net Fuente de Internet	1%
4	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1%
6	Submitted to Universidad TecMilenio Trabajo del estudiante	<1%
7	repositorio.upci.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	www.przetargi.info Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.ucsg.edu.ec Fuente de Internet	<1%
10	ticnegocios.camaravalencia.com Fuente de Internet	<1%

---

11 openaccess.uoc.edu  
Fuente de Internet

<1%

---

12 elbuho.pe  
Fuente de Internet

<1%

---

13 hdl.handle.net  
Fuente de Internet

<1%

---

Excluir citas Activo

Excluir bibliografía Activo

Excluir coincidencias < 15 words



Ing. HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA  
Docente Adscrito a la FACyM-UNPRG  
[hchiclayo@unprg.edu.pe](mailto:hchiclayo@unprg.edu.pe) - 920583570  
DNI N° 16703734

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a Dios por concederme la salud, la fortaleza y la bendición de culminar esta etapa profesional tan importante en mi vida, también agradezco a mis padres, quienes con su amor, sus valores y su apoyo incondicional han sido mi mayor motivación para llegar hasta aquí y alcanzar esta meta, a mis compañeros de clase por su compañerismo, ayuda y trabajo conjunto que fueron fundamentales para superar cada reto académico y sin su colaboración muchos de estos logros no habrían sido posibles. Asimismo, agradezco a cada uno de los docentes de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, quienes con su dedicación, exigencia y enseñanzas contribuyeron a mi formación profesional, permitiéndome desenvolverme con responsabilidad y ética en el ámbito laboral. Mi profundo agradecimiento también para mi asesor de tesis, por su tiempo, orientación y paciencia durante todo el proceso.

*Guevara Paz, Luis Enrique*

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis queridos padres, quienes han sido el pilar más firme en mi formación profesional y personal. Gracias por brindarme siempre su apoyo moral y emocional, por acompañarme en cada paso de este camino y por impulsarme a seguir adelante incluso en los momentos en que pensé rendirme.

Su amor, sus palabras de aliento y su confianza inquebrantable fueron la fuerza que me sostuvo y me permitió llegar hasta aquí.

Este logro representa la culminación de una meta profesional construida gracias a su guía, sus valores y su fe constante en mi formación profesional.

*Guevara Paz, Luis Enrique*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradeciendo en primer lugar a Dios y mis familiares por apoyarme sin condiciones en esta etapa profesional que permitirá insertarme completamente en mi carrera profesional, también agradezco a mi asesor de Tesis por sus enseñanzas y tiempo brindado para poder concluir con el presente. Agradezco a aquellos compañeros y amigos que me brindaron su apoyo también para poder llegar a la meta universitaria.

*Camizan Guerrero Elvis Neison*

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo es dedicado a mis padres, especialmente a mi madre por ser el pilar más importante y la motivación necesaria para la realización de este proyecto que es la culminación de mi formación profesional, por demostrarme siempre su cariño y apoyo constante en lo que respecta al arduo trabajo que conlleva la formación profesional.

*Camizan Guerrero Elvis Neison*

## INDICE GENERAL

1	CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO .....	18
1.1	Antecedentes .....	18
1.1.1	Antecedentes Internacionales.....	18
1.1.2	Antecedentes Nacionales .....	19
1.2	Bases Teóricas.....	21
1.2.1	Sistemas de comunicaciones.....	21
1.2.2	Sistemas de comunicaciones inalámbricas .....	22
1.2.3	Tecnologías inalámbricas según su Alcance.....	22
1.2.4	Ancho de banda.....	23
2	CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES .....	25
2.1	Diseño de Contrastación de Hipótesis.....	25
2.2	Población, muestra .....	27
2.2.1	Población.....	27
2.2.2	Muestra .....	27
2.3	Técnicas, instrumentos, equipos y materiales .....	27
2.3.1	Técnicas .....	27
2.3.2	Instrumentos.....	28
2.3.3	Equipos y materiales .....	28
3	CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	29
3.1	Resultados .....	29
3.1.1	Diagnóstico y requerimientos para la Infraestructura Actual de Comunicaciones.	30

3.1.2	Cobertura Actual de los Servicios de Telecomunicaciones .....	30
3.1.3	Arquitectura del sistema de comunicaciones .....	33
3.1.4	Enlace punto a punto Agroolmos - Agroindustria en la banda de 5 Ghz .....	39
3.1.5	Perfil del enlace con antenas instaladas a 10 m de altura .....	40
3.1.6	Perfil del enlace con antenas instaladas a 15 m de altura .....	44
3.1.7	Perfil del enlace con antenas instaladas a 16 m de altura .....	47
3.1.8	Perfil del enlace con antenas instaladas de 17 m a 20 m de altura .....	50
3.1.9	Desempeño del enlace PTP con antenas de 34 dBi y altura optima de 16 m. ....	55
3.1.10	Simulación y comparación de la capacidad del enlace PTP .....	62
3.1.11	Presupuesto del enlace PTP AgroOlmos - Agroindustria.....	66
3.1.12	Enlace Agroindustria satelital 500mbps .....	67
3.1.13	Enlace GPON - punto Agroindustria .....	69
3.1.14	Costos a implementar Ferretería .....	71
3.1.15	Comparación entre Wi-Fi terrestre - Starlink satelital .....	72
3.2	Discusión.....	80
4	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	82
4.1	Conclusiones .....	82
4.2	Recomendaciones.....	83
5	REFERENCIAS .....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Sistemas de Comunicaciones .....	21
<b>Figura 2:</b> Sistemas de Telecomunicaciones Inalámbricas .....	22
<b>Figura 3:</b> Distintas tecnologías inalámbricas .....	23
<b>Figura 4</b> Diseño de Contrastación de Hipótesis .....	26
<b>Figura 5</b> Cobertura móvil de los operadores en el distrito de Olmos .....	31
<b>Figura 6</b> Comparación de cobertura total y garantizada en el área de estudio .....	32
<b>Figura 7</b> Arquitectura del sistema de comunicaciones .....	34
<b>Figura 8</b> Infraestructura existente para enlaces inalámbricos en la empresa Agroolmos .....	37
<b>Figura 9</b> Torre de referencia para el sistema de comunicaciones en la empresa agroindustrial..	38
<b>Figura 10</b> Enlace punto a punto Agroolmos - Agroindustria en 5 GHz .....	39
<b>Figura 11</b> Perfil topográfico y zona de Fresnel del enlace punto a punto - 10 metros de altura .	41
<b>Figura 12</b> Perfil topográfico y zona de Fresnel del enlace punto a punto - 15 metros de altura .	45
<b>Figura 13</b> Perfil topográfico y zona de Fresnel del enlace punto a punto - 16 metros de altura .	48
<b>Figura 14</b> Perfil topográfico y zona de Fresnel del enlace punto a punto de 17 a 20 m.....	51
<b>Figura 15</b> Perfil radioeléctrico del enlace entre el punto AgroOlmos y punto Agroindustria.....	57
<b>Figura 16</b> Comparación de la capacidad teórica del enlace PTP con Python.....	62
<b>Figura 17</b> Comparación de configuraciones del enlace PTP en función del ancho de banda .....	64
<b>Figura 18</b> Arquitectura de comunicación satelital .....	68
<b>Figura 19</b> Arquitectura lógica de la red de datos para soporte de servicios IoT y administrativos .....	70
<b>Figura 20</b> Desempeño, latencia y costo mensual de las alternativas de backhaul .....	74
<b>Figura 21</b> Análisis económico de Wi-Fi terrestre, Starlink satelital y GPON.....	76

<b>Figura 22</b>	Análisis comparativo del costo de implementación y operación de backhaul .....	77
<b>Figura 23</b>	Análisis de sensibilidad del costo total de Wi-Fi terrestre, Starlink y GPON.....	78
<b>Figura 24</b>	Análisis de sensibilidad de costos en Wi-Fi, Starlink y GPON .....	79
<b>Figura 25</b>	Equipamiento Starlink Business para la solución de comunicación satelital.....	85
<b>Figura 26</b>	Terminal Starlink Performance Gen 2 para la solución satelital.....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Configuración de la antena emisora en Punto AgroOlmos.....	41
<b>Tabla 2</b>	Configuración de la antena receptora Punto Agroindustria.....	42
<b>Tabla 3</b>	Parámetros del sistema de radio para el análisis del enlace PTP.....	43
<b>Tabla 4</b>	Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria .....	43
<b>Tabla 5</b>	Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria.....	44
<b>Tabla 6</b>	Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria .....	46
<b>Tabla 7</b>	Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria.....	47
<b>Tabla 8</b>	Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria .....	49
<b>Tabla 9</b>	Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria.....	50
<b>Tabla 10</b>	Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria .....	51
<b>Tabla 11</b>	Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria.....	52
<b>Tabla 12</b>	Comparación de desempeño del enlace PTP con respecto a la altura de la antena .....	55
<b>Tabla 13</b>	Configuración de la antena emisora en Punto AgroOlmos.....	58
<b>Tabla 14</b>	Configuración de la antena emisora en Punto AgroOlmos.....	59
<b>Tabla 15</b>	Parámetros del sistema de radio para el análisis del enlace PTP.....	59
<b>Tabla 16</b>	Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria .....	60
<b>Tabla 17</b>	Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria.....	61
<b>Tabla 18</b>	Comparación de configuraciones del enlace PTP.....	63
<b>Tabla 19</b>	Comparación entre Wi-Fi terrestre - Starlink satelital.....	73
<b>Tabla 20</b>	Comparación de alternativas de backhaul: Wi-Fi terrestre, Starlink satelital y GPON	75

## RESUMEN

Esta investigación aborda el desafío de conectividad que enfrenta una empresa agroindustrial ubicada en Olmos, Lambayeque, región que presenta limitaciones significativas en infraestructura de telecomunicaciones, se analizaron tres alternativas tecnológicas mediante simulaciones especializadas en Radio Mobile: un enlace punto a punto Wi-Fi 6 en banda de 5,8 GHz, el sistema satelital Starlink Business y la tecnología GPON de fibra óptica. Los resultados demostraron que la configuración óptima corresponde al radioenlace Wi-Fi 6 con antenas parabólicas direccionales de 34 dBi instaladas a 16 metros de altura, alcanzando capacidades cercanas a 700 Mbps que superan ampliamente el requerimiento operativo de 500 Mbps necesario para integrar sensores LoRaWAN, videovigilancia IP, estaciones administrativas y servidor central. El análisis técnico-económico confirmó que esta solución equilibra capacidad, latencia reducida y viabilidad financiera, con costos proyectados de S/ 17,800 en 24 meses, frente a S/ 28,200 de GPON y S/ 54,800 de Starlink, consolidándose como la alternativa más adecuada para garantizar conectividad robusta y escalable en entornos agroindustriales remotos.

### **Palabras clave:**

Conectividad rural, enlaces inalámbricos, agroindustria, Wi-Fi 6, sistemas de comunicación.

## **ABSTRACT**

This research addresses connectivity challenges faced by an agro-industrial enterprise located in Olmos, Lambayeque, a region with significant telecommunications infrastructure limitations. Three technological alternatives were analyzed through specialized Radio Mobile simulations: a point-to-point Wi-Fi 6 link operating at 5.8 GHz, Starlink Business satellite system, and GPON fiber optic technology. Results demonstrated that the optimal configuration corresponds to Wi-Fi 6 radio link with 34 dBi directional parabolic antennas installed at 16 meters height, achieving capacities near 700 Mbps that widely exceed the 500 Mbps operational requirement needed to integrate LoRaWAN sensors, IP video surveillance, administrative workstations, and central server. Technical-economic analysis confirmed this solution balances capacity, reduced latency, and financial viability, with projected costs of S/ 17,800 over 24 months, compared to S/ 28,200 for GPON and S/ 54,800 for Starlink, establishing itself as the most suitable alternative to guarantee robust and scalable connectivity in remote agro-industrial environments.

### **Keywords:**

Rural connectivity, wireless links, agro-industry, Wi-Fi 6, communication systems

## INTRODUCCIÓN

En la era actual, caracterizada por un entorno globalizado y altamente competitivo, las empresas de todos los sectores, y en particular aquellas situadas en zonas alejadas y remotas, enfrentan el imperativo de disponer de sistemas de comunicación y conectividad fiables y eficaces. Estos sistemas son cruciales para garantizar su óptimo funcionamiento y su capacidad competitiva. La conectividad empresarial resulta esencial para la colaboración, la toma de decisiones y la eficiencia operativa (Gaggero et al., 2021). Por lo tanto, es fundamental que las empresas superen las barreras geográficas y aseguren la fiabilidad y eficiencia de sus sistemas de comunicación. La conectividad y los sistemas de comunicación actúan como pilares fundamentales para la modernización y el desarrollo económico. En localidades remotas, la ausencia de una infraestructura de comunicaciones adecuada constituye un obstáculo considerable para el crecimiento y la operatividad de las empresas. Esta carencia no solo compromete la eficiencia operativa, sino también limita la capacidad de las empresas para integrarse en mercados más amplios y para adoptar innovaciones tecnológicas, aspectos cruciales para mantener la competitividad en un mercado globalizado (Situmorang et al., 2023a).

En el contexto peruano, especialmente en las áreas agroindustriales remotas, esta problemática se agudiza. El Perú, con una vasta geografía que incluye regiones montañosas y zonas de difícil acceso, enfrenta retos particulares en la implementación de sistemas de comunicación eficientes. Para las empresas agroindustriales situadas en estas áreas, como es el caso de muchas en Olmos, Lambayeque, la falta de conectividad no solo impide una operación eficiente, sino que

también limita su capacidad de respuesta frente a las demandas del mercado y los cambios en la cadena de suministro (Peralta, 2019).

Para abordar los problemas de conectividad en ubicaciones remotas, se han desarrollado diversas soluciones tecnológicas. Estas incluyen el uso de sistemas de comunicación por satélite, redes de radio enlace, tecnologías de acceso inalámbrico de largo alcance y sistemas de comunicación híbridos que combinan múltiples tecnologías. Estas soluciones permiten establecer enlaces de comunicación confiables y de alta capacidad, incluso en áreas donde la infraestructura terrestre es limitada. Sin embargo, la implementación de estas soluciones requiere una planificación cuidadosa, una inversión significativa y un conocimiento técnico especializado (Quillas-Cupe et al., 2020).

El distrito de Olmos, ubicado en la provincia de Lambayeque del departamento de Lambayeque en el Perú, es un claro ejemplo de una ubicación remota y alejada donde las empresas enfrentan desafíos de conectividad. La empresa agroindustrial en la que se realizará el estudio se encuentra en esta región, caracterizada por su lejanía de los centros urbanos y una infraestructura de telecomunicaciones limitada. Esta situación plantea obstáculos significativos para la comunicación efectiva y la coordinación de las operaciones de la empresa, lo que afecta su eficiencia y competitividad (Toro-Bernal, 2020).

Dada la importancia de la empresa agroindustrial en cuestión, tanto en el contexto lambayecano como en el peruano, es fundamental plantear una solución que asegure su conectividad. Esta empresa es reconocida como una de las más importantes en el empresariado regional y nacional, y su éxito tiene un impacto significativo en la economía local y en la cadena de suministro agroindustrial. Por lo tanto, garantizar una comunicación confiable y eficiente es esencial para mantener su posición de liderazgo y contribuir al desarrollo económico de la región.

El diseño de un sistema de comunicación adecuado a las necesidades específicas de esta empresa en su ubicación remota es un paso crítico para superar los desafíos de conectividad y potenciar su crecimiento y competitividad.

# 1 CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO

## 1.1 Antecedentes

### 1.1.1 *Antecedentes Internacionales*

Wahyudin & Hikmaturokhman (2021), analizaron diferentes configuraciones de sistemas de comunicación por microondas para brindar conectividad de backhaul en áreas remotas del archipiélago indonesio. A través de simulaciones y cálculos teóricos, se evaluó la calidad de la comunicación en términos de disponibilidad, indisponibilidad y margen de desvanecimiento. Los resultados revelaron que la configuración punto a punto no cumple con los estándares requeridos, mientras que las técnicas de diversidad espacial e híbrida mejoran significativamente la calidad y disponibilidad del enlace. Este estudio destaca la importancia de explorar soluciones tecnológicas adecuadas para garantizar una conectividad confiable en regiones insulares remotas, donde la implementación de infraestructura de comunicaciones tradicional es limitada.

Kharlan et al., (2020) evalúan los sistemas de redes globales de telecomunicaciones avanzadas, incluyendo el segmento espacial de megaconstelaciones satelitales para cobertura global. Utilizando una técnica desarrollada para evaluar este mercado considerando los requisitos de servicio, los autores estiman que la demanda mundial de tráfico 5G alcanzará aproximadamente 8.5 EB/mes para 2022. Además, señalan que el costo de desplegar una megaconstelación de comunicaciones para brindar acceso de banda ancha global varía entre \$5 y \$50 mil millones, dependiendo de los requisitos específicos. El estudio también destaca que las constelaciones satelitales modernas pueden integrarse en la infraestructura 5G, lo que sugiere su potencial para

complementar y extender las capacidades de las redes terrestres, especialmente en áreas remotas o desatendidas.

Situmorang et al., (2023b) abordan la disparidad en el acceso a telecomunicaciones entre áreas urbanas y rurales/remotas de Indonesia. Los autores proponen un marco integral para guiar el desarrollo de infraestructura por parte del gobierno, basado en la categorización de 7232 distritos del país en una grilla de 4x4, según 17 indicadores de redes de telecomunicaciones y condiciones socioeconómicas. Utilizando un enfoque estadístico novedoso, calculan estos indicadores para cada distrito y generan una visualización en forma de grilla que refleja su nivel de desarrollo en conectividad y factores socioeconómicos. Esta herramienta busca facilitar la toma de decisiones estratégicas y la priorización de inversiones en infraestructura, con el objetivo de cerrar brechas de acceso y promover un desarrollo más equitativo de las telecomunicaciones en Indonesia..

### ***1.1.2 Antecedentes Nacionales***

Maticorena (2020), mediante una metodología de revisión documental y análisis de propuestas de entidades clave (MTC, OSIPTEL, AFIN) y espacios especializados (mesas de trabajo, sesiones del Congreso, foro) en el período 2018-2019, plantea estrategias enfocadas en normatividad, eficiencia, infraestructura, aspectos técnicos y alcance social, basadas en requerimientos técnicos (físicos, humanos, regulatorios) y legales (constitución, leyes), apuntando a mejoras en lo técnico, legal y económico, con el objetivo central de establecer lineamientos para optimizar la gestión de calidad del sector telecomunicaciones en Perú, considerando la perspectiva de una muestra de 500 profesionales y técnicos vinculados a este ámbito.

Cabana y Supho, (2022) evalúa mediante una metodología experimental con pre y post prueba, diseño e implementación de un sistema de comunicación inalámbrico, aplicado a una muestra de 24 trabajadores por servicio, tuvo como objetivo evaluar dicho sistema en la reducción del índice de accidentabilidad, obteniéndose como resultado principal la disminución de este índice de 25.8 en 2021 a 0.0 en los servicios de febrero a mayo de 2022, concluyendo que el sistema propuesto, diseñado en Rhinoceros 3D, fabricado en impresora 3D y con características de resistencia, logró reducir significativamente la accidentabilidad en la empresa al ser implementado.

Culi (2023) planteó como objetivo el analizar la actitud de los docentes frente a la implementación de una red de telecomunicaciones en el proceso de enseñanza-aprendizaje. La metodología empleada fue de tipo aplicado y diseño investigación-acción, centrada en la implementación física de una red basada en normativa de cableado estructurado CAT6. La muestra de estudio estuvo conformada por 15 docentes que utilizan el laboratorio de cómputo, siendo evaluados mediante un cuestionario especializado en el portal Educaplay para medir conocimientos y un cuestionario web tipo Likert para evaluar la afectividad conductual. Los principales resultados mostraron que el conocimiento técnico de los docentes superó el 80% de respuestas válidas, y que la actitud hacia la nueva red fue positiva muy alta (94.67%) en aspectos como optimismo, motivación y hábitos de uso, se concluye que la implementación de la red de telecomunicaciones ha generado una mayor y muy positiva actitud en los profesores para el uso del laboratorio, lo cual se considera un aspecto favorable para la institución.

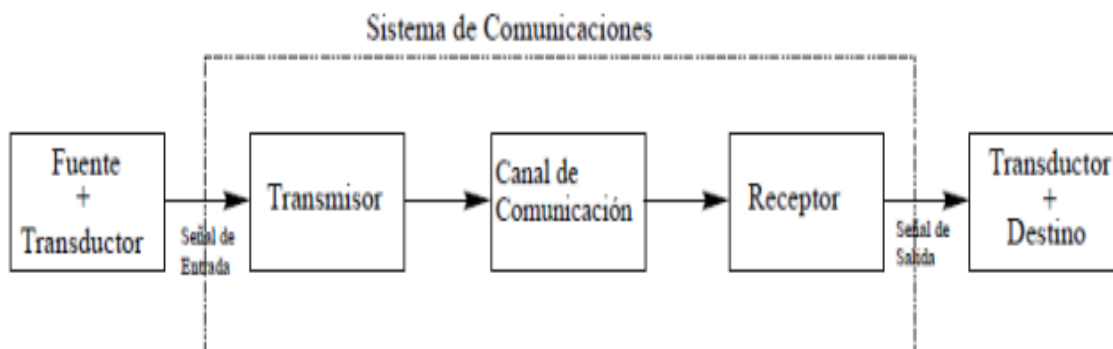
## 1.2 Bases Teóricas

### 1.2.1 Sistemas de comunicaciones

Los sistemas de telecomunicaciones abarcan una amplia variedad de métodos, herramientas y soluciones que permiten el intercambio de información a largas distancias entre personas o dispositivos, estas tecnologías incluyen desde la telefonía tradicional y móvil hasta las redes informáticas, así como la transmisión de televisión y radio, utilizando ondas electromagnéticas o medios físicos como el cableado para enviar y recibir datos en formatos de audio, video y texto, la infraestructura de telecomunicaciones facilita conexiones instantáneas a nivel global, respaldando tanto las comunicaciones personales como las transacciones comerciales y los dispositivos de respuesta urgente (Toro-Bernal, 2020).

**Figura 1:**

*Sistemas de Comunicaciones*

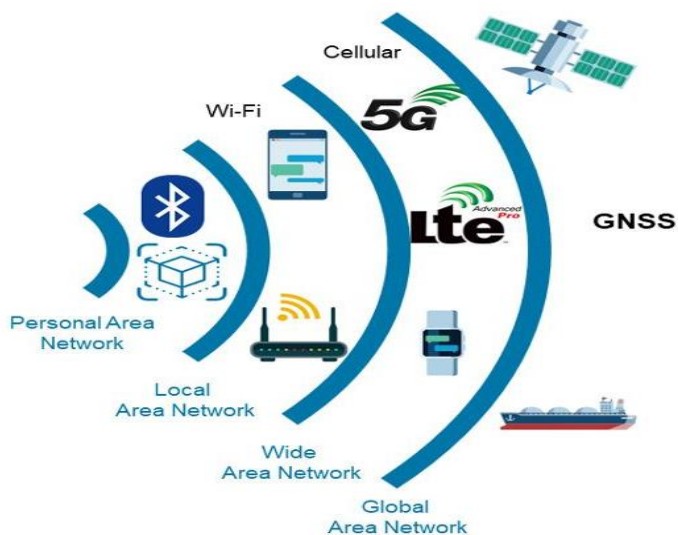


### 1.2.2 Sistemas de comunicaciones inalámbricas

Las telecomunicaciones inalámbricas abarcan una amplia gama de técnicas y métodos que posibilitan el intercambio de datos entre diversos lugares sin requerir una interconexión tangible a través de cableado. Estas soluciones emplean ondas electromagnéticas, tales como señales de radiofrecuencia, microondas, luz infrarroja o del espectro visible, para la emisión y recepción de información en formato de audio, video y texto, valiéndose del medio aéreo como canal de transmisión, como la telefonía celular, las redes de área local sin cables (WLAN), los enlaces vía satélite y la difusión de contenidos por radio y televisión (Arias, 2022).

**Figura 2:**

*Sistemas de Telecomunicaciones Inalámbricas*



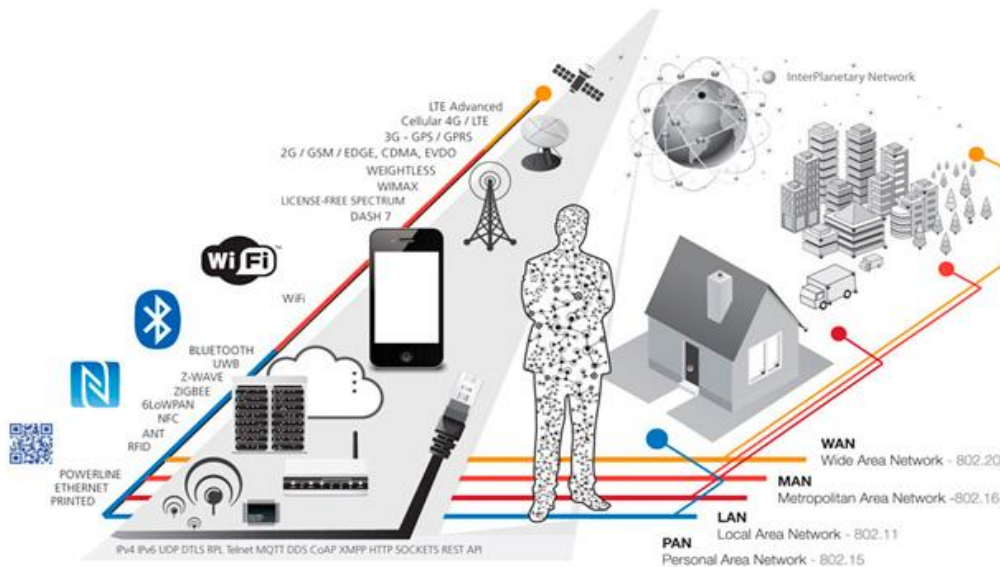
### 1.2.3 Tecnologías inalámbricas según su Alcance

Se muestra una pequeña parte del gran abanico de tecnologías inalámbricas existentes y las segmenta atendiendo a su alcance (Hinostroza-Quñones, 2022).

Permiten la conexión y comunicación entre dispositivos sin necesidad de cables, utilizando ondas electromagnéticas. Estas redes facilitan el acceso a internet, la transmisión de datos y la conectividad entre dispositivos en espacios personales, locales (Wi-Fi), y amplias áreas geográficas (redes móviles). Son esenciales para la implementación de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), ofreciendo flexibilidad, movilidad, y una infraestructura de comunicación crítica para la sociedad digital moderna (Herrera, 2022).

**Figura 3:**

*Distintas tecnologías inalámbricas*



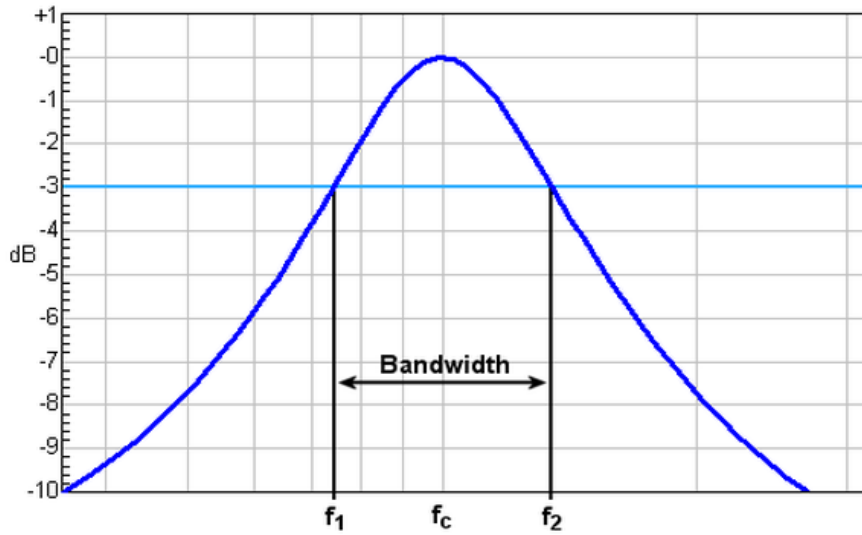
### **1.2.4 Ancho de banda.**

El ancho de banda se refiere a la capacidad de transmisión de una red y se mide en bits por segundo (bps). Este término indica la cantidad de datos que pueden ser enviados a través de una conexión de red en un período de tiempo específico, determinando la velocidad a la que la información se transmite desde un punto a otro. Un mayor ancho de banda permite transmitir

mayor cantidad de datos simultáneamente, lo que resulta en una comunicación más rápida y eficiente (Medina-Beltrán, 2021)

**Figura 4:**

*Ancho de Banda*



## 2 CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES

### 2.1 Diseño de Contrastación de Hipótesis

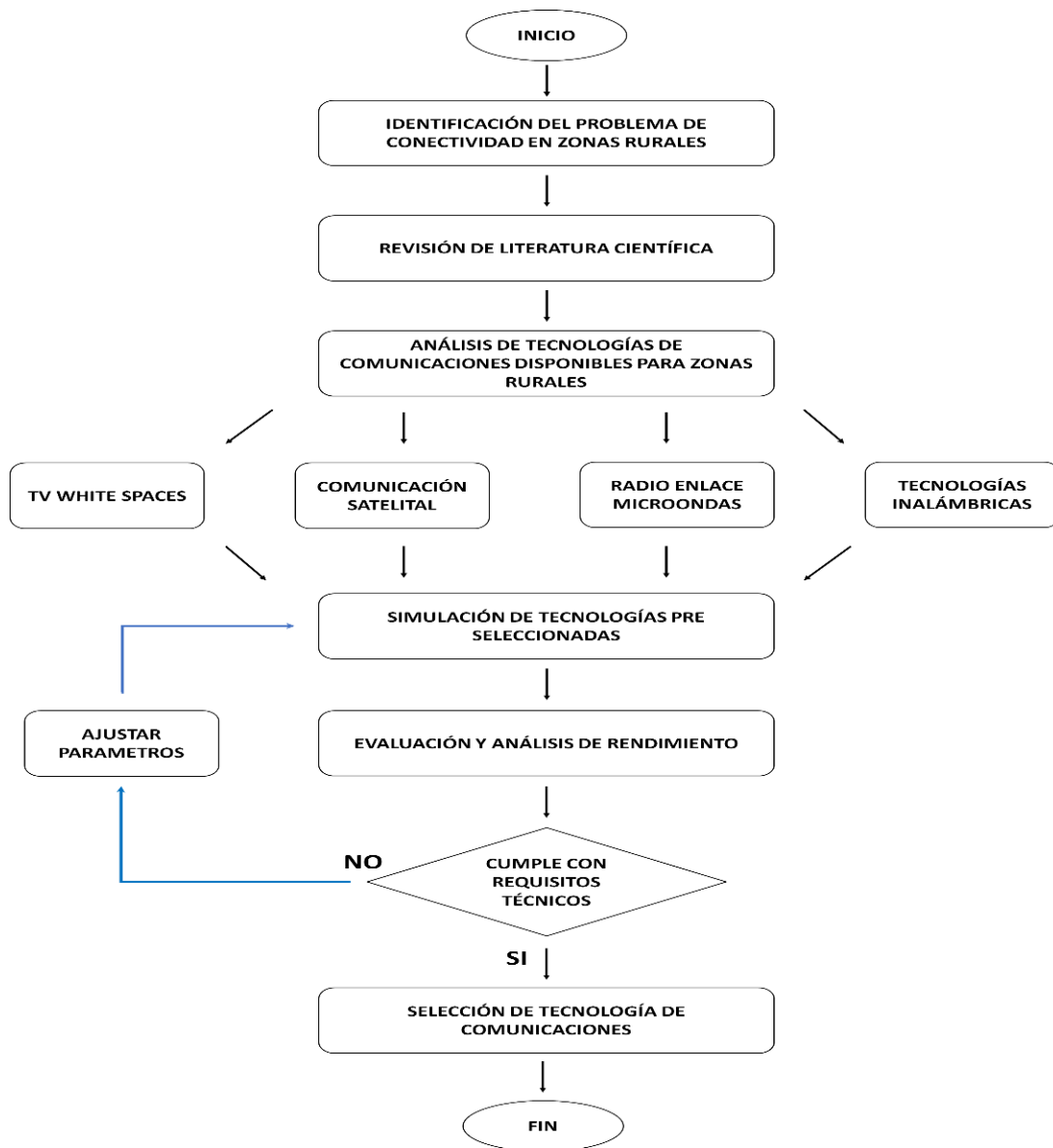
Se inicia con la identificación precisa del problema de conectividad en la empresa agroindustrial ubicada en Olmos, Lambayeque, caracterizando las limitaciones de infraestructura de telecomunicaciones en esta zona remota. Posteriormente, se ejecuta el Objetivo Específico 1 (OE1), realizando una revisión de literatura científica especializada en sistemas de telecomunicaciones para áreas remotas, abarcando antecedentes internacionales y nacionales, identificando soluciones tecnológicas implementadas en realidades similares, tales como sistemas satelitales, enlaces de microondas, redes de radio enlace y tecnologías inalámbricas de largo alcance, este análisis permite establecer el marco referencial y las bases teóricas que sustentan la investigación.

Para cada tecnología se evalúan características fundamentales como cobertura, capacidad de transmisión, latencia, inmunidad a interferencias, adaptabilidad a condiciones geográficas y climáticas de la región, este proceso culmina con la preselección de las tecnologías más adecuadas que serán procesadas y analizadas mediante herramientas de simulación especializadas como, Radio Mobile, se modelan las tecnologías preseleccionadas bajo las condiciones reales de la zona de estudio, también se simulan parámetros críticos incluyendo: potencia de transmisión, frecuencias de operación, ganancia de antenas, pérdidas por propagación en espacio libre, atenuación por lluvia, desvanecimiento por multitrayectoria, zona de Fresnel, relación señal-ruido (SNR), tasa de error de bits (BER), throughput, disponibilidad del enlace y margen de desvanecimiento.

Para la selección de la tecnología, se analiza la viabilidad técnica, sostenibilidad económica, adaptabilidad a las condiciones geográficas particulares de Olmos, Lambayeque, y escalabilidad futura, permitiendo seleccionar la tecnología que representa la solución óptima, equilibrando rendimiento técnico, viabilidad económica y factibilidad operacional.

**Figura 4**

*Diseño de Contrastación de Hipótesis*



## **2.2 Población, muestra**

### **2.2.1 Población**

La población de esta investigación está conformada por el conjunto de sistemas de telecomunicaciones inalámbricas disponibles y aplicables para proveer conectividad en zonas rurales remotas y alejadas, particularmente aquellos implementados en regiones con características geográficas y climáticas similares a las del distrito de Olmos, Lambayeque.

### **2.2.2 Muestra**

La muestra de estudio se delimita mediante un muestreo no probabilístico intencional o por conveniencia, seleccionando específicamente a cinco sistemas de telecomunicaciones inalámbricas que han sido implementados exitosamente en localidades rurales del Perú con condiciones geográficas comparables a la zona de Olmos, Lambayeque.

## **2.3 Técnicas, instrumentos, equipos y materiales**

### **2.3.1 Técnicas**

Este trabajo de investigación utiliza la revisión documental para analizar investigaciones previas y casos de estudio de implementaciones en áreas rurales, cimentando así el marco teórico de referencia, otra técnica que se aplica es la de simulación computacional, constituyéndose el eje central, ya que permite modelar el procedimiento de diferentes tecnologías inalámbricas bajo condiciones semejantes de Olmos, Lambayeque, desarrollando modelos virtuales de escenarios de propagación electromagnética sin implementación física.

### **2.3.2 Instrumentos**

El software Radio Mobile constituye el instrumento principal para simular radioenlaces terrestres, modelando propagación de señales, perfiles de terreno, y generando predicciones de cobertura y análisis de zonas de Fresnel. Google Earth Pro facilita la obtención de coordenadas geográficas, visualización 3D del terreno y medición de distancias.

### **2.3.3 Equipos y materiales**

Se requiere una computadora con las siguientes especificaciones, procesador Intel Core i5 o equivalente, 8 GB de RAM, disco sólido y tarjeta gráfica capaz de renderizar visualizaciones tridimensionales para ejecutar el software de simulación, la conexión a internet de banda ancha es esencial para acceder a bases de datos científicas, descargar información topográfica, consultar especificaciones de fabricantes y revisar publicaciones en repositorios académicos.

### 3 CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y examinan los resultados obtenidos en las simulaciones del sistema de comunicación propuesto para una empresa agroindustrial, ubicada en Olmos - Lambayeque, en primer lugar, se describen los escenarios modelados para cada alternativa tecnológica como Wi-Fi terrestre en banda libre, enlace satelital Starlink y red GPON, considerando los requerimientos de tráfico, la topografía y las condiciones reales de operación. a continuación, se analizan los principales indicadores técnicos como nivel de señal, margen, capacidad teórica y efectiva, latencia, junto con los costos de implementación, operación y mantenimiento, a fin de construir una comparación costo - beneficio, además, se discuten de manera crítica los hallazgos, contrastándolos con la literatura y los requerimientos de la empresa, para sustentar la selección de la solución que mejor garantiza la conectividad y la viabilidad del sistema de comunicación diseñado.

#### 3.1 Resultados

La empresa agroindustrial se encuentra ubicada en Olmos - Lambayeque, dedicada al cultivo y exportación de arándano bajo estrictos estándares de calidad, inició sus operaciones con 60 hectáreas de arándanos y, en la actualidad, cuenta con 460 hectáreas cultivadas, lo que refleja un crecimiento sostenido de su actividad productiva, este desarrollo es evidenciado en sus volúmenes de producción, en 2020 alcanzó 897 kilogramos; en 2021, 5,6 millones de kilogramos; y en 2022 llegó a exportar 8,9 millones de kilogramos, para 2025 se proyectó un volumen de 9,6 millones de kilogramos destinados a mercados altamente exigentes de Estados Unidos, Europa y Asia, cifras que dimensionan la relevancia económica y operativa de la empresa y justifican la

necesidad de contar con un sistema de comunicación robusto y confiable que soporte sus procesos productivos, logísticos y de gestión.

### ***3.1.1 Diagnóstico y requerimientos para la Infraestructura Actual de Comunicaciones***

El diagnóstico de la situación actual de la infraestructura de comunicaciones de la empresa agroindustrial ubicada en Olmos, Lambayeque, evidenció una serie de limitaciones que afectan directamente la gestión operativa y productiva. A partir de entrevistas con el personal técnico y operativo, así como de visitas in situ a las áreas de cultivo y a las instalaciones administrativas, se constató la ausencia de una red de comunicación estructurada, la limitada cobertura de señal en las zonas de producción agrícola y una alta dependencia de redes móviles con baja disponibilidad. Asimismo, se identificó la inexistencia de protocolos de comunicación estandarizados que articulen de manera eficiente los distintos procesos de la empresa.

Sobre la base de este diagnóstico, se definieron requerimientos para el diseño del sistema de comunicación, como el de garantizar la cobertura en zonas de difícil acceso, habilitar comunicación en tiempo real entre las áreas administrativas y operativas, incorporar equipos capaces de operar en condiciones climáticas adversas y asegurar la escalabilidad de la solución para acompañar futuras ampliaciones de la empresa, estos elementos orientan y justifican la propuesta de diseño planteada en la presente investigación.

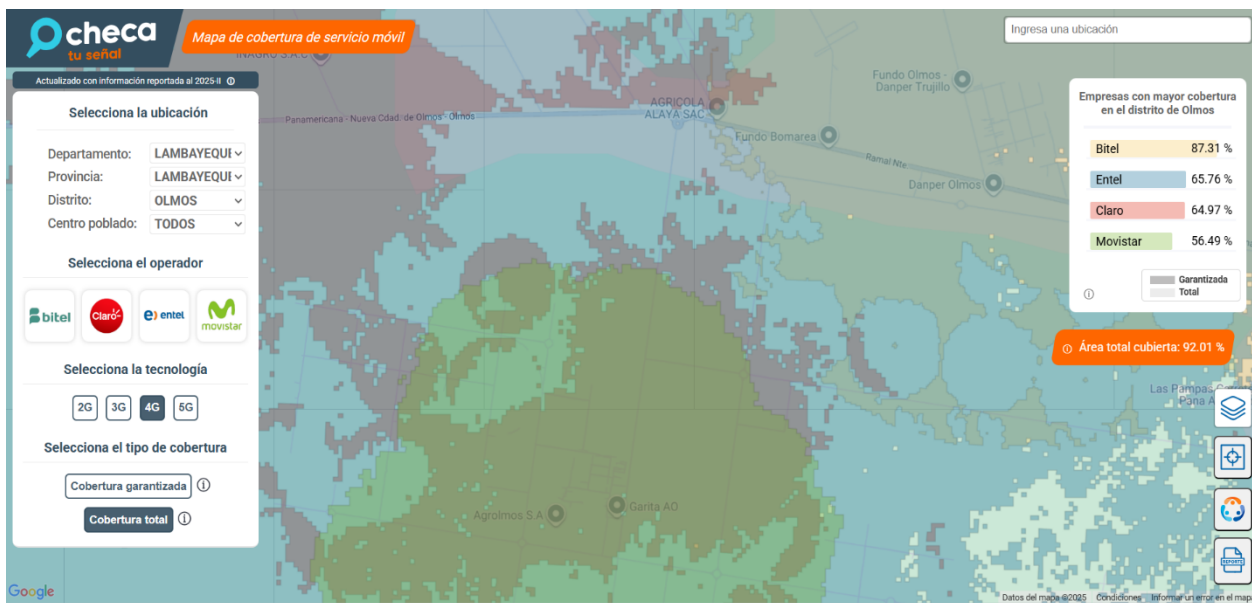
### ***3.1.2 Cobertura Actual de los Servicios de Telecomunicaciones***

Del análisis del mapa de cobertura móvil en el distrito de Olmos se observa que Bitel concentra aproximadamente el 87 % de la cobertura, lo que la posiciona como el operador con

mayor presencia en la zona. En contraste, Movistar alcanza solo alrededor del 56 %, situación que se traduce en un servicio más inestable, especialmente en áreas rurales. Si bien el área total teóricamente cubierta se aproxima al 92 %, la cobertura efectiva disminuye en los sectores agrícolas más alejados. En particular, las zonas donde se ubican Bomarea y Agrolmos presentan una cobertura irregular y fragmentada, lo que limita la continuidad del servicio de datos y respalda el diagnóstico de una alta dependencia de redes móviles con baja disponibilidad en campo. Este escenario justifica técnicamente la necesidad de un sistema de comunicación dedicado, planteándose el diseño de un enlace punto a punto en banda libre (5 GHz) como alternativa robusta para garantizar una conectividad más estable y confiable.

**Figura 5**

*Cobertura móvil de los operadores en el distrito de Olmos*

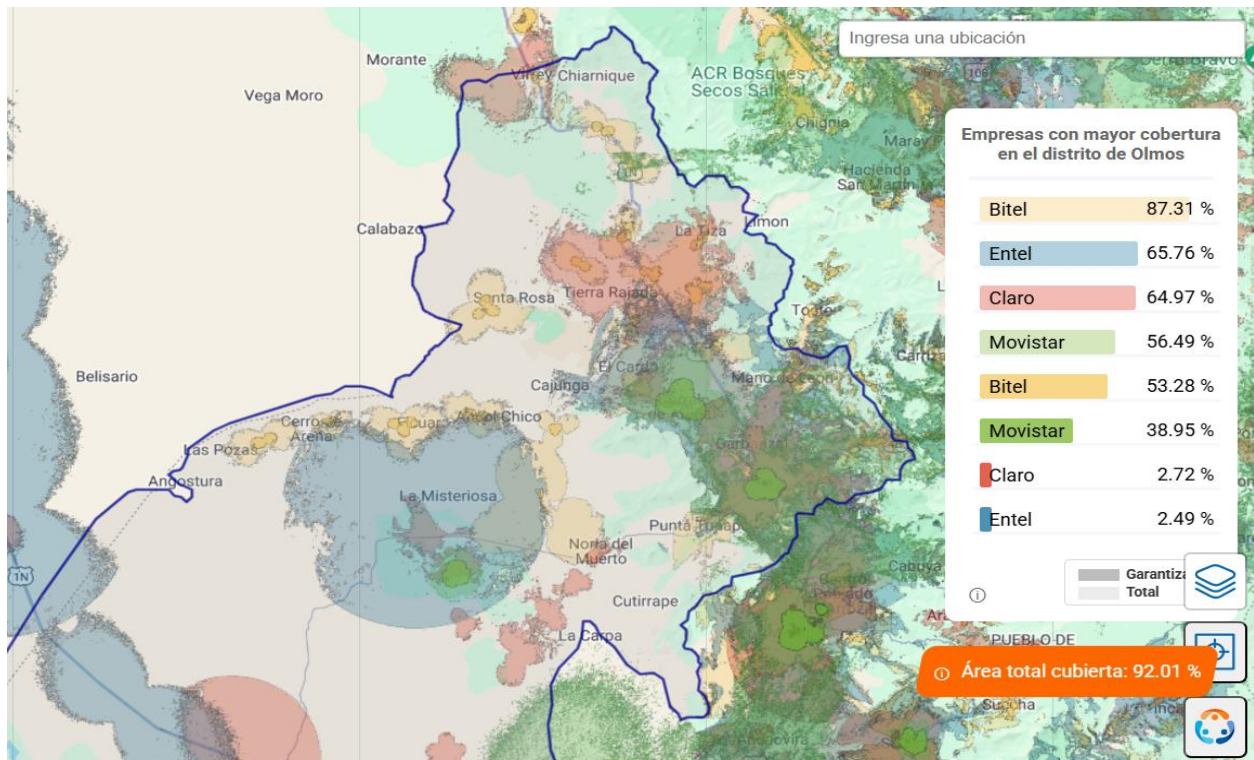


La figura N° 05, muestra el mapa de cobertura de servicio móvil del portal Checa tu señal para el distrito de Olmos, en Lambayeque, en él se aprecia una representación espacial de la cobertura de los principales operadores, como Bitel, Claro, Entel y Movistar, evidenciando zonas

con distinta intensidad de señal alrededor de las áreas agroindustriales, el recuadro lateral indica que Bitel alcanza la mayor cobertura total, con 87,31 %, seguida por Entel y Claro, mientras que Movistar presenta la menor presencia en el territorio, en conjunto, el sistema reporta un 92,01 % de área cubierta, aunque el mosaico de colores permite identificar sectores con cobertura irregular que resultan críticos para la operación de empresas agroindustrial.

**Figura 6**

*Comparación de cobertura total y garantizada en el área de estudio*



La figura N° 06, muestra el mapa de cobertura móvil en el distrito de Olmos, delimitado por un contorno azul, donde se superponen las áreas de servicio de los distintos operadores en la parte derecha se presenta el resumen cuantitativo, mostrando a la empresa Bitel la mayor cobertura total (87,31 %), seguida por Entel y Claro, mientras que Movistar registra la menor participación,

cuando se analiza solo la cobertura garantizada, los porcentajes se reducen de forma significativa, en especial para Claro y Entel, lo que evidencia una disponibilidad más limitada en condiciones exigentes, el mapa muestra un 92,01 % de área cubierta, pero con zonas de sombra y superposición que resultan críticas para planificar un sistema de comunicación robusto en el ámbito de una agroindustrial de Olmos.

Del análisis de los mapas de cobertura móvil en el distrito de Olmos se observa que Bitel concentra cerca del 87 % de la cobertura, posicionándose como el operador con mayor presencia en la zona, mientras que Movistar alcanza aproximadamente el 56 %, lo que se traduce en un servicio más limitado, sobre todo en áreas rurales, aunque el área total cubierta se aproxima al 92 %, la cobertura efectivamente garantizada disminuye en las zonas agrícolas más alejadas, en particular, las áreas donde se ubican la empresa agroindustrial de estudio, presentan una cobertura móvil irregular, lo que refuerza el diagnóstico de alta dependencia de redes con baja disponibilidad en campo, este escenario sustenta la necesidad de un sistema de comunicación dedicado y justifica técnicamente la propuesta de un enlace punto a punto en banda libre (5 GHz) como alternativa adecuada para asegurar una conectividad estable y confiable en la empresa agroindustrial.

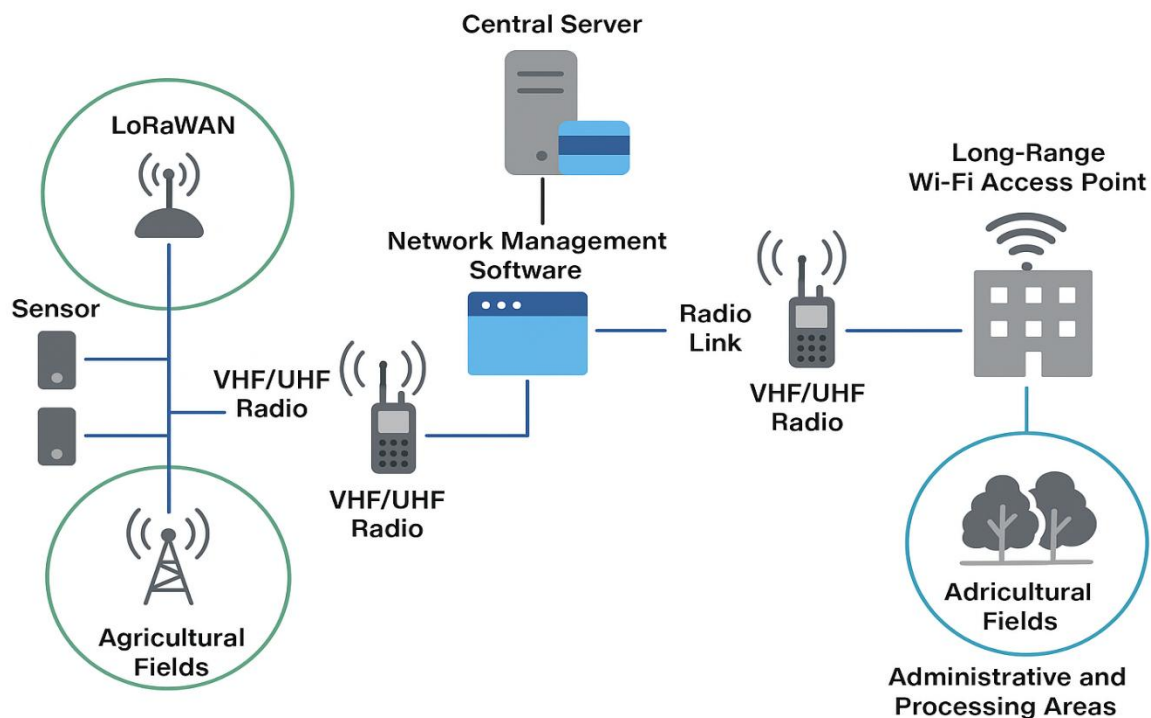
### ***3.1.3 Arquitectura del sistema de comunicaciones***

La figura N° 07, representa una arquitectura de comunicaciones para una empresa agroindustrial que integra monitoreo de campo y conectividad de datos, en las áreas agrícolas se despliegan sensores que envían información a través de una red LoRaWAN hacia un nodo concentrador, desde allí, la información se transporta mediante radios VHF/UHF hasta un software de gestión de red conectado a un servidor central, donde se almacenan y administran los datos,

además un enlace de radio VHF/UHF que establece la comunicación con un punto de acceso Wi-Fi de largo alcance ubicado en las áreas administrativas y de procesamiento, permitiendo el acceso a la red desde oficinas y zonas operativas, el esquema ilustra, de manera integrada, la relación entre los dispositivos de campo, los enlaces de radio y la infraestructura de gestión centralizada necesaria para sostener un sistema de comunicación confiable en entornos agrícolas extensos.

**Figura 7**

*Arquitectura del sistema de comunicaciones*



La figura N° 07, muestra la arquitectura de comunicaciones que integra tecnologías diferenciadas según las necesidades de la empresa agroindustrial, en los campos de cultivo, la red LoRaWAN permite la transmisión eficiente de los datos generados por los sensores distribuidos en las parcelas, la coordinación operativa se refuerza mediante enlaces VHF/UHF, que facilitan la

comunicación directa y confiable entre los operarios y los nodos intermedios, en las áreas administrativas y de procesamiento, un sistema Wi-Fi de largo alcance proporciona acceso a la red corporativa y a las aplicaciones de gestión, posteriormente, toda la información se concentra en un servidor central con software de gestión de red, encargado del control, supervisión y monitoreo integral del sistema de comunicaciones propuesto.

Para dimensionar la capacidad del sistema de comunicación en los campos agrícolas, se consideró el tráfico generado por los sensores y las cámaras de monitoreo. En primer lugar, se proyecta la instalación de 200 sensores basados en LoRaWAN, cada uno con una velocidad de transmisión aproximada de 50 kbps, lo que representa un requerimiento agregado cercano a 10 Mbps.

A ello se suma el flujo de video proveniente de 10 cámaras IP desplegadas en las áreas de cultivo para monitoreo visual, configuradas en resolución 1080p con compresión H.264 y un bitrate promedio de 4 Mbps por cámara, equivalente a unos 40 Mbps de tráfico total. Estas estimaciones permiten establecer una referencia clara del ancho de banda mínimo que debe soportar la infraestructura propuesta, garantizando tanto la transmisión continua de datos de sensores como la operación adecuada de las cámaras en tiempo casi real.

Para estimar la demanda de capacidad en las áreas administrativas, se consideró el tráfico generado por las estaciones conectadas vía Wi-Fi y por el servidor central. En las oficinas se proyecta la conexión de 50 dispositivos (entre computadoras personales y tabletas), con un

consumo promedio del orden de 5 Mbps por equipo para navegación, acceso a sistemas de gestión y transferencia de datos, lo que supone un requerimiento agregado cercano a 250 Mbps.

A ello se añade el tráfico asociado al servidor central, encargado del procesamiento de información y de la realización de copias de seguridad, cuyo comportamiento contempla picos de hasta 100 Mbps. De este modo, el tráfico combinado de sensores, cámaras, usuarios administrativos y servidor alcanza aproximadamente 400 Mbps. Considerando un margen adicional del 20 % para overhead de protocolos, retransmisiones y mecanismos de seguridad, la capacidad nominal del sistema de comunicación debería dimensionarse en torno a 480 Mbps para operar con holgura y estabilidad.

En el análisis de la arquitectura de comunicaciones propuesta se identifica como principal cuello de botella el enlace entre el punto de acceso de largo alcance y el servidor central, ya que por este segmento convergen simultáneamente la telemetría de los sensores, las señales de videovigilancia, el tráfico generado por los usuarios administrativos y los procesos que requieren tratamiento de datos en tiempo casi real. Esta concentración de flujos justifica la necesidad de un medio de alta capacidad y baja latencia.

En este contexto, se recomienda la implementación de un enlace basado en el estándar Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), operando en la banda de 5 GHz, con canal de 160 MHz y configuración MIMO 4x4. Bajo estas condiciones, es posible disponer de una capacidad superior a 1 Gbps, lo que permite asegurar del orden de 500 Mbps útiles, ofreciendo un margen adecuado para absorber picos de demanda y garantizar la estabilidad del sistema de comunicación en la empresa agroindustrial.

La figura N° 08, muestra una torre autoportante de telecomunicaciones perteneciente a la empresa Agroolmos, ubicada en una zona de infraestructura agrícola, se trata de una estructura metálica reticulada, pintada en franjas rojas y blancas, sobre la cual se disponen varios sistemas radiantes instalados a diferentes alturas, destinados a la transmisión y recepción de señales, evidenciando su condición de sitio técnicamente habilitado, esta antena constituye un punto de referencia clave para el diseño del sistema de comunicación propuesto, ya que puede emplearse como nodo de enlace o estructura de soporte para futuros equipos de radio, aprovechando su altura y visibilidad sobre los campos agrícolas y las áreas administrativas de la empresa.

**Figura 8**

*Infraestructura existente para enlaces inalámbricos en la empresa Agroolmos*



La figura N° 09, muestra una torre autoportante de telecomunicaciones instalada en medio de los campos de cultivo de la empresa agroindustrial donde se desarrolla el estudio, la estructura metálica se eleva sobre una base de concreto que delimita claramente el sitio de la estación, su ubicación estratégica, en un punto despejado y con visibilidad dominante sobre los lotes agrícolas y los caminos de acceso, la convierte en un candidato idóneo para alojar equipos de radio y actuar como nodo principal del sistema de comunicación propuesto, esta antena de referencia constituye un elemento clave para el diseño del enlace inalámbrico, ya que su altura y entorno libre de obstáculos favorecen la línea de vista hacia las áreas administrativas y otros puntos de interés dentro de la operación agroindustrial.

**Figura 9**

*Torre de referencia para el sistema de comunicaciones en la empresa agroindustrial*

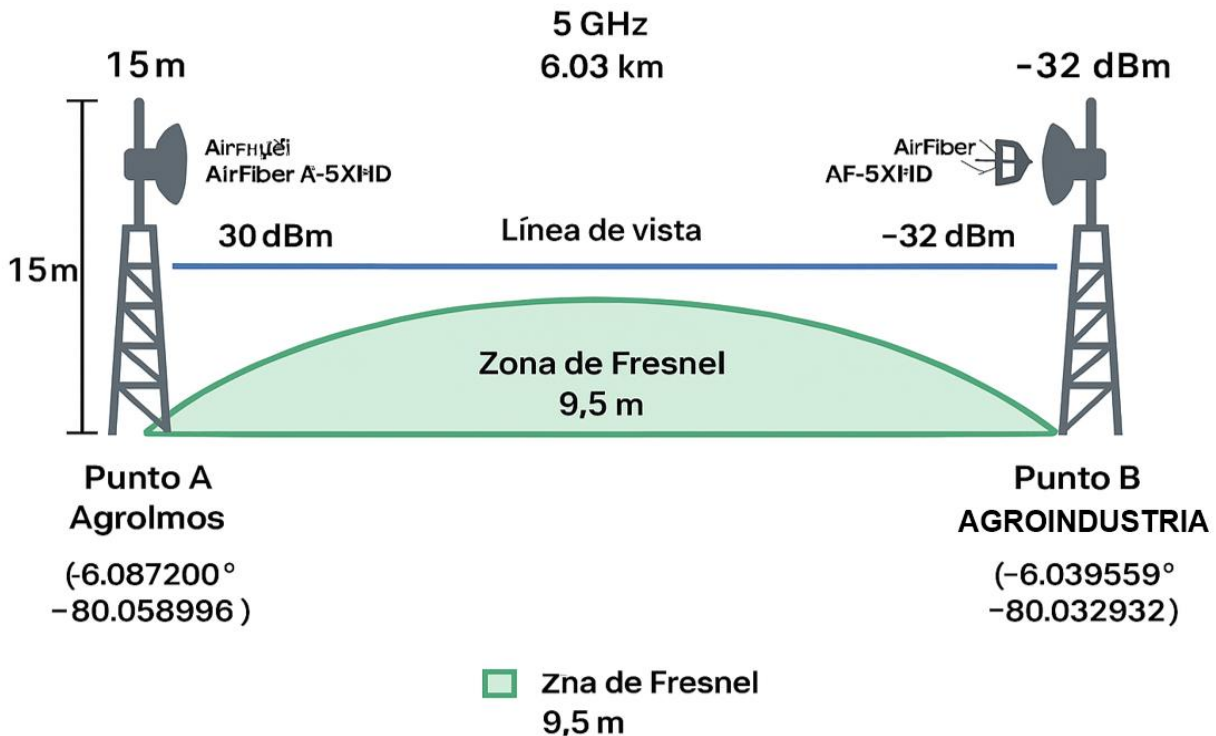


### 3.1.4 Enlace punto a punto Agrolmos - Agroindustria en la banda de 5 Ghz

La figura N° 10, presenta el enlace punto a punto propuesto entre Agrolmos (Punto A) y Agroindustria (Punto B) en la banda de 5 GHz, con una distancia aproximada de 6,03 km, en cada extremo se dispone una torre de 15 m equipada con radios AirFiber AF-5XHD; el transmisor opera con una potencia de 30 dBm y se obtiene un nivel recibido cercano a -32 dBm, valor compatible con un enlace de alta capacidad, la gráfica muestra la línea de vista directa y la primera zona de Fresnel, con un radio máximo de 9,5 m, completamente libre de obstáculos, lo que garantiza condiciones favorables para la propagación, las coordenadas geográficas de ambos puntos se incluyen para precisar la ubicación del enlace dentro del entorno agroindustrial, este esquema sintetiza los parámetros clave del diseño y respalda la viabilidad técnica del radioenlace PTP propuesto.

**Figura 10**

*Enlace punto a punto Agrolmos - Agroindustria en 5 GHz*



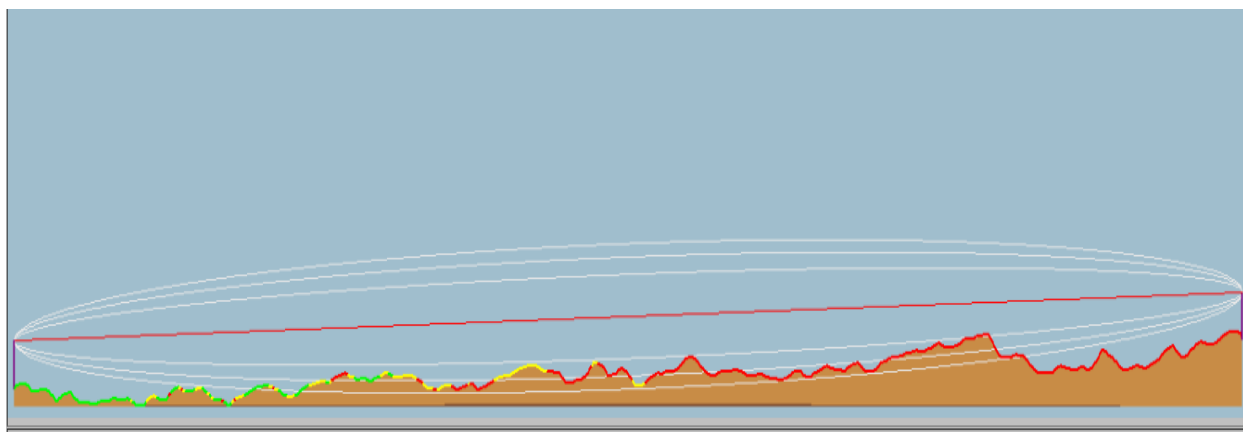
En el diseño del enlace punto a punto Agroolmos - Agroindustria, se empleó una frecuencia de 5 GHz en banda libre, con una potencia de transmisión de 30 dBm y pérdidas de línea del orden de 1 dB tanto en el tramo emisor como en el receptor, para ambos extremos se consideró el uso de antenas parabólicas direccionales de 30 dBi, cuya sensibilidad equivalente se ajusta a los niveles requeridos por el sistema, con estos parámetros se efectuaron los cálculos de presupuesto de enlace y de zona de Fresnel, fijando como criterio una fiabilidad del 99,995 % para garantizar la continuidad del servicio, permitiendo determinar la configuración óptima del radioenlace, en particular la altura adecuada de las antenas y la ganancia necesaria de los sistemas radiantes, asegurando márgenes suficientes frente a pérdidas por propagación y variaciones propias del entorno agroindustrial donde se implementará la solución de conectividad.

### ***3.1.5 Perfil del enlace con antenas instaladas a 10 m de altura***

La figura N° 11, corresponde al perfil de enlace entre los dos puntos del sistema de comunicación propuesto, en el gráfico se aprecia la topografía del terreno a lo largo del trayecto, con variaciones de altura que se representan en distintos colores, sobre la cual se traza la línea recta de vista entre antenas (en rojo), las curvas elípticas superpuestas representan las zonas de Fresnel, mostrando cómo se expande el frente de onda entre el emisor y el receptor, observando que la primera zona de Fresnel se mantiene mayormente despejada de obstáculos significativos, condición necesaria para garantizar niveles adecuados de señal y reducir pérdidas por difracción, respaldando la viabilidad radioeléctrica del enlace punto a punto diseñado para conectar las instalaciones agroindustriales en el área de estudio.

**Figura 11**

*Perfil topográfico y zona de Fresnel del enlace punto a punto - 10 metros de altura*



La tabla N° 01, presenta configuración de la antena emisora ubicada en el sitio AgroOlmos, empleada en el diseño del enlace punto a punto con el punto Agroindustria, se consignan las coordenadas geográficas del emplazamiento (latitud  $-6,087200^\circ$  y longitud  $-80,058996^\circ$ ), una elevación del terreno de 57,9 m y una altura de instalación de la antena de 10 m sobre el nivel del suelo, además, se especifica el azimut de orientación del sistema radiante ( $28,55^\circ$  TN |  $30,21^\circ$  MG) y una ligera inclinación de  $0,07^\circ$ , parámetros que permiten alinear con precisión el haz de radiación hacia el receptor y optimizar el desempeño del radioenlace propuesto en el entorno agroindustrial.

**Tabla 1**

*Configuración de la antena emisora en Punto AgroOlmos*

<u>AgrOlmos</u> (1)	
Latitud	$-6.087200^\circ$
Longitud	$-80.058996^\circ$
Elevación del terreno	57.9 m
Altura de la antena	10.0 m
Azimuth	$28.55$ TN   $30.21$ MG $^\circ$
Inclinación	$0.07^\circ$

La tabla N° 02, muestra la configuración de la antena receptora ubicada en el punto Agroindustria, correspondiente al extremo del enlace punto a punto con AgroOlmos, registrando sus coordenadas geográficas (latitud  $-6,039559^\circ$  y longitud  $-80,032932^\circ$ ), con una elevación del terreno de 68,2 m y una altura de instalación de la antena de 10 m sobre el nivel del suelo, además se precisa el azimut de orientación ( $208,55^\circ$  TN |  $210,24^\circ$  MG) y una ligera inclinación de  $-0,12^\circ$ , parámetros que aseguran la alineación del haz de radiación hacia la antena emisora, datos que permiten definir con precisión la geometría del enlace y son esenciales para verificar la viabilidad radioeléctrica del sistema de comunicación propuesto para la empresa agroindustrial.

**Tabla 2**

*Configuración de la antena receptora Punto Agroindustria*

	(2) Agroindustria
Latitud	$-6.039559^\circ$
Longitud	$-80.032932^\circ$
Elevación del terreno	68.2 m
Altura de la antena	10.0 m
Azimuth	208.55 TN   210.24 MG $^\circ$
Inclinación	$-0.12^\circ$

La tabla N° 03, presenta los parámetros del sistema de radio utilizados en el análisis del enlace punto a punto propuesto entre las instalaciones agroindustriales, consignándose una potencia de transmisión de 30 dBm y pérdidas en el cable de 1 dB tanto en el tramo emisor como en el receptor, en cada extremo del enlace se emplean antenas direccionales de 30 dBi de ganancia, configuradas de manera simétrica para maximizar el balance de potencia, además, se registra una sensibilidad del receptor de  $-74,13$  dBm, valor que constituye el umbral mínimo para garantizar la recepción adecuada de la señal, datos que sirven de base para el cálculo del presupuesto de enlace

y para verificar que el diseño satisface los márgenes requeridos de disponibilidad y calidad de servicio en la empresa agroindustrial.

**Tabla 3**

*Parámetros del sistema de radio para el análisis del enlace PTP*

<b>Sistema de radio</b>	
Potencia TX	30.00 dBm
Pérdida en cable TX	1.00 dB
Ganancia de antena TX	30.00 dBi
Ganancia de antena RX	30.00 dBi
Pérdida en cable RX	1.00 dB
Sensibilidad RX	-74.13 dBm

La tabla N° 04, muestra la propagación correspondiente al enlace inalámbrico diseñado entre las instalaciones agroindustriales, detallándose una pérdida en espacio libre de 123,31 dB, a la que se suma una pérdida estadística de 50,91 dB asociada a variaciones propias del medio y a condiciones de propagación no determinísticas, no se registran pérdidas adicionales por bosque ni por urbanización, y la obstrucción del trayecto resulta prácticamente despreciable (-3,84 dB), lo que confirma un escenario con línea de vista predominante, la pérdida total del enlace alcanza 170,38 dB, valor que se utiliza posteriormente en el cálculo del presupuesto de enlace y en la verificación del margen de desvanecimiento requerido para garantizar la disponibilidad del sistema de comunicación propuesto.

**Tabla 4**

*Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria*

	<b>Propagation</b>
Pérdida en espacio libre	123.31 dB
Pérdida por obstrucción	-3.84 dB
Pérdida por bosque	0.00 dB
Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida estadística	50.91 dB
Pérdida total	170.38 dB

La tabla N° 05, muestra los resultados de desempeño del enlace punto a punto diseñado en 5 GHz para interconectar las instalaciones agroindustriales, indicando una distancia de 6,031 km y una frecuencia de operación de 5825 MHz, con una Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente de 794,328 W y una ganancia total del sistema de 162,13 dB, la fiabilidad requerida se fija en 99,990 %, mientras que la señal recibida alcanza -82,38 dBm (equivalente a 17,02  $\mu$ V), el cálculo del margen de escucha arroja un valor de -8,25 dB, dato clave para valorar la suficiencia del presupuesto de enlace y la necesidad de ajustar parámetros como altura de antenas o ganancia para asegurar la disponibilidad del sistema de comunicación propuesto.

**Tabla 5**

*Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria*

Performance	
Distance	6.031 km
Precisión	10.0 m
Frecuencia	5825.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente	794.328 W
Ganancia del sistema	162.13 dB
Fiabilidad requerida	99.990 %
Señ recibida	-82.38 dBm
Señ recibida	17.02 $\mu$ V
Márgen de escucha	-8.25 dB

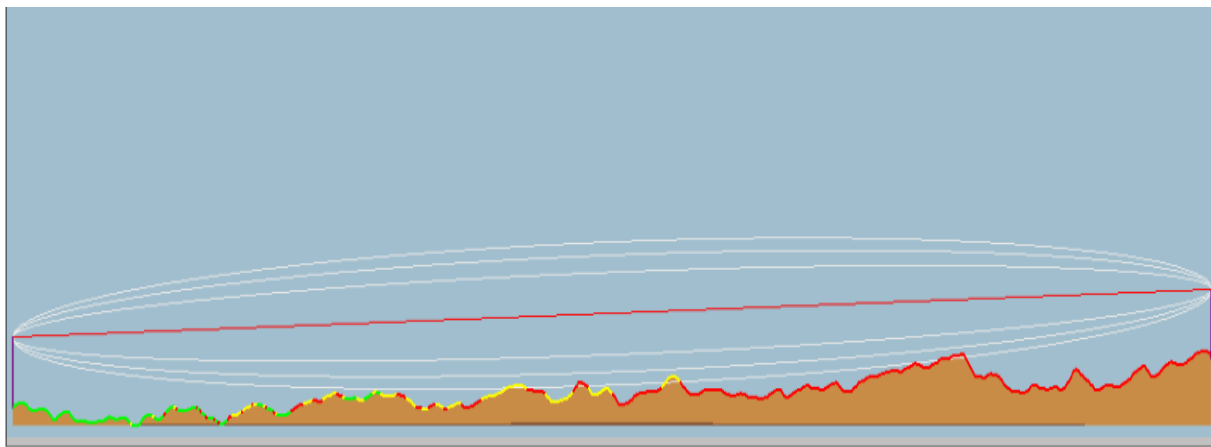
### 3.1.6 Perfil del enlace con antenas instaladas a 15 m de altura

La figura N° 12, muestra el perfil topográfico del enlace punto a punto diseñado entre las instalaciones agroindustriales, donde se representa la línea de vista (en rojo) y las elipses correspondientes a las zonas de Fresnel, sobre el relieve del terreno, que presenta irregularidades moderadas a lo largo del trayecto, se observa que la primera zona de Fresnel se mantiene prácticamente despejada en todo el recorrido, condición indispensable para minimizar pérdidas

por difracción y garantizar una propagación eficiente en la banda de 5 GHz, además se confirma que la configuración propuesta de alturas de antena y distancia del enlace es coherente con los criterios de diseño radioeléctrico adoptados en la tesis, respaldando la viabilidad técnica del sistema de comunicación planteado para la empresa agroindustrial.

**Figura 12**

*Perfil topográfico y zona de Fresnel del enlace punto a punto - 15 metros de altura*



La tabla N° 06, muestra la propagación del enlace inalámbrico considerando antenas instaladas a 15 metros de altura, registrando una pérdida en espacio libre de 123,31 dB, valor asociado a la distancia y a la frecuencia de operación del enlace, registrando una por obstrucción reducida (-2,90 dB), confirmando que el trayecto mantiene esencialmente la línea de vista, sin afectación relevante por obstáculos físicos, es importante señalar que, no se identifican atenuaciones adicionales por bosque ni por urbanización (0,00 dB), coherentes con el entorno predominantemente agrícola del área de estudio, la pérdida, asociada a variaciones del medio y desvanecimientos aleatorios, alcanza 51,00 dB, la pérdida total de propagación asciende a 171,42 dB, parámetro fundamental para el cálculo del presupuesto de enlace y la verificación del margen

necesario para garantizar la disponibilidad del sistema de comunicación propuesto entre las instalaciones agroindustriales.

**Tabla 6**

*Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria*

	<b>Propagation</b>
Pérdida en espacio libre	123.31 dB
Pérdida por obstrucción	-2.90 dB
Pérdida por bosque	0.00 dB
Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida estadística	51.00 dB
Pérdida total	171.42 dB

La tabla N° 07, muestra los resultados de desempeño del enlace punto a punto diseñado en la banda de 5 GHz, considerando una distancia de 6,031 km y una precisión de localización de 10 metros, el sistema opera a 5825 MHz, con una Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente de 794,328 W y una ganancia total de 162,13 dB, la fiabilidad objetivo se fija en 99,990 %, mientras que la señal recibida se estima en -83,42 dBm (15,11  $\mu$ V), el margen de escucha obtenido es de -9,29 dB, lo que evidencia que, con la configuración actual, el enlace trabaja por debajo del margen recomendado y requiere ajustes en parámetros como altura de torres, alineamiento o ganancia efectiva de antenas para alcanzar la disponibilidad planteada en la propuesta de sistema de comunicación para la empresa agroindustrial.

En esta configuración se observa que, al incrementarse la altura de las antenas, la pérdida total del enlace también aumenta y, en consecuencia, el nivel de señal recibida disminuye, evidenciando que una mayor altura no garantiza necesariamente un mejor desempeño radioeléctrico; por el contrario, puede generar condiciones menos favorables dependiendo del

perfil topográfico y de los parámetros de propagación, de este análisis se desprende que el diseño del enlace no debe basarse únicamente en elevar las antenas, sino en optimizar integralmente la relación entre altura, distancia, zona de Fresnel y características del entorno, a fin de minimizar las pérdidas y asegurar la calidad de la conectividad en la empresa agroindustrial.

**Tabla 7**

*Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria*

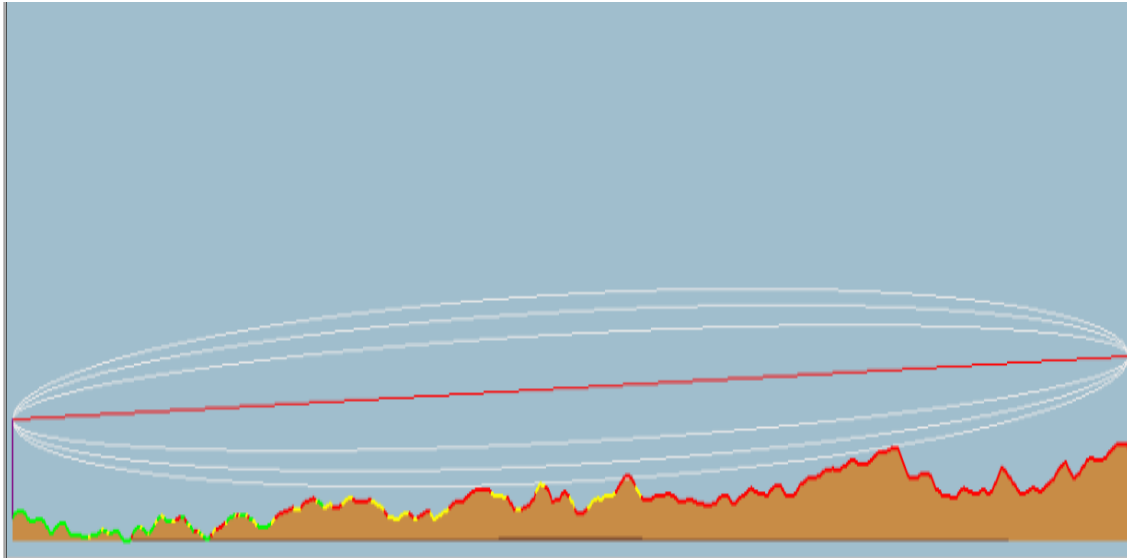
<b>Performance</b>	
<b>Distance</b>	<b>6.031 km</b>
Precisión	10.0 m
Frecuencia	5825.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente	794.328 W
Ganancia del sistema	162.13 dB
Fiabilidad requerida	99.990 %
Señal recibida	-83.42 dBm
Señal recibida	15.11 $\mu$ V
<b>Márgen de escucha</b>	<b>-9.29 dB</b>

### **3.1.7 Perfil del enlace con antenas instaladas a 16 m de altura**

La figura N° 13, corresponde al perfil radioeléctrico del enlace punto a punto diseñado entre el punto AgroOlmos y el punto Agroindustria en estudio, podemos observar que sobre el relieve del terreno se muestra la línea de vista del enlace (trazo rojo) y las elipses que representan las distintas zonas de Fresnel, apreciándose que la primera zona de Fresnel se mantiene mayormente despejada a lo largo del trayecto, con una separación suficiente respecto al relieve, lo que reduce las pérdidas por difracción y favorece la propagación de la señal en la banda de 5 GHz., confirmando que la configuración de alturas de antena seleccionada es técnicamente viable para garantizar la continuidad del servicio y la calidad de la conectividad requerida por la empresa agroindustrial.

**Figura 13**

*Perfil topográfico y zona de Fresnel del enlace punto a punto - 16 metros de altura*



La tabla N° 08, presenta el desglose de pérdidas de propagación del enlace punto a punto diseñado en la banda de 5 GHz para la empresa agroindustrial, observándose una pérdida en espacio libre de 123,31 dB, asociada a la distancia y frecuencia de operación, y una pérdida de 51,01 dB vinculada a desvanecimientos y variaciones del medio, cabe indicar que no se registran atenuaciones adicionales por bosque ni por urbanización (0,00 dB), coherentes con el entorno predominante agrícola del trayecto, la pérdida por obstrucción resulta reducida (-5,17 dB), lo que confirma un enlace con línea de vista prácticamente despejada, la pérdida total asciende a 169,16 dB, valor que se utiliza en el presupuesto de enlace para verificar que el sistema de comunicación propuesto cumple los márgenes requeridos de disponibilidad y calidad de servicio en la conexión punto AgroOlmos - punto Agroindustria.

**Tabla 8***Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria*

	Propagation
Pérdida en espacio libre	123.31 dB
Pérdida por obstrucción	-5.17 dB
Pérdida por bosque	0.00 dB
Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida estadística	51.01 dB
Pérdida total	169.16 dB

La tabla N° 09, muestra los resultados de desempeño del enlace punto a punto en 5 GHz para la configuración optimizada del sistema de comunicación entre las instalaciones agroindustriales. Se mantiene una distancia de 6,031 km y una frecuencia de operación de 5825 MHz, con una Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente de 794,328 W y una ganancia total del sistema de 162,13 dB. La fiabilidad objetivo se establece en 99,990 %. Bajo estas condiciones, la señal recibida se estima en -81,16 dBm (19,59  $\mu$ V), lo que mejora respecto a escenarios previos, pero aún arroja un margen de escucha de -7,03 dB. Este resultado indica que, aunque el enlace se aproxima a los niveles deseables, todavía requiere ajustes adicionales en la configuración (altura efectiva, alineamiento o ganancia de antenas) para asegurar con holgura la disponibilidad y calidad de servicio exigidas en la empresa agroindustrial.

En este escenario, el incremento de un metro en la altura de la antena se tradujo en una disminución de las pérdidas totales del enlace, explicándose, porque la componente de pérdida por obstrucción se redujo, al lograrse un mayor despeje de la primera zona de Fresnel, lo que se refleja en un nivel de señal recibida más favorable, con esta adecuación de la altura, se puede concluir que una instalación de las antenas alrededor de los 16 metros constituye una configuración más

eficiente para el enlace, al mejorar las condiciones de propagación y contribuir a la calidad de la conectividad requerida por la empresa agroindustrial.

**Tabla 9**

*Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria*

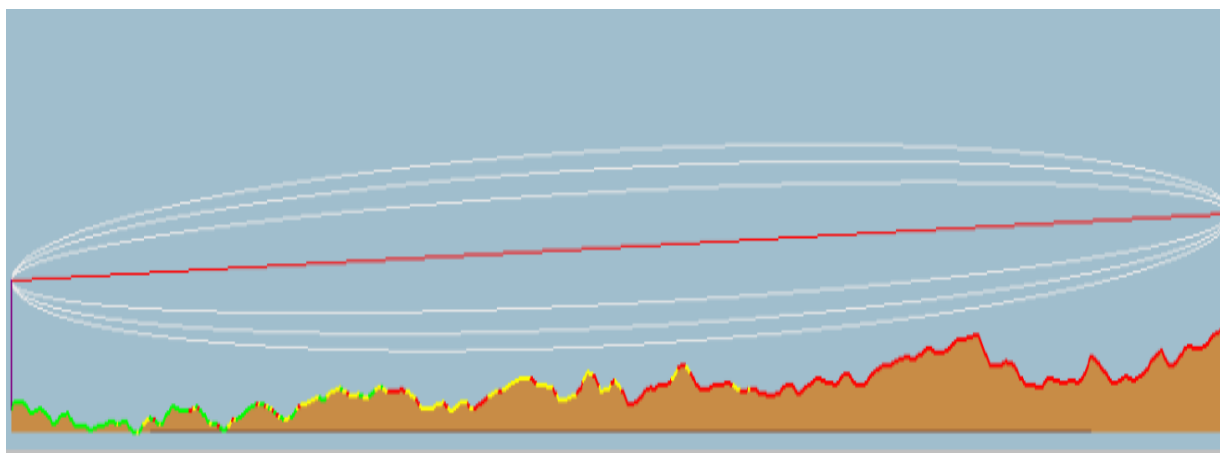
<b>Performance</b>	
<b>Distance</b>	<b>6.031 km</b>
Precisión	10.0 m
Frecuencia	5825.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente	794.328 W
Ganancia del sistema	162.13 dB
Fiabilidad requerida	99.990 %
Señ recibida	-81.16 dBm
Señ recibida	19.59 $\mu$ V
<b>Márgen de escucha</b>	<b>-7.03 dB</b>

### **3.1.8 Perfil del enlace con antenas instaladas de 17 m a 20 m de altura**

La imagen representa el perfil radioeléctrico del enlace punto a punto diseñado entre AgroOlmos y la empresa agroindustrial, considerando la altura optimizada de las antenas. Sobre el relieve del terreno se traza la línea de vista del enlace (en rojo) y las elipses que corresponden a las distintas zonas de Fresnel. Se aprecia que, con la nueva configuración, la primera zona de Fresnel queda prácticamente despejada en todo el trayecto, incrementando la separación respecto al terreno y reduciendo la pérdida por obstrucción. Este resultado confirma que el ajuste de la altura de las torres mejora las condiciones de propagación en la banda de 5 GHz y contribuye a alcanzar los niveles de señal requeridos para garantizar la continuidad del servicio y la calidad de la conectividad en la empresa agroindustrial.

**Figura 14**

*Perfil topográfico y zona de Fresnel del enlace punto a punto de 17 a 20 m.*



La tabla N° 10, presenta el análisis de propagación del enlace punto a punto en la banda de 5 GHz para la configuración final de alturas de antena, observándose una pérdida en espacio libre de 123,31 dB, asociada a la distancia y frecuencia de operación, y una pérdida de 51,07 dB, vinculada a fenómenos de desvanecimiento y variabilidad del medio, cabe indicar que no se registran pérdidas adicionales por bosque (0,00 dB), vinculados con el entorno predominante agrícola. La pérdida por obstrucción es reducida (-4,22 dB), lo que indica un despeje adecuado de la zona de Fresnel, la pérdida total asciende a 170,16 dB, valor que se emplea para verificar el presupuesto de enlace y confirmar la viabilidad radioeléctrica del sistema de comunicación propuesto para la empresa agroindustrial.

**Tabla 10**

*Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria*

	<b>Propagation</b>
Pérdida en espacio libre	123.31 dB
Pérdida por obstrucción	-4.22 dB
Pérdida por bosque	0.00 dB
Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida estadística	51.07 dB
Pérdida total	170.16 dB

La tabla N° 11, recoge los resultados de desempeño del enlace punto a punto en 5 GHz para una distancia de 6,031 km, con una precisión de localización de 10 m y una frecuencia de operación de 5825 MHz, la Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente alcanzada es de 794,328 W, con una ganancia total del sistema de 162,13 dB y una fiabilidad objetivo del 99,990 %. Bajo estas condiciones, la señal recibida se estima en -82,16 dBm (17,45  $\mu$ V), lo que permite la detección, pero todavía arroja un margen de escucha de -8,03 dB. Este valor indica que el enlace continúa trabajando por debajo del margen recomendado, por lo que, aunque el diseño se aproxima a la operación deseada, aún son necesarios ajustes finos en la configuración del sistema de comunicación propuesto para la empresa agroindustrial.

**Tabla 11**

*Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria*

<b>Performance</b>	
<b>Distance</b>	<b>6.031 km</b>
Precisión	10.0 m
Frecuencia	5825.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente	794.328 W
Ganancia del sistema	162.13 dB
Fiabilidad requerida	99.990 %
Señ recibida	-82.16 dBm
Señ recibida	17.45 $\mu$ V
<b>Márgen de escucha</b>	<b>-8.03 dB</b>

En el análisis de la simulación se puede observar que, al incrementar la altura de las antenas por encima de 16 m, la pérdida de señal se incrementa y el desempeño del enlace resulta inferior al obtenido con la configuración de 16 m., para torres de 25 m la señal recibida se degrada aún más, lo que evidencia que el aumento de altura no siempre se traduce en mejores condiciones de propagación, sino que puede generar un mayor desajuste de la zona de Fresnel y, en consecuencia, mayores atenuaciones, estos resultados, concluyen que una altura de 16 m constituye la opción

más adecuada para garantizar una conectividad más estable y coherente con los requerimientos del sistema de comunicación propuesto para la empresa agroindustrial.

Los Mbps que se pueden transmitir con esos parámetros con la antena de 16 metros, necesitamos estimar la capacidad del enlace usando la fórmula de Shannon:

$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$$

**donde:**

C= capacidad en bits por segundo

B= ancho de banda en Hz

SNR = relación señal/ruido en forma lineal

**Datos del cuadro:**

Frecuencia: 5825 MHz (banda típica Wi-Fi 5.8 GHz)

Señal recibida: -81.16 dBm

Margen de escucha: -7.03 dB (esto indica que el ruido está cerca)

Ganancia del sistema: 162.13 dB (para cálculo de enlace, ya está incluido)

**Suposiciones necesarias:**

Ruido térmico:

$$N = -174 \text{ dBm/Hz} + 10\log_{10}(B) + NF$$

**donde NF (factor de ruido)  $\approx$  6 dB (típico).**

Ancho de banda: Asumamos 20 MHz (Wi-Fi estándar) o 40 MHz si es canal ancho.

$$\text{SNR:} \quad \text{SNR} = P_{\text{rx}} - N$$

**Calculamos para 20 MHz y 40 MHz.**

Para 20 MHz

Ruido: -94.99 dBm

SNR: 13.83 dB

Capacidad teórica:  $\approx$  93 Mbps

Para 40 MHz

Ruido: -91.98 dBm

SNR: 10.82 dB

Capacidad teórica:  $\approx$  148 Mbps

En el escenario actual, el cálculo de capacidad del enlace arroja un valor aproximado de 148 Mbps, insuficiente frente al objetivo de disponer al menos de 500 Mbps para soportar aplicaciones de IoT y otros servicios avanzados en la empresa agroindustrial, esta limitación evidencia la necesidad de optimizar el subsistema de radio, particularmente la ganancia de las antenas, por ello, se propone el uso de antenas direccionales de mayor ganancia, del orden de 34 dBi, con las cuales las simulaciones indican que es posible alcanzar niveles de señal recibida cercanos a -74 dBm. Bajo estas condiciones, la capacidad teórica del enlace podría incrementarse hasta valores del orden de 1 Gbps, proporcionando un margen más holgado para la transmisión de

datos y alineándose con los requerimientos de conectividad planteados en el diseño del sistema de comunicación.

### 3.1.9 Desempeño del enlace PTP con antenas de 34 dBi y altura óptima de 16 m.

La tabla N° 12, muestra el desempeño del enlace punto a punto en función de la altura de instalación de las antenas y de los ajustes realizados en el sistema, comparando cinco escenarios, con torres entre 10 y 25 m, registrando para cada caso el nivel de señal recibida, el margen disponible y el rango de velocidad estimada, la configuración inicial, a 10 m, presenta niveles de señal cercanos a -82 dBm y márgenes negativos, con capacidades entre 50 y 150 Mbps, al incrementar la altura y optimizar la alineación, especialmente a 16 m con antenas de 34 dBi, se obtiene el mejor desempeño, con señal alrededor de -73 dBm, margen positivo y velocidades proyectadas entre 500 y 1000 Mbps, configuraciones de mayor altura no mejoran el enlace, evidenciando que existe una altura óptima que maximiza la calidad de la conectividad en la empresa agroindustrial.

**Tabla 12**

*Comparación de desempeño del enlace PTP con respecto a la altura de la antena*

<b>Altura (m)</b>	<b>Señal (dBm)</b>	<b>Margen (dB)</b>	<b>Velocidad estimada (Mbps)</b>	<b>Mejoras</b>
10	-82.38	-8.03	50-150	Configuración inicial
15	-75.42	-1.29	300-500	Alineación parcial
16	-73.16	0.97	500-1000	Antenas 34 dBi, ajuste altura
20	-76.1	-1.97	300-500	Altura alta, antenas 30 dBi
25	-82.58	-8.04	50-150	Altura óptima, antenas 34 dBi

En el diseño del enlace punto a punto se consideró una frecuencia de operación de 5825 MHz en banda libre, con una potencia de transmisión de 30 dBm y pérdidas de línea de 1 dB tanto en el tramo emisor como en el receptor. En ambos extremos se emplearon antenas parabólicas direccionales de 34 dBi, junto con una sensibilidad del receptor del orden de 44  $\mu$ V y un criterio de fiabilidad de 99,995 %, parámetros acordes con las exigencias de un sistema de alta disponibilidad.

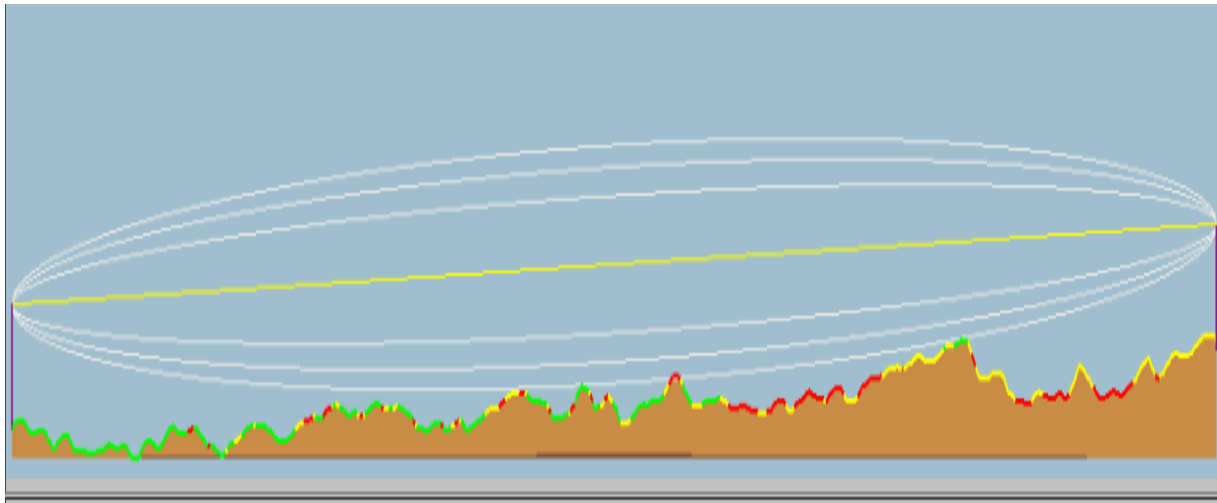
A partir de las simulaciones realizadas, se determinó que la configuración óptima se alcanza con una altura de instalación de 16 metros para las antenas, obteniéndose en este escenario el mejor nivel de señal y un margen de enlace más favorable, estos resultados permitieron concluir que dicha altura constituye la elección más adecuada entre propagación y pérdidas, y que, bajo estas condiciones, el enlace propuesto ofrece las garantías necesarias de conectividad para la operación de la propuesta.

La figura N° 15, muestra el perfil radioeléctrico del enlace punto a punto diseñado entre el punto AgroOlmos y punto Agroindustria, con la configuración optimizada del sistema, encima del relieve del terreno se representa la trayectoria del haz principal del enlace (línea amarilla) y las elipses correspondientes a las distintas zonas de Fresnel, apreciándose que, a lo largo de los 6 km aproximados de trayecto, la primera zona de Fresnel se mantiene mayormente despejada respecto al terreno, lo que reduce las pérdidas por difracción y favorece una propagación eficiente en la banda de 5 GHz, resultando que la altura seleccionada para las torres y la ganancia de las antenas permiten alcanzar condiciones adecuadas de visibilidad y margen radioeléctrico, coherentes con

los requerimientos de conectividad planteados en la tesis para la operación de la empresa agroindustrial.

**Figura 15**

*Perfil radioeléctrico del enlace entre el punto AgroOlmos y punto Agroindustria*



Analiza la siguiente imagen y descríbela en manera concisa, además propón 3 títulos adecuándolos al contexto, el texto debe sonar auténtico y atractivo para los jurados de la tesis, evitando clichés y frases robóticas mientras lo mantienes claro y profesional. Redáctalo en prosa, adecuándolo al contexto de la tesis

La tabla N° 13, muestra el perfil radioeléctrico del enlace punto a punto diseñado entre AgroOlmos y Agroindustria, considerando la configuración optimizada del sistema, sobre el relieve del terreno se representa la trayectoria del haz principal del enlace (línea amarilla) y las elipses correspondientes a las distintas zonas de Fresnel, además puede apreciar que, a lo largo de los 6 km aproximados de trayecto, la primera zona de Fresnel se mantiene mayormente despejada

respecto al terreno, reduciendo las pérdidas por difracción y favorece una propagación eficiente en la banda de 5 GHz., estos resultados respaldan que la altura seleccionada para las torres y la ganancia de las antenas permiten alcanzar condiciones adecuadas de visibilidad y margen radioeléctrico, coherentes con los requerimientos de conectividad planteados en la tesis para la operación de la empresa agroindustrial

**Tabla 13**

*Configuración de la antena emisora en Punto AgroOlmos*

<b>AgrOlmos (1)</b>	
Latitud	-6.087200 °
Longitud	-80.058996 °
Elevación del terreno	57.9 m
Altura de la antena	16.0 m
Azimuth	28.55 TN   30.21 MG °
Inclinación	0.07 °

La tabla N° 14, muestra la configuración definitiva de la antena receptora ubicada en el punto Agroindustria, extremo del enlace punto a punto diseñado con AgroOlmos, se consignan sus coordenadas geográficas (latitud -6,039559° y longitud -80,032932°), una elevación del terreno de 68,2 m y una altura de instalación de la antena de 16,0 m, valor correspondiente a la altura optimizada obtenida en las simulaciones, además, se precisa el azimut de orientación de 208,55° TN (210,24° MG) y una ligera inclinación negativa de -0,12°, parámetros que permiten alinear con precisión el haz de radiación hacia la antena emisora, esta información fortalece la geometría del enlace y son fundamentales para garantizar el despeje de la zona de Fresnel y la estabilidad del sistema de comunicación propuesto para el punto Agroindustria.

**Tabla 14***Configuración de la antena emisora en Punto AgroOlmos*

		(2) Agroindustria
Latitud		-6.039559°
Longitud		-80.032932°
Elevación del terreno		68.2 m
Altura de la antena		16.0 m
Azimuth		208.55 TN   210.24 MG°
Inclinación		-0.12°

La tabla N° 15, presenta la configuración del sistema de radio utilizada en el diseño optimizado del enlace punto a punto en 5 GHz para la empresa agroindustrial, estableciéndose una potencia de transmisión de 30 dBm y pérdidas en los cables de 1 dB tanto en el tramo emisor como en el receptor, en cada extremo del enlace se emplean antenas parabólicas direccionales de alta ganancia, con 34 dBi en transmisión y 34 dBi en recepción, lo que incrementa de manera significativa el balance de potencia disponible, la sensibilidad del receptor se fija en -74,13 dBm, umbral que permite evaluar el margen efectivo del enlace, esta información establece que se sustenta la viabilidad del sistema de comunicación propuesto entre AgroOlmos y la planta agroindustrial.

**Tabla 15***Parámetros del sistema de radio para el análisis del enlace PTP*

<b>Sistema de radio</b>	
Potencia TX	30.00 dBm
Pérdida en cable TX	1.00 dB
Ganancia de antena TX	34.00 dBi
Ganancia de antena RX	34.00 dBi
Pérdida en cable RX	1.00 dB
Sensibilidad RX	-74.13 dBm

La tabla N° 16, presenta el desglose de pérdidas de propagación del enlace punto a punto en la banda de 5 GHz para la configuración optimizada del sistema de comunicación entre el punto AgroOlmos y el punto Agroindustria. La pérdida en espacio libre alcanza 123,31 dB, asociada a la distancia y la frecuencia de operación, la pérdida por obstrucción es reducida (-5,17 dB), confirmando un trayecto con línea de vista prácticamente despejada, cabe indicar que no se registran pérdidas por bosque ni por urbanización, debido a su entorno predominante agrícola del enlace, la pérdida estadística, vinculada a desvanecimientos y variaciones del canal radioeléctrico, es de 51,01 dB, la pérdida total asciende a 169,16 dB, valor que se verifica que el enlace cumple los márgenes necesarios de disponibilidad y calidad de servicio para la empresa agroindustrial.

**Tabla 16**

*Análisis de pérdidas de propagación en el enlace AgroOlmos - Agroindustria*

	<b>Propagation</b>
Pérdida en espacio libre	123.31 dB
Pérdida por obstrucción	-5.17 dB
Pérdida por bosque	0.00 dB
Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida estadística	51.01 dB
Pérdida total	169.16 dB

La tabla N° 17, presenta los resultados de desempeño del enlace punto a punto entre punto AgroOlmos y punto Agroindustria, para una distancia de 6,031 km y una frecuencia de 5825 MHz, el sistema alcanza una Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente de 1995,262 W y una ganancia total de 170,13 dB, bajo un criterio de fiabilidad del 99,990 %, con la configuración final de antenas, la señal recibida se sitúa en -73,16 dBm (49,20 µV), logrando un margen de escucha positivo de 0,97 dB., estos indicadores muestran que el enlace opera en el umbral de los requisitos

de disponibilidad, evidenciando que los ajustes realizados en altura y ganancia de antenas permiten alcanzar las condiciones óptimas que garantizan la conectividad prevista en la empresa agroindustrial.

**Tabla 17**

*Desempeño del enlace inalámbrico AgroOlmos - Agroindustria*

<b>Performance</b>	
<b>Distance</b>	<b>6.031 km</b>
Precisión	10.0 m
Frecuencia	5825.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente	1995.262 W
Ganancia del sistema	170.13 dB
Fiabilidad requerida	99.990 %
Señ recibida	-73.16 dBm
Señ recibida	49.20 $\mu$ V
<b>Márgen de escucha</b>	<b>0.97 dB</b>

- **Para 20 MHz**
  - Ruido: -94.99 dBm
  - SNR: 21.83 dB
  - Capacidad teórica:  $\approx$  145 Mbps
  
- **Para 40 MHz**
  - Ruido: -91.98 dBm
  - SNR: 18.82 dB
  - Capacidad teórica:  $\approx$  251 Mbps

De acuerdo con el límite teórico de Shannon, la capacidad calculada corresponde a la máxima tasa de información que podría transportar el enlace en condiciones ideales, sin embargo, en un escenario real, la eficiencia efectiva se reduce por la sobrecarga de los protocolos, los

esquemas de modulación y los mecanismos de control de errores, por lo tanto, la capacidad útil suele situarse entre el 65 % y el 75 % de dicho valor teórico; por ejemplo, se obtendrían aproximadamente entre 95 y 110 Mbps para un canal de 20 MHz, y entre 160 y 190 Mbps para un canal de 40 MHz.

### 3.1.10 Simulación y comparación de la capacidad del enlace PTP

Figura 16

Comparación de la capacidad teórica del enlace PTP con Python

```
1 import math
2 import pandas as pd
3 # Configuraciones
4 configs = [
5     {"name": "Config 1 (-81.16 dBm)", "signal_dbm": -81.16},
6     {"name": "Config 2 (-73.16 dBm)", "signal_dbm": -73.16}
7 ]
8 NF = 6 # Factor de ruido en dB
9 bandwidths = [20e6, 40e6, 80e6, 160e6] # en Hz
10 # Crear lista para resultados
11 rows = []
12
13 for config in configs:
14     for B in bandwidths:
15         # Calcular ruido
16         noise_dbm = -174 + 10 * math.log10(B) + NF
17         # Calcular SNR
18         SNR_dB = config["signal_dbm"] - noise_dbm
19         SNR_linear = 10 ** (SNR_dB / 10)
20         # Capacidad Shannon
21         capacity_bps = B * math.log2(1 + SNR_linear)
22         capacity_mbps = capacity_bps / 1e6
23         rows.append({
24             "Configuración": config["name"],
25             "Ancho de banda (MHz)": B / 1e6,
26             "Ruido (dBm)": round(noise_dbm, 2),
27             "SNR (dB)": round(SNR_dB, 2),
28             "Capacidad teórica (Mbps)": round(capacity_mbps, 2)
29         })
30 # Crear DataFrame
31 tabla = pd.DataFrame(rows)
32 print(tabla)
```

La figura N° 16, corresponde a un fragmento de código en Python utilizado para estimar la capacidad teórica del enlace inalámbrico diseñado en la tesis, el script importa las librerías math y pandas, define dos configuraciones de señal recibida (-81,16 dBm y -73,16 dBm) y considera un factor de ruido de 6 dB. A partir de varios anchos de banda (20, 40, 80 y 160 MHz), calcula el nivel de ruido en dBm, el SNR en dB y en valor lineal, y posteriormente aplica la fórmula de Shannon  $C=B\log_2(1+SNR)$ , para obtener la capacidad en Mbps, los resultados se organizaron en una lista de diccionarios y luego en un DataFrame de pandas, generando una tabla comparativa que sirve como insumo para evaluar el desempeño potencial del enlace punto a punto en distintos escenarios de banda y calidad de señal.

**Tabla 18**

*Comparación de configuraciones del enlace PTP*

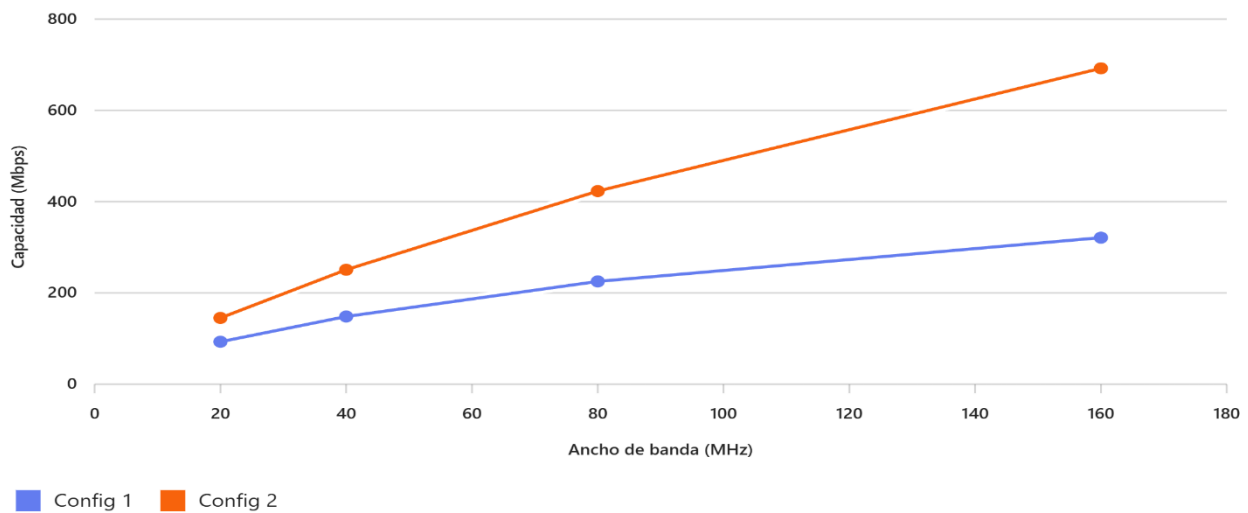
	Configuración	Ancho de banda (MHz)	Ruido (dBm)	SNR (dB)	Capacidad teórica (Mbps)
0	Config 1 (-81.16 dBm)	20.0	-94.99	13.83	93.05
1	Config 1 (-81.16 dBm)	40.0	-91.98	10.82	148.36
2	Config 1 (-81.16 dBm)	80.0	-88.97	7.81	225.22
3	Config 1 (-81.16 dBm)	160.0	-85.96	4.80	321.10
4	Config 2 (-73.16 dBm)	20.0	-94.99	21.83	145.22
5	Config 2 (-73.16 dBm)	40.0	-91.98	18.82	250.82
6	Config 2 (-73.16 dBm)	80.0	-88.97	15.81	423.12
7	Config 2 (-73.16 dBm)	160.0	-85.96	12.80	692.08

La tabla N° 18, muestra los resultados obtenidos a partir del cálculo de la capacidad teórica del enlace, considerando dos configuraciones de nivel de señal recibida (Config 1: -81,16 dBm y Config 2: -73,16 dBm) y cuatro anchos de banda: 20, 40, 80 y 160 MHz, para cada combinación se reporta el ruido equivalente en dBm, el SNR en dB y la capacidad teórica en Mbps según la fórmula de Shannon, observándose que, para una misma configuración, el incremento del ancho de banda aumenta la capacidad del enlace, aunque con una ligera reducción del SNR, además, la Config 2, al disponer de una mejor señal recibida, ofrece capacidades significativamente

superiores: por ejemplo, alcanza valores teóricos cercanos a 423 Mbps con 80 MHz y alrededor de 692 Mbps con 160 MHz, resultados que permiten evidenciar la necesidad de optimizar el nivel de señal y el ancho de banda para cumplir los requerimientos de conectividad de la empresa agroindustrial.

**Figura 17**

*Comparación de configuraciones del enlace PTP en función del ancho de banda*



La figura N° 17, presenta la relación entre el ancho de banda del canal y la capacidad teórica del enlace para dos configuraciones del sistema de radio (Config 1 y Config 2), correspondientes a diferentes niveles de señal recibida en el enlace punto a punto AgroOlmos -Agroindustria, en el eje horizontal se representan los anchos de banda de 20, 40, 80 y 160 MHz, mientras que en el eje vertical se muestra la capacidad en Mbps. La Config 2 (curva naranja), asociada a un mejor nivel de señal, alcanza capacidades considerablemente superiores en todos los escenarios, llegando a valores cercanos a 700 Mbps con 160 MHz, la Config 1 (curva azul) muestra un crecimiento más moderado, con capacidades entre 90 y algo más de 300 Mbps. La gráfica evidencia que la

combinación de mayor ancho de banda y mejor SNR resulta decisiva para satisfacer los requerimientos de alta capacidad exigidos por las aplicaciones de conectividad e IoT en la empresa agroindustrial.

Con un ancho de canal de 160 MHz y un nivel de señal óptimo cercano a  $-73$  dBm, el enlace alcanza una capacidad teórica del orden de 692 Mbps, superando holgadamente el requerimiento estimado de 500 Mbps para la red propuesta, que integra sensores LoRaWAN, cámaras IP de monitoreo, estaciones de trabajo administrativas y un servidor central, estos datos garantizan la selección de la tecnología Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) en la banda de 5,8 GHz, en combinación con antenas parabólicas direccionales de alta ganancia (34 dBi), como una solución adecuada para establecer enlaces punto a punto de gran capacidad y alta estabilidad en la empresa agroindustrial.

La banda de 5,825 GHz, se muestra especialmente conveniente para entornos rurales o semiurbanos, al presentar menores niveles de interferencia que la banda de 2,4 GHz y permitir el uso de canales anchos de hasta 160 MHz, incrementando significativamente la velocidad de transmisión, además, el empleo de modulaciones de alto orden (256-QAM o superiores) y de esquemas MIMO (Multiple Input Multiple Output) contribuye a maximizar el rendimiento espectral del enlace, se asegura poder aprovechar de manera eficiente de la infraestructura de comunicaciones diseñada.

### **3.1.11 Presupuesto del enlace PTP AgroOlmos - Agroindustria**

Para garantizar la capacidad requerida, se seleccionaron equipos de alta gama:

✓ **Antenas parabólicas 34 dBi (Ubiquiti RocketDish o AirFiberX)**

- Precio internacional: US\$ 489 ( $\approx$  S/ 1,850 por unidad)
- Cantidad: 2 antenas  $\rightarrow$  S/ 3,700

✓ **Radios Ubiquiti AirFiber 5XHD (1 Gbps, 5 GHz)**

- Precio internacional: US\$ 481.73 ( $\approx$  S/ 1,820 por unidad)
- Cantidad: 2 radios  $\rightarrow$  S/ 3,640

✓ **Accesorios y montaje (cables RF, soportes, PoE, mástil)**

- Estimado: S/ 500 – 700

✓ **Instalación y alineación profesional**

- Estimado en Perú: S/ 600 – 800

✓ **Costo total del enlace**

- Equipos: S/ 8,840
- Infraestructura adicional (mástiles, soportes): S/ 3,000
- Costo total aproximado: S/ 11,840

La configuración propuesta permite disponer de un enlace de alta robustez, cuya capacidad teórica supera 1 Gbps. aun considerando las pérdidas asociadas a protocolos y sobrecarga de señalización, este desempeño asegura una transmisión efectiva en el orden de 500 Mbps, suficiente para satisfacer con holgura los requerimientos de conectividad de la empresa agroindustrial.

#### ✓ **Ventajas técnicas**

Desde el punto de vista técnico, el enlace propuesto ofrece ventajas notables para la operación de la empresa agroindustrial, en primer lugar, proporciona alta capacidad y baja latencia, condiciones indispensables para la transmisión de video y datos en tiempo casi real, especialmente en aplicaciones de videovigilancia y monitoreo continuo de variables de campo, además, la solución presenta una elevada escalabilidad, facilitando la incorporación futura de nuevos servicios, mayor número de usuarios o incremento en el tráfico generado por dispositivos IoT sin requerir rediseños estructurales del sistema, además, el hecho de operar en banda libre de 5,8 GHz evita costos asociados a licenciamiento de espectro, reduciendo la inversión necesaria y haciendo más viable la implementación del sistema de comunicación propuesto.

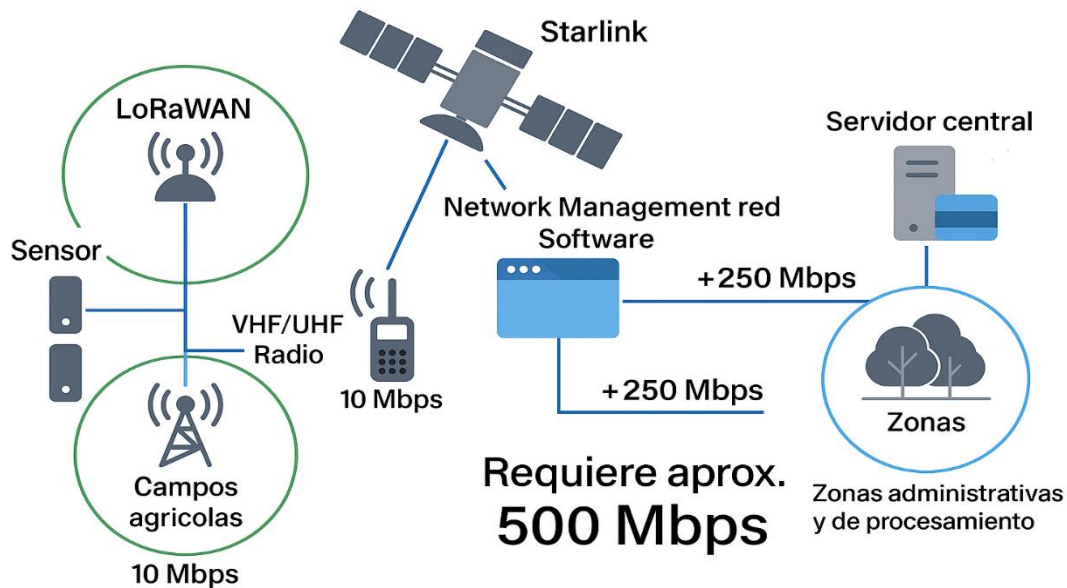
#### ***3.1.12 Enlace Agroindustria satelital 500mbps***

La figura N° 18, sintetiza la arquitectura de comunicaciones y el requerimiento de capacidad para la empresa agroindustrial, en los campos agrícolas, los sensores transmiten sus datos mediante una red LoRaWAN y enlaces VHF/UHF, generando aproximadamente 10 Mbps de tráfico hacia la plataforma de gestión de red, este tráfico se integra con el enlace principal de

acceso a Internet, representado por la conexión vía Starlink, y converge en el software de gestión, desde donde se distribuyen alrededor de 250 Mbps hacia las zonas administrativas y otros 250 Mbps hacia las áreas de procesamiento y servicios centralizados, la figura muestra que la operación simultánea de IoT agrícola, comunicaciones operativas y servicios corporativos requiere del orden de 500 Mbps de capacidad efectiva para asegurar un funcionamiento continuo y confiable del sistema de comunicación propuesto.

**Figura 18**

*Arquitectura de comunicación satelital*



En el escenario de comunicación satelital se plantea el uso de Starlink como alternativa para garantizar 500 Mbps requerido por la empresa agroindustrial, la arquitectura considera que los sensores desplegados en los campos agrícolas transmiten sus datos mediante LoRaWAN y radios VHF/UHF hasta un nodo satelital local, el cual concentra el tráfico y lo envía hacia la constelación de satélites, estableciéndose dos enlaces Starlink independientes, cada uno con una

capacidad aproximada de 250 Mbps, que en conjunto proporcionan un ancho de banda agregado cercano a 500 Mbps, el servidor central de la empresa se conecta a través de esta infraestructura satelital, desde donde se gestionan los servicios administrativos, de monitoreo y de procesamiento de datos.

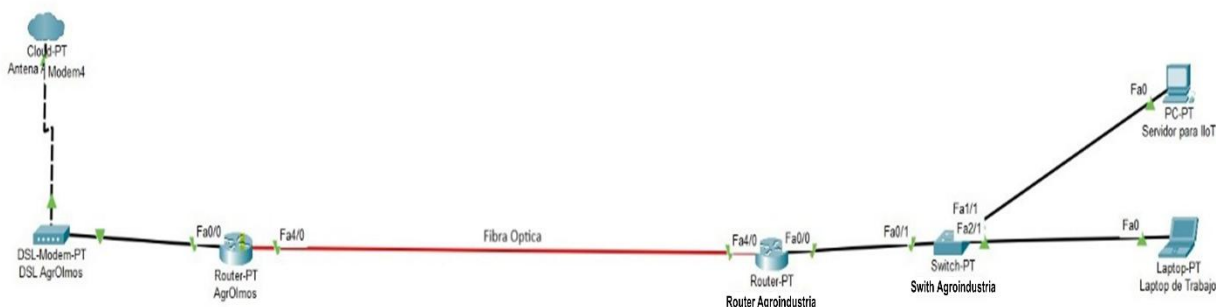
Entre las principales ventajas de esta solución destacan el cumplimiento del requerimiento de capacidad sin necesidad de desplegar infraestructura terrestre de larga distancia, una latencia relativamente baja (del orden de 20 a 50 ms) en comparación con sistemas satelitales geostacionarios tradicionales y una alta escalabilidad, dado que es posible incorporar terminales adicionales si en el futuro se demanda mayor capacidad.

### ***3.1.13 Enlace GPON - punto Agroindustria***

La figura M° 19, representa el esquema lógico de la red de datos entre el nodo Agroolmos y el nodo Agroindustria, desde la nube de Internet, el tráfico ingresa a través de un módem DSL ubicado en Agroolmos, conectándose a un router principal, estableciéndose un enlace de fibra óptica hacia el router instalado en el nodo Agroindustria, conformando el tramo de backbone del sistema, en el punto Agroindustria, el router se conecta con un switch de acceso, desde el cual se distribuye la conectividad hacia un PC que actúa como servidor para las aplicaciones IoT y hacia las estaciones de trabajo, ambos mediante enlaces Ethernet, el diagrama muestra una arquitectura jerárquica sencilla, con clara separación entre el acceso a Internet, el troncal de fibra óptica y la distribución local de servicios en la empresa agroindustrial.

**Figura 19**

*Arquitectura lógica de la red de datos para soporte de servicios IoT y administrativos*



La red GPON se plantea como una alternativa de backhaul basada en tecnología FTTH (Fiber to the Home), la cual emplea fibra óptica hasta el punto de servicio para garantizar altas tasas de transmisión y gran estabilidad (Montenegro, 2021). Un sistema GPON estándar permite alcanzar capacidades de hasta 2.5 Gbps en sentido descendente y 1.25 Gbps en sentido ascendente, mientras que las variantes XG-PON/XGS-PON elevan este desempeño hasta 10 Gbps simétricos, suficiente para soportar con holgura tráfico agregado de aplicaciones IoT, videovigilancia y servicios corporativos (Flores, 2023). Además, la latencia es del orden de 1 ms, prácticamente despreciable frente a otras tecnologías evaluadas, lo que convierte a GPON en una solución particularmente adecuada cuando se priorizan alta capacidad, baja latencia y elevada confiabilidad en la infraestructura de comunicaciones de la empresa agroindustrial (Falconi & Gabriel, 2024).

Al comparar con las alternativas basadas en Wi-Fi terrestre o en comunicación satelital mediante Starlink, la solución GPON ofrece ventajas técnicas significativas. Operar sobre fibra óptica dedicada, proporciona mayor estabilidad y velocidades constantes, al no verse afectada por interferencias radioeléctricas ni por variaciones climáticas (Cedeño, 2023). Además, por su naturaleza punto-multipunto permite una alta escalabilidad, al soportar la conexión de decenas o

cientos de usuarios mediante divisores ópticos sin degradar de forma apreciable la calidad del servicio, además de una latencia sensiblemente menor, lo que convierte a GPON en una opción idónea para aplicaciones que requieren respuesta casi en tiempo real.

También presentan ciertas limitaciones, la principal es el alto costo de despliegue inicial, asociado al tendido de la fibra óptica y a la adquisición de equipos OLT y ONT, además, en zonas rurales su implementación es menos flexible, ya que depende de la infraestructura física a lo largo del trazado, asimismo el tiempo de instalación suele ser mayor que en soluciones inalámbricas, aspecto a considerar al planificar la puesta en marcha de la red en la empresa agroindustrial.

#### ***3.1.14 Costos a implementar Ferretería***

- ✓ **OLT GPON (8 puertos)**
  - Precio: **US\$ 1,745.90 ≈ S/ 6,500**
  - Capacidad: hasta 2.5 Gbps downstream / 1.25 Gbps upstream.
  
- ✓ **ONT/ONU GPON (por cliente)**
  - Precio unitario: **S/ 150 – 250** (dependiendo del modelo Wi-Fi AC)
  - Para 10 usuarios: **S/ 2,000** aprox.
  
- ✓ **Fibra óptica y accesorios (cables, splitters, cajas NAP)**
  - Costo por kilómetro: **S/ 3,000 – 4,000** (incluye materiales y mano de obra)
  - Para un despliegue básico urbano (1 km): **S/ 3,500**.

✓ **Instalación y configuración**

- Mano de obra especializada: **S/ 500 – 1,000**

✓ **Costos sin permisos de uso de postes o permisos a municipalidad**

- OLT: **S/ 6,500**
- ONT (10 usuarios): **S/ 2,000**
- Fibra y accesorios: **S/ 3,500**
- Instalación: **S/ 1,000**

**Total: ≈ S/ 13,000**

Para una red GPON básica que puede entregar 500 Mbps garantizados por usuario (incluso más, hasta 1 Gbps).

### ***3.1.15 Comparación entre Wi-Fi terrestre - Starlink satelital***

La tabla N° 19, muestra una comparación entre dos alternativas de backhaul: Wi-Fi terrestre frente a Starlink satelital. Para Wi-Fi terrestre se estima una velocidad máxima cercana a 692 Mbps utilizando 160 MHz y buena señal, con latencias del orden de 5–10 ms, implicando un costo inicial elevado (antenas e infraestructura), aunque con pagos mensuales relativamente bajos; sus principales fortalezas son la alta capacidad, la baja latencia y la posibilidad de escalar en tierra, exigiendo línea de vista y una instalación más compleja en zonas rurales. A diferencia, Starlink brinda alrededor de 500 Mbps agregados utilizando dos terminales Business, con latencias típicas

entre 20 y 50 ms., teniendo como ventaja la cobertura en áreas remotas y la rapidez de despliegue, a costa de un pago mensual alto por terminal, una capacidad menor por unidad y una mayor sensibilidad a las condiciones climáticas.

**Tabla 19**

*Comparación entre Wi-Fi terrestre - Starlink satelital*

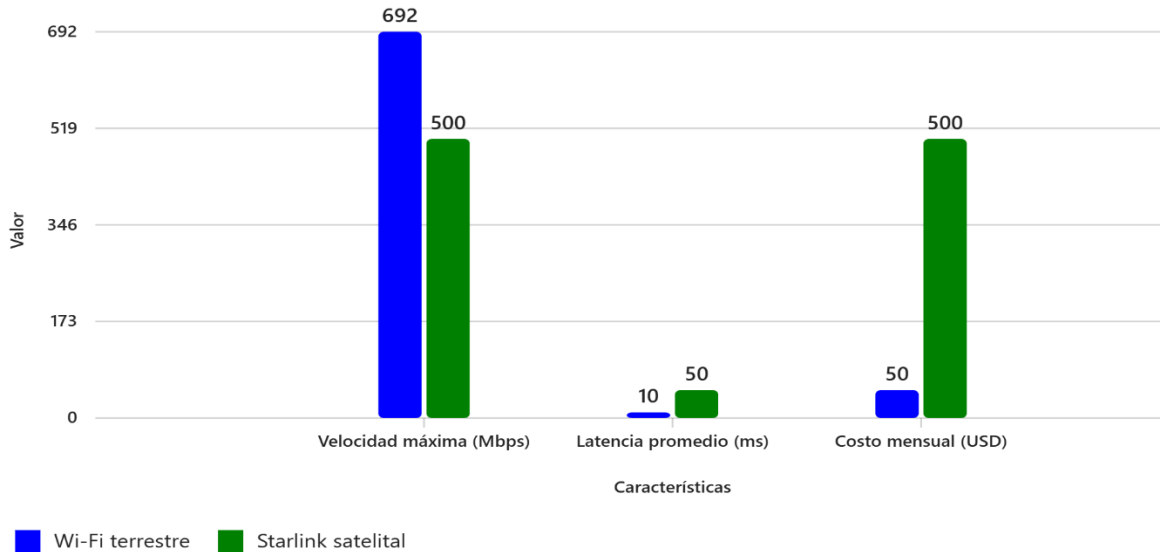
<b>Características</b>	<b>Wi-Fi Terrestre</b>	<b>Starlink Satelital</b>
<b>Velocidad máxima</b>	≈ 692 Mbps (con 160 MHz y buena señal)	≈ 500 Mbps (2 terminales Business)
<b>Latencia promedio</b>	5 – 10 ms	20 – 50 ms
<b>Costo estimado</b>	Costo inicial alto (antenas, infraestructura), mensual bajo	≈ 250 USD por terminal (x2 para 500 Mbps)
<b>Ventajas</b>	Alta capacidad, baja latencia, escalable en tierra	Cobertura en zonas remotas, instalación rápida
<b>Desventajas</b>	Requiere línea de vista, instalación compleja en zonas rurales	Costo mensual alto, depende de clima, menor capacidad por terminal

La figura N° 20, representa una comparación entre las alternativas de backhaul Wi-Fi terrestre y Starlink satelital, en el primer grupo de barras se aprecia que el enlace Wi-Fi terrestre alcanza una velocidad máxima estimada de 692 Mbps, superior a los 500 Mbps proyectados para Starlink, en términos de latencia promedio, la solución Wi-Fi muestra valores cercanos a 10 ms, mientras que el enlace satelital llega aproximadamente a 50 ms, lo que implica mayores retardos en la transmisión, además, el costo mensual estimado, la barra correspondiente a Wi-Fi terrestre se ubica alrededor de 50 USD, frente a los 500 USD asociados al uso de dos terminales Starlink Business, la opción Wi-Fi terrestre ofrece mayor capacidad, menor latencia y menores costos

recurrentes, mientras que Starlink se perfila como alternativa complementaria donde la infraestructura en tierra sea inviable.

**Figura 20**

*Desempeño, latencia y costo mensual de las alternativas de backhaul*



La tabla N° 20, presenta una comparación de tres alternativas de infraestructura de backhaul: Wi-Fi terrestre, Starlink satelital y GPON, donde se muestra que en términos de velocidad máxima, GPON ofrece la mayor capacidad (2.5 Gbps para GPON y hasta 10 Gbps en XGS-PON), seguida por Wi-Fi terrestre (~692 Mbps con canal de 160 MHz) y Starlink (~500 Mbps usando dos terminales Business). La latencia promedio es mínima en GPON (~1 ms), intermedia en Wi-Fi terrestre (5–10 ms) y mayor en Starlink (20–50 ms). En cuanto a costos, Wi-Fi terrestre demanda una inversión inicial aproximada de S/ 8,800 en equipos e instalación; GPON demanda entre S/ 15,000 y 20,000 por el tendido de fibra, mientras que Starlink implica un gasto mensual cercano a S/ 2,000 por dos terminales. Se destacan como ventajas la alta capacidad y baja

latencia de Wi-Fi y GPON, y la cobertura en zonas remotas de Starlink; entre las desventajas, la necesidad de línea de vista y complejidad de instalación para Wi-Fi, el alto costo inicial y tendido de fibra para GPON, y el elevado costo recurrente y dependencia del clima en el caso de Starlink.

**Tabla 20**

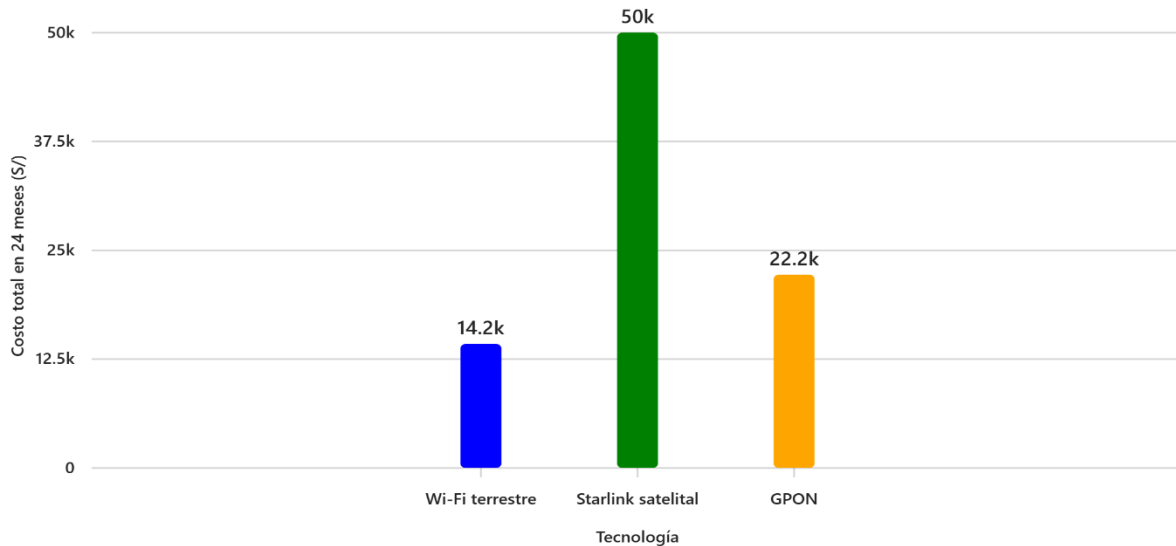
*Comparación de alternativas de backhaul: Wi-Fi terrestre, Starlink satelital y GPON*

<b>Característica</b>	<b>Wi-Fi terrestre</b>	<b>Starlink satelital</b>	<b>GPON</b>
<b>Velocidad máxima</b>	≈ 692 Mbps (con 160 MHz)	≈ 500 Mbps (2 terminales Business)	2.5 Gbps (GPON) / 10 Gbps (XGS-PON)
<b>Latencia promedio</b>	5 – 10 ms	20 – 50 ms	≈ 1 ms
<b>Costo aproximado (S/)</b>	≈ 8,800 (equipos + instalación)	≈ 2,000 mensuales (2 terminales)	≈ 15,000 – 20,000 (despliegue inicial)
<b>Ventajas</b>	Alta capacidad, baja latencia, escalable en tierra	Cobertura en zonas remotas, instalación rápida	Alta estabilidad, gran capacidad, baja latencia
<b>Desventajas</b>	Requiere línea de vista, instalación compleja en zonas rurales	Costo mensual alto, depende de clima, menor capacidad por terminal	Alto costo inicial, requiere tendido de fibra óptica

La figura N° 21, presenta la comparación del costo total para tres alternativas de backhaul, el enlace Wi-Fi terrestre muestra el menor costo acumulado, alrededor de S/ 14,2 mil, seguido por la solución GPON, con un costo estimado de S/ 22,2 mil, a diferencia, la opción Starlink satelital alcanza los S/ 50 mil en el mismo periodo, más del doble que GPON y más de tres veces el costo del Wi-Fi terrestre, el gráfico muestra que, desde una perspectiva económico - financiera a dos años, el enlace Wi-Fi de alta capacidad resulta la alternativa más competitiva, mientras que Starlink se perfila como una solución de última opción para escenarios donde el despliegue en tierra no sea viable.

**Figura 21**

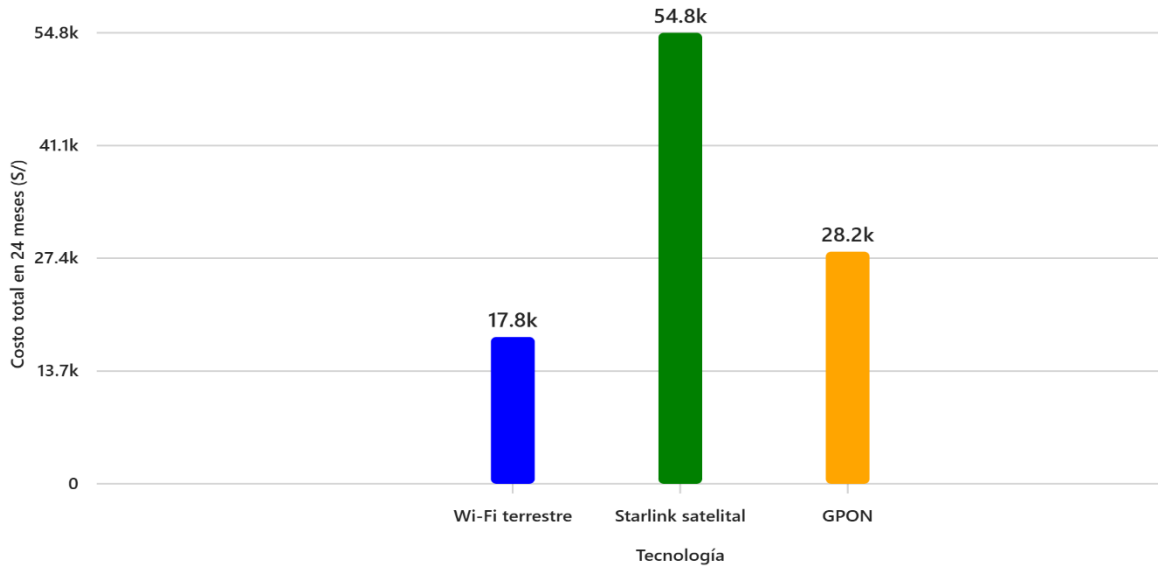
*Análisis económico de Wi-Fi terrestre, Starlink satelital y GPON*



La figura N° 22, muestra la comparación del costo total para las tres alternativas de backhaul: Wi-Fi terrestre, Starlink satelital y GPON. El enlace Wi-Fi terrestre presenta el menor costo, alrededor de S/ 17,8 mil, mientras que la solución GPON alcanza los S/ 28,2 mil en el mismo periodo, principalmente por la inversión inicial en fibra óptica, la opción Starlink satelital resulta la más costosa, con un gasto cercano a S/ 54,8 mil, debido al pago mensual asociado a los terminales Business, el gráfico expresa que, desde una perspectiva económico-financiera a mediano plazo, el enlace Wi-Fi de alta capacidad es la alternativa más competitiva, GPON se posiciona como una solución robusta pero más costosa, y Starlink queda reservada para escenarios donde la infraestructura terrestre no sea viable.

**Figura 24**

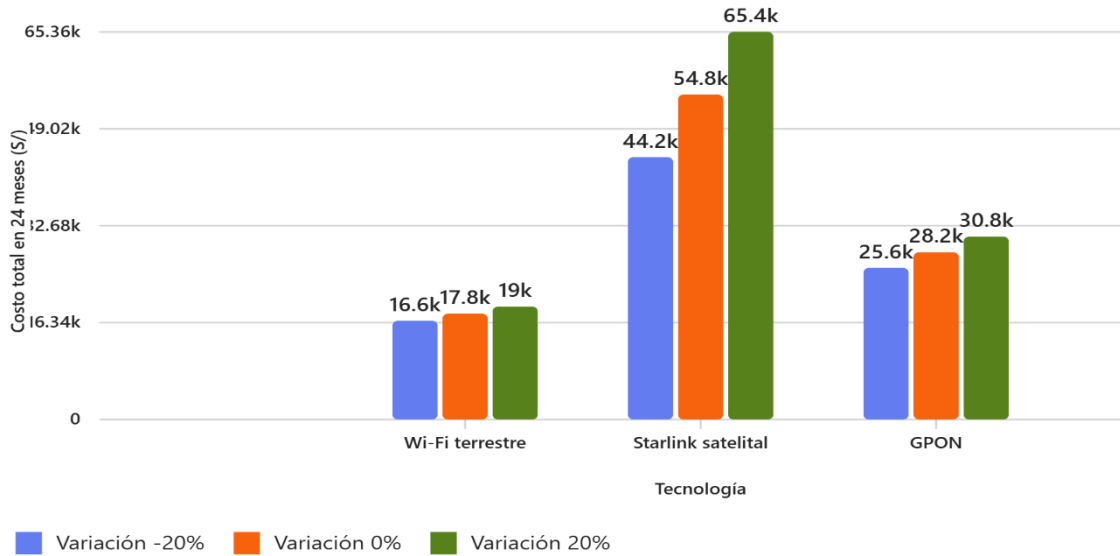
*Análisis comparativo del costo de implementación y operación de backhaul*



La figura N° 23, presenta un análisis de sensibilidad del costo total en 24 meses para las tres tecnologías de backhaul consideradas en la empresa agroindustrial: Wi-Fi terrestre, Starlink satelital y GPON, para cada tecnología se exponen tres escenarios: una variación de  $-20\%$ , costo base ( $0\%$ ) y una variación de  $+20\%$ . Se observa que el Wi-Fi terrestre mantiene el menor costo en los tres casos (aprox. S/ 16,6k–19k), GPON se ubica en un rango intermedio (S/ 25,6k–30,8k) y Starlink satelital continúa siendo la opción más costosa incluso en el escenario de  $-20\%$  (S/ 44,2k–65,4k), el gráfico ratifica que, aun considerando fluctuaciones significativas en los costos, el enlace Wi-Fi terrestre sigue siendo la alternativa económicamente más conveniente para el horizonte de dos años analizado.

**Figura 27**

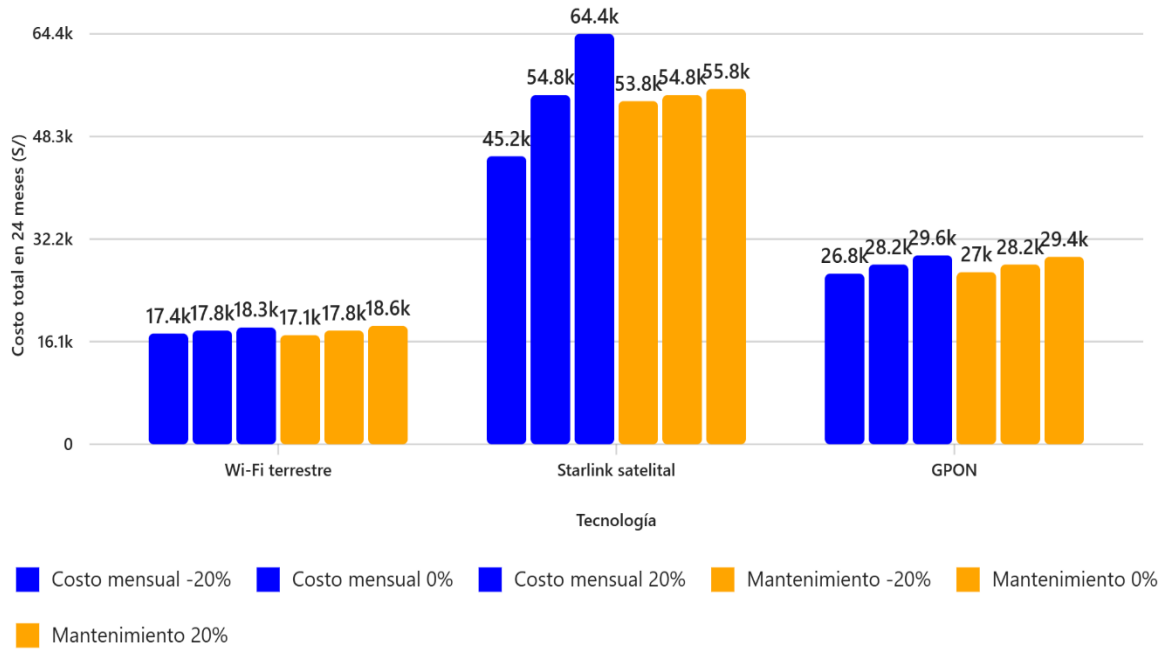
*Análisis de sensibilidad del costo total de Wi-Fi terrestre, Starlink y GPON*



La figura N° 24, presenta un análisis combinado del costo total en 24 meses para las tres tecnologías de backhaul evaluadas (Wi-Fi terrestre, Starlink satelital y GPON), considerando variaciones tanto en el costo mensual del servicio (barras azules) como en el costo de mantenimiento (barras naranjas), con escenarios de -20 %, 0 % y +20 %, en todos los casos, Wi-Fi terrestre se mantiene como la opción más económica, con valores que oscilan alrededor de S/ 17–18 mil, incluso cuando aumentan los costos de servicio o mantenimiento. GPON presenta costos intermedios, entre S/ 26,8 mil y S/ 29,6 mil, mostrando sensibilidad moderada a las variaciones consideradas, Starlink satelital es consistentemente la alternativa más costosa, con montos que pueden superar los S/ 60 mil en el escenario desfavorable. El gráfico evidencia que, aun bajo cambios simultáneos en costos operativos y de mantenimiento, el enlace Wi-Fi terrestre sigue siendo la solución más conveniente para la empresa agroindustrial en el horizonte de dos años.

**Figura 30**

*Análisis de sensibilidad de costos en Wi-Fi, Starlink y GPON*



### **3.2 Discusión**

La discusión de los resultados corrobora que la brecha de conectividad de la empresa agroindustrial no se explica solo por la falta de Internet, sino por la inadecuación de las tecnologías actualmente empleadas frente a sus exigencias operativas, el diagnóstico de cobertura móvil en el distrito de Olmos muestra que, aunque los operadores reportan altos porcentajes a nivel distrital, en las zonas donde operan AgroOlmos y la empresa agroindustrial la señal es irregular y no sostiene tráfico intensivo de datos, frente a ello la simulación del enlace punto a punto en 5,8 GHz, que muestra que la configuración óptima es: antenas parabólicas de 34 dBi, altura de 16 m y operación con Wi-Fi 6 que permite alcanzar capacidades cercanas a 700 Mbps y asegurar, con holgura, los 500 Mbps requeridos para sensores LoRaWAN, cámaras IP, usuarios administrativos y servidor central, cumpliendo así el objetivo general de la investigación.

Los resultados están vinculados con la literatura que destaca la necesidad de optimizar parámetros radioeléctricos (altura, despeje de la zona de Fresnel, margen de desvanecimiento) en enlaces rurales y con los estudios que advierten que las soluciones satelitales de órbita baja deben evaluarse considerando su costo de ciclo de vida, la comparación técnico económica entre Wi-Fi terrestre, Starlink Business y GPON muestra que, aunque GPON ofrece la mayor capacidad y la menor latencia, su despliegue resulta demasiado costoso para una sola empresa, mientras que Starlink presenta costos recurrentes muy elevados, a diferencia que, el radioenlace Wi-Fi propuesto equilibra capacidad, latencia y costo, y se configura como una solución viable y escalable que habilita aplicaciones concretas de agricultura de precisión, monitoreo en tiempo casi real y trazabilidad productiva.

Se presenta como principal limitación su carácter de simulación, sin validación en campo del enlace, y se apoya en proyecciones de tráfico para un horizonte de 24 meses, aunque, su solidez radica en el uso de datos reales de ubicación y demanda, en el análisis iterativo de alturas y ganancias de antena y en la traducción explícita de los parámetros radioeléctricos en capacidad útil. Se obtuvieron resultados inesperados, como el hecho de que alturas superiores a 16 m no mejoran el desempeño e incluso incrementan las pérdidas, cuestionan supuestos usuales en el diseño de enlaces rurales.

## 4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- El análisis de la literatura sobre conectividad en zonas remotas permitió identificar que tecnologías como microondas, Wi-Fi de largo alcance, satélite y GPON no son soluciones universales, sino alternativas cuyo desempeño depende fuertemente de la geografía, el tipo de demanda y la capacidad de inversión y que sirvieron como marco para orientar el diseño del sistema de comunicación en la empresa agroindustrial de Olmos.
- Las simulaciones comparativas mostraron que, frente a Starlink Business y GPON, el enlace Wi-Fi 6 punto a punto en 5,8 GHz ofrece la mejor combinación entre capacidad, latencia y costo, mientras que, la solución satelital presenta costos recurrentes muy altos y GPON exige una inversión inicial considerable en fibra, el radioenlace optimizado en altura y ganancia de antenas alcanza capacidades cercanas a los 700 Mbps con retardos reducidos, respondiendo de forma óptima al perfil de tráfico del nodo Agroindustria.
- La integración de los resultados técnicos y económico - financieros permitió concluir que la tecnología más apropiada para la empresa es un sistema basado en Wi-Fi 6 en 5,8 GHz, con antenas parabólicas de 34 dBi instaladas a 16 m y articuladas con la red interna de sensores y servicios, demostrando viabilidad técnica, sostenibilidad económica y adecuada adaptación a las condiciones geográficas del distrito de Olmos, además es una plataforma sólida y escalable para el desarrollo de aplicaciones de agricultura de precisión en la agroindustria.

## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda que la empresa agroindustrial implemente un proyecto piloto del enlace Wi-Fi 6 en 5,8 GHz con antenas de 34 dBi a 16 m de altura, replicando los parámetros definidos en la simulación, incluyendo mediciones sistemáticas de disponibilidad, latencia, jitter y tasa de errores, a fin de contrastar los resultados reales con los indicadores del modelo.
  
- Se sugiere establecer un esquema de gestión y monitoreo de la red, que incluya políticas de calidad de servicio (QoS) para priorizar el tráfico crítico de sensores LoRaWAN y videovigilancia frente a aplicaciones menos sensibles al retardo, sustentándose en indicadores de desempeño, que permitan tomar decisiones sobre ampliaciones o ajustes de capacidad.
  
- La arquitectura propuesta soporta tráfico superior a los 500 Mbps, se recomienda planificar estratégicamente la expansión del ecosistema IoT agrícola, priorizando aplicaciones de alto impacto, como monitoreo de riego, variables edafoclimáticas, trazabilidad y analítica de imágenes, vinculando las nuevas aplicaciones con objetivos productivos concretos como reducción de mermas, optimización de insumos, mejora de calidad, entre otros.
  
- Se sugiere que la empresa promueva un plan de capacitación dirigido al personal técnico y administrativo en el uso, supervisión y mantenimiento básico del sistema de comunicaciones, abordando no solo aspectos operativos (gestión de equipos, interpretación de alarmas), sino también buenas prácticas de seguridad de la información.

## 5 REFERENCIAS

Arias, A. (2022). *Caracterización de sistemas de comunicación RF y ópticos en aplicaciones submarinas* [Bachelor thesis, Universitat Politècnica de Catalunya].

<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/372768>

Cabana-Mamani, J., & Supho-Mayta, L. (2022). *Evaluación de un sistema de comunicación inalámbrico en el cambio de lanners de impacto en chutes y feeders para la reducción del índice de accidentabilidad en una empresa contratista, Arequipa, 2022* [Tesis para optar el título profesional, Universidad Tecnológica del Perú].

<http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/6118>

Cedeño, K. (2023). *Diseño para una construcción de una red FTTH con estándar GPON para la conexión de videocámaras en la urbanización San Luis de la ciudad de Portoviejo*. [Tesis de grado, Universidad Estatal del Sur de Manabí].

<http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/6374>

Culi, H. (2023). *Implementación de la red de Telecomunicaciones de la Institución Educativa César Abraham Vallejo, AbancayApurímac* [Tesis de grado]. Universidad Nacional San Luis Gonzaga.

Falconi, I., & Gabriel, D. (2024). *Diseño de una red basada en la tecnología GPON e inalámbrica para dotar de internet al distrito de Chongos Bajo* [Tesis de grado].

Universidad Continental.

Flores, E. (2023). *Implementación de Red GPON en el Recintro La Industria del Cantón Urdaneta, provincia de Los Ríos en el año 2023* [Tesis de grado]. Universidad Técnica de Babahoyo.

- Herrera, M. (2022). *Redes 6G empoderadas por superficies inteligentes reconfigurables: Simulación de comunicaciones inalámbricas asistidas por superficies inteligentes reconfigurables con errores de fase*. [bachelorThesis, Quito : EPN, 2022.].  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22696>
- Hinostroza-Quñones, J. (2022). *Diseño e implementación de un sistema multiparametrico mediante Internet de las cosas para la medición y monitoreo de signos vitales en pacientes con necesidad de vigilancia remota* [Tesis para optar el título profesional, Universidad de Ciencias y Humanidades].  
<https://repositorio.uch.edu.pe//handle/20.500.12872/747>
- Maticorena-Balvin, F. (2020). *Estrategias para mejorar la gestión de la calidad en telecomunicaciones en el Perú* [Tesis de grado, Universidad del Callao].  
<http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/5515>
- Medina-Beltrán, E. (2021). *Desarrollo de antenas miniatura UWB con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5G* [Tesis de grado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada].  
<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2995>
- Montenegro, C. (2021). *Estudio técnico para la implementación de una Red GPON para la Parroquia Sinaí De La Provincia de Morona Santiago* [Tesis de grado]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Toro-Bernal, H. (2020). *Análisis de tecnologías de comunicaciones inalámbricas para determinar la mejor opción a implementar para los servicios que presta la DITG-EAAB* [Bachelor thesis, Universidad Santo Tomás].  
<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/20741>

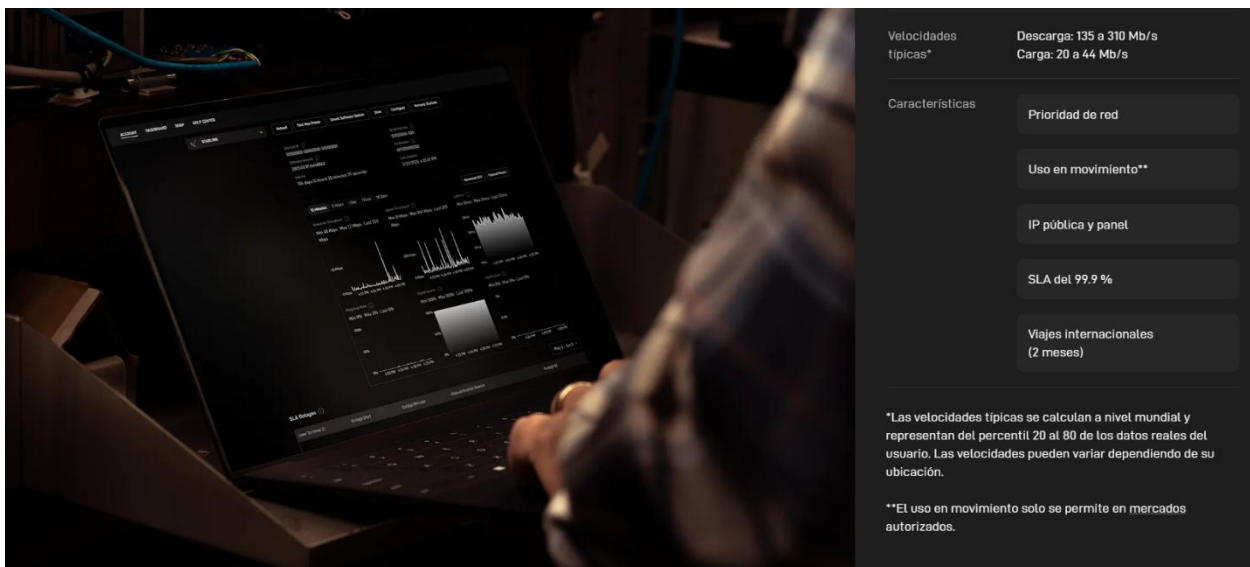
## **ANEXOS**

## Anexo 01: Equipamiento Starlink Business para la solución de comunicación satelital

La interfaz de monitoreo de un enlace satelital Starlink muestra en el panel derecho las velocidades típicas del servicio, con tasas de descarga en el rango de 135 a 310 Mb/s y de carga entre 20 y 40 Mb/s, así como características operativas como prioridad de red, posibilidad de uso en movimiento, disponibilidad de IP pública y panel de gestión, un SLA del 99,9 % y habilitación para uso en viajes internacionales por periodos limitados. Starlink se convierte en una alternativa viable de conectividad de alta capacidad y alta disponibilidad para la empresa agroindustrial.

**Figura 33**

*Equipamiento Starlink Business para la solución de comunicación satelital*



## **Anexo 02: Terminal Starlink Performance Gen 2 para la solución satelital**

La figura N° 20, muestra una antena plana tipo panel, correspondiente a un terminal Starlink Performance Gen 2, instalada mediante un soporte metálico anclado al muro, permite orientar la antena hacia el cielo despejado, asegurando la línea de vista necesaria para el enlace satelital de banda ancha, adecuada para zonas rurales o zonas agroindustriales donde no se dispone de infraestructura terrestre robusta.

**Figura 36**

*Terminal Starlink Performance Gen 2 para la solución satelital*

