

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA APLICACIONES EN LA BANDA DE 3,5 GHz

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela por la Br.
Renzella A., Rosangela para
optar al título de Ingeniero
Electricista.

Caracas, 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA APLICACIONES EN LA BANDA DE 3,5 GHz

Tutor Industrial: Ing. Emmanuel Millán

Tutor Académico: Francisco Varela

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela por la Br.
Renzella A., Rosangela para
optar al título de Ingeniero
Electricista.

Caracas, 2017

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

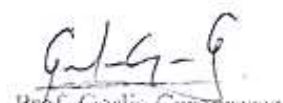
Caracas, 31 de marzo de 2017

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Rosangela Renzella A., titulado:

“EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA APLICACIONES EN LA BANDA DE 3,5 GHz”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Comunicaciones, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Lorena Núñez
Jurado


Prof. Gerlis Caropresse
Jurado


Prof. Francisco Varela
Prof. Guía

AGRADECIMIENTOS

A Dios principalmente por permitirme culminar mi carrera.

A mi mamá, mi papá y mi hermano, por su paciencia y comprensión y por apoyarme en todo momento.

Al profesor Francisco Varela por orientarme en la elaboración de la tesis y a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV y de la facultad de Ingeniería porque a pesar de la situación que están viviendo actualmente, tienen la disposición de ayudar y brindar sus conocimientos para la formación de nuevos profesionales.

A Orlando Medina, Emmanuel Millán y a las personas de Telefónica Venezolana por guiarme y apoyarme a lo largo del desarrollo de la tesis.

Renzella A., Rosangela

EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA APLICACIONES EN LA BANDA DE 3,5 GHz

Prof. Guía: Francisco Varela. **Tutor Industrial:** Ing. Emmanuel Millán.
Tesis. Caracas. U.C.V. **Facultad de Ingeniería.** Escuela de Ingeniería
Eléctrica. **Ingeniero Electricista.** **Opción:** Comunicaciones. **Empresa:**
Telefónica Movistar CA. 2017. 86 h + anexos.

Palabras claves: PMP, COST 231 WALFISCH-IKEGAMI, COST 231 HATA,
SUI, ECC-33, modelos de propagación, regresión lineal múltiple.

Resumen. La presente tesis consiste en la evaluación de cuatro modelos de propagación en la banda de frecuencias de 3,5 GHz para enlaces punto a multipunto, en el cual se modificarán las constantes de los parámetros de estos modelos, utilizando un método numérico de ajuste de curvas conveniente; además, se realizará un análisis estadístico de los resultados, para poder seleccionar y recomendar a la empresa Telefónica Venezolana, el modelo de propagación que le permita predecir los niveles de potencia recibida para la implementación de nuevos enlaces.

TABLA DE CONTENIDO

CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
Resumen	v
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE GRÁFICOS	x
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
Planteamiento del problema	3
Objetivos.....	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Justificación de la investigación.....	4
Factibilidad	4
Antecedentes del estudio	5
CAPÍTULO II - Tecnologías de acceso inalámbrico.....	8
Redes fijas.....	8
PTP (Punto a Punto)	8
PMP (Punto a Multipunto)	8
Malla	9
Redes móviles.....	9
Redes PAN (Personal Area Network)	9
Red LAN (Local Area Network)	10
Red MAN (Metropolitan Area Network).....	10
Red WAN (Wide Area Network)	10
WiMAX	10

WiMAX fijo	11
WiMAX móvil.....	11
Estándares de la IEEE para enlaces fijos.....	11
CAPÍTULO III - Clasificación de los modelos de propagación	13
Tipos de modelos de propagación	18
Determinístico	18
Ecuación de Friis	19
Empíricos	20
Semi-empíricos	21
Modelos de propagación	21
Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami	21
Modelo COST 231 Hata.....	24
Modelo SUI	26
Modelo ECC-33.....	28
CAPÍTULO IV - Métodos numéricos de ajuste de curvas	30
Modelo de regresión lineal simple	30
Modelo de regresión lineal múltiple	31
Matriz de dispersión	31
- Coeficiente de correlación de Pearson.....	31
Estimación de parámetros.....	32
Método de mínimos cuadrados	32
Bondad del ajuste.....	34
- Coeficiente de correlación múltiple (R)	34
- Coeficiente de determinación	34
- Coeficiente de determinación ajustado.....	35
Análisis de residuos	35
- Suma de los cuadrados de los errores residuales	36
CAPÍTULO V - Calibración de los modelos de propagación.....	38
Barrido de espectro	38

Diseño de la herramienta	41
Parámetros iniciales y muestras de señal recibida en dB.	44
CAPÍTULO VI - Análisis y comparación de los modelos de propagación	45
Datos para el cálculo de la potencia de señal recibida.....	45
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
BIBLIOGRAFÍAS.....	86
ANEXOS	87
Anexo 1. Barrido de espectro	87
Anexo 2. Convertir coordenadas en el sistema WGS-84 al sistema UTM.	91
Anexo 3. Fórmula de Haversine	94
Anexo 4. Manual para la utilización de la interfaz gráfica	95
Anexo 5. Formato Esri grid	107
Anexo 6. Cálculos para obtener la ganancia efectiva de la antena transmisora.....	108
Anexo 7. Especificaciones de la antena transmisora.	109
Anexo 8. Patrones de radiación.....	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Entornos de funcionamiento físico – Degradaciones de la propagación.	15
Tabla 2. Valores numéricos para el modelo SUI.....	27
Tabla 3. Variables utilizadas en el Modelo COST 231 WALFISCH-IKEGAMI.	46
Tabla 4. Variables utilizadas en el Modelo COST 231 HATA	47
Tabla 5. Variables utilizadas en el Modelo SUI.....	49
Tabla 6. Variables utilizadas en el Modelo ECC-33	51
Tabla 7. Información de las SU a nivel nacional	53
Tabla 8. Resultados de potencia recibida con los modelos de propagación ajustados	57
Tabla 9. Comparación entre los modelos antes y después del ajuste	64
Tabla 10. Modelo COST 231 WALFISCH-IKEGAMI.....	65
Tabla 11. Modelo COST 231 HATA.....	65
Tabla 12. Modelo SUI	66
Tabla 13. Modelo ECC-33	66
Tabla 14. Comparación del ajuste de los modelos.	67
Tabla 15. Resultados de las potencias recibidas con los modelos ajustados	69
Tabla 16. Comparación entre los modelos, antes y después del ajuste	76
Tabla 17. Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami.....	77
Tabla 18. Modelo Cost 231 Hata	77
Tabla 19. Modelo SUI	Error! Bookmark not defined.
Tabla 20. Modelo ECC-33	78
Tabla 21. Comparación del análisis de regresión	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Definición de parámetros del modelo COST 231 Walfisch Ikegami	22
Figura 2. Conexión para el barrido de espectro.....	39
Figura 3. Interfaz gráfica para calibrar los modelos de propagación.....	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Relación entre las variables para el modelo COST 231 WALFISCH-IKEGAMI	47
Gráfico 2. Relación entre las variables para el modelo COST 231 HATA	48
Gráfico 3. Relación entre las variables para el modelo SUI	50
Gráfico 4. Relación entre las variables para el modelo ECC-33	52
Gráfico 5. Interfaz gráfica con los resultados	60
Gráfico 6. Residuos para Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami	61
Gráfico 7. Residuos para Modelo Cost 231 Hata.....	61
Gráfico 8. Residuos para Modelo SUI.....	62
Gráfico 9. Residuos para Modelo ECC-33.....	62
Gráfico 10. Interfaz gráfica con los resultados (descartando los puntos atípicos)	72
Gráfico 11. Residuos para Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami	73
Gráfico 12. Residuos para Modelo Cost 231 Hata.....	74
Gráfico 13. Residuos para Modelo SUI.....	74
Gráfico 14. Residuos para Modelo ECC-33.....	75

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

ECC: *Electronic Communication Committee.*

FWA (*Fixed Wireless Access*): Acceso Inalámbrico Fijo.

FWS (*Fixed Wireless System*): Sistemas Inalámbricos Fijos

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones.

LAN (*Local Area Network*): Red de área local.

LDMS (*Local Multipoint Distribution Service*): Sistema de Distribución Local Multipunto.

LOS (*Line of Sight*): línea de vista.

MAN (***Metropolitan Area Network***): Red de área metropolitana.

MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*): Múltiple entrada múltiple salida.

MU: Unidad Maestra.

NLOS (*Non Line of Sight*): Sin línea de vista.

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiple*): Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.

PAN (*Personal Area Network*): Red de área personal.

PMP: Punto a Multipunto.

PoE: *Power over Ethernet.*

PTP (*Point-to-Point*): Punto a Punto.

RSSI (*Received Signal Strength Indicator*): Indicador de fuerza de la señal recibida.

SU: Unidad Esclava.

SUI: *Stanford University Interim*

TDD (*Time Division Multiple*): Multiplexación por división de tiempo.

UTM (*Universal Transverse Mercator*): Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator.

VoIP: Voz sobre protocolo de internet.

WGS84 (*World Geodetic System*): Sistema de coordenadas geográficas mundial.

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*): Interoperabilidad mundial para acceso por microondas.

WLL (*Wireless Local Loop*): Bucle local inalámbrico.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se realizó en la empresa Telefónica Venezolana C.A, ubicada en la Av. Francisco de Miranda, Edificio El Parque, Los Palos Grandes, Caracas; la cual es una de las principales en el área de las telecomunicaciones en Venezuela. A través de la marca Movistar, ofrece servicios de telefonía fija y móvil, TV digital, internet móvil, transmisión de datos y servicios de valor agregado, su finalidad es enfocarse en mejorar y ampliar la red en todo el país para ajustarse a las necesidades de sus clientes.

Actualmente, la banda de 3,5 GHz se utiliza a nivel mundial para brindar servicios de enlaces punto a multipunto (PMP), WiMAX fijo y móvil, LTE con la técnica duplexación por división de tiempo (TDD). Con el propósito de contar con la precisión requerida en la etapa de planificación y diseño del servicio planteado sobre enlaces punto multipunto para comunicaciones fijas, es necesario conocer cómo se propaga la señal en esta banda de frecuencias, por tal motivo, se realizará un estudio comparativo con los modelos de propagación.

Existen muchos modelos de propagación empíricos y semi-empíricos que han sido estudiados para los sistemas de comunicaciones. Los modelos empíricos Okumura [3], Okumura-Hata, Ericsson 9999 [11] no son válidos para frecuencias superiores a 2GHz. El modelo Longley-Rice se utiliza para rangos de frecuencias entre 20 MHz y 20 GHz, sin embargo, se usa principalmente para enlaces punto a punto, por lo cual no se podría utilizar en este estudio. De igual forma, el modelo Egli también es aplicado para enlaces punto a punto y para frecuencias inferiores a 1 GHz. El modelo Walfisch-Bertoni se utiliza para sistemas móviles con frecuencias inferiores a 3 GHz, por cual también quedaría descartado. El modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami se puede utilizar para frecuencias inferiores a 6 GHz debido a que se pueden despreciar los

efectos del clima para las frecuencias entre 2 y 6 GHz [8]. Además, los modelos Cost 231-Hata, ECC-33 y SUI [3], [9], [10] [12] son utilizados para sistemas que trabajan en la banda de 3,5 GHz; a pesar de que estos modelos son para sistemas móviles también han sido aplicados para comunicaciones fijas, por lo tanto, se trabajará con estos cuatro (4) modelos y se determinará cuál es el que mejor se adapta a las condiciones requeridas.

El objetivo de este trabajo de grado es calibrar y comparar cuatro (4) modelos de propagación para enlaces punto a multipunto en la banda de 3,5 GHz para poder seleccionar el modelo que mejor se ajuste, es decir, el que presente menor error con respecto a los valores medidos. Para realizar la calibración del modelo, se deberán tomar mediciones de los niveles de potencia de señal recibida de las antenas receptoras que se están instalando actualmente, así como los demás datos necesarios para efectuar el ajuste (frecuencia de operación del enlace, coordenadas geográficas y alturas sobre el nivel del suelo a la cual están colocadas las antenas transmisoras y receptoras).

Finalmente, conocido el modelo de propagación calibrado para la región de Caracas, la empresa se encargará de utilizar esas ecuaciones para modificar la herramienta que poseen actualmente para planificar y diseñar el servicio punto a multipunto.

CAPÍTULO I

Planteamiento del problema

En la empresa Telefónica Venezolana CA se está implementando una nueva tecnología para enlaces punto a multipunto; por lo cual, surge la necesidad de conocer un modelo ajustado que le permitiría al departamento de ingeniería de acceso, utilizar esas ecuaciones para añadirlas a la herramienta que poseen actualmente para planificar y diseñar el servicio en cuestión. Por tal motivo, se plantea estudiar cuatro (4) modelos de propagación en la banda de frecuencias de 3,5 GHz.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar cuatro (4) modelos de propagación para enlaces punto a multipunto para comunicaciones fijas en la banda de 3,5 GHz en la ciudad de Caracas.

Objetivos específicos

1. Describir los cuatro (4) modelos de propagación electromagnética para la banda de frecuencias de 3,5 GHz aplicados a enlaces punto a multipunto y así obtener un basamento teórico de los mismos.
2. Elaborar una herramienta, utilizando un software de simulación, que permita ajustar los parámetros de los modelos de propagación seleccionados para minimizar el error y la desviación estándar.
3. Recolectar muestras del nivel de potencia de señal recibida en los receptores ubicados en la ciudad de Caracas.

4. Analizar las variaciones estadísticas de los niveles de potencia recibida en varios enlaces ubicados en Caracas a fin de validar los modelos escogidos.
5. Comparar los modelos de propagación calibrados y recomendar a la empresa el que mejor se adapta a esta banda de frecuencias.

Justificación de la investigación

Es necesario determinar un modelo para enlaces punto a multipunto para comunicaciones fijas en la banda de frecuencias de 3,5 GHz; por tal razón, se realizará un estudio de cuatro (4) modelos de propagación, además, se deberán calibrar con el fin de reducir la diferencia entre los valores calculados y medidos (modelos empíricos).

Actualmente, se tiene una base de datos con información relacionada a las coordenadas de las estaciones base y de los clientes (CPE), la altura donde están ubicadas las antenas, las cuales serán necesarias para determinar los niveles de señal recibida para los distintos modelos de propagación. Se deberán tomar mediciones en campo que conformen una muestra estadísticamente representativa en la ciudad de Caracas, utilizando un analizador de espectro. Luego, se desarrollará una herramienta utilizando un software de simulación que permita calibrar los modelos en cuestión, dando resultados detallados que posibiliten la comparación precisa de las deducciones de los cuatro modelos, utilizando todos los datos recopilados para introducirlos como parámetros iniciales en la herramienta.

Factibilidad

El proyecto se realizará en las instalaciones de Telefónica Venezolana CA, en el Departamento de Ingeniería de Acceso, la cual está ubicada en la Av.

Francisco de Miranda, Edificio el Parque, piso 16, Los Palos Grandes, Caracas. Actualmente, la tecnología está siendo aplicada a nivel nacional y se tiene la base de datos con la información necesaria de las radio bases y los clientes; sin embargo, para seleccionar el modelo de propagación calibrado que mejor se ajusta a la banda 3,5 GHz se tomarán muestras de los niveles de señal recibida por lo cual se limitará el análisis únicamente a la ciudad de Caracas; además, el tiempo estipulado para la realización del proyecto es de 24 semanas, por lo tanto, es factible su realización.

Antecedentes del estudio

Actualmente, la empresa Telefónica Venezolana CA cuenta con una herramienta a través de una interfaz web que calcula enlaces punto a punto en la frecuencia de 23 GHz, donde el ingeniero coloca los datos generales (frecuencia, radio, tipo de terreno, tipo de clima, temperatura promedio, región pluviométrica, margen de diseño, confiabilidad objetivo, tipo medio de acceso), los datos del cliente (altura de la torre, cota, altura de la antena, AGL, soporte, coordenadas, polarización, tipo de cable, longitud de cable), los datos de la celda (nombre de la estación, altura de la antena, AGL, soporte, coordenadas, polarización, tipo de cable, longitud de cable, canal, par de frecuencia), los datos del proyecto (Antena del cliente, antena de la celda, potencia transmitida) y luego la herramienta realiza los cálculos y muestra una gráfica del enlace y los resultados (pérdidas de absorción, tasa de lluvia, potencia recibida, pérdidas de polarización, margen de dispersión, pérdidas totales, confiabilidad crane, azimut celda, ganancia total, pérdidas de espacio libre, *path outage*, margen de desvanecimiento, pérdidas de alimentadores, confiabilidad CCIR, margen compuesto, azimut del cliente, distancia).

Algunos trabajos relacionados con el tema propuesto se presentan a continuación:

- Trabajo realizado por los estudiantes Fidel Alberto Sánchez Maya y Robin Ricardo Lacruz López en el año 2008 en la Universidad Simón Bolívar, en el cual se estudiaron los modelos de propagación Hata, Cost 231 Hata, Erceg, Walfisch-Ikegami para y se diseñó una interfaz de usuario (GUI) para sistemas WiMAX móvil. [1]
- El trabajo de Julio César Covarrubias Ruiz para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Telecomunicaciones en el Instituto Politécnico Nacional, México. Donde se inicia una breve explicación sobre los sistemas WiMAX y se clasifican los modelos de propagación para los enlaces con línea de vista LOS y sin línea de vista NLOS. Además, se desarrolló método matemático para ajustar el modelo ERCEG a otros tipos de terrenos que no estaban considerados. [2]
- Trabajo realizado por el Ing. Stalin Xavier Caraguay Ramírez para obtener el grado de Maestro en Computación en la Universidad de Colima. Donde explica los distintos tipos de protocolos para redes inalámbricas y la clasificación de los modelos de propagación que se utilizan para WiMAX., tales como Okumura, Cost 231 Hata, ECC-33, SUI. [3]
- Trabajo realizado por Néstor Javier Hernández Marcano en el año 2007 en la Universidad Simón Bolívar, en el cual utilizan el modelo de propagación interino de la Universidad de Stanford (SUI) ya que es el recomendado por WiMAX Forum. También, se estudiaron la ecuación de Friis y el modelo de Keenan-Motley, utilizado para interiores. [4]

- Trabajo realizado por Bernardo A. Infante A., en el año 2012 en la Universidad Católica Andrés Bello, en el cual se realiza un diseño de un sistema inalámbrico utilizando WiMAX para las instalaciones de la UCAB. [5]
- Trabajo realizado por Christian de la Rosa Díaz Moreno, en el año 2006 en la Universidad Simón Bolívar, donde se elaboró un proyecto para presentar a CONATEL para la licitación de la banda 3,5 GHz utilizando la tecnología WiMAX, además, se explicó las ecuaciones usadas según la UIT REC. 530 y 526 (ecuación de Friis y pérdidas de espacio libre, pérdidas por difracción, reflexión, lluvia, probabilidad de desvanecimiento plano y desvanecimiento selectivo) y el modelo de propagación interino de la Universidad de Stanford (SUI) para el cálculo de los enlaces. [6]
- Trabajo realizado por Mohammad Shahajahan, A. Q. M. Abdulla Hes-Shafi, en el año 2009, en Blekinge Institute of Tegnology, donde se compara y explica cinco modelos de propagación para la tecnología de acceso WiMAX (Cost 231 Hata, ECC-33, modelo SUI, modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami y modelo Ericsson), para ambientes urbanos, suburbano y rural en condición NLOS (sin línea de vista), con el objetivo de encontrar el modelo adecuado para la planificaciones de células WiMAX en la frecuencia de 3.5 GHz. [12]

CAPÍTULO II - Tecnologías de acceso inalámbrico

En este capítulo se definirán los diferentes tipos de tecnologías de redes de acceso inalámbricos utilizados en la banda de frecuencia de 3,5 GHz, entre las cuales está la tecnología WiMAX, sistemas WLL y LDMS, cuya aplicación es en redes de acceso inalámbrico fijo, es decir, donde el usuario final no requiere de movilidad. [15]

Las redes de acceso inalámbrico se pueden clasificar en redes fijas o móviles, punto a punto o punto a multipunto, éstas, además, se pueden utilizar en bandas de frecuencias licenciadas y no licenciadas.

Redes fijas

Son diseñadas para establecer las comunicaciones de datos entre dos o más lugares fijos que están físicamente aislados.

PTP (Punto a Punto)

La topología punto a punto consiste en establecer una enlace entre una estación base y un receptor; emplean antenas directivas, por lo que su ganancia es mayor y se tiene mayor control de interferencia. [16]

PMP (Punto a Multipunto)

La topología punto a multipunto consiste en tener varios enlaces entre una estación base y varias estaciones receptoras que se encuentran en su zona de cobertura. Además, los enlaces pueden ser con o sin línea de vista LOS y NLOS, respectivamente. Las antenas utilizadas son sectoriales o tipo panel, en el cual la apertura es más ancha por lo que la ganancia es menor en comparación a las utilizadas en los enlaces PTP. Otra característica se relaciona con el rendimiento del enlace, debido a que, el mismo depende de

los usuarios que estén en una zona de cobertura debido a que se divide entre todos los usuarios suscritos a esa red.

Una ventaja de la utilización de enlaces PMP con respecto a los enlaces PTP es que se requiere de menos antenas para la misma cantidad de suscriptores, debido a que en PMP se utiliza una antena sectorial en el transmisor y cada receptor se enlaza con el mismo transmisor; mientras que, en los enlaces PTP cada antena receptora esta apuntada a una antena transmisora. [16]

Malla

La topología malla consiste en tener un nodo como estación base y los nodos usuarios, que a diferencia de los enlaces PMP éstos tienen la capacidad de retransmitir la señal para ofrecer el servicio a los usuarios que estén fuera de la zona de cobertura del nodo trasmisor. [16]

Redes móviles

Son redes más complejas de diseñar e implementar y se aplican por ejemplo en redes celulares en la cual soportan alta velocidad de movilidad de la red de datos por lo que se debe proporcionar cobertura en cualquier lugar.

Las redes de acceso inalámbrico se pueden clasificar según su alcance y las tecnologías se rigen según el estándar 802 de la IEEE. Algunos tipos de redes se mencionan a continuación:

Redes PAN (Personal Area Network)

Son una red de datos, por lo general inalámbrica, que se utiliza para que usuarios cercanos se puedan comunicar, su alcance es menor a 10 m. Algunas tecnologías que utilizan este tipo de red son Zigbee y Bluetooth. El estándar de la IEEE utilizado para la red WPAN es 802.15. [18]

Red LAN (Local Area Network)

Es una red de datos en la cual se pueden comunicar dispositivos de datos tales como computadoras, teléfonos móviles. El área de cobertura es relativamente pequeña, de aproximadamente 100 m y generalmente se aplica en los hogares, oficinas, universidades. Los estándares más utilizados son Ethernet y WiFi. La tecnología WiFi se basa en el estándar de la IEEE 802.11. También se aplica en redes LAN los estándares 802.3 y 802.5. [18]

Red MAN (Metropolitan Area Network)

Es una red que se sitúa en un sector, urbanización o municipio pequeño, la cual está constituida por un conjunto de redes LAN conectadas en un radio de aproximadamente 1 a 7 Km. Las tecnologías de este grupo son conocidas como de banda ancha, un ejemplo de este tipo de red es WiMAX fijo debido a que puede ser considerado como una red WMAN (Wireless Metropolitan Area Network). [18]

Red WAN (Wide Area Network)

Es una red de datos que cubre una gran área geográfica, están basadas en conexiones LAN y está compuesta por una cantidad de nodos interconectados. Las tecnologías más utilizadas en este tipo de red es Internet, WiMAX móvil. [18]

WiMAX

La tecnología WiMAX utiliza el estándar de la IEEE 802.16, las cuales se pueden aplicar tanto en bandas licenciadas como no licenciadas. Se basan en OFDM, la cual posee alta eficiencia espectral. El alcance de esta tecnología es de hasta 20 km. La topología utilizada es punto a multipunto y se clasifica en WiMAX fijo y móvil.

WiMAX fijo es utilizado para conexiones en el cual tanto el transmisor como el receptor se encuentran en los techos de edificaciones. Algunos servicios que ofrece es acceso inalámbrico y servicios telefónicos utilizando VoIP, las frecuencias utilizadas son las de 3,5 GHz y 2,5 GHz (licenciadas) y 5,8 GHz (no licenciada). [15]

WiMAX móvil por su parte es una tecnología que permite a los equipos móviles tener acceso a internet. [15]

Estándares de la IEEE para enlaces fijos

El estándar de la IEEE 802.16 fue aprobado en diciembre de 2001 para el acceso inalámbrico de sistemas fijos, punto a punto con línea de vista directa (LOS), en las frecuencias que van desde 10 GHz hasta 66 GHz. [22]

El estándar de la IEEE 802.16a es una actualización publicada en abril de 2003, donde se incluye el rango de frecuencias de 2 a 11 GHz y la capacidad de funcionar sin línea de vista NLOS; además, permite las conexiones fija punto a punto, punto a multipunto y redes malladas. [21]

El estándar de la IEEE 802.16c es una ampliación del estándar 802.16, publicada en el año 2002 donde se desarrollan las características obligatorias y opcionales para asegurar la interoperabilidad para el rango de frecuencias de 10 GHz a 66 GHz. [23]

El estándar de la IEEE 802.16d define las características importantes para el acceso fijo de banda ancha inalámbrica. Se incorporan tres tipos de modulación para la capa física, la modulación con una portadora OFDM con 256 portadoras y OFDM de 2048 portadoras, sin embargo, la más utilizada es

OFDM con 256 portadoras debido a que presenta menor complejidad a la hora de la sincronización.

El estándar de la IEEE 802.16e es una actualización en la cual se provee un soporte para el acceso móvil de banda ancha inalámbrica, con diferentes velocidades en una banda licenciada de 2 a 6 GHz con OFDMA como interfaz de aire, también es conocido como WiMAX móvil.

El estándar de la IEEE 802.16f se basa en modelos de gestión de redes que implica la gestión de nodos, de flujos de datos y la calidad de servicio (QoS). Define la base de encaminamiento para conexiones fijas y móviles entre una estación base y los terminales.

El estándar de la IEEE 802.16g se encarga de la gestión de procedimientos y servicios en el plano de control.

El estándar de la IEEE 802.16h mejora la existencia del sistema de bandas de frecuencias con licencia.

El estándar de la IEEE 802.16i provee la herramienta para la administración y control de la información en sistemas móviles.

El estándar de la IEEE 802.16j especificación para la red de transmisión multi-salto. [24]

El estándar de la IEEE 802.16m fue aprobada en el 2011, se conoce también como Mobile WiMAX Release 2 o WirelessMAN-Advanced y es una interfaz aérea avanzada con tasa de transferencia de 100 Mbit/s móvil y fijo 1 Gbit/s sobre punto fijo. Tiene como objetivo cumplir con los requerimientos de ITU-R IMT-Advanced para sistemas 4G. [25]

CAPÍTULO III - Clasificación de los modelos de propagación

Un modelo de propagación es un conjunto de ecuaciones y algoritmos matemáticos que se utilizan para representar el comportamiento de la señal que se propaga en un medio físico entre el transmisor y el receptor. Como el canal de comunicación depende de las características del entorno tales como las atenuaciones debido a los obstáculos y las señales por multitrayectorias, no se puede obtener un modelo de propagación general que se pueda aplicar a cualquier situación, es por tal motivo que surgen modelos más específicos que puedan ajustarse a los diferentes tipos de terrenos para determinadas distancias, frecuencias de operación y alturas de las antenas transmisora y receptoras. [19]

Los enlaces entre el transmisor y receptor pueden tener línea de vista (LOS), es decir, que esté libre de obstrucciones entre el transmisor y el receptor y sin línea de vista (NLOS) para lo cual existe modelos de propagación que se ajustan, agregando un factor de corrección para considerar los obstáculos, además, puede tomar en cuenta si el entorno de propagación es urbano, suburbano o rural. [17]

Los modelos de propagación permiten obtener el valor de potencia recibida a partir de los parámetros del enlace, es decir, dependiendo de las características del terreno y conociendo las alturas de las antenas, la frecuencia y la distancia del enlace, se puede tener una aproximación al valor medido. [19]

En un modelo de propagación se debe considerar los factores que lo afectan, tales como la pérdida del espacio libre, pérdidas debido a obstrucciones y los

efectos por multitrayecto, fenómeno de ensombrecimiento, efecto doppler, desvanecimientos atmosféricos, difracción, refracción retardos, así como el ambiente de propagación (urbano, suburbano, rural). Sin embargo, no necesariamente los modelos de propagación engloban todos los factores mencionados anteriormente y cada uno los considera de forma distintas; por tal razón, para mejorar la estimación de la pérdida por trayectoria, se suele realizar ajustes a los modelos, utilizando métodos numéricos de regresión en el cual se puede hallar una constante que permita calibrar el modelo de propagación para un ambiente dado. [19]

Por otro lado, los modelos de propagación se pueden considerar estáticos o dependiente del tiempo, en el primer caso, se calcula la señal recibida utilizando los parámetros de frecuencia, distancia, altura de la antena transmisora y receptora y en algunos modelos se toma en cuenta la información del terreno; sin embargo, cuando involucra el tiempo en el modelo de propagación, se debe tomar en cuenta los efectos de multitrayectoria y efecto doppler. [19]

Existen modelos de propagación publicados por la UIT en el cual se incluyen las pérdidas por trayectorias, los efectos de desvanecimiento por multitrayectoria, difracción, refracción dependiendo de las aplicaciones o la frecuencia de operación o algún otro parámetro del enlace. Según la recomendación UIT-R P.1411-8 las pérdidas por propagación de los enlaces a distancias inferiores a 1 km se ven afectadas principalmente por edificios y árboles, más que por variaciones en la elevación del terreno. Sin embargo, esta recomendación clasifica los entornos de propagación en urbano de construcción muy alta, urbano de construcción alta, urbano de construcción baja/suburbano, zona residencial y rural. [20]

Tabla 1. Entornos de funcionamiento físico – Degradaciones de la propagación. [20]

Entorno	Descripción y degradaciones de la propagación significativas
Urbano de construcción muy alta	– Valle urbano profundo con una gran actividad, caracterizado por avenidas con edificios de alta densidad y varias decenas de pisos, hecho que da como resultado un valle urbano profundo. – Los edificios de alta densidad y los rascacielos se alternan, hecho que da como resultado trayectos de propagación con abundante dispersión sin visibilidad directa. – Las hileras de edificios altos hacen posible la existencia de retardos muy largos de trayecto. – El tráfico intenso y el elevado flujo de visitantes en la zona actúan como reflectores, lo que añade una deriva Doppler a las ondas reflejadas. – Los árboles y las calles proporcionan un ensombrecimiento dinámico.

Urbano de construcción alta	– Valle urbano, caracterizado por avenidas con edificios altos de varios pisos. – La altura de los edificios reduce la probabilidad de una contribución significativa de la propagación que pasa por encima de los tejados. – Las hileras de edificios altos hacen posible la existencia de largos retardos de trayecto. – El gran número de vehículos en movimiento en la zona actúa como reflector, lo que añade una deriva Doppler a las ondas reflejadas.
Urbano de construcción baja/Suburbano	– Típicamente calles anchas. – Las alturas de los edificios suelen ser inferiores a tres pisos, lo que hace probable la difracción por los tejados. – Pueden producirse en ocasiones reflexiones y ensombrecimientos producidos por los vehículos en movimiento. – Los efectos principales son: retardos grandes y pequeñas derivas Doppler.
Zona residencial	– Construcciones de uno y dos pisos. – Las calles suelen ser de doble dirección con vehículos estacionados a ambos lados. – Es posible que haya vegetación densa a ligera. – Tráfico motorizado generalmente ligero.
Rural	– Pequeñas casas rodeadas de amplios jardines. – Influencia de la altura del terreno (topografía). – Posibilidad de vegetación densa a ligera. – Tráfico motorizado ocasionalmente elevado.

La recomendación de la UIT R P.1411-8 utiliza un modelo de propagación para el rango de frecuencias entre 2 y 16 GHz y estudia los distintos tipos de enlaces NLOS y LOS para las zonas urbanas, suburbanas y rural en los casos que el transmisor y el móvil están situados sobre los tejados, el móvil está a la altura de la cabeza o por debajo de la misma. [20]

En la recomendación de la UIT R-P.1546-5 se describe un método de predicción de propagación radioeléctrica para enlaces punto a zona en la gama de frecuencias de 30 a 3000 MHz y altura efectiva de la antena de transmisión menores a 3000 m. Este método permite que los trayectos puedan ser terrestres, marítimos o mixtos terrestres-marítimos y estén comprendidos entre 1-1000 km de longitud para ello se basa en la interpolación o extrapolación de curvas de intensidad de campo que fueron deducidas empíricamente en función de la distancia, la altura de la antena, la frecuencia y el porcentaje de tiempo. [26]

La recomendación de la UIT R P.526-6 proporciona información sobre el cálculo de intensidades de campo para trayectos con propagación con difracción, en el cual el modelo se aplica a diferentes tipos de obstáculos y a distintas geometrías del trayecto, tanto para tierra esférica como para terrenos irregulares con distintos obstáculos. [27]

La recomendación de la UIT-R P.1057-4 explica las distribuciones de probabilidad más importantes para establecer modelos en los cuales son necesarios para estudiar con métodos estadísticos, los fenómenos de propagación. Debido a que el comportamiento dinámico de las señales deseadas e interferentes desempeñan un papel importante en la factibilidad del sistema, es necesario conocer el alcance y la rapidez de las fluctuaciones de esas señales y así especificar parámetros tales como el tipo de modulación, potencia de transmisión, diversidad, método de codificación. [28]

Tipos de modelos de propagación

Los modelos de propagación se clasifican en determinísticos o teóricos, empíricos o experimentales y semiempíricos. [19]

Determinístico

Los modelos determinísticos se basan en un estudio físico que describe los fenómenos implicados en la propagación de la señal electromagnética. Estos modelos se basan en ecuaciones matemáticas, derivadas de las ecuaciones de Maxwell y de análisis geométrico y físico en el cual se pueden estudiar los efectos de multitrayectoria. [19]

Existen varios procesos físicos que intervienen en la propagación de la onda electromagnética entre el transmisor y el receptor, estos mecanismos de propagación son principalmente: reflexión, refracción, dispersión y difracción, y se definen a continuación:

- **Reflexión:** Ocurre cuando la onda choca con un obstáculo grande y a pesar de éste absorbe parte de la energía recibida hay una parte que se refleja. [19]
- **Refracción:** es el cambio de dirección que se produce cuando la onda cambia de un medio a otro. Por eso, se utiliza la ley de Snell, la cual describe la relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo refractado cuando las ondas electromagnéticas pasan por el límite entre dos medios diferentes. [19]
- **Difracción:** se produce cuando existen obstrucciones de objetos con bordes bien definidos entre la antena transmisora y receptora,

originando frente de onda secundarios. El principio de Huygens explica este mecanismo de propagación de la señal cuando no hay línea de vista (NLOS). [19]

- **Dispersión:** ocurre cuando la onda se propaga en un medio de alta densidad de obstáculos y a diferencia de la difracción, tiene mayor esparcimiento de la señal. [19]

Ecuación de Friis

El modelo teórico de pérdidas en el espacio libre o ecuación de Friis se deduce de las ecuaciones de Maxwell y es válida para cualquier frecuencia y distancia, sin embargo, este modelo se cumple si entre la antena transmisora y receptora no hay ningún obstáculo, es decir, para enlaces LOS.

$$P_r = \frac{P_t G_r G_t \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} = \frac{P_t G_r G_t c^2}{(4\pi)^2 d^2 f^2} \quad (1)$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log \frac{c}{1000 * 4\pi} - 20 \log d - 20 \log f \quad (2)$$

$$P_r = PIRE + G_r - PL \quad (3)$$

$$PIRE = P_t + G_t - L_c \quad (4)$$

$$PL = 20 \log \frac{4\pi}{0,3} 20 \log d + 20 \log f \quad (5)$$

$$PL = 32,44 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (6)$$

Donde:

PIRE: potencia isotrópica radiada efectiva

P_r : Potencia recibida

G_r : Ganancia de la antena receptora en dBi

G_t : Ganancia de la antena transmisora en dBi

PL : Pérdidas por trayectoria en dB

L_c : Pérdidas por conectores y cables en dB

d : distancia entre el transmisor y el receptor, expresado en km

f : frecuencia de transmisión en MHz

Por otro lado, la zona de Fresnel se define por un área en forma de elipse entre dos radios (la antena transmisora y receptora). Para garantizar que haya línea de vista radioeléctrica, la zona de Fresnel debe estar despejada al menos 60%.

Empíricos

A veces no es posible modelar un ambiente de propagación solo con ecuaciones matemáticas debido a que las características del terreno interfieren en la propagación de la señal. Por lo tanto, los modelos empíricos se modelan como un conjunto de variables aleatorias, donde el nivel de precisión depende de la información que se tenga sobre el ambiente, es decir, se basan en medidas realizadas en un entorno en un entorno particular. [19]

Estos modelos de propagación no tienen alta complejidad matemática, ya que se basan en mediciones realizadas en un ambiente particular y a partir de estos puntos medidos se utilizan métodos de regresión para ajustar el modelo.

Tal como se explicó anteriormente existen distintos tipos de modelos de propagación, por lo tanto, para este trabajo de especial de grado se seleccionó únicamente cuatro modelos que pueden ser utilizados para enlaces punto a multipunto en la banda de frecuencias de 3,5 GHz. Según la organización WiMAX Forum y la recomendación IEEE 802.16, sugieren los modelos válidos para la frecuencias de 3.5 GHz, los cuales se explicaran con detalle a continuación.

Semi-empíricos

Debido a que las características del terreno intervienen en la propagación de la señal, un modelo semi-empírico debe tomar en cuenta las medidas realizadas y luego ser ajustadas a cierto modelo establecido teóricamente, considerando los factores de ajuste de altura, así como la altura y densidad de los obstáculos. [19]

Modelos de propagación

Según el estándar de la IEEE 802.16 los modelos de pérdidas por trayectoria utilizados son los modelos COST 231 Walfisch-Ikegami, COST 231 HATA, modelo UIT-R P.1411 para sistemas móviles. Existen siete tipos de clasificación de terreno que se denominarán A, B, C, D, E, F, G. Las categorías A, B, C, son utilizadas para el modelo SUI. Terreno tipo D se aplican los modelos COST 231 HATA, COST 231 Walfisch-Ikegami y el modelo UIT-R P.1411. [14]

Según la organización WiMAX Forum los modelos de propagación utilizados son el modelo Erceg-SUI (el cual es válido para la gama de frecuencias comprendidas entre 700 a 6000 MHz para alturas de la antena transmisora entre 10 a 30 m para entornos suburbanos y rurales para terrenos tipo A, B, C), el modelo propuesto en la recomendación de la UIT-R M.2135-1 y el modelo COST 231-HATA, el modelo Hata-Okumura o el modelo Winner II. [17]

Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami

El modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami [13] fue propuesto en el proyecto europeo COST 231 y se desarrolló en la ciudad de Estocolmo, es una combinación entre el modelo Ikegami y el modelo de Walfisch-Bertoni. Está

compuesto por las pérdidas de espacio libre, pérdidas por difracción y por dispersión desde las azoteas hasta el nivel de la calle, clasificándolo en dos tipos de enlaces, con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS). A diferencia de los otros modelos empíricos éste toma en cuenta el ángulo de incidencia del rayo directo respecto a la calle y los factores de corrección para las pérdidas por difracción. Debido a que incorpora la influencia de las edificaciones y calles en las que se encuentra el dispositivo receptor para obtener una predicción más precisa de las pérdidas de propagación en entornos urbanos en condiciones NLOS.

El modelo Ikegami es un modelo empírico basado en la teoría de geometría de rayos. Mientras que, el modelo Walfisch-Bertoni es un modelo de propagación teórico que toma en cuenta la altura de los edificios.

El modelo COST 231 Walfisch-Ikegami puede ser aplicado cuando la antena de la estación base se encuentra por debajo de la altura media de las edificaciones y es válido para las frecuencias comprendidas entre 800 a 2000 MHz, distancias entre 200 a 5000 m, alturas de las antenas transmisoras entre 4 a 50 m y alturas de las antenas receptoras entre 1 a 3 m.

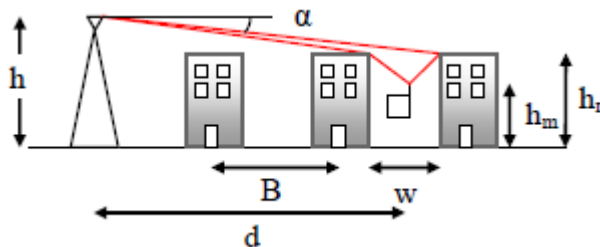


Figura 1. Definición de parámetros del modelo COST 231 Walfisch Ikegami ¹

¹ Yazan A. Alqudah, "On the performance of Cost 231 Walfisch Ikegami Model in Deployed 3.5 GHz Network", 2013.

Para los enlaces con línea de vista LOS:

$$PL_{LOS} = 42,6 + 26\log(d) + 20\log(f) \quad (7)$$

Para los enlaces sin línea de vista NLOS:

$$PL_{NLOS} = \begin{cases} L_{FSL} + L_{rts} + L_{msd} & \text{si } L_{rst} + L_{msd} > 0 \\ L_{FSL} & \text{si } L_{rst} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

Donde

L_{FSL} : Pérdidas de espacio libre

L_{rts}

: pérdida debida a la difracción de la terraza a la calle en que se sitúa el móvil

L_{msd}

: pérdida causada por la difracción de la onda en múltiples construcciones situadas entre el transmisor y el receptor

Pérdidas de espacio libre

$$L_{FSL} = 32,45 + 20 \log d + 20 \log f \quad (9)$$

Pérdidas causadas por la difracción de las terrazas a la calle

$$L_{rts} = \begin{cases} -16,9 - 10 \log \omega + 10 \log f + 20 \log h_m + L_{ori} & h_{roof} > h_m \\ 0 & h_{roof} < h_m \end{cases} \quad (10)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{para } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0,114(\varphi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (11)$$

Donde

h_m : altura de la antena receptora

h_{roof} : altura de los edificios

ω : el ancho de la calle que se encuentra el móvil

L_{ori} : factor de corrección debido a la orientación de las calles

φ : el ángulo entre el rayo de la onda incidente y el eje de la calle

$$\Delta h_m = h_{roof} - h_m \quad (12)$$

$$\Delta h_{base} = h_{base} - h_{roof} \quad (13)$$

Pérdidas por difracción multi-screen

$$L_{msd} = \begin{cases} L_{bsh} + \kappa_a + \kappa_d \log d + \kappa_f \log f - 9 \log b & \text{para } L_{msd} > 0 \\ 0 & \text{para } L_{msd} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Donde

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{base}) & \text{para } h_{base} > h_{roof} \\ 0 & \text{para } h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (15)$$

$$\kappa_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_{base} > h_{roof} \\ 54 - 0,8\Delta h_{base} & \text{para } d \geq 0,5 \text{ km y } h_{base} \leq h_{roof} \\ 54 - 0,8\Delta h_{base} \left(\frac{d}{0,5}\right) & \text{para } d < 0,5 \text{ km y } h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (16)$$

$$\kappa_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_{base} > h_{roof} \\ 18 - 15 \left(\frac{\Delta h_{base}}{h_{roof}}\right) & \text{para } h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (18)$$

$$\kappa_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{para ciudades suburbana o mediana} \\ -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{para urbano / metropolis (ciudades grandes)} \end{cases} \quad (17)$$

Los coeficientes κ_a , κ_d dependen de la altura de los edificios y la altura de la estación base, mientras que, κ_f depende de la frecuencia de operación y el tipo de ciudad.

Modelo COST 231 Hata

El modelo Hata es usado para predecir las pérdidas por trayectoria para frecuencias entre 150 a 1500 MHz, distancias hasta 20 Km, altura de la antena transmisora entre 30 a 200 m, la altura de la antena receptora entre 1 a 10 m.

Por lo tanto, surgió la necesidad de desarrollar un modelo semi-empírico, basado en el modelo Hata, que permita su utilización en frecuencias superiores, manteniendo las condiciones de distancia y altura de las antenas transmisoras y receptoras, es decir:

$$150 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$$

$$30 \text{ m} < h_b < 200 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} < h_m < 10 \text{ m}$$

$$1 \text{ km} < d < 20 \text{ km}$$

A pesar de que es válido para frecuencias hasta 2000 MHz, según WiMAX Forum este modelo de propagación se utiliza para el cálculo de enlaces en la frecuencia de 3,5 GHz.

Una característica de este modelo es que permite calcular las pérdidas por trayectoria para tres tipos de entornos (urbano, suburbano y rural).

Las pérdidas por trayectoria para el modelo COST 231-Hata están expresadas por [13]:

$$PL = 46,3 + 33,9 \log\left(\frac{f}{\text{MHz}}\right) - 13,82 \log\left(\frac{h_b}{\text{m}}\right) + c_m - a(h_m) + \left(44,9 - 6,55 \log\left(\frac{h_b}{\text{m}}\right)\right) \log\left(\frac{d}{\text{km}}\right) \quad (19)$$

Para ambientes urbanos, se mantienen las mismas ecuaciones del modelo Okumura-Hata para el cálculo de $a(h_m)$

$$a(h_m) = 8,29 (\log(1,54h_m))^2 - 1,1 \quad , \quad f \leq 200 \text{ MHz} \quad (20)$$

$$a(h_m) = 3,2 (\log(11,75h_m))^2 - 4,97 \quad , \quad f \geq 400 \text{ MHz} \quad (21)$$

Para ambientes suburbano o rural, se utiliza:

$$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7)h_m - (1,56 \log f - 0,8) \quad (22)$$

Donde:

$a(h_m)$: factor de corrección de la antena receptora

h_m : altura sobre el nivel del suelo de la antena CPE

h_b : altura sobre el nivel del terreno de la antena base en m

d : distancia entre las antenas AP y CPE en km

c_m : factor de corrección para ajustar el rango de frecuencias con el que opera el modelo Hata definido como 0 dB para zonas suburbano y 3 dB para ciudades

f : frecuencia medida en MHz

Modelo SUI

Fue propuesto por la IEEE y es un modelo empírico que está basado en el modelo Erceg, para frecuencias hasta 2 GHz y altura de la antena receptora menor a 2m; sin embargo, WiMAX Forum recomienda el uso de este modelo para aplicaciones WiMAX en la banda de 3,5 GHz, utilizando el modelo extendido de SUI donde se aplica un factor de ajuste para frecuencias superiores a 2 GHz. [14]

$$PL = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + S \quad \text{para } d > d_0 \quad (23)$$

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (24)$$

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (25)$$

$$X_f = 6,0 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (26)$$

$$X_h = \begin{cases} -10,8 \log\left(\frac{h_r}{2}\right) & \text{para Terreno tipo A y B} \\ -20,0 \log\left(\frac{h_r}{2}\right) & \text{para Terreno C} \end{cases} \quad (27)$$

Donde:

f : frecuencia en MHz

d : distancia entre las antenas transmisora y receptora

γ : parámetro

h_b : altura en metro de la estación base

X_f : factor de corrección para la frecuencia de operación

X_h : factor de corrección para la altura del receptor

h_r : altura en metro de la antena CPE

d_0 : distancia inicial de referencia, 100 m.

Tabla 2. Valores numéricos para el modelo SUI [14]

Parámetro del Modelo	Terreno A	Terreno B	Terreno C
a	4,6	4,0	3,6
b (m^{-1})	0,0075	0,0065	0,005
c (m)	12,6	17,1	20
S	10,6	9,6	8,2

Categoría A: Está asociado a terreno montañoso o con colinas, y con moderada o abundante presencia de vegetación, la cual corresponde a condiciones de pérdidas elevadas.

Categoría B: Se asocia a terreno llano con bastantes árboles o terreno montañoso con poca vegetación, donde el nivel de pérdidas es medio.

Categoría C: Está asociado a terreno llano, con densidad de vegetación baja, por lo tanto las pérdidas son bajas.

Distancia < 10 km

Altura de la antena de recepción: 2 a 10 m.

Altura de la antena de la estación base: 15 a 40 m.

Modelo ECC-33

El modelo ECC-33 [29], fue desarrollado por Electronic Communication Committee y surgió como una extensión del modelo Hata-Okumura para los enlaces PMP en la banda de 3,5 GHz, para sistemas inalámbricos fijos (FWS) y sistemas de acceso inalámbrico fijo (FWA), este modelo clasifica en dos tipos de escenarios los LOS y los NLOS, a continuación se detallan las ecuaciones del modelo:

$$PL = A_{fs} + A_{bm} - G_t - G_r \quad (28)$$

$$A_{fs} = 92,4 + 20 \log d + 20 \log f \quad (29)$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,83 \log d + 7,894 \log f + 9,56[\log f]^2 \quad (30)$$

$$G_t = \log\left(\frac{h_t}{200}\right) (13,958 + 5,8(\log d)^2) \quad (31)$$

Entorno de ciudad media

$$G_r = [42,57 + 13,7 \log f][\log(h_r) - 0,585] \quad (32)$$

Entorno ciudad grande

$$G_r = 0,759h_r - 1,862 \quad (33)$$

Donde:

A_{fs} : atenuación del espacio libre

A_{bm} : pérdidas por trayectorias

G_t : factor de ganancia de la altura del transmisor

G_r : factor de ganancia de la altura del receptor

d : distancia entre el transmisor y el receptor en km

f : frecuencia en GHz

h_t : altura de la antena transmisora en metros

h_r : altura de la antena receptora en metros

El entorno de ciudad media utilizado en este modelo es apropiado para ciudades europeas, mientras que, el entorno de grandes ciudades se aplica a ciudades con edificios altos.

Si la suma de las pérdidas debidas a la difracción de la terraza a la calle en que se sitúa el móvil y las pérdidas causadas por la difracción de la onda en múltiples construcciones situadas entre el transmisor y el receptor es menor o igual a 0, la ecuación de pérdidas para enlaces NLOS se simplifica a la ecuación de pérdidas de espacio libre.

CAPÍTULO IV - Métodos numéricos de ajuste de curvas

Para el ajuste de curvas se puede aplicar distintos métodos numéricos dependiendo si la ecuación que se desea ajustar es lineal o no lineal, para ello se define como ecuación lineal cuando la variable dependiente es combinación lineal de las variables independientes, si no se cumple esta condición se dice que la ecuación es no lineal.

Como en el presente trabajo de investigación se realizarán ajustes a los modelos de propagación, cuyas ecuaciones tienen un comportamiento lineal, los métodos que se aplicarán son los de mínimos cuadrados. Además, se puede realizar un análisis para comparar la relación entre las variables y determinar si tienen alguna relación lineal, más adelante se detallará sobre este método.

Modelo de regresión lineal simple

Se conoce como modelo de regresión simple cuando existe una sola variable regresora (o independiente) y una variable respuesta (o dependiente) y su expresión matemática es:

$$y = ax + b + e \quad (34)$$

Donde: y es la variable respuesta, x la variable regresora, a y b son los parámetros a estimar, e es el residuo. [30]

Modelo de regresión lineal múltiple

Es un modelo de regresión lineal múltiple cuando interviene dos o más variables regresoras. [30]

Matriz de dispersión

Para determinar la relación lineal entre las variables independientes y la variable dependiente y la correlación entre pares de variables, se realiza un análisis con una matriz de dispersión.

La matriz de dispersión es un arreglo de gráficas bidimensionales, en el que a excepción de la diagonal, cada cuadro contiene un diagrama de dispersión, para observar la relación lineal entre cada par de variables. Cuando hay una relación entre las dos variables independientes una de las dos debería salir del modelo.

- Coeficiente de correlación de Pearson

Es un valor que mide la relación lineal entre dos variables. Oscila entre -1 y 1, cuando el coeficiente es cero significa que no hay relación lineal, mientras que si es 1 o -1, indica que existe una perfecta relación lineal entre las variables; si el signo es negativo indica que la relación es inversa, es decir, mientras una variable crece la otra decrece.

Existe multicolinealidad cuando el coeficiente de correlación entre las variables independientes es significativo, es decir, se recomienda que las variables independientes tengan una correlación de aproximadamente cero

En cambio, para la relación de las variables independientes con respecto a la variable dependiente los valores de correlación deben ser significativos para garantizar la relación lineal en el modelo.

Estimación de parámetros

Existen dos tipos de estimación de parámetros en el cual se utilizan los datos muestrales y estadísticos; la estimación puntual y la estimación por intervalos. La estimación puntual aproxima la función a partir de datos muestrales, estimando los valores de los parámetros. [30]

La estimación por intervalo, en cambio, determina el intervalo que de forma probable se encuentra el valor de los parámetros, este intervalo recibe el nombre de intervalo de confianza estimado. [30]

Método de mínimos cuadrados

Entre las técnicas para la estimación de parámetros en el modelo de regresión lineal está el método de mínimos cuadrados el cual consiste en conseguir la recta que tenga el menor error entre los valores medidos y los valores obtenidos por el modelo.

A continuación se presentan las ecuaciones de mínimos cuadrados para múltiples variables.

$$\begin{aligned}
 S_r &= \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i \text{ medida}} - y_{i \text{ modelo}})^2 \\
 &= \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - a_2 x_{i2} - \dots - a_n x_{ik})^2
 \end{aligned}
 \tag{35}$$

Aplicando derivadas parciales e igualando a cero se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial a_0} S_r = \frac{\partial}{\partial a_0} \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - a_2 x_{i2} - \dots - a_n x_{ik})^2 = 0 \quad (36)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_1} S_r = \frac{\partial}{\partial a_1} \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - a_2 x_{i2} - \dots - a_n x_{ik})^2 = 0 \quad (37)$$

⋮

$$\frac{\partial}{\partial a_n} S_r = \frac{\partial}{\partial a_n} \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - a_2 x_{i2} - \dots - a_n x_{ik})^2 = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_0} S_r = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - a_2 x_{i2} - \dots - a_n x_{ik}) = 0 \quad (39)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_1} S_r = -2 x_{i1} \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - a_2 x_{i2} - \dots - a_n x_{ik}) = 0 \quad (40)$$

⋮

$$\frac{\partial}{\partial a_n} S_r = -2 x_{ik} \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_{i1} - a_2 x_{i2} - \dots - a_n x_{ik}) = 0 \quad (41)$$

Entonces, reescribiendo y despejando la ecuación se obtiene

$$a_0 \sum_{i=1}^n 1 + a_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + a_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + a_n \sum_{i=1}^n x_{ik} = \sum_{i=1}^n y_i \quad (42)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{i2} + \dots + a_n \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{ik} = \sum_{i=1}^n y_i x_{i1} \quad (43)$$

⋮

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_{ik} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{i1} + a_2 \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{i2} + \dots + a_n \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_{ik} \quad (44)$$

Finalmente, para calcular los parámetros de las variables regresoras se utiliza el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i \end{bmatrix} \quad (45)$$

Bondad del ajuste

La bondad del ajuste se realiza para determinar qué tan aproximado es el ajuste del modelo de regresión lineal a los datos medidos; además, de verificar la validez del ajuste para obtener predicciones futuras.

Para validar los modelos estudiados, existen varios índices para “cuantificar” el grado de ajuste con respecto a los resultados medidos, los cuales se mencionan a continuación:

- **Coefficiente de correlación múltiple (R)**

Mide la relación entre la variable dependiente y un conjunto de variables independientes. La correlación más alta entre las variables independientes respecto a la variable dependiente, se considera como el coeficiente de correlación múltiple. [30]

- **Coefficiente de determinación**

Es el cuadrado del coeficiente de correlación y mide la variabilidad de la variable dependiente con respecto a las variables independientes, su valor oscila entre 0 y 1. A medida que se agregan más variables al modelo, el

coeficiente de determinación aumenta, lo cual arroja falsas conclusiones sobre la bondad del ajuste. Otro problema de este índice es que es insensible a desviaciones constantes y es sensible a valores extremos, con lo cual aumentaría el coeficiente de determinación y por consiguiente se podría concluir erróneamente sobre la calidad del ajuste. [30]

- Coeficiente de determinación ajustado

Este índice se utiliza para medir la bondad del ajuste del modelo de regresión, a diferencia del coeficiente de determinación, éste no queda influenciado por el número de variables que se introduce al modelo. [30]

Análisis de residuos

Error residual se define como la diferencia entre el valor medido y el valor ajustado. [30]

$$e_i = y_i - (a_0 + a_1x_{i1} + a_2x_{i2} + \dots + a_nx_{in}) \quad (46)$$

La varianza promedio aproximada de los residuales se expresa como:

$$MS_{Res} = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n - p} = \frac{SS_{Res}}{n - p} \quad (47)$$

Los residuales estandarizados se utilizan para minimizar las observaciones que son atípicas o los valores extremos. Los residuales estandarizados tienen media cero y varianza aproximadamente unitaria. [30]

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{MS_{RES}}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (48)$$

- **Suma de los cuadrados de los errores residuales**

La suma de los cuadrados de los errores residuales oscila entre 0 y un número positivo, cuando mayor es este valor más erróneas son las predicciones de la ecuación de regresión, mientras que si el valor es cero, significa que el modelo de regresión lineal múltiple se ajusta perfectamente a las muestras. [30]

$$SS_{RES} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (49)$$

Como no hay valor máximo en la suma de los cuadrados residuales, resulta difícil su interpretación; por tal razón, se utiliza la varianza de los errores, que se obtiene al dividir la media aritmética del cuadrados de los residuales, entre n que es el número total de muestras. [30]

$$S_{YX}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n} \quad (50)$$

El cuadrado medio residual es un estimador insesgado σ^2 que se obtiene de la suma de los cuadrados de los errores residuales, y ésta sumatoria tiene $n - p$ grados de libertad porque p grados de libertad se asocian a los estimadores. Por lo tanto, el cuadrado medio residual se expresa como:

$$MS_{RES} = \frac{SS_{RES}}{n - p} \quad (51)$$

Por otro lado, el error estándar de la regresión se calcula como la raíz cuadrada del cuadrado medio residual. [30]

En regresión lineal los residuos deben ser independientes y los residuos observados y los esperados están bajo la hipótesis de distribución normal. Por lo tanto, el análisis de los residuos permite profundizar en la relación que se produce entre las variables para así determinar la bondad del ajuste del modelo de regresión obtenido. [30]

Una representación gráfica permite observar cómo se distribuyen los residuos para luego determinar su comportamiento. [30]

CAPÍTULO V - Calibración de los modelos de propagación

En este capítulo se describe la metodología utilizada para la calibración de los modelos de propagación, así como el desarrollo de la herramienta para tal fin.

En Telefónica se está desarrollando un nuevo proyecto PMP en todo el país, la finalidad del presente trabajo especial de grado es evaluar y calibrar los modelos de propagación aplicados en la banda de frecuencias de 3,5 GHz para enlaces fijos, es decir, la antena transmisora y receptora no presenta movilidad.

El objetivo principal de la tecnología PMP es migrar los servicios punto a punto para reducir la cantidad de antenas en las estaciones base y poder aprovecharlas para otros servicios.

Barrido de espectro

Antes de realizar las mediciones de niveles de señal recibida fue necesario efectuar un barrido de espectro en las estaciones transmisoras con la finalidad de determinar si existía interferencias en la zona, debido a que anteriormente se utilizaba otra tecnología en esta misma banda de frecuencia y se debe garantizar que el espectro este limpio para poder obtener únicamente la señal proveniente de la estación trasmisora.

En un primer barrido se determinaron algunas interferencias provenientes de equipos encendidos en la tecnología que se utilizaba anteriormente, por lo cual se procedió a apagar y desinstalar estos equipos y se realizó el barrido nuevamente, con lo cual se comprobó que el espectro estaba limpio.

Los equipos a utilizar para la realización del barrido de espectro son los siguientes:

- Analizador de espectro HP 8593E
- Amplificador LNA HP 8449^a (30 dB)
- Cable coaxial flexible baja pérdida
- Antena tipo bocina (20 dB)
- Brújula
- GPS

Para la ejecución del barrido de espectro se realizó lo siguiente:

- 1.- Se ubicaron los equipos alrededor de la instalación de la antena transmisora.
- 2.- Se conectó la salida del analizador de espectro HP 8593E a la entrada del amplificador LNA 8449A y la salida del amplificador a la antena tipo bocina, tal como se muestra en la figura 2.

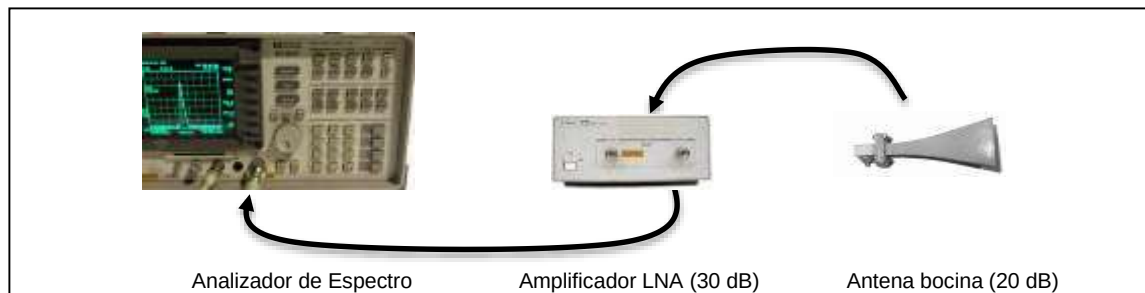


Figura 2. Conexión para el barrido de espectro.

- 3.- Se configuró el analizador de espectro para realizar las mediciones de la siguiente manera:

Se activó la función “MAX HOLD” del analizador de espectro, la cual tiene como función sostener las máximas amplitudes recibidas en el intervalo de frecuencias establecido.

- 4.- Se realizó un barrido con la antena en polarización horizontal, cubriendo los 360° de la horizontal respecto al suelo y un máximo de 90° de la vertical o perpendicular respecto al suelo, en el intervalo de 3400 – 3700 MHz.
- 5.- Se cambió el ancho de banda a 20 MHz en el analizador de espectro y se realizó el barrido para cada canal.
- 6.- Se guardó el registro de la medición, se limpió la pantalla y se repitió el procedimiento con la antena en polarización vertical.
- 7.- Se identifican y anotan las portadoras captadas en el barrido 360°.
- 8.- Luego de identificar las portadoras presentes, se ubicó el ángulo de incidencia respecto al Norte magnético, se mide con una brújula orientada hacia una referencia tomada de acuerdo al punto donde la portadora alcanza su pico más alto y estable, se mantiene la antena direccionada durante mínimo 10 segundos hacia ese punto y se registra el azimut.
- 9.- Se realizó un registro adicional por cada polarización de la antena, de un barrido con apertura de 30° orientado hacia un azimut de interés determinado. Con la finalidad de revalidar de forma clara las posibles incidencias presentes hacia un enlace deseado y así descartar canales ocupados que pudieran causar interferencia.
- 10.- Utilizando un GPS y ubicados en un punto cercano al lugar previsto para instalación de la antena, se toma nota de las coordenadas del lugar y la altitud respecto al nivel del mar.

Luego de la realización del barrido, se determinó las señales interferentes en ese sector y se procedió a apagar y desinstalar los transmisores que aún estaban encendidos de la tecnología utilizada anteriormente (WLL) en banda de frecuencia de 3,5 GHz por la empresa Telefónica.

Una vez garantizado el espectro libre se procedió a la instalación de clientes a la tecnología punto a multipunto, cambiando los equipos del enlace punto a punto con el cual operaban por los de este tipo de enlace.

Diseño de la herramienta

Se utiliza una aplicación de simulación para el diseño de la herramienta que permitirá calibrar los modelos de propagación estudiados, utilizando métodos numéricos de regresión y análisis estadísticos, con el fin de determinar, de los cuatro modelos de propagación, el que presente menor error.

Primero, se diseña y se crea una interfaz gráfica, tal como se muestra en la figura 3, donde se selecciona la frecuencia de operación, la potencia de transmisión, ganancias de las antenas transmisoras y receptoras, las pérdidas por conectores y cables, el nombre del archivo que se desea extraer la información de las MU a nivel nacional, el nombre del archivo que se desea extraer los datos de las SU medidos (tales como ubicación de las antenas receptoras, altura de la antena receptora, potencia recibida), el nombre del archivo con el patrón de radiación de la antena transmisora y el nombre de los archivos con la información del terreno.

Al presionar el botón Continuar, lo primero que realiza la herramienta es la lectura de los datos de los archivos colocados previamente para extraer y almacenar en variables los parámetros necesarios para la realización del ajuste de los modelos de propagación.

La herramienta calcular la distancia entre el transmisor y receptor, utilizando la fórmula de Haversine (ver anexo); el cual es un parámetro necesario para el cálculo de las pérdidas por trayectoria con los modelos de propagación utilizados en la herramienta, los cuales son: COST 231 WALFISCH-IKEGAMI, COST 231-HATA, SUI y ECC-33.

Por otro lado, para calcular la ganancia efectiva de la antena transmisora, se introdujo un código en la herramienta el cual se detalla en los anexos.

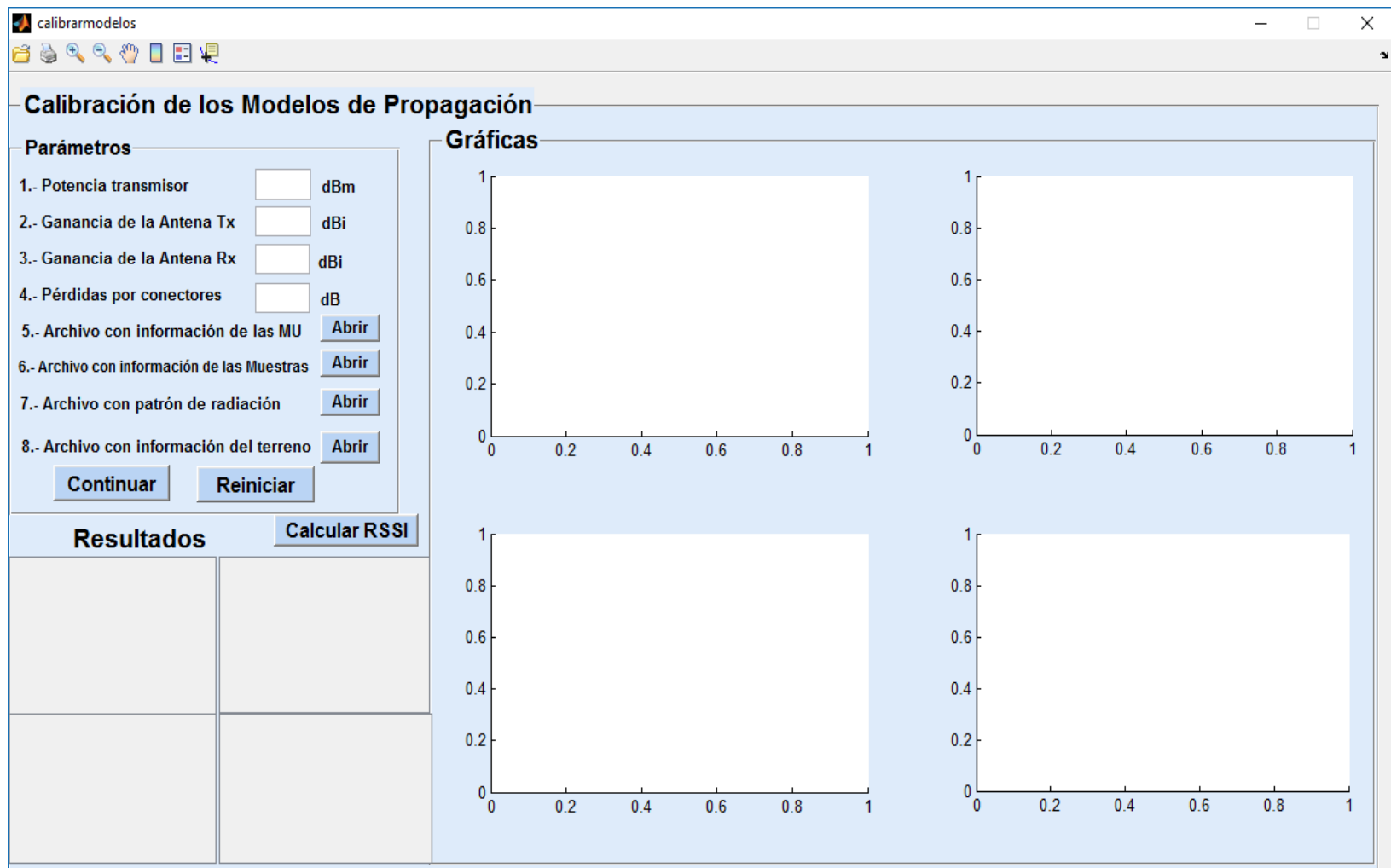


Figura 3. Interfaz gráfica para calibrar los modelos de propagación.

Para obtener resultados más precisos se debe considerar las alturas sobre el nivel del mar, por lo tanto es necesario utilizar datos topográficos de la zona a estudiar, para poder realizar la corrección. Los datos se extrajeron con una aplicación utilizada en la empresa y se almacenó en archivos tipo grid que luego la herramienta los lee y extrae la altura sobre el nivel del mar a las ubicaciones que se están estudiando. El archivo grid almacena una matriz, con las alturas sobre el nivel del mar con un espaciamiento de 20 m y otras dos matrices en el cual se tiene la coordenada X e Y en el sistema UTM en la zona 19N, en los anexos, se muestra con detalle este tipo de archivo y el algoritmo para convertir de coordenadas geográficas WGS84 en grados decimales a coordenadas UTM, la cual es necesario añadirlo al código de la herramienta para que pueda tener la altura corregida de cada uno de los transmisores y receptores, es decir, considerando el relieve del terreno Caracas, Maracay, Puerto Cabello, Acarigua, Barquisimeto, Cabudare, Mérida, San Cristóbal, Maracaibo, Ciudad Bolívar, Maturín, Puerto la Cruz).

Una vez realizado los cálculos de ajuste con el método de mínimos cuadrados descrito en el capítulo IV, la herramienta muestra las gráficas del nivel de señal recibida en función de la distancia, en donde se comprara las muestras con los valores del modelo de propagación antes y después del ajuste. Asimismo, se muestra una tabla comparativa con los valores de error residual, desviación estándar, desviación y error cuadrático medio de cada uno de los modelos de propagación. Con lo cual se utilizará para analizar y comparar los modelos de propagación ajustados y seleccionar el modelo de propagación que se aproxime a los valores medidos con el menor error.

Finalmente, seleccionado el modelo de propagación a utilizar, la herramienta almacena en un archivo de texto la ecuación de ese modelo ya ajustado.

Adicionalmente, se agregó un botón a la interfaz gráfica con el nombre de Calcular RSSI, el cual permite calcular un enlace en el cual el usuario puede colocar los parámetros de entrada y observar el nivel de señal recibida, según el modelo de propagación ajustado que se seleccionó previamente con la herramienta.

Parámetros iniciales y muestras de señal recibida en dB.

Con la base de datos suministrada por la empresa, en el cual contiene toda la información relacionada sobre cada una de las instalaciones de las MU y SU a nivel nacional, se procedió a almacenar las coordenadas geográficas WGS84 en grados decimales de cada uno, para almacenarlo en una hoja de cálculo, en el cual se colocará las tablas tal como se indica en los anexos.

De igual forma, se extrajo de esta base de datos la altura de los transmisores y receptores para añadirlo a la hoja de cálculo se colocara como parámetro inicial en la herramienta diseñada.

Para recolectar los niveles de señal recibida se utilizó una herramienta web, en el cual se monitorea la MU y Su instaladas, allí se observa el nivel de señal recibida que tienen en tiempo real de cada uno de los receptores, por lo cual, se tomó nota de los mismos y se almacenó en el archivo junto con las demás parámetros de las SU.

CAPÍTULO VI - Análisis y comparación de los modelos de propagación

Datos para el cálculo de la potencia de señal recibida

A continuación se describen los parámetros utilizados para el cálculo de la potencia recibida utilizando los modelos de propagación seleccionados en el capítulo III para realizar el ajuste (el modelo COST 231 Walfisch-Ikegami, COST 231 Hata, SUI, ECC-33), en las hojas de datos de las antenas transmisoras y receptoras utilizadas se observa que la ganancia máxima es de 15 dBi y 13 dBi, respectivamente. Otra característica importante de las antenas transmisoras para la realización del estudio, es el ancho del haz horizontal de la misma, la cual es de 90° y en ancho del haz vertical que es de 8°.

Además, como los enlaces PMP aplicados en la banda de 3,5 GHz trabajan con tecnología MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas) la polarización de las antenas es dual, es decir, polarización horizontal y vertical.

Se utiliza la técnica TDD (time division duplex), en la cual se transmite y recibe las señales en un mismo canal pero separándolo en intervalos de tiempo distintos.

Las atenuaciones por cables y conectores, son despreciables debido a que los equipos utilizados son completamente externos, los cables utilizados son UTP CAT5 y conectores RJ-45 y la energía por PoE (Power over Ethernet).

Parámetros:

Potencia Transmitida: 30 dBm

Ganancia de la antena transmisora: 15 dBi

Ganancia de la antena receptora: 13 dBi
Atenuación por cables, conectores: 0 dB.
Sensibilidad del equipo receptor: -86 dBm

Matriz de dispersión.

En la tabla 3 se observan las variables utilizadas para el ajuste del modelo COST 231 WALFISCH-IKEGAMI, en el cual se consideró la ecuación para enlaces LOS, debido a que los receptores se encuentran sobre los techos de los edificios y el modelo para los casos NLOS considera pérdidas por difracción considerando que el móvil está entre los edificios.

Tabla 3. Variables utilizadas en el Modelo COST 231 WALFISCH-IKEGAMI.

Variable	Expresión
Y	PL
X1	$\log(d)$
X2	$\log(f)$

En el gráfico 1 se observa la matriz de dispersión del modelo de propagación COST 231 WALFISCH-IKEGAMI, en el cual se puede determinar que existe relación lineal de la variable independiente X1 y la variable dependiente; a diferencia de la variable X2 y la variable dependiente donde el coeficiente de correlación es aproximado a cero, por lo que se debe considerar en el momento de la regresión lineal múltiple. Por otro lado, las relaciones entre las variables regresoras (X1 y X2) presentan relación lineal significativa lo que puede afectar al modelo de regresión.

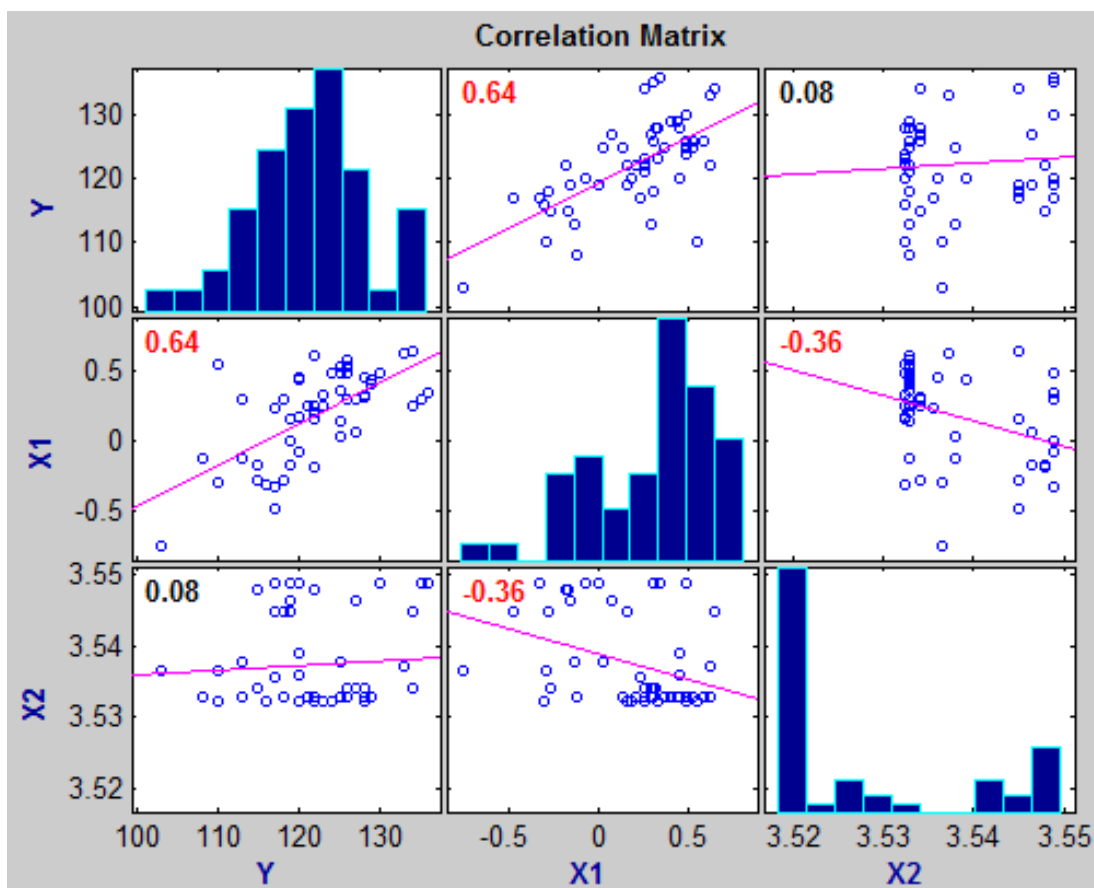


Gráfico 1. Relación entre las variables para el modelo COST 231 WOLFISCH-IKEGAMI.

Tabla 4. Variables utilizadas en el Modelo COST 231 HATA

Variable	Expresión
Y	PL
X1	$\log(f)$
X2	$\log(h_t)$
X3	$(\log(11,75 * h_t))^2$
X4	$\log(d)$
X5	$\log(h_t) \log(d)$

En la tabla 4 se muestra las variables utilizadas para el modelo de propagación COST 231 HATA, en el cual se consideró los enlaces NLOS y el tipo de entorno urbano, debido a que las zonas a estudiar son ciudades, por lo que atenuación debido a los edificios y obstrucciones es alta.

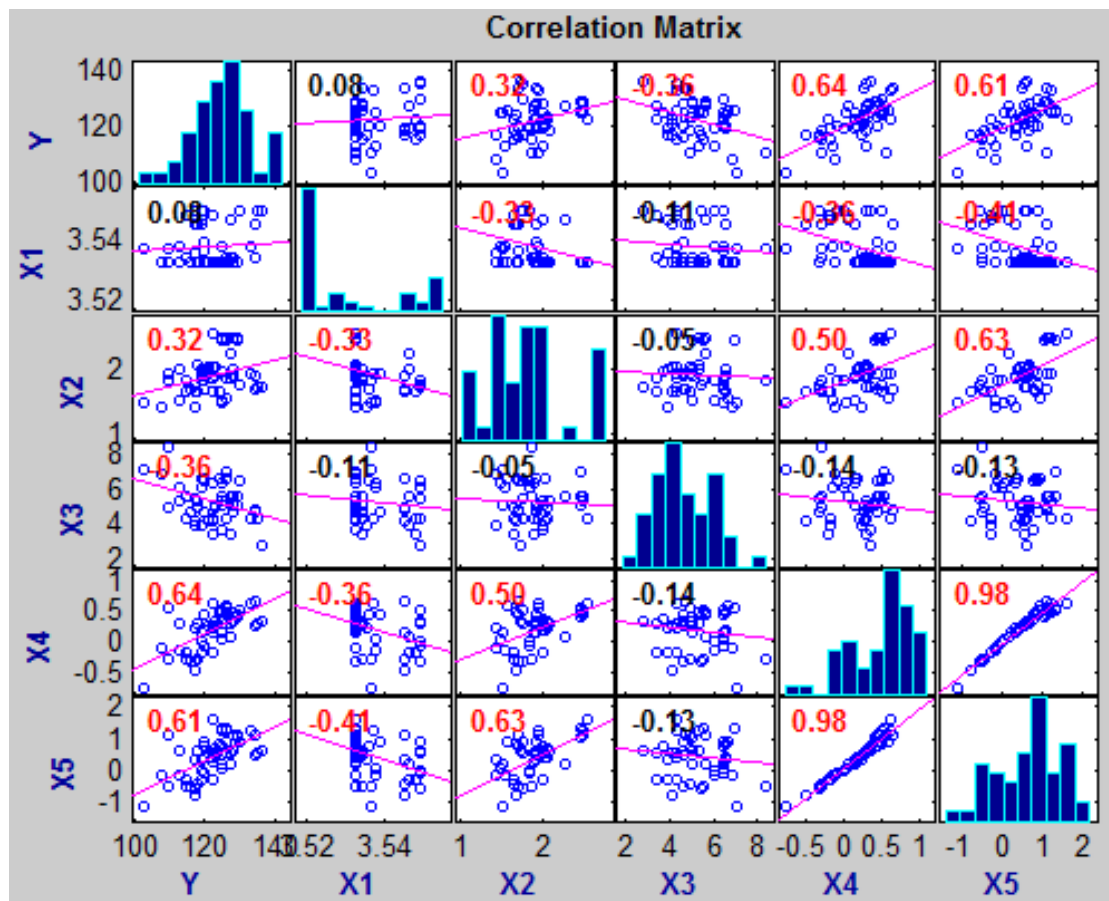


Gráfico 2. Relación entre las variables para el modelo COST 231 HATA

En el gráfico 2 se observan las relaciones entre la variable dependiente PL y las variables independientes X2, X3, X4 y X5 en el cual el coeficiente de correlación de Pearson es significativo por lo cual se puede garantizar que hay una relación lineal entre cada una de estas variables independientes y la variable dependiente; a diferencia de la variable X1 y la variable dependiente el cual no presenta relación lineal para las muestras a estudiar. Por otro lado,

analizando la correlación entre las variables X2 y X4, X2 y X5, X4 y X5, X1 y X2, X1 y X4, X1 y X5; si existe una linealidad lo que indica que hay alguna dependencia en esas variables y podría agregar cierto error al ajuste; es decir, incluir esas variables puede que no significativo para el modelo.

En la tabla 5 se observa las variables a utilizar en el ajuste del modelo de propagación SUI, se consideró enlaces NLOS, como este modelo se estudia para zonas suburbanas se consideró en el tipo de terreno la categoría A, debido a que se utiliza cuando hay una gran cantidad de árboles y montañas, por lo que la atenuación debida a las obstrucciones es alta y como las ciudades en las cuales se realizó el estudio hay atenuación alta debido a las obstrucciones, esta es la categoría del terreno que mejor se adapta.

Tabla 5. Variables utilizadas en el Modelo SUI

Variable	Expresión
Y	PL
X1	$\log\left(\frac{4 * \pi * 100 * f}{300}\right)$
X2	$\log\left(\frac{d * 1000}{100}\right)$
X3	$h_t * \log\left(\frac{d * 1000}{100}\right)$
X4	$\frac{\log\left(\frac{d * 1000}{100}\right)}{h_t}$
X5	$\log\left(\frac{f}{2000}\right)$
X6	$\log\left(\frac{h_r}{2}\right)$

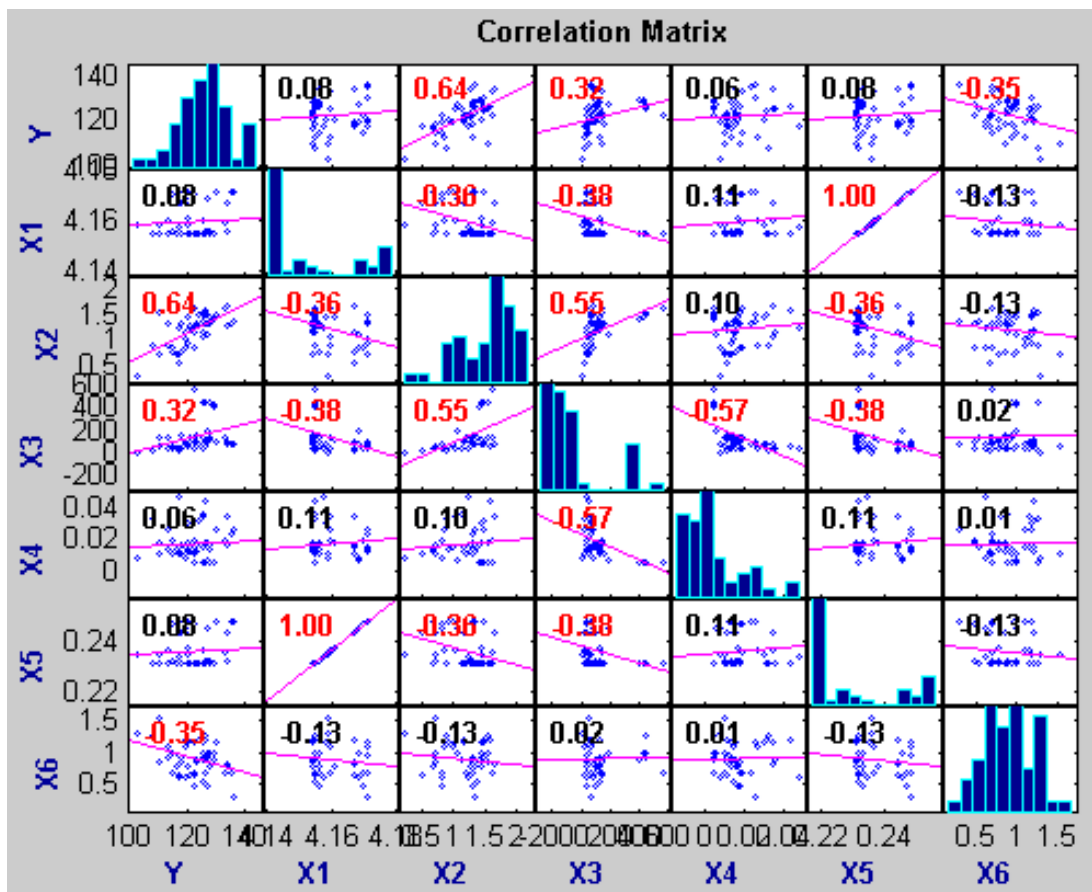


Gráfico 3. Relación entre las variables para el modelo SUI

En el gráfico 3 se muestra la matriz de correlación del modelo SUI, donde se determina que el coeficiente de correlación de Pearson entre la variable dependiente y las variables independientes X2, X3 y X6 es significativa, por lo tanto existe una relación lineal. Mientras que, las variables X1 y X2, X1 y X3, X1 y X5, X2 y X3, X2 y X5, X3 y X4, X3 y X5, presentan una relación lineal lo que significa que hay una dependencia entre estas variables, que se debe considerar a la hora de realizar el ajuste de regresión lineal múltiple y el análisis del mismo.

En la tabla 6 se muestran las variables correspondientes al modelo ECC-33, cuya ecuación de propagación utilizada es para enlaces NLOS en entornos urbanos.

Tabla 6. Variables utilizadas en el Modelo ECC-33

Variable	Expresión
Y	PL
X1	$\log(d)$
X2	$\log(f)$
X3	$\log(f)^2$
X4	$\log\left(\frac{h_t}{200}\right)$
X5	$\log\left(\frac{h_t}{200}\right)\log(d)^2$
X6	h_r

En el gráfico 4 se puede observar que el coeficiente de correlación de Pearson no es significativo para la variable X6 y la variable dependiente; por otro lado, la variable X2 y X3 tiene un coeficiente de 1 lo que indica que la relación entre estas dos variables es perfectamente lineal; las variables X1 y X2, X1 y X3, X1 y X4, X2 y X4, X3 y X4, X4 y X5 también tienen una correlación significativa por lo que hay que considerar a la hora de realizar el ajuste de regresión lineal múltiple.

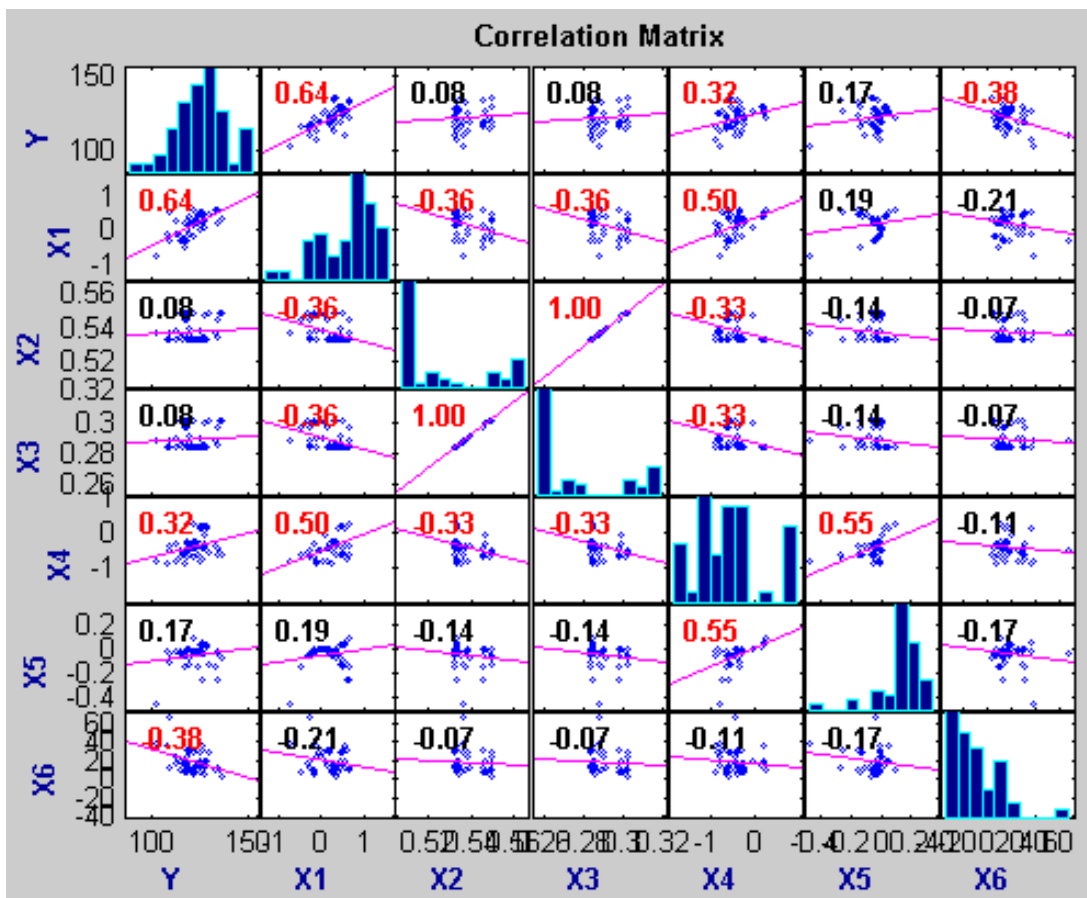


Gráfico 4. Relación entre las variables para el modelo ECC-33

En la tabla 7. Se muestran una tabla con 52 receptores a nivel nacional que utilizan los enlaces PMP en la banda de frecuencia de 3,5 GHz, dicha tabla contiene el nombre de la estación transmisora a la cual están enlazadas, las coordenadas geográficas (latitud y longitud), distancia entre la antena transmisora y receptora, la altura corregida de la antena transmisora y receptora, el ángulo que forma entre el haz principal (ángulo 0 de la antena transmisora) y el receptor, con la finalidad de calcular la ganancia efectiva de la antena transmisora.

Tabla 7. Información de las SU a nivel nacional.

Celda	Distancia [km]	Altura Antena Tx (corregida) [m]	Altura Antena Rx (corregida) [m]	Ángulo	Ganancia efectiva antena Tx	Frecuencia central
Ciudad Bolívar 3	1,82	80	12	358,13	14,33	3420
Ciudad Bolívar 3	1,99	75	6	357,98	14,26	3420
Maturín 1	2,18	82	12	357,84	12,30	3407
Maturín 1	1,44	75	29	357,83	13,69	3407
Maturín 1	3,58	87	14	357,17	14,51	3407
Maturín 1	1,83	79	15	358,00	13,02	3407
Maturín 3	2,08	97	15	358,25	13,76	3420
Maturín 3	0,53	70	19	1,42	12,50	3420
Acarigua 2	2,03	74	10	1,81	13,22	3420
Cumboto 1	2,84	48	30	358,36	14,04	3435
Lara 1	2,35	96	7	358,17	13,76	3410
Lara 2	1,00	69	25	358,51	12,99	3540
Lara 2	0,86	67	30	358,47	12,38	3540
Lara 2	3,14	57	30	356,49	14,00	3540
Lara 2	0,48	56	18	0,57	11,96	3540

Orinoco 1	2,07	116	17	358,80	14,00	3410
Orinoco 1	1,63	111	10	0,00	14,87	3410
Orinoco 1	1,83	107	9	359,07	11,75	3410
Orinoco 1	1,83	107	9	359,07	11,75	3410
Orinoco 2	0,77	27	36	356,67	13,86	3410
Orinoco 2	3,85	36	32	356,06	11,79	3410
Orinoco 2	1,38	32	15	356,70	12,39	3410
Puerto la Cruz 1	0,75	33	25	0,61	13,36	3407
Puerto la Cruz 1	1,08	30	29	0,05	15,00	3407
Maracaibo 1	2,22	52	4	355,24	12,00	3540
Maracaibo 1	2,01	55	10	355,28	12,00	3540
Maracaibo 2	4,29	85	10	1,00	13,93	3446
Maracaibo 3	0,33	47	9	2,47	12,39	3507
Maracaibo 3	4,44	48	13	356,45	11,99	3507
Barquisimeto 2	0,18	31	39	354,60	12,00	3440
Barquisimeto 3	0,50	49	12	2,27	13,50	3407
Barquisimeto 3	3,08	47	31	358,30	14,90	3407
Maracay 1	1,71	26	8	356,60	13,58	3432
Maracay 3	0,68	44	10	0,85	13,36	3532

Maracay 3	0,65	44	6	1,32	13,72	3532
San Cristóbal 1	1,43	80	31	1,96	13,50	3507
San Cristóbal 3	2,13	112	14	358,64	15,00	3407
San Cristóbal 3	1,53	102	31	358,65	15,00	3407
San Cristóbal 2	0,51	70	68	0,22	14,50	3440
San Cristóbal 4	0,69	98	8	357,45	12,00	3520
San Cristóbal 4	1,18	178	20	357,60	14,90	3520
Terrazas Ávila	0,53	44	14	359,26	15,00	3507
Mérida	2,59	280	15	1,85	13,50	3410
Mérida	3,10	300	17	1,21	13,44	3410
Mérida	3,40	287	19	0,51	12,49	3410
Mérida	3,41	288	37	0,20	13,49	3410
Mérida	2,77	296	20	1,69	13,43	3410
Mérida	3,09	298	17	1,19	13,35	3410
Mérida	2,89	299	20	1,51	13,50	3410
Mérida	4,20	346	10	0,58	13,82	3410
Bolívar 1	2,82	83	12	1,44	13,00	3460
Bolívar 2	1,99	97	17	2,30	11,60	3410

Con estos datos, se utiliza la herramienta para realizar el ajuste a los cuatro modelos de propagación, luego se realiza el análisis de varianza y se calcula los valores de los coeficientes de determinación. Se realiza un análisis de residuos para determinar los puntos atípicos que hay en las muestras y descartarlos, esto con la finalidad de realizar un nuevo ajuste a cada uno de los modelos de propagación para afinarlos y tener valores más precisos.

En la tabla 8 se muestran los valores de potencia de señal recibida y el error residual con los modelos de propagación ajustados por el método de regresión lineal múltiple.

Además, en el gráfico 5 se aprecia los resultados en la interfaz gráfica diseñada en este trabajo especial de grado, en el cual se utilizan los valores de nivel de señal recibida señalados en la tabla 8 y se muestra una representación gráfica respecto a la distancia, con la finalidad de comparar los valores obtenidos por el ajuste mediante el modelo de regresión lineal múltiple, los valores utilización las ecuaciones de cada uno de los modelos de propagación y las mediciones realizadas.

Tabla 8. Resultados de potencia recibida con los modelos de propagación ajustados.

Celda	COST 231 WALFISCH IKEGAMI		COST 231 HATA		SUI		ECC-33	
	Pr	Residuos	Pr	Residuos	Pr	Residuos	Pr	Residuos
Ciudad Bolívar 3	-63,2295	-12,7705	-64,3673	-11,6327	-63,8665	-12,1335	-63,8952	-12,1048
Ciudad Bolívar 3	-63,9404	-5,0596	-66,2303	-2,7697	-66,1205	-2,8795	-65,0851	-3,9149
Maturín 1	-65,9822	-4,0178	-66,9811	-3,0189	-66,6023	-3,3977	-66,7172	-3,2828
Maturín 1	-61,6046	-2,3954	-61,1115	-2,8885	-60,3665	-3,6335	-61,0680	-2,9320
Maturín 1	-67,3489	15,3489	-67,2299	15,2299	-67,3900	15,3900	-67,2324	15,2324
Maturín 1	-64,0067	-0,9933	-64,7626	-0,2374	-64,1864	-0,8136	-64,6329	-0,3671
Maturín 3	-64,7613	-5,2387	-65,3784	-4,6216	-64,8693	-5,1307	-65,0393	-4,9607
Maturín 3	-56,2511	-0,7489	-57,7847	0,7847	-56,4034	-0,5966	-56,9048	-0,0952
Acarigua 2	-65,0992	-2,9008	-66,3812	-1,6188	-66,0865	-1,9135	-65,8202	-2,1798
Cumboto 1	-67,3385	5,3385	-65,4689	3,4689	-65,4376	3,4376	-65,1176	3,1176
Lara 1	-65,1837	-1,8163	-67,1984	0,1984	-67,0438	0,0438	-66,3242	-0,6758
Lara 2	-65,3119	4,3119	-64,3559	3,3559	-63,9409	2,9409	-65,1446	4,1446
Lara 2	-64,7977	2,7977	-63,5160	1,5160	-63,0782	1,0782	-64,2112	2,2112
Lara 2	-72,5254	0,5254	-69,7094	-2,2906	-70,1123	-1,8877	-70,4325	-1,5675
Lara 2	-60,9732	1,9732	-60,9368	1,9368	-60,7092	1,7092	-61,6184	2,6184
Orinoco 1	-63,8853	3,8853	-64,5234	4,5234	-63,8199	3,8199	-64,2499	4,2499
Orinoco 1	-61,5210	-2,4790	-63,7086	-0,2914	-62,7667	-1,2333	-62,7651	-1,2349

Orinoco 1	-65,3820	1,3820	-67,5025	3,5025	-66,8100	2,8100	-66,6192	2,6192
Orinoco 1	-65,3820	2,3820	-67,5025	4,5025	-66,8100	3,8100	-66,6192	3,6192
Orinoco 2	-57,0086	7,0086	-54,0191	4,0191	-55,4100	5,4100	-55,9889	5,9889
Orinoco 2	-70,7204	2,7204	-68,8481	0,8481	-68,5543	0,5543	-67,8397	-0,1603
Orinoco 2	-62,7442	-4,2558	-62,4382	-4,5618	-62,8673	-4,1327	-63,4567	-3,5433
Puerto la Cruz 1	-57,2140	2,2140	-55,7005	0,7005	-56,5182	1,5182	-57,3846	2,3846
Puerto la Cruz 1	-58,1902	-8,8098	-56,1839	-10,8161	-56,9321	-10,0679	-57,7996	-9,2004
Maracaibo 1	-72,0250	-5,9750	-73,5737	-4,4263	-74,4276	-3,5724	-73,0718	-4,9282
Maracaibo 1	-71,3305	-5,6695	-71,3305	-5,6695	-71,6774	-5,3226	-71,9403	-5,0597
Maracaibo 2	-70,9029	-4,0971	-70,8540	-4,1460	-71,4374	-3,5626	-70,2292	-4,7708
Maracaibo 3	-56,6415	-2,3585	-57,8802	-1,1198	-58,3016	-0,6984	-57,5036	-1,4964
Maracaibo 3	-75,6672	-0,3328	-74,8595	-1,1405	-75,1171	-0,8829	-73,9483	-2,0517
Barquisimeto 2	-49,5678	4,5678	-46,0429	1,0429	-48,4821	3,4821	-46,2002	1,2002
Barquisimeto 3	-54,1055	-3,8945	-55,5797	-2,4203	-55,3814	-2,6186	-55,6124	-2,3876
Barquisimeto 3	-65,8828	-0,1172	-64,1298	-1,8702	-63,9934	-2,0066	-63,8922	-2,1078
Maracay 1	-64,0375	5,0375	-64,6305	5,6305	-65,3402	6,3402	-64,7261	5,7261
Maracay 3	-61,8381	4,8381	-62,1069	5,1069	-62,7513	5,7513	-63,1276	6,1276
Maracay 3	-61,1745	-2,8255	-62,4305	-1,5695	-63,2907	-0,7093	-62,8649	-1,1351
San Cristóbal 1	-66,0071	5,0071	-64,5910	3,5910	-64,1482	3,1482	-64,5711	3,5711
San Cristóbal 3	-63,1115	-1,8885	-64,0641	-0,9359	-63,4761	-1,5239	-63,7825	-1,2175
San Cristóbal 3	-60,7363	-1,2637	-60,4269	-1,5731	-59,3879	-2,6121	-59,9942	-2,0058

San Cristóbal 2	-54,7046	2,7046	-52,8834	0,8834	-51,8396	-0,1604	-50,1674	-1,8326
San Cristóbal 4	-62,7568	1,7568	-65,9294	4,9294	-64,3608	3,3608	-64,2053	3,2053
San Cristóbal 4	-63,7691	-5,2309	-65,1118	-3,8882	-63,1752	-5,8248	-63,7932	-5,2068
Terrazas Ávila	-57,2900	-2,7100	-57,1658	-2,8342	-57,6818	-2,3182	-57,8700	-2,1300
Mérida	-66,1398	-4,8602	-66,8681	-4,1319	-66,7033	-4,2967	-66,8919	-4,1081
Mérida	-67,5135	0,5135	-67,2506	0,2506	-67,7859	0,7859	-68,0594	1,0594
Mérida	-69,1232	2,1232	-68,2442	1,2442	-69,0741	2,0741	-69,4205	2,4205
Mérida	-68,1545	0,1545	-65,6438	-2,3562	-66,5661	-1,4339	-66,6596	-1,3404
Mérida	-66,7065	-4,2935	-66,5348	-4,4652	-66,6265	-4,3735	-66,9700	-4,0300
Mérida	-67,5852	-0,4148	-67,3341	-0,6659	-67,8530	-0,1470	-68,1273	0,1273
Mérida	-66,9468	-3,0532	-66,6023	-3,3977	-66,8619	-3,1381	-67,2060	-2,7940
Mérida	-69,3166	5,3166	-68,8768	4,8768	-70,8646	6,8646	-70,6622	6,6622
Bolívar 1	-69,4093	7,4093	-69,5456	7,5456	-69,6497	7,6497	-69,0541	7,0541
Bolívar 2	-66,1540	11,1540	-66,6700	11,6700	-66,0434	11,0434	-66,4820	11,4820

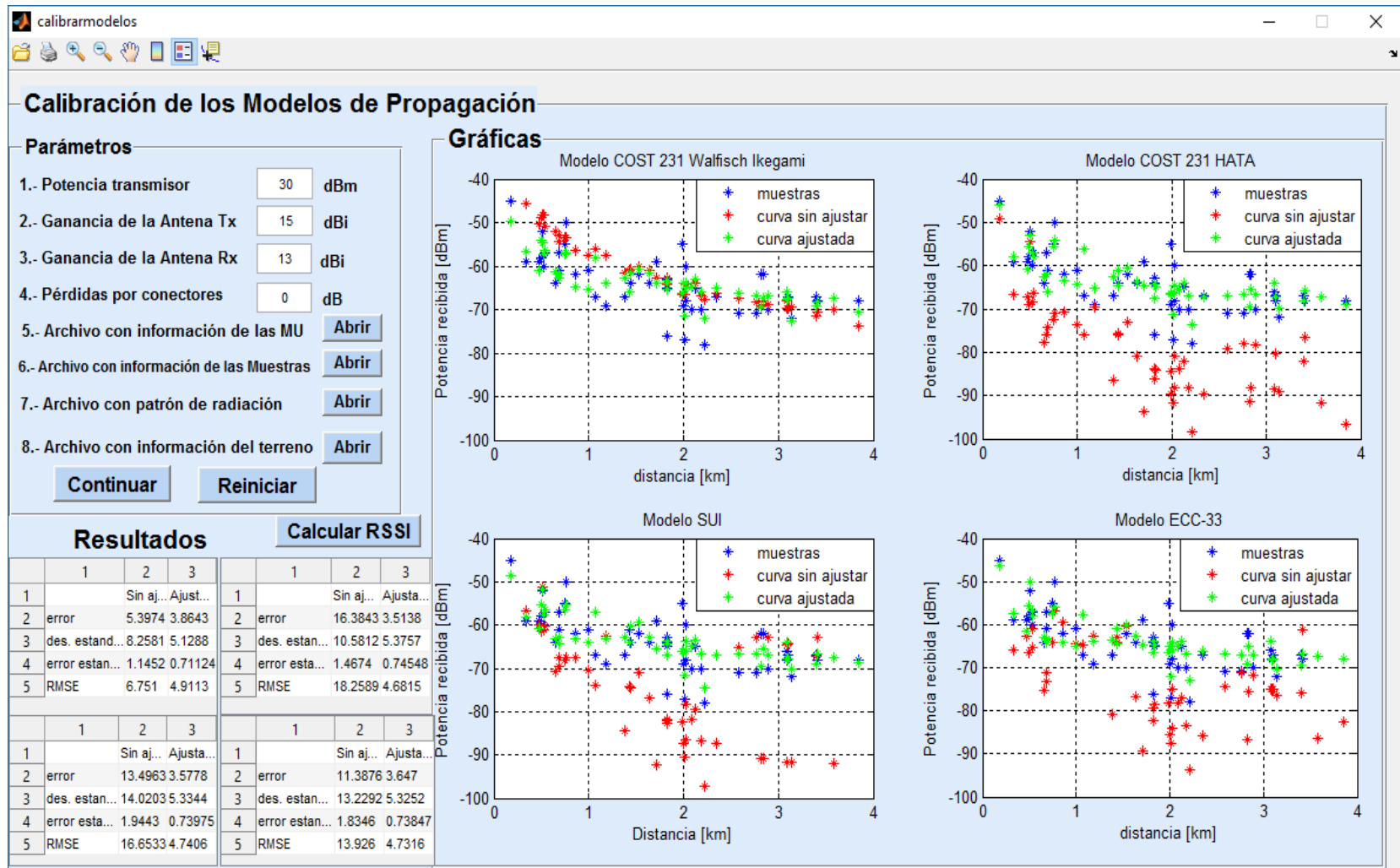


Gráfico 5. Interfaz gráfica con los resultados.

Análisis residual

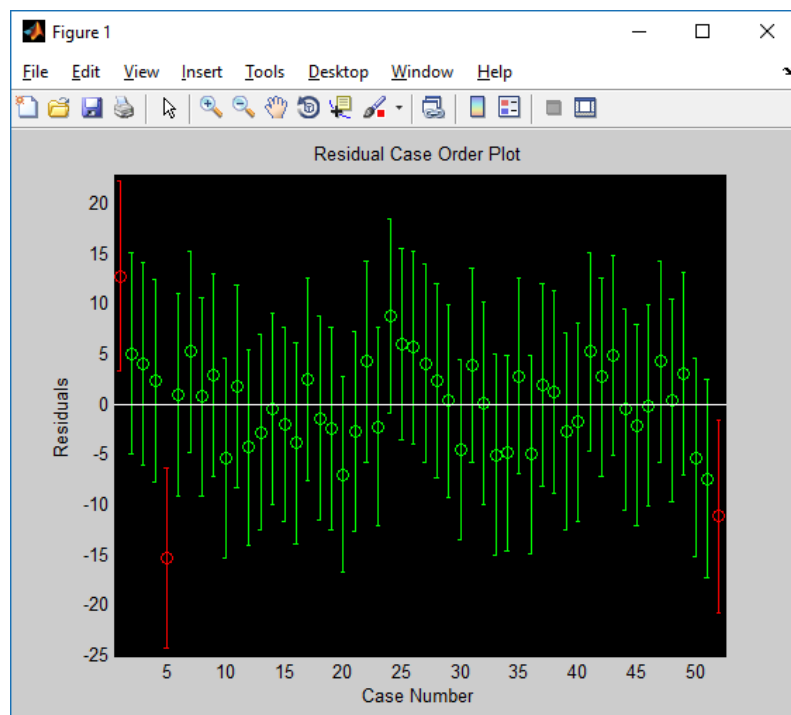


Gráfico 6. Residuos para Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami

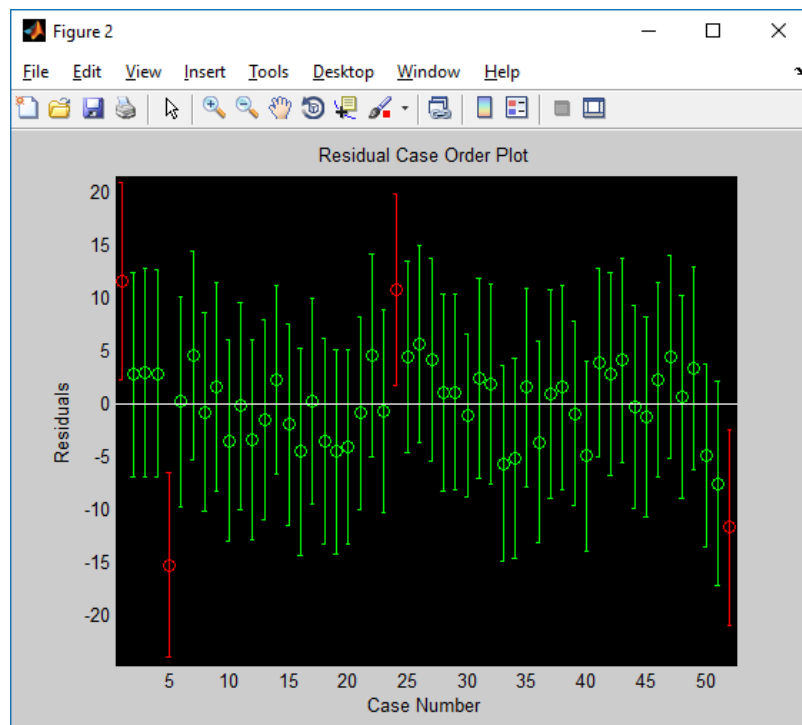


Gráfico 7. Residuos para Modelo Cost 231 Hata.

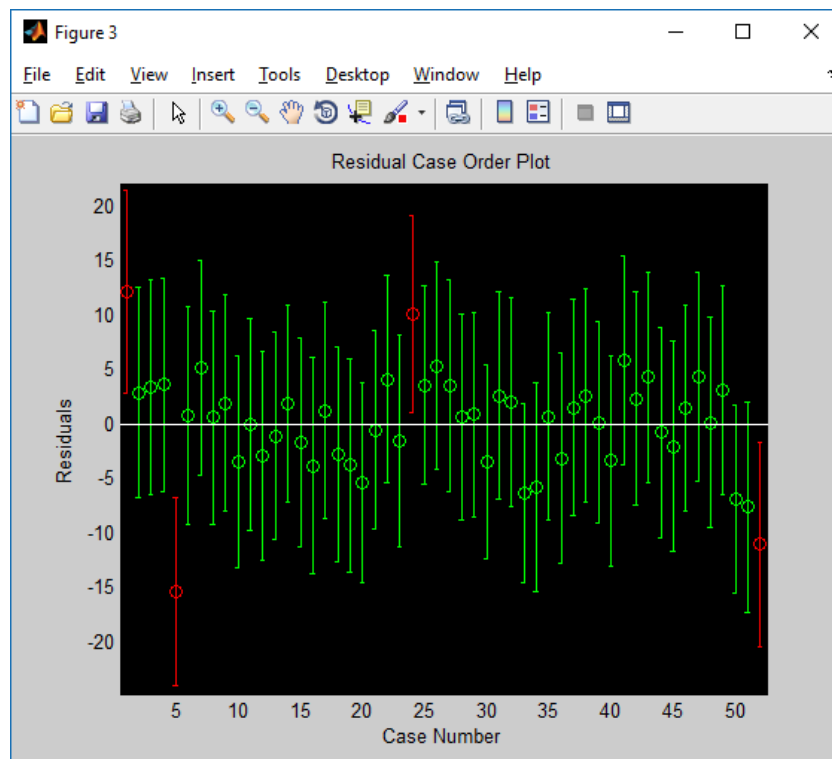


Gráfico 8. Resíduos para Modelo SUI

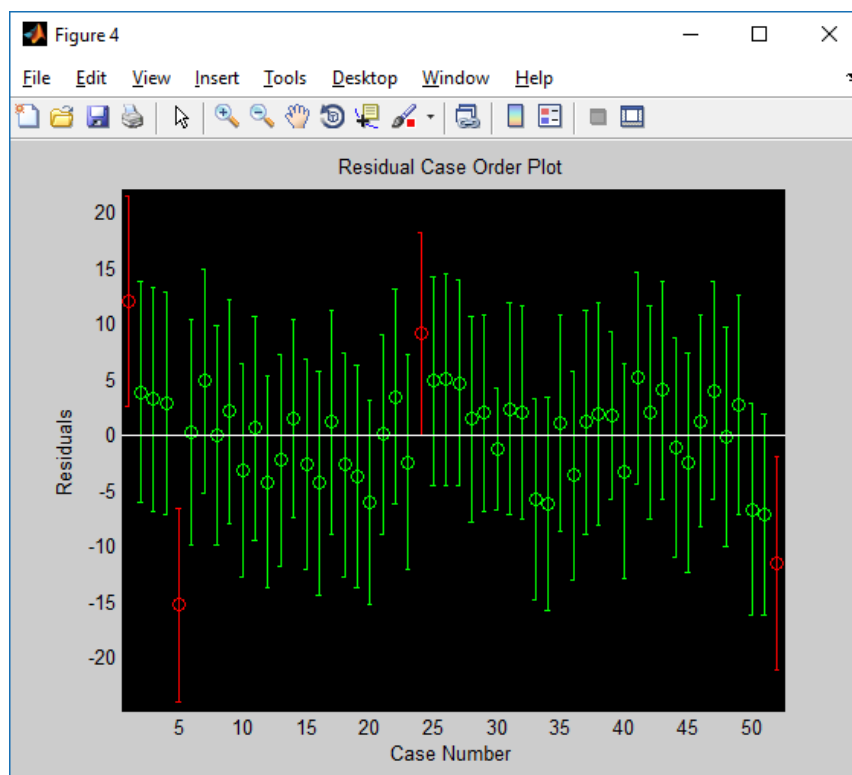


Gráfico 9. Resíduos para Modelo ECC-33

En el análisis residual se puede observar que para el modelo COST 231 WALFISCH-IKEGAMI (gráfico 6) las muestras que presentan error significativo son la 1, 5 y 52. Mientras que en el resto de los modelos, los que presentan mayor error son 1, 5, 24 y 52; es decir, que estos valores son atípicos por lo que se deben descartar del análisis para afinar el ajuste y obtener mejores resultados.

En la tabla 9, se reflejan los valores del error residual, desviación estándar, error estándar y el error cuadrático medio de cada uno de los modelos de propagación antes y después de realizar el ajuste por regresión lineal múltiple, en donde el modelo COST 231 HATA es el que presenta menor error residual y error cuadrático medio, ahora se debe realizar un análisis de varianza para determinar las pruebas de hipótesis para la significación de los modelo de ajuste.

Tabla 9. Comparación entre los modelos antes y después del ajuste.

	COST 231 WALFISCH IKEGAMI		COST 231 HATA		SUI		ECC-33	
	Sin ajustar	Ajustado	Sin ajustar	Ajustado	Sin ajustar	Ajustado	Sin ajustar	Ajustado
Error residual	5,397	3,864	16,384	3,514	13,496	3,578	11,388	3,647
Desviación estándar	8,258	5,129	10,581	5,376	14,020	5,334	13,229	5,325
Error estándar	1,145	0,711	1,465	0,745	1,944	0,739	1,835	0,738
RMSE	6,751	4,911	18,259	4,682	16,653	4,741	13,926	4,732

Análisis de varianza

Tabla 10. Modelo COST 231 WALFISCH-IKEGAMI

	Estimado	SE	tStat	pValor
Intersección	-1077,896	412,923	-2,610	0,012
X1	16,593	2,343	7,083	4,942
X2	337,892	116,694	2,896	0,006

En el modelo COST 231 Walfisch-Ikegami (Tabla 10), se observa que el término independiente y la variable que relaciona la frecuencia de operación, tienen error cuadrático significativo, lo cual produce que la estimación de estos parámetros tenga constantes muy altas, por lo que la prueba de significación (pValor) es mayor a 0,05 (que corresponde al nivel de significación de 5% utilizado); es decir, estas parámetros no son significativos para el ajuste del modelo, tal como se observó en la matriz de correlación, donde la variable dependiente y X2 no tienen una relación lineal significativa; lo cual trae como consecuencia errores innecesarios al modelo de ajuste.

Tabla 11. Modelo COST 231 HATA

	Estimado	SE	tStat	pValor
Intersección	-837,727	434,401	-1,928	0,060
X1	269,203	122,830	2,192	0,034
X2	5,147	4,515	1,140	0,260
X3	-1,118	0,632	-1,770	0,083
X4	32,523	16,799	1,936	0,059
X5	-10,210	1,936	-1,047	0,300

Para el modelo COST 231 HATA (Tabla 11) el término independiente y la variable X1 presentan mayor error cuadrático. Mientras que, para el modelo SUI (Tabla 12) las variables X4 y X5, tienen mayor error. Por último, el modelo

ECC-33 (Tabla 13) tiene errores cuadráticos considerables en las variables X2, X3 y el término independiente, además, al realizar la matriz de correlación, se observó que la correlación entre estas variables y la variable dependiente era cercana a cero, y la correlación entre estas dos variables es de 1 lo que significa que ambas variables tiene una relación lineal perfecta, por lo tanto, son dependientes.

Tabla 12. Modelo SUI

	Estimado	SE	tStat	pValor
Intersección	0	0	NaN	NaN
X1	9,190	7,728	1,189	0,241
X2	15,372	3,475	4,424	6,081e-05
X3	0,002	0,010	0,190	0,850
X4	-3,836	107,713	-0,036	0,972
X5	290,273	128,997	2,250	0,029
X6	-5,323	2,962	-1,797	0,079

Tabla 13. Modelo ECC-33

	Estimado	SE	tStat	pValor
Intersección	2748,247	11855,766	0,232	0,818
X1	15,218	2,747	5,539	1,500e-06
X2	-10040,558	43883,863	-0,229	0,820
X3	9581,000	40602,242	0,236	0,815
X4	0,204	3,247	0,063	0,950
X5	5,419	10,569	0,513	0,611
X6	-0,010	0,065	-1,531	0,133

Tabla 14. Comparación del ajuste de los modelos.

	Cost 231 Walfisch-Ikegami	Cost 231 Hata	SUI	ECC-33
Número de observaciones	52	52	52	52
Grados de libertad de error	49	46	46	45
Error cuadrático medio	5,06	4,98	5,04	5,09
R^2	0,508	0,553	0,541	0,543
R^2 ajustado	0,487	0,504	0,491	0,482
F-estadístico vs. Modelo constante	25,2	11,4	10,9	8,91
pValor	2,91e-08	3,6e-07	6,23e-07	2,04e-06

Por otro lado, en la tabla 14 se muestra una tabla comparativa donde el error cuadrático medio y el error residual (Tabla 9) es menor en el modelo de propagación COST 231 HATA. Además, el coeficiente de determinación ajustado es de 0,504 para el modelo COST 231 HATA, lo que significa que el 50,4% de los valores medidos son explicados por el modelo de regresión lineal múltiple. Por tal razón, para mejorar los resultados, se descartan los valores atípicos que se determinaron anteriormente, con el análisis residual.

Una vez descartados estos puntos atípicos, se corre de nuevo el programa y se obtienen los resultados reflejados en la tabla 15, donde se observa el nivel de señal recibida de cada una de las mediciones y el error residual de los mismos.

Tabla 15. Resultados de las potencias recibidas con los modelos ajustados

Celda	COST 231 WALFISCH IKEGAMI		COST 231 HATA		SUI		ECC-33	
	Pr	Residuos	Pr	Residuos	Pr	Residuos	Pr	Residuos
Ciudad Bolívar 3	-64,1935	-4,8065	-66,6040	-2,3960	-66,9877	-2,0123	-65,0212	-3,9788
Maturín 1	-66,2870	-3,7130	-67,3000	-2,7000	-67,6934	-2,3066	-67,4210	-2,5790
Maturín 1	-61,6465	-2,3535	-61,0580	-2,9420	-61,0513	-2,9487	-60,8254	-3,1746
Maturín 1	-64,2011	-0,7989	-64,9588	-0,0412	-65,0996	0,0996	-64,9921	-0,0079
Maturín 3	-65,0425	-4,9575	-65,7116	-4,2884	-66,0537	-3,9463	-65,0217	-4,9783
Maturín 3	-55,6741	-1,3259	-57,3770	0,3770	-56,1940	-0,8060	-56,1087	-0,8913
Acarigua 2	-65,3632	-2,6368	-66,6737	-1,3263	-66,9740	-1,0260	-65,6977	-2,3023
Cumboto 1	-67,8205	5,8205	-65,5677	3,5677	-65,6284	3,6284	-64,6544	2,6544
Lara 1	-65,5361	-1,4639	-67,6933	0,6933	-68,3013	1,3013	-67,1396	0,1396
Lara 2	-65,1735	4,1735	-64,2262	3,2262	-64,1175	3,1175	-64,9560	3,9560
Lara 2	-64,5605	2,5605	-63,2640	1,2640	-63,1074	1,1074	-63,8772	1,8772
Lara 2	-73,1095	1,1095	-69,9754	-2,0246	-70,7718	-1,2282	-71,8509	-0,1491
Lara 2	-60,3631	1,3631	-60,3975	1,3975	-60,0793	1,0793	-61,8356	2,8356
Orinoco 1	-64,1450	4,1450	-64,8858	4,8858	-65,0417	5,0417	-64,7835	4,7835
Orinoco 1	-61,6447	-2,3553	-64,0849	0,0849	-63,7640	-0,2360	-63,2030	-0,7970
Orinoco 1	-65,5755	1,5755	-67,9151	3,9151	-67,8963	3,8963	-67,1476	3,1476
Orinoco 1	-65,5755	2,5755	-67,9151	4,9151	-67,8963	4,8963	-67,1476	4,1476

Orinoco 2	-56,6515	6,6515	-53,0177	3,0177	-53,2940	3,2940	-54,1473	4,1473
Orinoco 2	-71,3864	3,3864	-69,0112	1,0112	-67,6919	-0,3081	-69,7543	1,7543
Orinoco 2	-62,7621	-4,2379	-62,0902	-4,9098	-61,3242	-5,6758	-62,4176	-4,5824
Puerto la Cruz 1	-56,8412	1,8412	-54,8875	-0,1125	-55,1010	0,1010	-56,1578	1,1578
Maracaibo 1	-72,3894	-5,6106	-73,9949	-4,0051	-74,5356	-3,4644	-74,0292	-3,9708
Maracaibo 1	-71,6339	-5,3661	-71,5830	-5,4170	-71,9106	-5,0894	-72,5986	-4,4014
Maracaibo 2	-71,6509	-3,3491	-71,4961	-3,5039	-73,1097	-1,8903	-70,8585	-4,1415
Maracaibo 3	-55,7973	-3,2027	-57,1289	-1,8711	-57,2539	-1,7461	-57,0764	-1,9236
Maracaibo 3	-76,4596	0,4596	-75,4020	-0,5980	-75,4382	-0,5618	-75,5607	-0,4393
Barquisimeto 2	-48,2919	3,2919	-44,2059	-0,7941	-46,9331	1,9331	-48,2252	3,2252
Barquisimeto 3	-53,4721	-4,5279	-54,9492	-3,0508	-54,6889	-3,3111	-55,5092	-2,4908
Barquisimeto 3	-66,4073	0,4073	-64,2406	-1,7594	-64,1819	-1,8181	-64,9746	-1,0254
Maracay 1	-64,1986	5,1986	-64,4509	5,4509	-62,6755	3,6755	-63,0310	4,0310
Maracay 3	-61,4529	4,4529	-61,6824	4,6824	-61,9062	4,9062	-62,3880	5,3880
Maracay 3	-60,7632	-3,2368	-62,0668	-1,9332	-62,4041	-1,5959	-62,2428	-1,7572
San Cristóbal 1	-66,0834	5,0834	-64,6177	3,6177	-64,8173	3,8173	-63,0882	2,0882
San Cristóbal 3	-63,4013	-1,5987	-64,4623	-0,5377	-64,7342	-0,2658	-64,5803	-0,4197
San Cristóbal 3	-60,8173	-1,1827	-60,5249	-1,4751	-60,3609	-1,6391	-60,0634	-1,9366
San Cristóbal 2	-54,0997	2,0997	-52,1871	0,1871	-51,6290	-0,3710	-47,7256	-4,2744
San Cristóbal 4	-62,3727	1,3727	-66,0687	5,0687	-64,4380	3,4380	-63,6884	2,6884
San Cristóbal 4	-63,7288	-5,2712	-65,5803	-3,4197	-63,6036	-5,3964	-63,7515	-5,2485

Terrazas Ávila	-56,7322	-3,2678	-56,5255	-3,4745	-56,7636	-3,2364	-56,2923	-3,7077
Mérida	-66,5536	-4,4464	-67,6104	-3,3896	-66,8645	-4,1355	-67,9409	-3,0591
Mérida	-68,0431	1,0431	-68,0008	1,0008	-67,8115	0,8115	-68,9793	1,9793
Mérida	-69,7104	2,7104	-68,9664	1,9664	-69,3050	2,3050	-70,2550	3,2550
Mérida	-68,7444	0,7444	-66,2291	-1,7709	-66,8183	-1,1817	-67,1378	-0,8622
Mérida	-67,1639	-3,8361	-67,2436	-3,7564	-66,6542	-4,3458	-67,8988	-3,1012
Mérida	-68,1129	0,1129	-68,0824	0,0824	-67,9011	-0,0989	-69,0501	1,0501
Mérida	-67,4315	-2,5685	-67,3164	-2,6836	-66,8747	-3,1253	-68,1112	-1,8888
Mérida	-70,0374	6,0374	-69,7673	5,7673	-70,3875	6,3875	-71,3552	7,3552
Bolívar 1	-69,8973	7,8973	-70,0016	8,0016	-70,9304	8,9304	-68,4279	6,4279

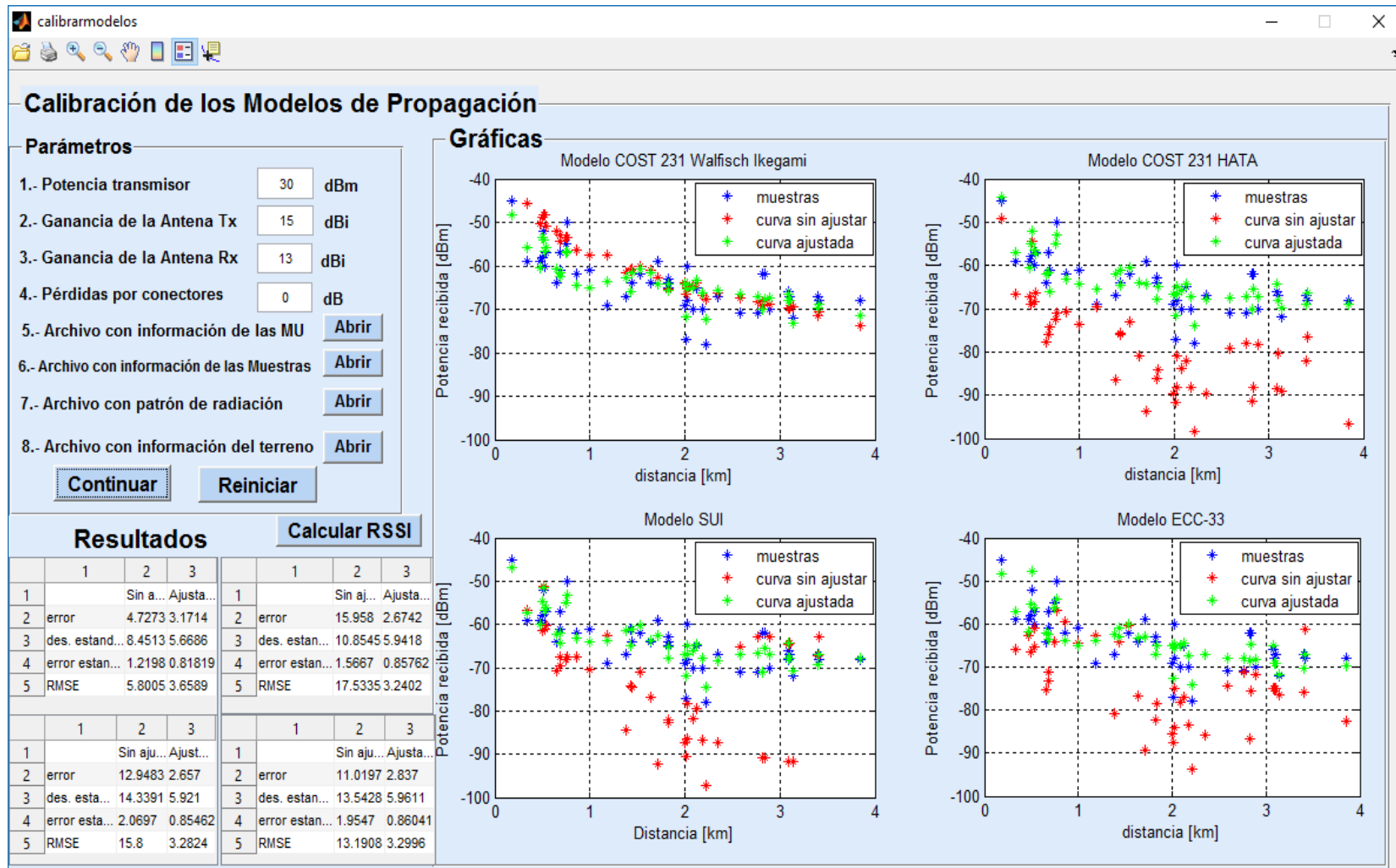


Gráfico 10. Interfaz gráfica con los resultados (descartando los puntos atípicos)

En el gráfico 10 se observa el resultado arrojado por la herramienta diseñada, descartando las muestras con los valores atípicos, las cuales fueron determinadas anteriormente aplicando un análisis residual. Además, se puede notar gráficamente y numéricamente que para cada uno de los modelos de propagación estudiados en el presente trabajo especial de grado existe una reducción significativa del error residual; debido a que el método de mínimos cuadrados aplicado para el modelo de regresión lineal múltiple permite conseguir la curva con la menor diferencia entre el valor teórico y el real.

Análisis residual.

En el gráfico 11, gráfico 12, gráfico 13 y gráfico 14 se muestra un error residual y el intervalo de confianza de cada una de las muestras, en el cual se indica como valor atípico cuando no se incluye el cero en ese intervalo. Como se puede observar, en todos los modelos se considera la última muestra como valor atípico.

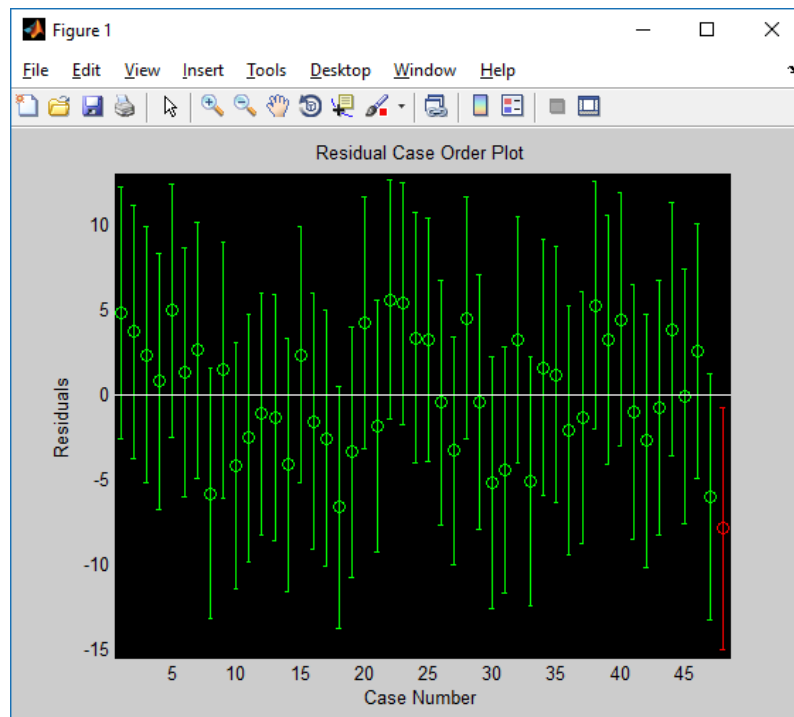


Gráfico 11. Residuos para Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami

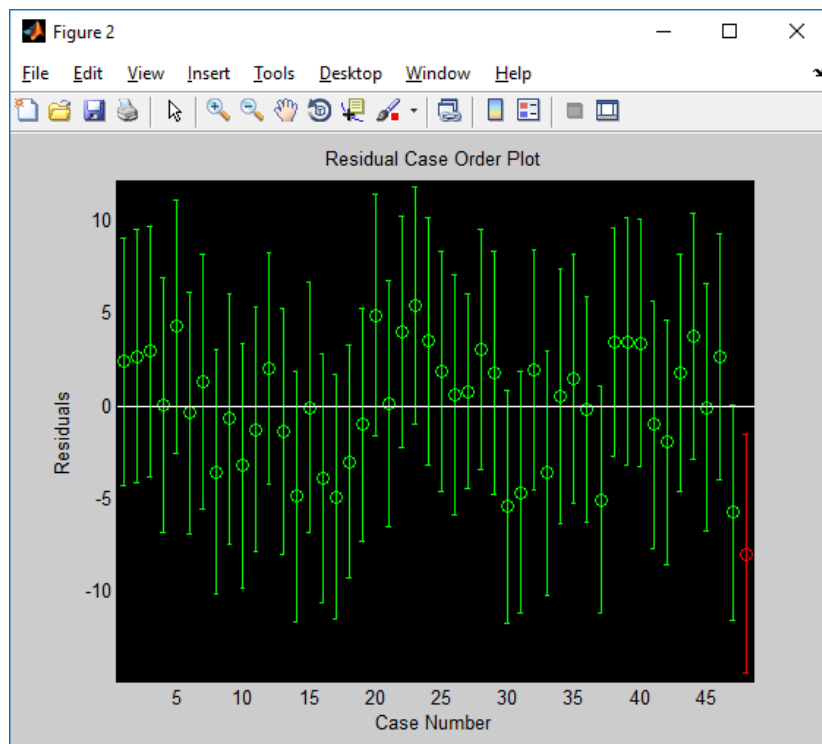


Gráfico 12. Resíduos para Modelo Cost 231 Hata

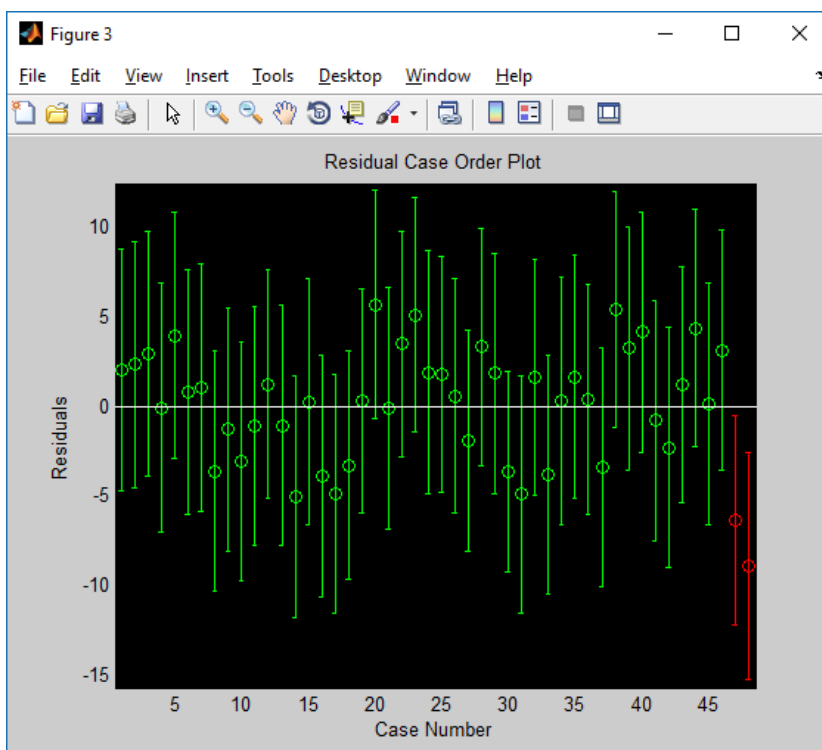


Gráfico 13. Resíduos para Modelo SUI

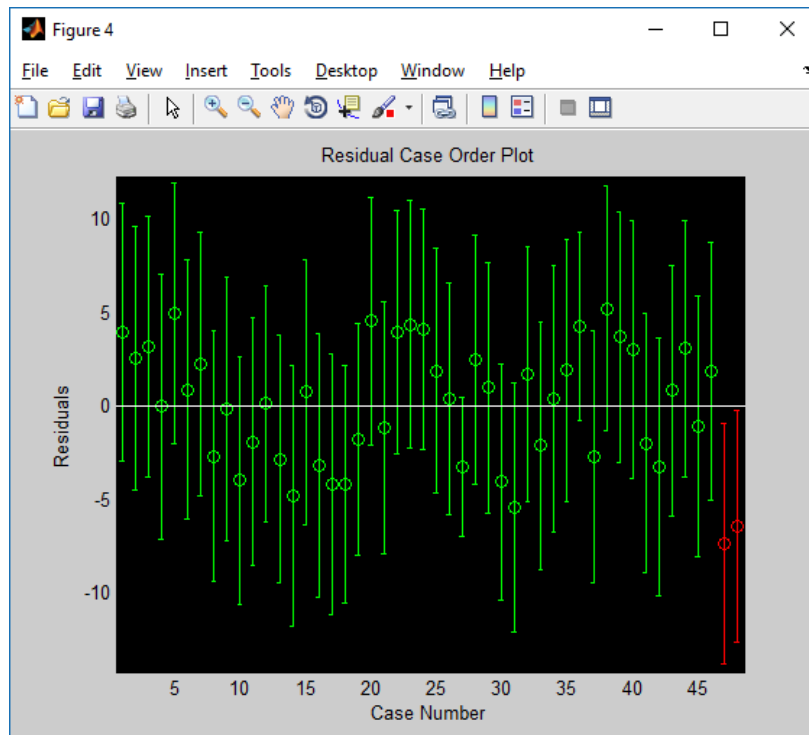


Gráfico 14. Resíduos para Modelo ECC-33

Tabla 16. Comparación entre los modelos, antes y después del ajuste

	COST 231 WALFISCH IKEGAMI		COST 231 HATA		SUI		ECC-33	
	Sin ajustar	Ajustado	Sin ajustar	Ajustado	Sin ajustar	Ajustado	Sin ajustar	Ajustado
Error	4,7273	3,1714	15,958	2,6742	12,9483	2,657	11,0197	2,837
Desviación estándar	8,4513	5,6686	10,8545	5,9418	14,3391	5,921	13,5428	5,9611
Error estándar	1,2198	0,81819	1,5667	0,85762	2,0697	0,85462	1,9547	0,86041
RMSE	5,8005	3,6589	17,5335	3,2402	15,8	3,2824	13,1908	3,2996

Comparando las tablas 9 y 14, el error cuadrático medio y el error residual disminuyó en 1 dB debido a que se descartaron los puntos atípicos, los cuales no aportan información significativa para el ajuste realizado. Además, es importante apreciar que el modelo con menor error es el COST 231 HATA, tal como se obtuvo de igual manera con las mediciones iniciales, sin embargo, al descartar los valores atípicos se logra aumentar la bondad del ajuste.

En las tabla 17, tabla 18, tabla 19 y tabla 20 se muestra el análisis de varianza de cada uno de los modelos de propagación, en el cual se compara la suma de los cuadrados, el estadístico t y el valor de p. Donde nuevamente, se presentan errores importantes en las mismas variables, analizadas anteriormente, debido a que no presentan relación lineal con la variable dependiente.

Análisis de varianza

Tabla 17. *Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami*

	Estimado	SE	tStat	pValor
Intersección	-1088,467	314,137	-3,465	0,001
X1	18,052	1,776	10,162	3,135e-13
X2	340,832	88,769	3,839	0,0003

Tabla 18. *Modelo Cost 231 Hata*

	Estimado	SE	tStat	pValor
Intersección	-858,132	308,933	-2,778	0,008
X1	274,405	87,317	3,143	0,003
X2	6,450	3,233	1,995	0,0526
X3	-1,2138	0,444	-2,734	0,009
X4	35,992	11,836	3,041	0,004
X5	-11,563	6,876	-1,682	0,100

Tabla 19. Modelo SUI

	Estimado	SE	tStat	pValor
Intersección	0	0	NaN	NaN
X1	9,171	5,495	1,669	0,103
X2	19,686	2,555	7,704	1,704e-09
X3	-0,008	0,007	-1,093	0,281
X4	-132,311	79,954	-1,655	0,106
X5	283,561	91,964	3,083	0,004
X6	-5,215	2,074	-2,515	0,016

Tabla 20. Modelo ECC-33

	Estimado	SE	tStat	pValor
Intersección	11209,054	8471,391	1,323	0,193
X1	15,814	1,941	8,147	4,169e-10
X2	-41356,964	31355,394	-1,319	0,194
X3	38556,965	29009,400	1,329	0,191
X4	2,771	2,395	1,157	0,254
X5	-6,650	7,711	-0,862	0,394
X6	-0,119	0,046	-2,574	0,014

El análisis de varianza se utiliza para determinar si el modelo de regresión lineal múltiple es adecuado para estimar los parámetros de la variable dependiente. El pValor indica la prueba de hipótesis para la significación del modelo, con un nivel de 5%, todos los modelos son significativos. Por otro lado, el coeficiente de determinación no da un valor correcto, debido a que el mismo se incrementa al añadir más variables al modelo de regresión, por lo cual se utiliza el coeficiente de determinación ajustado, donde el modelo que presenta un mayor valor es el COST 231 HATA con 73,4% de predicción de los datos con el modelo de regresión lineal múltiple.

Tabla 21. Comparación del análisis de regresión

	Cost 231 Walfisch-Ikegami	Cost 231 Hata	SUI	ECC-33
Número de observaciones	48	48	48	48
Grados de libertad de error	45	42	42	41
Error Cuadrático Medio	3,78	3,46	3,51	3,57
R^2	0,697	0,762	0,756	0,754
R^2 ajustado	0,684	0,734	0,727	0,718
F-estadístico vs. Modelo constante	51,8	27	26,1	20,9
pValor	2,13e-12	4,17e-12	7,11e-12	4,7e-11

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para la implementación de la tecnología PMP, es necesario conocer el comportamiento de la propagación de la señal en la banda de frecuencias de 3,5 GHz, por lo tanto, al revisar diversos trabajos de investigación para tecnologías similares en esta banda de frecuencias, se seleccionó los modelos de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami, COST 231 Hata, SUI y ECC-33. Sin embargo, para obtener valores aproximados a las mediciones tomadas, para la predicción de enlaces futuros, es necesario realizar ajustes a los modelos de propagación estudiados, en base a los parámetros que influyen en el desvanecimiento de la señal entre las antenas del transmisor y receptor, tales como, distancia entre el transmisor y receptor, frecuencia central del canal, altura en la cual están ubicadas las antenas.

Debido a que se tienen varias variables, que fueron mencionadas anteriormente, como parámetros de los modelos de propagación, no se puede utilizar como método de ajuste el de regresión lineal simple, si no que se aplica el modelo de regresión lineal múltiple y para verificar si la relación entre la variable dependiente y las variables independientes es lineal, se analizó con la matriz de dispersión.

En el presente trabajo especial de grado, se determinó que el modelo de propagación COST 231 HATA presenta menor error con respecto a los valores medidos, menor error cuadrático medio y por lo tanto el coeficiente de determinación ajustado fue mayor en comparación a los otros modelos, lo que quiere decir, que el modelo COST 231 HATA, es el que explica mejor los valores medidos; por esta razones que se le sugiere a la empresa Telefónica la utilización de este modelo de propagación para la predicción de nuevos enlaces en esta banda de frecuencias, con el objetivo de tener un estimado de la señal recibida al momento de realizar los cálculos teóricos de los enlaces,

previo a la instalación de los equipos. Es importante acotar, que el modelo es válido para las condiciones similares a las estudiadas, es decir, en ambientes urbanos donde la atenuación por obstrucción es alta.

No obstante, se recomienda a la empresa, realizar mayor cantidad de mediciones y analizar cada una de las ciudades donde ofrecen el servicio en la banda de 3,5 GHz; con la finalidad aumentar la precisión del modelo de propagación ajustado, donde el margen de error sea de aproximadamente cero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Fidel A. Sánchez M., Robin R. Lacruz L, “Cálculo de enlaces para WiMAX”, Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad Simón Bolívar, octubre 2008.

[2] Julio C. Covarrubias R, “Modelo de propagación para exteriores en la banda de 3,5 GHz”, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Telecomunicaciones, Instituto Politécnico Nacional, 2009.

[3] Ing. Stalin X. Caraguay R., “Simulación de la red inalámbrica de banda ancha con tecnología WiMAX para el estado de Colima”, Tesis para obtener el grado de Maestro en Computación, Universidad de Colima, diciembre 2011.

[4] Néstor J. Hernández M., “Diseño de proyecto técnico para solución de acceso masivo en la zona metropolitana utilizando la tecnología WiMAX en 3,5 GHz”, Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad Simón Bolívar, mayo 2007.

[5] Bernardo A. Infante A., “Diseño de un Sistema de Red Inalámbrico basado en WiMAX para su aplicación en las instalaciones de la Universidad Católica Andrés Bello”, Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero en Telecomunicaciones, Universidad Católica Andrés Bello, julio 2012.

[6] Christian R. Díaz M., “Proyecto técnico para la implementación de la tecnología WiMAX en la banda de 3,5 GHz”, Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad Simón Bolívar, octubre 2006.

[7] Josip Milanovic, Snjezana Rimac-Drlje, Krunoslav Bejuk, “Comparison of Propagation Model Accuracy for WiMAX on 3.5GHz,” 14th IEEE International conference on Electronic Circuits and Systems, 2007.

- [8] Nektarios Moraitis, Demosthenes Vouyioukas, Philip Constantinou, "Propagation Study and Performance Evaluation of a Mobile WiMAX System at 3.5 GHz".
- [9] V.S. Abhayawardhana, I.J. Wassell, D. Crosby, M.P. Sellars, M.G. Brown, "Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for fixed Wireless Access Systems".
- [10] Nafaa M. Shebani, Abdulati E. Mohammed, Mohammed A. Mosbah, Yousra A. Hassan, "Simulation and Analysis of Path Loss Models for WiMAX Communication System".
- [11] Selene Beciez O., Nestor J. Flores R., Cristian I. Pérez O., "Aplicación de modelos de propagación en sistemas inalámbricos de área extendida WWAN", para obtener el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, Instituto Politécnico Nacional.
- [12] Mohammad Shahajahan, A. Q. M. Abdulla Hes-Shafi, "Analysis of Propagation Models for WiMAX at 3.5 GHz", para obtener el título de Master de Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Blekinge Institute of Technology, Sweden.
- [13] Dieter J. Cichon; Thomas Kürner; "Propagation Prediction Models", COST 231 Reporte Final, capítulo 4.
- [14] V. Erceg et al., "Channel Models for Fixed Wireless Applications" IEEE802.16.3c-01/29r1, Broadband Wireless Working Group, IEEE P802.16, 2001, p3.
- [15] Gabriel A. Herrera O., "Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero en electrónica y telecomunicaciones", proyecto previo a la obtención

del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional.

[16] Julio C. Covarrubias R., “Modelos de propagación para exteriores en la banda de 3,5 GHz”, para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Telecomunicaciones, Instituto Politécnico Nacional.

[17] WiMAX Forum, “WiMAX’s technology for LOS and NLOS environments”, 2006.

[18] Joaquin Andréu Gómez, “Redes locales”, Editorial: EDITEX, Pozuelo de Alarcón, 2011.

[19] Alejandro Ulloa C., “Ajuste del modelo de propagación Hata Cost 231 para un entorno metropolitano”, Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander.

[20] Recomendación UIT-R P.1411.8 (07/2015), “Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz”.

[21] IEEE Std 802.16.1a-2013, “IEEE Standard for WirelessMAN-Advanced Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2: Higher Reliability Networks”.

[22] IEEE Std 802.16-2012, “IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems”.

[23] IEEE 802.16.3c-00/49r2. Project: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. "Interim Channel Models for G2 MMDS Fixed Wireless Applications".

[24] IEEE 802.16j-06/013. Project: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. "Multi-hop Relay System Evaluation Methodology (Channel Model and Performance Metric)".

[25] IEEE C802.16m-07/069. Project: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. "Draft IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document".

[26] Recomendación UIT-R P.1546-4 (09/2013). "Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz"

[27] Recomendación UIT-R P.526-6. "Propagación por difracción".

[28] Recomendación UIT-R P.1057 (07/2015). "Distribuciones de probabilidad para establecer modelos de propagación de las ondas radioeléctricas".

[29] Electronic Communication Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). "The analysis of the coexistence of point-to-multipoint FWS cells in the 3.4 - 3.8 GHz band".

BIBLIOGRAFÍAS

Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck, G. Geoffrey Vining. Introducción al análisis de regresión lineal, 3ra edición 2006, Compañía Editorial Continental.

Ronald E. Walpole; Raymond H. Myers; Sharon L. Myers. Probabilidad y estadística para ingenieros, sexta edición, Prentice Hall.

George C. Canavos. Probabilidad y estadística Aplicaciones y métodos, primera edición en español, McGRAW-HILL. 1998.

ANEXOS

Anexo 1. Barrido de espectro

En el analizador de espectro de guardó las imágenes con el barrido:

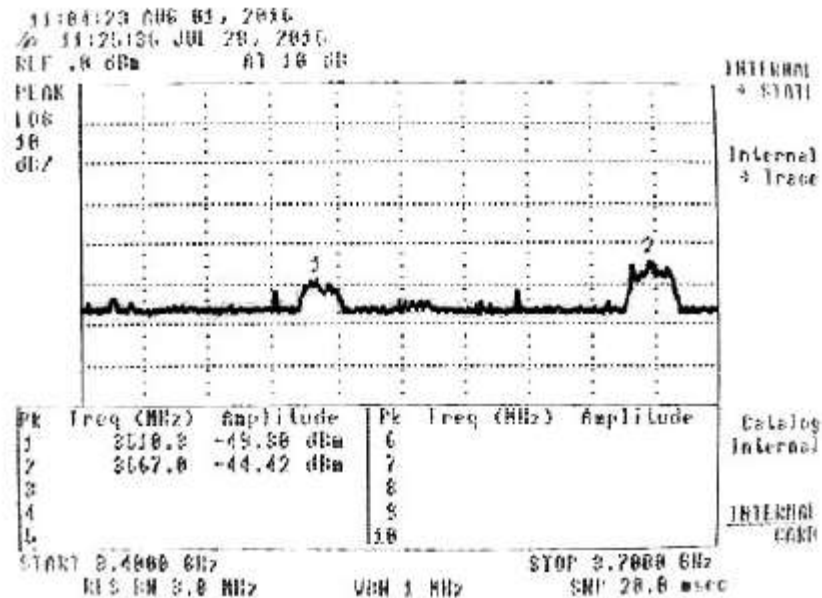


Figura 1. Gráfica Canaima 1er Barrido polarización V 0-180°

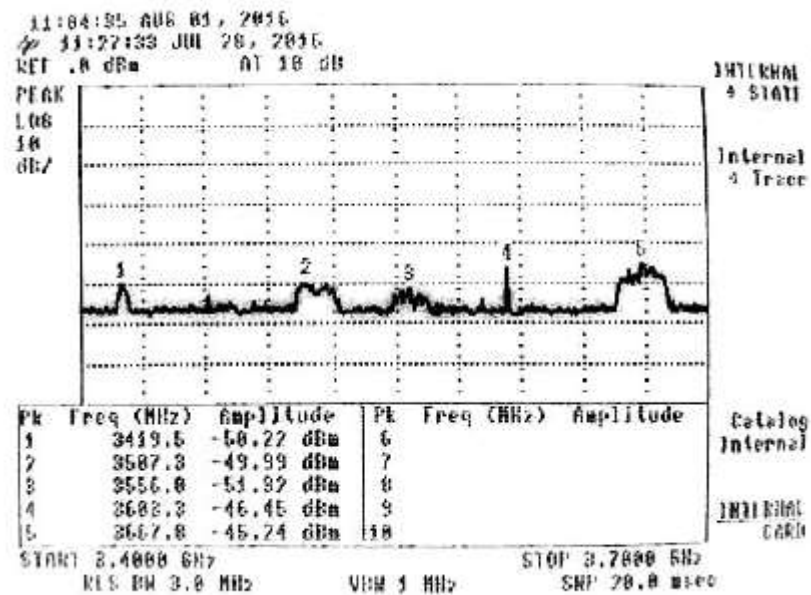


Figura 2. Gráfica Canaima 1er Barrido polarización H 0-180°

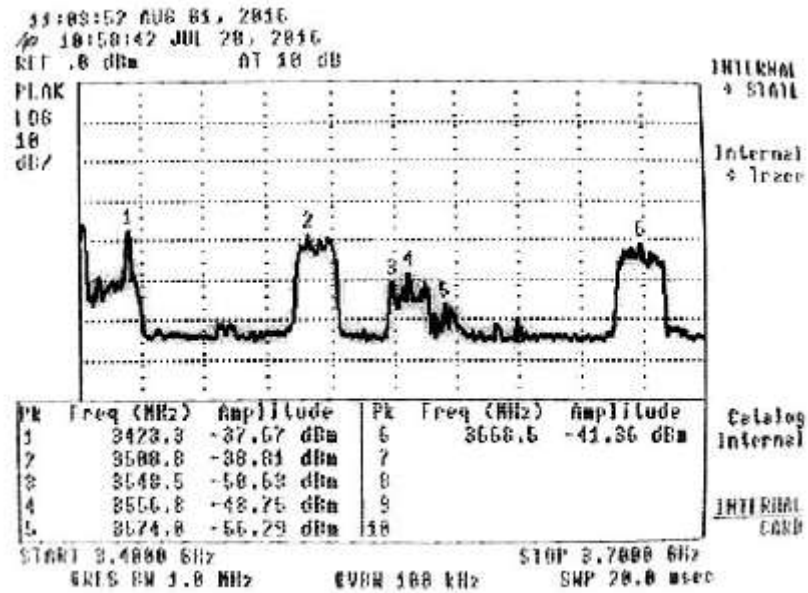


Figura 3. Gráfica Canaima 1er Barrido polarización V 180-360°

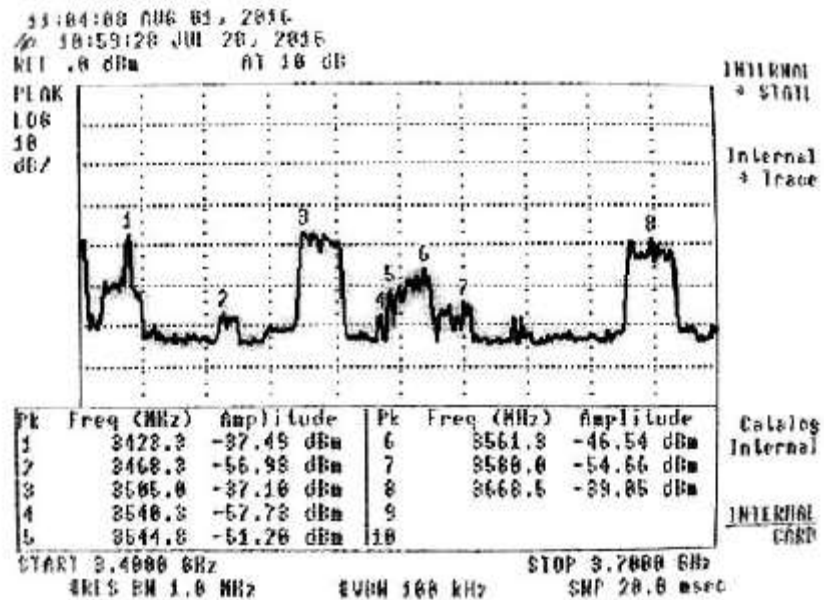


Figura 4. Gráfica Canaima 1er Barrido polarización H 180-360°

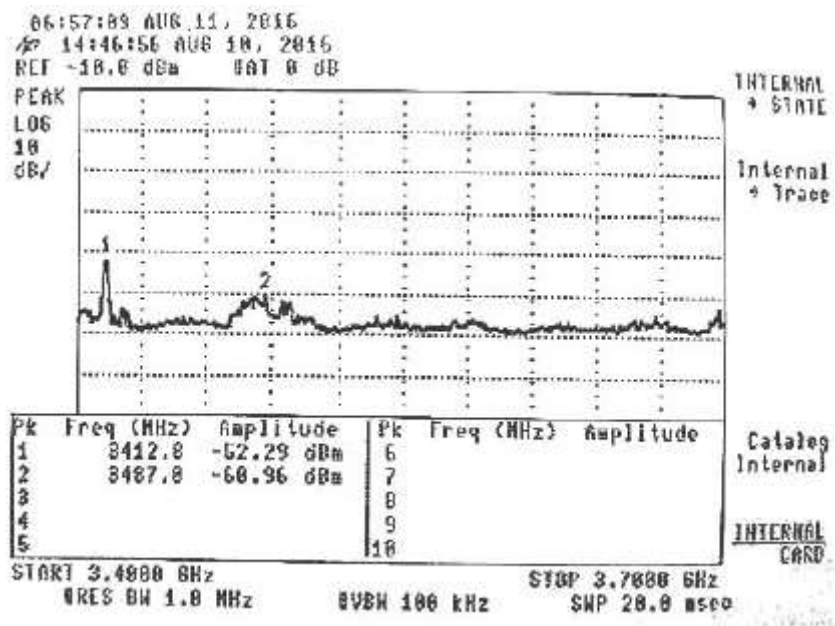


Figura 5. Gráfica Cablevisión en polarización V 0-180° (3400-3700 MHz)

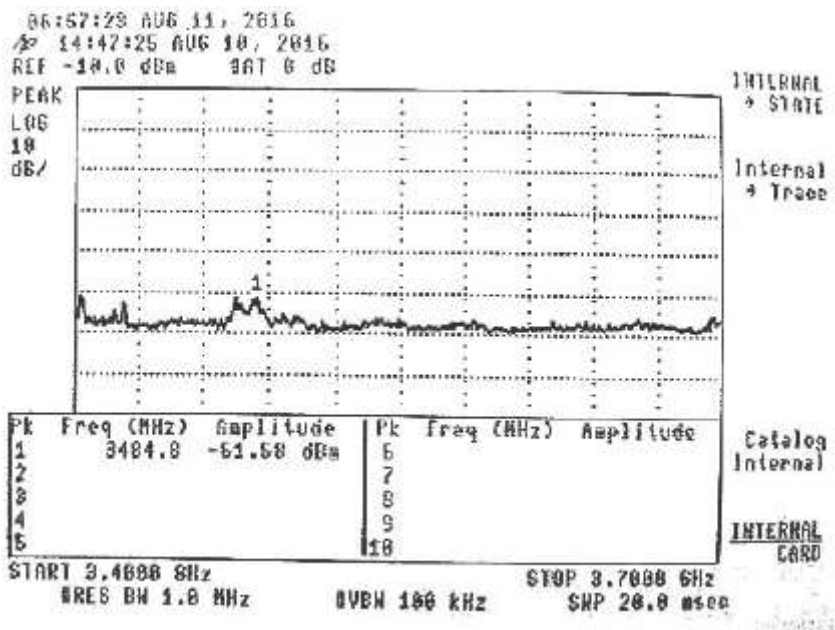


Figura 6. Gráfica Cablevisión en polarización H 0-180° (3400-3700 MHz)

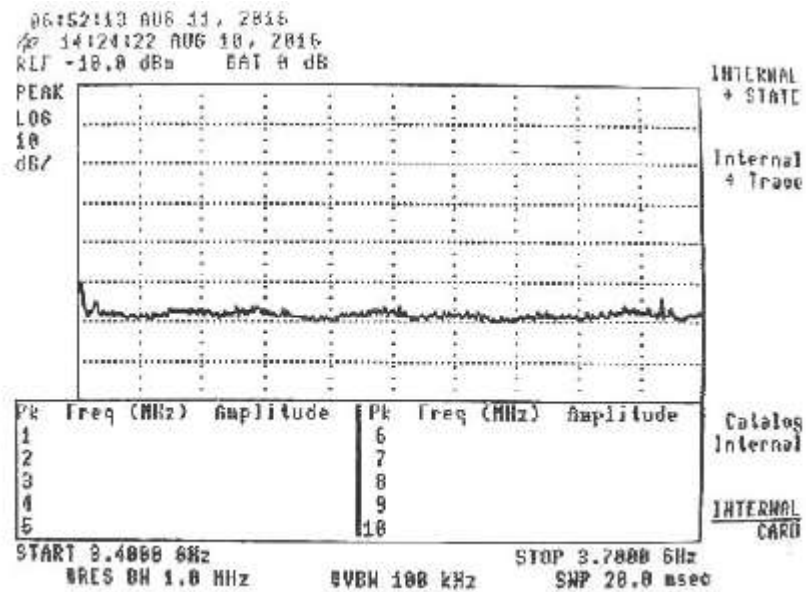


Figura 7. Gráfica Cablevisión en polarización V 180-360° (3400-3700 MHz)

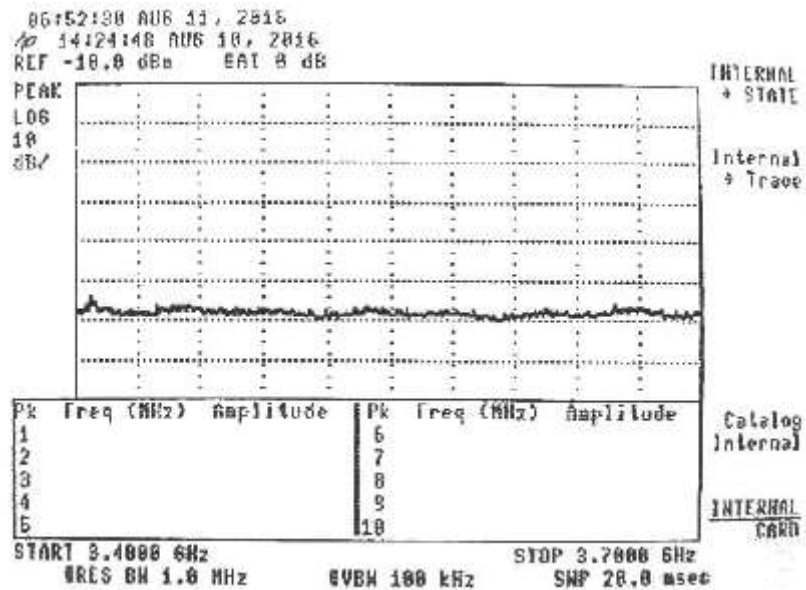


Figura 8. Gráfica Cablevisión en polarización H 180-360° (3400-3700 MHz)

Anexo 2. Convertir coordenadas en el sistema WGS-84 al sistema UTM²

Para convertir coordenadas en el sistema WGS-84 al sistema UTM es necesario aplicar el siguiente algoritmo:

Como parámetros de entrada se tiene la coordenada X, la coordenada Y, la Zona UTM (huso).

Del elipsoide de Hayford se obtiene el semieje mayor y menor

$$a = 6378388$$
$$b = 6356911,94613$$

“Luego, se calcula la excentricidad, el radio polar de curvatura y aplanamiento”

$$\text{Primera excentricidad: } e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

$$\text{Segunda excentricidad: } e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$$

$$\text{Radio polar de curvatura: } c = \frac{a^2}{b}$$

$$\text{Aplanamiento: } \alpha = \frac{a - b}{a}$$

Como la mayoría de los cálculos que se realizan en el algoritmo son en radianes, es necesario realizar la conversión a las coordenadas WGS-84 (longitud y latitud)

² Fuente: Gabriel Ortiz. “Aprende a convertir coordenadas geográficas en UTM y UTM en geográficas”. <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=058a>

Para obtener el meridiano central del huso en el que se encuentra las coordenadas en el sistema WGS84 con la cual se está trabajando, se aplica la siguiente ecuación:

$$\lambda_0 = Huso * 6 - 183$$

Luego, se calcula la distancia angular que existe entre la longitud del punto que se está trabajando y el meridiano central del huso (en radianes)

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

Finalmente, se aplica el algoritmo de Coticchia-Surace

$$A = \cos\varphi \operatorname{sen} \Delta\lambda$$

$$\xi = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1+A}{1-A} \right]$$

$$\eta = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \varphi}{\cos \Delta\lambda} \right) - \varphi$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{(1 + e'^2 \cos \varphi)}} 0,9996$$

$$\zeta = \frac{e'^2}{2} \xi^2 \cos^2 \varphi$$

$$A_1 = \operatorname{sen}(2\varphi)$$

$$A_2 = A_1 \cos^2 \varphi$$

$$J_2 = \varphi + \frac{A_1}{2}$$

$$J_4 = \frac{3J_2 + A_2}{4}$$

$$J_6 = \frac{5J_4 + A_2 \cos^2 \varphi}{3}$$

$$\alpha = \frac{3}{4} e'^2$$

$$\beta = \frac{5}{3} \alpha^2$$

$$\gamma = \frac{35}{27} \alpha^3$$

$$B_0 = 0,9996 \, c \, (\varphi - \alpha J_2 + \beta J_4 - \gamma J_6)$$

Las coordenadas en UTM se calculan a continuación:

$$X = \xi \, v \left(1 + \frac{\zeta}{3} \right) + 500000$$

$$Y = \eta \, v \, (1 + \zeta) + B_0$$

Anexo 3. Fórmula de Haversine

La fórmula de Haversine se utiliza para el cálculo de la distancia entre dos coordenadas geográficas

$$d = 2 * R * \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{(LaT - LaR) * \pi / 180}{2} \right) + \cos(LaT * \pi / 180) * \cos(LaR * \pi / 180) * \sin^2 \left(\frac{(LonT - LonR) * \pi / 180}{2} \right)} \right)$$

Donde:

R: Radio de la tierra 6371 km

d: Distancia del enlace

LaT: Latitud de la antena transmisora en decimal

LaR: Latitud de la antena receptora en decimal

LonT: Longitud de la antena transmisora en decimal

LonR: Longitud de la antena receptora en decimal

Anexo 4. Manual para la utilización de la interfaz gráfica

1. Antes de utilizar la herramienta es necesario tener los archivos con la información de las MU, SU, el patrón de radiación de la antena, en formato .xls y la información del terreno en formato .grd.

- 1.1. El archivo .xls con la información de las MU se creará con el siguiente formato:

Celda	Frecuencia	Acimut	Ht	Latitud tx	Longitud tx

Figura 1. *Formato del archivo con la información de la MU*

Donde: la primera columna se coloca el nombre de la MU, con el objetivo de relacionar las SU con los parámetros de la MU correspondiente y realizar los cálculos en los enlaces. En la segunda columna se coloca la frecuencia de operación del enlace. En la tercera columna, el acimut en el cual está ubicada la MU. La cuarta columna corresponde a la altura sobre el nivel del suelo a la cual está ubicada la MU. Por último, Las columnas cinco y seis corresponden a las coordenadas (latitud y longitud expresados en grados sexagesimal en el sistema WGS84, respectivamente) a las cuales están ubicadas las MU.

- 1.2. El formato necesario para colocar la información relacionada con las SU a la cual se desea ajustar, en un archivo .xls, es el siguiente:

Celda	Latitud	Longitud	Altura	RSSI

Figura 2. *Formato del archivo con la información de la SU*

Donde al igual que el archivo anterior, se debe colocar en la primera columna el nombre de la MU a la que corresponde las SU. En las columnas 2 y 3 las coordenadas de las SU (latitud y longitud expresados en grados sexagesimal en el sistema WGS84, respectivamente). La cuarta columna corresponde a la altura sobre el nivel del suelo a la cual está ubicada la antena receptora. Finalmente, en la columna 5, se coloca el nivel de señal recibida RSSI.

1.3. El archivo .xls relacionado con el patrón de radiación de la antena, se creará con el siguiente formato:

Atenuacion antena	
Horizontal	
Grados	Att

Figura 3. *Formato del archivo patrón de radiación*

En la primera columna se coloca los grados sexagesimales (de 0° a 360°) y en la segunda columna la atenuación de la antena para el ángulo correspondiente (utilizando el diagrama de radiación horizontal).

- 1.4. Crear archivos en formato .grd, donde está contenida la información topográfica de la(s) ciudad(es) en el cual están ubicadas las MU y SU, con la finalidad de buscar la altura sobre el nivel del mar de cada una de las antenas transmisoras y receptoras.
2. Para acceder a la herramienta es necesario tener instalado el software MATLAB.
3. Una vez inicializado MATLAB, se procede a ejecutar la interfaz gráfica, haciendo clic en abrir, seleccionar archivo “calibrarmodelos.m”
4. Al presionar el botón ejecutar, aparece la herramienta en una ventana como la que se muestra en la figura 4. Donde en la parte superior izquierda se coloca los parámetros del enlace (potencia del transmisor, ganancia de la antena transmisora, ganancia de la antena receptora, pérdidas por conectores y cables).

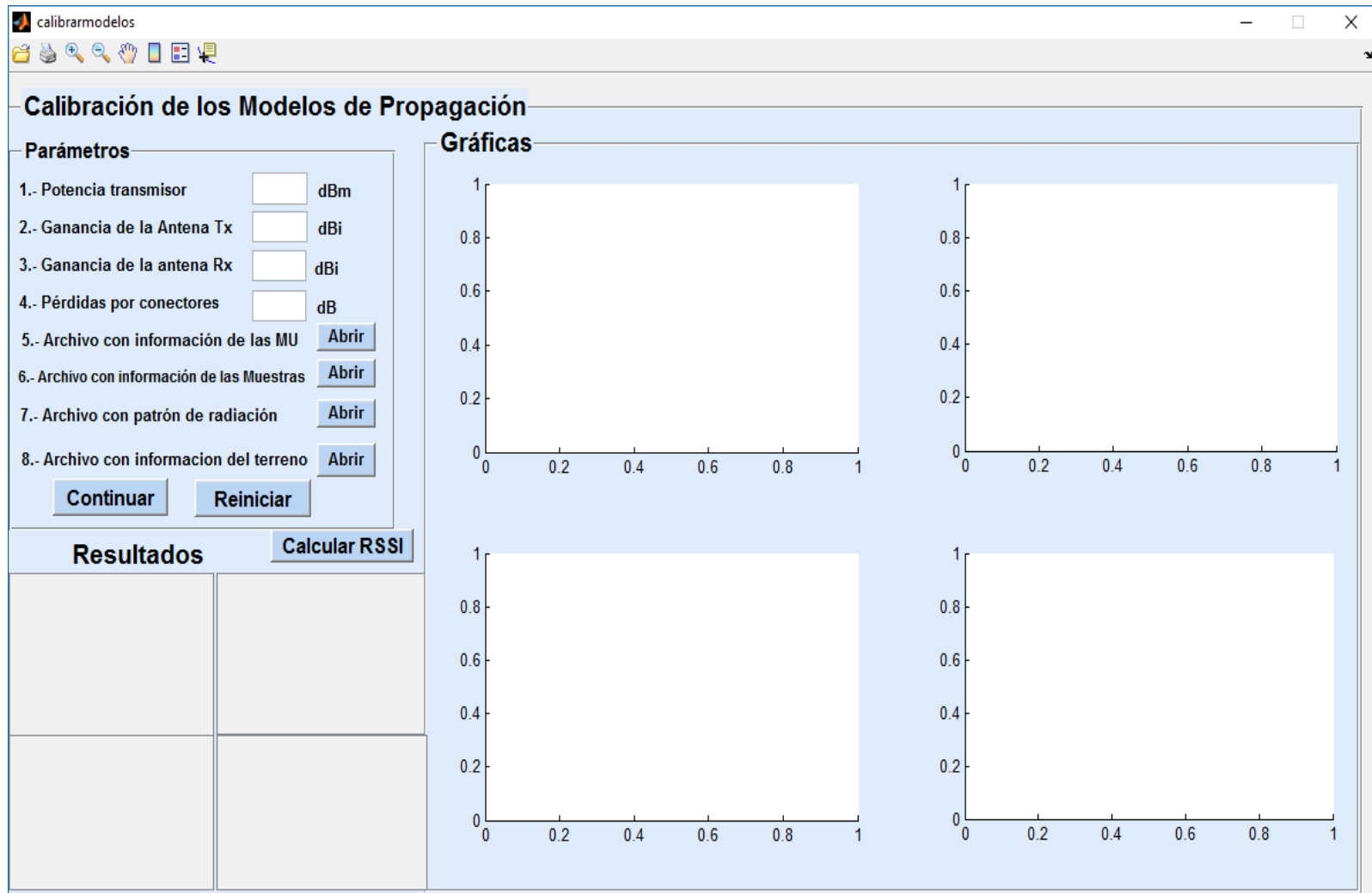


Figura 4. Interfaz gráfica para calibrar los modelos de propagación.

En la opción 5, al presionar el botón abrir y aparece la ventana mostrada en la figura 5. Donde se selecciona el archivo correspondiente a la información de las MU, con el formato explicado en la sección 1.1.

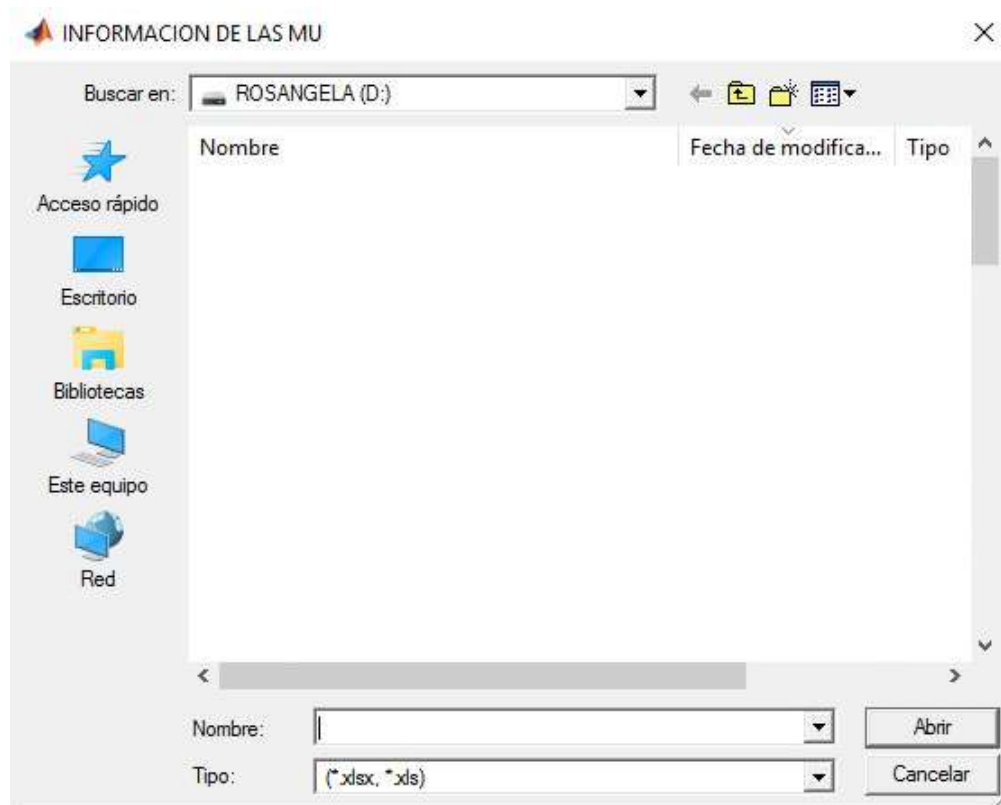


Figura 5. Información de las MU

Al seleccionar abrir en la opción 6, se ejecutará la siguiente ventana en el cual se coloca el nombre del archivo con el formato explicado en la sección 1.2.

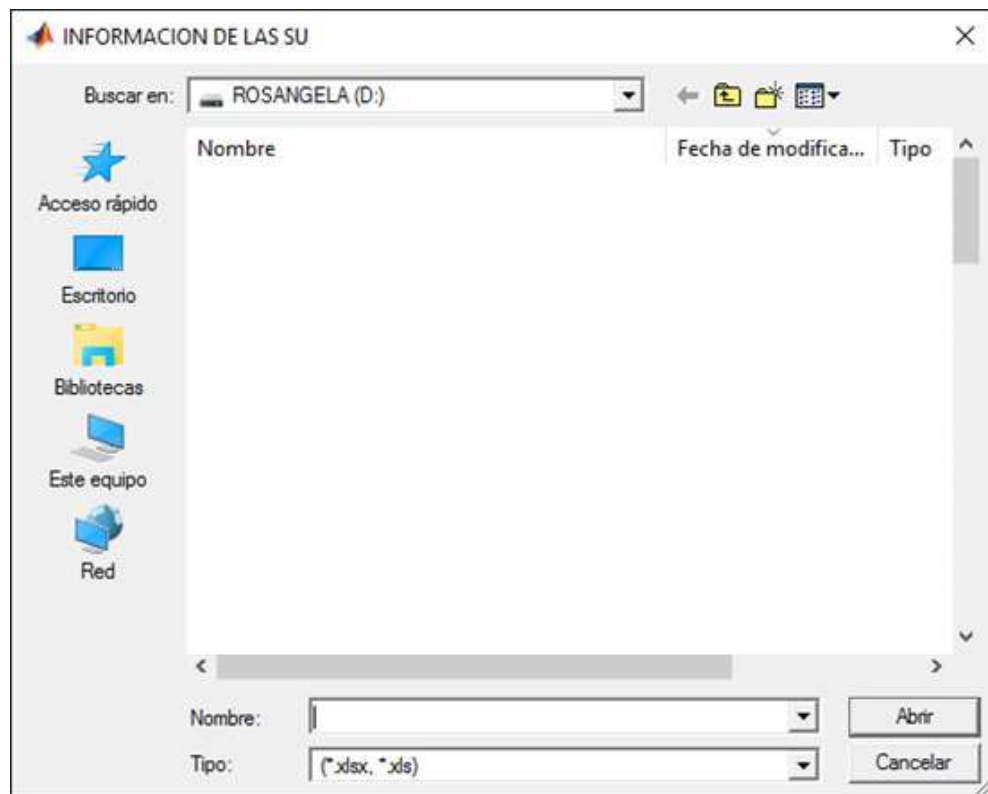


Figura 6. *Información de las SU*

Al seleccionar abrir en la opción 7, se ejecutará la siguiente ventana en el cual se coloca el nombre del archivo con el formato explicado en la sección 1.3.

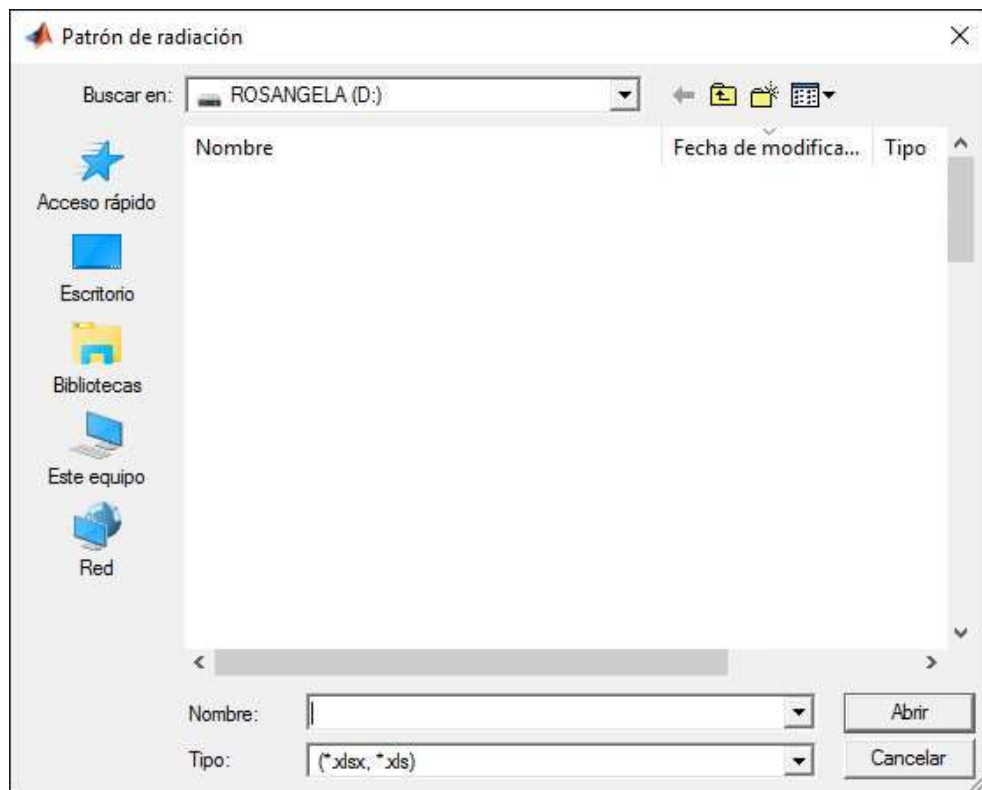


Figura 7. Información del patrón de radiación de la antena transmisora

Al seleccionar abrir en la opción 8, se ejecutará la siguiente ventana en el cual se coloca el nombre del archivo con el formato explicado en la sección 1.4, correspondiente a los archivos en formato .grd correspondientes a la información topográfica.

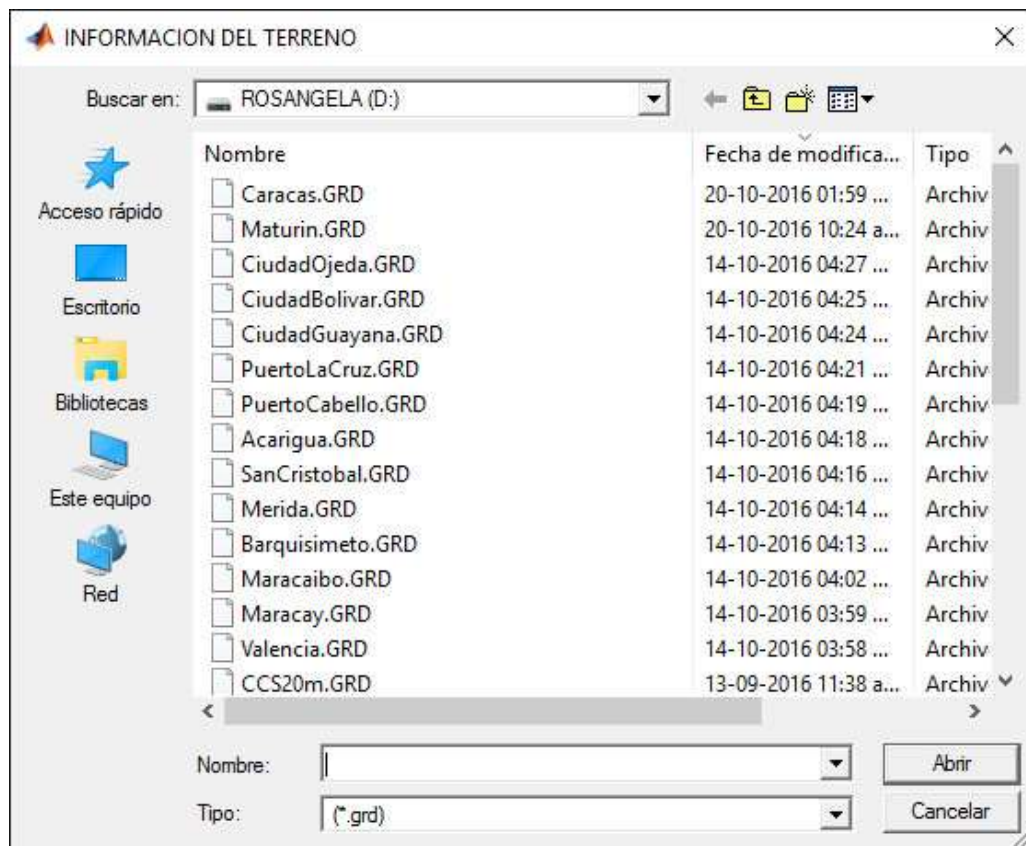


Figura 8. Información del terreno

Nota 1: En la imagen anterior, al hacer clic en abrir aparecerá el siguiente mensaje, en el cual se pregunta si desea agregar otro archivo. De ser afirmativa la respuesta aparecerá de nuevo la imagen anterior para que se seleccione otro archivo en formato .grd. De ser negativa la respuesta se oculta la ventana “INFORMACION DEL TERRENO”

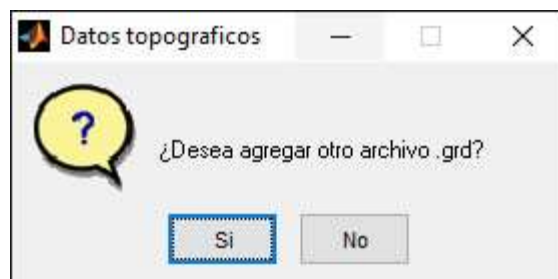


Figura 9.

Nota 2: Si en las opciones del 5 al 8 se presiona la opción cancelar o cerrar, aparecerá el siguiente mensaje:

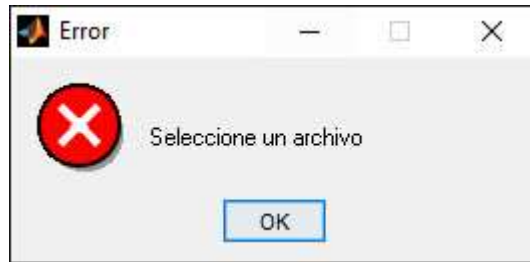


Figura 10.

Una vez introducido todos los parámetros necesarios para realizar el ajuste de los modelos de propagación se procede a presionar el botón continuar y luego, aparecerá las gráficas correspondientes a los modelos de propagación COST 231 WALFISCH-IKEGAMI, COST 231 HATA, SUI Y ECC-33; además, en la parte inferior izquierda se muestran tablas comparativas de cada modelo (error absoluto promedio, desviación estándar, error estándar de la media y el error cuadrático medio (RMSE) del modelo sin ajustar y ajustado). Finalmente, ejecuta un archivo en formato .txt en el cual se muestra las ecuaciones de los modelos de propagación ajustados.

La opción reiniciar, borra los elementos colocados en la sección Parámetros, las gráficas y las tablas, quedando nuevamente como la figura 4; además, limpia la información contenida en el archivo ecuaciones.txt.

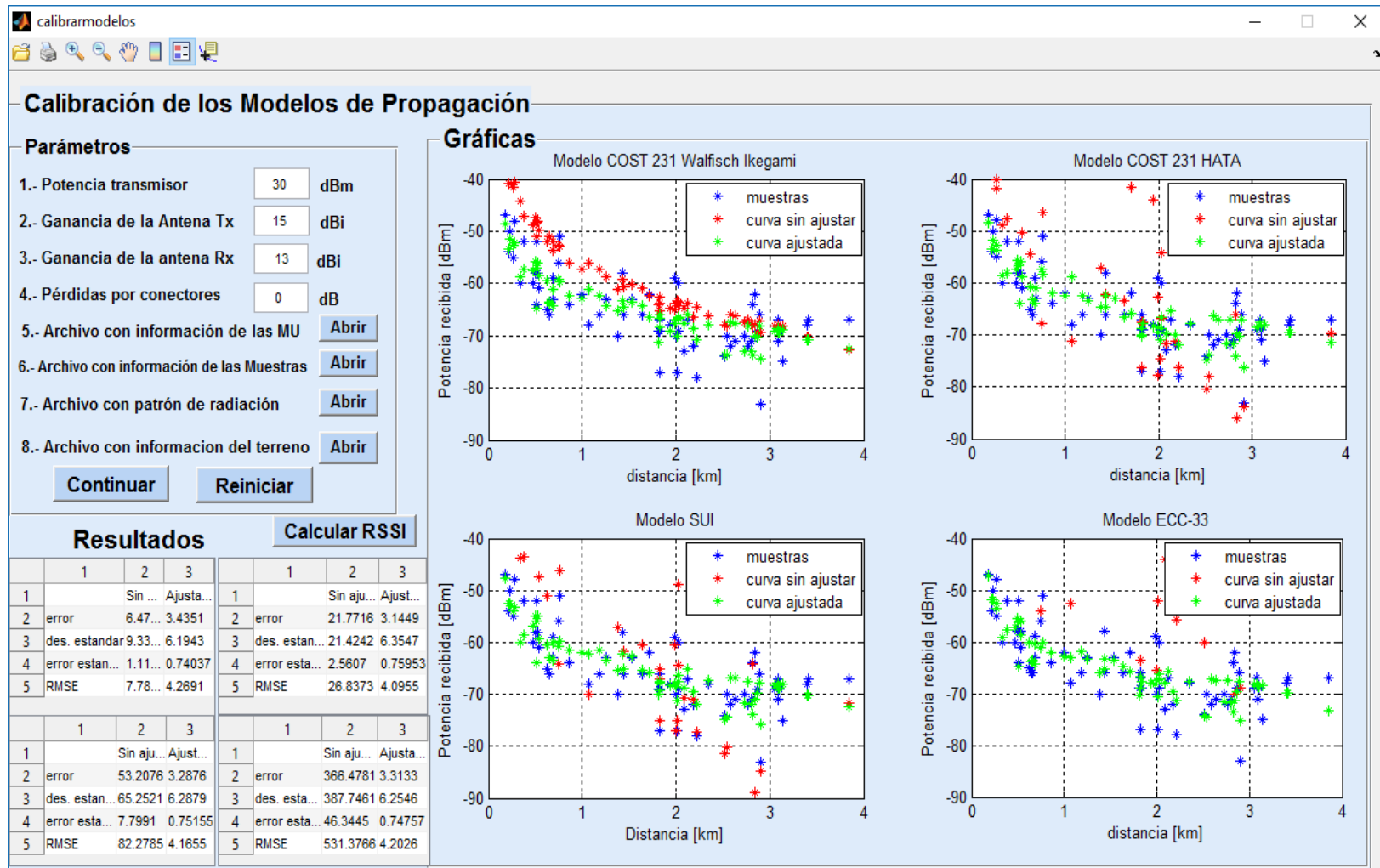


Figura 11. Resultados de la interfaz gráfica.

5. Al presionar el botón “Calcular RSSI”, se abre otra interfaz gráfica que permite predecir el nivel de señal recibida, utilizando el modelo de propagación ajustado que presente menor RMSE. En la siguiente imagen se muestra la nueva interfaz gráfica.

calcularPr

Cálculo de RSSI con modelo ajustado

Parámetros

Coordenadas del transmisor		Coordenadas del receptor	
Longitud		Longitud	
Latitud		Latitud	

Frecuencia de operación MHz
Altura transmisor m

Altura receptor m

Topografía del terreno

Potencia de transmisión dBm

Ganancia antena transmisor dBi

Ganancia antena receptor dBi

Pérdidas en los cables y acoplamiento dB

RSSI calculado es dBm

NOTA: Para separar decimales utilizar .

Figura 12. Interfaz gráfica para el cálculo de señal recibida

- 5.1. Se debe introducir los parámetros indicados en la imagen anterior (longitud y latitud a las cuales están ubicadas las antenas transmisoras y receptoras, frecuencia de operación del enlace, altura del receptor y

transmisor, potencia del transmisor, ganancia de la antena transmisora y receptora, pérdidas en los cables y pérdidas por acoplamiento).

En la opción abrir aparecerá la ventana como se muestra en la figura 8.

5.2. Al seleccionar la opción continuar se muestra el nivel de señal recibida en la parte inferior de la herramienta.

The screenshot shows a software window titled 'calcularPr'. The main heading is 'Cálculo de RSSI con modelo ajustado'. Below this is a 'Parámetros' section containing several input fields and buttons. The 'Coordenadas del transmisor' section has 'Longitud' set to -66.883775 and 'Latitud' set to 10.469047. The 'Coordenadas del receptor' section has 'Longitud' set to -66.88043889 and 'Latitud' set to 10.49627778. The 'Frecuencia de operación' is 3410 MHz and 'Altura transmisor' is 48 m. The 'Altura receptor' is 32 m. There is a 'Topografía del terreno' section with an 'Abrir' button. The 'Potencia de transmisión' is 30 dBm, 'Ganancia antena transmisor' is 15 dBi, 'Ganancia antena receptor' is 13 dBi, and 'Pérdidas en los cables y acoplamiento' is 0 dB. The 'RSSI calculado es' is displayed as -68.3261 dBm. There are 'Calcular' and 'Reiniciar' buttons. At the bottom, a note states: 'NOTA: Para separar decimales utilizar .'.

Coordenadas del transmisor		Coordenadas del receptor	
Longitud	-66.883775	Longitud	-66.88043889
Latitud	10.469047	Latitud	10.49627778

Frecuencia de operación		Altura receptor	
3410	MHz	32	m

Altura transmisor	
48	m

Topografía del terreno

Potencia de transmisión	
30	dBm

Ganancia antena transmisor	
15	dBi

Ganancia antena receptor	
13	dBi

Pérdidas en los cables y acoplamiento	
0	dB

RSSI calculado es dBm

NOTA: Para separar decimales utilizar .

Figura 13. Ejemplo de la interfaz gráfica.

Al presionar la opción reiniciar la ventana de la interfaz gráfica aparecerá como la figura 12, es decir, se borrarán todos los parámetros introducidos por el usuario.

Anexo 5. Formato Esri grid

Los archivos con este tipo de formato contienen información topográfica del terreno, en este trabajo de grado se utilizó una resolución de 20 m, en la figura 2 se muestra que el espaciamiento horizontal y vertical corresponde al tipo de resolución que se escoja en el programa. Al extraer la información de este archivo (leyéndolo por ejemplo en un formato texto) se obtiene el número de filas y columnas, las coordenadas del origen tal como se muestra en la figura 1, el tamaño de cada cuadro, el número de filas y columnas que contiene el archivo y la matriz con las alturas en cada punto medio de cada cuadro.

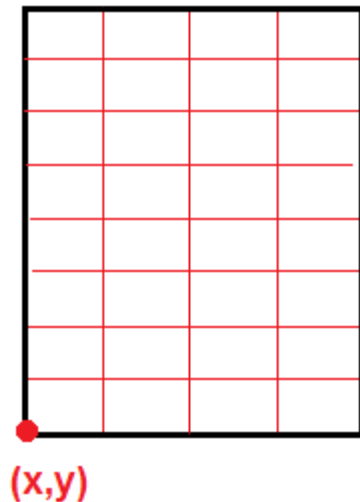


Figura 1 . Coordenadas de referencia

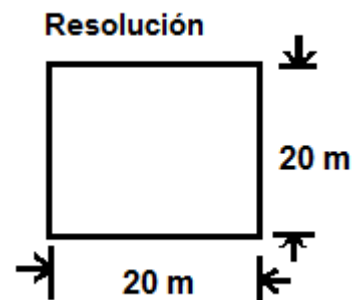


Figura 2. Resolución

Este formato se utiliza para obtener la altura sobre el nivel del mar de cualquier coordenada geografica almacenada en el archivo.

Anexo 6. Cálculos para obtener la ganancia efectiva de la antena transmisora

Búsqueda del ángulo de orientación para calcular la ganancia efectiva de la antena transmisora según el patrón de radiación

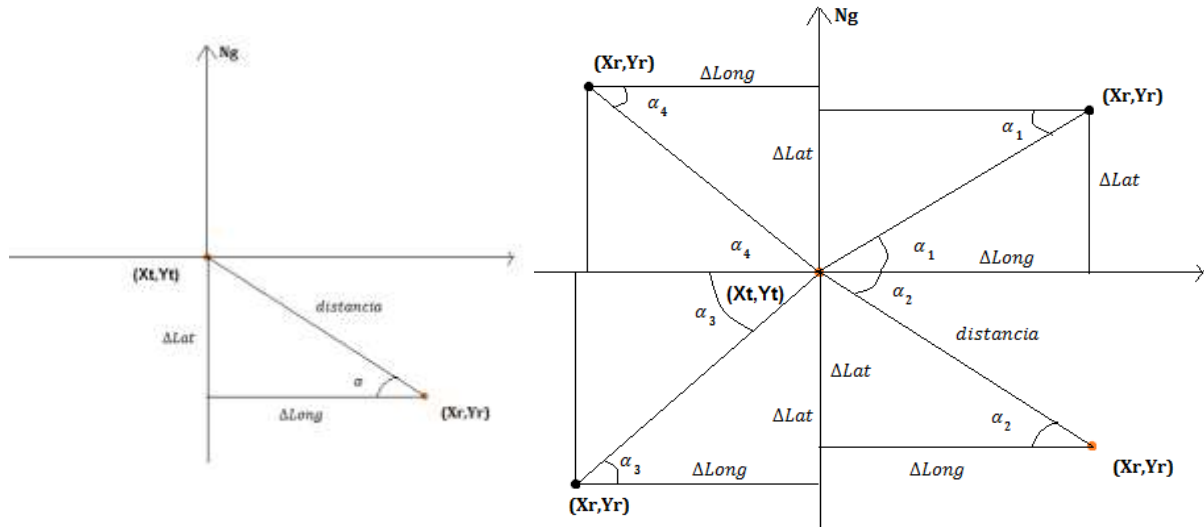


Figura 1

Para determinar el ángulo que forma el haz principal de la antena y el receptor, se calculó las diferencias de latitud y longitud entre la antena transmisora y receptora y se aplicó trigonometría para obtener este ángulo; que luego, se referenció al Norte geográfico y conociendo el acimut de la antena trasmisora se determinó la ganancia efectiva de la antena.

Anexo 7. Especificaciones de la antena transmisora.



3 GHZ MIMO Base Station Antennas

Specifications

Antenna P/N	SDP-3X-150D-090
Frequency Range	3300~3800 MHz
Antenna Type	Flat panel, sectorial
Gain	15 dBi
VSWR	<2
Horizontal Beamwidth	90°
Vertical Beamwidth	8°
F/B Ratio	>25 dB
Isolation	>30 dB
Polarization	Vertical & Horizontal
Impedance	50 Ω
Maximum Input Power	100 W
Connector	N Female/N Female

Mechanical Specifications

Antenna Dimension	430x165x35 mm
Weight	2 Kg
Mounting Diameter	ø30~50 mm
Rated Wind Velocity	241 Km/h





Teradion Industrial Park, Misgav 20179, Israel
 Tel: +972-4-902-7000 Fax: +972-4-999-0324
 Email: info@wavcip.com www.wavcip.com

Wavcip reserves the right to make technical changes or modifications to any of its products and specifications without prior notice and without implementing such changes to prior supplied products. Product images are representative and indicative only. Warranty terms and general conditions of sale are applicable on any purchase of any product and are available in the Quotation.

Anexo 8. Patrones de radiación

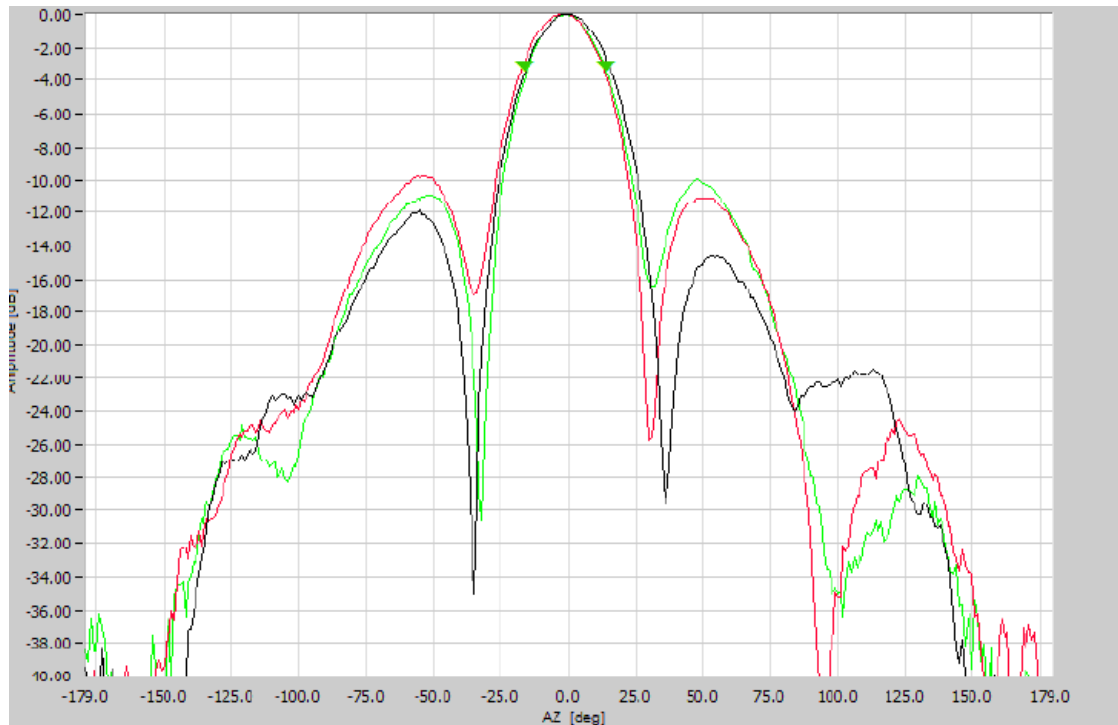


Figura 1. Polarización horizontal de la antena receptora de ganancia 13 dBi.

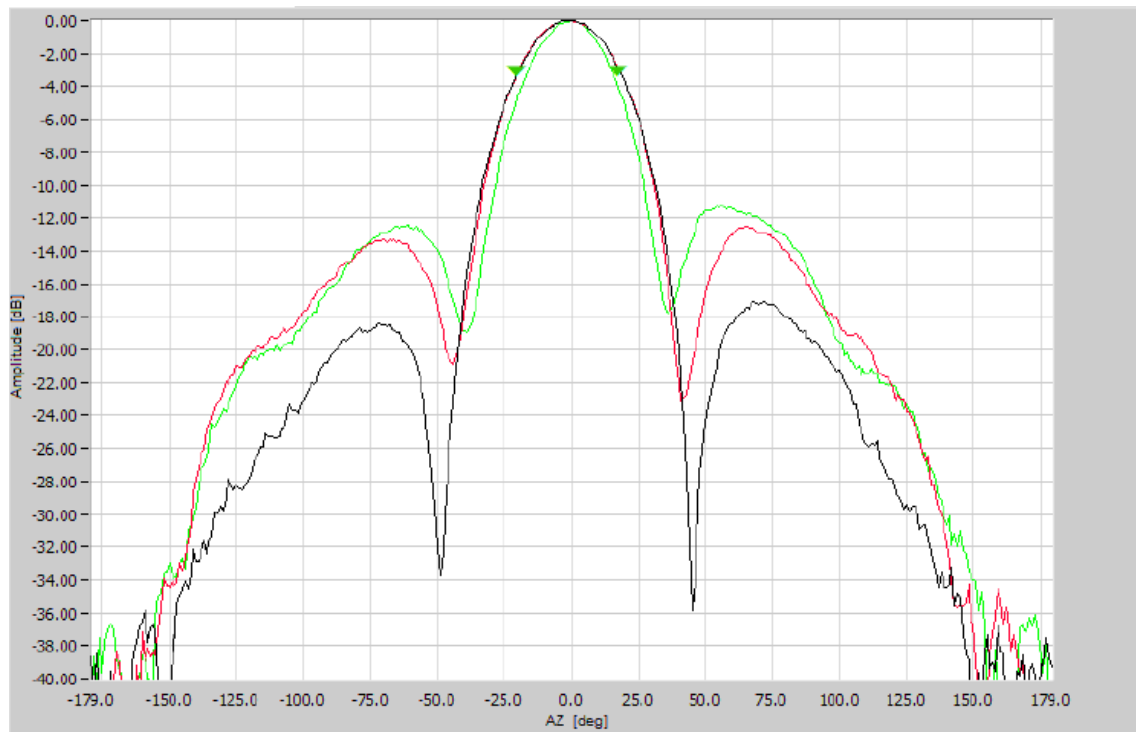


Figura 2. Polarización vertical de la antena receptora de ganancia 13 dBi.

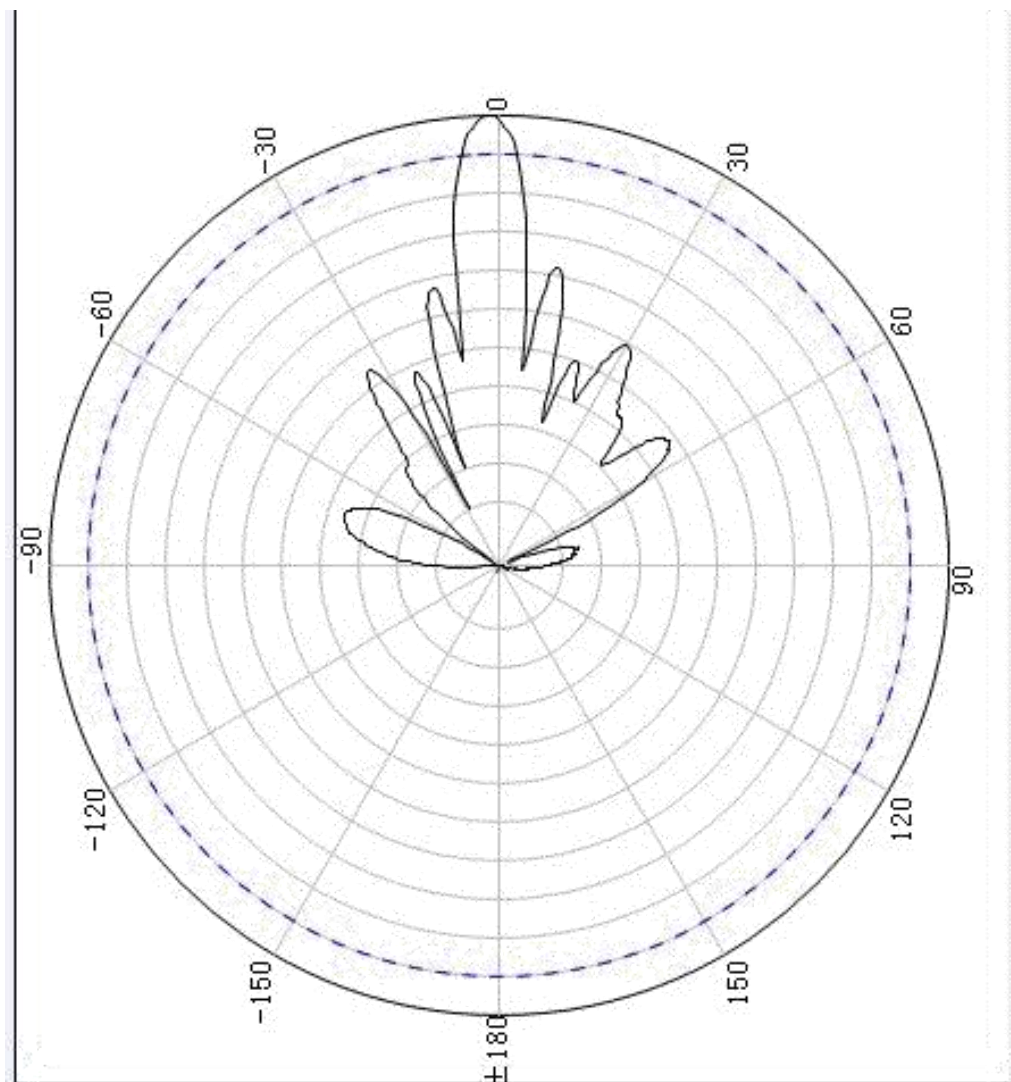


Figura 5. Patrón de radiación vertical antena transmisora de apertura 90° y ganancia 15 dBi.

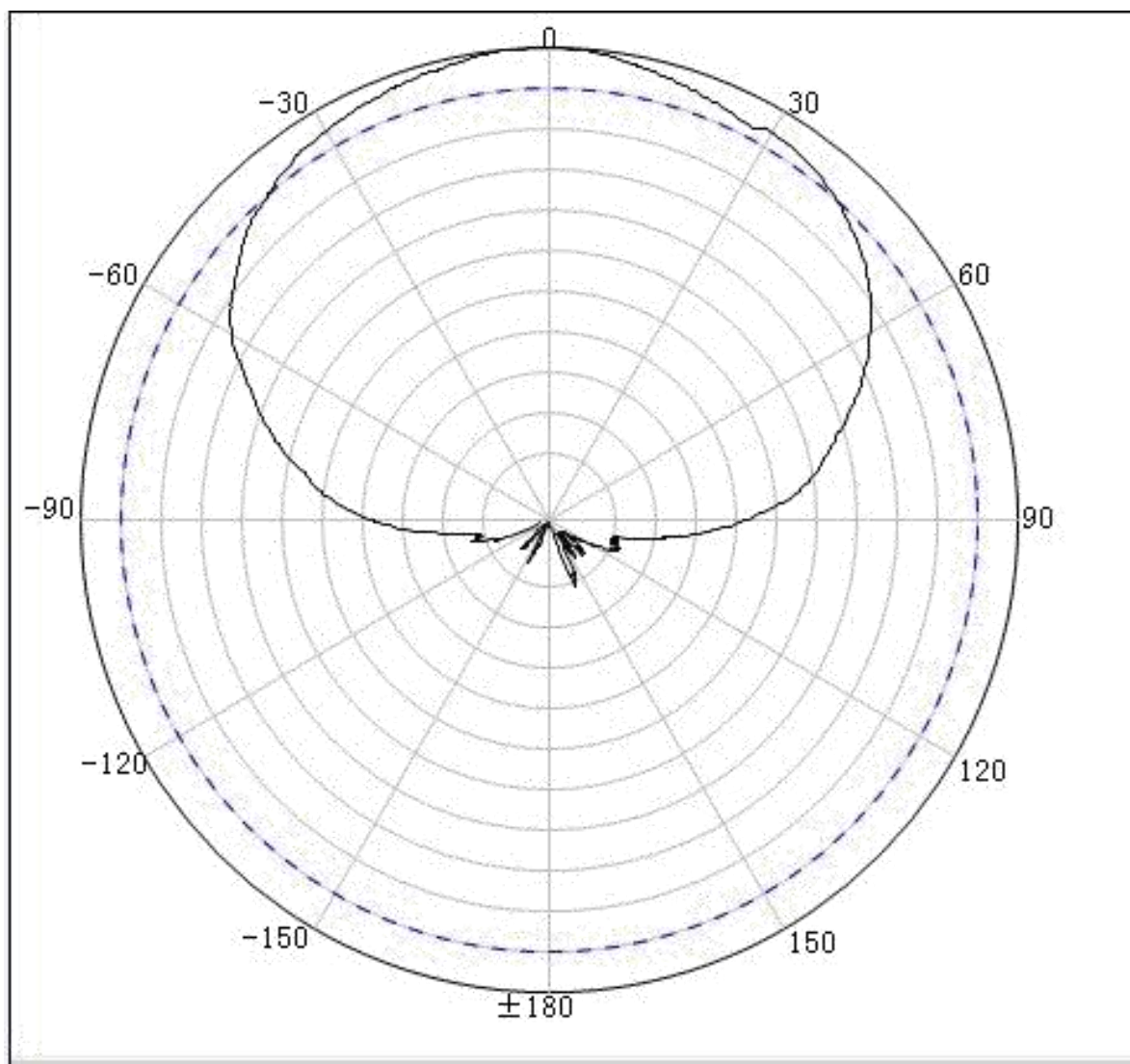


Figura 6. Patrón de radiación horizontal antena transmisora de apertura 90° y ganancia 15 dBi.