



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“VALIDACIÓN DE MODELO DE PROPAGACIÓN EMPÍRICO
PARA CONECTIVIDAD EXTERIOR EN ÁREAS RURALES
DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO GUAYAS EN 5GHZ.”**

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

MARIO ALEJANDRO CRESPO CUESTA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres Mario y Patricia por su paciencia, dedicación y guía desde la infancia hasta el día de hoy. A todos mis maestros desde la escuela hasta la etapa secundaria, este trabajo es también resultado del esfuerzo del conocimiento aportado por cada uno de ellos en su respectiva etapa. De manera especial a mis profesores de secundaria los misioneros Sergio y María Luisa, a mis profesores en la ESPOL. Mención especial al director de este trabajo Dr. Boris Ramos quien tuvo enorme paciencia y dedicación.

Mario Alejandro Crespo Cuesta

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres a mi esposa y mi hijo, Marianela y Mario Andrés, quienes a lo largo de mi dilatada carrera tuvieron la fe y constancia para acompañar este camino hasta su culminación. A mis hermanos Patricio, Estefanía y Francisco por su apoyo en el desafío de balancear trabajo y estudio a lo largo de estos años.

Mario Alejandro Crespo Cuesta

TRIBUNAL DE EVALUACION

PhD. Ing. Boris Ramos Sánchez.

PROFESOR DE MATERIA
INTEGRADORA

Msc. Washington Meddina

TUTOR ACADEMICO

DECLARACIÓN EXPRESA

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

Mario Alejandro Crespo Cuesta

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el desempeño de la elaboración de un modelo de propagación basado en mediciones experimentales frente a otros modelos de propagación de ondas electromagnéticas aplicables a la banda de 5 GHz y ambientes exteriores. Se está validando tanto las mediciones como que el modelo resultante sea aplicable en la zona de la cuenca baja del río Guayas por su importancia productiva, demográfica y esta frecuencia en particular por su aplicación para redes de acceso a Internet en áreas rurales. Se han tomado 1945 lecturas a lo largo de una semana promediando los valores en intervalos de una hora, para luego mediante el uso de herramientas estadísticas, obtener los parámetros de un modelo que se adapte a los valores observados. De esta forma se pudo constatar que, con los parámetros obtenidos y el modelo utilizado, nos hemos podido acercar mejor a los valores observados que utilizando otros modelos de propagación pertinentes para esta frecuencia y ambiente.

Palabras Clave: Modelo de Propagación, Empírico, Brecha Digital, Internet en áreas rurales, Comunicaciones Inalámbricas, Telecomunicaciones rurales, Acceso Inalámbrico Fijo, Banda Ancha Inalámbrica

ABSTRACT

The present work evaluates the elaboration performance of a propagation model based on experimental measurements against other models of electromagnetic waves propagation applicable to the 5 GHz band and outdoor environments. It has been evaluated both, the measurements, and that the resulting model is applicable in the lower Guayas river basin due to its productive, demographic importance and is particularly frequent due to its application for Internet access networks in rural areas. It has been taken 1945 readings over a week averaging the values in one-hour intervals, and then using statistical tools to obtain the parameters of a model that adapts to the observed values. In this way, it was possible to verify that, with the obtained parameters and the model used, it was possible to approach better to the observed values than using other propagation models relevant to this frequency and environment.

Keywords: *Propagation Model, Empirical, Digital Divide, Internet in Rural Areas, Wireless Communications, Rural Telecommunications, Fixed Wireless Access, Wireless Broadband.*

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
TRIBUNAL DE EVALUACION	IV
DECLARACIÓN EXPRESA	V
RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGIA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del Problema	2
1.2 Justificación	3
1.3 Solución Propuesta.....	5
1.4 Objetivos	5
1.5 Metodología.....	6
1.6 Alcance.....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE REDES WLAN Y PROPAGACIÓN EN EXTERIORES.....	9
2.1 Aspectos de Propagación en Exteriores	9
2.2 Estándares más usados	14
2.3 Modelos de Propagación más usados	15
CAPÍTULO 3.....	19
3 RECOPIACIÓN DE DATOS.....	19
3.1 Equipo Transmisor y Receptor	19
3.2 Software para la recolección y procesamiento de información.....	21
3.4 Resultados Obtenidos	23
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	33

4.1 CONCLUSIONES	33
4.2 RECOMENDACIONES.....	33
BIBLIOGRAFÍA	35
ANEXOS	38
Anexo A1: Perfiles Topográficos por sitio.....	38
Anexo A2: Tabla de Lecturas Obtenidas	42
Anexo A3: Especificaciones de los Equipos.....	43

ABREVIATURAS

TIC	Tecnologías de la Información y Comunicación.
LOES	Ley Orgánica de Educación Superior.
LOEP	Ley Orgánica de Empresas Públicas.
SENATEL	Secretaria Nacional de Telecomunicaciones.
SUPERTEL	Superintendencia de Telecomunicaciones.
Kbps	Kilobytes por segundo.
IP	Internet Protocol.
Art.	Artículo.
CAGR	Tasa anual compuesta de crecimiento
ISDN	Integrated Services Digital Networks
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones
FTTH	Fiber To The Home
DSL	Digital Subscriber Line
ISM	Industrial, Scientific and Medical
WLAN	Wireless Local Area Network
RF	Radio Frecuencia
CDMA	Code Division Multiple Access
TDD	Time Division Duplexing
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
GSM	Global System for Mobile Communications
LTE	Long Term Evolution
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
CAPEX	Capital Expenditures
OPEX	Operational Expenditures
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
SUI	Standford University Interim
PMP	Punto a Multi-Punto
EIRP	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
RMSE	Root Mean Square Error

SIMBOLOGIA

dBm	Decibelio milivatio
dB _i	Decibelio Isotrópico
m	Metros
Km	Kilometros
msnm	Metros sobre el nivel del mar
λ	Longitud de Onda
c	Velocidad de la Luz
f	Frecuencia

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Area de la cuenca hidrográfica del río Guayas y referencia de la cuenca baja a 30 msnm.	3
Figura 1.2: Distribución del Internet Fijo y Móvil el Ecuador.	4
Figura 1.3: Distribución de los sitios de análisis respecto al transmisor.	6
Figura 1.4: Equipo transmisor modelo PMP 450m	7
Figura 1.5: Nodo de comunicaciones con los 3 transmisores usados.	7
Figura 1.6: Ubicación geográfica de los transmisores.	8
Figura 1.7: Vista en perspectiva desde la ubicación del transmisor.....	8
Figura 2.1: Representación del efecto de la difracción en física.....	9
Figura 2.2: Representación gráfica de la reflexión en física	10
Figura 2.3: Representación gráfica del efecto de la dispersión en física	10
Figura 2.4: Efecto de la multiple trayectoria en radiofrecuencias.....	12
Figura 2.5: Atenuación debida a la propagación.	12
Figura 3.1: Equipo transmisor PMP450m.....	20
Figura 3.2: Cuadro de mando de Software para monitoreo CNMaestro	21
Figura 3.3: Pantalla de reportes de Software CNMaestro	21
Figura 3.4: Importación de datos adquiridos y calculados a Software Statistica.	22
Figura 3.5: Proceso de calculo de regresión en software Statistica.....	23
Figura 3.6: Sitios a ser estudiados sobre imagen satelital.....	24
Figura 3.7: Sitios a ser estudiados sobre imagen satelital.....	24
Figura 3.8: Primera etapa de desarrollo de modelo.....	25
Figura 3.9: Comparativa de valores Observado-Predichos 1era etapa	26
Figura 3.10: Parametros obtenidos en la primera etapa de la regresión.....	26
Figura 3.11: Representación de 3 variables: Altura-Distancia-Perdida.....	27
Figura 3.12: Parámetros obtenidos de la segunda etapa del modelo con 3 variables.	27
Figura 3.13: Comparativa de valores Observado-Predichos 2da etapa.....	28
Figura 3.14: Diagrama de cajas comparativo de los diferentes modelos a validar....	29
Figura 3.15: Comparativa de Modelos de propagación.	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tecnología de Acceso por Segmento de Banda Ancha Utilizado.	14
Tabla 2.3: Clasificación de Terreno en modelo de propagación SUI.	18
Tabla 3.1: Resumen de la disposición de transmisor-receptor.	20
Tabla 3.2: Resumen de los parámetros de cada sitio a ser estudiado.....	23
Tabla 3.3: Resumen estadístico de los datos obtenidos y calculados por los diferentes modelos analizados.	30
Tabla 3.4: Raíz del error medio cuadrático por modelo de propagación Analizado (RMSE)	31

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de las redes WLAN y su uso para transmisión de datos, simultáneamente fueron apareciendo aplicaciones de tecnologías similares de bajo costo para su uso en mayor distancia y vieron su popularización sobre todo en sectores rurales y países en vías de desarrollo debido a su bajo costo comparados con líneas dedicadas del tipo ISDN u otras tecnologías disponibles.

Los equipos usados para este tipo de conexiones compartían una plataforma común tanto en transmisores como en chipset con equipos WLAN que usaban el estándar 802.11b inicialmente, de forma posterior cuando debido a la proliferación de dispositivos en la banda de 2.4 GHz se adoptó la banda de 5 GHz y el estándar 802.11a, que compartía la forma de acceso al medio con introduciendo algunas importantes mejoras entre las que vale la pena nombrar las nuevas modulaciones que hacen uso de técnicas de modulación ortogonal.

Fue en este contexto en el que se empezó a trabajar en todo el mundo en el estándar 802.16 llamado comercialmente Wimax que por diversas razones que escapan al alcance de este documento, no terminó de consolidarse como tecnología y su aplicación ha sido muy limitada.

Desde entonces las tecnologías inalámbricas en banda libre para comunicaciones en áreas rurales han evolucionado por su cuenta al punto de contar con chipsets fabricados específicamente para este fin, adoptar tecnologías como OFDM y MIMO para mejorar su eficiencia y mejorar su desempeño en aquellos lugares donde otros tipos de despliegue de infraestructura no son económicamente viables. Sin embargo, a pesar de los avances en esta tecnología, los modelos de propagación siguen siendo un parámetro de gran importancia al momento de predecir la factibilidad de los enlaces inalámbricos y a pesar de existir algunos modelos ampliamente usados como el Okumura-Hata, la realidad es que cada zona geográfica tiene sus propias características lo que hace necesario contar con modelos de propagación empíricos que permitan de manera más fiable predecir las pérdidas por recorrido en zonas rurales y de entre todas las zonas rurales con especial énfasis en aquellos lugares que por sus características tienen gran relevancia productiva.

Como base de este análisis se ha seleccionado la llamada cuenca baja del río Guayas, una zona geográfica ubicada en el suroeste del Ecuador, de enorme significado

productivo, que incluye la parte baja y estribaciones de la cordillera de los andes que alimentan al río Guayas y sus afluentes. Esta zona, que empieza al norte con la provincia de Los Ríos, continúa con Guayas y continúa con parte de la provincia de El Oro, incluye también la zona costanera de las provincias del Chimborazo, Cañar y Azuay, zonas en las que se destacan grandes extensiones de cultivos de caña de azúcar, banano, cacao y en menor medida bosques madereros de teca.

La cuenca hidrográfica del río Guayas pertenece a la vertiente del Pacífico, tiene un área aproximada de 34.500 km². Esta cuenca tiene un área que corresponde al 12,57% del territorio ecuatoriano por otro lado, la población ubicada en esta microrregión se estima según estudios de la Secretaría del Agua en 5'592.025 habitantes, representado más del 39% del total de la población ecuatoriana. [1]

1.1 Descripción del Problema

Aproximadamente un tercio de la población del Ecuador vive en cantones de menos de 100.000 habitantes [2].

De manera general, cerca de la mitad de la población de estos cantones se ubica en el área urbana y la otra mitad en áreas rurales, fuera de la cobertura de los tendidos de fibra óptica para Internet Fijo [2][3].

En base a recorridos realizados y las estadísticas del ente regulador ARCOTEL, podemos decir que los principales medios de acceso son, fibra óptica (FTTH), par de cobre (DSL) y vía inalámbrica. Dentro de la población de los cantones arriba mencionados se puede notar en las estadísticas que, en las cabeceras cantonales, gran parte del área urbana cuenta ya con tendido de fibra óptica y cobre para el servicio de Internet Fijo [4].

Son precisamente las áreas rurales de estos cantones, donde podríamos esperar que la llamada “brecha digital” se encuentre más acentuada.

En este contexto, los proveedores de internet de las áreas rurales encuentran enormes desafíos para brindar un servicio de calidad y costo efectivos a sus usuarios y carecen de herramientas adecuadas, para dimensionar los enlaces inalámbricos con los que brindan servicios a sus usuarios, así como predecir de manera real la factibilidad del servicio, previo al despliegue de infraestructura.

1.2 Justificación

En el Ecuador los habitantes de áreas rurales con necesidades de conectividad a Internet son atendidos en su mayoría por pequeños proveedores de internet que usan tecnologías inalámbricas en las bandas ISM, tecnología espectro ensanchado, y transmisores de relativamente bajo costo, para poder atender las demandas de conectividad en estos sectores.

En este tipo de entornos, conforme las distancias desde el nodo al suscriptor se alargan y los usuarios se encuentran más alejados del área urbana, se vuelve más importante un cálculo adecuado para poder predecir la factibilidad de servicio.

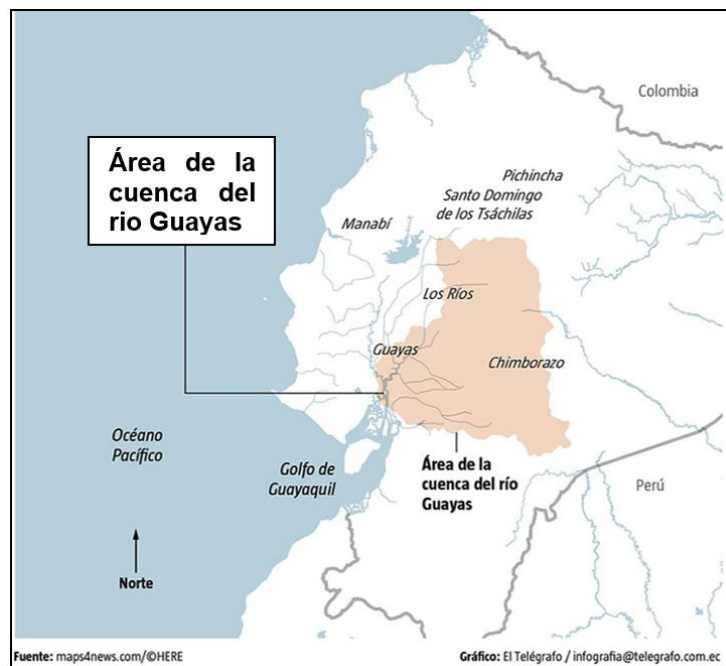


Figura 1.1: Área de la cuenca hidrográfica del río Guayas y referencia de la cuenca baja a 30 msnm [1].

Existen diversas herramientas que permiten calcular las pérdidas de espacio libre usando diferentes modelos de propagación, sin embargo, no se cuenta con trabajos que, de manera experimental, comparen los resultados de diversos modelos de propagación a la realidad de las condiciones de terreno y vegetación del Ecuador en el área rural. Existen en la industria de las telecomunicaciones numerosas herramientas para predicción de cobertura, enfocadas, principalmente al sector de telefonía celular y a los grandes operadores, que precisamente por este enfoque implican importantes costos de licencias y la necesidad de consultores especializados, todo esto fuera del alcance de los

pequeños operadores que brindan servicios de Internet en las áreas rurales. Por otro lado, tenemos herramientas gratuitas como Radio Mobile o Link Planner que, si bien permiten realizar predicciones de propagación, no cuentan con la opción de personalizar el modelo de propagación a usarse y más aún los modelos de propagación disponibles no han sido suficientemente evaluados contra resultados experimentales en zonas rurales como las que ocupan este estudio.

El tener una mejor comprensión de la propagación en exteriores para áreas rurales, mejora la eficiencia de los sistemas en estas áreas y abre las puertas a ampliar las aplicaciones de los sistemas inalámbricos en el campo, es debido a esto que el presente trabajo se enfoca en la zona geográfica llamada "Cuenca Baja del río Guayas" que tiene condiciones relativamente homogéneas en cuanto al tipo de terreno, variedad de cultivos y orografía, para determinar experimentalmente que modelo de propagación se adapta mejor a estas condiciones y que variables se deberían modificar para tener los resultados más exactos posibles.

Se busca de esta forma, aportar con una herramienta para que los pequeños proveedores de Internet con cobertura en la "Cuenca Baja del río Guayas" o zonas geográficas similares del Ecuador puedan de una manera más confiable, conocer qué modelo de propagación se adapta mejor a esta región en particular y con qué parámetros sería ideal realizar simulaciones y cálculos de pérdidas de espacio libre.

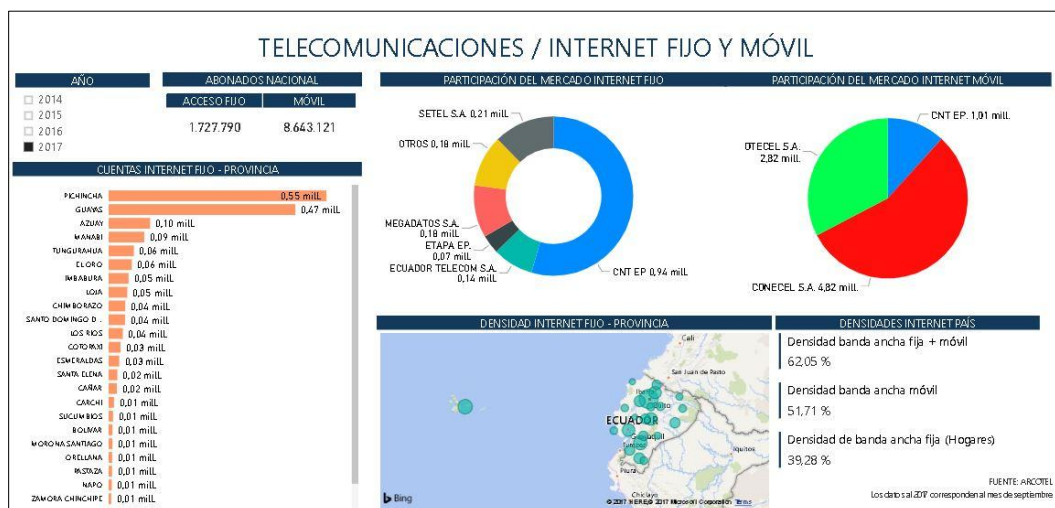


Figura 1.2: Distribución del Internet Fijo y Móvil el Ecuador [4].

1.3 Solución Propuesta.

Proponemos, por tanto, validar diferentes modelos de propagación basándonos en trabajos previos similares como los realizados por Molina en Ecuador Abhayawardhana, Wassell, Crosby, Sellars y Brown en Reino Unido y Pérez, Herrera y Uzcátegui en Venezuela y Colombia para construir un modelo semi-empírico, basados en los datos obtenidos en campo mediante la medición de pérdida en espacio libre a diferentes distancias y en direcciones diversas de tal forma que atravesasen campos con diversos cultivos de forma que podamos emular de la manera más fiel los entornos que un proveedor de internet rural de servicio fijo inalámbrico encontraría [5] [6] [7].

Realizaremos con estos datos y el modelo empírico resultante una comparación con otros modelos de forma que se pueda evaluar y validar la efectividad del modelo construido.

Se ha seleccionado para este estudio, de entre todas las frecuencias ISM, exclusivamente a la banda de 5 GHz debido a que es la actualmente más usada por los proveedores de Internet consultados.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Validar un Modelo de Propagación empírico, en la frecuencia de 5 GHz para un área Rural de Ecuador, específicamente en la Cuenca Baja del río Guayas en Ecuador.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Medir experimentalmente los niveles de señal recibidos a diferentes distancias en el área rural del Ecuador.
- Comparar los valores teóricos y experimentales con diferentes parámetros de un modelo de propagación.
- Concluir que valores del modelo de propagación se aproximan más a los resultados experimentales.
- Comparar y evaluar diferentes modelos de propagación y concluir cual se adapta mejor al área rural ecuatoriana objeto de este estudio.

1.5 Metodología

Con la finalidad de cumplir el primer y segundo objetivo se seleccionarán ubicaciones a distancias de entre 1 km a 20 km desde el cerro Huaquillas en el cantón La Troncal, precisamente porque los sitios de interés para comunicaciones rurales se encuentran en las afueras del núcleo urbano o cabecera cantonal, que en cantones de menos de 100.000 habitantes asumiremos como mayores a 1 km de diámetro. Se realizarán lecturas cada 5 minutos y se promediarán cada hora a lo largo de una semana, estas mediciones se realizarán en diferentes trayectorias, procurando que los puntos de medición se encuentren en línea de vista, evitando obstrucción por vegetación y edificios, lo más cercano al centro del patrón de radiación de las antenas sectoriales, de esta forma se busca tener mediciones en 3 transmisores iguales que apuntan en direcciones diferentes, pero en similares circunstancias, cabe indicar que la distancia máxima de las mediciones realizadas serán en receptores que se encuentren hasta a 20 km medidos desde el transmisor en el cerro Huaquillas.

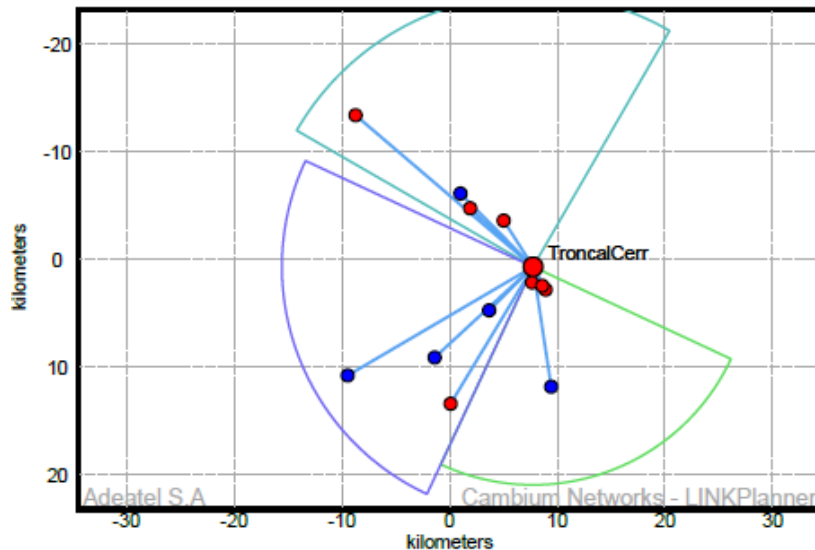


Figura 1.3: Distribución de los sitios de análisis respecto al transmisor.

Por su parte el tercer objetivo será alcanzado mediante el análisis comparativo entre los datos teóricos obtenidos a partir del modelo de propagación elaborado y los resultados recopilados experimentalmente, luego de lo cual se podrá alcanzar el cuarto objetivo en el cual concluiremos cuál de los modelos propuestos se logra adaptar de mejor manera al área geográfica contemplada en este estudio.



Figura 1.4: Equipo transmisor modelo PMP 450m

1.6 Alcance

Validar un modelo de propagación empírico que permita estimar el nivel de señal recibido y facilitar el cálculo de cobertura para conectividad de sistemas inalámbricos exteriores en áreas rurales de la cuenca baja del río Guayas a frecuencias de 5 GHz.

Para el desarrollo de esta propuesta de investigación se realizarán mediciones de los niveles de señal recibidos desde el cerro Huaquillas en el Cantón La Troncal atravesando diferentes tipos de cultivos como caña de azúcar, banano, cacao y pequeños bosques de teca.



Figura 1.5: Nodo de comunicaciones con los 3 transmisores usados.

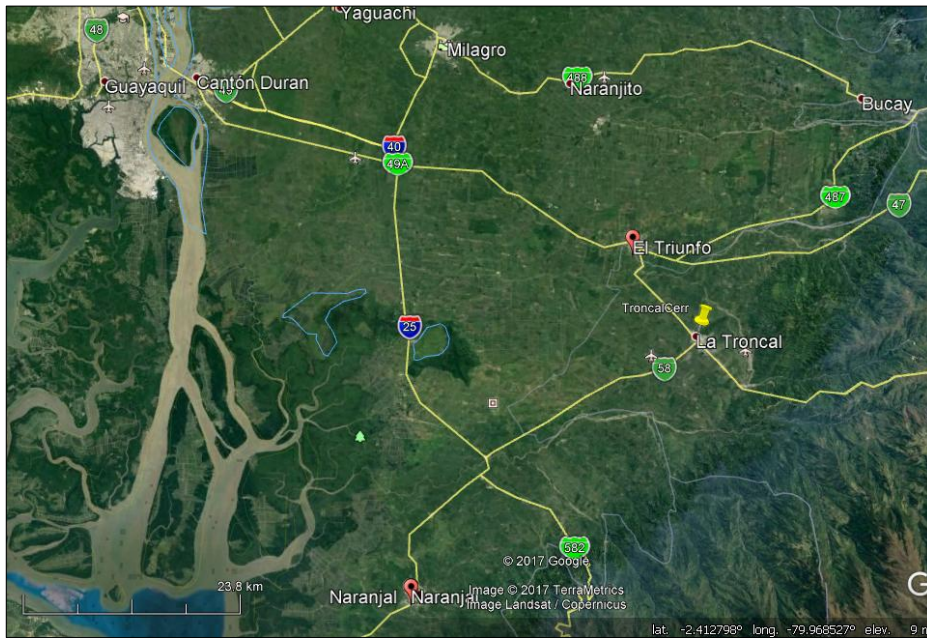


Figura 1.6: Ubicación geográfica de los transmisores.

Desde -2.416470° latitud SUR y -79.341860° longitud Oeste hacia trayectorias en diferentes segmentos entre 1 y 20 kilómetros de distancia del transmisor.



Figura 1.7: Vista en perspectiva desde la ubicación del transmisor.

CAPÍTULO 2

2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE REDES WLAN Y PROPAGACIÓN EN EXTERIORES

2.1 Aspectos de Propagación en Exteriores

2.1.1 Difracción

Las microondas objeto de este estudio son una forma de onda electromagnética que comparten con la luz muchas de sus propiedades y efectos como la difracción. La difracción es un fenómeno característico de las ondas que se basa en el desvío que estas sufren al encontrarse con obstáculos o al atravesar una ranura. El fenómeno de la difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas mecánicas como las sonoras o las que encontramos en la superficie de un fluido y también podemos encontrarlas en ondas electromagnéticas como la luz visible y las ondas de radio que son capaces de propagarse en él vacío. Lo podemos observar también cuando un grupo de ondas de tamaño finito se propaga; por ejemplo, por causa de la difracción, cualquier haz de luz por más dirigido que sea, incluso la luz laser a una cierta distancia tenderá a convertirse en un haz menos concentrado, convirtiéndose en un rayo más amplio. En el caso de ondas de radio, vemos este efecto cuando las ondas pasan muy cerca de una colina o un pico pronunciado y el haz principal se difracta en un haz de propagación más amplio que el original.[8]

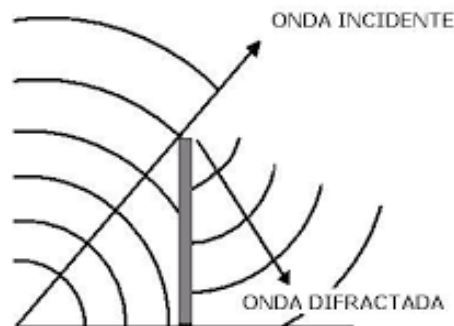


Figura 2.1: Representación del efecto de la difracción en física [9].

2.1.2 Reflexión

Otro de los efectos usuales que la luz y las ondas de radio comparten, es la reflexión y es tal vez el efecto más cotidiano y fácil de entender. Es el cambio de dirección de una onda, que, al entrar en contacto con la superficie de

separación entre dos medios cambiantes, regresa al punto donde se originó. En las ondas de radio, vemos frecuentemente efectos de reflexión cuando las ondas se encuentran cerca de superficies muy lisas como el techo de un edificio o la superficie de un lago o un desierto [10].

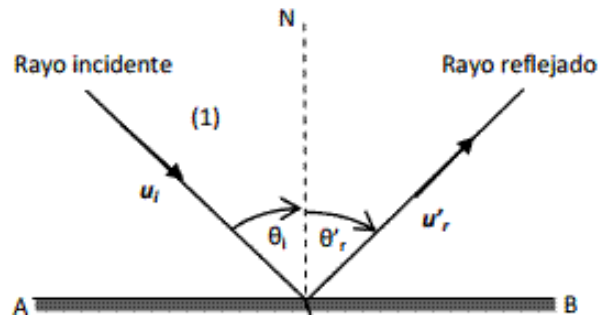


Figura 2.2: Representación gráfica de la reflexión en física [11].

2.1.3 Dispersión

En la ciencia física denominamos dispersión al fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material. En la naturaleza todos los medios materiales tienen en mayor o menor medida efectos dispersivos sobre las ondas y es un efecto que se puede constatar sobre todo tipo de ondas, por ejemplo, a las ondas sonoras que se desplazan a través del aire, a las ondas de radio que atraviesan el espacio interestelar o a la luz que atraviesa líquidos, sólidos translúcidos como el vidrio o gases como cuando atraviesa la atmósfera. Este es el fenómeno que produce el arco iris, en el momento que la luz atraviesa las gotas de agua, la luz se dispersa en diferentes longitudes de onda, que forman todos los colores del espectro visible. En las ondas de radio, este efecto se puede notar también en cierto grado dependiendo de frecuencia y del fenómeno natural que afecte a las ondas, niebla, lluvia ligera, lluvia fuerte, granizo o nieve tendrán diferentes efectos de difracción y afectarán de manera diferente de acuerdo con la frecuencia de la onda [12].

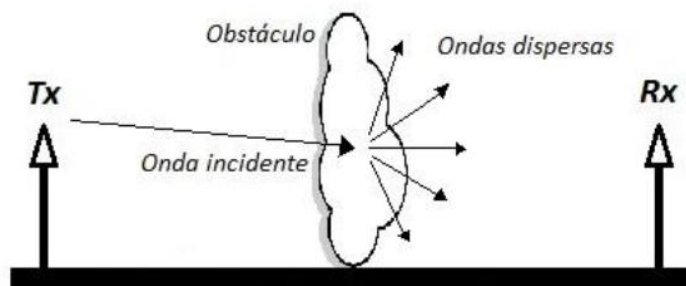


Figura 2.3: Representación gráfica del efecto de la dispersión en física [5].

2.1.4 Múltiple trayectoria

Un efecto importante también para el estudio de las ondas de radio es la múltiple trayectoria. Es de especial interés en las redes inalámbricas de área local debido a la multitud de obstáculos que en ambientes interiores se encuentran. Es aquello que se produce cuando una señal de radiofrecuencia se transmite en dirección al receptor. Esta onda electromagnética en su trayecto se encuentra con objetos que reflejan, refractan, difractan o interfieren la señal original.

Cuando una onda electromagnética del tipo radiofrecuencia se refleja en un objeto, se crean múltiples frentes de onda. Como resultado de esto hay nuevos frentes de onda duplicados, son estos los frentes de onda múltiples que alcanzan el receptor y se superponen entre sí.

El efecto de propagación multi-trayectoria o de trayectos múltiples ocurre cuando las señales de radiofrecuencia llevan diversas trayectorias desde una fuente hacia un destino. Una parte de la señal va al destino mientras que otra parte rebota contra una obstrucción y después continúa rumbo a su destino. Como consecuencia de esto, una parte de las señales se retrasan porque recorren una trayectoria más larga hacia su destino.

Por tanto, el efecto multi-trayectoria se podría definir como una combinación de la señal original junto con los frentes de onda duplicados, y el resultado de la reflexión de las ondas en los obstáculos a lo largo del trayecto entre el transmisor y el receptor.

La distorsión de trayectoria múltiple es considerada una forma de interferencia en el campo de la radiofrecuencia y las ondas electromagnéticas que ocurre cuando una señal de radio tiene más de una trayectoria entre el receptor y el transmisor. Esto se puede constatar cuando existen superficies metálicas en el trayecto u otras superficies altamente reflexivas respecto a las radiofrecuencias, tales como muebles, paredes, o revestimientos de vidrio. Es también común encontrar el efecto de trayectoria múltiple en ambientes exteriores y largas distancias, con muchas superficies irregulares o con fuentes de agua cercanas que acentúen el efecto de la reflexión [13].

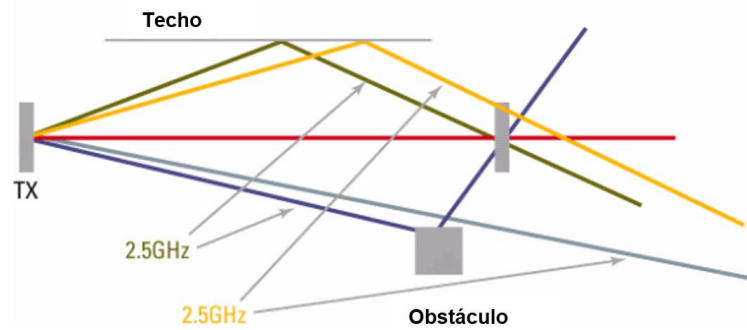


Figura 2.4: Efecto de la múltiple trayectoria en radiofrecuencias [13].

2.1.5 Pérdida de espacio libre

Para los sistemas de transmisión inalámbrica, la atenuación de la señal en ausencia de obstáculos o también conocido como pérdida de espacio libre, es uno de los parámetros a tener en consideración. Este tipo de atenuación se incrementa a medida que la señal se aleja de su transmisor debido a que aumenta la superficie de frente de onda, con lo cual, en cumplimiento con la ley de conservación de energía, la potencia de la señal se distribuye sobre un área cada vez mayor dando como resultado que la energía entregada al receptor en un área determinada sea cada vez menor.

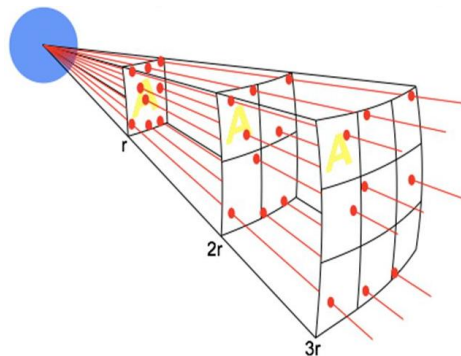


Figura 2.5: Atenuación debida a la propagación [14].

La pérdida por recorrido en espacio libre se calcula mediante a siguiente ecuación[15] [16].

$$P_{el}(dB) = 32.45 + 20\log(f) + 20\log(d) \quad (2.1)$$

Donde:

- **f**: Frecuencia de trabajo de la señal transmitida dada en MHz.
- **d**: Distancia entre transmisor y receptor dada en Km.

Con el fin de verificar nuestros cálculos usaremos el método del gradiente en uno de los puntos de estudio para constatar la validez de nuestras mediciones, con este fin en primer lugar elegimos un sitio por ejemplo el ubicado a 1941 metros del transmisor en el que hemos recibido un nivel de señal de -68 db y mediante el despeje de la forma siguiente:

$$\text{Señal Recibida} = P_t + G_{at} - P_{el} + G_{ar} \quad (2.2)$$

Donde:

- **P_t**: Potencia del transmisor: 25 dBm
- **G_{at}**: Ganancia de antena del Transmisor: 15.2 dBi
- **P_{el}**: Pérdidas de camino del Enlace
- **G_{ar}**: Ganancia antena del Receptor 16.4 dBi

Obtenemos que la perdida de camino observada para una distancia de 1941 metros es de 124.6 dB y como resultado de la observación de la ecuación obtenida de los valores experimentales resumidos en la figura 3.10 concluimos que el valor de Lo a una distancia de 1 metro es de 70.1708 dB. Usando:

$$L_o = -10 \log G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \quad (2.3)$$

Donde el valor de la longitud de onda λ está dado por

$$\lambda = \left(\frac{c}{f} \right) = \left(\frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{5565 \times 10^6 \text{ Hz}} \right) \quad (2.4)$$

Reemplazamos el valor de Lo y asumiendo la ganancia del transmisor igual a 1 tenemos el valor de la distancia do de nuestros valores experimentales.

$$70.1708 = -10 \log G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2$$

$$-70.1708 = 10 \log \left(\frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5565 \times 10^6 \text{ Hz} * 4\pi d_0} \right)^2$$

$$-7.0171 = \log \left(\frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5565 \times 10^6 \text{ Hz} * 4\pi d_0} \right)^2$$

$$9.61 \times 10^{-8} = \frac{1.8403 * 10^{-5}}{d_0^2}$$

$$d_0^2 = 191.5 \therefore d_0 = 13.83\text{m}$$

Habiendo obtenido el valor de d_0 podemos verificar el valor del gradiente de atenuación para nuestros valores experimentales.

$$L_{p(dB)} = L_0 + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

$$124.6 = 70.1708 + 10\gamma \log\left(\frac{1941}{d_0}\right)$$

$$54.4292 = 10\gamma \log\left(\frac{1941}{13.83}\right)$$

$$\gamma = \frac{54.4292}{10 \log\left(\frac{1941}{13.83}\right)} = 2.53$$

Por tanto, hemos verificado que el valor del gradiente de los valores experimentales obtenidos es superior a dos y están en un rango experimentalmente razonable.

2.2 Estándares más usados

Hoy los fabricantes de equipos para comunicaciones rurales se podrían dividir en dos grandes grupos, los que han evolucionado a partir de las tecnologías de medio compartido como CDMA y los que usan tecnologías a partir división de tiempo TDD.

Segmento de Banda Ancha	Tecnología de Acceso	Crecimiento de Mercado
Inalámbrica		
Acceso Inalámbrico en banda no licenciada, de uso fijo en interior.	Wifi, IEEE 802.11 a/b/g/n/ac	2012: 5.2 millones de Hotspots 2018:10.5 millones de Hotspots 12% CAGR (2012-2018)
Acceso Inalámbrico Móvil en banda licenciada	GSM, WCDMA, TD-SCDMA, HSPA, LTE	2012: 6.5 billones de conexiones. 2018: 8.1 billones de conexiones. 4% CAGR (2012-2018)
Acceso Inalámbrico Fijo de exteriores en Banda licenciada y No licenciada.	KMDS, WiMAX, LTE Fijo, Non-3GPP FWA	2012: 29 millones de suscriptores 2018: 41 millones de suscriptores 6% CAGR (2012-2018)

Tabla 2.1: Tecnología de Acceso por Segmento de Banda Ancha Utilizado [17].

Como claramente se muestra en la tabla, los tres tipos de acceso inalámbrico están creciendo, pero lo que es más importante es la coexistencia de estos tres segmentos.

Esto indica el hecho de que, dependiendo de donde se encuentren localizados los usuarios habrá diferentes formas más eficientes de conectarse a la red.

Respecto a las redes inalámbricas móviles licenciadas como las que usamos diariamente en nuestros celulares operadas por los proveedores de servicio. En este tipo de redes el uso intensivo de video, música y descargas de contenido implican un conflicto de dualidad, debido a que, si bien es cierto empujan el consumo de datos, pero por otro lado implican constantes inversiones en ampliaciones de red.

Las inversiones en ampliaciones de red por parte de los operadores de telecomunicaciones de redes móviles licenciadas no solo implican ingentes gastos de capital (CAPEX por sus siglas en inglés) sino también enormes gastos operacionales (OPEX por sus siglas en inglés).

Esto último unido a una limitada disponibilidad de espectro y al elevado costo de este, tiene un impacto directo a la cobertura y la capacidad que los proveedores de servicio pueden ofrecer a los usuarios en las redes celulares.

El fenómeno explicado previamente se verifica de manera especial en los países emergentes, el uso de redes inalámbricas en espectro no licenciado, tiene la capacidad de ahorrar espectro muy valioso y mejorar sustancialmente el retorno de la inversión para los operadores, sin necesariamente implicar una rivalidad entre los dos servicios[17].

2.3 Modelos de Propagación más usados

2.3.1 Modelo ITU P-530-16

La Unión Internacional de las Telecomunicaciones o UIT por sus siglas en inglés, es un organismo adscrito a las Naciones Unidas cuyo enfoque principal es fomentar las tecnologías de información y comunicación como un medio de progreso, enfocándose sobre todo en la optimización de la interconexión, coexistencia y la estandarización como herramientas para optimizar el avance de la tecnología y sus beneficios entre sus estados miembros. Al día de hoy

son 193 países los miembros y de entre la enorme cantidad de documentos y recomendaciones que este organismo promueven, destaca para nuestro estudio la recomendación ITU-R P-530-16 titulado “*Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa*” en este documento se encuentra implícito un modelo complejo detallado en este anexo y toma en cuenta para la predicción de las pérdidas de camino los siguientes efectos:

- Desvanecimiento debido al efecto de la difracción producida por la obstrucción por obstáculos a lo largo del trayecto.
- Atenuación debido al efectos que los gases atmosféricos implican sobre las ondas electromagnéticas.
- Desvanecimiento debido a la propagación atmosférica por trayectos múltiples o a la dispersión del haz (conocida generalmente como desenfoque) asociados con la existencia de capas refractivas anormales
- Desvanecimiento debido al efecto multi-trayectoria o de propagación en trayectos múltiples cuyo origen tiene entre otros la presencia de superficies reflectivas.
- Atenuación debida a las lluvias o a otro tipo de partículas sólidas en la atmosfera como nieve o granizo.
- Variación tanto del ángulo de llegada como de salida en receptor y transmisor respectivamente.
- Reducción de la discriminación por polarización cruzada (XPD) en condiciones de propagación por trayectos múltiples o durante las precipitaciones.
- Distorsión de la señal debida a desvanecimientos selectivos en frecuencia y a retardos durante la propagación multi-trayectoria.

Como se puede observar, este modelo de predicción no toma en cuenta de manera significativa los efectos del tipo de terreno y geografía sin embargo hace uso de otra recomendación ITU específicamente el documento: Cálculo de la atenuación en el espacio libre P.525-3 en el que sí se toma en cuenta incluso la atenuación debida a las tormentas de arena y polvo.

Debido a la complejidad que implica el análisis de las fórmulas de cada uno de los efectos, el cálculo de la predicción de las pérdidas de espacio libre usando

este modelo han sido automatizadas a través de software desarrollado para ese propósito.

2.3.2 Modelo SUI (Stanford University Interim)

El modelo Stanford University Interim (SUI) fue desarrollado por el grupo de trabajo IEEE 802.16 en conjunto con la Universidad de Standford, quienes a partir del modelo de Okumura-Hata, realizó una profunda investigación con la intención de desarrollar un modelo de canal WIMAX, para las frecuencias 1.9GHz hasta 11GHz para entornos suburbanos, este trabajo dio como resultado el modelo de pérdida de propagación SUI [20].

El modelo SUI es de tipo empírico y para calcular la perdida básica de propagación se requiere de la caracterización del tipo de terreno, agrupándolos en los tres siguientes grupos:

- **Grupo A:** Presenta la mayor cantidad de pérdidas debido a ser terreno montañoso o con colinas con abundante vegetación.
- **Grupo B:** Asociado con niveles de pérdida medios, presenta un terreno llano con muchos árboles o montañoso, pero con escasas de vegetación.
- **Grupo C:** Suele presentar los menores niveles de pérdida y es un terreno de tipo llano con poca vegetación.

La expresión matemática que permite hallar las pérdidas de propagación para los diferentes escenarios de terreno en el modelo SUI, es la siguiente [18]:

$$L_{(dB)} = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + Xf = Xh \text{ para } d > d_0 \quad (2.5)$$

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad \gamma = a - bh_{te} + \frac{c}{h_{te}} \quad (2.6)$$

$$Xf = 6.0 \log\left(\frac{f_c}{2000}\right)$$

(2.8)

$$Xh = -10.8 \log \left(\frac{h_{re}}{2000} \right) \quad \therefore \text{para area Grupo A y Grupo B} \quad (2.7)$$

$$Xh = -20 \log \left(\frac{h_{re}}{2000} \right) \quad \therefore \text{para area Grupo C} \quad (2.9)$$

Donde:

- $d_{(m)}$: Distancia entre el móvil y la estación base, en metros.
- d_0 : es una medida fija de 100 metros.
- X_f (dB): Es el factor de corrección para frecuencias mayores a 2000 MHz.
- X_h (dB): Es el factor de corrección de altura para la antena receptora.
- f_c (MHz): Es la frecuencia de operación.
- λ : Longitud de onda, en metros; $f \leq 2000$ MHz
- γ : Exponente de pérdidas.
- **a, b y c**: Factores que dependen del tipo de entorno en base a la siguiente Tabla:

	Categoría A	Categoría B	Categoría C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

Tabla 2.2: Clasificación de Terreno en modelo de propagación SUI [20].

El modelo SUI, gracias a su coeficiente de pérdidas de trayecto, puede ser aplicado en zonas rurales de Ecuador o sectores que cuenten con las mismas características de alguno de los grupos geográficos A, B o C antes listados.

CAPÍTULO 3

3 RECOPIACIÓN DE DATOS

Para el presente trabajo de investigación se procedió a la recopilación de datos a lo largo de una semana en 16 sitios diferentes con la finalidad de recopilar la información que nos permita modelar y validar el modelo de propagación empírico propuesto.

Los sitios desde los que se han recolectados datos tienen las características típicas de clientes servidos por un proveedor de internet rural:

- Se encuentran a distancias de entre 2km a 25km.
- Todos cuentan con línea de vista completa.
- La primera zona de Fresnel se encuentra despejada.
- Se encuentran en zonas rurales.
- Tienen alturas diversas, sobre nivel de tierra.

3.1 Equipo Transmisor y Receptor

El equipo transmisor en realidad está compuesto por tres equipos transmisores independientes, que fueron instalados simultáneamente sobre una torre de tipo auto soportada en un nodo de telecomunicaciones en el cerro Huaquillas en el Cantón La Troncal, Provincia del Cañar.

Estos tres transmisores están adjuntos a sus respectivas antenas sectoriales de forma directa sin que existan pérdidas debido a cable o conectores, más allá de sus conexiones internas.

La coordenada geográfica del sitio fue tomada con GPS con un margen de error menos a los 7 metros, lo que significa un margen aceptable tomando en cuenta que todas las mediciones serán realizadas a distancias mayores a un kilómetro.

Nombre del Transmisor	Modelo	Azimuth de la Antena	Lobulo de radiación	Banda	Rango Máximo Configurado	Receptores Conectados
Troncal Cerro1	PMP450m	345	90°	5.4 GHz	16 millas	4
Troncal Cerro2	PMP450m	250	90°	5.4 GHz	15 millas	4
Troncal Cerro3	PMP450m	160	90°	5.4 GHz	13 millas	4

Ganancia de la Antena	+14 dBi
Maxima Potencia Transmitida	+24dBm
Ancho de Lobulo	5 GHz 90° sectorial integrada

Tabla 3.1: Resumen de la disposición de transmisor-receptor.

Como se puede apreciar en la tabla adjunta se tratan de equipos modelo PMP450m del fabricante Cambium Networks cuya hoja de datos técnicos puede ser encontrada en la sección de Apéndice 3. El patrón de radiación de cada antena es de 90 grados y la banda en la que se harán las mediciones corresponde al 5.4 GHz, su ganancia es de 14 dBi y la potencia del transmisor llega a los 24dBm. En la figura 3.1 podemos apreciar lo previamente comentado respecto a la ausencia de conectores y cables de radiofrecuencia que introduzcan una pérdida apreciable entre el transmisor y el elemento radiante.

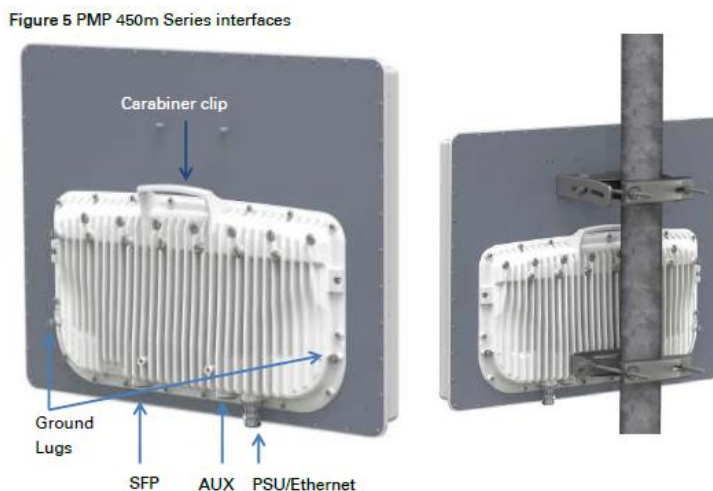


Figura 3.1: Equipo transmisor PMP450m

3.2 Software para la recolección y procesamiento de información

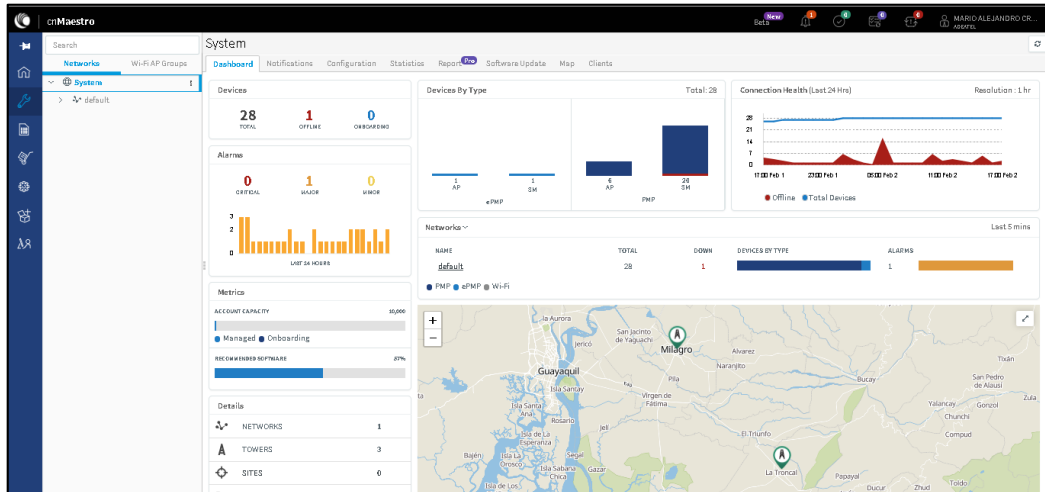


Figura 3.2: Cuadro de mando de Software para monitoreo CNMaestro

En cada una de las 12 ubicaciones seleccionadas para realizar las mediciones objeto de este estudio, se encuentra un equipo receptor del fabricante cambium networks. Estos equipos al igual que muchos otros equipos tienen la capacidad de medir el nivel de señal recibido y reportar esta información usando para ello el protocolo de monitoreo de red SNMP. Usando este protocolo y con ayuda de un software de recolección de datos del mismo fabricante llamado CNMaestro, pudimos obtener el promedio estadístico de los niveles de señal recibida por cada suscriptor con lecturas tomadas cada 5 minutos y promediadas cada hora a lo largo de 7 días, con lo que logramos obtener 1945 lecturas con sus respectivas estampas de tiempo.

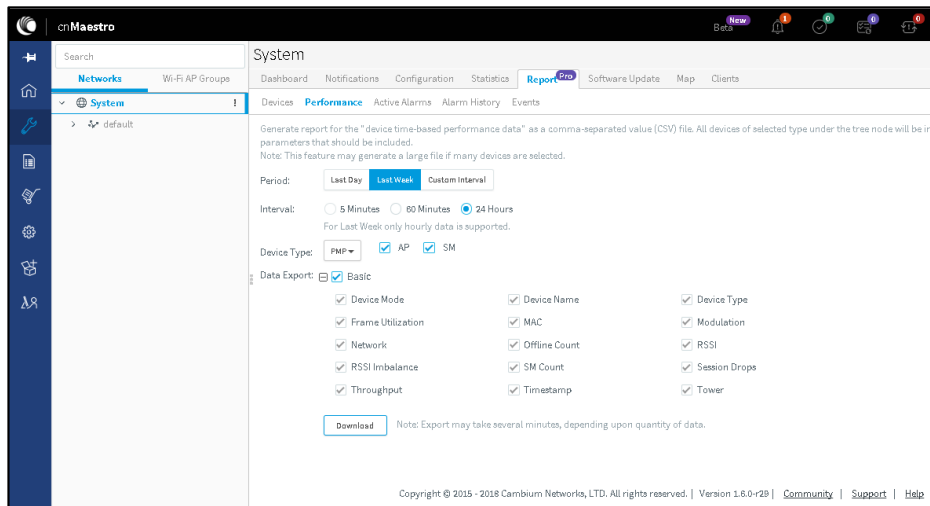


Figura 3.3: Pantalla de reportes de Software CNMaestro

Estos datos fueron exportados desde este software en el formato CSV (Texto delimitado por comas) y fueron importados en Excel donde se realizó el cálculo en el que se toma en cuenta el presupuesto del enlace para deducir para cada caso y cada ubicación las pérdidas de espacio libre, tomando en cuenta que

$$Señal\ Recibida = P_t + G_{at} - P_{el} + G_{ar} \quad (3.1)$$

Donde:

- **P_t**: Potencia del transmisor.
- **G_{at}**: Ganancia de antena del Transmisor
- **P_{el}**: Pérdidas de camino del Enlace
- **G_{ar}**: Ganancia antena del Receptor

Esto tomando en cuenta los diferentes tipos de antenas que tenemos en cada una de las 12 localizaciones nos dio como resultado las pérdidas de espacio libre que tabulamos en cada una de las 1945 lecturas obtenidas.

	1	2	3	4
	Distancia	PerdidaObs	Perdida ITU	Altura
1920	2399	121	115,07	10
1921	2399	121	115,07	10
1922	2399	121	115,07	10
1923	2399	121	115,07	10
1924	2399	121	115,07	10
1925	2399	121	115,07	10
1926	2399	121	115,07	10
1927	2399	121	115,07	10
1928	2399	121	115,07	10
1929	2399	121	115,07	10
1930	2399	121	115,07	10
1931	2399	121	115,07	10
1932	2399	121	115,07	10
1933	2399	121	115,07	10
1934	2399	121	115,07	10
1935	2399	121	115,07	10
1936	2399	121	115,07	10
1937	2399	121	115,07	10
1938	2399	121	115,07	10
1939	2399	121	115,07	10
1940	2399	121	115,07	10
1941	2399	121	115,07	10
1942	2399	121	115,07	10
1943	2399	121	115,07	10
1944	2399	121	115,07	10
1945	2399	121	115,07	10

Figura 3.4: Importación de datos adquiridos y calculados a Software Statistica.

Hecho esto se introdujo esta información junto con la distancia y la altura del receptor en el software Statistica y se definió como variables independientes la distancia y la altura, mientras la pérdida de camino del enlace se la definió como variable dependiente.

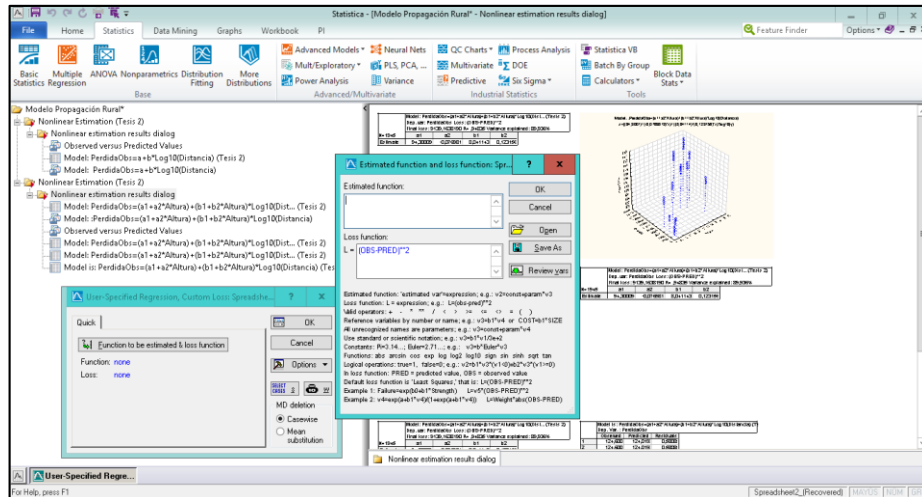


Figura 3.5: Proceso de cálculo de regresión en software Statistica.

3.4 Resultados Obtenidos

En la etapa de recolección de datos se han tomado muestras cada 5 minutos, valores que fueron promediados cada 60 minutos, entre las 23:00 del 31/12/2017 hasta las 22:00 del 7/01/2018 con lo cual se recopiló un total de 1945 muestras de niveles de señal en el receptor.

Los valores tomados corresponden al nivel de señal recibido medido en dBm y se ha realizado la revisión de la potencia del transmisor lo cual, sumado a la ganancia de la antena, nos ha dado un total de 40,2 dBm EIRP.

En cada una de las ubicaciones se han usado diferentes Ganancias de antenas, de tal forma que se ha tenido que calcular el análisis del valor de las pérdidas de espacio libre del camino para cada uno de los lugares a estudiar de acuerdo con esta tabla.

Ubicación	Average of Altura del Receptor (m)	Average of Distancia entre equipos (m)	Average of Ganancia Antena Receptor (dbi)	Average of Perdida del Camino (dbm)
Sitio 1	10	1941	16,4	124,41
Sitio 10	15	9449	29	134,12
Sitio 11	21	12271	34	137,91
Sitio 12	10	2393	23	121,02
Sitio 2	10	5021	16,4	124,77
Sitio 3	10	7872	16,4	130,65
Sitio 4	10	1444	16,4	126,00
Sitio 5	27	5668	29	133,37
Sitio 6	23	11130	34	139,05
Sitio 7	24	19691	34	138,13
Sitio 8	30	21391	34	142,36
Sitio 9	27	14660	34	139,63

Tabla 3.2: Resumen de los parámetros de cada sitio a ser estudiado.

Como se puede ver en la tabla adjunta, se han elegido 12 lugares distribuidos geográficamente de forma diversa desde el sitio donde se encuentra el transmisor. En cada uno de estos puntos de medición se ha realizado un cuidadoso apuntamiento para evitar errores debido a un inadecuado apuntamiento. También se han seleccionado los lugares haciendo un análisis de la topología del trayecto de tal forma que nos podamos asegurar que exista línea de vista y los efectos de difracción y reflexión se vean minimizados. Las antenas usadas han sido diversas de acuerdo con la distancia que exista desde el emisor al receptor.

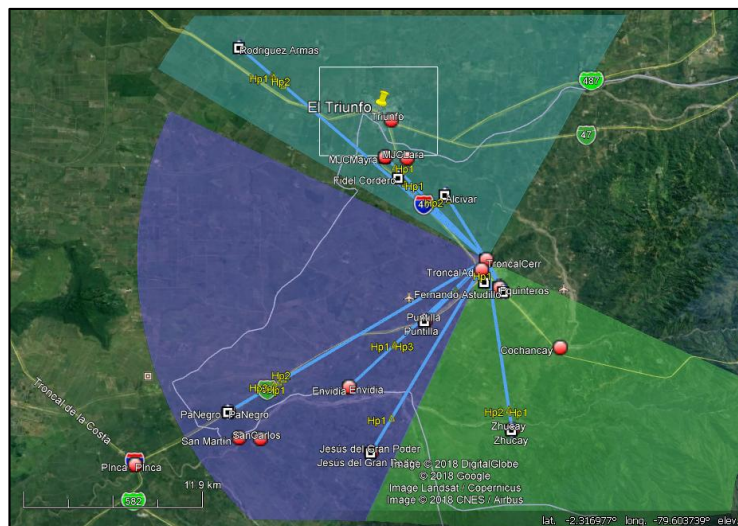


Figura 3.6: Sitios a ser estudiados sobre imagen satelital.

En la figura 3.6 se puede ver una referencia de la zona de cobertura en de los tres equipos sectoriales. Se puede apreciar una cobertura de 90 grados y orientaciones separadas casi uniformemente cercanas a los 90 grados también.

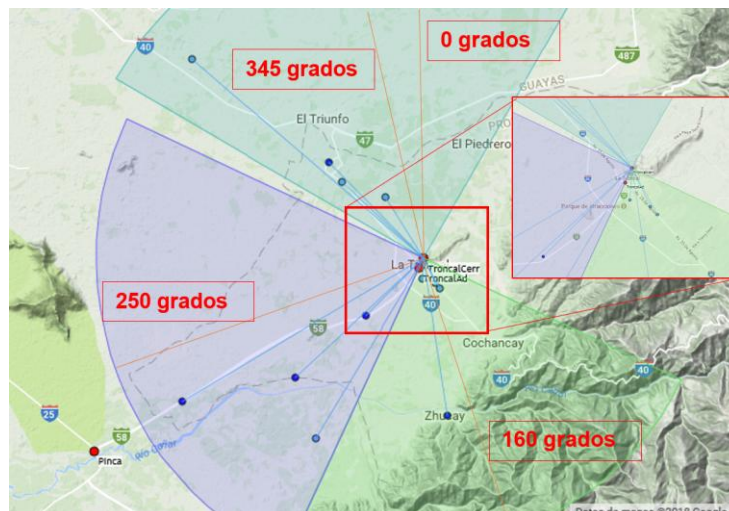


Figura 3.7: Sitios a ser estudiados sobre imagen satelital.

El ángulo que separa el norte verdadero del centro de la zona de cobertura de la antena sectorial se llama Azimut y para cada uno de los sectores tiene un valor de:

- Azimut del sector 1 = 345 grados
- Azimut del sector 2 = 250 grados
- Azimut del sector 3 = 160 grados

En el mismo gráfico podemos apreciar levemente algunas de las trayectorias de los enlaces objeto de este estudio.

Podemos observar que 4 de los sitios se encuentran en la zona de cobertura del sector 1, en el sector 2 se encuentran 4 enlaces y en el sector 3 se encuentran 4 enlaces.

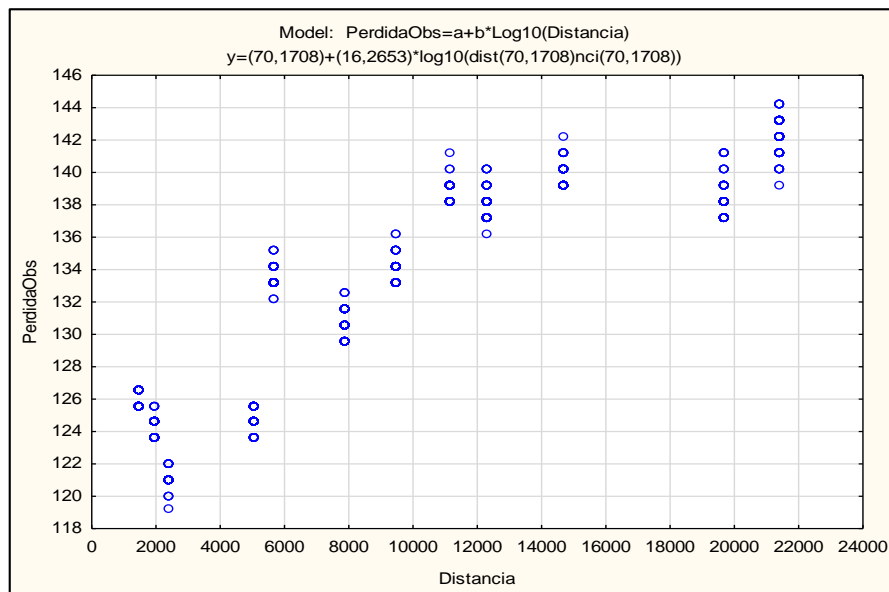


Figura 3.8: Primera etapa de desarrollo de modelo

Con los datos obtenidos en los doce sitios en estudio a lo largo de 7 días, se obtuvieron 1945 mediciones que fueron introducidas en el software de análisis estadístico llamado Statistica. De este gráfico pudimos obtener la figura 3.7 que nos muestra la distribución de las pérdidas del enlace con respecto a la distancia desde el transmisor. Como se puede observar en el gráfico existe una cierta dispersión de las medidas obtenidas que nos muestra una varianza más o menos uniforme y nos permite descartar el que existan mediciones erróneas y nos permite ya intuir en el comportamiento exponencial de las pérdidas del enlace con respecto a la distancia.

Haciendo uso de la opción de regresión personalizada e introduciendo la fórmula teórica de la pérdida, dejando libres dos parámetros a y b pudimos obtener los valores de los parámetros a y b mostrados en la figura 3.8 que ya nos sirven para explicar la varianza con un 80,775% de confianza.

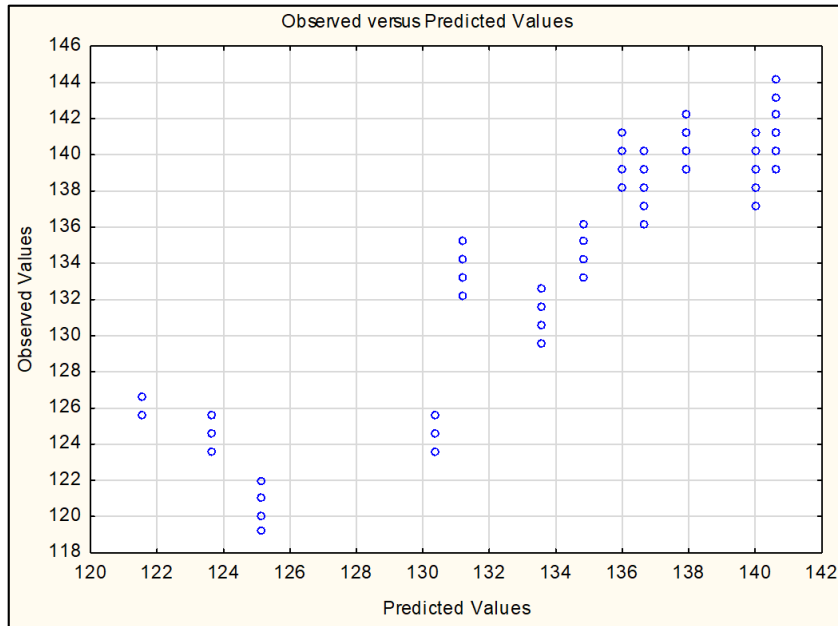


Figura 3.9: Comparativa de valores Observado-Predichos 1era etapa

Model: PerdidaObs=a+b*Log10(Distancia) (Tesis 2)	
Dep. var: PerdidaObs Loss: (OBS-PRED)**2	
Final loss: 17458,432187 R= ,89875 Variance explained: 80,775%	
N=1945	
Estimate	a b
	70,17083 16,26525

Figura 3.10: Parametros obtenidos en la primera etapa de la regresión.

Modelo de Propagación ETAPA 1

$$L_{(dB)} = A + B * \log(D) \therefore \begin{cases} \text{Para cuenca baja del rio Guayas} \\ A = 70,1708 \text{ dB} \\ B = 16,2652 \text{ dB} \end{cases} \quad (3.2)$$

Donde:

- **A_(dB)**: Constante aditiva de pérdida por recorrido.
- **B_(dB)**: Constante multiplicativa de pérdida por recorrido.
- **D_(km)**: Distancia entre antena emisora y antena receptora.

Basados en el trabajos previos realizados por Molina, procedimos con el resultado preliminar de los dos parámetros a y b, a mejorar la calidad de la predicción del modelo introduciendo nuevos parámetros y una nueva variable

que es la altura del receptor que es diferente en cada uno de los caso medidos, pero que en la gran mayoría corresponde a 10 metros [5].

El resultado es el que se puede apreciar en la figura 3.11 donde podemos ver que tenemos 3 variables de estudio. La variable dependiente perdida y las dos variables independientes Altura y Distancia.

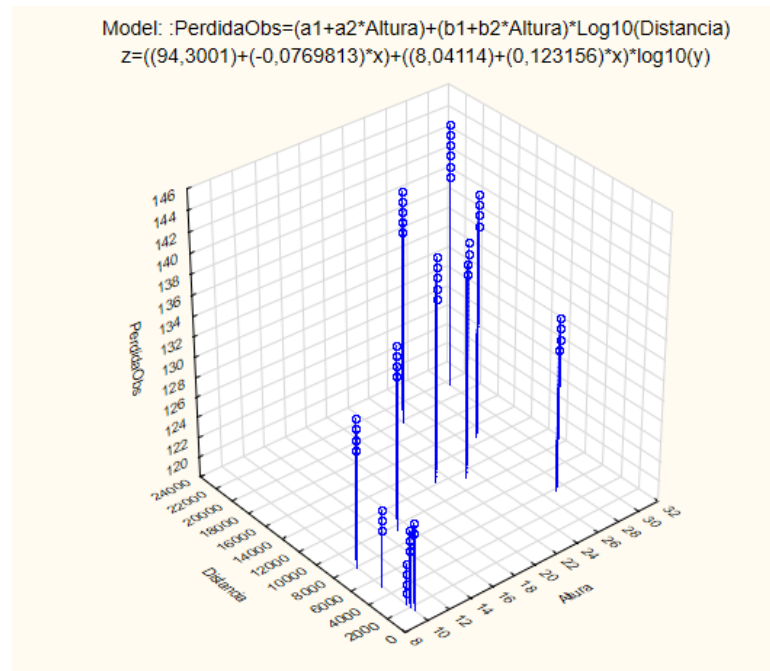


Figura 3.11: Representación de 3 variables: Altura-Distancia-Perdida

La figura 3.11 nos permite ver la forma en como los valores obtenidos experimentalmente van cambiando a diferentes distancias y con diferentes valores de altura, pero al mismo tiempo con el resultado de la regresión, podemos ver que el número de parámetros de nuestro modelo empírico se incrementa a 4: a1, a2, b1 y b2. Cuyos resultados podemos ver en la figura 3.12, de la misma forma podemos apreciar que esta vez la segunda etapa de la regresión explica mucho mejor la varianza de los datos, pues con estos nuevos parámetros y la nueva variable, logramos explicar la varianza con un 89,936% de confianza.

N=1945	Model: PerdidaObs=(a1+a2*Altura)+(b1+b2*Altura)*Log10(Dist... (Tesis 2)			
	Dep. var: PerdidaObs Loss: (OBS-PRED)**2			
	Final loss: 9139,1638190 R= ,94835 Variance explained: 89,936%			
Estimate	a1	a2	b1	b2
	94,30009	-0,076981	8,041143	0,123156

Figura 3.12: Parámetros obtenidos de la segunda etapa del modelo con 3 variables.

En la figura 3.12 podemos ver por tanto ya el resultado de la regresión con los 4 parámetros completos lo que nos permite construir y validar completamente el modelo empírico obtenido en base a las mediciones realizadas.

Nos queda únicamente comparar con los resultados obtenidos de los otros modelos con los que se desea comparar.

Modelo de Propagación ETAPA 2

$$L_{(dB)} = (A_1 + A_2 * h) + [(B_1 + B_2 * h) * \log(D)] \therefore \left\{ \begin{array}{l} \text{Para cuenca baja del rio Guayas} \\ A_1 = 94,3000 \text{ dB} \\ A_2 = -0,07698 \text{ dB} \\ B_1 = 8,0411 \text{ dB} \\ B_2 = 0,1231 \text{ dB} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Donde:

- $A_{1(dB)}$ y $A_{2(dB)}$: Constantes aditivas de perdida por recorrido.
- $B_{1(dB)}$ y $B_{2(dB)}$: Constante multiplicativa de perdida por recorrido.
- $D_{(Km)}$: Distancia entre antena emisora y antena receptora.
- $h_{(m)}$: Altura de la antena receptora

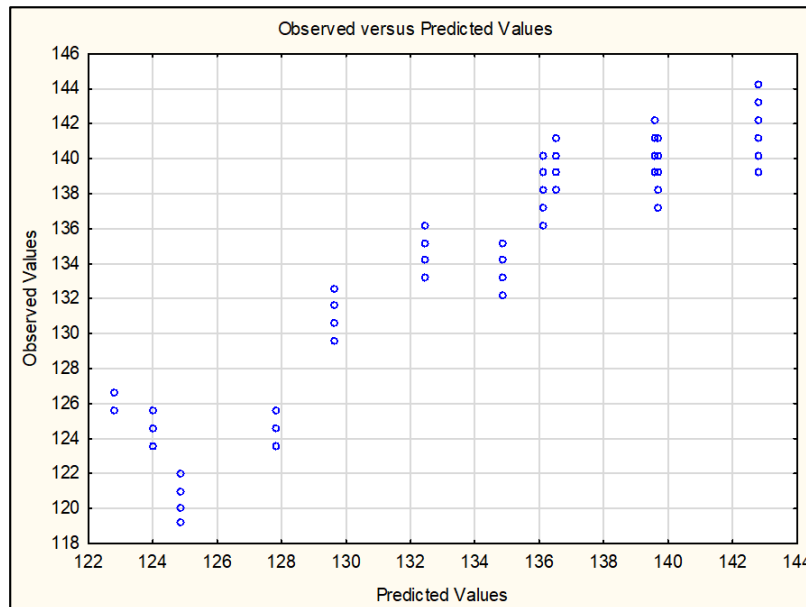


Figura 3.13: Comparativa de valores Observado-Predichos 2da etapa.

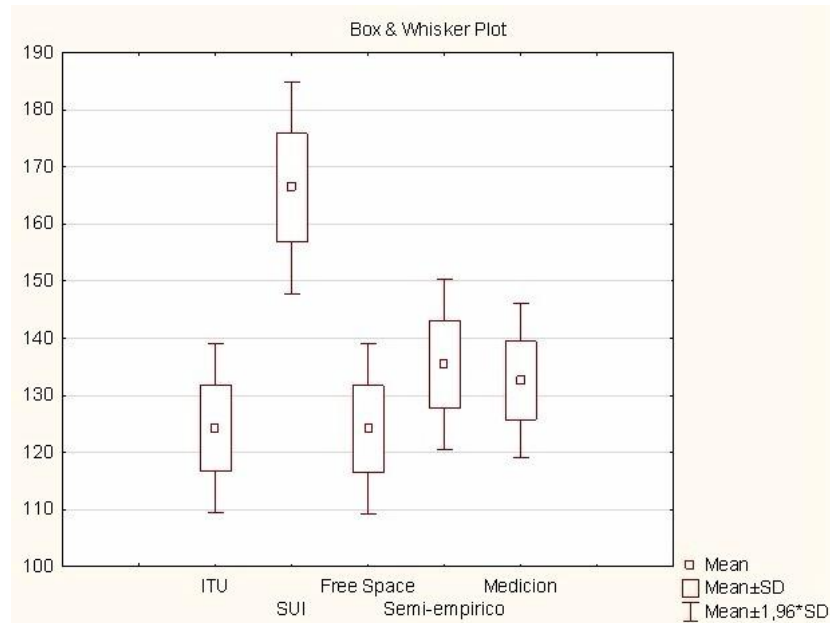


Figura 3.14: Diagrama de cajas comparativo de los diferentes modelos a validar.

Con la finalidad de validar el modelo de propagación de forma comparativa hemos tomado el conjunto de datos obtenidos experimentalmente y para cada conjunto hemos calculado los valores teóricos de acuerdo con los modelos pertinentes a este ambiente.

Realizado el cálculo pertinente para cada instante de medición, hemos vuelto al software de análisis estadístico y definiéndolos como una variable a cada conjunto, hemos hecho un análisis comparativo que inicia con la figura precedente. En la misma podemos observar en el eje x los diferentes modelos y los valores en dBm de las pérdidas calculadas y observadas en el eje y, los valores de la media estadística representada con el recuadro central, la dispersión de los datos ha sido medidos a través de la desviación estándar que se representa en el tamaño de la caja y a través de los corchetes que representan donde se concentran los valores que se desvían por encima y por debajo de un valor igual a 1,96 veces la desviación estándar.

A través de una sencilla observación podemos darnos cuenta de que, tanto desde el punto de vista de promedio estadístico como de la dispersión de los datos, es nuestro modelo empírico el que más se acerca a los resultados experimentales obtenidos, aunque podemos observar también que los valores experimentales se encuentran relativamente cerca a los valores calculados de pérdida de espacio libre.

Variable	Estadística Descriptiva (Comparativa Modelos)				
	Valid N	Media	Mínimo	Máximo	Std.Dev.
ITU	1945	124,2272	110,6800	133,8300	7,53709
SUI	1945	166,3605	148,7944	177,8834	9,47533
Free Space	1945	124,1520	110,5506	133,9639	7,55311
Semi-empírico	1945	135,4135	124,3676	147,4283	7,59833
Medición	1945	132,6234	119,2000	144,2000	6,83469

Tabla 3.3: Resumen estadístico de los datos obtenidos y calculados por los diferentes modelos analizados.

Otra forma de comparar los valores obtenidos de los diferentes modelos que nos parece pertinente es la comparación estadística desde el punto de vista de la correlación de los datos calculados versus los datos observados.

Fruto de este análisis obtuvimos los siguientes gráficos que nos muestran niveles altos de correlación justamente en el modelo semi-empírico, ITU y las pérdidas de espacio libre [21].

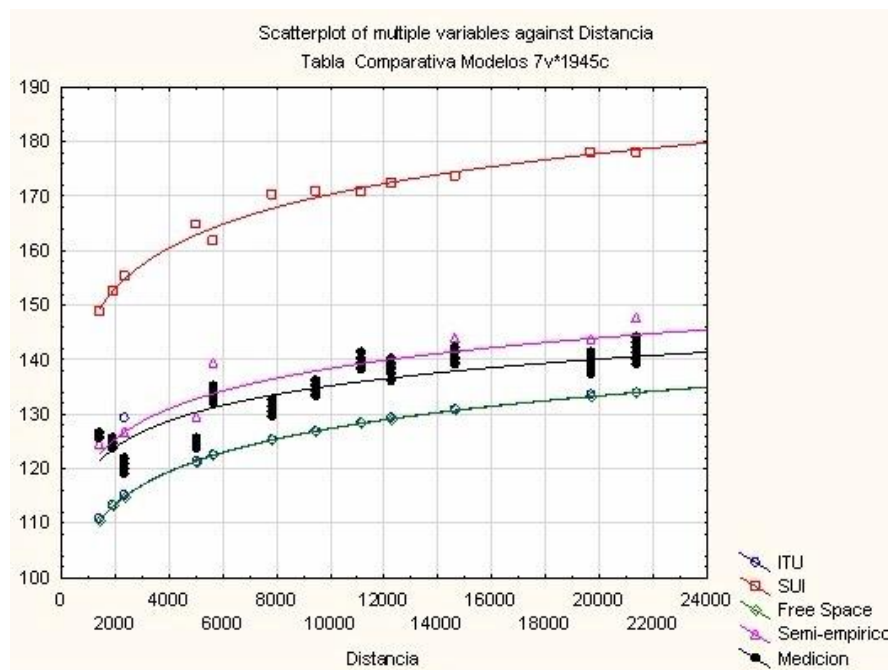


Figura 3.15: Comparativa de Modelos de propagación.

Como se puede observar en el último gráfico el coeficiente de correlación entre el modelo semi-empírico y los datos obtenidos experimentalmente es igual a 0,94674. Lo que implica la correlación más fuerte entre datos observados y

calculados. Es importante recalcar que esto fue calculado con un intervalo del 95% de Intervalo de confianza, desde el punto de vista estadístico.

No obstante, podemos también tener una mejor idea del desempeño de cada modelo y evaluar el desempeño del modelo utilizado y los parámetros obtenidos recurriendo a la raíz del error medio cuadrático (RMSE, Root Mean Square Error) para los cuatro casos de medición considerados en las figuras y tablas precedentes.

La RMSE evalúa la diferencia entre los valores estimados por cada modelo y los valores observados en el ambiente objeto de este estudio, en el que está siendo aplicado el modelo y se determina a partir de [33]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{medidos} - X_{estimados})^2}{n}} \quad (3.4)$$

Donde:

$X_{medidos}$ = Valores observados o medidos.

$X_{estimados}$ = Valores predichos o estimados.

n = Número total de puntos de medición.

Modelo de Propagacion	RMSE (dB)
ITU	9,012959
SUI	34,13226
Espacio Libre	9,095596
Modelo Semiempirico	3,727769

Tabla 3.4: Raíz del error medio cuadrático por modelo de propagación Analizado (RMSE)

Nótese en la formula que el valor se obtiene sumando todas las diferencias entre cada una de las mediciones realizadas menos los valores estimado, luego se eleva al cuadrado para eliminar la distorsión de valores negativos y se divide para el número de mediciones, para finalmente aplicar la raíz cuadrada y obtener un valor muy similar a lo que podríamos llamar coloquialmente como “un promedio de los errores”. En este caso este cálculo fue realizado de manera directa usando la hoja electrónica Excel.

De esta última tabla podemos interpretar que el error esperado medido en decibelios para nuestro modelo usando los parámetros obtenidos estará por debajo de los 4 decibelios, mientras que todos los otros modelos analizados tienen errores superiores a los 9 decibelios en las circunstancias analizadas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. En base a la observación comparativo de los valores obtenidos experimentalmente y las predicciones tanto del modelo ITU como de los otros modelos, podemos concluir que existen apreciables diferencias entre lo que los modelos analizados predicen y los resultados experimentales medidos. Aunque no resulta sencillo descubrir el origen de esas diferencias [21].
2. Los resultados experimentales nos permitieron obtener valores concretos de los parámetros de un modelo empírico que se acerca con un grado de confianza cercano al 90% a los valores originalmente medidos.
3. Que las mediciones a gran distancia se ajustan mejor al modelo que las mediciones a una distancia corta, probablemente debido a la influencia de los efectos físicos en las ondas debido a los obstáculos en la parte urbana del cantón donde se realizaron estas mediciones.
4. Que a través de las mediciones y el uso de un software estadístico que nos permita realizar regresiones, podemos elaborar un modelo empírico que, al ser un modelo matemático realizado a la medida de nuestra realidad, se acerca mucho más a los valores medidos que otro modelo teórico o empírico.
5. Se puede concluir que para enlaces del tipo punto multipunto a 5Ghz y en las condiciones que le corresponden a este estudio es decir entre uno y veinte kilómetros, el modelo usado en la ITU-530 se desempeña en extremo cercano a las pérdidas de espacio libre.
6. Se puede concluir que el modelo Stanford University Interim sobre estima las perdidas en el ambiente y condiciones de este estudio, respecto a las medidas observadas experimentalmente.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar nuevas mediciones de campo en nuevos puntos dentro de la misma infraestructura para revalidar el modelo y poder determinar con qué nivel de efectividad el modelo es capaz de predecir los resultados que se obtendrán en un ambiente similar en sitios diferentes que los analizados en este estudio.
2. Incrementar el número de mediciones y análisis sobre entornos rurales enfocados a los servicios fijos inalámbricos, de tal forma que podamos tener predicciones más exactas y modelos más precisos, toda vez que podemos

observar que modelos como ITU-530 y Stanford University Interim tienen importantes diferencias cuando los comparamos con mediciones experimentales de campo.

3. Continuar mediciones, evaluaciones y en general investigaciones, respecto a los efectos de lluvias fuertes y prolongadas sobre las condiciones de propagación, sobre todo tomando en cuenta épocas del año en los que la saturación de agua en el suelo y el nivel freático son altos.
4. Profundizar en futuros estudios sobre la recomendación UIT-R P. 530-16 que habla sobre los “Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa” [21]. debido a que este tipo de aplicaciones, si bien tienen un desempeño cercano a las condiciones de espacio libre, y el modelo usado por esta recomendación ITU es el que más se acerca a los valores observados de los modelos analizados, todavía tiene diferencias apreciables respecto a los valores experimentalmente observados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Del *et al.*, “DISEÑO DE MODELO ESTRATIGRÁFICO DE LAS FORMACIONES CUATERNARIAS DEL SECTOR SEPTENTRIONAL DE LA CUENCA BAJA DEL GUAYAS,” 2015.
- [2] “home – Instituto Nacional de Estadística y Censos.” [Online]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/>. [Accessed: 28-Jan-2018].
- [3] V. Ojeda and A. Vinuesa, “ANÁLISIS COMPARATIVO TÉCNICO ECONÓMICO Y REGULATORIO DE UNA RED QUE PROVEA LA COBERTURA DE SERVICIOS DE TELEFONÍA EN EL RECINTO BAJADA DE CHANDUY DE LA PROVINCIA DEL GUAYAS,” 2017.
- [4] Ministerio de Telecomunicaciones del Ecuador, “Estadísticas de Telecomunicaciones / Internet Fijo y Móvil.” [Online]. Available: <https://observatoriotic.mintel.gob.ec/estadistica/>. [Accessed: 03-Feb-2018].
- [5] M. Molina, “MODELO DE PROPAGACIÓN PARA LA CIUDAD DE CUENCA (ECUADOR), EN REDES WLAN OPERANDO EN 2.4 GHz Y 5.8 GHz, EN AMBIENTES EXTERIORES,” 2017.
- [6] V. S. Abhayawardhana, I. J. Wassell, D. Crosby, M. P. Sellars, and M. G. Brown, “Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems,” *2005 IEEE 61st Veh. Technol. Conf.*, vol. 1, no. c, pp. 73–77, 2005.
- [7] P. G. Nelson, H. Jorge, U. J. Rafael, and B. P. José, “MODELO DE PROPAGACIÓN EN LAS CIUDADES DE MÉRIDA (VENEZUELA) Y CÚCUTA (COLOMBIA) PARA REDES WLAN, OPERANDO EN 2.4 GHz, EN AMBIENTES EXTERIORES WLAN PROPAGATION MODEL

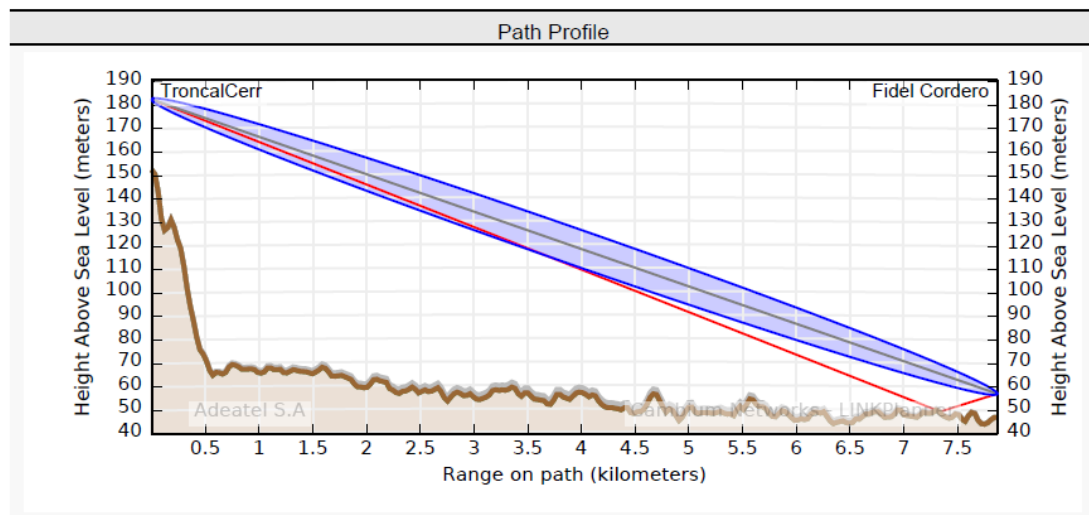
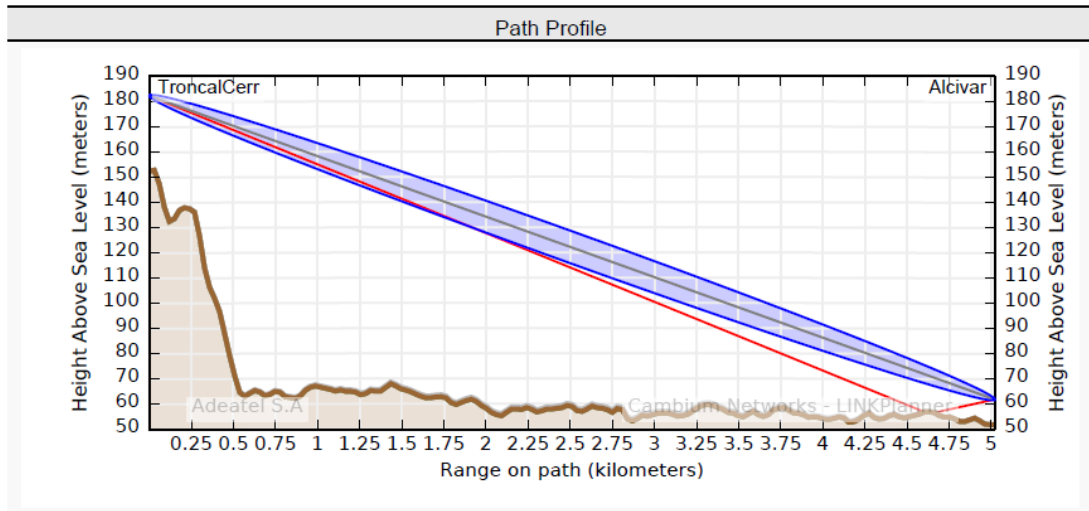
IN MERIDA (VENEZUELA) AND CUCUTA (COLOMBIA) CITIES, OPERATING AT 2.4 GHz IN EXTERIOR ENVIR,” pp. 54–64, 2012.

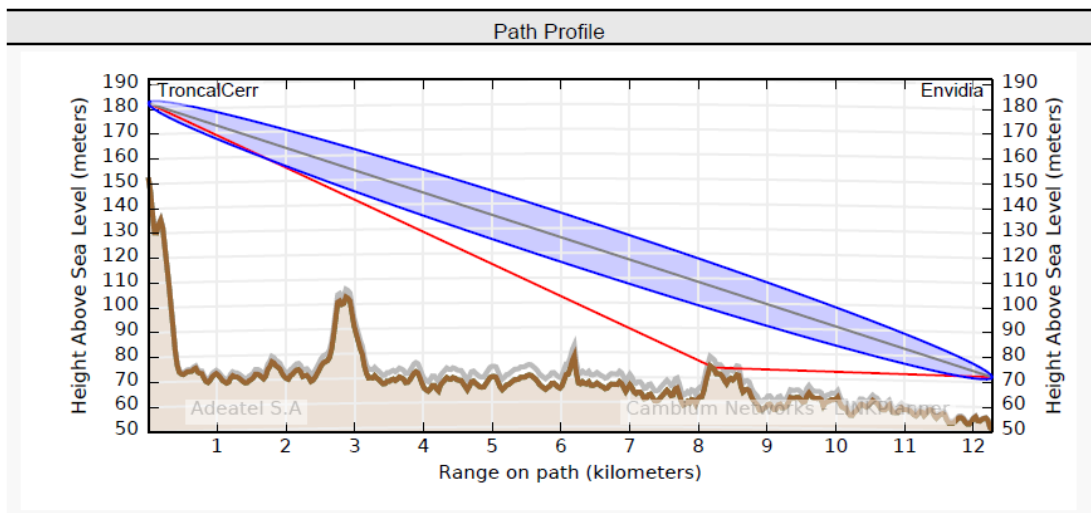
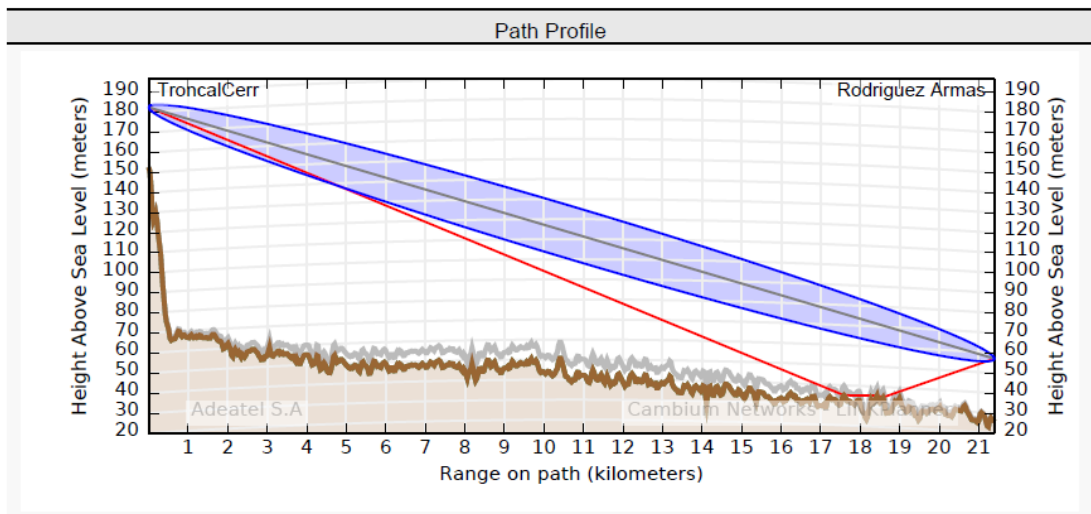
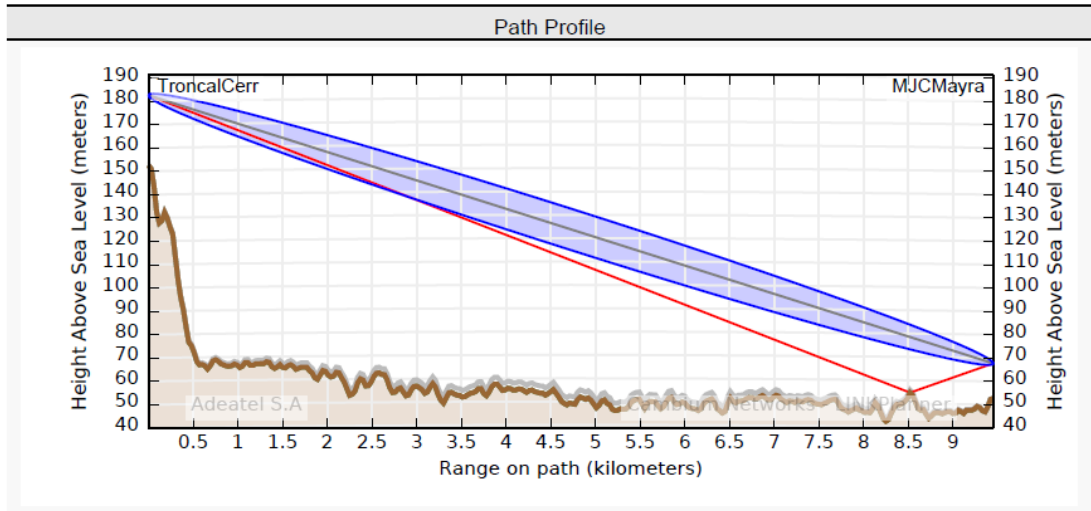
- [8] wikipedia, “Difracción (física) - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Difracci3n_\(f3sica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Difracci3n_(f3sica)). [Accessed: 20-Jan-2018].
- [9] “FISICA BASICA: MOVIMIENTO ONDULATORIO.” [Online]. Available: <http://fisicapila.blogspot.com/2015/03/movimiento-ondulatorio.html>. [Accessed: 13-Feb-2018].
- [10] J. Lekner, *Theory of reflection : of electromagnetic and particle waves*. M. Nijhoff, 1987.
- [11] “Fen3menos ondulatorios. ~ F3SICA II.” [Online]. Available: <http://farafisica.blogspot.com/2014/12/fenomenos-ondulatorios.html>. [Accessed: 13-Feb-2018].
- [12] “Dispersi3n (f3sica) - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi3n_\(f3sica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi3n_(f3sica)). [Accessed: 20-Jan-2018].
- [13] Cisco, “Multiple Trayectoria.”
- [14] “Perdidas en espacio libre | Wifisafe.” [Online]. Available: <https://www.wifisafe.com/blog/perdidas-en-espacio-libre/>. [Accessed: 13-Feb-2018].
- [15] J. Wiley and & Sons, *The Mobile Radio Propagation Channel.*, Second. London: Parsons J.D., 2000.
- [16] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice.*, Second. Prentice Hall, 2002.
- [17] Cambium Networks, “Service enablement and growth using purpose-built non-3GPP fixed wireless broadband access as an alternative to Fixed LTE,” 2014.

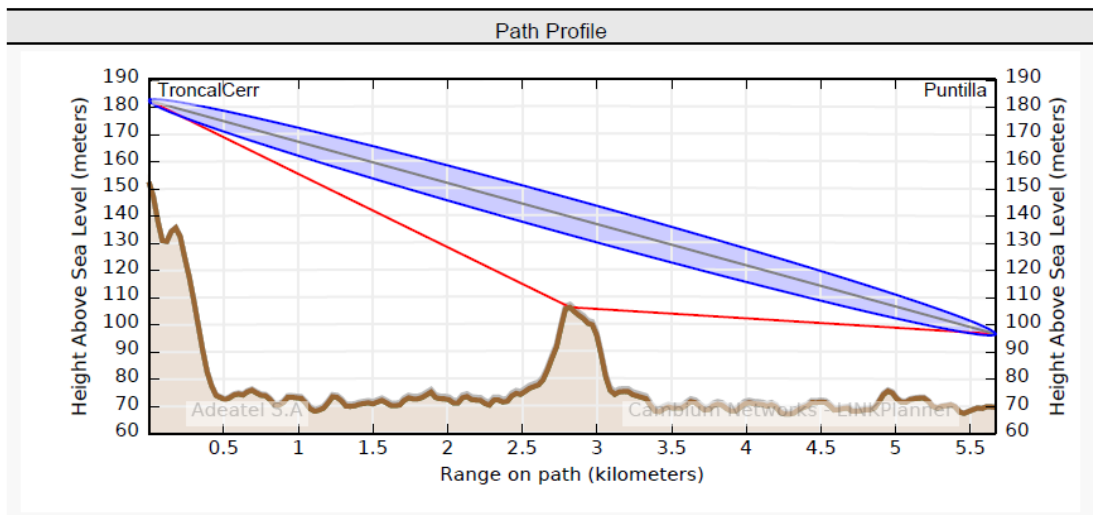
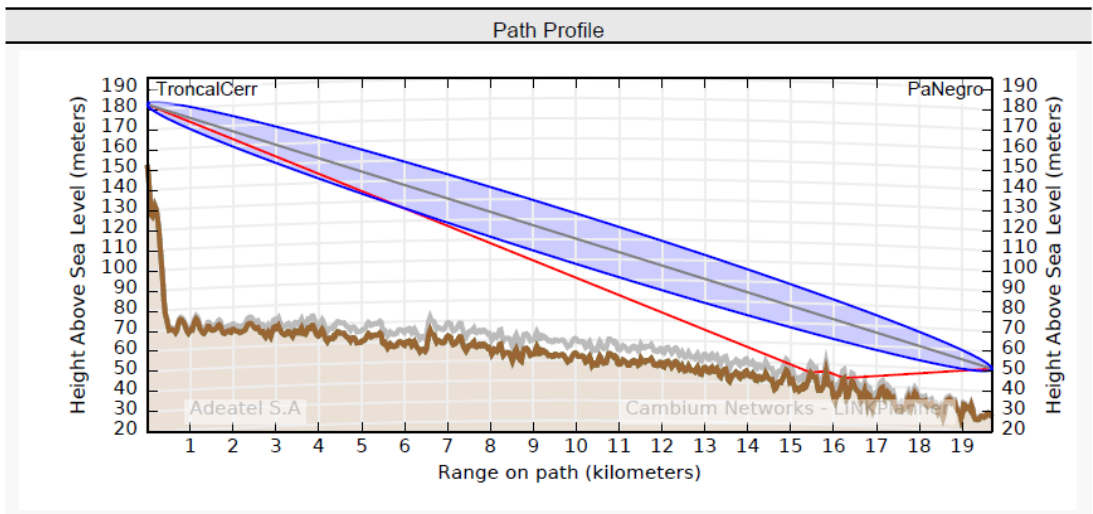
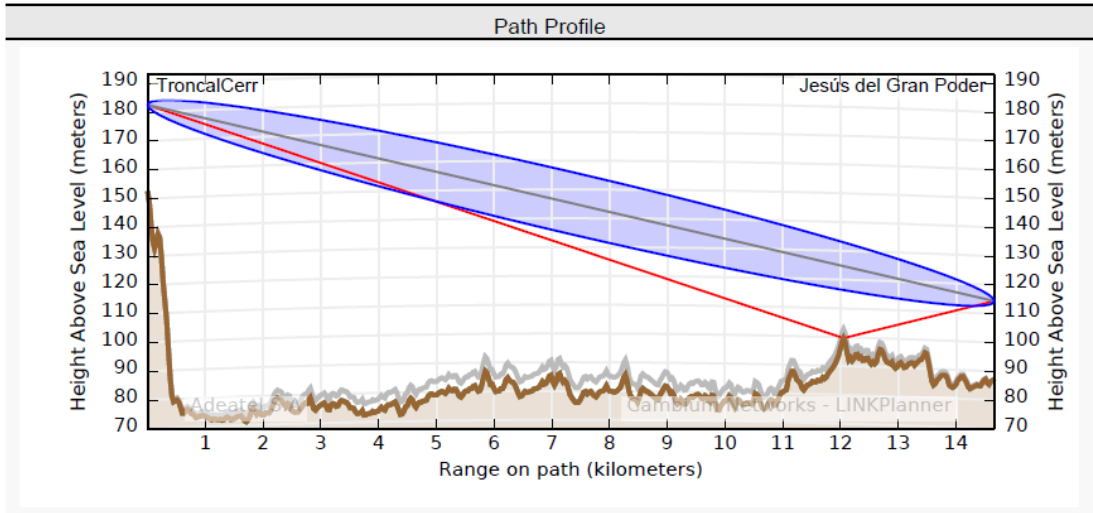
- [18] P. L. Longley, A.G. Rice, "PREDICTION 3F TROPOSPHERIC RADiv TRANSMISSION LOSS OVER IRREGULAR TERRAIN- A COMPUTER METHOD -i1968."
- [19] J. S. Seybold, *Introduction to RF propagation*. Wiley-Interscience, 2005.
- [20] V. Erceg *et al.*, "An empirically-based path loss model for wireless channels in suburban environments," in *IEEE GLOBECOM 1998 (Cat. NO. 98CH36250)*, vol. 2, pp. 922–927.
- [21] U. I. de Telecomunicaciones, "Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa UIT-R P. 530-16," 2015.
- [22] Cambium Networks, "Cambium 450 Platform User Guide."

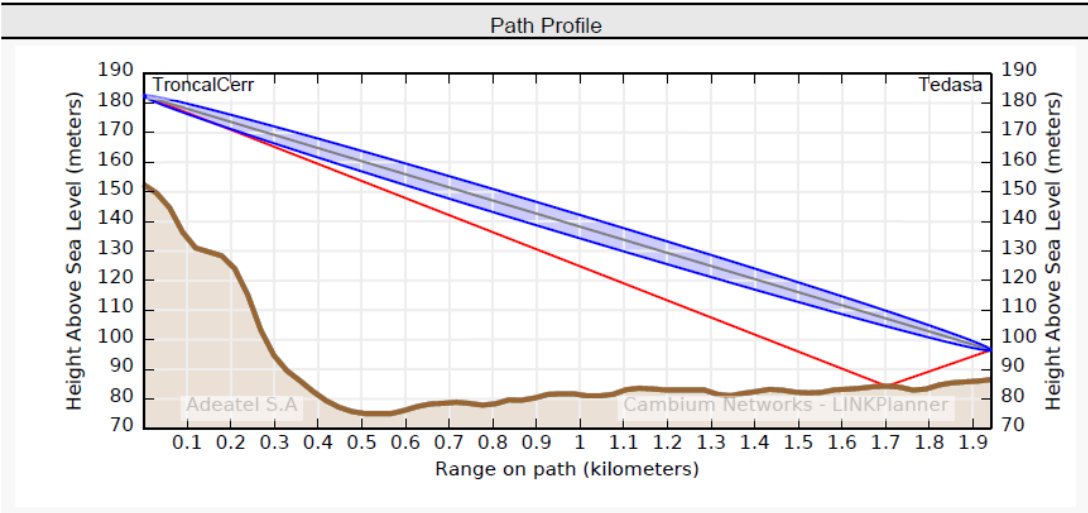
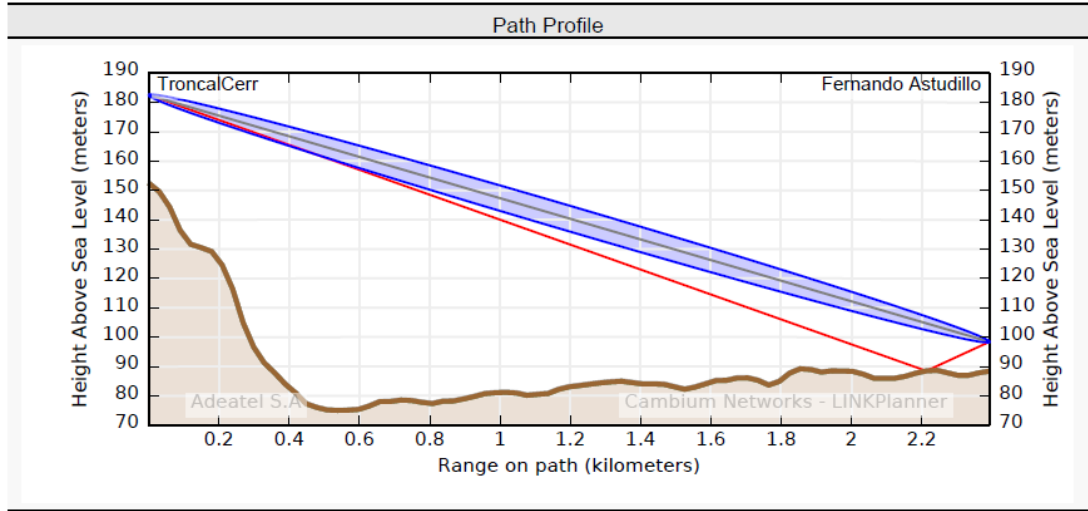
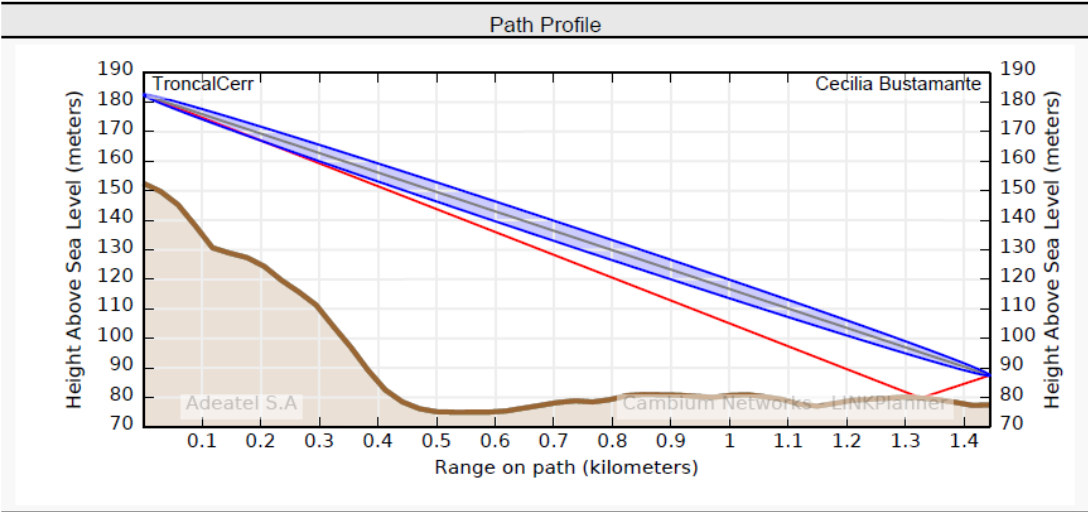
ANEXOS

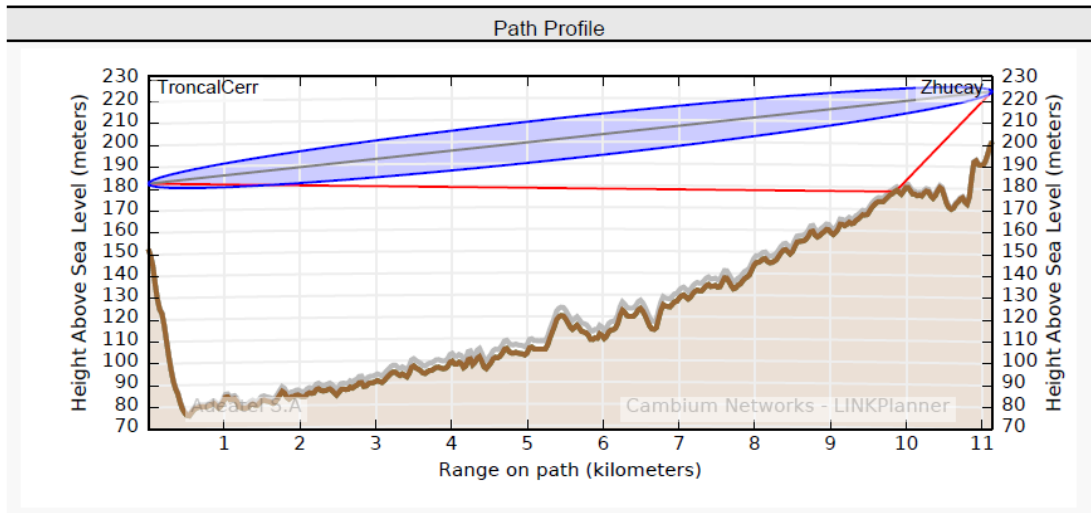
Anexo A1: Perfiles Topográficos por sitio.



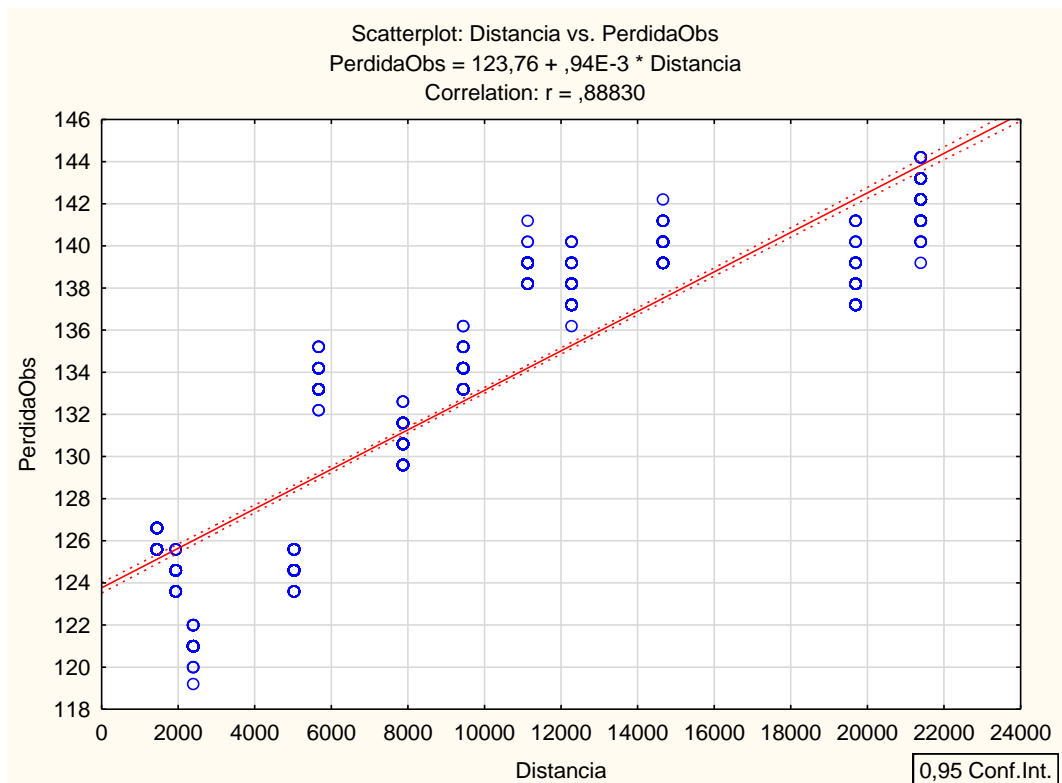








Anexo A2: Tabla de Lecturas Obtenidas



Anexo A3: Especificaciones de los Equipos[22]

Specifications for PMP 450m Series - AP

The PMP 450m AP conforms to the specifications listed in [Table 245](#).

Table 245 PMP 450m Series - AP specifications

Category		Specification
Model Number		PMP 450m AP
Spectrum		
Channel Spacing		Configurable on 2.5 MHz increments
Frequency Range		5150 to 5925 MHz
Channel Bandwidth		5, 10, 15, and 20 MHz
Interface		
MAC (Media Access Control) Layer		Cambium Proprietary
Physical Layer		14x14 Multi-User MIMO OFDM
Ethernet Interface		100/1000BaseT, half/full duplex, rate auto negotiated (802.3 compliant)
Protocols Used		IPv4, UDP, TCP, IP, ICMP, Telnet, SNMP, HTTP, FTP
Network Management		HTTP, HTTPS, Telnet, FTP, SNMP v3
VLAN		802.1ad (DVLAN Q-in-Q), 802.1Q with 802.1p priority, dynamic port VID
Sensitivity		
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 5 MHz Channel	5.1 GHz	1x=-101.6 dBm, 2x=-96.2 dBm, 4x=-90.2 dBm, 6x=-84 dBm, 8x=-76.6 dBm
	5.2 GHz	1x=-101.3 dBm, 2x=-96.3 dBm, 4x=-89.7 dBm, 6x=-83.3 dBm, 8x=-75.7 dBm
	5.4 GHz	1x=-101.1 dBm, 2x=-96.8 dBm, 4x=-90 dBm, 6x=-83.9 dBm, 8x=-76.2 dBm

Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 10 MHz Channel	5.1 GHz	1x=-99 dBm, 2x=-94.6 dBm, 4x=-87.8 dBm, 6x=-81.6 dBm, 8x=-74.6 dBm
	5.2 GHz	1x=-98.8 dBm, 2x=-93.8 dBm, 4x=-87.6 dBm, 6x=-81.4 dBm, 8x=-73.6 dBm
	5.4 GHz	1x=-98.1 dBm, 2x=-94.1 dBm, 4x=-87.5 dBm, 6x=-81.5 dBm, 8x=-73.8 dBm
	5.8 GHz	1x=-98.5 dBm, 2x=-93.6 dBm, 4x=-87.5 dBm, 6x=-81.2 dBm, 8x=-73.7 dBm
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 15 MHz Channel	5.1 GHz	1x=-97.3 dBm, 2x=-92.5 dBm, 4x=-86.3 dBm, 6x=-79.9 dBm, 8x=-72.9 dBm
	5.2 GHz	1x=-96.7 dBm, 2x=-91.9 dBm, 4x=-85.7 dBm, 6x=-79.5 dBm, 8x=-72.5 dBm
	5.4 GHz	1x=-96.2 dBm, 2x=-92.1 dBm, 4x=-85.5 dBm, 6x=-79.4 dBm, 8x=-72.4 dBm
	5.8 GHz	1x=-97.2 dBm, 2x=-92.4 dBm, 4x=-85.5 dBm, 6x=-79.4 dBm, 8x=-72.5 dBm
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 20 MHz Channel	5.1 GHz	1x=-96.3 dBm, 2x=-91.9 dBm, 4x=-85.3 dBm, 6x=-79.3 dBm, 8x=-71.3 dBm
	5.2 GHz	1x=-95.8 dBm, 2x=-91.8 dBm, 4x=-84.8 dBm, 6x=-78.8 dBm, 8x=-71.8 dBm
	5.4 GHz	1x=-95.1 dBm, 2x=-91.4 dBm, 4x=-84.8 dBm, 6x=-78.3 dBm, 8x=-71.1 dBm
	5.8 GHz	1x=-95.8 dBm, 2x=-91.3 dBm, 4x=-84.7 dBm, 6x=-78.3 dBm, 8x=-70.8 dBm
Performance		
Subscriber Per Sector	Up to 238	
ARQ	Yes	
Cyclic Prefix	1/16	
Frame Period	2.5 ms	

Specifications for PMP 450i Series - SM

The PMP 450i SM conforms to the specifications listed in [Table 247](#).

Table 247 PMP 450i Series - SM specifications

Category		Specification
Model Number		PMP 450i SM
Spectrum		
Channel Spacing		5, 7, 10, 15, 20, 30, and 40 Channel Bandwidth Configurable on 2.5 MHz increments
Frequency Range		3300 – 3900 MHz 4900 - 5925 MHz
Channel Bandwidth	3300 – 3900 MHz	5, 7, 10, 15, 20, 30, and 40 MHz
	4900 – 5925 MHz	5, 10, 15, 20, 30, and 40 MHz
Interface		
MAC (Media Access Control) Layer		Cambium Proprietary
Physical Layer		2x2 MIMO OFDM
Ethernet Interface		10/100/1000BaseT, half/full duplex, rate auto negotiated (802.3 compliant)
Protocols Used		IPv4, UDP, TCP, IP, ICMP, Telnet, SNMP, HTTP, FTP
Network Management		HTTP, HTTPS, Telnet, FTP, SNMP v2c and v3
VLAN		802.1ad (DVLAN Q-in-Q), 802.1Q with 802.1p priority, dynamic port VID
Sensitivity		
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 5 MHz Channel	3.5 GHz	1x = -92.6 dBm, 2x = -89.22 dBm, 4x = -83.19 dBm, 6x = -76.5 dBm, 8x = -69.1 dBm
	3.6 GHz	1x = -92 dBm, 2x = -88.08 dBm, 4x = -82.3 dBm, 6x = -75.9 dBm, 8x = -68.6 dBm

	5.4 GHz	1x = -93 dBm, 2x = -89.1 dBm, 4x = -81.5 dBm, 6x = -74.8 dBm, 8x = -67.4 dBm
	5.8 GHz	1x = -92 dBm, 2x = -88.3 dBm, 4x = -80.8 dBm, 6x = -74 dBm, 8x = -66.2 dBm
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 7 MHz Channel	3.5 GHz	1x = -92 dBm, 2x = -88.4 dBm, 4x = -81.4 dBm, 6x = -75.37 dBm, 8x = -68.1 dBm
	3.6 GHz	1x = -91.02 dBm, 2x = -87.87 dBm, 4x = -80.82 dBm, 6x = -73.6 dBm, 8x = -67.32 dBm
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 10 MHz Channel	3.5 GHz	1x = -90.787 dBm, 2x = -86.6 dBm, 4x = -80.2 dBm, 6x = -73.52 dBm, 8x = -66.34 dBm
	3.6 GHz	1x = -89.8 dBm, 2x = -86 dBm, 4x = -79.84 dBm, 6x = -72.92 dBm, 8x = -66 dBm
	4.9 GHz	1x = -90.2 dBm, 2x = -85.2 dBm, 4x = -78.8 dBm, 6x = -71.4 dBm, 8x = -64.5 dBm
	5.4 GHz	1x = -90 dBm, 2x = -85.8 dBm, 4x = -78.5 dBm, 6x = -72.2 dBm, 8x = -65.8 dBm
	5.8 GHz	1x = -89.9 dBm, 2x = -84.9 dBm, 4x = -78.5 dBm, 6x = -71.2 dBm, 8x = -63.8 dBm
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 15 MHz Channel	3.5 GHz	1x = -88.57 dBm, 2x = -84.5 dBm, 4x = -78.4 dBm, 6x = -71.47 dBm, 8x = -65.22 dBm
	3.6 GHz	1x = -87.6 dBm, 2x = -84.1 dBm, 4x = -77.1 dBm, 6x = -71.03 dBm, 8x = -64.8 dBm
	4.9 GHz	1x = -88.2 dBm, 2x = -83.1 dBm, 4x = -76.9 dBm, 6x = -70.5 dBm, 8x = -62.3 dBm
	5.4 GHz	1x = -87.7 dBm, 2x = -83.9 dBm, 4x = -76.6 dBm, 6x = -70.4 dBm, 8x = -63 dBm
	5.8 GHz	1x = -88 dBm, 2x = -82.9 dBm, 4x = -76.7 dBm, 6x = -69.4 dBm, 8x = -62.3 dBm

Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 20 MHz Channel	4.9 GHz	1x = -87 dBm, 2x = -81.8 dBm, 4x = -75.8 dBm, 6x = -68.5 dBm, 8x = -61.4 dBm
	5.4 GHz	1x = -87 dBm, 2x = -82.8 dBm, 4x = -75.6 dBm, 6x = -69.3 dBm, 8x = -61.6 dBm
	5.8 GHz	1x = -85.9 dBm, 2x = -81.5 dBm, 4x = -74.8 dBm, 6x = -68.7 dBm, 8x = -61.2 dBm
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 30 MHz Channel	3.5 GHz	1x = -86 dBm, 2x = -80.9 dBm, 4x = -75 dBm, 6x = -67.9 dBm, 8x = -61.1 dBm
	3.6 GHz	1x = -85.5 dBm, 2x = -80.6 dBm, 4x = -74.5 dBm, 6x = -67.5 dBm, 8x = -61 dBm
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 30 MHz Channel	4.9 GHz	1x = -84.9 dBm, 2x = -80.9 dBm, 4x = -73.2 dBm, 6x = -67.4 dBm, 8x = -59.3 dBm
	5.4 GHz	1x = -85.2 dBm, 2x = -80.2 dBm, 4x = -74.1 dBm, 6x = -67.9 dBm, 8x = -59.8 dBm
	5.8 GHz	1x = -84.9 dBm, 2x = -80 dBm, 4x = -73.2 dBm, 6x = -67.4 dBm, 8x = -59.4 dBm
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 40 MHz Channel	3.5 GHz	1x = -83.2 dBm, 2x = -79 dBm, 4x = -72.4 dBm, 6x = -66 dBm, 8x = -58.4 dBm
	3.6 GHz	1x = -82.5 dBm, 2x = -79 dBm, 4x = -71.3 dBm, 6x = -65.4 dBm, 8x = -58.3 dBm
	4.9 GHz	1x=-84.2 dBm, 2x=-79.3 dBm, 4x=-72.3 dBm, 6x=-66 dBm, 8x=-56.8 dBm
	5.4 GHz	1x=-84.2 dBm, 2x=-79.1 dBm, 4x=-73.1 dBm, 6x=-66 dBm, 8x=-56.9 dBm
	5.8 GHz	1x=-83.6 dBm, 2x=-78.7 dBm, 4x=-72.5 dBm, 6x=-66.4 dBm, 8x=-56.3 dBm

Performance

ARQ	Yes
Cyclic Prefix	1/16

Page 10-14

Chapter 10: Reference Information

Equipment specifications

Frame Period	2.5 ms or 5.0 ms		
Modulation Levels (Adaptive)	Modulation Levels	MCS	SNR (in dB)
	2x	QPSK	10
	4x	16QAM	17
	6x	64QAM	24
	8x	256QAM	32
Latency	3 - 5 ms		
Maximum Deployment Range	Up to 40 miles (64 km)		
GPS Synchronization	Yes, via Autosync (CMM4)		
Quality of Service	Diffserv QoS		
Link Budget			
Antenna Beam Width	10° azimuth for 23 dBi integrated antenna		
Antenna Gain (Does not include cable loss, -1dB)	5 GHz	+23 dBi H+V, integrated or external	
	3 GHz	+19 dBi dual slant, integrated or external	

Specifications for PMP 450b Series - SM

The PMP 450b SM conforms to the specifications listed in [Table 247](#).

Table 249 PMP 450b Series - SM specifications

Category	Specification
Model Number	PMP 450b SM
Spectrum	
Channel Spacing	Configurable in 2.5 MHz increments
Frequency Range	4900 - 5925 MHz
Channel Bandwidth	5, 10, 15, 20, 30, and 40 MHz
Interface	
MAC (Media Access Control) Layer	Cambium Proprietary
Physical Layer	2x2 MIMO OFDM
Ethernet Interface	100/1000BaseT, half/full duplex, rate auto negotiated (802.3 compliant)
Protocols Used	IPv4, UDP, TCP, IP, ICMP, Telnet, SNMP, HTTP, FTP
Network Management	HTTP, HTTPS, Telnet, FTP, SNMP v2c and v3
VLAN	802.1ad (DVLAN Q-in-Q), 802.1Q with 802.1p priority, dynamic port VID

Sensitivity		
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 5 MHz Channel	4.9 GHz	1x = -92.5 dBm, 2x = -88.5 dBm, 4x = -81 dBm, 6x = -74.2 dBm, 8x = -66 dBm
	5.1 GHz	1x = -93 dBm, 2x = -89.1 dBm, 4x = -81.5 dBm, 6x = -74.8 dBm, 8x = -67.4 dBm
	5.2 GHz	1x = -92 dBm, 2x = -88.3 dBm, 4x = -80.8 dBm, 6x = -74 dBm, 8x = -66.2 dBm
	5.4 GHz	1x = -93 dBm, 2x = -89.1 dBm, 4x = -81.5 dBm, 6x = -74.8 dBm, 8x = -67.4 dBm
	5.8 GHz	1x = -92 dBm, 2x = -88.3 dBm, 4x = -80.8 dBm, 6x = -74 dBm, 8x = -66.2 dBm
	4.9 GHz	1x = -90.2 dBm, 2x = -85.2 dBm, 4x = -78.8 dBm, 6x = -71.4 dBm, 8x = -64.5 dBm

Page 10-21

Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 10 MHz Channel	5.1 GHz	1x = -90 dBm, 2x = -85.8 dBm, 4x = -78.5 dBm, 6x = -72.2 dBm, 8x = -65.8 dBm
	5.2 GHz	1x = -89.9 dBm, 2x = -84.9 dBm, 4x = -78.5 dBm, 6x = -71.2 dBm, 8x = -63.8 dBm
	5.4 GHz	1x = -90 dBm, 2x = -85.8 dBm, 4x = -78.5 dBm, 6x = -72.2 dBm, 8x = -65.8 dBm
	5.8 GHz	1x = -89.9 dBm, 2x = -84.9 dBm, 4x = -78.5 dBm, 6x = -71.2 dBm, 8x = -63.8 dBm

Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 15 MHz Channel	4.9 GHz	1x = -88.2 dBm, 2x = -83.1 dBm, 4x = -76.9 dBm, 6x = -70.5 dBm, 8x = -62.3 dBm
	5.1 GHz	1x = -87.7 dBm, 2x = -83.9 dBm, 4x = -76.6 dBm, 6x = -70.4 dBm, 8x = -63 dBm
	5.2 GHz	1x = -88 dBm, 2x = -82.9 dBm, 4x = -76.7 dBm, 6x = -69.4 dBm, 8x = -62.3 dBm
	5.4 GHz	1x = -87.7 dBm, 2x = -83.9 dBm, 4x = -76.6 dBm, 6x = -70.4 dBm, 8x = -63 dBm
	5.8 GHz	1x = -88 dBm, 2x = -82.9 dBm, 4x = -76.7 dBm, 6x = -69.4 dBm, 8x = -62.3 dBm
Nominal Receive Sensitivity (w/ FEC) @ 20 MHz Channel	4.9 GHz	1x = -87 dBm, 2x = -81.8 dBm, 4x = -75.8 dBm, 6x = -68.5 dBm, 8x = -61.4 dBm
	5.1 GHz	1x = -87 dBm, 2x = -82.8 dBm, 4x = -75.6 dBm, 6x = -69.3 dBm, 8x = -61.6 dBm
	5.2 GHz	1x = -85.9 dBm, 2x = -81.5 dBm, 4x = -74.8 dBm, 6x = -68.7 dBm, 8x = -61.2 dBm
	5.4 GHz	1x = -87 dBm, 2x = -82.8 dBm, 4x = -75.6 dBm, 6x = -69.3 dBm, 8x = -61.6 dBm
	5.8 GHz	1x = -85.9 dBm, 2x = -81.5 dBm, 4x = -74.8 dBm, 6x = -68.7 dBm, 8x = -61.2 dBm
	4.9 GHz	1x = -84.9 dBm, 2x = -80.9 dBm, 4x = -73.2 dBm, 6x = -67.4 dBm, 8x = -59.3 dBm