



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“MODELAMIENTO DE PROPAGACIÓN DEL CANAL
INALÁMBRICO EN LA BANDA DE 5Ghz EN ÁREA
INDUSTRIAL”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

WASHINGTON ANTONIO DELGADO NEIRA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTOS

A quienes con su amor, dedicación y ejemplo dieron forma a mis sueños y objetivos, mis padres, José y Leticia, mi familia y amigos.

A quien con su ayuda y dirección hicieron posible este trabajo de titulación, Dra. Rebeca Estrada.

Al Ing. Julio Tobar Gerente de Operaciones y al Ing. Gonzalo Velazco Gerente General de Papelera Nacional, por la confianza y el apoyo brindado de parte de Papelera Nacional S.A. para poder cursar y concluir esta maestría.

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mi amada esposa Génesis, por su amor y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, y en especial durante el desarrollo y culminación de este proyecto.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
PHD. CÉSAR MARTIN
SUBDECANO DE LA FIEC

.....
PHD. REBECA ESTRADA P.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

.....
PHD. JUAN C. AVILÉS C.
MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
Washington Delgado Neira.

RESUMEN

El uso de enlaces inalámbricos punto a punto en la industria ofrece una solución de rápida implementación y menor costo que las alternativas por cobre o fibra, sin embargo, el medio de propagación industrial afecta de manera particular a la onda de propagación. Esta afectación se traduce en atenuación de potencia de la señal de radio frecuencia.

Determinar un modelo de propagación en áreas industriales permitiría hacer una correcta estimación de la potencia a lo largo del enlace y de esta manera dimensionar efectivamente los equipos en la implementación de una solución como esta.

El escenario industrial para el desarrollo de este trabajo es en la planta de Papelera Nacional S.A. y el Ingenio Azucarero San Carlos en el cantón Marcelino Maridueña de la provincia del Guayas.

Para el desarrollo de este trabajo, se parte de mediciones de potencia de la señal de radio frecuencia a lo largo de los enlaces sobre las plantas industriales de Papel y el ingenio azucarero. Estas mediciones se las realizará a la altura del enlace con la ayuda de un dron, en la banda de 5 GHz.

Se usa el modelo de propagación de espacio libre y las mediciones los enlaces para realizar la regresión matemática y obtener un modelo de pérdida por trayectoria de propagación característico del escenario industrial.

El escenario de este trabajo son industrias papeleras o azucareras con un tamaño, de acuerdo a su consumo energético, de 11 a 15 Mw.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	v
DECLARACIÓN EXPRESA.....	vi
RESUMEN	vii
CAPÍTULO 1.....	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	10
1.1. Antecedentes.....	10
1.2. Identificación del problema.....	11
1.3. Solución propuesta.....	11
1.4. Objetivos.....	12
1.5. Alcance.....	12
1.6. Metodología.....	13
CAPÍTULO 2.....	15
2. ASPECTOS DE ENLACES DE RADIO WLAN Y PROPAGACIÓN RF EN AMBIENTES EXTERIORES.	15
2.1. Descripción de las comunicaciones WLAN.	15
2.1.1. Estándar 802.11a/b/g/n/ac.....	16
2.1.2. Uso del estándar 802.11 en los enlaces punto a punto... 19	
2.1.3. Equipos de enlaces punto a punto con estándar 802.11. 20	
2.2. Propagación RF en ambientes exteriores (outdoor).	21
2.2.1. Propagación en el espacio libre.....	21
2.2.2. Factores que afectan la propagación de las ondas RF. ..	22
2.3. Modelos de propagación en exteriores.....	27
2.3.1. Modelo de pérdida por trayectoria (Path Loss).....	28
CAPÍTULO 3.....	32
3. MEDICIONES EN AREAS INDUSTRIALES.....	32

3.1.	Equipos de enlace de datos.	33
3.1.1.	Antenas Ubiquiti.	33
3.1.2.	Arquitectura de los enlaces de datos.....	36
3.2.	Mediciones enlace PANASA – ISC	42
3.2.1.	Puntos de medición	42
3.2.2.	Resultados de mediciones.....	44
3.2.3.	Análisis de las mediciones.....	45
3.3.	Mediciones enlace PANASA – BOMBA 2	48
3.3.1.	Puntos de medición	48
3.3.2.	Resultados de mediciones.....	49
3.3.3.	Análisis de las mediciones.....	51
	CAPITULO 4.....	53
4.	DESARROLLO DE UN MODELO DE PROPAGACION SEMI-EMPIRICO PARA ÁREAS INDUSTRIALES	53
4.1.	Desarrollo de modelo de propagación para áreas industriales.	53
4.1.1.	Regresión enlace PANASA – ISC.	54
4.1.2.	Regresión enlace PANASA – BOMBA 2.	56
4.2.	Validación de los modelos de propagación desarrollados.	58
4.2.1.	Validación de modelo Panasa – ISC.	58
4.2.2.	Validación de modelo Panasa – Bomba 2.....	60
4.3.	Análisis de resultados obtenidos.	61
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	66
	ANEXOS.....	68

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1. Antecedentes.

El uso de redes inalámbricas de sensores y enlaces de radio (WSN) en la industria se ha incrementado en los últimos años [1], lo que conlleva a utilizar modelos de propagación de canales con características similares al entorno donde se implementará la solución y estimar la atenuación de la señal, esta es una práctica común en el sector industrial emergente.

En la actualidad, la automatización industrial [2] está incrementando el uso de buses de datos basados en el estándar ethernet en diferentes medios como: cables de cobre, fibra óptica o inalámbrico; lo que facilita la integración con servicios administrativos y flujos de información desde la maquina hasta los sistemas informáticos de la planta. Esta compatibilidad abrió un sin número de aplicaciones y servicios con mejor facilidad de implementación, por ejemplo:

- La trazabilidad de los productos desde la línea de fabricación, hasta el mismo cliente
- El levantamiento de información sobre el estado de la máquina en línea, para la gestión de mantenimiento oportuno.

También es de interés el uso de índices de producción, que vienen dados desde la misma máquina y son elevados al sistema informático de la empresa para disposición de gerentes en cualquier momento y en cualquier lugar colocando toda la información en la nube. Sin duda la aplicación de las telecomunicaciones en el ámbito industrial supone una verdadera ventaja competitiva llamándola la cuarta revolución industrial [3].

Dentro de las aplicaciones de las telecomunicaciones en el campo industrial tenemos el uso de enlaces inalámbricos PtP (Point to Point) para plantas de gran tamaño. Estos enlaces son de rápida implementación y dado al crecimiento en el uso residencial por parte de los proveedores de internet, actualmente esta tecnología es más barata, sin embargo, no se puede dejar de lado las consideraciones especiales que requieren las aplicaciones de tipo industrial.

Estas consideraciones especiales se refieren al correcto dimensionamiento de la solución a implementar para que las pérdidas de potencia debido al ruido propio de la industria no afecten el enlace y garantizar la disponibilidad.

1.2. Identificación del problema.

El diseño e implementación de un enlace de datos para estas aplicaciones requieren un análisis de espectro radioeléctrico o el uso de modelos de propagación para la estimación y correcto dimensionamiento; en el caso de usar un modelo de propagación, este debe tener en cuenta las consideraciones especiales del ambiente industrial.

Estas consideraciones especiales son propias de su operación y tienen que ver con la reducción de la relación de señal a ruido generado por las grandes cargas inductivas de los motores, líneas de distribución de potencia, focos de radiación de altas temperaturas, vapor y condensado liberado a la atmósfera por las calderas y emisiones de CO₂ como lo identifica la recomendación ITU-R P.372 [4].

El modelamiento de un canal de propagación es un proceso requerido para poder estimar el comportamiento del canal bajo las circunstancias donde se espera implementarlo. Debido a las diferentes respuestas de propagación en cada entorno, es difícil precisar un modelo único que permita la estimación para todos los casos.

La importancia de un modelo de propagación en la planeación e implementación radica en no sobredimensionar, es decir el uso de más recursos para alcanzar la cobertura deseada incrementando costos, y mucho menos sub-dimensionar obteniendo menor cobertura o calidad real que la estimada. Esto motiva a proponer la presente investigación para desarrollar un modelo matemático de pérdida por trayectoria de propagación usando modelos de propagación ya establecidos, que no tienen en consideración directa las afectaciones del entorno industrial, y las mediciones de un enlace en la industria.

1.3. Solución propuesta.

El presente trabajo de titulación propone un modelo de pérdida por trayectoria del canal de propagación usando como bases a los modelos de propagación en entornos similares a los entornos industriales, y a su vez que tenga en

consideración las características propias del entorno industrial mediante el uso de las mediciones y de regresiones lineales para el ajuste de los modelos bases.

El modelo desarrollado permitirá la estimación del comportamiento de la atenuación de la señal en la banda de 5 GHz para enlaces PtP a una altura de 15 metros sobre áreas industriales de tipo papelerero o azucarero, lo que supondrá una herramienta útil para el correcto dimensionamiento de enlaces de datos en estas condiciones.

1.4. Objetivos.

Objetivo General:

Desarrollar un modelo de propagación de canal inalámbrico en la banda de 5 GHz para ambientes industriales.

Objetivos Específicos:

- Revisar y analizar los modelos de propagación usados en los sistemas inalámbricos que operan en la banda de 5 GHz en ambientes exteriores.
- Determinar una función para el modelo nuevo de propagación mediante regresión lineal y factores de corrección basado en las mediciones de campo en dos enlaces de radio en la industria en la banda de 5 GHz.
- Análisis de los resultados obtenidos en las mediciones con respecto al desempeño del modelo de propagación desarrollado.
- Validación del modelo de propagación mediante el cálculo de la potencia requerida para la implementación de un enlace de datos industrial.

1.5. Alcance.

El modelo a desarrollar está basado en modelos de propagación conocidos y probados, como es el caso del modelo de propagación en espacio libre, y tendrá las mismas limitaciones de aquellos modelos.

Este modelo permitirá la estimación de la potencia de la señal en los entornos industriales, es decir, cuando el enlace atraviere plantas industriales con línea de vista entre las antenas (LOS), a una altura aproximada de 15 metros y en la banda de 5 GHz.

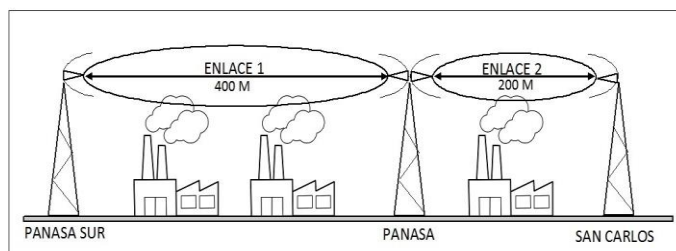


Figura 1.1: Enlaces de radio sobre zona industrial.

El presente trabajo usa herramientas estadísticas, como el RMSE (Root Mean Square Error) o la raíz del error cuadrático medio, para evaluar el rendimiento del modelo a desarrollar, compararlo con otros modelos y determina el mejor modelo que se adapte a nuestro entorno.

1.6. Metodología.

Para alcanzar los objetivos propuestos, primero se revisa el estado del arte de las redes WLAN y los modelos de propagación en la banda de 5GHz.

Se considera el modelo teórico de la ecuación de Friis para pérdidas de propagación en el espacio libre [5] para comparar con una referencia base de la atenuación mínima esperada.

Luego se utilizará el grupo de modelos que más se ajusten al escenario industrial, estos se contrastan con las mediciones del canal físico para elegir el modelo teórico base para el desarrollo del nuevo modelo. Se toma como base el modelo teórico que presente la mejor aproximación con las mediciones reales.

Para realizar las mediciones de la potencia de las antenas, se cuenta con un analizador de espectro radioeléctrico portátil, un terminal móvil con la aplicación Wifi Analyzer, y un dron. Luego estos datos son cargados en Matlab para la determinación del modelo.

Se aplica regresión lineal a las medidas obtenidas con la ayuda del software Matlab y de la herramienta de pago *Curve Fitting Toolbox* [6] para obtener una función que se ajuste al modelo teórico usado como base y obtener el nuevo modelo de propagación que permita estimar con mejor precisión la pérdida de la señal de radio por la trayectoria en los ambientes industriales.

Debido a que se cuenta con dos enlaces de similares características en la misma zona, las mediciones se realizarán en los dos enlaces de manera independiente para desarrollar dos modelos de propagación.

Con los datos obtenidos, se realiza la comparación de las medidas con el desempeño de los nuevos modelos de propagación usando el RMSE, finalmente, se buscará obtener un modelo con el menor RMSE posible.

CAPÍTULO 2

2. ASPECTOS DE ENLACES DE RADIO WLAN Y PROPAGACIÓN RF EN AMBIENTES EXTERIORES.

2.1. Descripción de las comunicaciones WLAN.

Una red WLAN (Wireless Local Area Network), es una red local de tipo inalámbrica para comunicación de datos que cubre espacios locales, pequeñas áreas alrededor de los 100 metros y satisface la demanda de comunicación inalámbricas de pc portátiles y luego de terminales móviles. Este tipo de redes usa ondas de radiofrecuencia no licenciadas, lo que le da una gran facilidad de implementación y movilidad.

Estas redes usan diferentes tipos de estándares para comunicarse usando el medio, es decir el espacio libre, dependiendo de la frecuencia de operación y de la modulación usada.

El estándar más usado es el desarrollado por el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) y es el 802.11.

Las redes WLAN usan las normativas de los estándares IEEE 802 de las redes LAN, como son la IEEE 802.3 y equivalentes, pero usan una normativa específica adicional que define el uso y acceso al medio RF [1], definiendo protocolos de capa física (PHY), capa de control de acceso al medio (MAC) y capa de enlace de datos (DLC), este estándar es el IEEE 802.11[7].

El presente trabajo de titulación trabaja con equipos que usan el estándar IEEE 802.11.

La Tabla 1 muestra los estándares más usados.

Desarrollado	Estándar	Año	Frecuencia	Nivel físico
IEEE	802.11	1997	2,4 GHz	DSSS, FHSS
IEEE	802.11b	1999	2,4GHz	DSSS
IEEE	802.11a	1999	5 GHz	OFDM
IEEE	802.11g	2003	2,4 GHz	OFDM/DSS
IEEE	802.11n	2009	2,4 / 5 GHz	MIMO-OFDM
IEEE	802.11ac	2013	5 GHz	MIMO-OFDM

Tabla 1: Lista de estándares WiFi 802.11 en orden de aparición.

2.1.1. Estándar 802.11a/b/g/n/ac

Dentro de la familia 802.11 se tienen las clasificaciones 802.11a/b/g/n/ac/ad/ah/aj/ax/ay/az, cada una de las cuales usan diferentes tipos de modulación, ancho de banda, frecuencia de operación y velocidad, siendo este último el objetivo de las nuevas versiones de los estándares 802.11.

Los principales y más usados estándares actuales son los a/b/g/n/ac, de los cuales se mencionan a continuación.

2.1.1.1. IEEE 802.11/a

Es un estándar que usa OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) como modulación en la banda de 5 GHz, para alcanzar velocidades de hasta 54 Mbps.

Fecha de aprobación	Julio 1999
Máxima tasa de datos [Mbps]	54
Típica tasa de Datos [Mbps]	25
Rango típico en interiores [m]	30
Modulación	OFDM
Banda RF [GHz]	5
Ancho de canal	20

Tabla 2: Sumario del estándar 802.11a [8].

La señal OFDM usa 52 subportadoras con 48 de ellas para la transmisión de datos y tiene una variedad de formas de modulación para las subportadoras, estas modulaciones son BPSK, QPSK, 16QAM y 64 QAM [8].

A cada tipo de modulación digital le corresponde una velocidad de transmisión de los datos, siendo 64 QAM la máxima con 54 Mbps.

2.1.1.2. IEEE 802.11/b

Fue lanzado al mismo tiempo que el 802.11a y fue el primer estándar adoptado y construido en la mayoría de las computadoras portátiles y otros equipos móviles [9].

Fecha de aprobación	Julio 1999
Máxima tasa de datos [Mbps]	11
Típica tasa de Datos [Mbps]	5
Rango típico en interiores [m]	30
Modulación	CCK(DSSS)
Banda RF [GHz]	2.4
Ancho de canal	20

Tabla 3: Sumario del estándar 802.11b [9].

Este estándar usa modulación DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) en la capa de enlace y CCK (Complementary Code Keying) en la capa física y el mismo método de acceso CSMA/CA definido en el estándar 802.11 y alcanza una velocidad máxima de 11 Mbps.

2.1.1.3. IEEE 802.11/g

Este estándar salió a la luz en el año 2003 y ofrece velocidades de hasta 54 Mbps igual que el estándar 802.11a pero trabajando en la banda de 2.4 GHz [10].

Fecha de aprobación	Junio 2003
Máxima tasa de datos [Mbps]	54
Modulación	CCK(DSSS), ó OFDM
Banda RF [GHz]	2.4
Ancho de canal	20

Tabla 4: Sumario del estándar 802.11g [10].

Adopta la misma modulación del 802.11a, DSSS y OFDM, la ventaja de este estándar es la compatibilidad con 802.11 y 802.11b ajustándose a sus velocidades. Para lograr la máxima compatibilidad, este estándar tiene 4 capas físicas diferentes a las que corresponden diferentes tasas de datos desde 1 hasta 54 Mbps como máximo

2.1.1.4. IEEE 802.11/n

Este estándar incorpora la tecnología MIMO (Multiple-Input/Multiple-Output) en la banda 2.4 ó 5 GHz y alcanzar velocidades de hasta 100 Mbps. MIMO fue introducida para mejorar la calidad de transmisión y la eficiencia espectral del sistema.

Fecha de aprobación	2009
Máxima tasa de datos [Mbps]	600
Modulación	CCK(DSSS), OFDM
Banda RF [GHz]	2.4 ó 5
Ancho de canal [MHz]	20 ó 40

Tabla 5: Sumario del estándar 802.11n [11].

La capa física del 802.11n configurado con MIMO 4x4 y ancho de banda de 40 MHz logra velocidades de hasta 600 Mbps. La ventaja de MIMO al aumentar las salidas y entradas de los datos da como resultado un consumo mayor de energía, al aumentar el número de entradas y salidas también aumenta el número de transmisores y receptores.

2.1.1.5. IEEE 802.11/ac

Conocido como Gigabit Wifi, o 5G Wifi, por alcanzar un muy alto rendimiento, VHT (Very High Throughput), incorpora tecnología MIMO y MU-MIMO (Multi User – Multiple input Multiple Output) en la banda de 5 GHz.

Fecha de aprobación	2013
Máxima tasa de datos [Gbps]	6.9
Modulación	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM.
Banda RF [GHz]	5.8
Ancho de canal [MHz]	20, 40, 80, 160.

Tabla 6: Sumario del estándar 802.11ac [12].

Puede usar 20, 40, 80 y 160 MHz de ancho de banda por canal, y logra velocidades de hasta 6.9 Gbps.

La incorporación de MU-MIMO sirve para hacer transmisiones simultáneas de diferentes usuarios, lo que mejora aún más la capacidad de la tasa de datos que puede manejar este estándar.

2.1.2. Uso del estándar 802.11 en los enlaces punto a punto.

El estándar 802.11 fue diseñado originalmente para aplicaciones de redes de área local para interiores, sin embargo, se han desarrollado soluciones para aplicaciones en exteriores del tipo punto a punto y punto a multipunto para aprovechar todas las ventajas que ofrece el estándar 802.11.

Las principales limitaciones dependen de la capa física (Phy) y de la capa de control de acceso al medio (MAC) ,Con una adecuada configuración de los protocolos de estas dos capas, es posible extender el rango de cobertura [13].

Para el caso de la capa Phy del estándar 802.11 trabaja sobre las frecuencias 2.4 y 5 GHz las cuales la legislación permite usar sin la necesidad de contar con una licencia o concesión en la mayoría de los países incluyendo Ecuador [14], pero limitan el nivel de potencia que se puede transmitir dependiendo de cada país, para Ecuador es de 200 mw de PIRE (Potencia Isotrópica Irradiada Equivalente) [15]. Este aspecto es el que limita el alcance del enlace.

El estándar también establece diferentes velocidades dependiendo de la modulación y codificación y que determinan los distintos tipos de BER (Bit Error Rate) para una misma relación de señal/ruido. Cuanto mayor es la

velocidad, mayor es la potencia requerida para mantener una tasa de error de bit lo suficientemente baja para su correcto funcionamiento.

El objetivo es lograr un compromiso entre la potencia transmitida, la distancia y la velocidad. Actualmente los equipos entregan una velocidad y alcance dependiendo de su precio y tienen un umbral mínimo de potencia recibida con el que pueden trabajar, este umbral se lo conoce como radio sensibilidad del receptor.

Para estimar la potencia necesaria para transmitir, se tiene que calcular las pérdidas por efectos de propagación en el medio, las pérdidas de cables, conectores de las antenas y la distancia del enlace. La diferencia entre la potencia de transmisión y la suma total de las perdidas debe ser mayor que la sensibilidad del receptor, esto garantizara el correcto funcionamiento del enlace [16].

2.1.3. Equipos de enlaces punto a punto con estándar 802.11.

En la actualidad existe una extensa variedad de equipos de diferentes marcas y características que trabajan con el estándar 802.11 o WIFI, como se detalla en la Tabla 7.

Marca	Modelo	Rango	Throughput	Frecuencia
Ubiquiti	NanoBeam AC	10+ km	450+ Mbps	2.4 y 5 GHz
Ubiquiti	NanoStation AC	15+ km	450+ Mbps	5 GHz
Ubiquiti	PowerBeam AC	20+ km	450+ Mbps	2.4 y 5 GHz
Ubiquiti	airGrid M	30+ km	100+ Mbps	2.4 y 5 GHz
Ubiquiti	NanoStation M	15+ km	150+ Mbps	2.4 y 5 GHz
Mikrotik	SXTsq Lite5	12+ km	54+ Mbps	5 GHz
Mikrotik	DISC Lite5	5+ km	54+ Mbps	5 GHz
Mikrotik	LHG 2	40+ km	54+ Mbps	2.4 GHz
C. Networks	ePMP	10 millas	200+ Mbps	5 GHz
C. Networks	ePMP 1000	40 millas	200+ Mbps	2.4 y 5 GHz
C. Networks	PTP 700	100 km	450+ Mbps	5 GHz
C. Networks	PMP 450	40 millas	250+ Mbps	2.4 y 5 GHz

Tabla 7: Equipos Wifi para aplicaciones punto a punto.

Existe la competencia de muchas otras marcas en el mercado de los proveedores de internet residencial y comercial hasta la fecha, en donde empieza la tendencia del uso de fibra óptica para estas aplicaciones. Sin embargo, esta competencia y demanda en su tiempo abarató los costos de estos equipos y tecnología, permitiendo el acceso de internet a muchas zonas rurales en el mundo. Solo en el Ecuador, se produjo un crecimiento de 1,3% en 2010 al 9.1% en 2013 [17]. También permitió el uso de estos para aplicaciones industriales, debido a la rápida conexión de equipos que en su mayoría actualmente usan el protocolo Ethernet/IP para comunicarse. Esta generación de equipos hizo posible el despliegue de redes de proveedores de internet rápidamente por todo el Ecuador, como también el uso para enlaces de datos dentro de empresas o industrias con plantas de grandes distancias, disminuyendo los costos y el tiempo de implementación, teniendo un enlace rápido y confiable.

2.2. Propagación RF en ambientes exteriores (outdoor).

2.2.1. Propagación en el espacio libre.

Para el análisis, es fundamental entender el comportamiento característico de la onda de radio frecuencia (RF) para poder realizar estimaciones y en la práctica ayudar a dimensionar los equipos requeridos para un enlace de PtP. Adicionalmente, se debe tener en cuenta el efecto que tiene el medio en el que se propaga la onda, lo cual se denomina Path Loss o pérdida de trayectoria.

Existen muchos modelos matemáticos y empíricos que describen la atenuación de los diferentes entornos posibles.

La planificación de un sistema de comunicaciones [18] requiere hacer un análisis para el correcto dimensionamiento de los equipos, este análisis se denomina Link Budget o presupuesto del enlace.

La potencia en la propagación de las ondas RF en el espacio libre sigue un comportamiento según la ecuación de Friis, que está dada por la ecuación (2.1).

$$L = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

donde:

L: Es la pérdida de la potencia, es decir es un valor menor que la unidad.

G_t: Es la ganancia de la antena que transmite.

G_r: Es la ganancia de la antena que recibe.

λ: Es la longitud de onda que está propagando.

d: Es la distancia entre el emisor y el receptor.

La misma ecuación expresada en dB corresponde a la ecuación (2.2).

$$L_{dB} = -G_T - G_R - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) + 22 \quad (2.2)$$

Se puede notar que en esta ecuación el signo menos ha sido incluido, lo que indica que L en dB es una pérdida de potencia, o ganancia negativa que sufre la señal al propagarse una distancia d y en una frecuencia dada.

En muchas aplicaciones, la ecuación es expresada sin las ganancias de las antenas, ya que estas son datos específicos de la configuración del enlace, la ecuación (2.3) muestra como puede ser expresada sin estas ganancias.

$$L_{dB} = -20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (2.3)$$

2.2.2. Factores que afectan la propagación de las ondas RF.

Los factores que afectan la propagación de las ondas RF son fenómenos físicos que alteran el comportamiento de la onda al interactuar con su medio en donde se propaga a continuación, se describen los principales.

2.2.2.1. Perdidas por distancia.

Toda onda que se propaga en un medio ve afectada su potencia, disminuyendo a medida que se aleja de su fuente. En el vacío su atenuación es mínima en comparación con otros medios y sigue un comportamiento según la ecuación (2.1).

2.2.2.2. Pérdidas por difracción.

Este efecto se produce en el frente de onda al pasar cerca de la orilla o borde de un objeto opaco o rendija estrecha, redistribuyendo la energía[19], creando una nueva propagación en torno a estos bordes en lugar de continuar en línea recta.

Esta nueva propagación crea un desvanecimiento de la potencia que debería llegar al receptor, es decir la potencia se distribuyó hacia caminos no deseados y también crea interferencias entre las nuevas propagaciones.

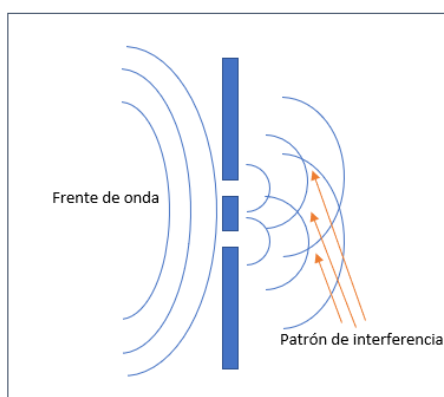


Figura 2.1: Difracción de la onda electromagnética al pasar por la doble rendija.

2.2.2.3. Pérdidas por dispersión.

La dispersión ocurre cuando las ondas de radio atraviesan un material o pequeñas gotas de agua y estas se descomponen o separan en las distintas frecuencias en las que estaba compuesta la onda.

La dispersión depende del material que atraviesen y del tamaño, en el caso de una onda RF para que pueda atravesar la lluvia, depende del tamaño de las gotas comparadas con longitud de onda de la señal propagada.

Si la longitud de onda es mayor que el diámetro de una gota de lluvia, la atenuación de la potencia de la señal por dispersión será pequeña, si la longitud de onda disminuye hasta el diámetro de la gota o menor, la dispersión aumentará la pérdida de potencia de la señal.

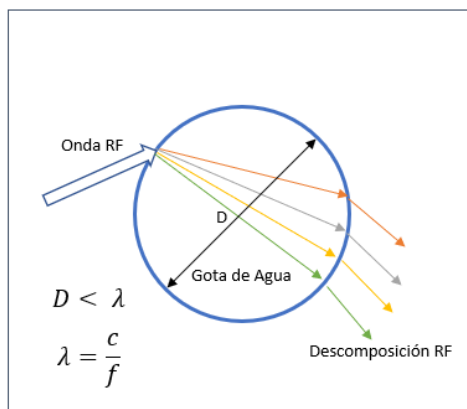


Figura 2.2: Dispersión de la onda RF al atravesar una gota de agua.

Por lo que para frecuencias altas la longitud de onda disminuye y es más sensible al paso de lluvias o columnas de gases en la atmósfera.

2.2.2.4. Perdidas por reflexión.

Las ondas de radio al igual que la luz, se reflejan cuando chocan con superficies, una parte de la onda penetra la superficie y otra se refleja, dividiéndose la potencia, es decir, atenuando la onda deseada.

Este fenómeno también se da entre capas de la atmósfera, desde la troposfera hasta la ionosfera según la diferencia de los índices de reflectividad de cada capa, llegando incluso a producir reflexión total.

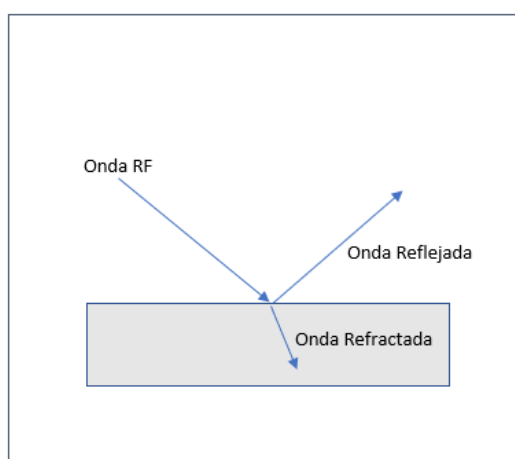


Figura 2.3: Reflexión y refracción de una onda electromagnética.

2.2.2.5. Pérdidas por refracción.

Las ondas de radio cuando atraviesan la frontera de un medio a otro con densidad distinta sufren una desviación en su trayectoria, este efecto es apreciable también cuando las ondas de radio atraviesan las diferentes capas de la atmósfera, o cuando atraviesan edificios y demás obstáculos. La desviación en la trayectoria depende del índice de refractividad que es la relación entre la velocidad de propagación en el espacio libre y la velocidad de propagación en el medio.

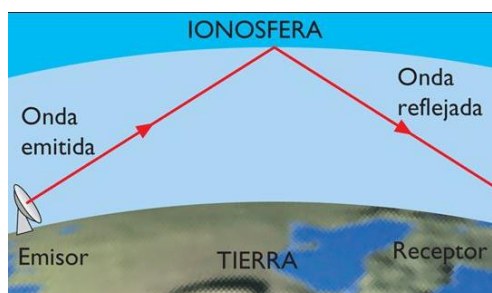


Figura 2.4: Refracción de una onda RF sobre la ionosfera [20].

2.2.2.6. Pérdidas por multi-trayectoria.

Este fenómeno se da por la reflexión y refracción, creando múltiples caminos de la onda, estos caminos recorren diferentes distancias desfasándose cada una de la señal original.

Estas trayectorias pueden interferir entre ellas cuando sus caminos chocan en un punto y dependiendo del desfase que tengan, la onda resultante será una suma que puede atenuarse o maximizarse. Este fenómeno resulta difícil de predecir cuando la antena receptora es móvil y no existe línea de vista.

En el caso de un enlace PtP se toma en cuenta la onda reflejada de la tierra y se ajusta la altura de las antenas para que la interferencia entre la señal directa y la señal reflejada sea aditiva.

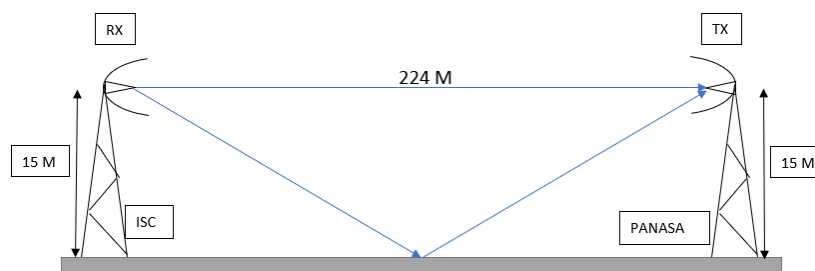


Figura 2.5: Multi-trayectoria de una onda RF sobre la superficie terrestre.

2.2.2.7. Condiciones atmosféricas.

En los sistemas de telecomunicaciones, las ondas RF se propagan en la atmósfera, y por eso la importancia de conocer el efecto de las condiciones atmosféricas en la propagación de la onda.

La atmósfera y sus capas proveen las condiciones para que exista refracción y reflexión de las ondas RF, y esto generen otros tipos de efectos como multi-camino, onda guiada por la superficie terrestre, y combinaciones de ellas [21]. Adicional a estas, existen dos efectos más que son la atenuación atmosférica debido a la absorción de la energía de la onda por parte de los gases de la atmósfera y la atenuación debido a las precipitaciones y condensaciones.

2.2.2.8. Condiciones industriales.

Las condiciones industriales dependen de las características del ambiente industrial [22] en donde se propaga la onda, tales como las dimensiones de las estructuras, materiales y presencia de equipo eléctrico que afectan al canal de propagación con diferentes tipos de degradación.

Los ambientes industriales pueden ser típicos, de amplias dimensiones y superficies metálicas, o de características especiales como almacenes de papel, por esta razón se los clasifica por el tipo de afectación a la propagación de la siguiente manera:

- Industriales con Hornos.
- Industriales de trabajos con metal.

- Industria papelera y cartonera.
- Laboratorios y oficina.
- Industria de ferrocarriles
- Minería y túneles.

El ambiente industrial en donde se realiza el presente trabajo es de tipo paplero cartonero, aunque también interviene en el escenario la industria azucarera, el enlace sobre el que se realiza las mediciones, atraviesa la industria de papel en su totalidad.

Las características de estos ambientes son de tipo reflectivas, debido a las infraestructuras metálicas, y absorbentes por la propiedad del papel en los almacenes de no reflejar las ondas RF.

2.3. Modelos de propagación en exteriores.

La propagación de las ondas de radio en exteriores depende de las características topográficas y eléctricas del medio en el que se propaga la onda como de los tipos de canales de radio, estos se clasifican por sus condiciones de propagación general como son:

- Frecuencia de operación.
- Altura de antenas RX/TX.
- Entorno donde se propaga.
- Condición de línea de vista (LOS) o no línea de vista (NLOS).

La condición de línea de vista indica si existe una ruta de propagación directa entre las antenas TX y RX, cuando no existe esta condición la propagación disminuye drásticamente y su comportamiento difiere de la condición LOS, esta es la razón por lo que cuando se modela o se analiza mediciones, se considera de manera separadas según esta condición.

En general, a la hora de usar un modelo de propagación que se aplique a un área específica, se debe tener en cuenta:

- Rango de la frecuencia de operación.
- Rango de distancias.
- Entorno de propagación.
- Aplicación.

En este último punto hace referencia al enfoque del análisis que se quiera dar, ya que se puede modelar la pérdida de potencia por la trayectoria, el ruido del entorno y la caracterización de la propagación debido al multi-camino.

Los modelos de propagación pueden ser empíricos, determinísticos, o una mezcla de los dos denominados semi-empíricos, los empíricos son basados en mediciones para describir el comportamiento de la onda, los determinísticos son basados en ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento físico de la onda como la ecuación de Friis derivada de las ecuaciones de Maxwell [23], y los semi-empíricos usan mediciones para ajustar las ecuaciones de los modelos determinísticos a sus entornos particulares [24].

Algunos de los modelos de propagación para ambientes exteriores más conocidos se mencionan en la Tabla 8.

	Frecuencia	Distancia	Ambiente	Tipo
Okumura	150-1920 MHz	100 km	Urbano	Empírico
Hata	150-1920 MHz	20 km	Urbano	Empírico
Longley-Rice	20 MHz-20 GHz	2000 km	Rural	Semi-Empírico

Tabla 8: Lista de los modelos de propagación exteriores más conocidos [25] [26].

2.3.1. Modelo de pérdida por trayectoria (Path Loss).

La propagación en el espacio libre es el modelo generalmente usado [22] para estimar el rendimiento de un enlace inalámbrico, la pérdida por trayectoria Path Loss para este caso puede ser expresada en función de la ecuación de Friis (2.3) [27].

$$\overline{PL}(d, f) = \overline{PL}(d_0, f) + 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.4)$$

En donde \overline{PL} es el promedio de la señal recibida en función de la distancia y frecuencia, d_0 es la distancia de referencia que se determina a partir de la medición cercana al transmisor, d es la distancia de separación entre el transmisor y receptor, y α es el exponente de la pérdida por trayectoria que indica la tasa de incremento de la pérdida por trayecto con la distancia. Esta ecuación puede ser expresada como la ecuación (2.5).

$$\overline{PL}(d, f) = 10\beta \log_{10}(f) + 10\alpha \log_{10}(d_0) + A + 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 + 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.5)$$

Donde los primeros 4 términos corresponden a la pérdida de trayectoria en d_0 según la ecuación (2.3) más una constante A que difiere según el enlace tenga línea de vista o no, β es el exponente de la frecuencia y el último término es la relación de pérdida por trayecto entre d y d_0 .

Los modelos de propagación, tanto teóricos como basados en mediciones, indican que la potencia de señal recibida promedio disminuye logarítmicamente con la distancia. Tales modelos se han utilizado ampliamente en la literatura.

Los parámetros β , α , y A de la ecuación (2.5) son determinados usando mediciones en el entorno específico y aplicando regresión lineal sobre esta ecuación. Para el caso de la propagación de espacio libre en el vacío, la ecuación de Friis, los valores β , α , y A son 2, 2 y 0 respectivamente.

La ecuación (2.6) nos permite saber el resultado de la potencia total recibida mediante la diferencia entre todas las ganancias de potencia de transmisión y todas las pérdidas.

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - \overline{PL}(d, f) \quad (2.6)$$

Donde:

Prx: Potencia total recibida.

Ptx: Potencia de transmisión de la antena emisora.

Gtx: Ganancia de la antena emisora.

Grx: Ganancia de la antena receptora.

\overline{PL} : Pérdida de potencia promedio debido al trayecto.

Estos modelos están dados por tablas según los tipos de canales de radio, es decir según las características del entorno y la aplicación. Estas tablas se han obtenidos gracias a campañas de mediciones en zonas urbanas y rurales en todo el mundo, a continuación, incluimos en la Tabla 9 los valores de estos parámetros para la frecuencia de 5GHz en ambientes exteriores punto a punto que más se adaptan al escenario con los tipos de enlaces según la revisión bibliográfica realizada.

	α	β	A
Friis Eq. LoS.	2	2	0
Áreas Industriales Absorbentes [22]	1.99	2	0.01
Áreas Industriales Reflectivos [22]	1.86	1.82	-5.03
Ambientes Urbanos NLoS [28]	5.82	2	-51.22

Tabla 9: Parámetros de la ecuación de propagación en espacio libre según el modelo de propagación PtP.

La Tabla 10 muestra los parámetros para ambientes exteriores en la banda de 5GHz para sistemas dependiendo de la altura de la antena del transmisor.

	α	β	A
Urbano LoS HTx: 4m	1.4	2	58.6
Urbano LoS HTx: 12m	2.5	2	35.8
Urbano LoS HTx: 45m	3.5	2	16.7
Urbano NLoS HTx: 4m	2.8	2	4.4
Urbano NLoS HTx: 12m	4.5	2	20
Urbano NLoS HTx: 45m	5.8	2	-16.9

Tabla 10: Parámetros de la ecuación de propagación en el espacio libre según el modelo de propagación para sistemas móviles [29].

Para validar cada uno de estos parámetros, se usa el RMSE entre la ecuación con el parámetro estimado mediante regresión y las mediciones obtenidas, de esta manera si tenemos un RMSE bajo, quiere decir que la aproximación es buena o cercana a las mediciones.

Para el desarrollo del modelo de propagación en áreas industriales similares, se comparará con los tres primeros modelos de la Tabla 9.

Los modelos para áreas industriales absorbente y áreas industriales reflectivos, son modelos realizados a partir de mediciones sobre almacenes industriales de papel con línea de vista y se lo denomina absorbente y reflectivos[22], respectivamente, por la propiedad física del papel y la

industria ante las señales RF absorbiendo o reflejando parte de la energía irradiada dependiendo del ambiente en donde se propaga.

Para hacer referencia al modelo en áreas industriales absorbentes, se lo denominará *modelo A*, al modelo para áreas industriales reflectivos como *modelo R*, y al modelo de Friis como *Friis Eq.*

CAPÍTULO 3

3. MEDICIONES EN AREAS INDUSTRIALES.

Para el desarrollo del modelo de propagación objetivo, se parte de las mediciones en el área industrial del cantón Marcelino Maridueña de la provincia del Guayas.

Se cuenta con dos enlaces sobre la planta industrial Papelera Nacional (Panasa) y el ingenio azucarero San Carlos (ISC).

El primer enlace comunica al cuarto de control de planta de fuerza de Panasa con el cuarto de control del ISC en dirección norte, este enlace tendrá el nombre de:

- Panasa – ISC.

El segundo enlace comunica el cuarto de control de planta de fuerza de Panasa con la estación de bombeo de pozo número 2 en dirección sur, este enlace se denominará:

- Panasa – Bomba 2.

Se eligieron los puntos de medición siguiendo la línea de vista de cada enlace y la separación entre muestra y muestra de manera aproximadamente simétrica, las coordenadas GPS de estos puntos sirven para dirigir el dron con el analizador de espectro y tomar las mediciones.



Figura 3.1: Elaboración de base para sujeción del analizador de espectro al dron.

Las mediciones se toman con una imagen al instrumento sobrevolando en la coordenada correspondiente previamente seleccionada. Cada imagen tomada es una fotografía que registra la potencia de la señal recibida, la coordenada, y la altura de donde se tomó la medida.



Figura 3.2: Imagen tomada desde el dron en un punto de medición.

Para realizar las mediciones se usó el analizador de espectro RF Explorer y la aplicación WiFi Analyzer en un terminal móvil. Esta última nos permite engancharnos a la Mac Address de la antena emisora y medir su potencia recibida discriminando cualquier otra señal que use la misma frecuencia, la Figura 3.2 muestra un ejemplo de la imagen tomada a la aplicación WiFi Analyzer desde el dron.

Estas mediciones se las realizaron sobre enlaces que se encuentran en operación y es por eso por lo que no se pueden realizar mediciones variando la altura de las antenas o ubicando las antenas en diferentes posiciones del área industrial.

3.1. Equipos de enlace de datos.

3.1.1. Antenas Ubiquiti.

El enlace Panasa – ISC está compuesto por dos antenas Ubiquiti LiteBeam M5 de 150 Mbps, mientras que el enlace Panasa – Bomba 2 emplea dos antenas Ubiquiti Nano Station M5 de 100 Mbps para 15 km de rango máximo.

3.1.1.1. LiteBeam M5.



Figura 3.3: Antena LiteBeam M5 de Ubiquiti [30].

Estas antenas son equipos compactos [30] que ofrecen una solución completa para la implementación rápida sistemas de comunicaciones inalámbricas para aplicaciones de enlaces punto a punto de larga distancia en exteriores de hasta 30km en la banda mundialmente libre de 5Ghz.

El perfil de radiación de la antena tanto para el azimut como para la elevación es de tipo direccional, es decir enfocando toda la energía en una dirección como se muestra en la figura 3.4, dado que esta antena es para uso de enlaces punto a punto.

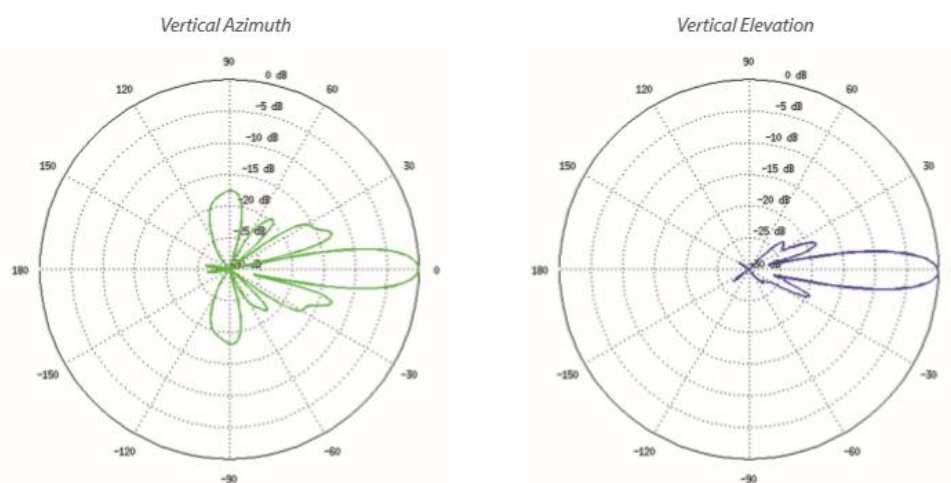


Figura 3.4: Mapa del perfil de irradiación de una antena LiteBeam M5 [30].

3.1.1.2. Nano Station M5.



Figura 3.5: Antena Nano Station M5 [31].

Este equipo tiene iguales características que el LiteBeam M5 como:

- Protocolo de 802.11n/airmax de Ubiquiti.
- Banda de frecuencia de 5Ghz.
- Esquema de comunicación Punto a Punto.
- Sistema operativo AirOs con interfaz de configuración web.

Pero adiciona otras características [31], como la opción de configurar enlaces Punto a Multipunto (PtMP) y polarización dual.

La antena tiene un perfil de irradiación de energía con un ángulo de apertura de alrededor de 60° en azimut, como se muestra en la Figura 3.6, mucho mayor a la antena LiteBeam, dado que esta antena permite la opción de trabajar PtMP, esto hace que muchas antenas se conecten a ellas apuntándolas dentro de ese ángulo de apertura.

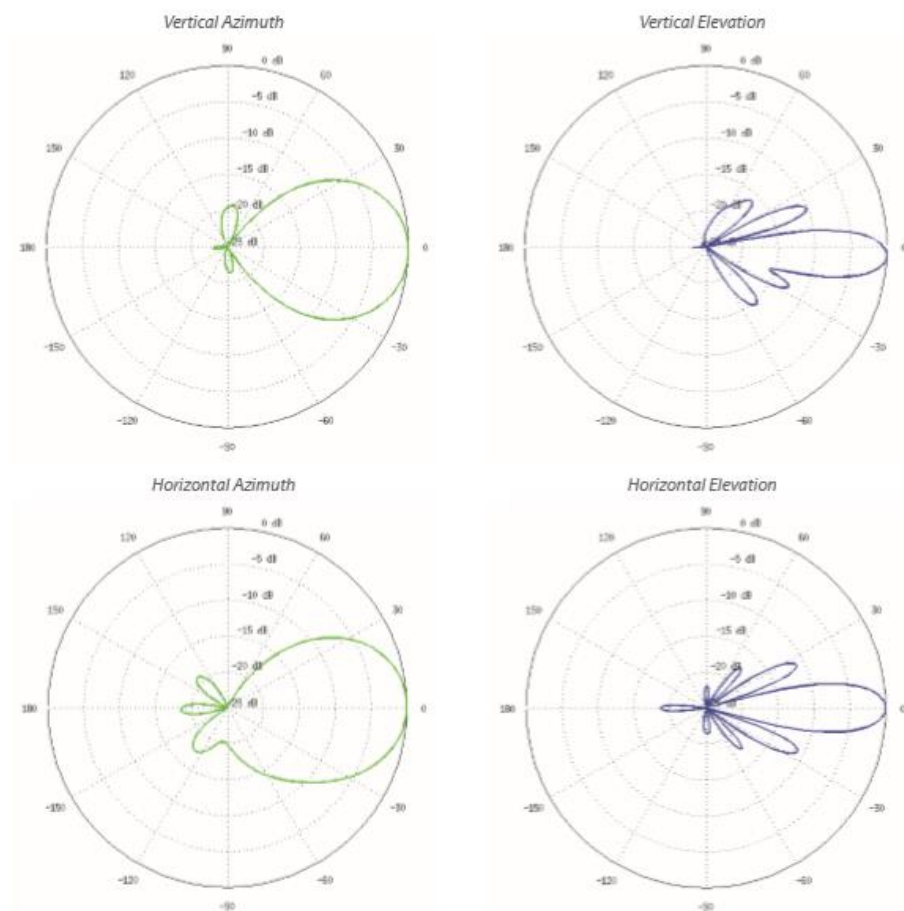


Figura 3.6: Mapa del perfil de irradiación de una antena Nano Station M5 [31].

3.1.2. Arquitectura de los enlaces de datos.

Los enlaces están instalados a través de la fábrica de Panasa y ISC a una altura de 15 metros como se muestra en la Figura 3.7.

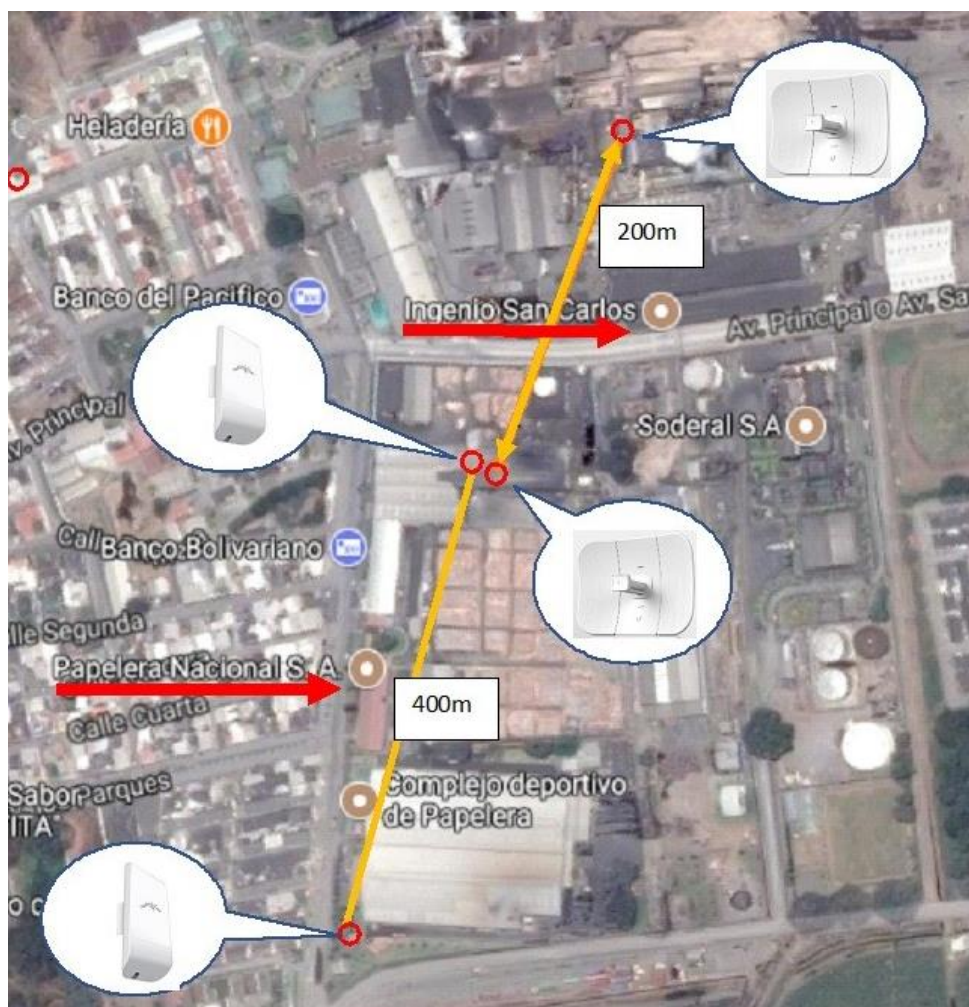


Figura 3.7: Mapa de los enlaces en el Cantón Marcelino Maridueña [32]

El enlace Panasa – ISC es el que se encuentra en la parte superior de la Figura 3.7 con aproximadamente 200 metros de separación, y el enlace Panasa – Bomba 2 en la parte inferior con aproximadamente 400 metros de separación.

Se establece los A0 y A1 como los extremos del enlace Panasa – ISC, siendo A0 el punto en Panasa y A1 en ISC, se puede observar la ubicación de estos en la Figura 3.8.

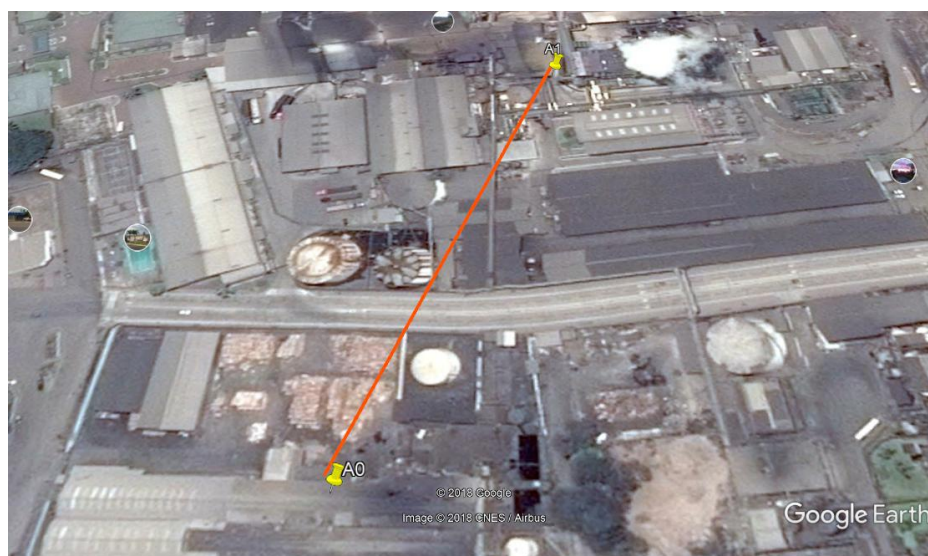


Figura 3.8: Enlace Panasa – ISC en Marcelino Maridueña [32].

Las coordenadas de los puntos A0 y A1 son mostradas en la Tabla 11, también se observa la separación de 224 metros según los cálculos gráficos de Google Earth.

Enlace Panasa – ISC		
	Punto A0 (Panasa)	Punto A1 (ISC)
Latitud	2°12'35.79"S	2°12'29.32"S
Longitud	79°26'10.80"W	79°26'7.98"W
Distancia entre A0 y A1	224 m	

Tabla 11: Coordenadas de los puntos en los extremos del enlace Panasa – ISC.

El perfil de elevación en la Figura 3.9 destaca que existe una diferencia de un metro en el punto más bajo casi en la mitad del trayecto, lo que no supone una consideración especial al momento de considerar el efecto del suelo en la onda, es decir se tiene una línea de vista LoS en todo el trayecto.



Figura 3.9: Perfil de elevación de enlace Panasa – ISC [32].

El diagrama de rayos del perfil del enlace en la Figura 3.10 muestra las dos antenas alineadas a una altura de 15 metros con respecto al terreno.

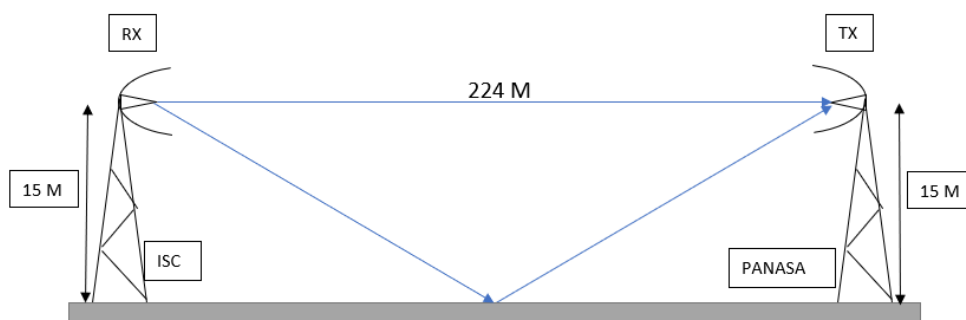


Figura 3.10: Diagrama de rayos del enlace Panasa – ISC.

El enlace Panasa – Bomba 2 se define los puntos B0 y B1, siendo B0 el punto en Panasa y B1 en Bomba 2, se puede observar los puntos sobre el mapa en la Figura 3.11.



Figura 3.11: Enlace Panasa – Bomba 2 en Marcelino Maridueña [32].

La Tabla 12 muestra las coordenadas de los puntos B0 y B1 y la separación entre ellos de 396 metros.

Enlace Panasa – Bomba 2		
	Punto B0 (Panasa)	Punto B1 (ISC)
Latitud	2°12'35.94"S	2°12'48.13"S
Longitud	79°26'10.60"W	79°26'14.68"W
Distancia entre B0 y B1	396 m	

Tabla 12: Coordenadas de los puntos en los extremos del enlace.

El perfil de elevación de este enlace se muestra en la Figura 3.12 y se observa una elevación máxima en la mitad de la trayectoria de 4 metros lo que podría suponer una reflexión y se tendrá que tener en cuenta al momento de analizar las mediciones en este punto.



Figura 3.12: Perfil de elevación del enlace Panasa – Bomba 2 [32].

El diagrama de rayos se muestra las antenas alineadas a una altura de 13 metros con respecto al suelo según la Figura 3.13.

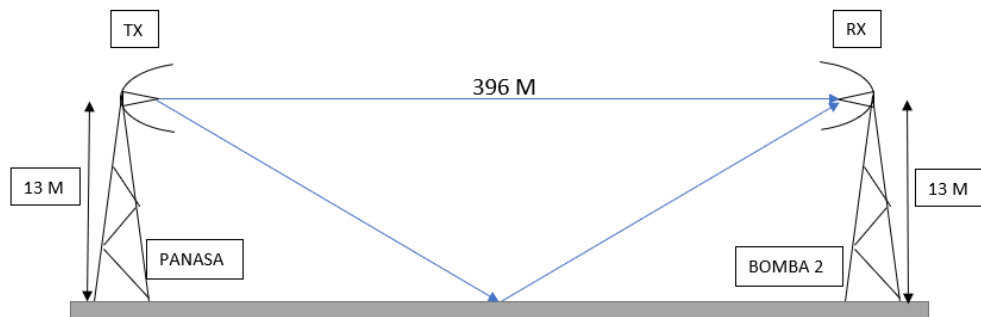


Figura 3.13: Diagrama de rayo del enlace Panasa – Bomba 2.

La Tabla 13 resume los datos de cada enlace, estos datos son los que se utilizan para evaluar sobre los modelos de propagación conocidos.

	PANASA - ISC	PANASA – BOMBA 2
Distancia [m]	224	396
Frecuencia [Mhz]	5180	5190
Potencia [dBm]	15	15
Ganancia antena TX [dBi]	3	3
Ganancia antena Rx [dBi]	3	3
Ancho de banda [Mbps]	150	100

Tabla 13: Resumen de datos de los enlaces medidos.

3.2. Mediciones enlace PANASA – ISC



Figura 3.14: Vista aérea del enlace Panasa - ISC.

Las mediciones sobre este enlace se las realizaron sobrevolando en línea recta sobre los puntos de medición a la altura del enlace.

3.2.1. Puntos de medición

Las coordenadas de los puntos de medición sobre el enlace Panasa – ISC se presentan en la Tabla 14.

	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA a A0
PTO1	2°12'35.30"S	79°26'10.51"W	18.29
PTO2	2°12'34.77"S	79°26'10.30"W	36.88
PTO3	2°12'34.07"S	79°26'10.00"W	62.21
PTO4	2°12'33.31"S	79°26'9.68"W	89.48
PTO5	2°12'32.46"S	79°26'9.33"W	119.35
PTO6	2°12'31.74"S	79°26'9.06"W	144.9
PTO7	2°12'30.99"S	79°26'8.72"W	170.48
PTO8	2°12'30.23"S	79°26'8.42"W	195.75

Tabla 14: Coordenadas de los puntos de medición enlace Panasa – ISC.

La Figura 3.15 muestra las coordenadas donde el dron toma las mediciones, podemos notar en el punto 3 y 4 que tenemos un tanque metálico de 10 metros de altura, esto indica un punto de reflexión que afectara la medición en ese punto.



Figura 3.15: Puntos de medición del enlace Panasa – ISC sobre mapa [32].

Se observa en el punto 4 la avenida principal del cantón Marcelino Maridueña, esta avenida establece la separación entre ISC y Panasa.

3.2.2. Resultados de mediciones

Los resultados de las mediciones de todos los puntos se presentan en la Tabla 15. El promedio de las mediciones se muestra en la última fila y es el que se usará para desarrollar el modelo y para el análisis posterior.

	PTO1	PTO2	PTO3	PTO4	PTO5	PTO6	PTO7	PTO8
M1	-50.1	-66.0	-71.1	-73.7	-74.0	-73.9	-79.6	-78.8
M2	-54.1	-60.0	-62.1	-76.1	-66.1	-72.0	-72.1	-74.5
M3	-52.0	-65.7	-68.1	-73.1	-72.0	-72.2	-73.7	-78.5
M4	-53.3	-63.9	-68.8	-74.3	-68.2	-72.9	-77.7	-78.8
M5	-50.6	-60.2	-68.6	-74.1	-71.4	-73.9	-73.9	-76.9
M6	-52.1	-63.0	-66.6	-74.9	-70.1	-73.0	-75.9	-76.7
M7	-53.2	-61.6	-65.2	-74.7	-72.9	-73.5	-77.6	-78.2
M8	-53.6	-63.3	-71.7	-76.0	-71.5	-72.8	-75.4	-78.5
PROMEDIO	-52.4	-62.9	-67.7	-74.6	-70.8	-73.0	-75.7	-77.6

Tabla 15: Valores de las mediciones sobre los puntos de la tabla 6.

En la gráfica de la Figura 3.16 se observa las curvas de cada una de las mediciones, junto con el promedio de todas con el nombre de Avg. Panasa ISC.

Como se esperaba, las curvas muestran una tendencia decreciente. Sin embargo, se observa un pico de potencia entre 90 y 120 metros, el cual corresponde al punto 4 y 5 en la avenida principal y al inicio de las edificaciones del ISC. Este valle está generando un punto de reflexión aditiva lo que se observa como un punto de mayor potencia en la gráfica.

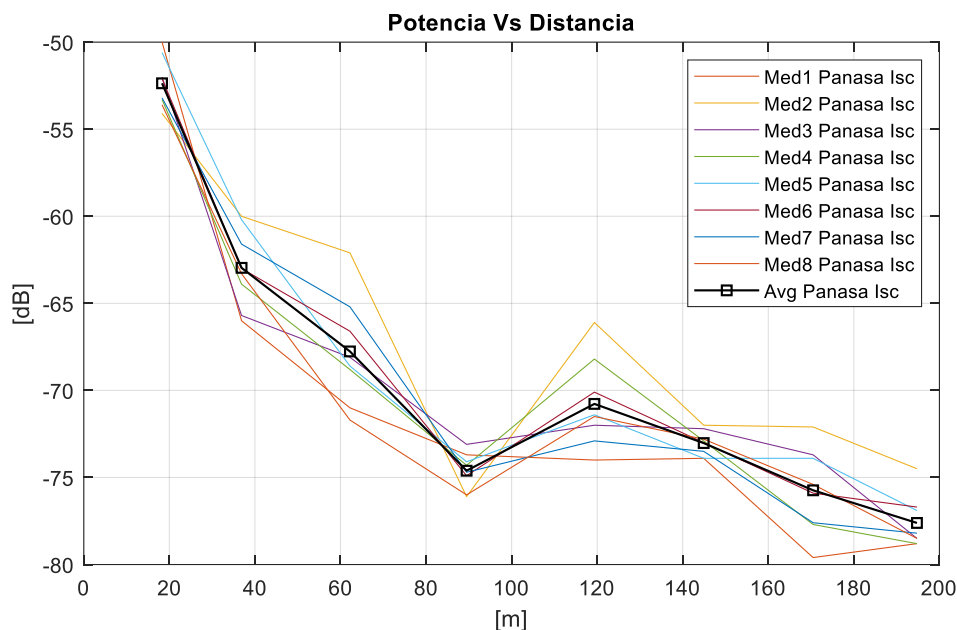


Figura 3.16: Curvas de mediciones del enlace Panasa – ISC.

3.2.3. Análisis de las mediciones

Para el análisis de las mediciones, se establecen comparativas con los tres modelos de propagación de espacio libre en áreas industriales seleccionados en el capítulo dos. En la Tabla 16 se muestran estos tres modelos junto con sus parámetros.

	α	β	A
Friis Eq.	2	2	0
Modelo A.	1.99	2	0.01
Modelo R.	1.86	1.82	-5.03

Tabla 16: Parámetros de los modelos de propagación en áreas industriales de la Tabla 4.

En la Tabla 16 se muestran los parámetros α , β , y A para cada uno de estos modelos, estos parámetros se usarán para sustituir en la ecuación (2.5), y se ha definido la distancia de referencia d_0 a 1 metro de la antena emisora.

$$\overline{PL}(d, f) = 10\beta \log_{10}(f) + 10\alpha \log_{10}(d_0) + A + 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 + 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.5)$$

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - \overline{PL}(d, f) \quad (2.6)$$

Los datos de este enlace, Panasa – ISC, por evaluar en la ecuación (2.6) son los presentados en la Tabla 17.

Parámetro	Valor	Unidad
Pt	15	dBm
Gtx	3	dB
Grx	3	dB
FREC.	5190	MHz

Tabla 17: Datos del enlace Panasa – ISC.

La variable d es la distancia desde el punto A0 hasta cada punto de medición, estas distancias corresponden a la última columna de la Tabla 14. Para cada distancia d corresponde una potencia P_{rx} .

Distancia (m)	Friis Eq.	Modelo A.	Modelo R.
18.29	-50.97	-50.85	-26.68
36.88	-57.06	-56.91	-32.35
62.21	-61.60	-61.43	-36.57
89.48	-64.76	-64.57	-39.51
119.35	-67.26	-67.06	-41.84
144.9	-68.94	-68.74	-43.40
170.48	-70.36	-70.14	-44.72
195.75	-71.51	-71.29	-45.79

Tabla 18: Potencias recibidas a diferentes distancias según el modelo de propagación, enlace Panasa - ISC.

La Figura 3.17 muestra los resultados de los tres modelos de la Tabla 18 juntos con el promedio de las mediciones para poder comparar y analizar los resultados obtenidos.

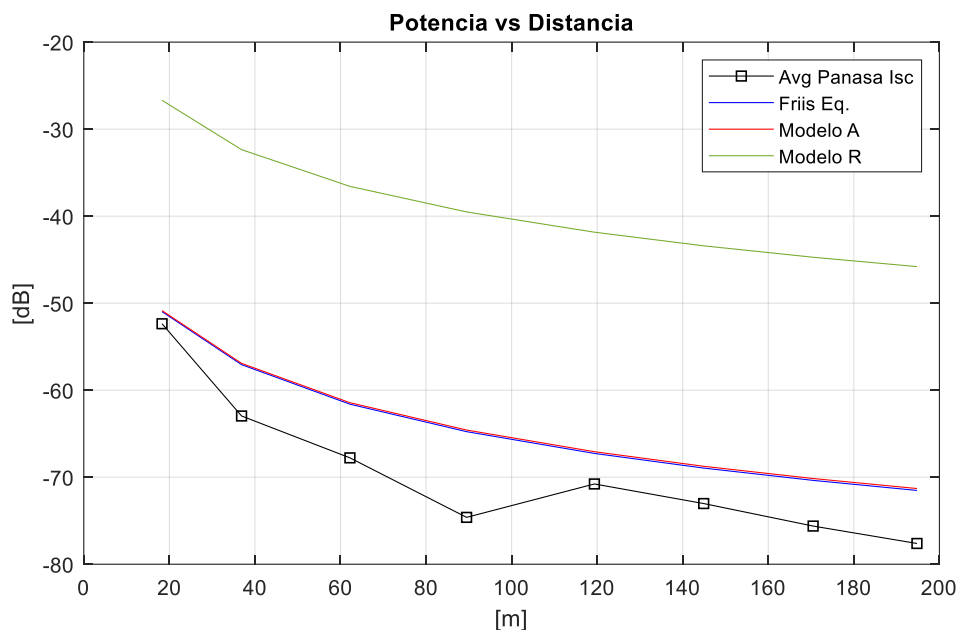


Figura 3.17: Curvas de potencia para los diferentes modelos de propagación junto con curva del promedio de las mediciones del enlace Panasa – ISC.

Se puede notar que el promedio de las mediciones tiene un comportamiento similar a las de los modelos de propagación en el espacio libre, pero el modelo R se aleja con respecto a los demás. La Tabla 19 muestra los valores RMSE de los 3 modelos con respecto al promedio de las mediciones.

	Friis Eq.	Modelo A	Modelo R
RMSE	5.76	5.93	30.58

Tabla 19: Valores RMSE de los diferentes modelos de propagación con respecto al promedio de las mediciones del enlace Panasa – ISC.

Según los valores RMSE, el modelo A y el modelo Friis Eq. muestra una desviación de 5 dB con respecto al promedio de las mediciones y el modelo R una desviación de 30 dB, lo que nos permite descartarlo para nuestro análisis y comparativa con el modelo a desarrollar.

3.3. Mediciones enlace PANASA – BOMBA 2



Figura 3.18: Vista aérea del enlace Panasa – Bomba 2.

Las Mediciones de este enlace se las realizaron en días diferentes con respecto a las mediciones del enlace Panasa – ISC, pero siguiendo la misma metodología. El dron se lo sobrevoló sobre cada punto de medición y se tomó la lectura de la potencia recibida.

3.3.1. Puntos de medición

A continuación, la Tabla 20 presenta las coordenadas de los puntos de medición y la distancia que cada punto tiene con respecto a la antena transmisora o emisora.

	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA a B0
PTO1	2°12'36.82"S	79°26'11.13"W	23.00
PTO2	2°12'38.07"S	79°26'11.55"W	72.00
PTO3	2°12'39.06"S	79°26'11.89"W	92.00
PTO4	2°12'40.59"S	79°26'12.42"W	154.00
PTO5	2°12'42.09"S	79°26'12.89"W	203.00
PTO6	2°12'43.49"S	79°26'13.41"W	248.00
PTO7	2°12'45.12"S	79°26'13.98"W	301.00
PTO8	2°12'46.93"S	79°26'14.56"W	359.00

Tabla 20: Coordenadas de los puntos de medición enlace Panasa – Bomba 2.

La Figura 3.19 muestra los puntos de medición sobre el mapa, podemos observar que el enlace atraviesa toda la planta industrial pasando incluso por el almacén de pacas de cartón reciclado. Este escenario corresponde con el modelo A.



Figura 3.19: Puntos de medición del enlace Panasa – Bomba 2 sobre mapa [32].

3.3.2. Resultados de mediciones

La Tabla 21 presenta las mediciones realizadas con el dron, cada una de ellas en diferentes días, pero manteniendo las misma coordenadas o puntos. El promedio de todas las mediciones es mostrado en la última fila, y son los valores con los que se desarrolla el modelo de propagación.

	PTO1	PTO2	PTO3	PTO4	PTO5	PTO6	PTO7	PTO8
M1	-56.1	-68.2	-66.3	-74.1	-76.2	-77.2	-76.3	-79.5
M2	-59.6	-72.7	-69.5	-73.5	-74.1	-76.7	-78.2	-79.0
M3	-56.5	-67.9	-68.9	-73.4	-74.2	-77.5	-76.8	-79.7
M4	-59.6	-72.8	-69.7	-72.7	-75.6	-77.5	-78.1	-78.6
M5	-58.5	-72.7	-68.2	-73.3	-75.4	-76.2	-77.9	-80.2
M6	-56.3	-69.9	-65.1	-72.3	-74.6	-76.9	-76.4	-78.7
M7	-57.1	-71.8	-69.2	-73.4	-75.9	-76.8	-78.2	-79.5
M8	-58.1	-67.1	-69.6	-72.1	-74.1	-77.2	-77.4	-81.1
PROMEDIO	-57.7	-70.38	-68.3	-73.1	-75.0	-77.0	-77.41	-79.53

Tabla 21: Valores de las mediciones sobre los puntos de la tabla 11.

La Figura 3.20 muestra los resultados de la Tabla 21 y se observa una tendencia decreciente esperada. También se observa un pico en 90 metros, lo que corresponde al punto 3 justo en el centro del almacén de pacas de cartón. Este punto tiene una altura de 7 metros y está generando reflexión aditiva y una desviación de 4 dB con respecto a la tendencia de los demás puntos.

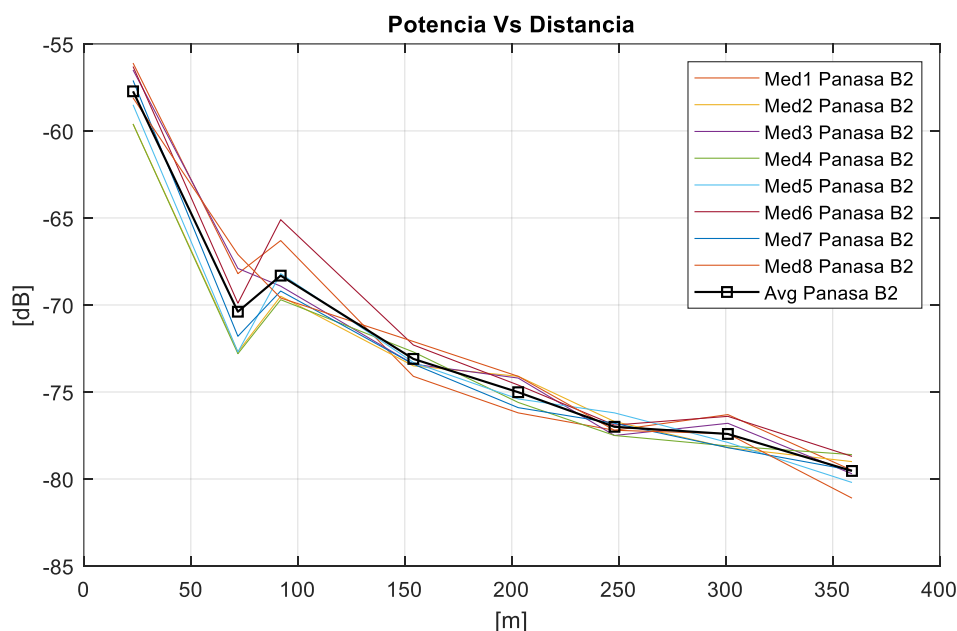


Figura 3.20: Curvas de mediciones del enlace Panasa – Bomba 2.

3.3.3. Análisis de las mediciones

Para el análisis de este enlace, se usará los mismos modelos de propagación de la Tabla 16 en la ecuación (2.5) de propagación en el espacio libre con una distancia de referencia d_0 de 1 metro.

$$\overline{PL}(d, f) = 10\beta \log_{10}(f) + 10\alpha \log_{10}(d_0) + A + 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 + 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.5)$$

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - \overline{PL}(d, f) \quad (2.6)$$

Los datos por evaluar propios de este enlace en la ecuación (2.6) se muestran en la Tabla 22.

Parámetro	Valor	Unidad
Pt	15	dBm
Gtx	3	dB
Grx	3	dB
FREC.	5180	MHz

Tabla 22: Datos del enlace Panasa – Bomba 2.

La variable d es la distancia desde el punto A0 hasta cada punto de medición, estas distancias corresponden a la última columna de la Tabla 20. Para cada distancia d corresponde un valor de potencia recibida Prx.

Distancia (m)	Friis Eq.	Modelo A.	Modelo R.
23.00	-52.97	-52.85	-28.55
72.00	-62.89	-62.71	-37.77
92.00	-65.02	-64.83	-39.75
154.00	-69.49	-69.28	-43.91
203.00	-71.89	-71.67	-46.14
248.00	-73.63	-73.40	-47.76
301.00	-75.31	-75.07	-49.32
359.00	-76.84	-76.60	-50.75

Tabla 23: Potencias recibidas a diferentes distancias según el modelo de propagación, enlace Panasa – Bomba 2.

La Figura 3.21 muestra las curvas de los tres modelos de la Tabla 23 para establecer comparaciones con la curva del promedio de las mediciones de este enlace.

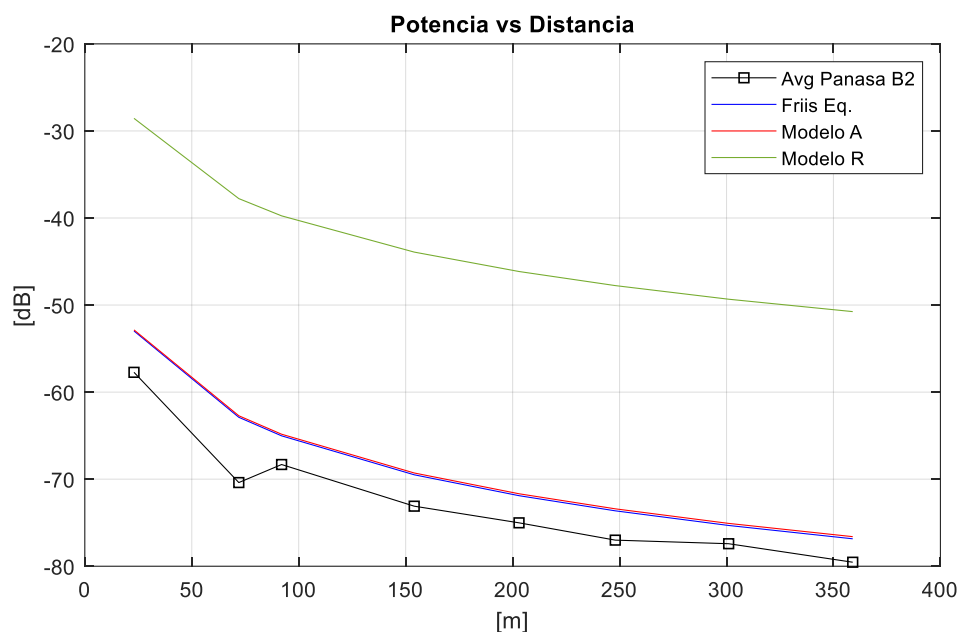


Figura 3.21: Curvas de potencia para los diferentes modelos de propagación junto con curva del promedio de las mediciones del enlace Panasa – Bomba 2.

Se observa que los modelos tienen una tendencia similar al promedio de las mediciones como en el caso del enlace Panasa – ISC, y que el modelo A y Friis son los más cercanos al comportamiento del enlace Panasa – Bomba 2. La Tabla 24 muestra los valores RMSE de los tres modelos con respecto al promedio de las mediciones. Se observa una desviación aproximada de 4 dB del modelo Friis y A, el modelo R se encuentra 30 dB desviado, por lo tanto, se descarta para el análisis y comparación futura.

	Friis Eq.	Modelo A	Modelo R
RMSE	4.11	4.29	29.34

Tabla 24: Valores RMSE de los diferentes modelos de propagación con respecto al promedio de las mediciones del enlace Panasa – Bomba 2.

CAPITULO 4

4. DESARROLLO DE UN MODELO DE PROPAGACION SEMI-EMPIRICO PARA ÁREAS INDUSTRIALES

4.1. Desarrollo de modelo de propagación para áreas industriales.

Para el desarrollo del modelo de propagación, se usa la herramienta de pago de Matlab *Curve Fitting Toolbox* [6] para generar los parámetros de ajustes a la ecuación de propagación de espacio libre mediante regresión lineal a partir de las mediciones.

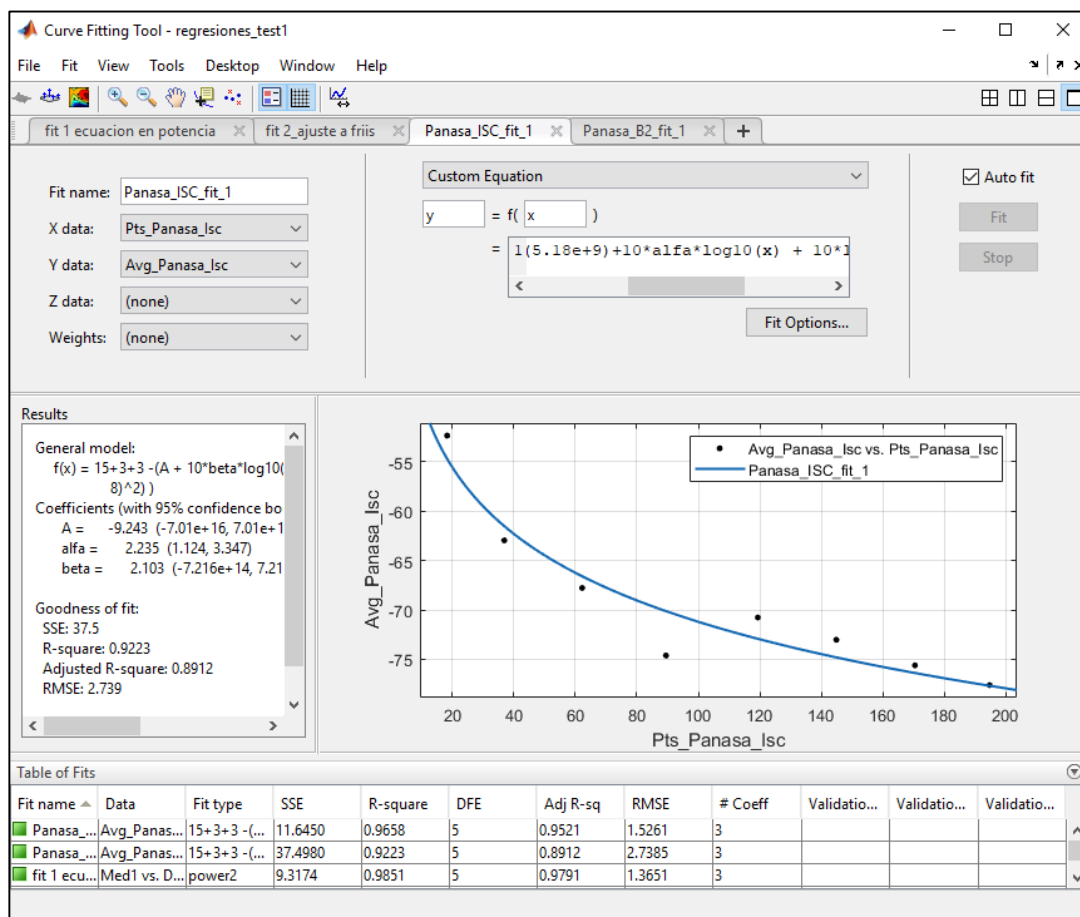


Figura 4.1: Ambiente de trabajo de la herramienta Curve Fitting Toolbox.

Curve Fitting Toolbox permite hacer regresiones lineales de funciones conocidas y de ecuaciones personalizadas, para este caso se usa la ecuación (2.5) y (2.6) como ecuaciones personalizadas, la Figura 4.1 muestra el ambiente de trabajo de la herramienta y se observa en la parte derecha la ventana de resultados donde muestra los valores ajustados de los parámetros de la ecuación.

Esta ventana de resultados también provee información sobre la calidad del ajuste, como el RMSE o la bondad del ajuste, para este trabajo se usará RMSE como criterio para determinar el mejor ajuste.

La Figura 4.2 muestra la ecuación de propagación de espacio libre como ecuación personalizada para realizar la regresión lineal con alfa, beta y A como las variables a ajustar.

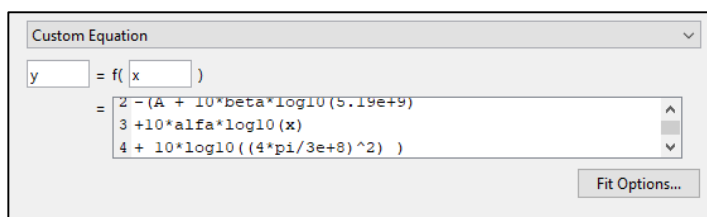


Figura 4.2: Ecuación de propagación de espacio libre en Curve Fitting Toolbox.

Las variables independientes X y Y corresponden a la distancia de cada uno de los puntos de medición y a la medición de potencia recibida en cada punto respectivamente. Para cada enlace se usará el promedio de las mediciones como variable Y.

4.1.1. Regresión enlace PANASA – ISC.

Usando el promedio de las mediciones del enlace Panasa - ISC y la ecuación de propagación en el espacio libre (2.5) y (2.6) con los parámetros α , β y A, como los factores que ajustan la ecuación a las mediciones, se obtiene los resultados de la Figura 4.3.

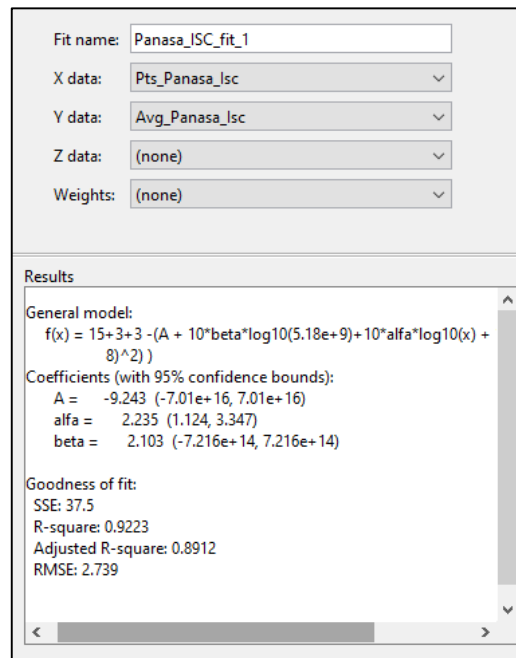


Figura 4.3: Resultados de la regresión del enlace Panasa – ISC.

La Tabla 25 resume los resultados de la Figura 4.3.

	α	β	A	RMSE
Modelo Panasa - ISC	2.235	2.103	-9.243	2.739

Tabla 25: Resultados de la regresión del enlace Panasa – ISC.

Los parámetros resultantes de la regresión lineal muestran un RMSE de 2.74 dB, esto da una aproximación mejor al del modelo de Friis y al modelo A.

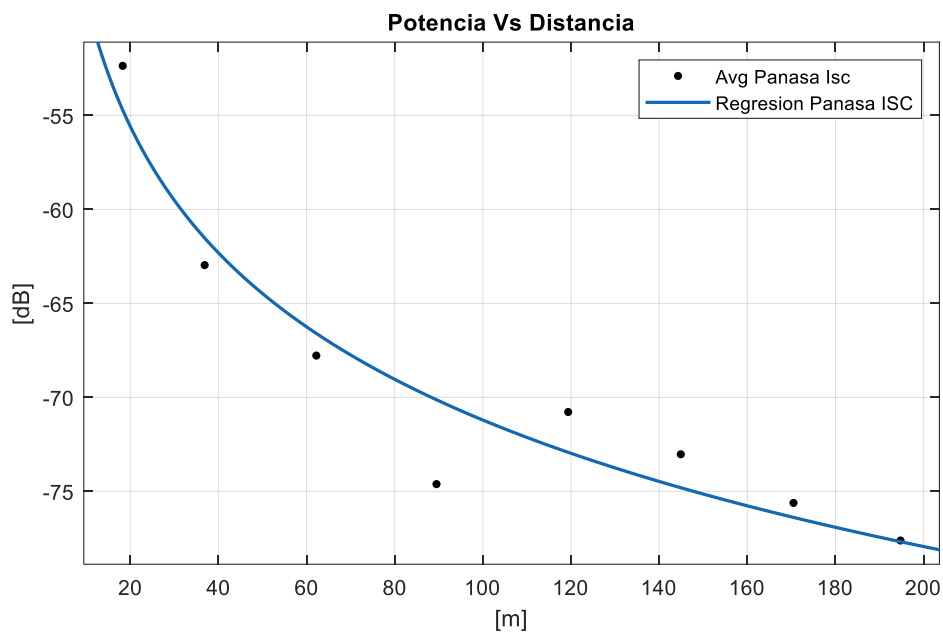


Figura 4.4: Curva de regresión del enlace Panasa – ISC.

Se observa en la Figura 4.4 que la curva de regresión pasa de manera simétrica por los puntos a 90 y 120 metros, este efecto, dado las condiciones del terreno del enlace, aumenta el RMSE a 2.74 dB.

Los resultados de la regresión en la Tabla 25 se lo denominará modelo Panasa – ISC.

4.1.2. Regresión enlace PANASA – BOMBA 2.

Con los datos de las mediciones de este enlace, se procede a aplicar la regresión lineal sobre la ecuación de propagación en el espacio libre, obteniendo los resultados de la Figura 4.5.

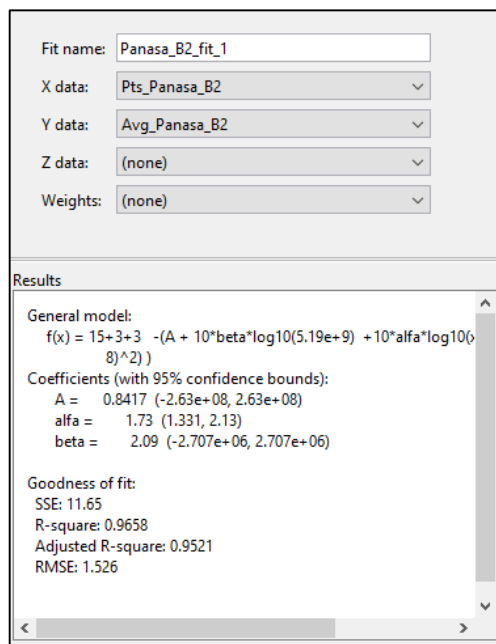


Figura 4.5: Resultados de la regresión del enlace Panasa – Bomba 2.

La Tabla 26 resume los resultados obtenidos en la Figura 4.5.

	α	β	A	RMSE
Modelo Panasa – Bomba 2	1.73	2.09	0.8417	1.526

Tabla 26: Resultados de la regresión del enlace Panasa – Bomba 2.

Los parámetros resultantes tienen un RMSE de 1.5 dB de desviación, muestra un mejor desempeño que la regresión del enlace Panasa – ISC.

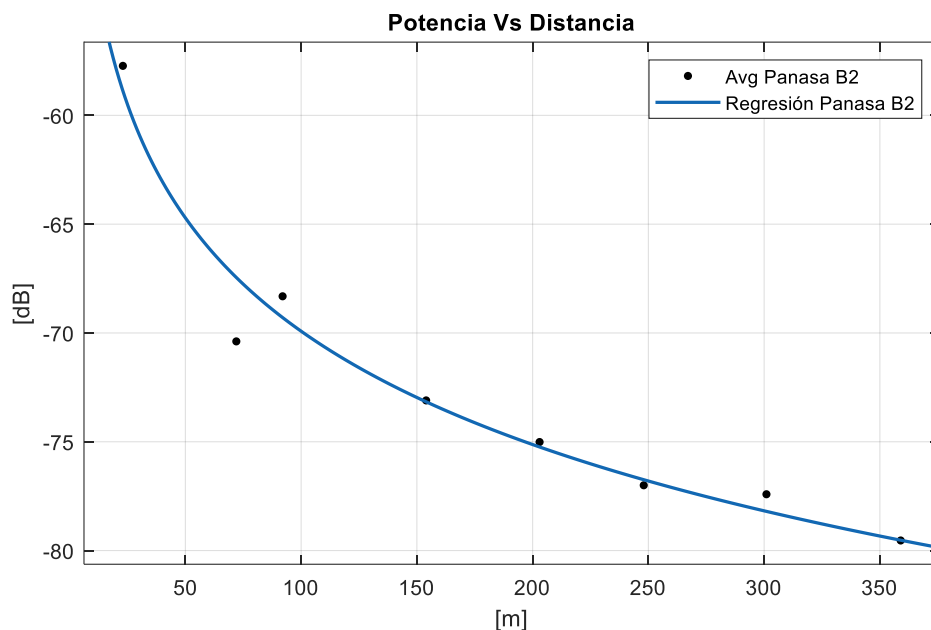


Figura 4.6: Curva de regresión del enlace Panasa – Bomba 2.

La Figura 4.6 muestra una mejor aproximación de la regresión a las mediciones que la regresión del enlace Panasa – ISC. En la Tabla 26 se observa un RMSE de 1.5 dB de desviación, esto es cerca de la mitad de la desviación del enlace Panasa - ISC.

Los resultados de la regresión en la Tabla 26 se lo denominará modelo Panasa – Bomba 2.

4.2. Validación de los modelos de propagación desarrollados.

Para realizar la validación de los dos modelos desarrollados, se realiza una evaluación cruzada, es decir el modelo obtenido del enlace Panasa – ISC se usará para estimar el enlace Panasa – Bomba 2 y comparar con sus mediciones, y el modelo obtenido del enlace Panasa – Bomba 2 se usará para estimar el enlace Panasa – ISC y comparar con las mediciones del enlace Panasa – ISC.

4.2.1. Validación de modelo Panasa – ISC.

Usando el modelo Panasa – ISC se estima el enlace Panasa - Bomba 2 y se grafican los resultados junto con el promedio de las mediciones de ese enlace.

También se usa el modelo Panasa – Bomba 2 para estimar el enlace Panasa - Bomba 2 y hacer comparaciones.

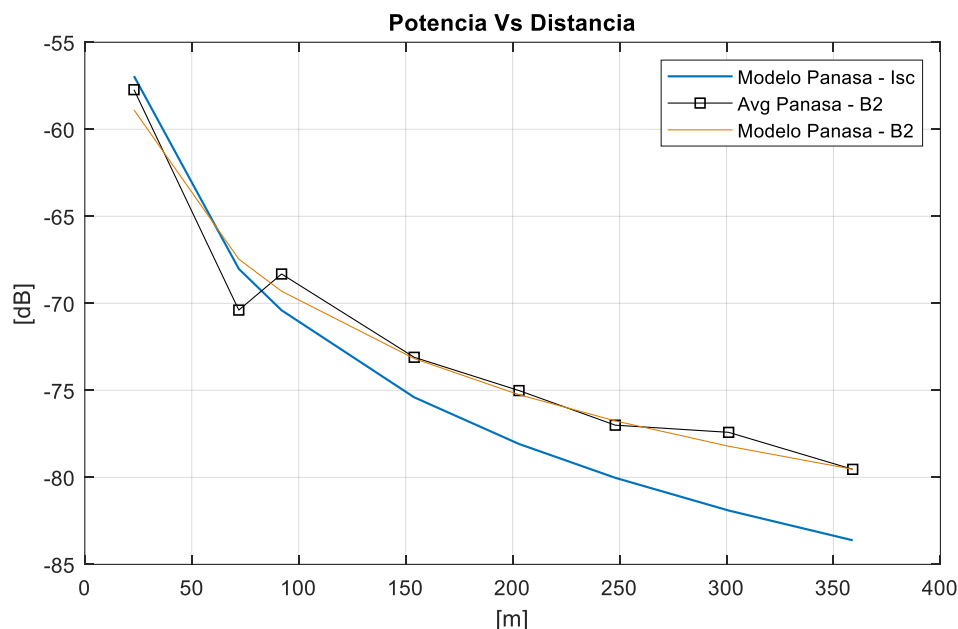


Figura 4.7: Comparación de curvas los modelos desarrollados y el promedio de las mediciones del enlace Panasa – Bomba 2.

Se puede notar en la Figura 4.7 que la curva del Modelo Panasa – ISC tiene una tendencia de alejarse del promedio de las mediciones, también se observa que la curva del Modelo Panasa – Bomba 2 se ajusta perfectamente a las mediciones, esto se debe a que este modelo es una regresión de las mismas mediciones.

Para determinar la desviación se calcula el RMSE de las estimaciones de los dos modelos junto con el RMSE del Modelo de Friis y el Modelo A calculado en la Tabla 24.

	Panasa-ISC	Panasa-Bomba2	Friis Eq.	Modelo A
RMSE	2.98	1.20	4.11	4.29

Tabla 27: Valores RMSE de los modelos desarrollados con respecto al promedio de las mediciones del enlace Panasa – Bomba 2.

Se observa en la Tabla 27 que el modelo Panasa – ISC tiene una desviación menor que el modelo de Friis y modelo A, pero el modelo Panasa - Bomba 2

tiene una desviación de alrededor 1.20 dB, mejorando aun el rendimiento de todos los demás modelos.

El modelo Panasa – Bomba 2 muestra una mejor aproximación y es el candidato a ser el modelo que cumpla con los objetivos de este trabajo.

4.2.2. Validación de modelo Panasa – Bomba 2

Se evalúa el modelo Panasa – Bomba 2 para estimar el enlace Panasa – ISC y graficar los resultados junto con el promedio de las mediciones de este enlace.

También se usará el modelo Panasa – ISC para estimar el mismo enlace Panasa – ISC y hacer comparativas.

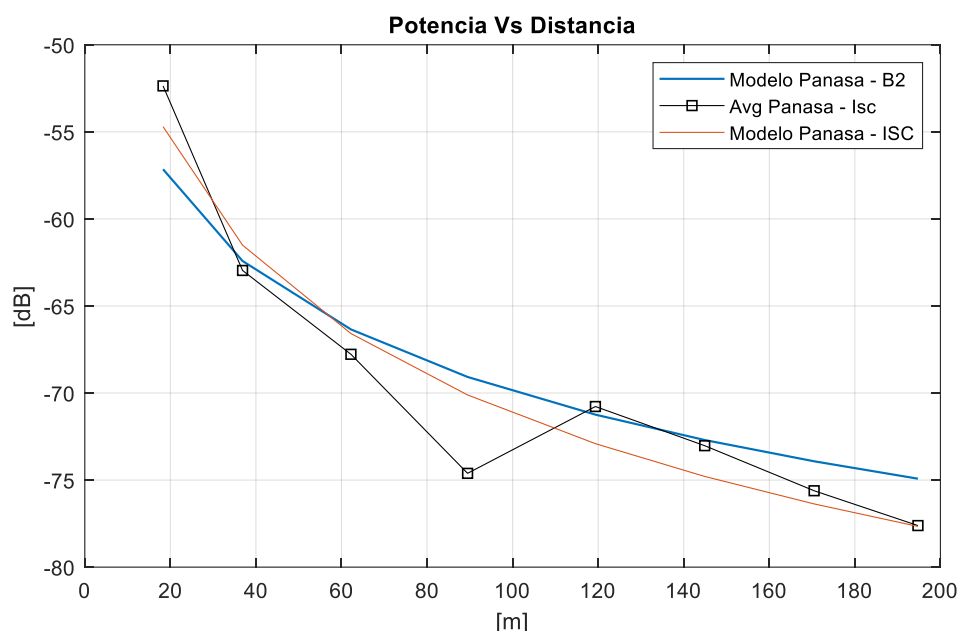


Figura 4.8: Comparación de curvas de los modelos desarrollados y el promedio de las mediciones del enlace Panasa – ISC.

Se puede observar en la Figura 4.8 que el modelo Panasa – Bomba 2 se ajusta al promedio de las mediciones al igual que el modelo Panasa – ISC. Sin embargo, se puede notar una tendencia un poco más ajustada a las mediciones por parte del modelo Panasa – ISC, esto se debe a que este modelo es una regresión de las mismas mediciones.

En la Tabla 28 se muestra los RMSE de cada uno de los modelos junto con los modelos de Friis y A de la Tabla 19.

	Panasa-Bomba2	Panasa-ISC	Friis Eq.	Modelo A
RMSE	2.87	2.16	5.76	5.93

Tabla 28: Valores RMSE de los modelos desarrollados con respecto al promedio de las mediciones del enlace Panasa – ISC.

Se puede notar un RMSE de 2.87 dB por parte del modelo Panasa – Bomba 2, mejorando el rendimiento del modelo Panasa – ISC en la evaluación cruzada. También se observa un mejor rendimiento comparado con Friis y Modelo A.

El rendimiento del Modelo Panasa – ISC es ligeramente mejor, siendo un modelo que es regresión de las mismas mediciones de este enlace, se esperaría una diferencia mayor como en la sección anterior.

4.3. Análisis de resultados obtenidos.

Según los datos obtenido y los valores de RMSE, el mejor modelo es el obtenido con la regresión del enlace de Panasa – Bomba 2, ya que al evaluarlo en el otro enlace sigue mostrando un mejor desempeño que el resto de los modelos.

Este modelo de Pérdida por trayectoria tiene un RMSE de 1.20 a 2.87 dB de desviación y mejora en un 33% al modelo para ambientes absorbentes de zonas industriales, Modelo A, y en un 30% al modelo de Friis Eq.

Este modelo da una muy buena aproximación de las mediciones obtenidas en los dos enlaces, y tanto para el modelo Panasa – ISC y Panasa – Bomba 2, tienen características de ambientes reflectivos según la comparación con el modelo para ambientes industriales absorbente de la revisión bibliográfica.

Para el cumplimiento de los objetivos y de la solución propuesta, se ha determinado al modelo Panasa - Bomba 2, como modelo de propagación para áreas industriales de tipo papelerero con características absorbentes.

El modelo Panasa – Bomba 2 puede ser expresado como la ecuación (4.1) y (4.2).

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - \overline{PL}(d, f) \quad (4.1)$$

$$\overline{PL}(d, f) = 10\beta \log_{10}(f) + 10\alpha \log_{10}(d_0) + A + 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 + 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (4.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d < 500 \\ 5.170GHz < f < 5.825GHz \\ \alpha = 1.73; \beta = 2.09; A = 0.8417 \end{array} \right.$$

Donde el rango de separación entre las antenas Tx y Rx sea menor a 500 m y la frecuencia se la banda de 5 GHz para WiFi con la altura de las antenas de aproximadamente 15 metros sobre la superficie del piso.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo tiene como objetivo principal el desarrollo de un modelo de Path Loss promedio o función que describa el comportamiento de la potencia de la señal RF debido a la pérdida por trayecto a lo largo de un enlace en áreas industriales usando técnicas de regresión lineal a partir de mediciones de dos enlaces RF, los resultados obtenidos nos permiten concluir que:

Los modelos de propagación PtP estudiados en este trabajo, usan la ecuación de propagación de espacio libre como base y las variables α , β y A como las constantes que caracterizan el modelo de propagación de su ambiente o aplicación. Esta forma de desarrollar un modelo de propagación semi-empírico, es la más usada según la revisión bibliográfica realizada, y es la metodología usada en este trabajo de titulación para el desarrollo del modelo de propagación.

La cantidad de puntos de medición para hacer una regresión debe ser representativa a las dimensiones del enlace, es decir tener una muestra que caracterice el comportamiento del enlace, para este caso se estableció una muestra de 8 puntos separados de manera aproximadamente simétrica ya que se observó gráficamente que con 8 puntos se obtenía una curva que se aproximaba a la curva teórica de la ecuación de Friis, lo que permitió establecer que 8 puntos caracterizaban el comportamiento del enlace, tomando una muestra cada 25 metros en el caso del enlace Panasa – ISC y una muestra cada 50 metros en el enlace Panasa – Bomba 2.

Las mediciones en zonas industriales en la banda de 5 GHz siguen un comportamiento aproximado a la ecuación de Friis, siendo esta una herramienta útil a la hora de usar una estimación que no requiera precisión.

Las Mediciones del enlace Panasa – ISC muestra gráficamente una dispersión mayor entre las mediciones con respecto al enlace Panasa – Bomba 2, esto supone que hubo una mayor afectación del canal de Panasa – ISC. El perfil del terreno de este enlace tiene más características reflectivas que absorbente por lo que se observa efectos de multi trayectoria en la mitad del enlace.

En las mediciones del enlace Panasa – Bomba 2 graficadas en la Figura 3.20 se observa un punto con un pico de potencia aproximadamente a 100 metros de la antena emisora, esto supone un punto de reflexión aditivo del efecto suelo. Estos puntos dependen mucho del perfil del terreno y para el caso industrial de la infraestructura física que este debajo del enlace, sin embargo, este enlace presenta más características de ambiente absorbentes que reflectivo por el poco efecto suelo. Para el análisis de los modelos de propagación de la literatura comparado con las mediciones obtenidas de los enlaces se usó el RMSE y las curvas graficadas, esto permitió seleccionar al Modelo A y Friis como los más cercanos a las mediciones y con los que compete el modelo desarrollado en este trabajo.

Los resultados de la regresión tienen asociado el parámetro RMSE que permite evaluar la calidad de la regresión, para el caso del enlace Panasa – ISC se observó un RMSE más elevado con respecto al enlace Panasa – Bomba 2, esto se debió a la mayor dispersión de las mediciones en el enlace Panasa – ISC, pero manteniendo una desviación menor con respecto a los otros dos modelos de la bibliografía con los que usamos para la comparación.

La evaluación cruzada, que consiste en evaluar el modelo desarrollado a partir del enlace Panasa – ISC, para estimar el enlace Panasa – Bomba 2, y viceversa, mostro que el modelo Panasa – Bomba 2 es el que más se acerca a las mediciones de cualquiera de los dos enlaces. Este modelo es el que tiene en promedio un RMSE de 2 dB de desviación, mejorando a los modelos de la literatura y al teórico modelo de Friis con 5 y 4 dB de desviación respectivamente.

Es recomendable complementar el presente trabajo con mediciones perpendiculares a los enlaces medidos, y usar mediciones variando la altura de las antenas para determinar el efecto que tienen estas variantes en los modelos de propagación desarrollado.

El presente trabajo sirve de base para establecer un procedimiento a seguir para realizar la caracterización de un canal de propagación, este procedimiento es: medición, regresión y validación.

El modelo de propagación Path Loss promedio obtenido es de utilidad para estimar el comportamiento de potencia a lo largo de un enlace de tipo PtP en áreas

industriales de tipo papelerero con antenas a una altura de 15 metros y en la banda de 5 GHz.

Se recomienda usar la misma metodología de este trabajo para generar modelos de propagación dentro de plantas industriales en la banda de 2.4 y 5 GHz para la estimación y dimensionamiento de soluciones de tipo IIoT (Industrial Internet Of Things).

Otra forma de analizar el comportamiento de la propagación de la onda es modelar el ruido del área donde se propaga, por esta razón se recomienda hacer mediciones del ruido y en diferentes zonas industriales del país y modelar el comportamiento y establecer en que banda de frecuencias tiene más afectación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Cheffena, "Industrial wireless sensor networks: channel modeling and performance evaluation," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2012, no. 1, Dic. 2012.
- [2] A. Morant, "¿Cuáles serán las TENDENCIAS de la INDUSTRIA 4.0 en 2018?," *Alfonso Morant*, 21-Dec-2017.
- [3] "La cuarta revolución industrial es digital," *El Universo*, 19-Mar-2018. [Online]. Available: <https://www.eluniverso.com/tendencias/2018/03/19/nota/6675070/cuarta-revolucion-industrial-es-digital>.
- [4] "RECOMENDACIÓN UIT-R P.372-13 – Ruido radioeléctrico" p. 80.
- [5] "Recomendación UIT-R P.525-3 – Cálculo de la atenuación en el espacio libre" p. 6.
- [6] "Curve Fitting Toolbox." [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/curvefitting.html>.
- [7] "IEEE Std 802.11™-2016, IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control," p. 3534, 2016.
- [8] "IEEE 802.11a: Radio-Electronics.Com." [Online]. Available: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11a.php>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [9] "IEEE 802.11b: Radio-Electronics.Com." [Online]. Available: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11b.php>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [10] "IEEE 802.11g | Wi-Fi WLAN | Tutorial - Radio-Electronics.Com." [Online]. Available: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11g.php>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [11] "IEEE 802.11n Standard | Wi-Fi WLAN | Radio-Electronics.com." [Online]. Available: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11n.php>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [12] "IEEE 802.11ac | VHT Gigabit Wi-Fi | Radio-Electronics.com." [Online]. Available: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11ac-gigabit.php>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [13] K. K. Leung, B. McNair, L. J. Cimini, and J. H. Winters, "Outdoor IEEE 802.11 cellular networks: MAC protocol design and performance," in *2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. No.02CH37333)*, New York, NY, USA, 2002, pp. 595–599.
- [14] U. I. de T. (UIT), *Reglamento de Radiocomunicaciones. Volumen 4*. Ginebra: Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012.
- [15] CONATEL, "Resolución-Tel-560-18-Conatel-2010." Sep-2010.
- [16] P. B. D. Fernando, "Diseño de una red WiFi de largo alcance, a través del espectro no licenciado, para permitir el acceso al servicio de internet de banda ancha, en los sectores más poblados de la zona rural del cantón Junín," p. 233.
- [17] ARCOTEL, "Boletín estadístico del sector de telecomunicaciones #6." 2015.
- [18] J. S. Seybold, *Introduction to RF propagation*. Hoboken, N.J: Wiley, 2005.

- [19] F. J. Blatt and V. G. Pozo, *Fundamentos de física*. Prentice-Hall Hispanoamericana, 1991.
- [20] “¿Cómo funciona la ionósfera en la transferencia de ondas de radio?,” *Comunicación por la ionósfera*, 11-Jul-2014.
- [21] “Recomendación UIT-R P.676-11 (09/2016) – Atenuación debida a los gases atmosféricos,” p. 26.
- [22] J. FERRER, “Channel Characterization and Wireless Communication Performance in Industrial Environments,” Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm, Sweden, 2014.
- [23] J. L. B. Sanmartín and M. S. Castañer, “RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN,” p. 15.
- [24] J. B. Andersen, T. S. Rappaport, and S. Yoshida, “Propagation measurements and models for wireless communications channels,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 33, no. 1, pp. 42–49, Jan. 1995.
- [25] Y. Singh, “Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 59, no. 11, pp. 37–41, Dec. 2012.
- [26] S. Kasampalis, P. I. Lazaridis, Z. D. Zaharis, A. Bizopoulos, and J. Cosmas, “Comparison of Longley-Rice, ITM and ITWOM propagation models for DTV and FM Broadcasting,” p. 7.
- [27] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: principles and practice*. New York, NY: IEEE Press [u.a.], 1996.
- [28] Zhenyu Wang, E. K. Tameh, and A. R. Nix, “Statistical peer-to-peer channel models for outdoor urban environments at 2GHz and 5GHz,” in *IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004*, Los Angeles, CA, USA, 2004, vol. 7, pp. 5101–5105.
- [29] Xiongwen Zhao, J. Kivinen, P. Vainikainen, and K. Skog, “Propagation characteristics for wideband outdoor mobile communications at 5.3 GHz,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 507–514, Apr. 2002.
- [30] “LiteBeam 5GHz, airMAX Technology Solutions.” UBIQUITI NETWORKS, 2018.
- [31] “NanoStation M, NanoStation LocoM.” UBIQUITI NETWORKS, 2014.
- [32] “Google Earth.” [Online]. Available: <https://earth.google.com/web/>.

Función de regresión para los cálculos de los parámetros A, alfa, beta a partir de las mediciones de los enlaces Panasa – ISC y Panasa – Bomba 2.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [fitresult, gof] = createFits(Dist1, Med1, Pts_Panasa_Isc,
Avg_Panasa_Isc, Pts_Panasa_B2, Avg_Panasa_B2)
%CREATEFITS (DIST1,MED1,PTS_PANASA_ISC,AVG_PANASA_ISC,PTS_PANASA_B2,AVG_PANASA_B2)
% Create fits.
%
% Data for 'Panasa_ISC_fit_1' fit:
%   X Input : Pts_Panasa_Isc
%   Y Output: Avg_Panasa_Isc
% Data for 'Panasa_B2_fit_1' fit:
%   X Input : Pts_Panasa_B2
%   Y Output: Avg_Panasa_B2
% Output:
%   fitresult : a cell-array of fit objects representing the
%   fits.
%   gof : structure array with goodness-of fit info.
%
% See also FIT, CFIT, SFIT.

% Auto-generated by MATLAB on 17-Aug-2018 23:03:38

%% Initialization.

% Initialize arrays to store fits and goodness-of-fit.
fitresult = cell( 4, 1 );
gof = struct( 'sse', cell( 4, 1 ), ...
    'rsquare', [], 'dfe', [], 'adjrsquare', [], 'rmse', [] );

%% Fit: 'Panasa_ISC_fit_1'.
[xData, yData] = prepareCurveData( Pts_Panasa_Isc, Avg_Panasa_Isc );

% Set up fittype and options.
ft = fittype( '15+3+3 -(A + 10*beta*log10(5.18e+9)+10*alfa*log10(x)
+ 10*log10((4*pi/3e+8)^2) )', 'independent', 'x', 'dependent', 'y'
);
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
opts.Display = 'Off';
opts.StartPoint = [0.171186687811562 0.706046088019609
0.0318328463774207];

% Fit model to data.
[fitresult{3}, gof{3}] = fit( xData, yData, ft, opts );

% Plot fit with data.
figure( 'Name', 'Panasa_ISC_fit_1' );
h = plot( fitresult{3}, xData, yData );

```


ANEXO B: Registro fotográfico

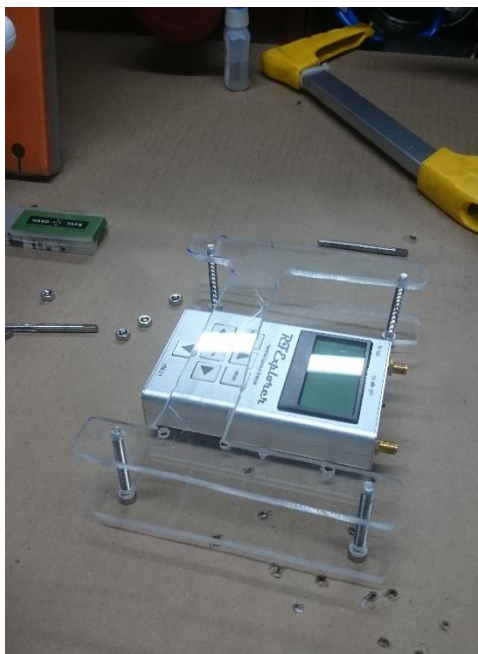


Figura B.1: Construcción de base para medidor de potencia en dron.



Figura B.2: Dron con analizador de espectro acoplado.



Figura B.3: Alineación de antenas con línea de vista



Figura B.4: Dron sobrevolando el primer punto de medición.

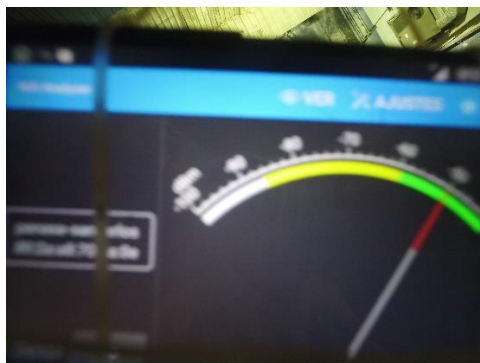


Figura B.5: Toma de medición desde dron a 15 metros.



Figura B.6: Antena en el punto B1, Bomba 2.

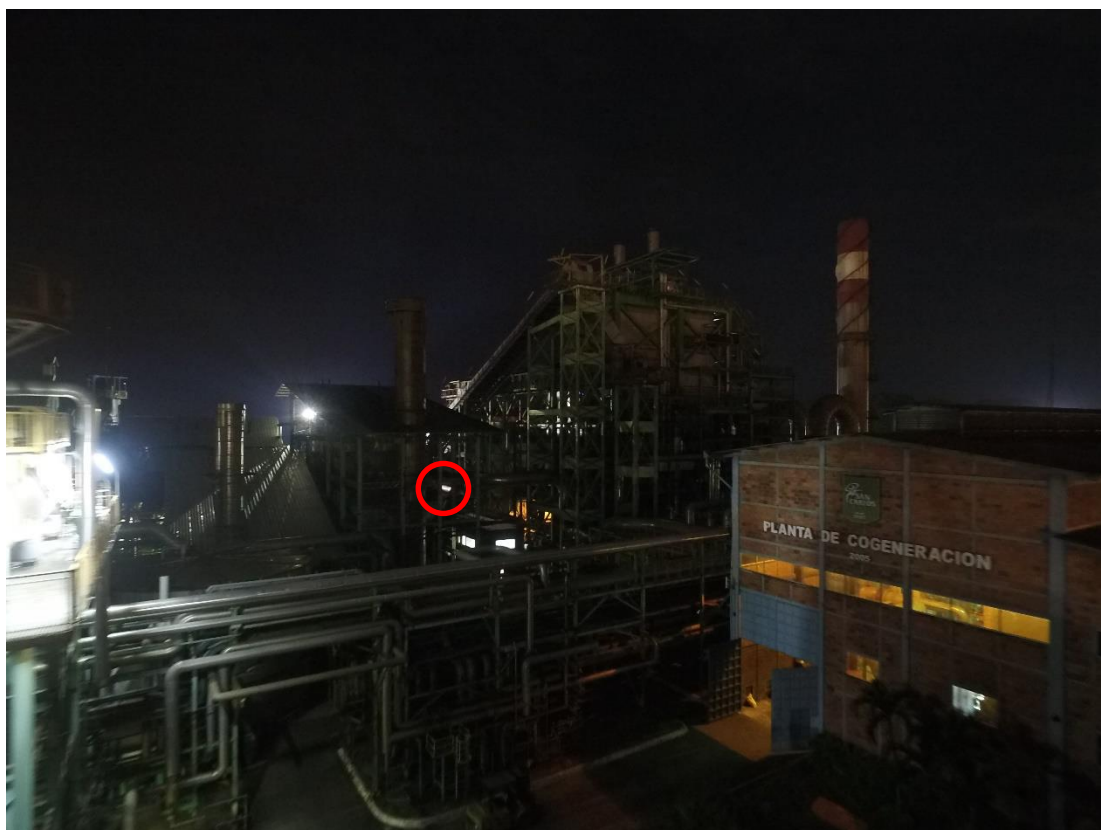


Figura B.7: Antena en punto A1, Ingenio San Carlos.