

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación

“DISEÑO DE MODELO DE PROPAGACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA
WIFI EN 5 GHZ.”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Nombre de la titulación

INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

Presentado por:

Rogger Daniel Jiménez Silva

Karen Roxana Morán Andrade

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

DEDICATORIA

A Dios, quien me guía, ilumina y bendice, me da fuerza día a día en el camino hacia las metas trazadas.

A mis padres por su amor, sacrificio, esfuerzo abnegado y ayuda incondicional que me acompañaron durante estos años, desde el inicio hasta la culminación de mi vida académica, gracias a ustedes he llegado hasta aquí.

A mis hermanos por estar presentes con su apoyo moral, incentivando a continuar en esta dura carrera de formación académica.

Rogger

El presente trabajo es dedicado a las personas que estuvieron durante mi carrera universitaria, por su fiel compromiso y confianza en este trayecto de mi vida, en especial a mi madre por su gran esfuerzo y apoyo incondicional.

A mis hermanos por estar presentes con su apoyo moral, incentivándome a continuar en esta dura carrera de formación académica.

Karen

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos los conocidos y amigos por sus palabras de aliento como motivación y desafío a hacer las cosas con excelencia, a los maestros que impartieron sus enseñanzas a lo largo de mi vida académica. De manera especial al Dr. Boris Ramos, quien impartió sus conocimientos como profesor y fue guía de nuestro proyecto de graduación como tutor de este. Al Ing. Mario Crespo por su valioso aporte para la culminación nuestro proyecto. A la Ing. Maricela Freire por su paciencia, entrega a sus estudiantes.

Rogger

Agradezco a mi madre por estar conmigo en estos cinco años que duró mi carrera universitaria, por ser pilar fundamental para cumplir todas mis metas y por estar presente en los buenos y malos momentos. De manera especial a la Ing. Maricela Freire que con sus conocimientos siempre estaba predispuesta a ayudarnos para la elaboración de este trabajo de titulación, a el Dr. Boris Ramos que sus consejos fueron de mucha ayuda para finalizar nuestro proyecto.

Karen

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; y damos nuestro 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”

Rogger Daniel Jiménez Silva

Karen Roxana Morán Andrade

EVALUADORES

Dra. Maria Antonieta Álvarez

PROFESOR DE LA MATERIA

Dr. Boris Ramos

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Para diseñar un sistema de radiocomunicaciones, la forma más efectiva de predecir las pérdidas en el camino es modelar el canal de señal inalámbrica que se está transmitiendo. En este proyecto, se hace un estudio comparativo de los modelos de propagación, tales como: ikegamy modelo Walfich, Okumura Hata, y el modelo Ericsson 999, que es el desarrollo de un modelo de propagación empíricamente.

Para validar este tipo de modelo de propagación, se debe tener en cuenta el tipo de terreno, su topografía y los puntos donde se analizarán los niveles de potencia de la señal; se escogió un nodo ubicado en el cerro de La Troncal (cerca de la cuenca de Guayas) por las características que representa en la cual se medirán las señales recibidas de las redes WLAN que operan en la banda de 5 GHz. Estas mediciones se realizarán durante un treinta días, de forma continua para varios usuarios, generando una base de datos mucho más concisa que analiza varios puntos de medición con una ventana de tiempo de cinco minutos por cada medición que será mucho más precisa para el diseño del modelo de propagación.

Se utilizó un software de simulación (LINKPlaner) que permite simular el enlace punto a punto (PTP) entre la antena transmisora y la antena receptora. El propósito de simular los múltiples enlaces ubicados en el área o sector a analizar es obtener una mejor predicción sobre las pérdidas del camino que se tienen de cada enlace con el fin de poder estimar esos valores en el modelo semi-empírico.

Durante los treinta días de medición se obtuvieron 34913 mediciones utilizando la plataforma cnMaestro de Cambium Networks, proveedor internacional de soluciones inalámbricas de banda ancha. Para obtener el proceso de regresión lineal con los datos medidos para la evaluación del área de cobertura lineal se hizo uso de un software estadístico (Statistica).

Se hizo la comparación del rendimiento del nuevo modelo de propagación, utilizando una métrica conocida como Error cuadrático medio (RMSE), con el rendimiento presentado

por algunos de los modelos existentes en la literatura de las telecomunicaciones para ambientes exteriores.

Palabras Clave: Radiocomunicaciones, canal inalámbrico, semi-empírico, RMSE.

ABSTRACT

For the design of a radio communication system, the most effective way to predict losses on the road is to model the wireless signal channel that is being transmitted. In this project, a comparative study of propagation models is made, such as: Ikegami Walfisch model, Okumura Hata, and the Ericsson 999 model, which is the development of an empirically propagated model.

To validate this type of propagation model, one must take into account the type of terrain, its topography and the points where the signal power levels will be analyzed; a node located in the La Troncal hill (near the Guayas river basin) was chosen for the characteristics it represents, in which the signals received from the WLANs operating in the 5 GHz band will be measured. These measurements will be made for thirty days, continuously for several users, generating a much more concise database that analyzes several measurement points with a time window of five minutes for each measurement that will be much more accurate for the design of the propagation model.

A simulation software (LINKPlanner) was used to simulate the point-to-point link (PTP) between the transmitting antenna and the receiving antenna. The purpose of simulating the multiple links located in the area or sector to be analyzed is to obtain a better prediction about the losses of the path that each link has in order to be able to estimate these values in the semi-empirical model.

During the thirty days of measurement, 34913 measurements were obtained using the cnMaestro platform of Cambium Networks, an international provider of wireless broadband solutions. For the process of linear regression with measured data for the evaluation of linear coverage area it made use of a statistical software (Statistica).

The comparison was made of the performance of the new propagation model using a metric known as mean square error (RMSE), with the performance presented by some of those in the literature of telecommunications for outdoor environments models.

Keywords: Radiocommunications, wireless, semi-empirical channel, RMSE.

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
RDSI	Red Digital de Servicios Integrados
RFID	Radio Frequency Identification
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
TIC	Tecnología de la Información y Comunicaciones
IoT	Internet of Things
WLAN	Wireless Local Area Network
MINTEL	Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones
ISP	Proveedores de Servicio de Internet
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

SIMBOLOGÍA

Kbps	Kilo bit por segundo.
dB	decibelios.
GHz	Giga Hertz.
KHz	Kilo Hertz.
dBi	Decibelios isotrópico.
dBm	Decibelio milivatio.
Km	Kilómetro.
f	Frecuencia

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Acceso de servicio de internet en los hogares.	3
Figura 1.2: Estadística de acceso de internet en sectores según el área.....	3
Figura 1.3: Pérdida de camino en el espacio libre de un enlace.	8
Figura 2.1: Estructura básica de una red WLAN.	11
Figura 2.2: Ubicación de los puntos receptores desde el punto de vista geográfico.	14
Figura 2.3: Comparativa de valores Observado-distancia de la primera etapa del modelo.	16
Figura 3.1: Modelo del equipo transmisor PMP 450m.....	21
Figura 3.2: Plataforma CnMaestro del Software Cambium Network.	23
Figura 3.3: Plataforma de simulación del Software Link Planner.....	24
Figura 3.4: Comparativa entre el nivel de la señal recibida y la distancia.	26
Figura 3.5: Parámetros obtenidos en la primera etapa de la regresión lineal.....	27
Figura 3.6: Comparativa de valores Observado-Predichos primera etapa del modelo de propagación.....	28
Figura 3.7: Comparativa de valores Observado-distancia de la primera etapa del modelo de propagación.....	29
Figura 3.8: Parámetros obtenidos en la segunda etapa de la regresión lineal.	29
Figura 3.9: Comparativa de modelos de propagación.	31
Figura 3.10: Comparativa de nuevos modelos de propagación propuestos.	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tecnología de Acceso Inalámbrico por Segmento de Banda Ancha.	12
Tabla 2.2: Factor de corrección de la altura del móvil en variación al tipo de ciudad. ...	18
Tabla 2.3: Factor de corrección de la altura del móvil en variación al sector.	19
Tabla 2.4: Factor de corrección para diferentes sectores.....	20
Tabla 3.1: Parámetros de cobertura entre el transmisor-receptor.	22
Tabla 3.2: Parámetros de operación de la antena receptora para el presupuesto de enlace.....	23
Tabla 3.3: Ubicación de los puntos receptores y transmisores para la simulación de los enlaces punto a punto.	25
Tabla 3.4: Comparativo de los modelos de propagación a analizar.	30
Tabla 3.5: Comparativo del RMSE calculado de los modelos de propagación utilizados.	32
Tabla 3.6: Comparativo de los valores medios calculado de los modelos de propagación utilizados.....	34
Tabla 3.7: Comparativo del RMSE calculado de los modelos de propagación utilizados.	34

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción-----	1
1.1. Descripción del problema. -----	2
1.2. Objetivos. -----	5
1.2.1. Objetivo General. -----	5
1.2.2. Objetivos Específicos. -----	5
1.3. Marco teórico. -----	6
1.3.1. Fenómenos fundamentales de un modelo de propagación. -----	6
1.3.2. Sistemas de comunicación inalámbricas. -----	8
2. Parámetros técnicos para el análisis de un medio de propagación para ambientes exteriores. -----	11
2.1. Características de una Red WLAN. -----	11
2.2. Segmentos inalámbricos en banda ancha. -----	12
2.3. Aspectos de propagación en ambientes exteriores para redes WLAN. -----	13
2.3.1. Macrocélulas. -----	17
2.3.2. Hipercélulas -----	19
3. Toma de datos en ambientes exteriores en el sector la Troncal. -----	21
3.1. Parámetros de Equipo Transmisor. -----	21
3.2. Parámetros de Equipo Receptor. -----	22
3.3. Método de toma de datos. -----	23
3.4. Simulación de los enlaces punto a punto. -----	24
3.5. Desarrollo del Modelo de Propagación Semi-empírico.-----	26
3.5.1. Fase de aproximación con relación a la distancia entre el transmisor y receptor. -----	26
3.5.2. Fase de aproximación con relación a la distancia y la altura entre el receptor. -----	29
3.5.3. Medición del grado de precisión del modelo semi-empírico. -----	30
4. Conclusiones y recomendaciones. -----	36
4.1. Conclusiones. -----	36
4.2. Recomendaciones.-----	37
5. Bibliografía-----	38
6. Anexos. -----	39
A1. Datasheet de la antena PMP 450M. -----	39
A2. Simulación punto a punto desde software LINK Planner -----	41

CAPÍTULO 1

1. Introducción

Con el gran desarrollo tecnológico que se presenta en la actualidad, han ido apareciendo nuevas tecnologías las cuales tienen un aporte significativo para el desarrollo del país por la gama de utilidades en las que se puede emplear. Un área de las telecomunicaciones mayormente usadas son las comunicaciones que se dan de manera inalámbrica, pues ofrecen beneficios en la vida cotidiana incluso desplazando los servicios convencionales ya establecidos que son parte de la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI) definida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), tales como llamada de voz y videotelefonía. La tecnología que presenta un mayor abarrotamiento de usuarios es el Wi-Fi, dado que trabaja en dos bandas no licenciadas; una es la banda de 2.4 GHz y la otra es la banda de 5GHz, esto ha generado de cierta manera una saturación en dichas frecuencias.

Desde un punto de vista económico, la tecnología Wi-Fi ha ganado terreno porque es un servicio menos costoso; su mayor auge se ha producido en las zonas urbanas, dejando una gran brecha digital en el sector rural. Sin embargo, hay pequeños sectores que se centra en el área de producción en la que se puede mejorar los servicios de telecomunicaciones utilizando tecnologías ya conocidas como sectores de multiplexación de frecuencia ortogonal (OFDM).

Existe una gama de modelos de propagación, unos se basan en otros previamente existentes, cada uno de estos tiene características a la cual están orientados, entre estos el área rural. Si bien es cierto, los modelos de propagación juegan un papel fundamental en la mejora de tecnologías en comunicaciones inalámbrica, pero a pesar de su gran utilidad no son los más idóneos en todos los sectores, aunque tengan adaptaciones que hagan más fiables sus resultados en diferentes zonas con características específicas [1].

Los modelos de propagación continúan siendo un parámetro de gran importancia para el diseño e implementación de redes inalámbricas. Actualmente, existe una amplia variedad de modelos que difieren en su dominio de aplicación, en términos de bandas de frecuencia, características del entorno y otros parámetros del sistema de transmisión [2].

En base al análisis de este trabajo, se desarrolla un modelo de propagación para entornos al aire libre en la ciudad de La Troncal, Ecuador, basado en las mediciones del nivel de señal recibido en redes WLAN que operan en la banda de frecuencia de 5 GHz.

1.1. Descripción del problema.

En la actualidad, si bien es cierto el crecimiento de la infraestructura de acceso a Internet se ha incrementado a un ritmo considerable a nivel nacional, el impacto tecnológico que esto tiene en la sociedad se hace palpable cuando la población comienza a utilizar todo este desarrollo en su beneficio, tales como: en la creación de nuevos puestos de trabajo, innovación, educación, salud, etc.

El acceso a Internet varía según el tipo de población donde se analiza la muestra, por lo que hay una clara diferencia entre el porcentaje de la población con acceso a internet para diferentes sectores. Tenemos que para el sector urbano el 37% de la población cuentan con acceso a internet en sus hogares, a comparación con el entorno rural con un 9,1%. Estos datos fueron analizados en el 2015 por la Arcotel. Otros factores que contribuyen a estas diferencias incluyen las dificultades geográficas y la falta de rentabilidad para las empresas privadas de invertir en áreas con bajo poder adquisitivo [3].

La Figura 1.1 muestra la información registrada en el censo realizado por el Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información (Mintel), en la que se verifica que el acceso a Internet en los hogares en el 2017 solo ha tenido un pequeño aumento del 1% en relación al año 2016, por lo que no se ha conseguido mayor avance en comparación con los otros años [4].

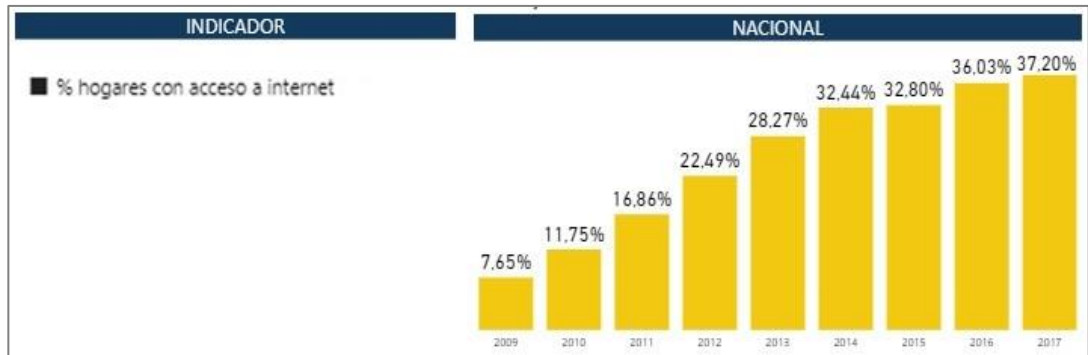


Figura 1.1: Acceso de servicio de internet en los hogares [3].

Sin embargo, si el análisis es por sectores se tiene que para el sector rural, el acceso a Internet hacia los hogares es mucho menor en relación con los sectores urbanos. La figura 1.2, nos muestra que según las estadísticas realizadas por el Mintel, la población con acceso a internet en el sector rural es del 16.62 % a diferencia del sector urbano que han aumentado en un 30% [4].

Para los empresarios proveedores de servicio de internet, se les hace muy difícil llegar a sectores rurales, donde se carece de buena cobertura y poder brindar un servicio de buena calidad a los usuarios que viven en este tipo de regiones.

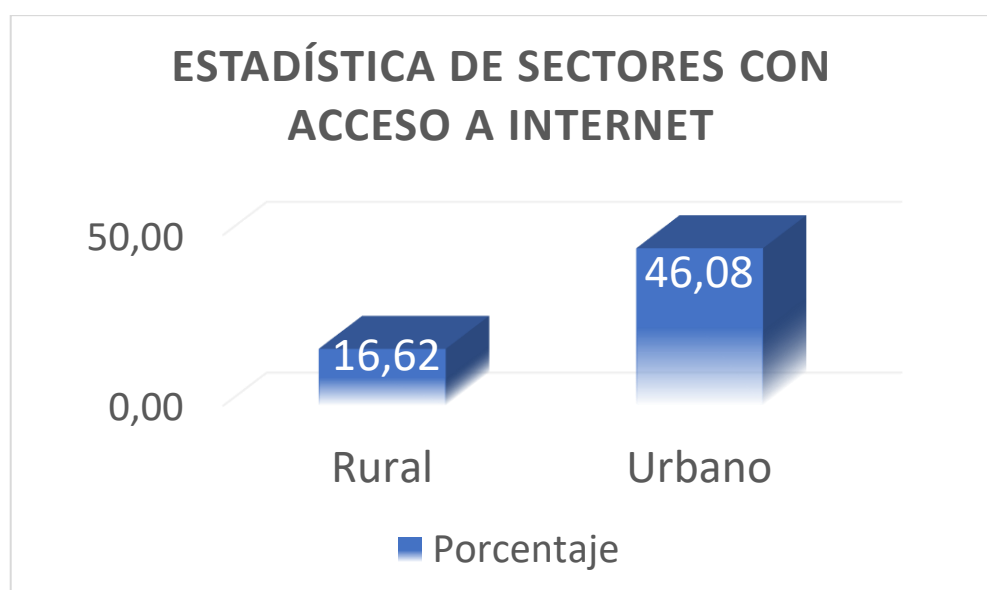


Figura 1.2: Estadística de acceso de internet en sectores según el área [4].

Con el auge tecnológico en la actualidad se puede decir que el uso de internet ya es uno más de los servicios básicos, como tal es necesario que esté al alcance de todos para obtener el máximo beneficio que este puede entregar; es por esta razón que el diseño de un modelo de propagación que se ajuste a las necesidades y características del entorno sería un paso a la solución de este problema, mejorando así la cobertura y teniendo datos más precisos en el momento de hacer una predicción de la señal.

Los modelos de propagación existentes se pueden clasificar de acuerdo con el área de cobertura en dos tipos: los modelos exteriores y los modelos interiores. Para el análisis de este proyecto, los modelos exteriores se tienen en cuenta debido al tamaño del área de cobertura. Los modelos para exteriores se pueden dividir en modelos de propagación en áreas grandes (macrocélulas) y áreas pequeñas (microcélulas). Existen modelos de propagación específicos para ambientes exteriores tales como: Okumura, Okumura-Hata, Young, Cost-231, entre otros. El modelo que se propone como solución puede ser de utilidad en otros ambientes con características similares al sector en el que se está haciendo el análisis, bajo la condición que se trabaje la señal en la banda de 5GHz.

Para diseñar este tipo de modelo de propagación empírico, se debe tomar en cuenta el tipo de terreno, su topografía y los puntos donde se analiza los niveles de potencia de la señal; es decir, se realiza una gama de mediciones de las señales recibidas de las redes WLAN que operan en la banda de 5GHz. Estas mediciones se realizarán durante treinta días en el sector la Troncal (cerca de la cuenca del río Guayas) de forma continua para varios usuarios, generando una base de datos mucho más concisa con 34913 datos de muestra, analizado en varios puntos de recepción con una ventana de tiempo de cinco minutos por cada medición que será mucho más precisa para el diseño del modelo de propagación.

El software estadístico "Statistica", es una herramienta matemática que a través del proceso de regresión lineal, se modela una ecuación que facilite la predicción del comportamiento de la señal a 5 GHz.

Con el desarrollo de este proyecto, se busca brindar a las empresas privadas o los pequeños proveedores de servicio de internet (ISP), la oportunidad de llegar a lugares donde la cobertura es insuficiente pueda realizar inversiones en áreas de difícil acceso y ofrezcan un servicio de mejor calidad a sus clientes.

El presente documento está detallado de la siguiente forma: En el Capítulo 2, se realiza una descripción de las características principales de los modelos de propagación en exteriores, estándares usado por la IEEE para una red WLAN. En el capítulo 3, se hace la recopilación de datos adquiridos con el software cnMaestro, se desarrolla un modelo matemático obteniendo los respectivos resultados de las variables propuestas. En el capítulo 4, se muestran las conclusiones.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo General.

Desarrollar un modelo de propagación empírico, haciendo uso de un software estadístico que permita la realización del proceso de regresión lineal con los datos medidos, para la evaluación del área de cobertura en una zona rural.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Realizar mediciones diarias de la señal recibida en la banda de 5GHz en diferentes puntos durante un mes, usando un equipo de monitoreo con equipos Cambium Networks.
- Examinar el estado de las señales de las redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.11, para la detección de zonas con menor cobertura en zona rural.

- Plantear una expresión matemática que permita la predicción del comportamiento de la señal, haciendo uso de un software estadístico con los datos adquiridos.
- Validar el modelo de propagación diseñado con los modelos ya existentes en la literatura de las telecomunicaciones.

1.3. Marco teórico.

1.3.1. Fenómenos fundamentales de un modelo de propagación.

Los modelos de propagación basan sus resultados de pérdidas de trayecto en tres fenómenos fundamentales, la reflexión, difracción, línea de vista y otros factores que influyen al momento de diseñar un modelo de una red inalámbrica, tales como:

Reflexión

Las ondas con la que se propaga la señal suelen sufrir cierta reflexión cuando se encuentra en su trayecto un obstáculo de dimensiones mucho mayores que su longitud de onda, originando ondas reflejadas que pueden sumarse constructiva o destructivamente en la señal. Generalmente esto ocurre a partir de superficies terrestres como edificios o paredes que obstaculizan la señal, produciendo una atenuación de esta.

Difracción

La difracción se produce cuando el trayecto entre el transmisor y el receptor está obstaculizado por superficies afiladas, esto genera frentes de onda secundarios. Este mecanismo explica la propagación de la señal en sistemas sin línea de vista. El fenómeno de la difracción ocurre en todo tipo de ondas, ya sean mecánicas o de sonido, pero también en ondas electromagnéticas, como la luz visible y las ondas de radio que pueden propagarse en el vacío [1].

Dispersión

La dispersión ocurre cuando en el trayecto de la onda existen objetos pequeños comparados con la longitud de onda de la señal y su agrupación

espacial es muy densa. La dispersión surge también por la presencia de superficies rugosas y objetos de pequeñas dimensiones.

Estos fenómenos son la causa de afectaciones severas a la propagación de la señal, en la medida que aumenta la densidad de estructuras entre transmisor y receptor, originando la propagación multiproyecto y consigo el desvanecimiento. Lo cual puede ocasionar cambios rápidos en la potencia de la señal en cortos intervalos de tiempo o distancia, aparición de ecos en la señal debido a componentes con diferentes retrasos y modulaciones aleatorias de frecuencia.

Para los sistemas de transmisión inalámbrica, la atenuación de la señal en ausencia de obstáculos, también conocido como pérdida de espacio libre, es uno de los parámetros a tener en consideración. En la figura 1.3, para el cálculo de la pérdida del camino en el espacio libre mediante la ecuación que se observa en la imagen es derivada de la fórmula de transmisión de Friis, considerando la frecuencia en MHz y la distancia en Km.

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 [5].

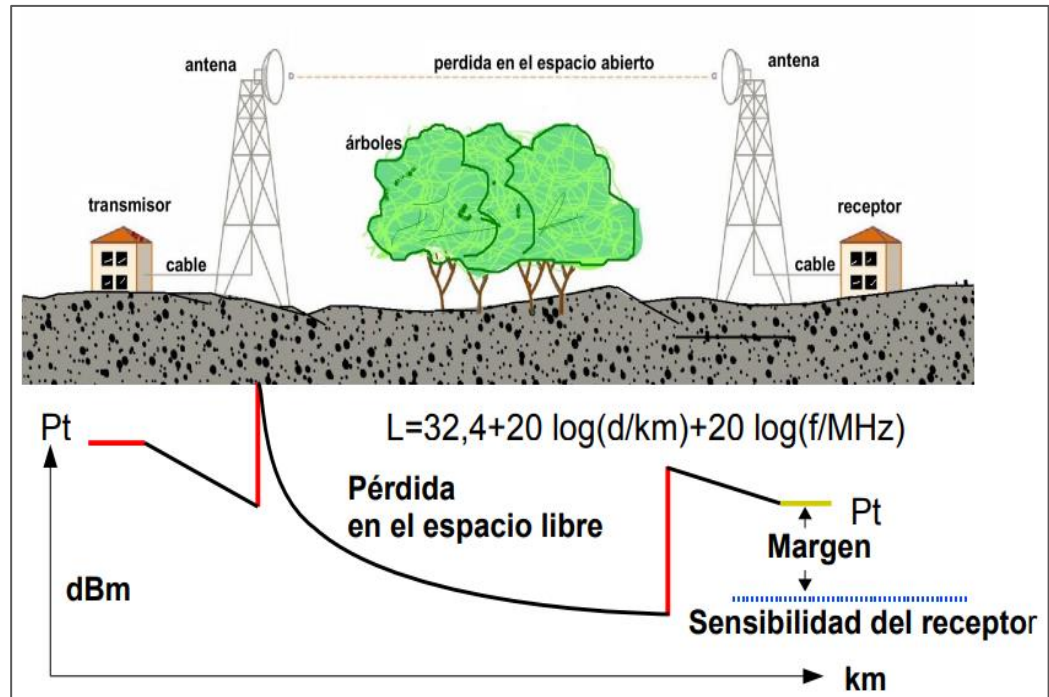


Figura 1.3: Pérdida de camino en el espacio libre de un enlace [5].

1.3.2. Sistemas de comunicación inalámbricas.

El diseño de las redes de comunicación inalámbricas es ahora una actividad que requiere de una respuesta rápida y mejorada a las aplicaciones de los servicios soportados por estas redes.

En las tecnologías de redes inalámbricas se tienen: RFID (Radio Frequency Identification), Bluetooth, ZigBee, WiFi, RF links (Enlaces de radiofrecuencia) y redes móviles.

RFID (Radio Frequency Identification): Esta tecnología nace por la necesidad de identificar objetos a través de chips muy pequeños como los pagos en los peajes. Están conformados por un circuito integrado, un transductor radio y una antena. Se divide en tres tipos:

- Pasiva: Transmite información únicamente cuando se activa el lector RFID, esto es debido a que no cuenta con una batería o fuente de alimentación.

- Activa: A diferencia de la anterior, esta cuenta con una fuente de alimentación o batería por lo cual puede transmitir de manera continua.
- Híbrida: Es muy similar al primero, puesto que transmite información sólo cuando se activa el lector RFID, sin embargo, cuenta con una fuente de alimentación o batería la cual ayuda a transmitir la información a una distancia mucho más larga.

Entre las ventajas de esta tecnología está su bajo costo en el mercado y una alta eficiencia, también es compatible con el microcontrolador arduino, sin embargo, entre sus desventajas se tiene que no se puede establecer conexión a través de una puerta de enlace para tener comunicación a internet [6].

Bluetooth: Es una tecnología muy conocida y usada puesto que ha sido desarrollada en los teléfonos móviles de los que se hace uso a diario, implementando esto en accesorios como manos libres y auriculares inalámbricos. Sin embargo, su uso inicial fue con un enfoque a la transferencia de archivos entre móviles. Entre sus ventajas se encuentra que trabaja en la banda de 2.4 GHz que es de uso libre, y es compatible con el microcontrolador arduino. Como principal desventaja se encuentra la limitación de conexión directa a internet, para lo cual se necesita un intermediario que puede ser un ordenador [6].

ZigBee: Es una tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4, similar a Bluetooth con diferencia que admite más nodos, tiene una mayor eficiencia energética, el alcance es mucho mayor (aproximadamente 300 metros), pese a esto su velocidad de transmisión es mucho menor que Bluetooth, es por esta razón que no ha sido implementado en los teléfonos móviles, ya que Bluetooth cuenta con 3000 Kbps mientras que ZigBee cuenta con tan solo 250 Kbps [6].

WiFi: Esta tecnología está basada en el estándar IEEE 802.11x, es la que goza de mayor popularidad puesto que en la actualidad se encuentra en la mayoría de los hogares y negocios. La principal ventaja es que tiene conexión directa a internet y esta se puede establecer de manera fácil; es totalmente compatible con el microcontrolador arduino y pese a que no fue pensada para las redes IoT (Internet of Things) se puede integrar directamente con estos dispositivos.

RF links (Enlaces de radiofrecuencia): Presenta ventajas respecto a otras tecnologías debido a que es pequeño y su costo es bajo; el alcance de comunicación puede ir desde los 100 metros hasta 1000 metros, y esto depende de la potencia a la que se transmita y la antena que se use para ello. Respecto a su velocidad, puede alcanzar 1 Mbps; tiene compatibilidad con microcontroladores con puerto serie, sin embargo, su principal desventaja es que no posee una aplicación del protocolo TCP/IP por lo que no se puede conectar a internet de forma directa [6].

Redes Móviles: Esta tecnología cuenta con diferentes estándares como: GPRS, 3G y 4G, de tal forma que se tiene acceso a internet en un dispositivo móvil a través de una red de banda ancha. La velocidad de internet proporcionada al dispositivo móvil varía según el estándar usado y va desde los 80 Kbps a unos pocos Mbps en 3G, llegando aproximadamente a los 40 Mbps en 4G. Tiene compatibilidad con el microcontrolador arduino mediante módulos GPRS; es una buena opción para el IoT (Internet of Things) puesto que tiene conexión directa a internet. Su principal desventaja es el alto consumo de energía, lo cual es muy desfavorable debido a que es implementado en dispositivos móviles que hacen uso de batería, todo esto se da por la complejidad del protocolo y la codificación de la información [6].

CAPÍTULO 2

2. Parámetros técnicos para el análisis de un medio de propagación para ambientes exteriores.

En el presente capítulo, se analiza los puntos más importantes relacionado con las redes WLAN, también se hace referencia a los estándares IEEE 802.11 más utilizados para dichas redes. Conjuntamente, se realiza el estudio del medio de propagación de una señal RF (radio frecuencia) para ambientes exteriores a una frecuencia de operación de 5 GHz, en la cual se verá cómo la señal del transmisor sufre pérdidas durante el recorrido hasta el receptor.

2.1. Características de una Red WLAN.

Una red de área local inalámbrica (WLAN) es un sistema de comunicación de datos que permite transmitir información entre el receptor y el transmisor por medio de ondas electromagnéticas que se propagan en el aire, minimizando las conexiones alámbricas [7].

En la figura 2.1, se muestra la arquitectura básica de una red WLAN, formada por el proveedor de servicios de Internet (ISP) y al menos un punto de acceso (AP), que es responsable de la provisión de internet de forma inalámbrica a los dispositivos finales de los usuarios.

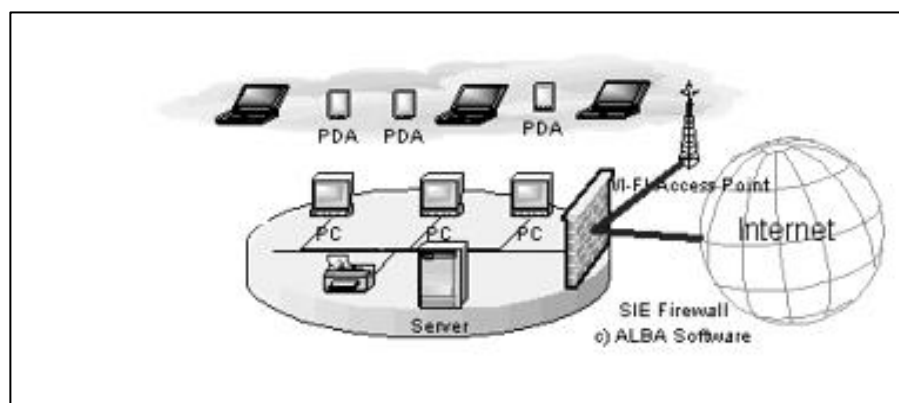


Figura 2.1: Estructura básica de una red WLAN.

2.2. Segmentos inalámbricos en banda ancha.

Hay varias formas de conectarse a la red, de las cuales se dividen en tres segmentos de banda ancha tal como se muestra en la tabla 2.1. Este tipo de segmentos está creciendo con el avance de nuevas tecnologías y coexisten en el medio dependiendo de donde se encuentre ubicada las personas o las cosas, lo que da distintas formas de conectarse a una red inalámbrica [8].

Tabla 2.1: Tecnología de Acceso Inalámbrico por Segmento de Banda Ancha.

Segmento de banda ancha inalámbrica	Tipo de tecnología	Tasa de crecimiento del mercado
Acceso inalámbrico interior fijo sin licencia	WiFi: IEEE 802.11 a/b/g/n/ac	2012: 5,2 millones de puntos de acceso. 2018: 10,5 millones de puntos de acceso. 12% CAGR (2012-18)
Acceso inalámbrico móvil con licencia	GSM, WCDMA, TD-SCDMA, HSPA, LTE	2012: 6,5 billones de puntos de acceso. 2018: 8,1 billones de puntos de acceso. 4% CAGR (2012-18)
Acceso inalámbrico al aire libre fijo sin licencia y con licencia	LMDS, WiMAX, Fixed LTE, non-3GPP FWA	2012: 29 millones de puntos de acceso. 2018: 41 millones de puntos de acceso. 6% CAGR (2012-18)

Estándar IEEE 802.11n

El estándar IEEE 802.11n fue lanzado en el año 2009, puede funcionar en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz, estas pueden alcanzar velocidades superiores a 100 Mbps pudiendo llegar a 600 Mbps, razón por la cual es compatible con cualquiera de los estándares anteriores como: 802.11b, 802.11g y 802.11a.

Las especificaciones del estándar IEEE 802.11n fueron diseñadas para asegurar compatibilidad con más de 200 millones de dispositivos WiFi actualmente en uso. A continuación se menciona algunas especificaciones del estándar IEEE que se deben considerar [9]:

- Las ondas de RF son de “señal múltiple”, existe una onda primaria y otras ondas secundarias debido al efecto multitrayectoria. Hasta ahora solo se usaba la onda primaria y las otras se percibían como interferencias o ruidos. El algoritmo de entrada múltiple de salida múltiple (MIMO), envía señal a dos o más antenas, luego las recopila y las convierte en una señal.
- La velocidad es importante según sea el caso, pero es un gran atractivo para los compradores; de acuerdo con los expertos en WiFi, la velocidad de una red inalámbrica la fija el usuario más lento, y de nada sirve tener un punto de acceso muy rápido si la mayoría de los usuarios son lentos, por lo que solo en algunos casos se podrá sacar ventaja de la velocidad.

Forzar una tecnología como la 802.11n para unirse a los estándares 802.11b y 802.11g implica un gran sacrificio de recursos técnicos. La transmisión de información en redes inalámbricas WiFi 802.11b y 802.11g se realiza en la banda altamente poblada de 2.4 GHz con solo 3 canales no superpuestos a un ancho de banda de 20 MHz, por donde transmite y se recibe la información. En el estándar 802.11n se propone utilizar canales de 40 MHz de ancho, para hacer que ambas tecnologías sean compatibles. En el estándar 802.11a se trabaja en la banda de 5 GHz, mucho más despoblada y con 8 canales para elegir; por ello, muchos abogan por impedir a 802.11n que incluya la opción de funcionar en la banda de 2.4 GHz [9] [10].

2.3. Aspectos de propagación en ambientes exteriores para redes WLAN.

Ambientes exteriores considerados para las mediciones.

Para el desarrollo del modelo de propagación propuesto, los niveles de las señales recibidas se medirán desde la colina de Huaquillas, en el cantón de La Troncal, cruzando diferentes tipos de cultivos como de caña de azúcar, el banano; así como pequeña forestación de bosques.

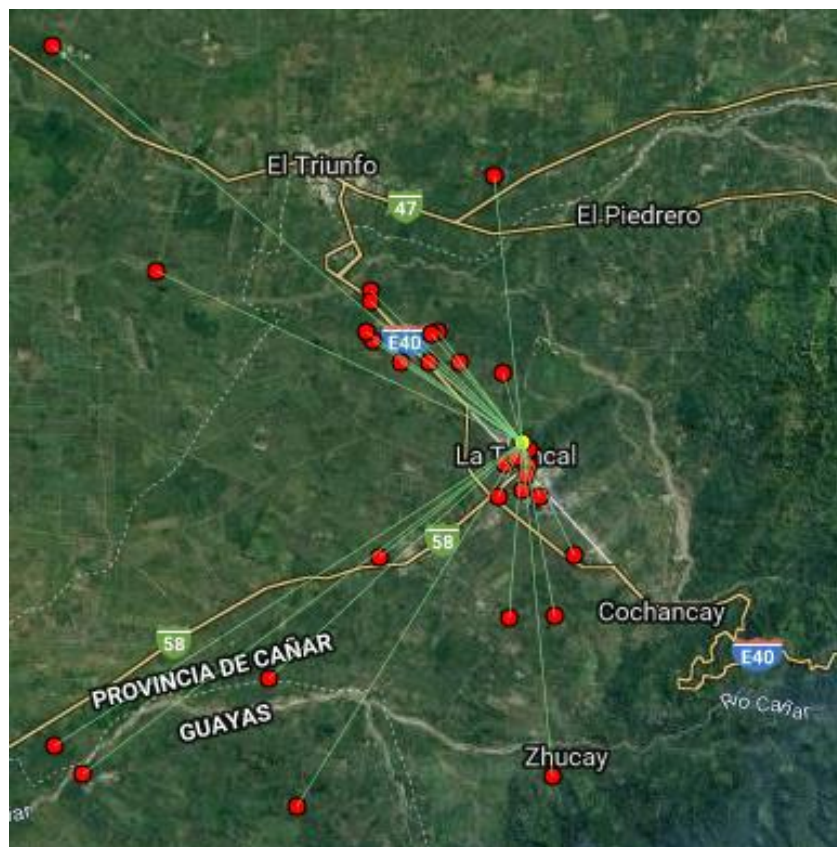


Figura 2.2: Ubicación de los puntos receptores desde el punto de vista geográfico.

La selección del área se debe a los siguientes tres tipos de escenarios:

- **Ambientes urbanos:** lugares consolidados, ubicados en medio de grandes centros de población, dotados de todos los servicios básicos y con una alta concentración de objetos que emiten señales (vehículos, paredes externas de casas y edificios, presencia de personas, etc.); lugares como calles residenciales, parques y lugares públicos, etc.
- **Ambientes semiurbanos:** lugares en proceso de consolidación, ubicados en las afueras de la ciudad. En general, estos lugares no cuentan con todos los servicios y tienen una concentración promedio de objetos que dispersan la señal (árboles, vegetación, entre otros).
- **Ambientes abiertos (rurales):** lugares despejados, alejados de los centros urbanos y semiurbanos de las ciudades; en consecuencia, esos

lugares poseen una baja concentración de objetos dispersores de la señal.

Evaluación del modelo de propagación semi-empírico diseñado.

Para poder validar el modelo de propagación antes planteado, se realiza ciertos análisis en base a modelos de propagación ya establecidos, dependiendo del área de cobertura de la zona que se está analizando.

Si se toma como base la organización de los modelos de propagación de acuerdo con el área que se va a analizar, se clasificaría de la siguiente manera:

- **Microcélulas:** Se aplica más en grandes ciudades, por la gran cantidad de obstáculos como las edificaciones en las urbes, la señal transmitida es atenuada y se requiere de mayor cantidad de radio bases. Cubre de 0.1 Km a 1.5 km.
- **Macrocelulas:** Comprende para ciudades pequeñas y vías de comunicación; debido a la poca cantidad de obstáculos presentes en esta área sumado a esto la poca densidad de población que existe, da como resultado menor atenuación de la señal, logrando así cubrir una superficie más extensa. Cubre un radio de entre 1.5 Km y 30 km.
- **Hipercélulas:** Comprende una distancia entre 30 Km y 100 km, es aplicable para medios o zonas rurales, dado que no hay grandes edificaciones que impidan la propagación libre de la señal.

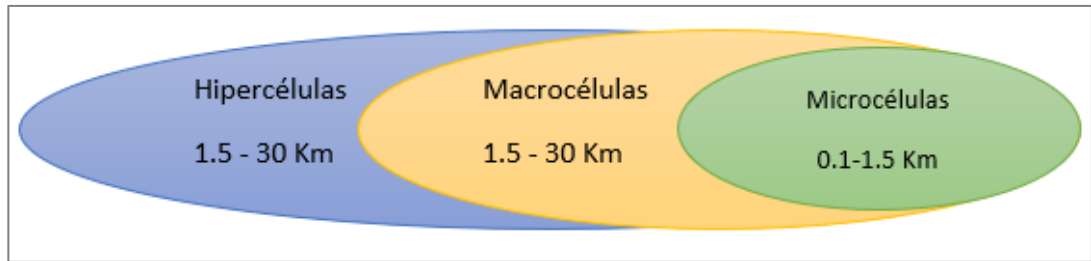


Figura 2.3: Comparativa de valores Observado-distancia de la primera etapa del modelo.

Una vez determinado cada zona a analizar, como se muestra en la figura 2.3, se detalla que modelo de propagación que se puede emplear en cada zona.

2.1.1 Microcélulas.

Las Microcelulas cuentan con radios que puede ir desde metros a kilómetros. Modelos aplicables en esta zona:

Modelo cost 231 Walfich ikegami

Este modelo es una extensión del modelo COST Hata, en el que puede aplicarse bajo las siguientes condiciones:

- Frecuencias de operación entre 800 y 2000MHz.
- Distancia entre el transmisor y receptor puede estar entre 0.02 y 50 Km.
- Altura relativa del transmisor respecto a edificios debe ser mayor que cero.

Cuando entre el transmisor y el receptor están en línea de vista, la perdida básica del enlace está dada por:

$$PL(dB) = 42.64 + 26 \log D + \log f \quad (2.1)$$

Donde:

f: Frecuencia de operación.

D: Distancia entre el transmisor y el receptor.

2.3.1. Macrocelulas.

En el siguiente tipo de celda se puede analizar desde un uno hasta 30 Km. Estas Macrocelulas son muy comunes para sectores urbanos.

Modelo de Okumura-Hata

El modelo de Okumura Hata, fue desarrollado en Tokio, Japón. Aunque se considera un modelo simple, también se considera como uno de los mejores resultados en términos de precisión, convirtiéndose en el modelo utilizado para planificar sistemas móviles en Japón. Este modelo estima la atenuación que una señal puede sufrir en el espacio libre; tiene como parámetros la distancia entre transmisor y receptor, sus respectivas alturas y la frecuencia que tiene la señal transmitida.

La ecuación matemática de este modelo es la siguiente:

$$L = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_b)) \log(d_m) \quad (2.2)$$

Donde:

f: Es la frecuencia de portadora y tiene un rango que va desde 150 MHz a 1500 MHz.

h_b: Es la altura de la antena transmisora y tiene un rango va desde 30 metros a 200 metros.

h_m: Es la altura de la antena receptora que tiene un rango de 1 metro a 10 metros.

d_m: Es la distancia medida en metros entre T_x (transmisor) y R_x (receptor) y está en el rango de 1 a 20 Km.

En donde $a(h_r)$, es el factor de corrección de la altura del móvil que varía de acuerdo con el entorno de propagación; tal como se muestra en la continuación en la tabla 2.2:

Tabla 2.2: Factor de corrección de la altura del móvil en variación al tipo de ciudad.

Ciudad	Factor de Corrección	Frecuencia [MHz]
mediana o pequeña	$a(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8)$	$200 < f < 400$
Grande	$a(h_m) = 8.29 (\log(1.54h_m))^2 - 1.1$	$f \leq 200$
	$a(h_m) = 3.2 (\log(11.75h_m))^2 - 4.97$	$f \geq 400$

Modelo extendido de Hata (COST-231 Hata)

El modelo extendido de Hata, más conocido como COST-231 fue desarrollado por EURO-COST (Cooperativa Europea), que se dedica a la investigación técnica y científica. Este modelo tiene un rango de operación de hasta 2 GHz.

En un futuro se estima que la mayoría de los sistemas operen con frecuencia en el rango de 1.8 KHz a 2 GHz. Como se ha demostrado que la pérdida de propagación en el medio en las bandas mencionadas tuvo un mayor impacto que en la banda de 900 MHz, con una atenuación de alrededor de 10 dB mayor que la de la banda de 900 MHz, el modelo de costo 231 rango de trabajo de colocación de 1.5 GHz a 2 GHz.

El modelo se expresa de acuerdo con los siguientes parámetros:

$$L_p = A + B \log(D) + C \quad (2.3)$$

Donde:

$$A = 46.3 + 33.9 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - a(h_r) \quad (2.4)$$

f_c: Es la frecuencia de portadora y tiene un rango que va desde 1.5 GHz a 2.0 GHz.

h_b: Es la altura de la antena transmisora y tiene un rango va desde 30 metros a 200 metros.

h_r: Es la altura de la antena receptora que tiene un rango de 1 metro a 10 metros.

D: Es la distancia medida en metros entre T_x (transmisor) y R_x (receptor).

En donde $a(h_r)$, es el factor de corrección de la altura del receptor que varía de acuerdo con el ambiente; tal como se muestra en la continuación en la tabla 2.3:

Tabla 2.3: Factor de corrección de la altura del móvil en variación al sector.

Sector	Factor de Corrección	Frecuencia [MHz]
suburbano o rural	$a(h_r) = (1.1 \log(f_c) - 0.7)h_r - (1.56 \log(f_c) - 0.8)$	--
Urbano	$a(h_r) = 8.29 (\log(1.54h_r))^2 - 1.1$	$150 \leq f_c \leq 200$
	$a(h_r) = 3.2 (\log(11.75h_r))^2 - 4.97$	$200 < f_c \leq 1500$

El valor de B es una constante que depende de la altura de la base, tal como se expresa en la ecuación 2.5:

$$B = 44.9 - 6.55 \log(h_b) \quad (2.5)$$

El valor de C varía dependiendo de la ciudad a la que será aplicado el modelo. Para ciudades de medio tamaño y áreas urbanas $C = 0$ y para grande metrópolis $C = 3$.

2.3.2. Hipercélulas

Modelo de ericsson 9999

El modelo ericsson 9999, fue desarrollado por la compañía Ericsson, para el direccionamiento de redes; es una extensión del modelo de Hata. La ventaja de este modelo es que se hace un ajuste en parámetros de acuerdo con el escenario en que se esté aplicando el modelo.

La expresión matemática que describe la pérdida que puede predecir este modelo es:

$$L = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_b) + a_3 \log(h_b) \log(d) - 3.2(\log(11.75h_r))^2 + g(f) \quad (2.6)$$

Sabiendo que:

$$g(f) = 44.49 \log(f) - 4.78(\log(f))^2 \quad (2.7)$$

Donde:

d: Es la distancia entre la base transmisora y el receptor medida en metros.

h_b: Es la altura en metros a la que se encuentra el transmisor.

h_r: Es la altura en metros a la que se encuentra el receptor.

f: Es la frecuencia medida en GHz de la señal que es transmitida.

A continuación, se muestra los valores del factor de corrección para diferentes sectores.

Tabla 2.4: Factor de corrección para diferentes sectores.

Factor	Urbano	Suburbano	Rural
<i>a</i>₀	36.2	43.20	45.95
<i>a</i>₁	30.2	68.93	100.6
<i>a</i>₂	-12.0	-12.0	-12.0
<i>a</i>₃	0.1	0.1	0.1

CAPÍTULO 3

3. Toma de datos en ambientes exteriores en el sector la Troncal.

En este capítulo se describe en detalle cómo se adquirieron las mediciones en el sector de La Troncal, Ecuador; cómo se recopilaron los datos de diferentes sitios durante un mes para modelar y validar el modelo de propagación empírico propuesto.

3.1. Parámetros de Equipo Transmisor.

La torre central de transmisión se encuentra ubicada en el cerro de La Troncal. Está conformada por siete puntos de acceso o transmisores independientes, se instalaron simultáneamente sobre una torre auto soportada en un nodo de telecomunicaciones. Estos siete transmisores tienen adjuntadas sus respectivas antenas sectoriales de forma directa sin tener pérdidas debido a cable o conectores.



Figura 3.1: Modelo del equipo transmisor PMP 450m.

En la tabla 3.1, se detalla los parámetros del área de cobertura de las antenas sectoriales ubicada en la torre principal, cada antena trabaja en la banda de 5.2 GHz con un patrón de radiación de 90°; el azimut hace referencia al ángulo horizontal respecto al norte geográfico de donde está ubicado.

Tabla 3.1: Parámetros de cobertura entre el transmisor-receptor.

	Sector Troncal 1	Sector Troncal 2	Sector Troncal 3
Ganancia de la antena	24 dBi	24 dBi	24 dBi
Máxima potencia transmitida	24 dBm	24 dBm	24 dBm
Azimut	330°	145°	240°
Ángulo de elevación	90°	90°	90°
Banda de operación	5.2 GHz	5.2 GHz	5.2 GHz
Rango de cobertura	24 Km	14 Km	21 Km
Receptores conectados	10	5	5

3.2. Parámetros de Equipo Receptor.

Para el equipo receptor se utilizó el modelo de antenas PMP 450i y PMP 450b. Los radios de banda ultra ancha admiten toda la banda, ya sea en 3 GHz o 5 GHz. Este tipo de modelo de antenas mejora el diseño de radio avanzado, transmite potencia y aumenta la sensibilidad de recepción.

En la tabla 3.2, se muestra los parámetros de configuración que son utilizados en los equipos para diseñar el presupuesto de enlace entre la antena transmisora y receptora, teniendo como ganancia de la antena receptora de 17 dBi con un máximo de potencia transmitida de 28 dBm. Estos datos son obtenidos por el fabricante (Cambium Network), cuya ficha técnica se encuentra en el anexo A1.

Tabla 3.2: Parámetros de operación de la antena receptora para el presupuesto de enlace.

Ganancia de la antena	Máxima Potencia Transmitida	Azimut	Banda de operación	Máximo EIRP de la antena
17 dBi	28 dBm	90°	5.2GHz	43 dBm

3.3. Método de toma de datos.

Como se mencionó en el capítulo 2, para obtener el nivel de potencia recibido de cada uno de nuestros sitios de análisis, se utiliza la plataforma CnMaestro de Cambium Network, que permite obtener cierta información sobre las diferentes redes inalámbricas cercanas al receptor, como: nivel de potencia recibida (RSSI, Received Signal Strength Indicator), ancho de canal, velocidad de transmisión recibida, nombre de la red, tipo de antena, entre otros.

En la Figura 3.2, se observa una captura de la pantalla principal del de la herramienta computacional de la plataforma CnMaestro.

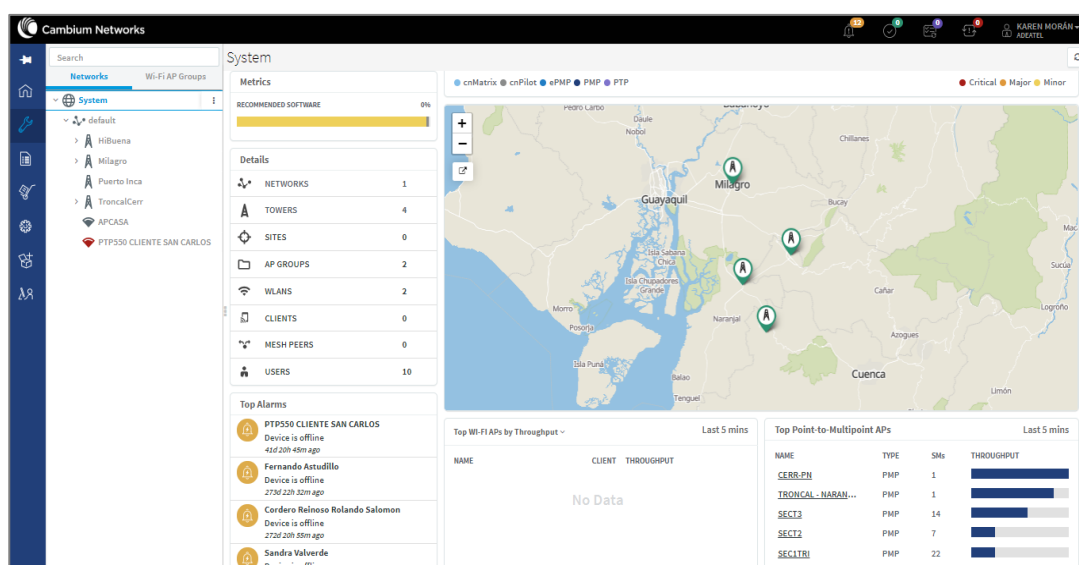


Figura 3.2: Plataforma CnMaestro del Software Cambium Network.

Esta plataforma hace un monitoreo de todos los puntos o redes que están conectadas al nodo principal (Nodo La troncal) y permite seleccionar todos los parámetros que deben incluirse para exportar el archivo de las mediciones obtenidas diariamente.

Genera un informe con los "datos de rendimiento basados en el tiempo del dispositivo" como un archivo de valores separados por comas (CSV). Todos los dispositivos del tipo seleccionado bajo el nodo del árbol se incluirán en la exportación.

3.4. Simulación de los enlaces punto a punto.

Mediante el programa LINKPLANNER se logró realizar las simulaciones de todos los enlaces punto a punto que se registraron en el lugar de estudio.

En la figura 3.3, se muestra el área de cobertura segmentada de todos los puntos receptores analizados de acuerdo con los parámetros de operación de la antena, tal como se indica en la tabla 3.2.

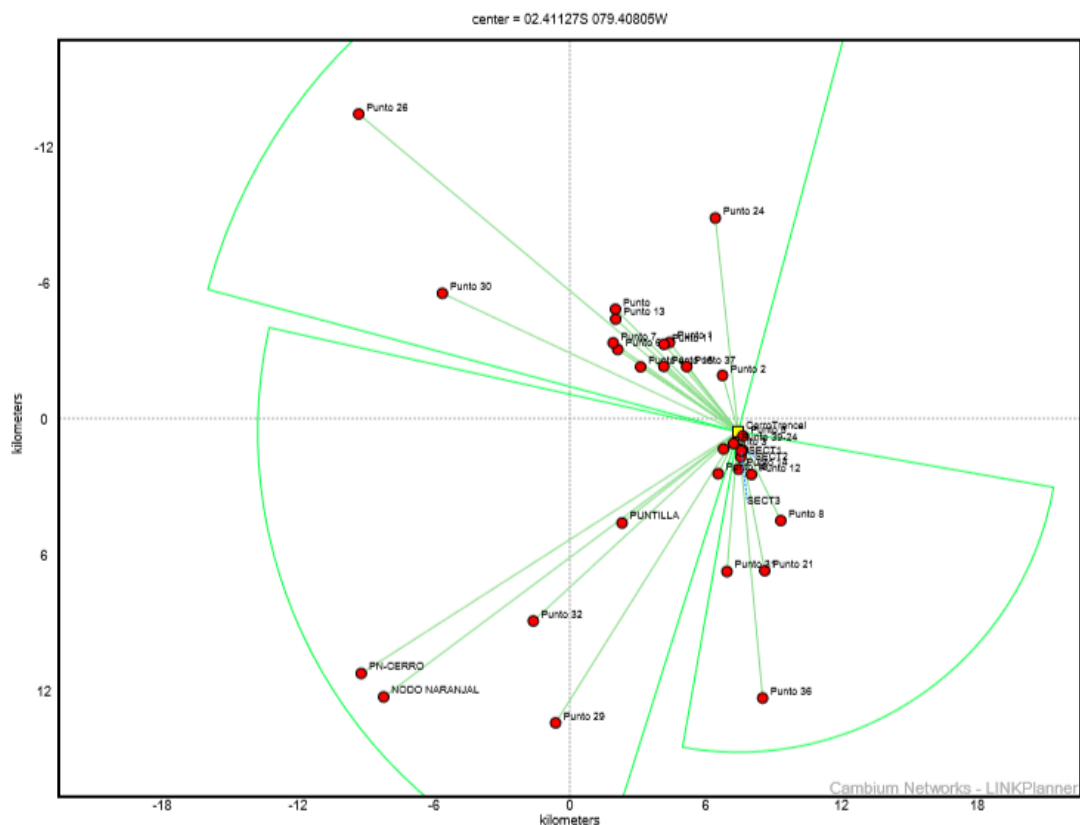


Figura 3.3: Plataforma de simulación del Software Link Planner.

Los puntos o antenas receptoras que se observa en la figura 3.3, se encuentran enlazados en la torre principal de acuerdo con la selección del área previamente explicada en el capítulo 2.

En la tabla 3.3, se detalla la ubicación de los puntos receptores con respecto al sistema de coordenadas geográficas en referencia a la ubicación de la torre transmisora principal (Nodo troncal) en cualquier punto de la superficie terrestre. La altura es medida con referencia al nivel del mar, que es obtenida ubicando cada punto en Google Earth.

Tabla 3.3: Ubicación de los puntos receptores y transmisores para la simulación de los enlaces punto a punto.

Nombre	Latitud	Longitud	Altura máxima (m)
Nodo Troncal	02.41647S	079.34186W	145
Punto 1	02.38124S	079.36884W	56
Punto 2	02.39427S	079.34800W	56
Punto 3	02.42331S	079.34765W	85
Punto 4	02.39091S	079.38020W	49
Punto 5	02.41818S	079.33999W	70
Punto 6	02.38400S	079.38921W	47
Punto 7	02.38140S	079.39100W	47
Punto 8	02.45164S	079.32510W	75
Punto 9	02.52130S	079.48120W	60
Punto 10	02.51200S	079.49000W	90
Punto 11	02.38200S	079.37100W	56
Punto 12	02.43341S	079.33664W	86
Punto 13	02.37200S	079.39000W	47
Punto 14	02.43131S	079.34170W	86
Punto 15	02.43310S	079.34971W	86
Punto 16	02.39070S	079.37110W	55
Punto 17	02.47141S	079.33140W	120
Punto 18	02.45257S	079.38750W	66
Punto 19	02.36812S	079.39010W	47
Punto 20	02.33210S	079.35084W	80
Punto 21	02.29100S	079.49100W	29
Punto 22	02.53153S	079.41360W	98
Punto 23	02.36184S	079.45810W	47
Punto 24	02.47175S	079.34627W	160
Punto 25	02.49130S	079.42237W	52
Punto 26	02.52173S	079.33223W	153
Punto 27	02.39081S	079.36210W	57
Punto 28	02.42118S	079.34368W	76
Punto 29	02.42646S	079.34080W	130
Punto 30	02.42382S	079.34000W	120

3.5. Desarrollo del Modelo de Propagación Semi-empírico.

Para la obtención del nuevo modelo de propagación, se desglosa en dos fases:

3.5.1. Fase de aproximación con relación a la distancia entre el transmisor y receptor.

En base a los datos obtenidos en los puntos de estudio durante 30 días consecutivamente, se obtuvieron 34913 mediciones del nivel de señal recibida por el transmisor, el cual se ingresaron en el software estadístico "Statistica", donde se realizó un análisis sobre la señal recibida en el receptor con respecto a la distancia a la que se encuentra la antena transmisora.

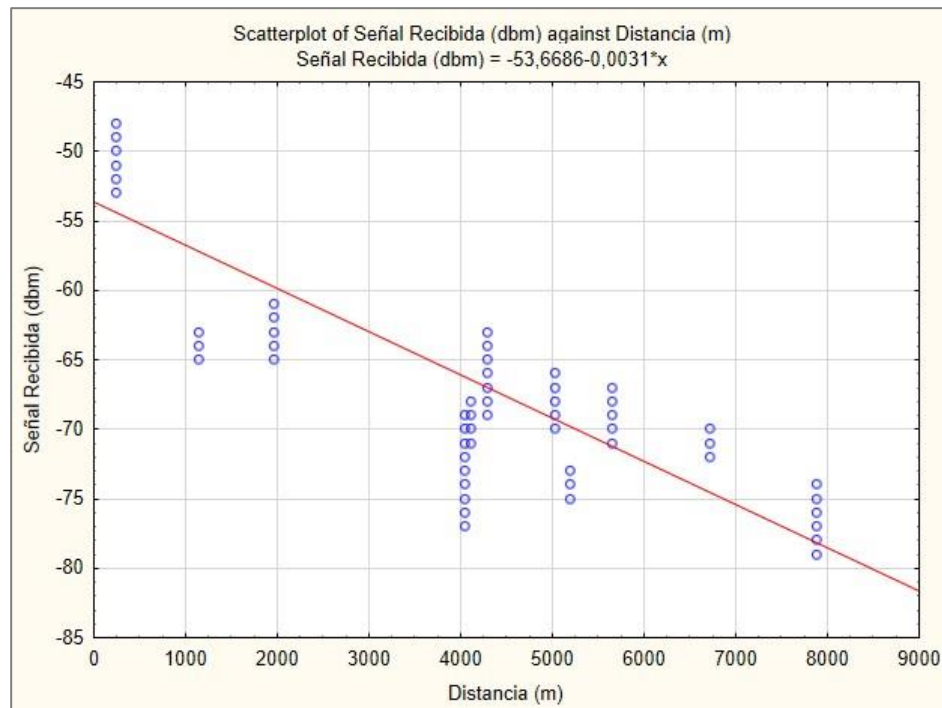


Figura 3.4: Comparativa entre el nivel de la señal recibida y la distancia.

La figura 3.4, se puede observar cómo la correlación entre la señal recibida y la distancia va decreciendo logarítmicamente respecto a la distancia, de esta manera se puede decir que la primera etapa del modelo estaría descrita por:

$$L_{(dB)} = A + B * \log(D) \quad (3.1)$$

Donde:

$A_{(dB)}$: Es la constante aditiva por pérdidas de recorrido. Este factor considera las pérdidas de potencia de transmisión, altura del transmisor, paredes externas de casas, persona, edificios y otros obstáculos, etc.

$B_{(dB)}$: Es la constante multiplicativa de la pérdida por recorrido.

$D(Km)$: Distancia entre la antena transmisora y la antena receptora.

Los constantes de pérdidas por recorrido se estiman mediante técnicas de regresión lineal, utilizando el software Statistica. La ecuación (3.1), se considera como función de control para el ajuste para obtener dichos valores:

$$\text{Loss} = (\text{Observados} - \text{Predichos})^2 \quad (3.2)$$

Donde:

Observados: es el valor medido para el punto de medición.

Predichos: es el valor de propagación estimado para dicho punto.

A partir de la ejecución del software Statistica para encontrar la regresión lineal se obtuvo los parámetros A y B como se muestra en la figura 3.5 que indica la distribución de las pérdidas del enlace respecto a la distancia desde el transmisor.

	Model: v3=a+b*Log10(v2) (mod)	
	Dep. var: Perdida del Camino Loss: (OBS-PRED)**2	
	Final loss: 64767,523183 R= ,97394 Variance explained: 94,856%	
N=34913	A	B
Estimate	81,65556	13,18483

Figura 3.5: Parámetros obtenidos en la primera etapa de la regresión lineal.

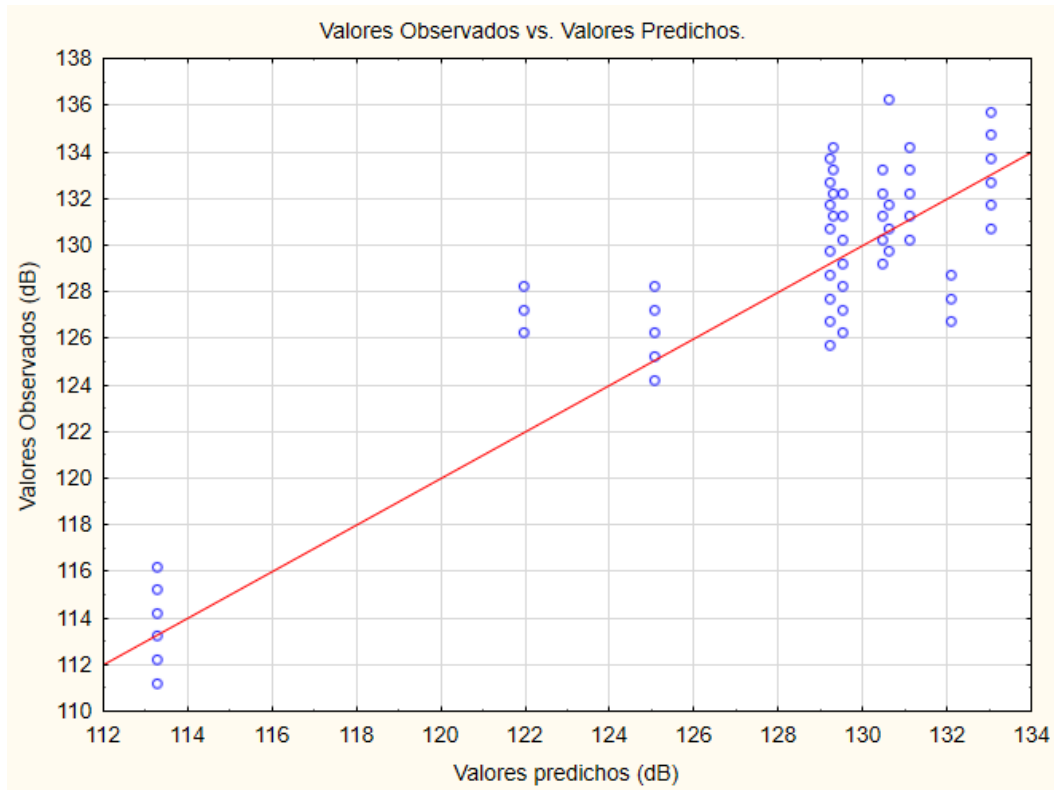


Figura 3.6: Comparativa de valores Observado-Predichos primera etapa del modelo de propagación.

En la Figura 3.6, se muestra el gráfico de dispersión entre los valores medidos del nivel de señal recibido y los obtenidos mediante la ecuación (3.1), con una varianza del 94.856% de confiabilidad.

Reemplazando los valores de las constantes A y B en la ecuación (3.1), se tiene como modelo para la primera etapa:

$$L_{(dB)} = 81.65556 + 13.184883 * \log(D) \quad (3.2)$$

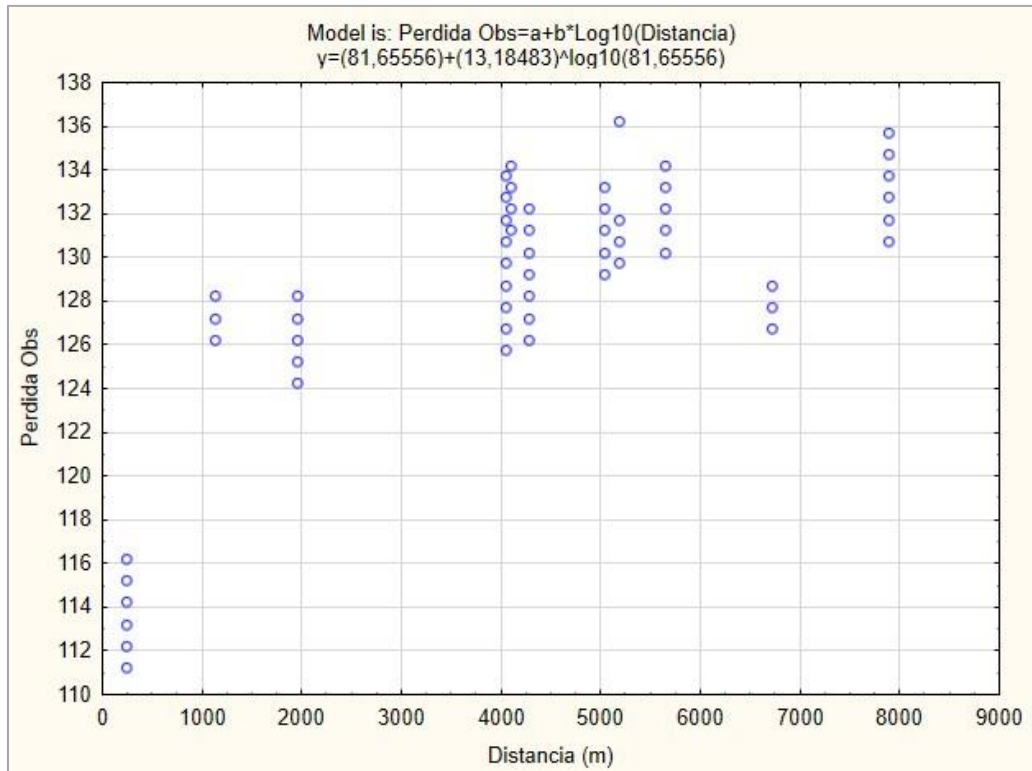


Figura 3.7: Comparativa de valores Observado-distancia de la primera etapa del modelo de propagación.

En la figura 3.7, se observa la correlación de los datos analizados en relación con la pérdida observada obtenida por la regresión lineal en función de la distancia.

3.5.2. Fase de aproximación con relación a la distancia y la altura entre el receptor.

Los resultados se pueden ver en la figura 3.8, de la misma forma se logra apreciar que esta vez la segunda etapa del proyecto explica mucho mejor la varianza de los datos, pues con estos nuevos parámetros y la nueva variable, el modelo logra explicar la varianza en un 94.90%.

Model: $v_3=(a_1+a_2*v_5)+(b_1+b_2*v_5)*\text{Log}_{10}(v_2)$ (mod)				
Dep. var: Perdida del Camino Loss: (OBS-PRED)**2				
Final loss: 64166.900276 R= .97419 Variance explained: 94.904%				
N=34913	a1	a2	b1	b2
Estimate	87.73256	-0.082355	11.39654	0.024995

Figura 3.8: Parámetros obtenidos en la segunda etapa de la regresión lineal.

La ecuación para el nuevo modelo es:

$$L_{(dB)} = (A_1 + A_2 + A_3) + [(B_1 + B_2 + h) * \log(D)] \quad (3.3)$$

Donde:

A_1 (dB) y A_2 (dB): Constantes aditivas de pérdida por recorrido.

B_1 (dB) y B_2 (dB): Constante multiplicativa de pérdida por recorrido.

D (Km): Distancia entre antena emisora y antena receptora.

h(m): Altura de la antena receptora.

3.5.3. Medición del grado de precisión del modelo semi-empírico.

Una forma de evaluarlo es determinar el grado de precisión de este, por tal razón se analizarán algunos criterios estadísticos de significancia, como son:

- Coeficiente de correlación
- Calidad de ajuste.
- Error cuadrático medio
- Desviación estándar en valor absoluto.

En la tabla 3.4, se hace una comparación de los modelos de propagación que pueden ser aplicados en sectores suburbanos, se valida por medio de la desviación estándar la dispersión más común que se tiene al aplicar cada modelo con las muestras obtenidas en el sector. Este valor nos indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media; es decir, mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos.

Tabla 3.4: Comparativo de los modelos de propagación a analizar.

VARIABLE	MUESTRA	MEDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	STD. DEV.
ITU	34913	118,580408	105,4	124,2	5,85049438
SUI	34913	150,293829	116,479059	163,107884	13,8826244
FREE_SPACE	34913	117,351458	95,3181035	125,300843	8,87234742
SEMI-EMPÍRICO	34913	127,797306	113,155208	132,853219	5,53229585
MEDICIÓN	34913	127,797299	111,2	136,2	6,00550992

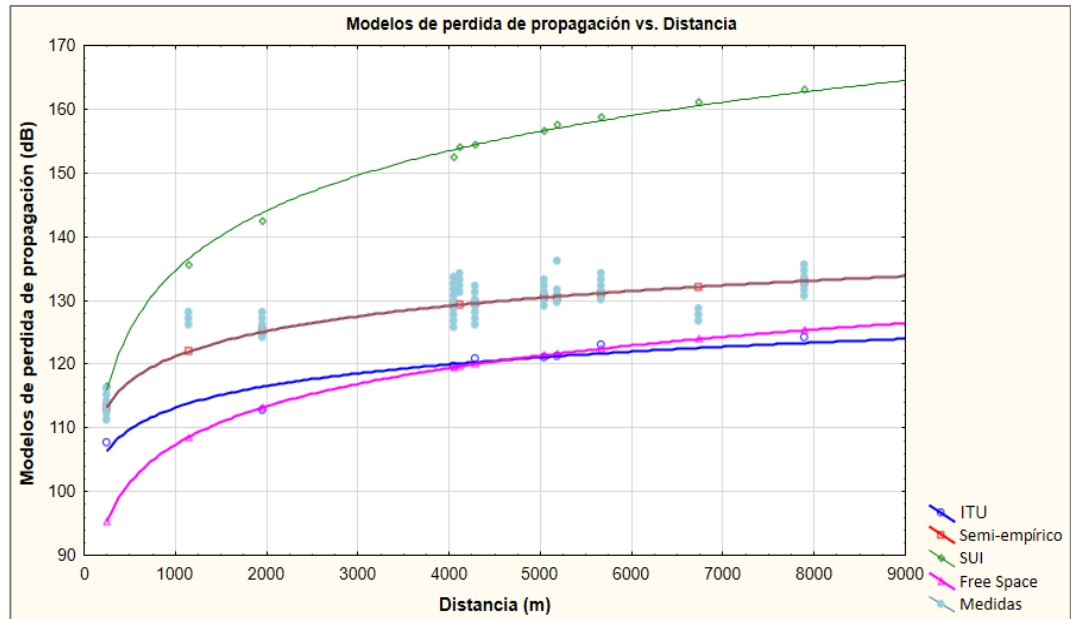


Figura 3.9: Comparativa de modelos de propagación.

En la figura 3.9, se puede observar las curvas de los diferentes modelos de propagación aplicados al lugar, donde cada punto en la gráfica indica el promedio de los 34913 datos tomados para cada punto de medición.

Se muestra claramente como los modelos tradicionales (ITU, SUI) y la pérdida de propagación en el espacio libre, se alejan de la curva que representa los datos medidos, mientras que el modelo semi empírico desarrollado se apega a esta por la parte inferior.

Para más información sobre la comparación con estos modelos, se puede hacer revisión del documento de la autoría del Ing. Mario Crespo Cuesta, cuyo modelo de propagación semi empírico muestra características similares en relación con el que ha sido propuesto [1].

Para tener una idea más clara de la comparación entre estos modelos, se puede recurrir al cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) por sus siglas en inglés (Root Mean Square Error), el cual mide la cantidad de error que existe entre dos conjuntos de datos; es decir compara un valor predicho con un valor observado o medido de manera experimental.

El modelo óptimo que podría ser aplicado al lugar es el que tenga un menor RMSE. A continuación, se presenta la expresión matemática usada para estos cálculos y se realiza un cuadro comparativo del error con todos los modelos que se mostró en la figura 3.9.

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

Donde:

n= Cantidad de datos medidos.

X_{estimados}= Valores predichos

X_{medidos}= Valores observados de manera experimental

Tabla 3.5: Comparativo del RMSE calculado de los modelos de propagación utilizados.

Modelo de Propagación	RMSE (dB)
ITU	9,73649516350266
SUI	23,9344155815137
Free_space	10,9595259882898
Semi-empírico	1,35569484894008

Se puede verificar en la tabla 3.5, los diferentes RMSE para cada modelo de propagación medido en decibelios. Haciendo la comparación entre estos se puede concluir que, bajo condiciones normales y con los parámetros establecidos anteriormente, se observa que el modelo semi empírico propuesto como solución a la problemática planteada, tiene un menor RMSE. Esto implica que es más confiable que los otros modelos para aplicarse en la cuenca del río Guayas.

El RMSE del modelo semi empírico no supera por mucho a la unidad en decibelios, mientras que, en comparación con los otros modelos, el más cercano en lo que se refiere a error, es el modelo ITU que se encuentra por encima de los nueve decibelios, los modelos restantes tienen un error

mayor a este, por lo tanto, su nivel de confiabilidad es menor al modelo semi empírico.

Se puede observar las curvas de los diferentes modelos de propagación aplicados al lugar, donde cada punto en la gráfica indica el promedio de datos tomados para cada punto de medición.

Se muestra claramente como los modelos tradicionales y la pérdida de propagación en el espacio libre, se alejan de la curva que representa los datos medidos, mientras que el modelo semi empírico desarrollado se apega a esta por la parte inferior.

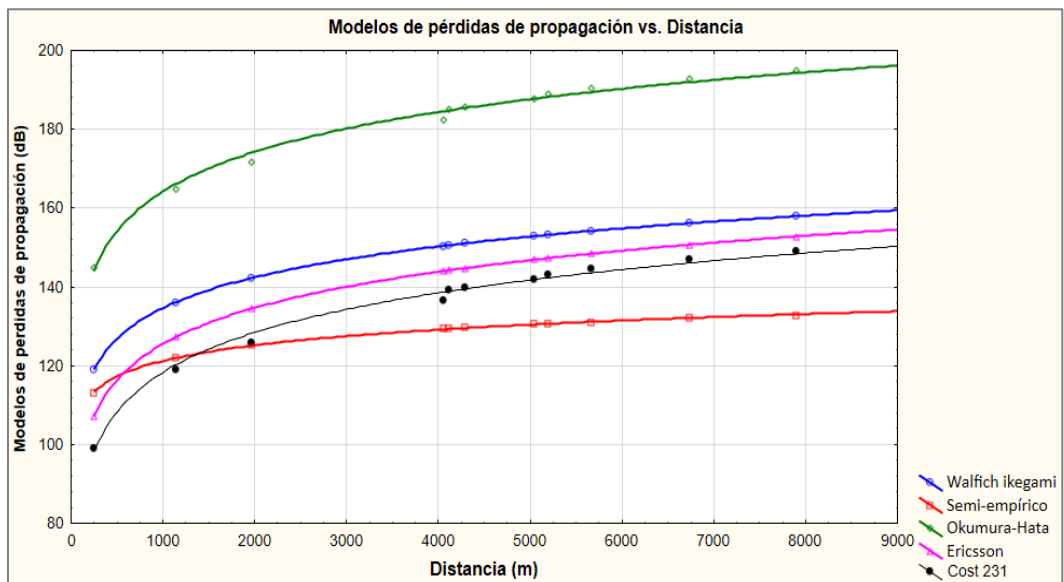


Figura 3.10: Comparativa de nuevos modelos de propagación propuestos.

En la tabla 3.6, se hace una comparación de los modelos de propagación que pueden ser aplicados en sectores rurales. Se valida por medio de la desviación estándar, que para el modelo de propagación semi-empírico nos indica cuánto pueden alejarse o acercarse los valores respecto al promedio (media); es decir, para el modelo semi-empírico la dispersión de los datos es menor en comparación a los otros modelos propuestos.

Tabla 3.6: Comparativo de los valores medios calculado de los modelos de propagación utilizados.

Variable	Muestra	Media	Mínimo	Máximo	Std. Dev.
Walfich Ikegami	34913	147,609201	118,96584	157,943402	11,5340516
Okumura-Hata	34913	180,94658	145,033019	194,926751	14,9324399
Ericsson	34913	140,712064	107,193243	152,805276	13,4972924
COST 231	34913	135,059795	99,1462336	149,039965	14,9324399
Semi-Empírico	34913	127,797306	113,155208	132,853219	5,85049438
Medición	34913	127,797299	111,2	136,2	6,00550992

Evaluando de la misma forma el RMSE, en base a los modelos analizados, se tiene que el modelo semi-empírico sigue siendo el óptimo para aplicarlo en la zona que se está analizando.

Tabla 3.7: Comparativo del RMSE calculado de los modelos de propagación utilizados.

Modelo de Propagación	RMSE (dB)
Walfich Ikegami	20,6563832277682
Okumura-Hata	53,9449247568100
Ericsson	15,0712423408063
COST 231	11,7453240172260
Semi-empírico	1,35569484894008

En la tabla 3.7, se puede observar que el RMSE del modelo propuesto es muy bajo, alejándose por mucho de los modelos tradicionales, donde el más cercano es el modelo COST 231. Sin embargo, este supera por un poco más de diez puntos al modelo tomado experimentalmente.

Esto puede darse con los modelos tradicionales que fueron creados en condiciones ambientales diferentes y con características superficiales que se alejan de las características del terreno en el que se realizaron las mediciones que fueron base para el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y recomendaciones.

4.1. Conclusiones.

- Al realizar el proceso de regresión lineal, se puede apreciar en la figura 3.5 que la varianza explicada por el modelo trazado es superior al 90%, esto se puede traducir como un nivel de confianza de este, indicando que los resultados son bastante acertados.
- En comparación con los modelos tradicionales, se puede notar en la figura 3.10 y la tabla 3.6 que el modelo más óptimo es el modelo semi-empírico propuesto; debido a que se acerca en gran manera a los datos experimentales, esto se da porque toma parámetros cuyas características son propias del lugar; mientras que los modelos tradicionales no son los más recomendados a aplicarse, dado que en algunos casos estos modelos tienen rango de uso en parámetros como la altura de las antenas transmisoras y receptoras, y en ciertos puntos de medición estas alturas se salían del rango propuesto por los autores de dichos modelos.
- Si se toma como referencia el valor RMSE como métrica, se muestra que el más cercano a aplicarse, luego del modelo propuesto, es el ITU, dado que fue diseñado para áreas con similares características a la que se desarrolló el proyecto.
- Es posible desarrollar un modelo de propagación empírico realizando mediciones de los parámetros que serán la variable independiente y dependiente en el proceso matemático, tales como: la potencia de la señal recibida, la distancia que existe entre la antena transmisora y receptora, haciendo uso de un software estadístico que tenga como herramienta el método de regresión lineal, el cual consiste en aproximar una relación entre la variable dependiente e independiente, de tal forma nos permite conocer un

posible comportamiento de la señal en nuevos puntos dentro del lugar de medición.

4.2. Recomendaciones.

- Para mejorar el nivel de confianza obtenido, se puede extender el número de mediciones a un valor mayor a 35000 o una data con mayor cantidad de puntos de los que se realizó para obtener los resultados mostrados.
- Para un mejor desarrollo del proyecto, se puede agregar variables al proceso de regresión lineal, tales como: lluvia, humedad o temperatura, de esta manera se puede predecir un aproximado de los posibles valores a obtenerse en épocas con condiciones no normales.

5. Bibliografía

- [1] M. Crespo, «Validación de modelo de propagación empírico para conectividad exterior en áreas rurales de la Cuenca Baja del río Guayas en 5GHz,» 2018.
- [2] R. Bordón López, R. A. Quintana y S. Montejo Sanchez, «Evaluación de modelos de propagación de canal inalámbrico,» *REVISTA CUBANA DE INGENIERÍA*, vol. III, nº 1, pp. 1- 4, 2012.
- [3] ARCOTEL, «ARCOTEL,» *Boletín Estadístico del Sector de Telecomunicaciones*, vol. 6, nº 11, pp. 36-37, 2015.
- [4] M. d. T. y. S. d. I. Información., «MINTEL,» [En línea]. Available: <https://observatoriocit.mintel.gob.ec/estadistica/index.html>.
- [5] S. Buettrich, «TRICALCAR,» [En línea]. Available: http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/06_es_calculo-de-radioenlace_guia_v02.pdf. [Último acceso: 2018].
- [6] L. d. V. Hernández, «Programa Fácil,» [En línea]. Available: <https://programafacil.com/podcast/65-sistemas-de-comunicacion-inalambricas/>. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [7] CISCO, «CISCO,» Cisco Systems, Inc., [En línea]. Available: https://www.cisco.com/c/es_mx/tech/wireless-2f-mobility/wireless-lan-wlan/index.html. [Último acceso: Diciembre 2018].
- [8] C. Networks, «Cambium Networks,» 2014. [En línea]. Available: https://3fdumf3rqw5xx4mjgywguwz9-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2017/09/WP_Fixed20Wireless20LTE20Alternative.pdf. [Último acceso: Diciembre 2018].
- [9] E. Herrera Ramírez, A. Díaz Ramírez y C. T. Calafate, *Desarrollando el estándar IEEE 802.11n, un paso adelante en WLAN*, México, 2009.
- [10] M. A. Molina Reino, «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. Anexos.

A1. Datasheet de la antena PMP 450M.

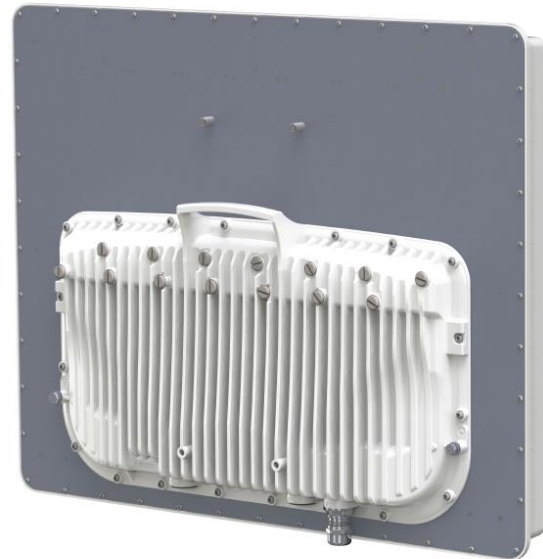


PMP 450m Access Point

Cambium Networks industry-leading 450 platform adds Multi-User MIMO capability with *cnMedusa™* technology.

Key Features:

- ***cnMedusa™* technology** enhances sector capacity by combining a smart beamforming antenna array with multiple RF transmit and receive chains, effectively multiplying available capacity by more than three times.
- Multi-User MIMO more effectively uses available spectrum by simultaneous transmissions to multiple subscribers, increasing **spectral efficiency** to more than 40 bps/Hz.
- **Protect your investment** in the 450 platform equipment by continuing to utilize existing Subscriber Modules (both 450 and 450i SMs work with the 450m and *cnMedusa* technology).
- Dramatically reduce the effect of interference with **smart beamforming**
- **SFP** port allows for greater deployment flexibility, and **AUX** port allows for connection of camera or other PoE directly.



PRODUCT

		RoW	US	EU	DES only	IC
Model Numbers	Integrated 90 degree sector	C050045A101A	C050045A102A	C050045A103A	C050045A104A	C050045A105A

SPECTRUM

Channel Spacing	Configurable to 2.5 MHz channel spacing
Frequency Range	5150-5925 MHz
Channel Width	10 MHz*, 20 MHz, and 40 MHz*

© 2016 Cambium Networks Ltd. All rights reserved.

CN PMP450m AP 06222016

Specifications

PMP 450m Access Point SPECIFICATION SHEET

INTERFACE

MAC (Media Access Control) Layer	Cambium Networks proprietary
Physical Layer	14x14 Multi-User MIMO OFDM
Ethernet Interface	100/1000BaseT, 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-inQ), 802.1Q with 802.1p priority, dynamic port VID

PERFORMANCE

Subscriber Per Sector	Up to 238		
ARQ	Yes		
Modulation Levels (Adaptive)	MCS	Signal to Noise Required (SNR, in dB)	
2X	QPSK	10	
4X	16QAM	17	
6X	64QAM	24	
8X	256QAM	32	
Maximum Deployment Range	Up to 40 miles (64 km)		
Latency	10 ms, typical		
GPS Synchronization	Yes, via Autosync (CMM5 or UGPS)		
Quality of Service	Diffserv QoS		

LINK BUDGET

Antenna Beam Width	90° integrated sector (dual polarity, H+V)
Antenna Gain	+14 dBi
Maximum Transmit Power	+24 dBm combined

PHYSICAL

Antenna Connection	Integrated Sector Array		
Surge Suppression (with LPU)	EN61000-4-5: 1.2us/50us, 500 V voltage waveform Recommended external surge suppressor: Cambium Networks Model # C000065L007A		
Mean Time Between Failure	> 40 Years		
Environmental	IP67, IP66		
Temperature / Humidity	-40°C to +60°C (-40°F to +140°F), 0-95% non-condensing		
Weight	Integrated	Approx. 14.2 kg (31 lbs)	
Wind Loading - Front Facing	@ 90 mph / 144 kph	460 N	
	@ 110 mph / 177 kph	700 N	
Dimensions (HxWxD)	Integrated	52 x 65 x 11 cm (20.3" x 25.7" x 4.4")	
Power Consumption	70 W typical, 80 W peak (up to 110 W max with AUX port PoE enabled)		
Input Voltage	42.5-59 V DC		
Mounting	Pole mount with included brackets		

CN PMP450m AP 06222016

Specifications

PMP 450m Access Point SPECIFICATION SHEET

SECURITY

Encryption 56-bit DES, FIPS-197 128-bit AES

CERTIFICATIONS

Industry Canada (ISED) 5.1*, 5.2*, 5.4*, 5.8 GHz

FCC ID 5.1*, 5.2*, 5.4*, 5.8 GHz

CE EN 301 893 v1.8.1 (5.4GHz)

EN 302 502 v1.2.1 (5.8 GHz)

A2. Simulación punto a punto desde software LINK Planner

