



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
TELECOMUNICACIONES Y REDES

DISEÑO DE UN MODELO ESTADÍSTICO DE PROPAGACIÓN
PARA LA BANDA DE RADIODIFUSIÓN FM APLICABLE EN LA
CIUDAD DE RIOBAMBA

Trabajo de titulación para optar al grado académico de:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y
REDES

AUTORES: GABRIELA NOEMÍ MARTÍNEZ JARA
MAURO DARIO CALUÑA TISALEMA
TUTOR: ING. WILLIAM CALVOPÍÑA HINOJOSA

RIOBAMBA – ECUADOR

2016

©2016, Gabriela Noemí Martínez Jara, Mauro Darío Caluña Tisalema

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES

El Tribunal de Titulación certifica que: El trabajo: **DISEÑO DE UN MODELO ESTADÍSTICO DE PROPAGACIÓN PARA LA BANDA DE RADIODIFUSIÓN FM APLICABLE EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA**, de responsabilidad de la señorita Gabriela Noemí Martínez Jara y del señor Mauro Darío Caluña Tisalema, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dr. Miguel Tasambay DECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Ing. Franklin Moreno DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES
Ing. William Calvopiña DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN
Ing. Alex Troya MIEMBRO DEL TRIBUNAL

NOTA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN:

Nosotros, Gabriela Noemí Martínez Jara, y, Mauro Darío Caluña Tisalema, declaramos ser los autores del presente trabajo de Titulación **“DISEÑO DE UN MODELO ESTADÍSTICO DE PROPAGACIÓN PARA LA BANDA DE RADIODIFUSIÓN FM APLICABLE EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”** previo a la obtención del título de INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES, haciéndonos responsables por las ideas, criterios, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo, y declarando que el patrimonio intelectual de la misma pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Gabriela Noemí Martínez Jara
C.C. N° 060405646-5

Mauro Darío Caluña Tisalema
C.C. N° 180462455-7

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis padres Washington y Noemí, por todo su apoyo y cariño incondicional, y a mi mejor amiga, mi hermana Carolina, quien ha sido mi alegría y mi motivación.

“Somos hojas de una rama, las gotas de un solo mar, las flores del mismo jardín”. Lacordaire.

Gabriela

El trabajo presente se lo dedico a mis padres, Fausto y Mirian, quienes me han brindado su apoyo constante e incondicional en el transcurso de mi preparación estudiantil y de la vida, me han brindado palabras de aliento en los momentos más difíciles y han sabido guiarme en las grandes decisiones éticas que se me han presentado.

A mis hermanos Alex, Angie, Steven y de manera muy especial a Lenin quien tuvo que irse antes de tiempo, a todos ellos por brindarme alegría y apoyo en el hogar.

A mi novia Gennesis quien me ha brindado su amor y fuerza para continuar con el trabajo y me ha inspirado en la solución de los problemas.

Mauro

AGRADECIMIENTO

A Dios por regalarme salud y vida, y por haberme permitido conocer maravillosas personas en el transcurso de mi vida, con quienes he compartido tantos consejos, alegrías, tristezas y aventuras.

A Alex Samaniego y Blanqui Martínez, mis queridos tíos, porque siempre aprendo algo nuevo gracias a ustedes, los extraño.

A Dennis Basantes, por apoyarme y acompañarme siempre, dándome la alegría y la fuerza necesarias en cada momento.

A Mauro Caluña, por ser un maravilloso amigo, las palabras no alcanzarían, simplemente, gracias por todo colega.

De manera especial al Ingeniero William Calvopiña, tutor de nuestro Trabajo de Titulación, quien siempre ha estado dispuesto a compartir sus conocimientos y experiencias, siendo un gran ejemplo como profesional y como persona.

Amigos gracias por haberme contagiado de ilusiones más grandes y enriquecedoras cada día.

Gabriela

Una vez finalizado el Trabajo de Titulación es indispensable expresar mi agradecimiento a las personas que directa e indirectamente lo encausaron en el rumbo adecuado.

Al Ingeniero William Calvopiña por aceptar, de manera entusiasta, la tutoría del presente trabajo, prestarnos toda su ayuda en la comprensión de los temas necesarios, y cuidar siempre del adecuado desarrollo del mismo. De igual manera quiero agradecerle por su amable predisposición al ayudarnos a conseguir los medios necesarios para desarrollar este trabajo.

A Adrián Sigüenza, mi gran amigo, quien me ha acompañado durante todo el proceso educativo, mostrándome que un arduo trabajo puede conjugarse con grandes experiencias y anécdotas irrepetibles.

De manera muy especial a Gaby Martínez, mi compañera en el desarrollo de este trabajo, sin su constancia, este trabajo no hubiera sido posible. He de destacar, por encima de todo, su gran paciencia y dedicación que hizo de cada una de nuestras reuniones de trabajo, una experiencia grata y enriquecedora. Gracias Gaby espero conservar por siempre tu preciosa amistad.

Mauro

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AM	Amplitud Modulada
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, antes SUPERTEL
DDF	Digital Direction Finder - Buscador Digital de Direcciones
EM	Estación Móvil
ERT	Estación Remota Transportable
EURO-COST	Cooperativa Europea para Investigación Científica y Técnica
ERPE	Escuelas Radiofónicas Populares del Ecuador
FM	Frecuencia Modulada
GHz	Giga Hertzio
GMC-FM-R	Modelo Estadístico de Propagación Gabriela Martínez y Mauro Caluña para la banda de radiodifusión FM en Riobamba
GPS	Global Positioning System – Sistema de Posicionamiento Global
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
kHz	Kilo Hertzio
LOS	Line of sight – Línea de vista
MAN	Metropolitan Area Network - Red de Área Metropolitana
MHz	Mega Hertzio
NLOS	Non line of sight – Sin línea de vista
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal
RDS	Radio Data System – Sistema de Radiodifusión de Datos

RX	Receptor
R&S ARGUS	Software de monitoreo del Espectro Radioeléctrico Rohde&Schwarz ARGUS
SACER	Sistema Automático de Control del Espectro Radioeléctrico
SUPERTEL	Superintendencia de Telecomunicaciones
TX	Transmisor
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	Recomendación de la UIT
UPS	Uninterruptible Power Supply – Sistema de Alimentación Ininterrumpida
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access – Red Mundial de Interoperabilidad para el Acceso a Microondas

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
RESUMEN.....	XVII
SUMMARY	XVIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
1. MARCO TEÓRICO	6
1.1 PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	6
1.1.1 Antenas	6
1.1.1.1 Campo cercano y lejano de una antena.....	7
1.1.1.2 Ganancia	8
1.1.1.3 Patrón de Radiación.....	8
1.1.1.4 Polarización	9
1.1.2 Mecanismos básicos de Propagación.....	9
1.1.2.1 Atenuación.....	10
1.1.2.2 Refracción.....	11
1.1.2.3 Reflexión	12
1.1.2.4 Difracción	13
1.1.2.5 Dispersión.....	13
1.1.3 Modelos de Propagación.....	13
1.1.3.1 Modelo de Friis.....	14
1.1.3.2 Modelo de Propagación de 2 rayos.....	15
1.1.3.3 Modelo de Propagación de Okumura	16
1.1.3.4 Modelo de Propagación Okumura-Hata	18
1.1.3.5 Modelo Cost 231	20
1.1.3.6 Modelo Walfisch Bertoni	20
1.1.3.7 Modelo de Ericsson	22
1.1.3.8 Modelo de Walfisch-Ikegami	22
1.2 RADIODIFUSIÓN FM	24
1.2.1 Transmisión y recepción FM	25
1.2.1.1 Transmisor	25

1.2.1.2	Línea de transmisión.....	25
1.2.1.3	Sistema Radiante	25
1.2.2	Ventajas y Limitaciones en la radiodifusión.....	26
1.2.3	Banda de Radiodifusión FM.....	26
1.2.4	Fundamentos de funcionamiento	29
1.2.5	Análisis Regulatorio	31
1.2.5.1	Ley Orgánica de Telecomunicaciones.....	31
1.2.5.2	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones.....	32
1.2.5.3	Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Análoga.....	32
1.3	SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO “SACER” ..	33
1.3.1	R&S ARGUS.....	34
1.3.2	Estaciones del SACER	34
1.3.3	Antenas del SACER	36
1.3.4	Mediciones en el SACER.....	36
1.3.4.1	Tipos de mediciones	36
1.3.4.2	Gestión de resultados de mediciones	41
1.3.5	EM del SACER	44
1.3.5.1	Proceso de encendido del sistema.....	44
 CAPITULO II		
2.	MARCO METODOLÓGICO	47
2.1	MEDICIONES	47
2.1.1	Evaluación del entorno de medición.....	47
2.1.1.1	Visita al Cerro Hignug Cacha y Análisis de los sistemas de Radiación.....	47
2.1.1.2	Evaluación de la EM del SACER.....	52
2.1.1.3	Entorno de la ciudad de Riobamba.....	53
2.1.2	Selección de estaciones radiodifusoras para las mediciones	54
2.1.3	Configuración de la EM del SACER.....	56
2.1.4	Método de Medición.....	64
2.1.5	Resultados de medición	66
2.1.5.1	Procesamiento de los datos.....	70
2.1.5.2	Depuración de datos	71
2.1.5.3	Análisis estadístico de los resultados de medición.	73
2.2	ANÁLISIS TEÓRICO DE LA PROPAGACIÓN	75

2.2.1	Cálculo teórico con los puntos de medición	75
2.2.1.1	Cálculo de distancias Transmisor-Receptor	75
2.2.1.2	Potencia radiada.....	80
2.2.1.3	Modelo Okumura.....	83
2.2.1.4	Modelo Okumura-Hata.....	85
2.2.1.5	Modelo Walfisch Bertoni	86
2.2.1.6	Modelo de Ericsson	87
2.2.1.7	Modelo de Walfisch-Ikegami	88
2.2.2	Comparación de modelos con datos obtenidos con el sistema SACER y selección de modelos con mejor aproximación.....	90
2.2.2.1	Comparación gráfica.....	91
2.2.2.2	Comparación numérica.....	93
 CAPÍTULO III		
3.	MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS....	96
3.1	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL MODELO	96
3.1.1	Parámetros analizados en cada modelo	96
3.1.1.1	Modelo Okumura.....	96
3.1.1.2	Modelo Ericsson.....	97
3.1.2	Formulación del modelo de propagación	97
3.1.2.1	Análisis preliminar	98
3.1.2.2	Ajuste del modelo.....	105
3.1.2.3	Bondad del modelo.....	109
3.2	VALIDACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN	112
3.2.1	Análisis gráfico.....	112
3.2.2	Análisis numérico	114
3.2.3	Comparación con Software Radio Mobile	115
3.2.4	Desarrollo de una aplicación en C# para aplicación y comparación del modelo.	117
CONCLUSIONES		121
RECOMENDACIONES		122
GLOSARIO		
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.-	Coeficientes de expresión de pérdidas. Modelo Ericsson	22
Tabla 2-1.-	Ventajas y Limitaciones de radiodifusión en AM	26
Tabla 3-1.-	Ventajas y Limitaciones de radiodifusión en FM.....	26
Tabla 4-1.-	Canalización FM de 88 a 108 MHz.....	27
Tabla 5-1.-	Grupos de Frecuencias FM para distribución y asignación.....	28
Tabla 6-1.-	Distribución y asignación de Frecuencias FM en la Provincia de Chimborazo ...	29
Tabla 7-1.-	Resumen de parámetros técnicos para radiodifusión FM.....	30
Tabla 8-1.-	Intensidad de campo mínima.....	30
Tabla 9-1.-	Relación C/I.....	31
Tabla 10-1.-	Relación Potencia de salida - Ganancia de la antena.....	31
Tabla 11-1.-	Antenas del SACER	36
Tabla 12-1.-	Parámetros para medición de AB	38
Tabla 13-1.-	Parámetros para monitoreo de escucha	38
Tabla 1-2.-	Planificación de horarios de Inspección	48
Tabla 2-2.-	Resultados de inspección a estaciones de Radiodifusión del Cerro Cacha	50
Tabla 3-2.-	Tabla de especificaciones de la antena HE500 – EM del SACER.....	52
Tabla 4-2.-	Tabla de especificaciones de cable y conectores – EM del SACER	52
Tabla 5-2.-	Radiodifusoras con estación principal en el Cerro Hignug Cacha	55
Tabla 6-2.-	Radiodifusoras seleccionadas para la recolección de datos.....	56
Tabla 7-2.-	Muestra parcial de los resultados de medición obtenidos	67
Tabla 8-2.-	Datos de interés disponibles luego de la depuración de datos.....	73
Tabla 9-2.-	Muestra de los datos de la estación 89,3 después de la depuración	73
Tabla 10-2.-	Resumen estadístico de los resultados por estación radiodifusora FM	74
Tabla 11-2.-	Equivalencia en distancia de las unidades sexagesimales de las coordenadas geográficas (Latitud)	76
Tabla 12-2.-	Aproximaciones de equivalencias de grados sexagesimales en distancia, longitud dependiendo de la latitud. Hasta los 45°	76
Tabla 13-2.-	Muestra de los resultados de cálculo de distancia en 2D. Frecuencia 97,7MHz...78	
Tabla 14-2.-	Muestra del cálculo de los diez primeros valores de las distancias 3D para la frecuencia 89,3 MHz.....	80
Tabla 15-2.-	Pérdidas de cables y conectores en los sistemas radiantes	81
Tabla 16-2.-	Ganancias de los arreglos de antenas	81

Tabla 17-2.-	Cálculo de potencias radiadas en las estaciones a analizarse	82
Tabla 18-2.-	Cálculo de la pérdida de potencia para la frecuencia 89,3MHz	83
Tabla 19-2.-	Datos para el cálculo de Okumura.....	84
Tabla 20-2.-	Muestra del cálculo con el modelo Okumura. Frecuencia 89,3MHz	85
Tabla 21-2.-	Muestra del cálculo con el modelo Okumura Hata. Frecuencia 89,3MHz.....	86
Tabla 22-2.-	Datos para el cálculo de Walfisch-Bertoni. Frecuencia 89,3MHz	87
Tabla 23-2.-	Muestra del cálculo con el modelo Walfisch Bertoni. Frecuencia 89,3MHz. ...	87
Tabla 24-2.-	Datos para el cálculo del Modelo Ericsson.	88
Tabla 25-2.-	Muestra del cálculo con el modelo Ericson. Frecuencia 89,3MHz	88
Tabla 26-2.-	Datos para el cálculo con el Modelo Walfisch-Ikegami.....	90
Tabla 27-2.-	Muestra del cálculo con el modelo Walfisch-Ikegami. Frecuencia 89,3MHz...	90
Tabla 28-2.-	Resultado de comparación numérica entre modelos	94
Tabla 1-3.-	Obtención de variables explicativas. Frecuencia 89,3MHz.....	99
Tabla 2-3.-	Matriz de correlaciones entre las variables. 89,3MHz	103
Tabla 3-3.-	VARIABLES UTILIZADAS EN EL MODELO.....	104
Tabla 4-3.-	Resumen del ajuste de modelos.....	106
Tabla 5-3.-	Intervalos de confianza al 97,5% de las variables	107
Tabla 6-3.-	Contraste de hipótesis con coeficientes	108
Tabla 7-3.-	Resultados de la comparación entre modelos.....	114
Tabla 8-3.-	Comparación Resultados con Radio Mobile	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.-	Diagrama de bloques de un sistema típico de comunicación inalámbrica.....	6
Figura 2-1.-	Diferenciación de campos cercano y lejano de una antena.....	7
Figura 3-1.-	Patrón de radiación direccional.....	8
Figura 4-1.-	Patrón de radiación omnidireccional.....	9
Figura 5-1.-	Propagación de una señal.....	10
Figura 6-1.-	Representación de la atenuación de una onda causada por un medio.....	11
Figura 7-1.-	Refracción en una frontera plana entre dos medios.....	11
Figura 8-1.-	Reflexión y refracción de una señal.....	12
Figura 9-1.-	Propagación de una onda con presencia de reflexión.....	12
Figura 10-1.-	Difracción de una señal.....	13
Figura 11-1.-	Modelo de dos rayos.....	15
Figura 12-1.-	Set de curvas de Atenuación media del modelo Okumura.....	17
Figura 13-1.-	Curvas de ganancia por Área.....	18
Figura 14-1.-	Representación del modelo Walfisch y Bertoni.....	21
Figura 15-1.-	Radiodifusión en Ecuador.....	24
Figura 16-1.-	Diagrama de bloques de Transmisión FM.....	25
Figura 17-1.-	Diagrama de bloques de Recepción FM.....	25
Figura 18-1.-	Estaciones SACER de la Intendencia Regional Centro.....	35
Figura 19-1.-	Mediciones directas del SACER.....	37
Figura 20-1.-	Selección de antenas del SACER para medición directa.....	37
Figura 21-1.-	Medición Automática o Programada.....	37
Figura 22-1.-	Medición de Ancho de Banda.....	38
Figura 23-1.-	Monitoreo de escucha.....	39
Figura 24-1.-	Monitoreo de lista de frecuencias.....	39
Figura 25-1.-	Monitoreo con detección de RDS: positiva (izquierda), negativa (derecha).....	40
Figura 26-1.-	Selección de Antenas del SACER para medición de TV.....	40
Figura 27-1.-	Monitoreo de TC Televisión.....	41
Figura 28-1.-	Archivo de audio.....	41
Figura 29-1.-	Archivo de medición.....	42
Figura 30-1.-	Tipo de gráfica en el SACER.....	42
Figura 31-1.-	Procesamiento de archivos de medición.....	43
Figura 32-1.-	Ventana de exportación de archivos.....	44
Figura 33-1.-	Sistema de alimentación e inversor de onda senoidal de la EM.....	45

Figura 34-1.- Sistema de protección de potencia DIAF, apagado (arriba) y en funcionamiento (abajo)	45
Figura 35-1.- DDF255 en estado de espera luego de ser encendido	46
Figura 1-2.- Representación del Sistema de comunicación	47
Figura 2-2.- Equipo Amplificador: imagen frontal (izquierda) y acercamiento (derecha)	49
Figura 3-2.- Conectores (izquierda) y cable coaxial (derecha)	49
Figura 4-2.- Arreglo de antenas de radiodifusión FM.....	49
Figura 5-2.- Ubicación de la Ciudad de Riobamba en el Ecuador.....	54
Figura 6-2.- Mapa del Relieve de la ciudad de Riobamba	54
Figura 7-2.- Diagrama de interconexión de equipos para mediciones.....	57
Figura 8-2.- Sistema receptor de GPS Rohde & Schwarz	58
Figura 9-2.- Pantalla de inicio R&S ARGUS	58
Figura 10-2.- Ventana inicio de sesión R&S ARGUS.....	59
Figura 11-2.- Selección de modo medición de Cobertura.....	59
Figura 12-2.- Ventana emergente. Modo medición de cobertura	60
Figura 13-2.- Lista de frecuencias a monitorear	60
Figura 14-2.- Selección del Estándar de Transmisión que se va a recibir en las mediciones ...	61
Figura 15-2.- Selección de sistema de recepción de señales.....	61
Figura 16-2.- Selección de parámetros a medirse	61
Figura 17-2.- Botón de guardado R&S ARGUS.....	62
Figura 18-2.- Opciones de guardado. R&S ARGUS	62
Figura 19-2.- Mediciones iniciadas, en la EM	63
Figura 20-2.- Gráfica en tiempo real Frecuencia (Hz)/Nivel (dBUV/m).....	63
Figura 21-2.- Gráfica en tiempo real Frecuencia (Hz) / C/I (dB)	64
Figura 22-2.- Perímetro elegido para mediciones en la ciudad de Riobamba.....	65
Figura 23-2.- Inicio del recorrido por las avenidas perimetrales de la ciudad de Riobamba. Datos de estación 89,3MHz	66
Figura 24-2.- Gráfica de Nivel de intensidad de campo eléctrico estación 89,3. Final de mediciones.....	66
Figura 25-2.- Ventana del Navegador de R&S ARGUS en la EM.....	69
Figura 26-2.- Ventana Crear archivos de respaldo.....	69
Figura 27-2.- Proceso de carga de datos en el sistema scd-w01 del SACER	70
Figura 28-2.- Botón de acceso a herramienta de procesamiento de datos. Software R&S ARGUS	70
Figura 29-2.- Ventana Procesar Archivos de Resultado de medición.....	71

Figura 30-2.- Selección de estaciones de interés según la Tabla 2-6.....	72
Figura 31-2.- Eliminación de datos duplicados con relación al punto de medición (Latitud y Longitud).....	72
Figura 32-2.- Diagrama de Dispersión. Distancia vs. Intensidad de campo recibido. 89,3 MHz.....	74
Figura 33-2.- Diagrama de Dispersión en 3D. Intensidad de campo recibido	75
Figura 34-2.- Representación de la distancia 2D de un punto muestral de la ciudad	77
Figura 35-2.- Representación del cálculo de la distancia 2D.....	78
Figura 36-2.- Representación de distancias, arriba sobre el mapa, y abajo diagrama plano.....	79
Figura 37-2.- Diagrama de conexión de elementos en estación de radiodifusión FM.....	82
Figura 38-2.- Gráfica. Distancia vs. Pérdida 89,3MHz.....	91
Figura 39-2.- Familia de curvas para los rangos de interés. Modelos Okumura (Izquierda) y Ericsson (derecha).....	92
Figura 40-2.- Familia de curvas para los rangos de interés con valores reales medidos.....	93
Figura 1-3.- Utilidad Matriz de diagramas de dispersión. Software R.	100
Figura 2-3.- Matriz de diagramas de dispersión. 89,3MHz	100
Figura 3-3.- Diagramas de Dispersión. Pérdida real vs variables consideradas. 89,3MHz ..	101
Figura 4-3.- Relación Pérdida real vs Ganancia por altura. 89,3 MHz	101
Figura 5-3.- Relación Pérdida real y Logaritmo distancia. 89,3MHz	102
Figura 6-3.- Relación pérdida real y logaritmo de la altura del transmisor. 89,3 MHz	102
Figura 7-3.- Relación pérdida real vs producto de logaritmos de altura y distancia. 89,3MHz.....	103
Figura 8-3.- Herramienta de regresión lineal. Software R.....	105
Figura 9-3.- Resumen del modelo.....	109
Figura 10-3.- Comparación de predicciones entre modelos con modelo diseñado.....	113
Figura 11-3.- Familia de curvas, predicciones Modelo diseñado	113
Figura 12-3.- Comparación Modelo diseñado con Radio Mobile.....	116
Figura 13-3.- Ejemplo Perfil de enlace entre Riobamba Stereo y un punto aleatorio en Riobamba	117
Figura 14-3.- Formulario principal, aplicación para validar el modelo	118
Figura 15-3.- Formulario Cálculo de altura efectiva del transmisor	118
Figura 16-3.- Formulario Principal con datos ingresados	119
Figura 17-3.- Formulario Balance de potencias.....	119
Figura 18-3.- Formulario Comparación con otros modelos de Propagación	120

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue diseñar un modelo estadístico de propagación para la banda FM, ajustado específicamente para la ciudad de Riobamba, que permita mayor exactitud en los cálculos de coberturas y pérdidas de potencia de los estudios de ingeniería para radiodifusión, debido a que al momento se han utilizado modelos diseñados para otros ambientes, generando un gran margen de error. Para lograr este propósito se realizó una campaña de medición de intensidad de campo eléctrico en el perímetro urbano de la ciudad, datos que luego fueron utilizados en un balance de potencias para calcular las pérdidas que presentaba cada sistema. Para mayor confiabilidad, se visitó cada una de las estaciones de transmisión FM en el cerro Cacha, en donde se obtuvieron datos de los equipos de transmisión que influyen en las ganancias o pérdidas de potencia, importantes en el cálculo general. Se obtuvieron las pérdidas por propagación, utilizando los modelos Okumura, Okumura-Hata, Ericsson, Walfisch-Bertoni y Walfisch-Ikegami y se compararon con los valores reales. Se tomaron los dos modelos de mejor aproximación para utilizar sus variables en un proceso de regresiones sucesivas que finalmente definió el modelo GMC-FM-R con la fórmula:

$$L(dB) = -170,929 + 30,194F_{ht}(dB) + 1909,284 \log d(K\eta) - 647,17 \log d(K\eta) \log h_t(\eta) - 72,375 \log f(MHz)$$
, la cual describe el comportamiento de las ondas electromagnéticas en la banda de radiodifusión FM, en el entorno de Riobamba. Los resultados obtenidos con esta nueva fórmula, se volvieron a comparar con los anteriores modelos para, finalmente, verificar que mejoran la efectividad entregando un error RMS de 6.339, mejor que el 14.8414 y 23,0434 que entregaban los modelos más aproximados: Ericsson y Okumura respectivamente. Se concluye que es posible mejorar la efectividad de las predicciones de pérdidas por propagación adaptando los modelos a ambientes particulares o diseñando uno específico. Se recomienda utilizar bandas de frecuencias limitadas, con el fin de evitar excesiva complejidad en el proceso de diseño del modelo.

Palabras clave: <MODELO DE PROPAGACIÓN>, <ANTENAS FM>, < RIOBAMBA [Cantón]>, <SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA>, <MODELAMIENTO DE FENÓMENOS>, <REGRESIÓN DE FUNCIONES>, <TELECOMUNICACIONES>

SUMMARY

The objective of this study was to design a statistical propagation model for the FM band, adjusted specifically to Riobamba city, this allows more accurate coverage and power loss calculations of the engineering studies for broadcasting, since the used models are designed for other environments, generating a large margin of error. In order to achieve this goal, a campaign was conducted to measure the electric field intensity in the urban area of the city, these data were then used in power balance to calculate losses presented in each system. For reliability, visits to each one of the FM broadcast stations in Cacha hill were carried out, where transmission equipment data about power loss or gain were collected and which are important for the overall estimate. The propagation losses were obtained using the Okumura, Okumura-Hata, Ericsson, Walfisch-Bertoni and Walfisch-Ikegami models and compared with the actual values. The two best approximation models and their variables were used in the successive regression process which finally define GMC-FM-R model with this formula: $L(dB) = -170,929 + 30,194F_{ht}(dB) + 1909,284 \log d(Kn) - 647,17 \log d(Kn) \log h_t(n) - 72,375 \log f(MHz)$, describing the behavior of the electromagnetic waves in the FM broadcast band in Riobamba. The obtained results by applying this new formula were compared again with the previous models to finally verify that they improve effectiveness delivering a de 6.339 RMS error better than 14.8414 and 23,0434 with the most approximate models Ericsson and Okumura. It is concluded that it is possible to improve the effectiveness of the loss predictions by propagation adapting the models to specific environments or designing a specific one. It is recommended to use limited frequency band, to avoid excessive complexity in the model design process.

Keywords: <PROPAGATION MODEL>, <FM ANTENNA>, <RIOBAMBA [City]>, <WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS>, <PHENOMENA MODELING>, <REGRESSION FUNCTION>, <TELECOMMUNICATIONS>.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo denominado “DISEÑO DE UN MODELO ESTADÍSTICO DE PROPAGACIÓN PARA LA BANDA DE RADIODIFUSIÓN FM APLICABLE EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”, trata sobre el diseño de un modelo estadístico de propagación electromagnética para la banda de radiodifusión FM (88 - 108 MHz), mediante la comparación de datos reales y teóricos, y la deducción de una fórmula específica que prediga el comportamiento de la propagación de las ondas electromagnéticas radiadas en la zona de Riobamba, con el fin de proporcionar mayor exactitud en la predicción de la pérdida por propagación, y por lo tanto de la cobertura alcanzada por una radiodifusora FM.

Este proyecto reúne las condiciones metódicas de investigación mixta, ya que se utilizan conocimientos de las Ciencias y Tecnología en la especialidad de las Telecomunicaciones, para el estudio correspondiente, y el diseño del modelo estadístico de propagación. Los métodos utilizados son: Inductivo, Deductivo, Descriptivo, Exploratorio, Estadístico, Comparativo, Análisis y Síntesis, apoyados en las técnicas de observación, análisis documental, estudio de casos, estudio de campo, revisión selectiva, cálculo y tabulación, confrontación y confirmación.

Inicialmente se analizan los parámetros utilizados en los modelos de propagación de uso común para el cálculo de pérdidas por propagación en el espacio libre, y se comparan con las pérdidas reales basadas en los resultados de medición del nivel de intensidad de campo eléctrico recibido.

Los resultados de medición del nivel de intensidad de campo eléctrico recibido de la señal de radiodifusión FM, fueron obtenidos por un barrido en las calles longitudinales de la ciudad de Riobamba, utilizando la EM del SACER, facilitada por la ARCOTEL.

Posteriormente se deduce una fórmula específica de cálculo de pérdidas de potencia por propagación en la banda de radiodifusión FM en Riobamba, partiendo de los dos modelos de mejor aproximación: Okumura y Ericsson. Finalmente, se lo valida mediante la comparación de las predicciones realizadas y los valores reales obtenidos en mediciones.

Encontrando como resultado final, que el MODELO ESTADÍSTICO DE PROPAGACIÓN PARA LA BANDA DE RADIODIFUSIÓN FM APLICABLE EN LA CIUDAD DE

RIOBAMBA, proporciona un error RMS de **6.338761**, en las predicciones de las pérdidas por propagación, y en comparación al **23.04341532** del modelo Okumura y **14.84136527** del modelo Ericsson, que fueron los de mejor aproximación entre los modelos analizados, respecto a los resultados de medición, finalmente se define como el modelo de mayor exactitud en las predicciones de las pérdidas por propagación, y por lo tanto de la cobertura alcanzada por una radiodifusora.

Antecedentes

Con el inicio de la radiodifusión regular AM en 1920, comienza también la búsqueda de métodos de difusión óptimos tanto para la estación transmisora como para los radioescuchas, así, la modulación FM se desarrolló muy pronto esperando obtener una mejor relación señal a ruido. (Mediavilla et al, 2012: pp. 1-3; SUPERTEL, 2013:pp. 12-13). En el año de 1939 se inició la difusión FM en la banda de 42 a 50 MHz, luego se modificó a la actual banda de 88 a 108 MHz, incrementando la potencia mínima de transmisión junto con las pérdidas por propagación. (SUPERTEL, 2013: pp. 13-14; Santa Cruz, 2010: pp. 1-4)

El cálculo de pérdidas por el trayecto es un proceso esencial para el establecimiento de un sistema de telecomunicaciones. Este depende de factores que hacen del cálculo numérico un proceso excesivamente complejo, razón por la cual se han desarrollado diversos modelos enfocados para un ambiente especial. (Soriano, 2009: pp. 1-3; Parson, 2000: pp. 15-17) La Unión Internacional de Telecomunicaciones en su modelo ITU-R P.1546 recoge los aspectos de propagación a fin de realizar dichos cálculos, basándose en varios modelos de propagación conocidos (Guzmán, 2012: pp. 5-8). En Colombia y Chile se han realizado estudios sobre el tema, demostrando que cada zona específica de terreno requiere de un modelo de propagación diferente, dichos resultados se pueden hallar en Herrera et al (1998); García et al (2008) y García et al (2002). En Ecuador se ha desarrollado un simulador para un modelo de propagación para comunicaciones basadas en Wimax, IEEE 802.16-2009 Fixed Wireless MAN OFDM mediante la herramienta Matlab. Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R REC-P 1546-1, 2003)

La formulación de un modelo de propagación inalámbrica tiene como problemática constante los amplios rangos de las variables a considerarse, como la amplitud del espectro radioeléctrico,

y las características del sistema de comunicaciones: alturas de transmisores y receptores, y distancias entre ellos; la solución hallada ha sido limitar los intervalos válidos de cálculo en cada una de dichas variables, de acuerdo al tipo de servicio de telecomunicaciones analizado. (Herrera et al, 1998: pp. 4-8) (García et al, 2008: pp. 15-20) (García et al, 2002: pp. 12-18)

En la actualidad los modelos de propagación se utilizan principalmente para el diseño y evaluación de sistemas de comunicaciones inalámbricos en un ambiente específico, y del desempeño de antenas y equipos de potencia para los mismos. La ARCOTEL utiliza el software ICS-TELECOM para realizar cálculos y simulaciones referentes a su actividad, dicho programa permite además evaluar el desempeño con una buena precisión (Guzmán, 2012: pp. 5-10).

Justificación

El diseño de un Modelo de propagación para la banda de radiodifusión no se ha realizado en la ciudad de Riobamba, razón por la cual la ARCOTEL, las estaciones de radiodifusión en operación actual y peticionarios interesados en concesiones, han fundamentado sus cálculos y estudios en modelos estándar de uso común, tales sean Okumura-Hata, Walfisch-Bertoni, Walfisch-Ikegami. Cabe mencionar que la recomendación UIT-R P.1546-1 resalta la aproximación del modelo Okumura-Hata, que aunque ha sido aceptable, necesita ciertas condiciones para obtener resultados compatibles, y podría presentar errores, puesto que es un modelo generalizado. (ITU-R REC-P 1546-1, 2003: p. 38)

Se utilizará un método de análisis comparativo-estadístico, tomando predicciones de algunos modelos de propagación de uso común, junto con predicciones basadas en las mediciones reales de la intensidad de campo eléctrico recibida en diversos puntos. Comparando los datos se elegirán los modelos cuyos resultados presenten mejor aproximación a la realidad, partiendo de su formulación y agregando variables características del entorno de estudio, finalmente se deducirá la fórmula específica para el modelo de propagación en la ciudad de Riobamba.

En el proceso de análisis para el diseño del modelo estadístico de propagación para la banda de radiodifusión FM en la ciudad de Riobamba, se considerará la atenuación de la línea de transmisión, la ganancia del arreglo de antenas en el sistema de transmisión, los ángulos de

azimut y elevación, por ser datos necesarios para tener certeza de la potencia radiada por cada una de las estaciones de radiodifusión consideradas, y además se considerarán los factores de corrección acoplados con mediciones a diferentes distancias y alturas topográficas, para ajustarlo perfectamente al comportamiento específico del entorno.

La aplicación del modelo diseñado, será una herramienta de apoyo fundamental para los estudios de ingeniería necesarios al momento de solicitar, autorizar, o renovar una concesión para radiodifusión FM con el Estado, propietario del espectro radioeléctrico, así como para el control que realiza la ARCOTEL; tendrá un impacto tecnológico e innovador, debido a que con ayuda de los resultados obtenidos se podrán tomar decisiones en los dispositivos a utilizarse, mejora en la cobertura de las estaciones, arreglos y mejoras en los sistemas de transmisión, búsqueda de lugares alternativos para la ubicación de transmisores, al igual que posibles modificaciones o configuraciones alternativas, tendrá también un impacto educativo puesto que se podrá utilizar como herramienta para la enseñanza y servirá como base para futuros estudios.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un modelo estadístico de propagación para la banda de radiodifusión FM aplicable en la ciudad de Riobamba.

Objetivos Específicos

- Analizar los parámetros utilizados en los modelos de propagación Okumura, Okumura-Hata, Ericsson, Walfisch-Bertoni, y Walfisch-Ikegami para el cálculo de pérdidas por propagación.
- Medir el nivel de intensidad de campo eléctrico recibido de la señal de radiodifusión FM en la ciudad de Riobamba.
- Comparar las predicciones de los modelos de propagación considerados, con los datos de medición obtenidos en el perímetro urbano de la ciudad de Riobamba.

- Deducir una fórmula específica para calcular las pérdidas de potencia por propagación en la banda de radiodifusión FM en Riobamba.
- Validar el modelo mediante la comparación de las predicciones realizadas y los valores reales obtenidos en mediciones.

Hipótesis

¿El diseño de un modelo estadístico de propagación para la banda de radiodifusión FM específico para la ciudad de Riobamba, proporcionará mayor exactitud en las predicciones de las pérdidas por propagación y por lo tanto de la cobertura alcanzada por una radiodifusora?

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Propagación de Ondas Electromagnéticas

Un sistema básico de comunicación inalámbrica funciona gracias a un flujo de energía que inicia como una corriente a lo largo de un conductor en el transmisor, luego transformándose en una serie de ondas que viajan en el aire, y finalmente volviendo a su forma de corriente en un conductor presente en el receptor (Florian, 2005: p. 2).



Figura 1-1.- Diagrama de bloques de un sistema típico de comunicación inalámbrica

Fuente.- Documentos Udlap. Florian,

Existen dos formas de establecer la comunicación entre transmisor (T_x) y receptor (R_x), y depende de la línea de visión entre los dos. Cuando el receptor recibe la señal en forma directa sin atravesar obstáculos, se denomina enlace *LOS*, y cuando la señal llega de manera indirecta, habiendo pasado por distintos fenómenos físicos se llama enlace *NLOS* (Villareal, 2005: p. 38).

1.1.1 Antenas

El proceso realizado en el transmisor de convertir señales eléctricas a ondas aéreas y el proceso opuesto en el receptor, es ejecutado por antenas, cuya importancia es trascendental para la existencia de un sistema de comunicaciones inalámbrico.

El tamaño de las antenas varía dependiendo de la frecuencia en la que trabajan, es decir, la longitud de onda de la señal que transmiten o reciben, haciéndose más pequeñas conforme aumenta la frecuencia. Su longitud generalmente es un múltiplo o submúltiplo exacto de la longitud de onda de la señal (Soriano, 2009: p. 2).

1.1.1.1 Campo cercano y lejano de una antena

A medida que la distancia aumenta, el comportamiento de radiación de las antenas cambia rápidamente, por lo que se realiza la diferenciación entre el campo cercano y el lejano de una antena. La distancia o radio donde sucede esta separación se calcula con la ecuación siguiente:

$$R = \frac{2L^2}{\lambda}$$

Donde L es el diámetro de la menor esfera que encierra a la antena y λ (Hz) simboliza la longitud de onda de la antena. La Figura 2 muestra gráficamente la diferenciación de campos cercano y lejano, el campo interno hasta R, comprende el campo cercano, y el resto se comprende como campo lejano.

La distribución del campo angular en el campo cercano depende de la distancia a la antena y en el lejano es independiente de la misma (Florian, 2005: p. 4).

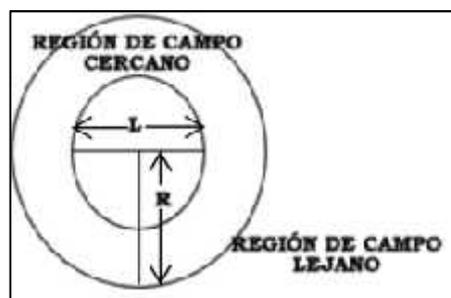


Figura 2-1.- Diferenciación de campos cercano y lejano de una antena
Fuente.- Documentos Udlap. Florian, M.

1.1.1.2 Ganancia

Se define como la relación entre la intensidad de campo que produce una antena en un punto y la intensidad que produce una antena omnidireccional en el mismo punto y las mismas condiciones.

1.1.1.3 Patrón de Radiación

Es la gráfica de la radiación de campo lejano, más específicamente, es la potencia radiada por la antena por unidad de ángulo, se expresa por la siguiente ecuación:

$$U = r^2 S$$

Donde (U) es la intensidad de radiación en Watts por unidad de ángulo, (S) es la intensidad de potencia en watts sobre metro cuadrado y (r) es la distancia a cada punto dado, en metros.

Este parámetro se puede utilizar para clasificar a las antenas en 2 grupos, Antenas Direccionales, y Omnidireccionales,

Las antenas direccionales mantienen un patrón de radiación limitado con una dirección específica.

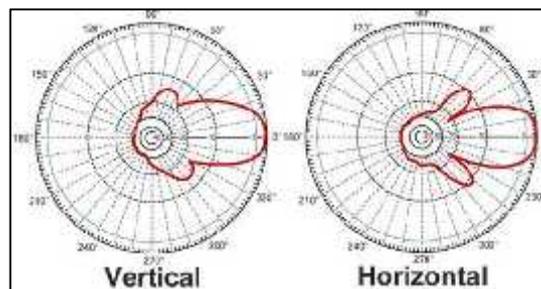


Figura 3-1.- Patrón de radiación direccional

Fuente.- "Fundamentos de la teoría de la antena "

<http://www.antenna-theory.com/spanish/basics/main.php>

Las antenas omnidireccionales emiten señal en todas las direcciones en un plano, comúnmente horizontal, se utilizan comúnmente para emisión de señales en amplias zonas.

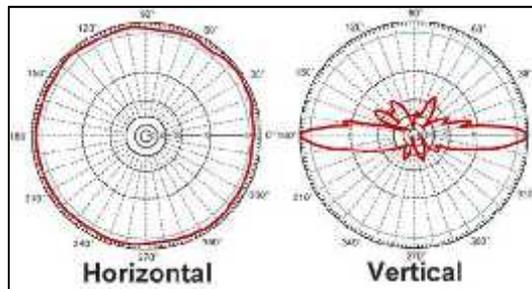


Figura 4-1.- Patrón de radiación omnidireccional

Fuente.- "Fundamentos de la teoría de la antena"

<http://www.antenna-theory.com/spanish/basics/main.php>

1.1.1.4 Polarización

En una señal electromagnética los campos, eléctrico y magnético viajan perpendicularmente, la polarización de una antena indica la orientación del campo electromagnético que recibe o emite. Los tipos de polarización que puede tener una antena son:

Polarización vertical.- La orientación del campo eléctrico es vertical con respecto al horizonte terrestre (perpendicular).

Polarización horizontal.- El campo eléctrico es paralelo al horizonte terrestre.

Polarización circular.- el campo eléctrico producido por la antena cambia de horizontal a vertical y viceversa, generando movimientos circulares en todas las direcciones. El giro puede tener sentido horario o anti horario (Krauss et al, 2005: p. 45; Cheng, 1997: p. 430; Balanis, 2005: p. 30).

1.1.2 Mecanismos básicos de Propagación

Cuando una onda electromagnética viaja desde un emisor hacia un receptor, pueden ocurrir dos casos, que en el trayecto de la misma no exista ningún factor que la altere y llegue, a través del espacio libre, totalmente íntegra al receptor, este caso de condiciones ideales, se considera poco

probable al menos en el ambiente terrestre, dado que incluso el aire es un factor que podría modificar la onda. El otro caso, más realista, es que la onda se encuentre con diferentes obstáculos o condiciones ambientales en su trayecto que cambien sus condiciones de partida impidiendo o facilitando su llegada.

Dichos obstáculos o condiciones ambientales desencadenan procesos físicos que intervienen en la propagación de ondas electromagnéticas llamados *Mecanismos de Propagación*: principalmente la atenuación, refracción, reflexión, difracción y dispersión (Pérez, 2013: p.52).

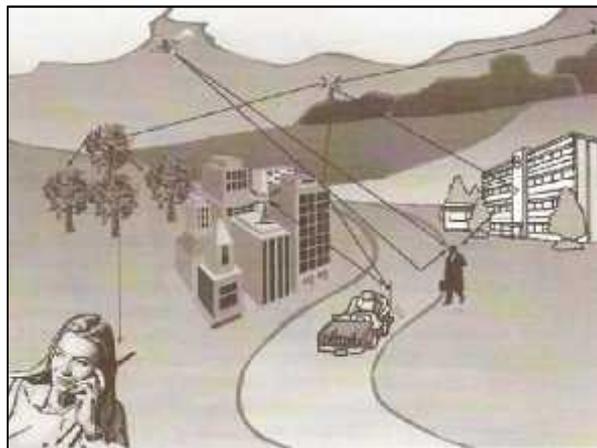


Figura 5-1.- Propagación de una señal
Fuente.- Florian, M. "Comunicaciones inalámbricas"

1.1.2.1 Atenuación

Cuando una onda electromagnética ingresa a un medio, en la mayoría de los casos el aire, ésta comienza a ceder lentamente parte de su energía a medida que se adentra en el mismo. Éste fenómeno se denomina *atenuación* y depende del coeficiente de atenuación (α) que es una característica intrínseca de cada material y mide la rapidez con la que se reduce la intensidad de una onda electromagnética cuando se propaga por el medio.

Así, la intensidad que tendrá una onda luego de recorrer una distancia (x), en un medio con coeficiente (α), habiendo ingresado con una intensidad (I_0), viene dada por la ecuación:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

Lo cual indica que la intensidad se va reduciendo exponencialmente, cuánto más grande es el valor de () más rápido se atenúa la onda.

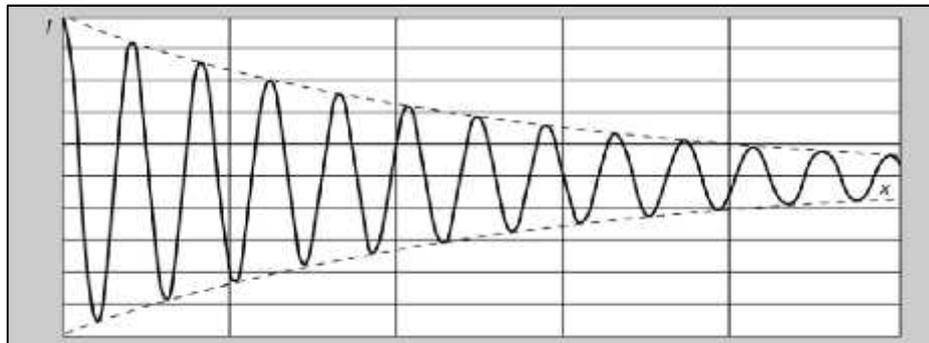


Figura 6-1.- Representación de la atenuación de una onda causada por un medio

Fuente.- Bonastre, M. "Propagación de Ondas Electromagnéticas"

[http://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica_II_ES/Fisica_II_ES_\(Modulo_5\).pdf](http://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica_II_ES/Fisica_II_ES_(Modulo_5).pdf)

1.1.2.2 Refracción

Es el cambio de dirección de propagación de una onda al pasar de un medio a otro con diferente índice de refracción. El índice de refracción se define como el cociente entre la velocidad de propagación en el vacío y la velocidad de propagación en el medio. La velocidad de propagación de una onda en un medio es inversamente proporcional a la densidad del medio, por tanto, hay refracción cuando se pasa de un medio a otro con distinta densidad.

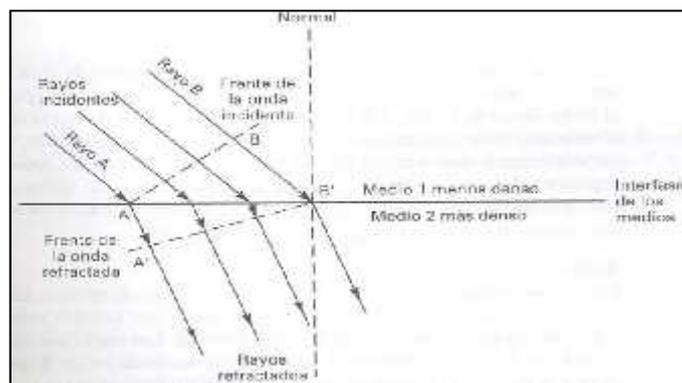


Figura 7-1.- Refracción en una frontera plana entre dos medios

Fuente.- Vila, B. "Propagación de Ondas electromagnéticas".

catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/vila_b_ca/capitulo1.pdf

1.1.2.3 Reflexión

Cuando una onda electromagnética choca contra una frontera entre dos medios y parte o toda la potencia de la señal no se propaga en el nuevo medio, sino que rebota hacia el primero, se conoce como el fenómeno de *reflexión*, en donde, la señal cambia de dirección abruptamente por la presencia de un obstáculo.

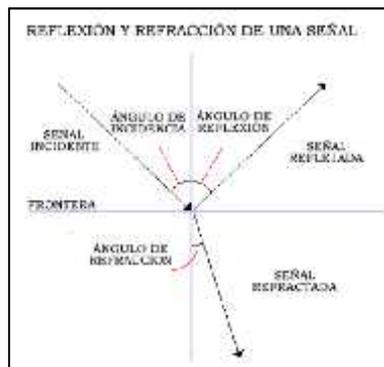


Figura 8-1.- Reflexión y refracción de una señal

Fuente.- Vila, B. "Propagación de Ondas electromagnéticas".

Dependiendo del grado de reflexión de la onda, puede darse una reflexión especular en donde el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, y la reflexión difusa en donde hay muchos frentes de onda con distintos ángulos reflejados (Bonastre, 2001: p. 5).

Cuando se produce una reflexión difusa existe una gran pérdida de potencia, es común en una propagación isotrópica, y generalmente se evita en una propagación direccional.

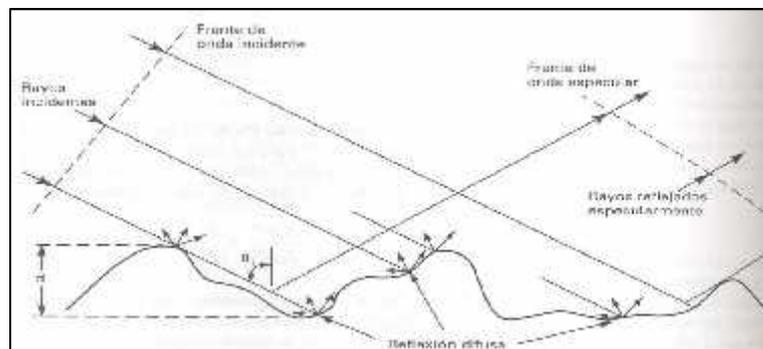


Figura 9-1.- Propagación de una onda con presencia de reflexión

Fuente.- Vila, B. "Propagación de Ondas electromagnéticas".

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/vila_b_ca/capitulo1.pdf

1.1.2.4 Difracción

Sucede cuando el frente de onda choca contra el extremo de un objeto y se curva para rodearlo. El cambio de dirección que presenta la onda depende del tamaño del objeto y de la longitud de onda, cuanto más delgado sea el objeto o mayor sea la longitud de onda, mayor es el cambio de dirección.

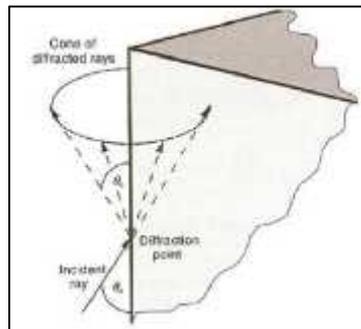


Figura 10-1.- Difracción de una señal
Fuente.- Florian, M. "Comunicaciones inalámbricas"

1.1.2.5 Dispersión

Las superficies no siempre se presentan lisas y reflejan perfectamente la señal, sino que también pueden tener rugosidades e irregularidades que provocan que la señal se disperse en varias direcciones, este fenómeno se llama *dispersión* y comúnmente sucede en la vegetación, postes de luz, árboles, entre otros (Vila, 2004: p. 4).

1.1.3 Modelos de Propagación

En el ambiente real resulta demasiado complejo analizar cada uno de los mecanismos que intervienen en la propagación de una onda electromagnética, por ésta razón nace la necesidad de establecer modelos que predigan el comportamiento de una señal en un ambiente en particular.

Dichos modelos han sido realizados en primera instancia, basados puramente en las leyes físicas, son denominados Modelos Determinísticos, y su aproximación a los valores reales tiende a ser poco acertada, porque no toma en cuenta variables ambientales. Luego, procurando una mejor aproximación se realizaron mediciones y a partir de ellas se modelaron nuevos

métodos de predicción de pérdidas por el trayecto, obteniendo resultados mucho más acertados y apegados a la realidad, se denominan Modelos Empíricos, y sirven para entornos muy específicos.

Por esta razón lo más óptimo, en cuestión de predicción de pérdidas, es tener un modelo propio para el entorno en que se realizará la propagación, no obstante, por cuestiones de desarrollo, se utiliza un modelo prediseñado y se lo adecúa a las condiciones propias del medio (Florian, 2005: p.4).

1.1.3.1 Modelo de Friis

También llamado modelo de propagación en Espacio Libre, es un modelo determinístico basado en las ecuaciones de Maxwell, que permite calcular la potencia recibida a cierta distancia pero en condiciones ideales, es decir, sin obstáculos de ningún tipo en todo el trayecto.

De esta manera las pérdidas por trayectoria (L) se calculan con la siguiente fórmula:

$$L(\text{dB}) = 32,44 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f$$

En donde:

(L) son las pérdidas producidas por el trayecto y se miden en dB, (d) es la distancia del enlace en Kilómetros y (f) es la frecuencia en MHz.

Y la potencia recibida por el receptor está dada por la fórmula:

$$P_r(\text{W}) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

En donde (P_t) es la potencia transmitida en Watts, (P_r) es la potencia recibida en Watts, (G_t) es la ganancia de la antena transmisora, (G_r) es la ganancia de la antena receptora, (d) es la

distancia entre transmisor y receptor en kilómetros, (L) es el factor de pérdida no relacionado a la propagación, y (λ) es la longitud de onda dada en metros.

La pérdida L se debe a la atenuación de la línea de transmisión, a las pérdidas por filtros y a las pérdidas de la antena en los sistemas de comunicación. (Soriano, 2009: p. 4; Florian, 2005: p. 5)

1.1.3.2 Modelo de Propagación de 2 rayos

Se basa en óptica geométrica y permite conocer la reflexión de las señales sobre la tierra, ambas antenas deben estar sobre el mismo plano, y deben conocerse las alturas de las antenas.

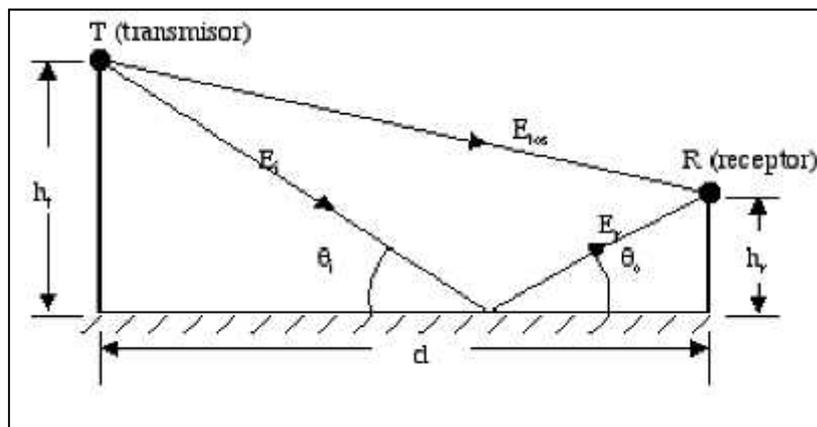


Figura 11-1.- Modelo de dos rayos

Fuente.- Soriano, M. "Modelos de propagación"

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/soriano_m_jc/capitulo2.pdf

La potencia a una distancia d del transmisor está dada por la fórmula:

$$P_r (W) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4}$$

En donde (P_t) es la potencia transmitida en Watts, (P_r) es la potencia recibida en Watts, (G_t) es la ganancia de la antena transmisora, (G_r) es la ganancia de la antena receptora, (h_t) es la altura de la antena transmisora en metros, (h_r) es la altura de la antena receptora en metros, (d) es la distancia entre transmisor y receptor en kilómetros.

Y las pérdidas por propagación:

$$L_p(\text{dB}) = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r)$$

Donde (L_p) son las pérdidas por trayectoria en dB, (G_t) es la ganancia de la antena transmisora en dB, (G_r) es la ganancia de la antena receptora en dB, (h_t) es la altura de la antena transmisora en metros, (h_r) es la altura de la antena receptora en metros y (d) es la distancia entre transmisor y receptor en kilómetros (Soriano, 2009: p. 5).

1.1.3.3 Modelo de Propagación de Okumura

Es uno de los más ampliamente utilizados en predicción de señales en áreas urbanas, fue desarrollado en Japón en base a una exhaustiva serie de mediciones en zonas urbanas. Es aplicable para frecuencias en el rango de 150 MHz hasta los 1920 MHz, abarcando las bandas VHF y UHF, no obstante se utiliza también en frecuencias fuera de ese intervalo, las distancias entre Tx y Rx de 1Km hasta 100Km y en alturas efectivas de antenas desde 30m hasta 1000m.

El resultado entregado por Okumura es una serie de curvas que entregan la atenuación relativa al espacio libre promedio para una zona urbana en terreno casi plano. Las curvas deben ser interpretadas para obtener una aproximación de las pérdidas.

Es uno de los modelos más simples y adecuados para predicciones de atenuación, se utiliza para sistemas celulares y sistemas de radio terrestre en ambientes poblados, por lo que no es muy efectivo en zonas rurales (Soriano, 2009: p. 5).

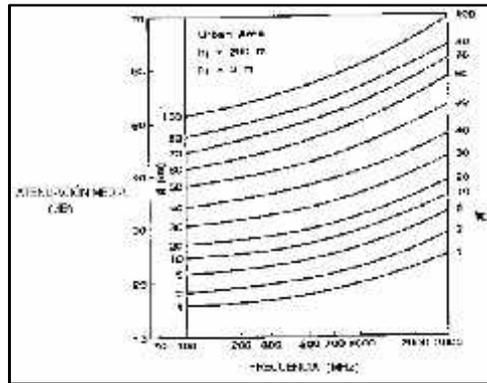


Figura 12-1.- Set de curvas de Atenuación media del modelo Okumura

Fuente.- Soriano, M. "Modelos de propagación"

Las pérdidas pueden ser expresadas con la siguiente fórmula:

$$L_p(dB) = L_0 + A_{mi} - G(h_t) - G(h_r) - G_{\text{área}}$$

En donde:

(L_p) son las pérdidas por trayectoria en dB, (L_0) es la atenuación por el espacio libre en dB, (A_{mi}) Atenuación relativa promedio, $G(h_t)$ la ganancia de la altura de la antena transmisora, $G(h_r)$ la ganancia de la altura de la antena receptora, $(G_{\text{área}})$ ganancia debida al ambiente.

Las pérdidas por espacio libre (L_0) se calculan con la fórmula perteneciente al modelo de Friis.

$$L_0(dB) = 32,44 + 20 \log_{10} d(Km) + 20 \log_{10} f(MHz)$$

Las ganancias de altura del transmisor $G(h_t)$ tienen una variación de pérdidas de 20dB/década y que $G(h_r)$ tiene una variación de 10dB/década para alturas menores de 3m, por lo tanto:

$$G(h_t) = 20 \log(h_t/200) \quad \text{Para} \quad 30m < h_t < 1000m$$

$$G(h_r) = 10 \log(h_r/3) \quad \text{Para} \quad h_r < 3m$$

$$G(h_r) = 20 \log(h_r/3) \quad \text{Para} \quad 3m < h_r < 10m$$

Las ganancias por el tipo de área o entorno se muestran también en un set de curvas:

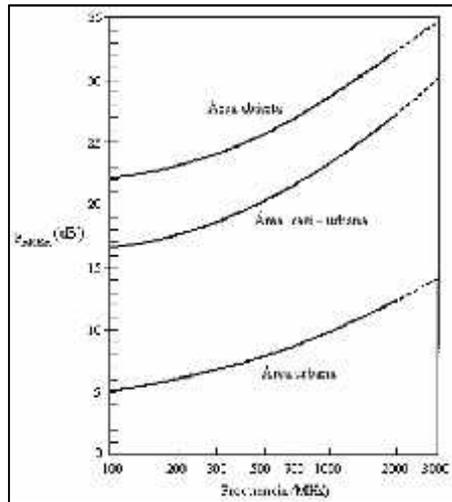


Figura 13-1.- Curvas de ganancia por Área
Fuente.- Soriano, M. "Modelos de propagación"

1.1.3.4 Modelo de Propagación Okumura-Hata

Masaharu Hata utilizó las gráficas y características que encontró Okumura y las definió en fórmulas empíricas válidas para casi todos los mismos rangos de frecuencias, alturas y distancias, agregando además una formulación para ambientes sub-urbanos y rurales considerando un terreno ligeramente montañoso, con elevaciones menores a 20 metros.

Las pérdidas en el ambiente urbano quedan expresadas por la siguiente fórmula estándar.

$$L_{50}(\text{urb})(\text{dB}) = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_t + \log d (44,9 - 6,55 \log h_t) - a(h_r)$$

En donde:

(f_c) es la frecuencia de la portadora en MHz, (h_t) es la altura efectiva de la antena transmisora en metros, (h_r) es la altura de la antena receptora en metros, y d es la distancia entre Tx y Rx en kilómetros.

Los rangos de validez de los datos son:

$$150 \text{ MHz} < f_c < 1500 \text{ MHz}$$

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

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

Finalmente $a(h_r)$ es el factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil que está en función del tipo de área de servicio de la siguiente manera:

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$\alpha(h_r) = (1,1 \log f_c - 0,7) h_r - (1,56 \log f_c - 0,8) \text{ [dB]}$$

Para ciudades grandes:

$$\alpha(h_r) = 8,29(\log 1,54 h_r)^2 - 1,1 \text{ [dB]} \quad \text{para } f_c < 300 \text{ MHz}$$

$$\text{y } \alpha(h_r) = 3,2(\log 11,75 h_r)^2 - 4,97 \text{ [dB]} \quad \text{para } f_c > 300 \text{ MHz}$$

En ambiente suburbano se utiliza la fórmula de ambiente urbano con una ligera variación en función de la frecuencia de trabajo (f_c)

$$L(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbano}) - 2 \left[\log \left(\frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5,4$$

Finalmente para entornos rurales las pérdidas se describen con la fórmula siguiente:

$$L(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbano}) - 4,78(\log f_c)^2 + 18,33 \log f_c - 40,94$$

El modelo se adapta muy bien en sistemas cuya distancia Tx/Rx es mayor a 1 Km (Soriano, 2009: p. 5).

1.1.3.5 Modelo Cost 231

Es una extensión del modelo Hata hasta los 2 GHz, desarrollado por La Cooperativa Europea para Investigación Científica y Técnica (EURO-COST).

Las pérdidas en el ambiente urbano se denotarían de la siguiente forma:

$$L_{50}(\text{urbano}) = 46,3 + 33,9 \log f_c - 13,82 \log h_t - a(h_r) + \log d (44,9 - 6,55 \log h_t) + C_M$$

El nuevo factor que se presenta es el factor de corrección para poder extender el rango de frecuencias (C_M), y se maneja de la siguiente manera

$C_M = 0 \text{ dB}$; para ciudades medianas y áreas suburbanas

$C_M = 3 \text{ dB}$ para centros metropolitanos.

El rango de frecuencias se extiende hasta los 2GHz, la distancia entre emisor-receptor se limita a 20Km y el resto de parámetros se mantienen invariantes, así:

$$1500 \text{ MHz} < f_c < 2000 \text{ MHz}$$

$$1 \text{ Km} < f_c < 20 \text{ Km}$$

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

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

1.1.3.6 Modelo Walfisch Bertoni

Toma en consideración las alturas de los edificios con relación al nivel de la calle para trazar modelos de difracción que predicen la potencia media de la señal a nivel del pavimento.

Las pérdidas por la trayectoria se representan como:

$$L = L_0 + L_{ex}$$

Donde (L_0) es la pérdida por espacio libre y se define como

$$L_0(dB) = 32,44 + 20 \log f_c(MHz) + 20 \log R(Km)$$

(L_{ex}) es la pérdida de la señal al nivel de los techos a causa de la sombra producida por los techos sobre el receptor, combinada con las pérdidas por difracción en la señal, desde los techos al nivel de la calle.

$$L_{ex}(dB) = 57,1 + A + \log f_c + 18 \log R - 18 \log(h_t - h) - 18 \log\left(1 - \frac{R^2}{17(h_t - h)}\right)$$

En donde: (R) es la distancia entre transmisor y receptor y se expresa en kilómetros, (f_c) es la frecuencia de operación en MHz, (h_t) es la altura efectiva de la antena transmisora, y (h) es la media de las alturas de los edificios, ambas en metros.

El factor (A) depende de (h_r) que es la altura de la antena receptora y de (h) que es la altura media de los edificios, así como también de (d) que es la distancia media de centro a centro de los edificios, todas ellas en metros. (Quintana et al, 2013: pp. 16 - 18).

$$A = 5 \log \left[\frac{d^2}{4} + (h - h_r)^2 \right] - 9 \log d + 20 \log \left[\tan^{-1} \left(\frac{2(h - h_r)}{d} \right) \right]$$

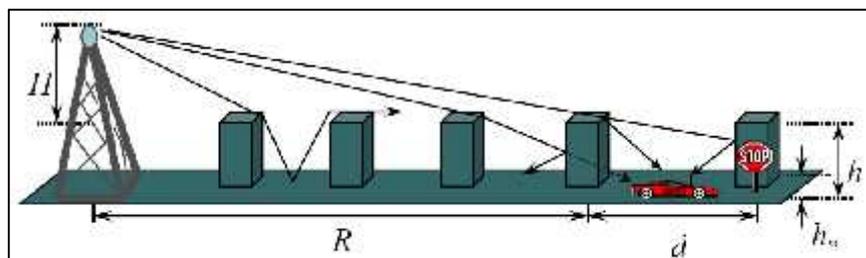


Figura 14-1.- Representación del modelo Walfisch y Bertoni

Fuente.- Soriano, M. "Modelos de propagación"

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/soriano_m_jc/capitulo2.pdf

1.1.3.7 Modelo de Ericsson

Está basado en el modelo Okumura-Hata, es utilizado por la compañía homónima para el dimensionamiento de sus redes. (Quintana et al, 2013: p. 18).

Sus expresiones son:

$$L(dB) = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log h_t + a_3 \log h_t \log d - 3,2 \log((11,75h_r)^2) + g(f_c)$$

$$g(f_c) = 44,9 \log f_c - 4,78(\log f_c)^2$$

Los valores a_0 , a_1 , a_2 y a_3 son coeficientes de expresión de pérdidas, exclusivos del modelo, y se asignan según la siguiente tabla:

Tabla 1-1.- Coeficientes de expresión de pérdidas. Modelo Ericsson

Factor	Urbano	Suburbano	Rural
a_0	36,2	43,20	45,95
a_1	30,2	68,93	100,6
a_2	-12,0	-12,0	-12,0
a_3	0,1	0,1	0,1

Fuente.- Quintana, R., Bordón, R., Montejo, S., (2013).“Estudio comparativo de los modelos de propagación del canal inalámbrico”

1.1.3.8 Modelo de Walfisch-Ikegami

Resulta de combinar los modelos Walfisch-Bertoni e Ikegami. Está descrito por una expresión compuesta por 3 términos, las pérdidas por espacio libre, pérdidas por difracción y dispersión desde las azoteas hasta el nivel del pavimento y las perdidas por difracciones múltiples. Toma en cuenta el ángulo de incidencia respecto a la calle, lo cual es ignorado por la mayoría de modelos. Las pérdidas por trayecto entonces, están determinadas por la expresión:

$$L = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{mds} & L_{rts} + L_{mds} > 0 \\ L_0 & L_{rts} + L_{mds} \leq 0 \end{cases}$$

Pérdidas por espacio libre L_0

$$L_0(dB) = 32,4 + 20 \log d + 20 \log f_c$$

Pérdidas azotea - nivel de la calle $L_{rts} (dB)$

$$L_{rts}(dB) = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f_c + 20 \log \Delta h_m + L_\delta$$

Donde: (w) es el ancho de la calle, y (Δh_m) es la diferencia entre la altura media de los edificios y la altura del móvil, ambas en metros; (f_c) es la frecuencia en MHz.

Finalmente (L_δ) define las pérdidas debidas al ángulo de incidencia del rayo directo respecto a la calle, de la siguiente manera:

$$L_\delta = \begin{cases} -10 + 0,354\phi & 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\phi - 35^\circ) & 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\phi - 55^\circ) & 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases}$$

Donde ϕ es el ángulo de incidencia respecto a la calle.

El tercer elemento son las pérdidas por difracción en múltiples pantallas, queda expresado por la siguiente ecuación:

$$L_{msd}(dB) = L_{ht} + k_a + k_d \log d + k_f \log f_c - 9 \log b$$

En la expresión (b) es la distancia expresada en metros de centro a centro entre los edificios, (d) es la distancia en kilómetros de transmisor a receptor, (L_{ht}) son las pérdidas debido a la altura de la antena de la estación base en dB y (k_a) es el incremento de las pérdidas para las estaciones base que están por debajo de la altura de las azoteas de los edificios adyacentes, éstos últimos valores se toman según las siguientes condiciones:

$$L_{ht} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_t) & h_t > h_{techo} \\ 0, & h_t \leq h_{techo} \end{cases}$$

Donde h es la altura de la estación base y $(k_{echo})(m)$ es la altura media de los edificios. El término (k_d) está relacionado con el control de la dependencia entre las pérdidas por difracción en múltiples pantallas y la distancia, está expresado en dB al igual que el término (k_f) que controla la dependencia de dichas pérdidas con la frecuencia de trabajo. Se definen bajo las siguientes condiciones:



(Quintana et al, 2013: pp. 18 – 20; Soriano, 2009: p.6)

1.2 Radiodifusión FM

La radiodifusión sonora en el Ecuador inició en 1925, precisamente en Riobamba, la ciudad de las Primicias, al crearse Radio “El Prado”, con un transmisor de 25 W en la banda de 5 MHz. La historia de la radiodifusión en el Ecuador puede apreciarse en la siguiente figura:



Figura 15-1.- Radiodifusión en Ecuador
Fuente.- Revista Institucional SUPERTEL (n°15).

1.2.1 Transmisión y recepción FM

Una estación de radiodifusión FM consta básicamente de un transmisor, una línea de transmisión, y un sistema radiante (RES ARCOTEL-2015-0061, 2015).

1.2.1.1 Transmisor

El proceso de transmisión básicamente es el siguiente:

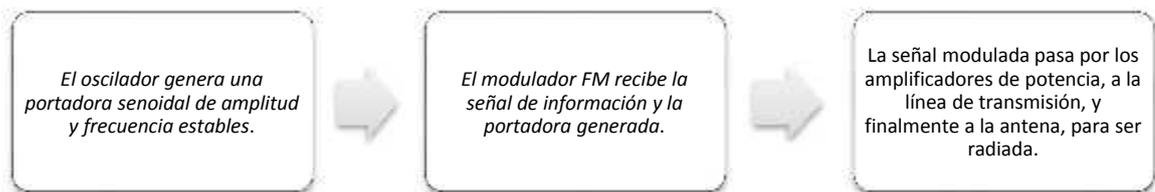


Figura 16-1.- Diagrama de bloques de Transmisión FM

Fuente.- Revista Institucional SUPERTEL (n°15).

1.2.1.2 Línea de transmisión

Línea utilizada para alimentar la antena, puede ser guía de onda o cable coaxial; el acoplamiento adecuado entre el transmisor y la antena, depende de sus características de impedancia.

1.2.1.3 Sistema Radiante

El sistema radiante o arreglo de antenas, y sus patrones de radiación, deben orientarse para irradiar a sectores poblacionales de acuerdo a los requerimientos y autorizaciones establecidas en el contrato de concesión. El proceso de recepción, se detalla a continuación:

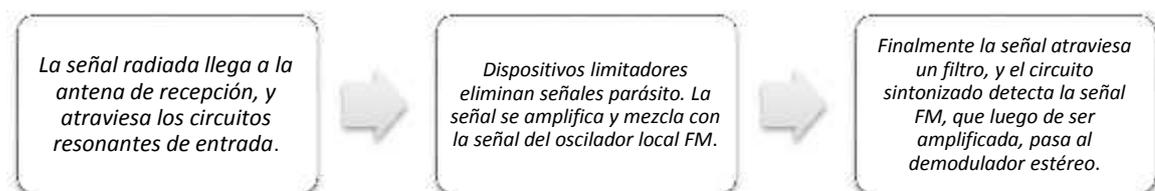


Figura 17-1.- Diagrama de bloques de Recepción FM

Fuente.- Revista Institucional SUPERTEL (n°15).

1.2.2 Ventajas y Limitaciones en la radiodifusión

Para apreciar las ventajas y limitaciones de la radiodifusión FM, se mencionan también, a modo de referencia, las ventajas y limitaciones de la radiodifusión AM.

Tabla 2-1.- Ventajas y Limitaciones de radiodifusión en AM

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none">- Cobertura nacional o internacional, necesitando pocos transmisores.- Menor uso del ancho de banda.- Circuitos demoduladores sencillos (relativamente) y poco costosos en el receptor.	<ul style="list-style-type: none">- Limitación en la calidad de sonido: poca fidelidad, difícil recepción en sitios bajos o túneles, y susceptibilidad a ruidos por descargas atmosféricas e interferencias eléctricas diversas.- Antenas de gran tamaño.- En la noche las ondas pueden llegar a grandes distancias, y causar interferencia a otros sistemas, deteriorando las señales de radiodifusión AM.

Fuente.- Revista Institucional SUPERTEL (n°15).

Tabla 3-1.- Ventajas y Limitaciones de radiodifusión en FM

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none">- Mayor resistencia al efecto desvanecimiento.- Mejor relación C/I.- Mayor fidelidad.- Menor ruido e interferencia.- Requiere menores potencias.- Puede trabajar en bandas de frecuencias muy altas, por lo que utiliza antenas pequeñas.- Reutilización de las bandas de frecuencia, por el alcance limitado a unos cientos de kilómetros.	<ul style="list-style-type: none">- Mayor ancho del canal.- Mayor ancho de banda de sintonización de los equipos receptores.- Por la direccionalidad de la señal en la banda VHF, la cobertura es dependiente de la propagación por línea de vista y de la difracción en obstáculos agudos.

Fuente.- Revista Institucional SUPERTEL (n°15).

1.2.3 Banda de Radiodifusión FM

El Plan Nacional de Distribución de Frecuencias de Radiodifusión y Televisión establece la banda de radiodifusión de frecuencia modulada analógica en el rango de 88 a 108 MHz.

La canalización de la banda FM se detalla en la Norma Técnica para el servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica, que define 100 canales separados cada 200 KHz, como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 4-1.-Canalización FM de 88 a 108 MHz

CANAL	FRECUENCIA MHz	CANAL	FRECUENCIA MHz	CANAL	FRECUENCIA MHz
1	88.1	34	94.7	68	101.5
2	88.3	35	94.9	69	101.7
3	88.5	36	95.1	70	101.9
4	88.7	37	95.3	71	102.1
5	88.9	38	95.5	72	102.3
6	89.1	39	95.7	73	102.5
7	89.3	40	95.9	74	102.7
8	89.5	41	96.1	75	102.9
9	89.7	42	96.3	76	103.1
10	89.9	43	96.5	77	103.3
11	90.1	44	96.7	78	103.5
12	90.3	45	96.9	79	103.7
13	90.5	46	97.1	80	103.9
14	90.7	47	97.3	81	104.1
15	90.9	48	97.5	82	104.3
16	91.1	49	97.7	83	104.5
17	91.3	50	97.9	84	104.7
18	91.5	51	98.1	85	104.9
19	91.7	52	98.3	86	105.1
20	91.9	53	98.5	87	105.3
21	92.1	54	98.7	88	105.5
22	92.3	55	98.9	89	105.7
23	92.5	56	99.1	90	105.9
24	92.7	57	99.3	91	106.1
25	92.9	58	99.5	92	106.3
26	93.1	59	99.7	93	106.5
27	93.3	60	99.9	94	106.7
28	93.5	61	100.1	95	106.9
29	93.7	62	100.3	96	107.1
30	93.9	63	100.5	97	107.3
31	94.1	64	100.7	98	107.5
32	94.3	65	100.9	99	107.7
33	94.5	66	101.1	100	107.9
		67	101.3		

Fuente.- Anexo1 de la Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica

Para minimizar las interferencias cocanal y de canales adyacentes, se realiza una distribución de frecuencias por zonas geográficas, según los seis grupos establecidos y la asignación de frecuencias en el territorio nacional.

Tabla 5-1.- Grupos de Frecuencias FM para distribución y asignación

G1		G2		G3		G4		G5		G6	
CANAL	F [MHz]										
01	88.1	02	88.3	03	88.5	04	88.7	05	88.9	06	89.1
07	89.3	08	89.5	09	89.7	10	89.9	11	90.1	12	90.3
13	90.5	14	90.7	15	90.9	16	91.1	17	91.3	18	91.5
19	91.7	20	91.9	21	92.1	22	92.3	23	92.5	24	92.7
25	92.9	26	93.1	27	93.3	28	93.5	29	93.7	30	93.9
31	94.1	32	94.3	33	94.5	34	94.7	35	94.9	36	95.1
37	95.3	38	95.5	39	95.7	40	95.9	41	96.1	42	96.3
43	96.5	44	96.7	45	96.9	46	97.1	47	97.3	48	97.5
49	97.7	50	97.9	51	98.1	52	98.3	53	98.5	54	98.7
55	98.9	56	99.1	57	99.3	58	99.5	59	99.7	60	99.9
61	100.1	62	100.3	63	100.5	64	100.7	65	100.9	66	101.1
67	101.3	68	101.5	69	101.7	70	101.9	71	102.1	72	102.3
73	102.5	74	102.7	75	102.9	76	103.1	77	103.3	78	103.5
79	103.7	80	103.9	81	104.1	82	104.3	83	104.5	84	104.7
85	104.9	86	105.1	87	105.3	88	105.5	89	105.7	90	105.9
91	106.1	92	106.3	93	106.5	94	106.7	95	106.9	96	107.1
97	107.3	98	107.5	99	107.7	100	107.9				

Fuente.- Anexo 2 de la Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica

Los grupos de frecuencias asignados para Chimborazo, excepto las estribaciones occidentales del ramal occidental de la Cordillera de los Andes de esta provincia, son G1, G3 y G5, contando finalmente con 50 canales disponibles, y cumpliendo con la separación mínima entre estaciones de 400 KHz que dicta la Norma, como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 6-1.- Distribución y asignación de Frecuencias FM en la Provincia de Chimborazo

Canal	Frecuencia MHz	Estado	Canal	Frecuencia MHz	Estado
1	88,1	Operando	51	98,1	No asignado
3	88,5	Operando	53	98,5	Operando
5	88,9	Operando	55	98,9	Operando
7	89,3	Operando	57	99,3	No asignado
9	89,7	Operando	59	99,7	Operando
11	90,1	Operando	61	100,1	Operando
13	90,5	Operando	63	100,5	No asignado
15	90,9	No asignado	65	100,9	Operando
17	91,3	Operando	67	101,3	Operando
19	91,7	Operando	69	101,7	Operando
21	92,1	Operando	71	102,1	Operando
23	92,5	Operando	73	102,5	Operando
25	92,9	Operando	75	102,9	Operando
27	93,3	Operando	77	103,3	No asignado
29	93,7	Operando	79	103,7	Operando
31	94,1	Operando	81	104,1	Operando
33	94,5	Operando	83	104,5	Operando
35	94,9	No asignado	85	104,9	Operando
37	95,3	Operando	87	105,3	Operando
39	95,7	Operando	89	105,7	Operando
41	96,1	Operando	91	106,1	Operando
43	96,5	Operando	93	106,5	No asignado
45	96,9	Operando	95	106,9	Operando
47	97,3	Operando	97	107,3	Operando
49	97,7	Operando	99	107,7	No asignado

Fuente.- Base de datos del SACER

1.2.4 Fundamentos de funcionamiento

En la Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica, se establecen las condiciones técnicas de operación de las estaciones de radiodifusión FM, basándose en las recomendaciones de la UIT, y buscando minimizar interferencias y facilitar su operación.

Así, en cuanto a los parámetros técnicos de instalación para radiodifusión sonora FM, establece:

Tabla 7-1.- Resumen de parámetros técnicos para radiodifusión FM

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICA
Ancho de Banda	Estereofónico: 220 kHz Monofónico: 180 kHz Tolerancia: 5 %
Frecuencia de Banda Base para audio	50 Hz – 15 kHz
Separación entre Portadoras	Según los grupos de frecuencias correspondientes al área de operación: 400 kHz.
Porcentaje de Modulación (crestas de recurrencia frecuente)	Sistemas monofónicos o estereofónicos: 100 % Con una subportadora: 95 % Con 2 o más subportadoras: 100 %
Tolerancia de Frecuencia	Máxima variación de frecuencia en la portadora principal: ± 2 kHz
Estabilidad de la Potencia de Salida	95 %

Fuente.- Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica

En cuanto a los niveles de intensidad de campo eléctrico, medidos a un nivel de 10 metros sobre el suelo, define:

Tabla 8-1.- Intensidad de campo mínima

Estaciones de Potencia Normal y Locales	Intensidad De Campo Eléctrico dBuV/m
En el borde del área de cobertura principal: - Monofónicos - Estereofónicos	48 54
En el borde del área de cobertura secundaria: - Monofónicos - Estereofónicos	30 y < 48 50 y < 54

Fuente.- Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica

Así mismo, en cuanto a la relación de protección señal deseada / señal no deseada, o C/I (portadora a interferencia), establece la siguiente tabla:

Tabla 9-1.- Relación Portadora a interferencia

Separación deseada entre portadoras (cocanal)	Sistema Estereofónico	Sistema Monofónico
0 kHz	37 dB	28 dB
200 kHz	7 dB	6 dB
400 kHz	-20 dB	-20 dB
600 kHz	-30 dB	-30 dB

Fuente.- Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica.

La potencia máxima de salida de un transmisor FM está en función de la ganancia máxima de la antena (máxima radiación respecto a la antena isotrópica [dB]); donde la potencia isotrópica radiada equivalente máxima no debe exceder de 16 [dB]; los valores de potencia del transmisor se muestra en la siguiente tabla (SUPERTEL, 2012: pp. 5-6).

Tabla 10-1.- Relación Potencia de salida - Ganancia de la antena.

Potencia del Transmisor [kW]	16	8	4	2	1	0,5	0,25
Ganancia máxima de la antena [dB]	0	3	6	9	12	15	18

Fuente.- Revista Institucional SUPERTEL (n°15).

1.2.5 Análisis Regulatorio

1.2.5.1 Ley Orgánica de Telecomunicaciones

“Esta Ley tiene por objeto desarrollar, el régimen general de telecomunicaciones y del espectro radioeléctrico como sectores estratégicos del Estado...” (Artículo 1, Objeto, del Capítulo I, Título I).

En el TÍTULO XII, SERVICIOS DE RADIODIFUSIÓN, CAPÍTULO ÚNICO, Instalación de Infraestructura y Características Técnicas, se define entre otras cosas que:

- Los equipos e infraestructura de las estaciones radiodifusoras deberán instalarse y operar de conformidad con lo dispuesto en la normativa que para el efecto emita la ARCOTEL.
- Las características técnicas para la operación de los servicios de radiodifusión serán las que apruebe la ARCOTEL en los procesos de adjudicación.

1.2.5.2 Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones.

Resumiendo el Artículo 144, Competencias de la Agencia, CAPÍTULO II del TÍTULO XIV de la Ley de Telecomunicaciones, se define que, entre otras cosas, le corresponde a la ARCOTEL:

- Elaborar, aprobar, modificar y actualizar el Plan Nacional de Frecuencias.
- Controlar y monitorear el uso del espectro radioeléctrico.
- Establecer los requisitos, contenidos, condiciones, términos y plazos de los títulos habilitantes, y elaborar las propuestas de valoración económica para la asignación y uso, aprovechamiento y/o explotación del espectro radioeléctrico.
- Inspeccionar y fiscalizar la instalación, establecimiento y explotación de redes de telecomunicaciones y los sistemas de los medios de comunicación social que usen el espectro radioeléctrico, así como las redes de audio y vídeo por suscripción.
- Realizar estudios sobre el sector de telecomunicaciones y mantener y publicar las estadísticas de dicho sector.
- Emitir las regulaciones, normas técnicas, planes técnicos y demás actos que sean necesarios en el ejercicio de sus competencias.

1.2.5.3 Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica

Esta norma establece el marco técnico para la utilización del espectro radioeléctrico: bandas de frecuencias, canalización, técnicas de distribución y asignación de frecuencias, buscando minimizar las interferencias y racionalizar la utilización del espectro radioeléctrico.

Define, entre otras cosas que:

- Los sistemas radiantes de las estaciones locales estarán a una altura máxima de 36 metros sobre la altura promedio de la superficie de la población servida, y podrá instalarse a una altura mayor a 36 metros, solo en caso de que el peticionario demuestre técnicamente que garantizará la calidad del servicio sin emitir su señal a otras localidades.

- Las estaciones de radiodifusión sonora FM no podrán cubrir con un solo transmisor dos o más áreas de operación independientes, salvo a una estación de potencia normal o local, autorizada para cubrir el límite de dos o más áreas de operación, al no ser cubierto por estaciones autorizadas en las áreas de operación colindantes, luego de que un estudio de ingeniería demuestre que no causará interferencias a las mismas.

1.3 Sistema Automático de control del Espectro Radioeléctrico “SACER”

El SACER es una herramienta de control y monitoreo del espectro radioeléctrico, fundamentada en las recomendaciones y normas de la UIT. Este sistema permite a la ARCOTEL ejercer sus funciones como ente de regulación y control del espectro radioeléctrico (SUPERTEL, 2013):

- Proporcionar datos y estadísticas de comprobación técnica.
- Garantizar la calidad de los servicios de telecomunicaciones, radiocomunicaciones, radiodifusión y televisión.
- Ayudar al desarrollo de mejores modelos de gestión del espectro radioeléctrico

Las funcionalidades del SACER permiten realizar las siguientes actividades de control (SUPERTEL, 2013: p. 8).

- Monitoreo del espectro radioeléctrico: sistema fijo-móvil, sistemas troncalizados, radiodifusión y televisión.
- Análisis de interferencias, y verificación de la ocupación.
- Medición de parámetros técnicos y obtención de la cobertura de radiodifusión y televisión.

1.3.1 R&S ARGUS

El SACER funciona con el software R&S ARGUS, que es un software para mediciones y evaluaciones muy popular. Entre sus fortalezas podemos mencionar:

- Mediciones guiadas.
- Valores por defecto, útiles.
- Mensajes de estado y de error informativo.
- Gran flexibilidad gracias a su diseño modular.
- Idiomas: inglés, chino, francés, alemán, ruso, español.
- Se puede ejecutar en Windows Vista, en Windows XP, y en Windows 7 y 8 (64 bits).
- Soporta IPv6.
- Cuenta con una base de datos: registro general, listas de transmisores (sistemas de transmisión y recepción), lista de frecuencias, lista de canales, configuración de mediciones automáticas (definición de rango, definición de medición, definición de horario), resultados de medición, entre otros.

1.3.2 Estaciones del SACER

El SACER a nivel nacional cuenta con:

Un Centro de Control Nacional - CCN

Cinco Centros de Control Regional - CCR

Una estación fija de monitoreo en Taura, operada desde la sede de la Intendencia Costa.

Una estación fija de monitoreo en Turi, operada desde la sede de la Intendencia Sur.

Una estación remota transportable – ERT, de monitoreo HF/VHF/UHF, en la jurisdicción de la Intendencia Norte.

Estaciones remotas transportables – ERT, de monitoreo VHF/UHF:

5 en la jurisdicción de la Intendencia Regional Norte.

4 en la jurisdicción de la Intendencia Regional Costa.

4 en la jurisdicción de la Intendencia Regional Sur.

3 en la jurisdicción de la Intendencia Regional Centro.

2 en la jurisdicción de la Delegación Insular Galápagos.

1 en la jurisdicción de la Delegación Manabí.

5 estaciones móviles de monitoreo: Delegación Manabí, Intendencias Regionales Norte, Costa, Centro y Sur.

La Intendencia Regional Centro cuenta entonces, con 3 ERT de monitoreo VHF/UHF y 1 EMT:

scd-101: Estación Remota Transportable - ERT Riobamba

scd-102: Estación Remota Transportable - ERT Ambato

scd-103: Estación Remota Transportable - ERT Puyo

sct-101: Estación Móvil- EM

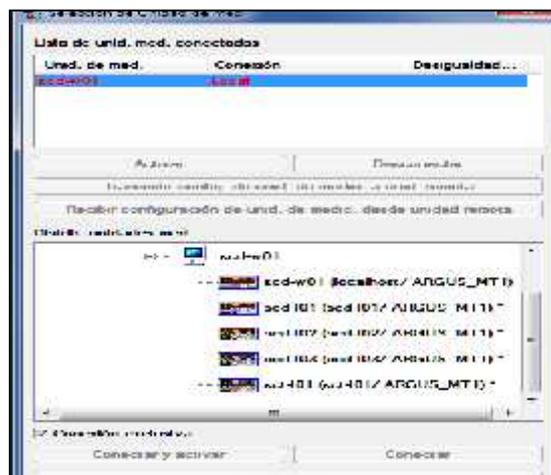


Figura 18-1.- Estaciones SACER de la Coordinación Zonal 3 (antes Intendencia Regional Centro).

Fuente.- SACER – R&S ARGUS

1.3.3 Antenas del SACER

Las antenas instaladas en cada estación del SACER son las siguientes:

Tabla 11-1.- Antenas del SACER

TIPO	CARACTERÍSTICAS	IMAGEN
HE500	Monitoreo de señales polarizadas verticalmente. (FM, fijo-móvil)	
ADC2300	Recepción omnidireccional. Monitoreo de señales polarizadas horizontalmente. (20 MHz a 3 GHz)	
ADD295	Mediciones de radiogoniometría (determinar la dirección de origen de una señal de radio). Monitoreo de señales con polarización vertical. (20 MHz a 3 GHz)	

Fuente.- Cuadernillo N.- 6 de la SUPERTEL

1.3.4 Mediciones en el SACER

El objetivo del sistema SACER es realizar mediciones de las señales del espectro radioeléctrico y así mantener un control constante de las mismas. Dependiendo de diferentes aspectos, las mediciones que se pueden realizar son las que se listan a continuación:

1.3.4.1 Tipos de mediciones

Según el modo de medición

Medición Directa.- El software R&S ARGUS dispone de una barra de herramientas, para realizar mediciones directas, por ejemplo: rastreo de lista de frecuencias, panorama goniométrico, etc.



Figura 19-1.- Mediciones directas del SACER

Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Medición Manual.- Para realizar una medición manual hay que seleccionar la antena correspondiente, elegir la medición deseada, según el objeto de medición, y configurar los parámetros básicos de medición.

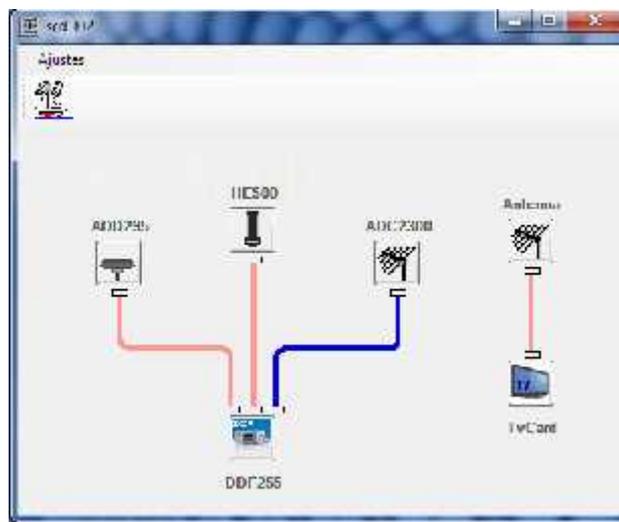


Figura 20-1.- Selección de antenas del SACER para medición directa

Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Medición Automática o Programada.- Para crear una tarea es necesario establecer: horario, rango, antena a utilizar, y lista de frecuencias a monitorear.

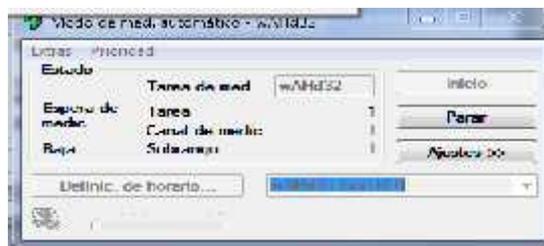


Figura 21-1.- Medición Automática Programada

Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Según el objeto de medición

Medición de ancho de banda.- Para medir el ancho de banda de una señal de radiodifusión FM, se selecciona la antena HE500, y la medición PSCAN. Las consideraciones fundamentales para esta medición, tomando como ejemplo la medición de ancho de banda de la estación de radiodifusión FM 88,1 MHz, serían:

Tabla 12-1 Parámetros para medición de AB

Detector	Ancho de Banda FI	Modo video Modo FI	Marcador	Ferc. Central	Span	No. de rastreos
Peak	120 kHz	MaxHold	88,1	88,1	300 kHz	10/ 100/ 1000

Fuente.- Instructivo SACER.

Este ejemplo de medición de ancho de banda se muestra en la siguiente figura:

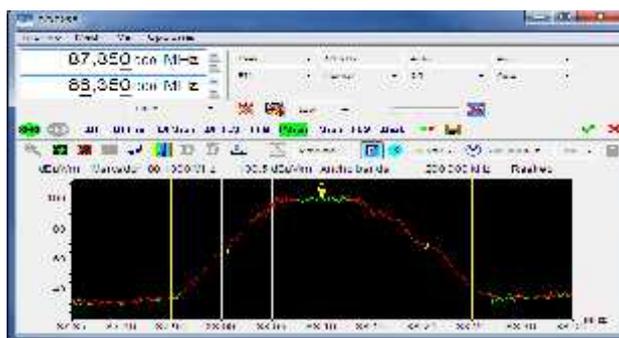


Figura 22-1.- Medición de Ancho de Banda

Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Monitoreo de escucha.- Para realizarlo, se selecciona la antena HE500, y la medición FFM. Las consideraciones fundamentales para esta medición, tomando como ejemplo el monitoreo de escucha de la radiodifusión FM 88,1 MHz, serían las siguientes:

Tabla 13-1 Parámetros para monitoreo de escucha

Detector	Ancho de Paso FI	Ancho de Banda FI	Modo video Modo FI	Ferc. Central	Span de FI	Parámetros
Peak	1 o 2 kHz	120 kHz	MaxHold	88,1	500 kHz	Normal y Audio

Fuente.- Instructivo SACER

Este ejemplo de monitoreo de escucha puede apreciarse en la siguiente figura:

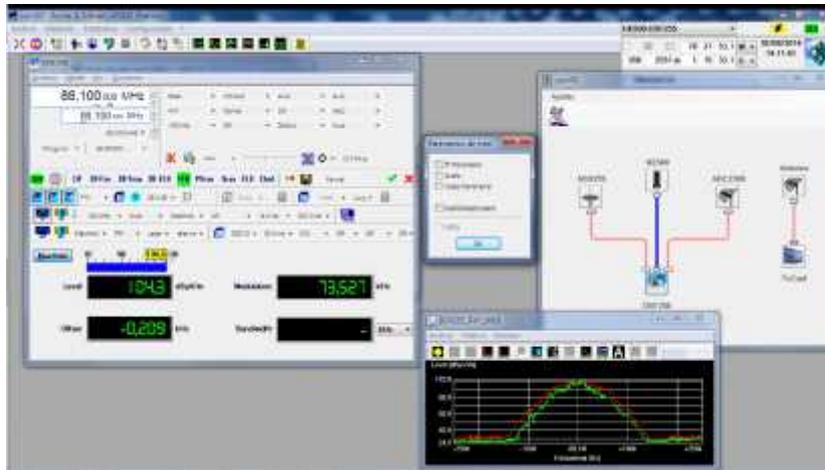


Figura 23-1.- Monitoreo de escucha
Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Monitoreo de lista de frecuencias.- Con este tipo de medición, es posible medir simultáneamente la lista de frecuencias seleccionada, de las listas de frecuencias de la base de datos del SACER. Para ello se selecciona la medición FLS, y la lista de frecuencias. Un ejemplo de monitoreo de lista de frecuencia se muestra en la siguiente figura, monitoreando la lista FM-CHIMBORAZO:

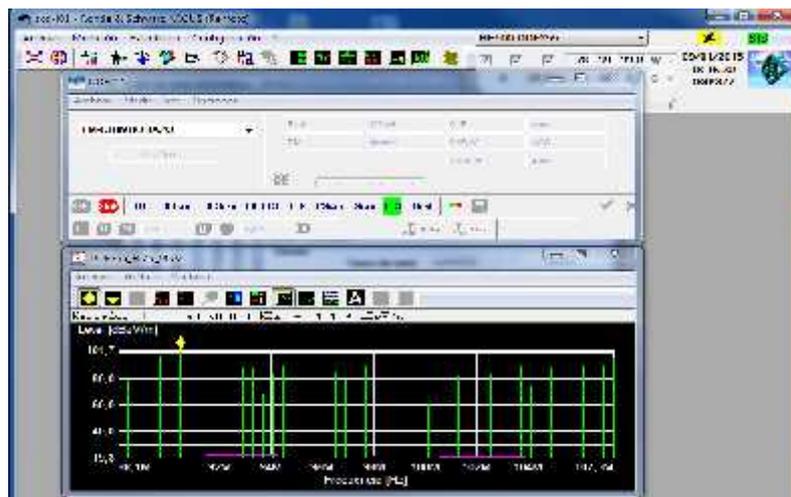


Figura 24-1.- Monitoreo de lista de frecuencias
Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Monitoreo RDS.- Con este monitoreo se busca identificar las estaciones de radiodifusión que implementan RDS. A continuación se visualiza el monitoreo de 2 radiodifusoras FM a manera de ejemplo, 105,3 MHz, y 88,1 MHz, encontrando que la primera implementa RDS, mientras la segunda no.

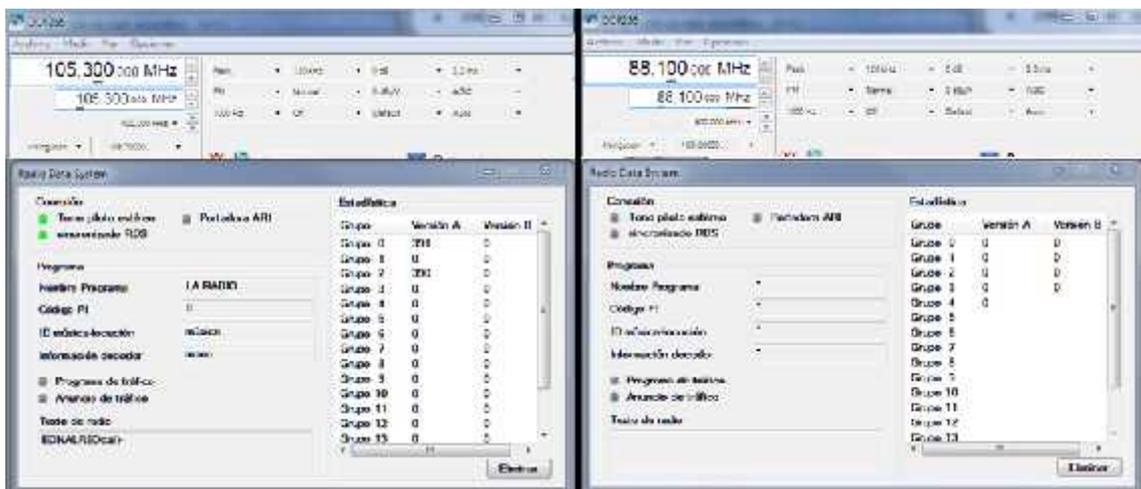


Figura 25-1.- Monitoreo con detección de RDS: positiva (izquierda), negativa (derecha)

Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Monitoreo de transmisión de TV.- Para el monitoreo de TV se utiliza la antena ADC2300 (TvCard), y la frecuencia que se debe ingresar es la frecuencia de la portadora de video del canal a monitorear.

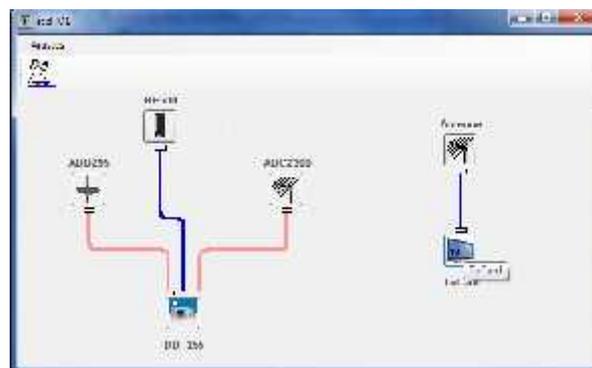


Figura 26-1.- Selección de Antenas del SACER para medición de TV

Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Como ejemplo, se muestra el monitoreo de TV del canal 6, el resultado se muestra a continuación:



Figura 27-1.- Monitoreo de TC Televisión
Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Radiogonometría.- La radiogonometría se utiliza para determinar la ubicación del transmisor de una señal detectada, comúnmente se utiliza para detectar señales emitidas ilegalmente.

1.3.4.2 Gestión de resultados de mediciones

Guardar archivos

Cada archivo obtenido puede conservarse, esto dependerá de los parámetros configurados en la medición, así por ejemplo, en el caso de guardar un monitoreo de escucha, se obtienen dos archivos, uno con los niveles de medición y uno con el audio, como se aprecia a continuación:

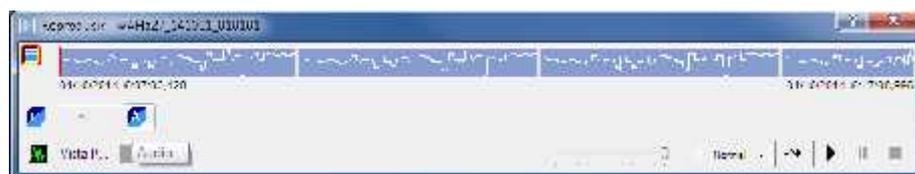


Figura 28-1.- Archivo de audio
Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Un archivo de medición incluye: fecha y hora de cada medición, frecuencia establecida, y nivel medido; según los parámetros configurados en la medición puede incluir otros datos, por ejemplo en la medición de cobertura: nivel de señal a ruido.

Fecha + Hora	Frecuencia (MHz)	Nivel (dBm/W)	Audio (Índice)
01/10/2014 6:07:03.426	RR: 000000	80,2	0
01/10/2014 6:07:03.649	RR: 000000	80,1	104
01/10/2014 6:07:03.827	SS: 000000	80,2	10,79
01/10/2014 6:07:04.059	SS: 000000	79,7	1483
01/10/2014 6:07:04.276	RR: 000000	80,2	1099
01/10/2014 6:07:04.492	RR: 000000	80,1	2010
01/10/2014 6:07:04.707	SS: 000000	80,2	2,734
01/10/2014 6:07:04.911	SS: 000000	79,8	3,172
01/10/2014 6:07:05.119	RR: 000000	80,1	3464
01/10/2014 6:07:05.335	RR: 000000	80,1	3295
01/10/2014 6:07:05.548	SS: 000000	80,1	4343
01/10/2014 6:07:05.756	SS: 000000	80,1	4756
01/10/2014 6:07:05.970	RR: 000000	80,1	5011
01/10/2014 6:07:06.186	RR: 000000	80,1	5604
01/10/2014 6:07:06.397	SS: 500000	73,2	8065
01/10/2014 6:07:06.598	SS: 500000	73,4	8477
01/10/2014 6:07:06.807	RR: 500000	73,1	8212
01/10/2014 6:07:07.022	RR: 500000	72,6	7146
01/10/2014 6:07:07.233	SS: 500000	73,3	7633
01/10/2014 6:07:07.441	SS: 500000	73,3	8289
Último resultado			
01/10/2014 6:07:03.426	RR: 000000	80,2	

Figura 29-1.- Archivo de medición
Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Al guardar las mediciones, se puede realizar lo siguiente:

Obtener gráficas.- Trazador YT, Diagrama cartesiano, Diagrama en cascada 3D, y Diagrama en cascada 2D.

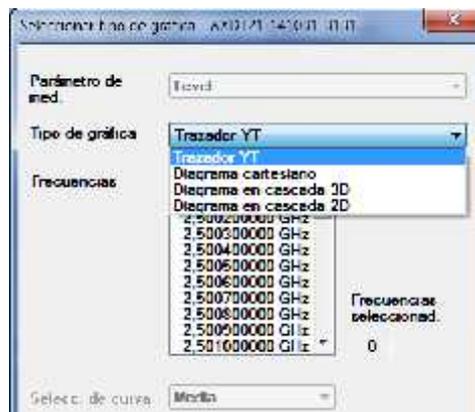


Figura 30-1.- Tipo de gráfica en el SACER
Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Procesar los archivos de medición.- El procesamiento de archivos, permite manipular los resultados obtenidos, de acuerdo a lo que se necesite: limitar los rangos de medición, limitar el rango de frecuencias, obtener los valores máximos medidos, establecer estadísticas de ocupación, etc.

A manera de ejemplo, se visualiza la ventana de procesamiento a continuación:

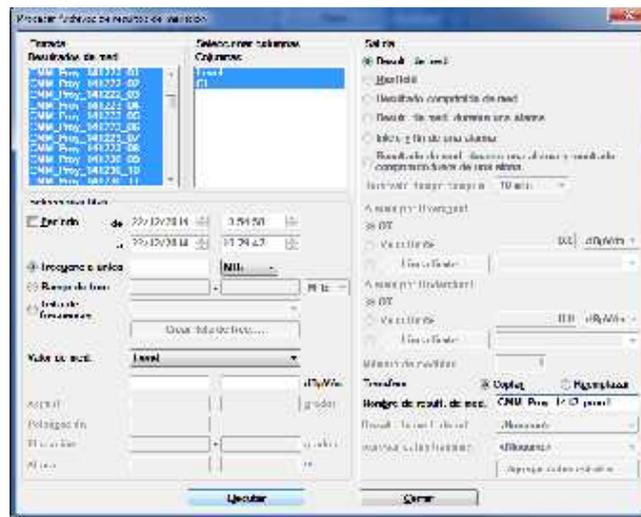


Figura 31-1.- Procesamiento de archivos de medición
Fuente.- SACER – R&S ARGUS

Exportar los archivos de medición.- R&S ARGUS ofrece la facilidad de compartir los archivos de mediciones con diferentes formatos, compatibles con múltiples plataformas.

En formato .xls.- Todo archivo de medición puede ser exportado a hojas de cálculo, el nuevo archivo incluirá: fecha y hora de cada medición, frecuencia o frecuencias medidas, resultados de medición, y datos generales del archivo de medición. En el caso de exportar a una hoja de cálculo, un archivo procesado, incluirá los datos informativos de cada archivo considerado para generarlo.

En formato .exp.- Para poder manipular los archivos de medición obtenidos en la EM, estos deben ser exportados a una unidad de almacenamiento externo, e importados en la estación scd-w01.

En formato MP3.- Al utilizar la modalidad de medición de escucha, es posible grabar audio en tiempo real, el cual puede ser, finalmente, exportado de R&S ARGUS en formato MP3 de uso universal.

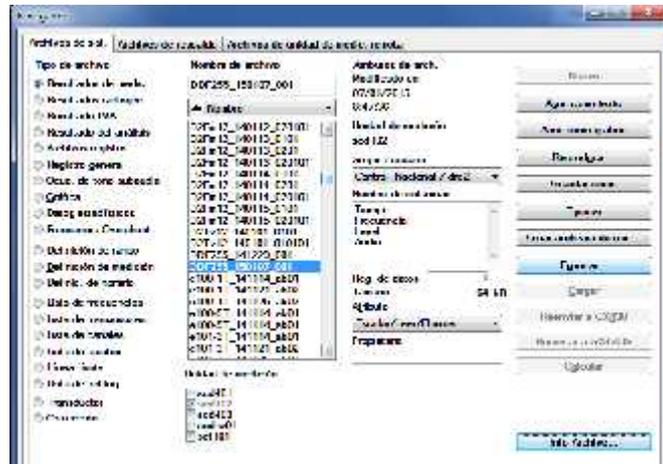


Figura 32-1.- Ventana de exportación de archivos
Fuente.- SACER – R&S ARGUS

1.3.5 EM del SACER

El sistema SACER requiere analizar todas las señales electromagnéticas presentes en el medio, por lo cual cuenta con la EM que es una unidad móvil con un sistema de medición a bordo. La EM cuenta con todas las características y funcionalidades de las unidades fijas a nivel nacional, además de la funcionalidad de medición de cobertura.

1.3.5.1 Proceso de encendido del sistema

El proceso de encendido del sistema a bordo es el siguiente.

- Iniciar los sistemas de alimentación y protección contra descargas, en donde se volvía imprescindible realizarse en el orden adecuado por cuestión de eficiencia. La energía que alimentará al sistema proviene del mismo sistema eléctrico del vehículo, pero necesita ser adaptada adecuadamente, para esto, el inversor de onda senoidal transforma la señal de corriente continua entregada por el vehículo en una señal de corriente alterna que alimentará al dispositivo DDF255.



Figura 33-1.- Sistema de alimentación e inversor de onda senoidal de la EM

Fuente.- Fotografía EM

- En caso de que el vehículo no pueda proveer de energía por más tiempo al sistema, y para evitar daños en el mismo y/o pérdida de los datos que contiene, la EM consta de un UPS, el cual provee de energía de respaldo a los dispositivos de medición por un lapso de tiempo suficiente para que el usuario guarde la información con la que se encuentra trabajando y apague el sistema adecuadamente. Además de esto provee cierto nivel de purificación de la señal, dependiendo del sistema de alimentación al que esté conectado (generador, red comercial, inversor), que protegerá a los dispositivos conectados, en este caso, el DDF255, el sistema GPS, el computador portátil, y un switch de interconexión.



Figura 34-1.- Sistema de protección de potencia DIAF, apagado (arriba) y en funcionamiento (abajo)

Fuente.- Fotografía EM

- Se procede a encender el DDF255, el cual permite ser configurado directamente con sus controles y también remotamente mediante el software ARGUS embebido en la computadora. En el caso de estas mediciones la configuración se realizó directamente, por tanto solo fue necesario el encendido manual del DDF255 que conserva la última configuración utilizada. El software ARGUS es compatible con Windows, que también es el sistema operativo dentro del DDF255.



Figura 35-1.- DDF255 en estado de espera luego de ser encendido
Fuente.- Fotografía EM

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Mediciones

2.1.1 Evaluación del entorno de medición

El entorno de medición se compone del sistema de comunicaciones y el área donde se realizó la campaña de mediciones. Por tanto, se analizan los tres elementos involucrados: las estaciones de radiación (Transmisor), la EM del SACER (Receptor) y el entorno de la ciudad de Riobamba (entorno)



Figura 1-2.- Representación del Sistema de comunicación
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Radio Mobile.

2.1.1.1 Visita al Cerro Hignug Cacha y Análisis de los sistemas de Radiación

Cada sistema de radiación de las estaciones de radiodifusión está compuesto básicamente por un amplificador de señal, conectores, cables y antenas. Se buscan los equipos seriados, para tener acceso a su hoja de especificaciones. Bajo esta premisa y con el apoyo de ARCOTEL se realizó una visita al cerro Hignug Cacha para realizar una inspección a los equipos de las

radiodifusoras, y obtener información sobre: Equipos amplificadores, Conectores, Filtros (de existir alguno), Cables, Antenas, Altura de las antenas y otros datos que pudieran ser útiles para el proceso.

Toda esta información se utilizará en un balance de potencias, esencial para la formulación del modelo estadístico de propagación, aquí también nace la necesidad de considerar los equipos y antenas con número de serie, ya que se requieren datos confiables para el proceso y la mayoría de concesionarios utilizan antenas de elaboración nacional que no garantizan la exactitud de los valores de potencia radiados lo cual ocasionaría errores en el modelo final. Siendo éste, un importante criterio de selección de frecuencias para la medición.

De acuerdo a la disponibilidad del personal de cada radiodifusora, se planificó la inspección para los días lunes 05 y martes 06 de enero del 2015, ordenándose de la siguiente manera:

Tabla 1-2.- Planificación de horarios de Inspección

Lunes, 05 de enero 2015		Martes, 06 de Enero de 2015	
Estación	F(MHz)	Estación	F(MHz)
Mundial FM	96,1	ERPE FM	91,7
Alegría FM	98,5	Futura	104,9
Caracol FM Stereo	91,3	Puntual FM	99,7
Bonita FM	93,7	Tricolor FM	97,7
Panamericana FM	106,9	Súper Stereo FM	93,3
Católica Nacional FM	105,7	Riobamba Stereo	89,3
Rio FM	95,7		

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

En las fechas fijadas para la jornada de inspecciones, el orden en que se realizó variaba dependiendo del orden de llegada de los encargados de las estaciones de radiodifusión concesionarias, lo cual no altera los resultados, así que se procedió sin mayores contratiempos.

En cada estación se recopilaron los datos mencionados anteriormente y se capturaron imágenes para constancia y respaldo del procedimiento.

A manera de ejemplo se muestran las fotografías del caso de la estación Riobamba Stereo (89,3MHz).



Figura 2-2.- Equipo Amplificador: imagen frontal (izquierda) y acercamiento (derecha)

Fuente.- Estación de Radiodifusión Riobamba Stereo (89,3MHz)



Figura 3-2.- Conectores (izquierda) y cable coaxial (derecha)

Fuente.- Estación de Radiodifusión Riobamba Stereo (89,3MHz)



Figura 4-2.- Arreglo de antenas de radiodifusión FM

Fuente.- Estación de Radiodifusión Riobamba Stereo (89,3MHz)

Los datos recogidos se muestran ordenados en la siguiente tabla, en la que se puede hallar también información correspondiente a la ubicación geográfica de la antena transmisora de cada estación, que servirá para cálculos posteriores.

Tabla 2-2.- Resultados de inspección a estaciones de Radiodifusión del Cerro Cacha

Listado de Estaciones de radiodifusión inspeccionadas						
Nombre	Frecuencia (MHz)	Ubicación Geográfica			Equipo Marca/Modelo	Potencia Utilizada (W)
		Latitud	Longitud	Altura Base (msnm)		
Riobamba Stereo	89,3	01°41'31,65"S	78°42'59,42"W	3556	RVR PI1000M	936
Caracol	91,3	01°41'30,62"S	78°42'57,62"W	3527	RVR TEX100	83
ERPE	91,7	01°41'32,47"S	78°43'00,98"W	3526	NAUTEL NARF07/ FCC B3WFM3-5	1000
Súper Stereo	93,3	01°41'30,88"S	78°42'57,47"W	3530	RVR TEX1000-LCD	930
Bonita	93,7	01°41'30,62"S	78°42'57,62"W	3527	OMB-AM250S	209
Rio FM	95,7	01°41'31,11"S	78°42'58,40"W	3531	RVR TEX 1000 LIGHT	908
Mundial	96,1	01°41'30,62"S	78°42'57,62"W	3527	OMB-AM1000	752
Tricolor	97,7	01°41'30,95"S	78°42'57,98"W	3548	PI1000-C/PFL	1020
Alegría	98,5	01°41'30,62"S	78°42'57,62"W	3527	RVR TEX300	225
Puntual	99,7	01°41'31,64"S	78°42'58,32"W	3523	ABS ATV 050SSFm	400
Latina	102,1	01°41'30,02"S	78°42'56,39"W	3515	ELETRONICA MIZAR FM	837
Futura	104,9	01°41'31,64"S	78°42'58,32"W	3523	RVR TEX1000-LCD	670,8
Católica	105,7	01°41'31,11"S	78°42'58,40"W	3531	NAUTEL NARF06/ NAC57A	1000
Panamericana	106,9	01°41'30,62"S	78°42'57,62"W	3527	RVR TEX1000-LCD	402

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

Los datos sobre la ubicación de las antenas transmisoras (latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar), fueron tomados con una aplicación GPS embebida en un sistema ANDROID, que brinda un servicio de gran exactitud en un rango de 30 metros.

Tabla 2-2.- Resultados de inspección a estaciones de Radiodifusión del Cerro Cacha (Continuación)

Listado de Estaciones de radiodifusión inspeccionadas								
Nombre	Antena			Cable			Conector	Observaciones
	Tipo	Número	Altura Torre (m)	Tipo	Medida (Plg)	Longitud (m)		
Riobamba Stereo	RVR ACP1	4	30	Andrew Helix LDF 4-50 A	7/8	27,5	Flange L44R 7/8	
Caracol	C_Nacional	4	48	Andrew Helix LDF 4-50 A	1/2	51,5	Tipo N	
ERPE	Nautel Shevel	4	48	Andrew Helix RG-319 A/V	1 5/8	39	EIA Flange 7/8	
Súper Stereo	RVR Ferrara ACP 0X42	4	42	Andrew Helix LDF 5-50 A	7/8	51,5	EIA Flange 7/8	
Bonita	C_Nacional	4	48	Andrew Helix LDF 4-50 A	1/2	46	Tipo N	
Rio FM	RVR ACP1	4	15	Draka RFA	1/2	15,5	EIA Flange 7/8	
Mundial	C_Nacional	4	33	Andrew Helix LDF 4-50 A	1/2	34,5	EIA Flange 7/8	
Tricolor	RVR ACP1	4	48	Andrew Helix	7/8	39	Flange L45R 7/8	
Alegría	C_Nacional	4	48	Andrew Helix LDF 4-50 A	1/2	47	Tipo N	
Puntual	Nacional	4	26	Andrew Helix LDF 4-50 A	1/2	22,5	Tipo N	
Latina	RVR ACP1	4	30	HFE 12D LS	1/2	31	Tipo N	
Futura	C_Nacional	4	35	Andrew Helix LDF 5-50 A	7/8	30,5	Flange	Perdida por filtro -0.8 dB
Católica	C_Nacional	4	27	Andrew Helix LDF 4-50 A	7/8	24,5	EIA Flange 7/8	Filtro ADR-01/EF/2/CC1 SIRA CFM4-3/CC
Panamericana	C_Nacional	4	33	Andrew Helix LDF 4-50 A	1/2	34,5	EIA Flange 7/8	

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

2.1.1.2 Evaluación de la EM del SACER

La estación móvil del SACER permite hacer mediciones en movimiento, básicamente es un sistema de recepción y monitoreo montado sobre un vehículo.

Aquí se enfatizan los elementos utilizados en el desarrollo del proyecto conjuntamente con sus características. La EM está funcionando como el sistema receptor del sistema de comunicaciones FM; la antena que utiliza en este caso es la HE500 conectada al DDF255, mediante dos conectores tipo N y un cable coaxial tipo RG10 de 3 metros. Los datos técnicos de relevancia para el proyecto se detallan a continuación:

Tabla 3-2.- Tabla de especificaciones de la antena HE500 – EM del SACER

Antena HE500	
Rango de Frecuencias	20 MHz to 3 GHz
Polarización	vertical
Factor de la antena $k = 20 \lg (E/V_{out})$	22,5 (a 100 MHz)
Conector	Tipo N
Impedancia	50

Fuente.- Documento de información técnica antena HE500.
http://www.itc.ku.edu/~callen/active_antennas/Rohde&Schwarz_HE500_Tech_Info.pdf

Tabla 4-2.- Tabla de especificaciones de cable y conectores – EM del SACER

Cable y conectores (1/2 pulgada)			
Conector tipo N		Cable coaxial tipo RG10	
Impedancia	50	Impedancia	50
Pérdidas de inserción	0.15 dB max a 10 GHz	Atenuación a 20°C	6,25 dB/100m
VSWR	1.3 max. 0–11 GHz		

Fuente.- Documentos de información técnica
Conector N.- <http://www.amphenolconnex.com/media/downloads/5653/n-type.pdf>
Cable RG10.- <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Tabla-cable-coaxial.php>

2.1.1.3 Entorno de la ciudad de Riobamba

La información referente a las características de la ciudad de Riobamba es un factor importante en el momento de definir factores de corrección para el modelo de propagación.

Riobamba

Riobamba es la capital de la provincia de Chimborazo, situada en el centro del Ecuador, se encuentra en el valle del río Chambo de los Andes. Ubicada a 200 km al sur de Quito, capital del Ecuador y está ubicada en 2754 metros de la Avenida de los Volcanes. La ciudad es un importante centro de transporte regional, así como una parada en la carretera Panamericana que atraviesa Ecuador. Riobamba se erige como una de las ciudades más grandes en la parte central de la región de la Sierra del Ecuador. (Información ciudad de Riobamba, 2015)

Geografía y clima.- Riobamba se encuentra en el centro del país, en la región de la sierra, en las cercanías del volcán Chimborazo. Al igual que muchas ciudades del Ecuador, Riobamba tiene una temperatura casi constante durante todo el año, con una estación húmeda y una seca. Su altitud y cercanía al Chimborazo dan a la ciudad un clima fresco todo el año, con temperaturas promedio de entre 23° C y 14° C.

Orografía: La topografía es parcialmente irregular con alturas que oscilan entre 2740 y 2900 metros. La orografía del sector de la ciudad se representa por planicies con elevaciones leves y uniformes.

Cotas extremas: 2740 y 2900 msnm.

Hidrografía: No existen ríos que atraviesen la ciudad. El río Chibunga rodea el sector suroeste de Riobamba.

Red Vial: La red vial es numerosa, cuenta con carreteras pavimentadas de dos o más vías, carreteras sin pavimentar de dos o más vías, un pequeño tramo del ferrocarril Riobamba-Bucay.



Figura 5-2.- Ubicación de la Ciudad de Riobamba en el Ecuador
Fuente.- EcosTravel destinos, Riobamba Ecuador
http://server.ecostravel.com/imagenes/map_riobamba.jpg

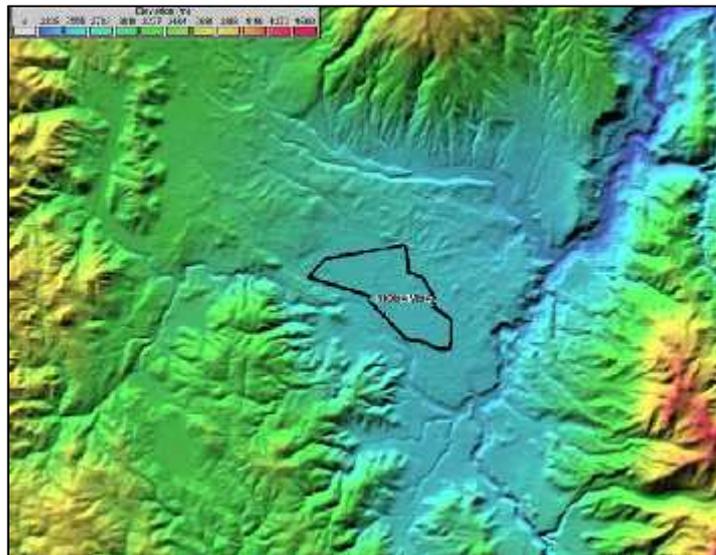


Figura 6-2.- Mapa del Relieve de la ciudad de Riobamba
Fuente.- Software RadioMobile
http://www.igm.gob.ec/cms/files/cartabase/enie/ENIEIV_E2.html

2.1.2 Selección de estaciones radiodifusoras para las mediciones

Las metas buscadas en la recopilación de datos son las siguientes:

- Confiabilidad de los datos obtenidos.
- Evitar redundancia de datos.
- Utilización eficiente de los recursos asignados para esta labor.

A fin de cumplir dichas metas fue necesario elegir adecuadamente las fuentes de información, que en este caso eran las radiodifusoras, en la ciudad de Riobamba existen 42 emisoras en funcionamiento como se indica en la Tabla 6-1, de las cuales se tomarán las que cumplan los siguientes criterios:

- Estaciones de radiodifusión cuya estación principal de radiación se encuentre en el cerro Hignug Cacha.
- Estaciones de radiodifusión cuyos equipos tengan número de serie y permitan el acceso a las hojas de especificaciones técnicas.

El objetivo principal de la primera condición es recoger información de señales de radio que no han sido previamente repetidas o amplificadas en otras estaciones de radiación, dado que cada uno de estos procesos podrían ocasionar degradación de la señal, afectando la confiabilidad de los datos que se pudieran obtener de estas estaciones. Varias estaciones cumplieron con este requerimiento, y se indican en el cuadro siguiente:

Tabla 5-2.- Radiodifusoras con estación principal en el Cerro Hignug Cacha

Nombre Estación	Frecuencia (MHz)	Nombre Estación	Frecuencia (MHz)
Radio Pública	88,1	Alegría FM	98,5
Romance	88,5	Hola FM	98,9
Rumba Stereo FM	88,9	Puntual FM	99,7
Riobamba Stereo	89,3	Buen Sembrador	100,1
Stereo Mundo KBM	90,5	La voz del Volcán	100,9
Caracol FM Stereo	91,3	Ternura FM	101,3
ERPE FM	91,7	La voz de AIIECH	101,7
Fantástica FM	92,1	Cumbre FM (Turbo)	102,5
Sistema 2 FM	92,9	Sensación Stereo	102,9
Súper Stereo FM	93,3	Sonorama FM	103,7
Bonita FM	93,7	Paz y Bien FM	104,5
Stereo Buenas Nuevas	95,3	Futura	104,9
Rio FM	95,7	Radio Legislativa	105,3
Mundial FM	96,1	Católica Nacional FM	105,7
Sol 96	96,5	Andina FM	106,1
Amor FM Stereo	96,9	Panamericana FM	106,9
Tricolor FM	97,7	Stereo Familiar	107,3

Fuente.- Base de datos del SACER (ARCOTEL)

Para verificar que se cumpla la segunda condición indicada fue necesario tener acceso a los sistemas de radiación, para lo cual se contó con el respaldo de ARCOTEL, entidad que promovió el desarrollo del proyecto, consiguiendo el ingreso a las estaciones de radiación de algunas estaciones presentes en la tabla anterior (**Tabla 5-2**).

Los resultados de dicho proceso se encuentran en la **Tabla 2-2**, de donde se seleccionaron las radiodifusoras cuyas antenas cuentan con una marca reconocida y una serie, con las cuales se pueda acceder a la hoja de especificaciones para obtener datos técnicos.

De ésta manera las emisoras a considerar para el posterior análisis fueron las siguientes:

Tabla 6-2.- Radiodifusoras seleccionadas para la recolección de datos

Nombre Estación	Frecuencia (MHz)
Riobamba Stereo	89,3
ERPE FM	91,7
Súper Stereo FM	93,3
Rio FM	95,7
Tricolor FM	97,7

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

Es importante mencionar que de acuerdo a la disponibilidad de equipos y personal de las estaciones de radiodifusión, se acordó realizar las mediciones antes de la inspección al Cerro Hignug Cacha, por lo cual las señales que fueron medidas realmente corresponden a todas las de la Tabla 5-2, y que luego, para la realización del trabajo, simplemente se extrajo las seleccionadas en la Tabla 6-2. Dicho proceso no representó ninguna dificultad extra, ni desperdicio de recursos.

2.1.3 Configuración de la EM del SACER

Para iniciar con el proceso de las mediciones se requiere de la configuración adecuada del sistema de recepción. Una medición con la EM, es muy similar a una medición con cualquiera de las ERT, sin embargo, se debe considerar que en el caso de este proyecto se utilizaron los siguientes criterios:

- Se utilizaron mediciones manuales, para mantener la secuencia del recorrido deseado, concatenando cada medición nueva con la anterior inmediata.
- Se utilizó monitoreo de lista de frecuencias, con la lista de frecuencias creada según los requerimientos de este estudio.
- Los archivos guardados fueron archivos de medición.

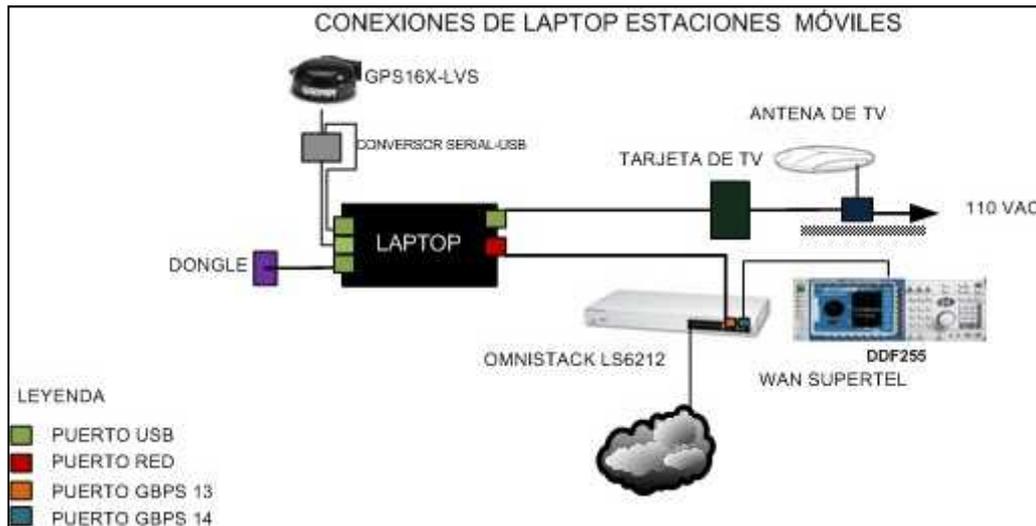


Figura 7-2.- Diagrama de interconexión de equipos para mediciones
Fuente.- Manual SACER. Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015.

Dicha configuración permite realizar mediciones periódicas de las frecuencias seleccionadas en la banda de radiodifusión FM. Básicamente el funcionamiento es el siguiente:

- La antena HE500 recibe las señales FM mientras el vehículo está en movimiento y envía la información al DDF255.
- El dispositivo DDF255 procesa las señales, las muestra en función de la frecuencia y las envía al computador portátil.
- El sistema receptor de GPS, en sincronía con el DDF255, recoge muestras de la ubicación geográfica precisa en donde se mide la intensidad de campo eléctrico y las envía también al computador.



Figura 8-2.- Sistema receptor de GPS Rohde & Schwarz
Fuente.- Archivo especificaciones R&S@TSMX-PPS2 GPS Module.
https://cdn.rohdeschwarz.com/pws/product/tsmx_pps2/TSMX_PPS2_img_lightbox_landscape.jpg

- El computador portátil recibe la información desde el DDF255, las muestra en función del espectro y puede decodificarlas, a la vez combina los datos del GPS con las señales decodificadas y las empareja, los resultados se muestran tanto gráfica como numéricamente gracias al software ARGUS y a MapView.

Luego del proceso de encendido, detallado dentro del punto 1.3.5, se estableció la configuración del sistema con el siguiente método:

Para iniciar es necesario abrir el software ARGUS y seleccionar la opción **Conectar**, en la pestaña **Archivo** para tener conexión en la red del SACER, en la cual se encuentran interconectados todos los equipos con el software instalado en el país, pero el acceso es restringido de acuerdo a la jerarquía de los profesionales encargados.

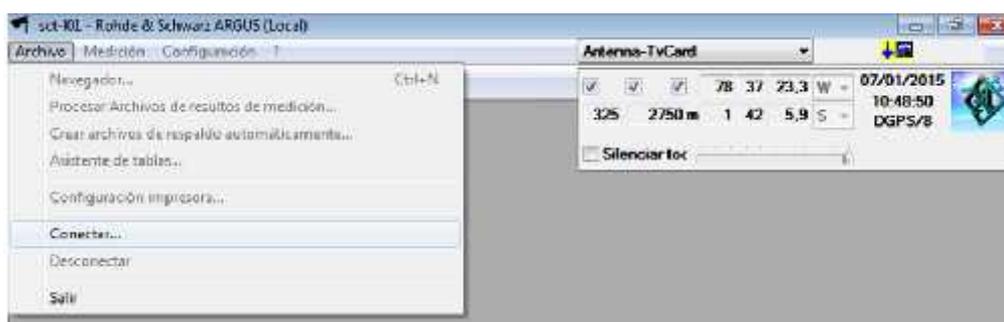


Figura 9-2.- Pantalla de inicio R&S ARGUS
Fuente.- Captura de pantalla, equipo de cómputo a bordo (EM)

Se abre una ventana en la que el encargado inicia una sesión con su respectivo usuario y contraseña, los permisos del usuario **drc2** eran suficientes para realizar las mediciones que se

necesitaron. A mayor complejidad o sensibilidad del proceso a realizar, se necesitan de más permisos y por tanto de mayor jerarquía de usuario.

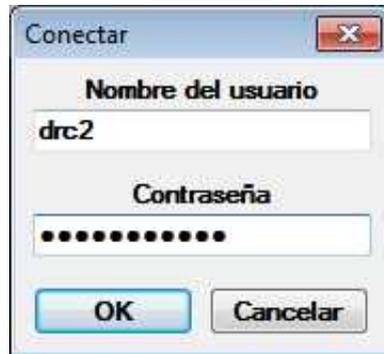


Figura 10-2.- Ventana inicio de sesión R&S ARGUS
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

Las demás opciones de la barra de tareas se activan una vez iniciada la sesión, se procede a seleccionar el **Modo medición de Cobertura** en la pestaña **Medición** también se puede acceder con la tecla de acceso rápido F3.

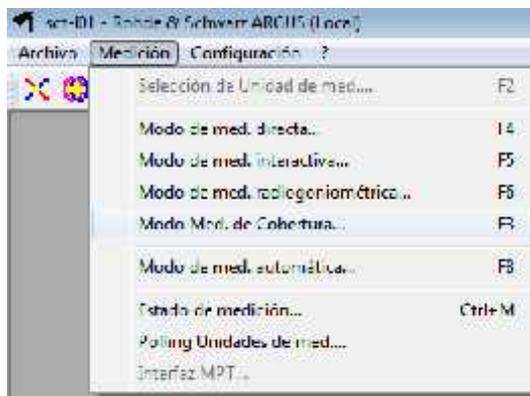


Figura 11-2.- Selección de modo medición de Cobertura
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

En la ventana emergente los parámetros de frecuencias a medir, el tipo de estándar, la antena a utilizarse entre otros, pueden modificarse y elegirse a conveniencia, en el caso de este proyecto fue necesario seleccionar la lista de frecuencias FM_proyecto, creada anteriormente según las frecuencias elegidas que se detallaron en la Tabla 6-2.

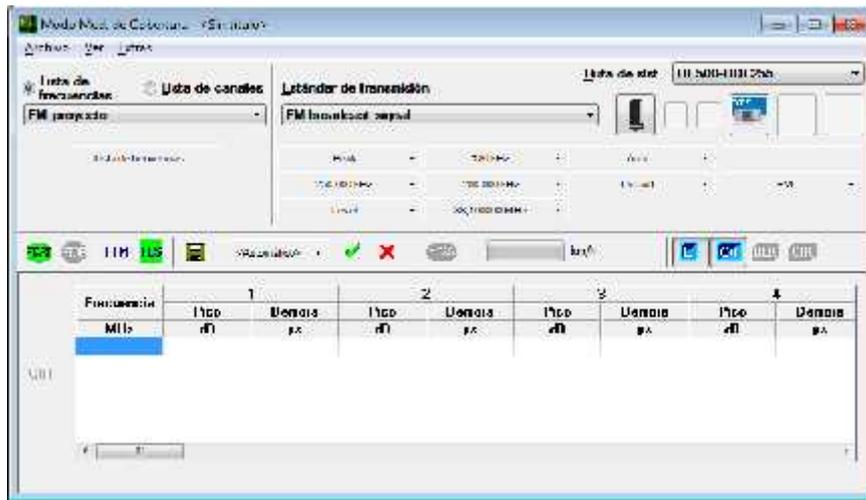


Figura 12-2.- Ventana emergente. Modo medición de cobertura R&S ARGUS
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

En la sección superior izquierda de la ventana se pueden elegir entre dos opciones, Lista de frecuencias y Lista de canales, bajo las opciones se encuentra un botón **Lista de frecuencias** en donde se pueden ingresar manualmente las frecuencias a medirse, creando la lista de frecuencias según el caso.

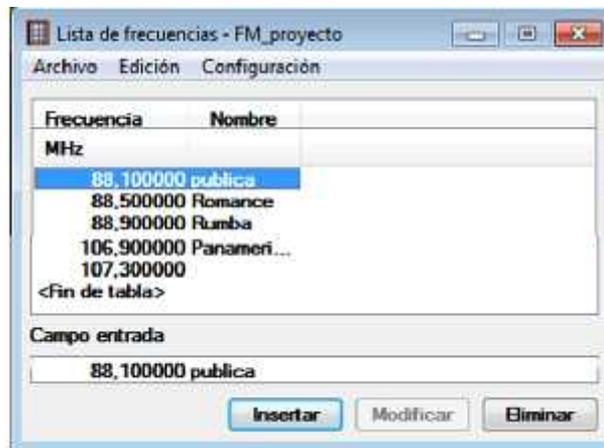


Figura 13-2.- Lista de frecuencias a monitorear
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

En la parte central el **Estándar de transmisión** que debe elegirse es **FM broadcast signal** porque las señales a medirse fueron señales de radiodifusión FM. Los parámetros en la parte inferior se dejan por defecto porque son los óptimos para la medición que se realizará.



Figura 14-2.- Selección del Estándar de Transmisión que se va a recibir en las mediciones

Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

La ruta del sistema nos indica el tipo de antena que se utilizará y el dispositivo que procesará la señal, en este proyecto la antena a usarse fue la HE-500 y el dispositivo el DDF255, por tanto la opción a elegir es **HE500-DDF255** y automáticamente la simbología de ambos aparece en la parte inferior tanto de la antena como el DDF255.



Figura 15-2.- Selección de sistema de recepción de señales

Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

Hay que elegir los parámetros a medirse en la jornada, que en este caso fueron el nivel de intensidad de campo eléctrico (**L**) y la relación de portadora/interferencia (**C/I**), datos esenciales para el proceso.

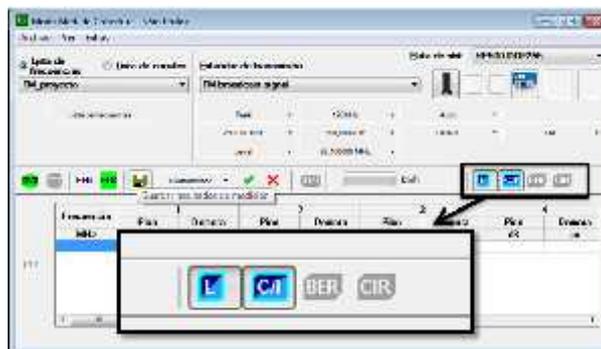


Figura 16-2.- Selección de parámetros a medirse

Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

EL software R&S ARGUS permite recolectar datos de señales inalámbricas, y almacenarlas en el equipo, para hacerlo hay que seleccionar el botón de guardado, similar a un diskette de 3 1/2, acción que abrirá la ventana de opciones para el archivo que guardará los datos recogidos



Figura 17-2.- Botón de guardado R&S ARGUS
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

En la ventana que aparece se establece el nombre del archivo que tendrá y se acepta con **Guardar como.**

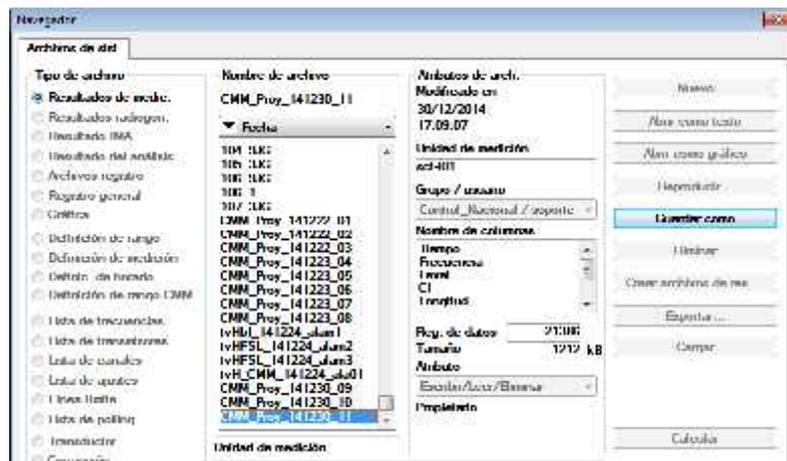


Figura 18-2.- Opciones de guardado. R&S ARGUS
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

Este es el proceso necesario para iniciar correctamente las mediciones en la banda FM. Al momento de iniciar las mediciones hay que dar clic en el botón START de color verde, automáticamente el sistema calcula la posición geográfica de la EM y la grafica en un mapa de Openstreetmap.org, a su vez también muestra la velocidad a la que hay que recorrer el circuito elegido para que todas las estaciones sean medidas en el mismo punto sin retardo considerable.



Figura 19-2.- Mediciones iniciadas en la EM
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

En el caso de las mediciones de este proyecto la EM requería moverse a una velocidad que oscilaba entre los 23 Km/h hasta los 30 Km/h.

Una vez iniciada la medición, R&S ARGUS presenta gráficas en tiempo real de las magnitudes que se encuentran en medición, correspondientes con las estaciones medidas, siendo en este caso el nivel de intensidad de campo eléctrico y la relación Portadora a interferencia C/I, con sus respectivas unidades.

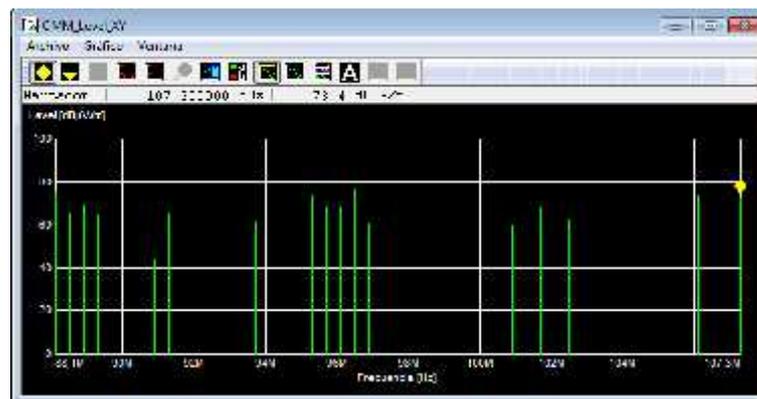


Figura 20-2.- Gráfica en tiempo real Frecuencia (Hz)/Nivel (dBuV/m)
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

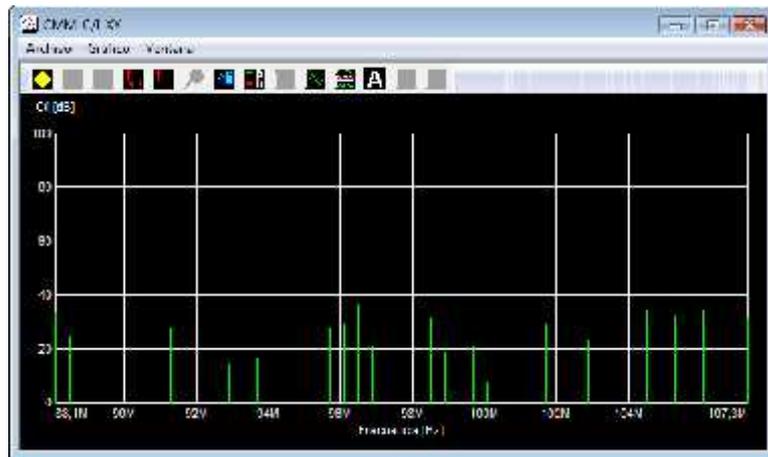


Figura 21-2.- Gráfica en tiempo real Frecuencia (Hz) / C/I (dB)
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

2.1.4 Método de Medición

Las jornadas de mediciones se acordaron para los días lunes 22, martes 23 y martes 30 de diciembre del 2014 de acuerdo con la disponibilidad de la EM. La temperatura oscilaba entre 12 y 20 grados centígrados con el tope máximo al mediodía de 20° C. Las mediciones se realizaron en horario de 09H00 a 17H00 con la finalidad de no alcanzar variaciones acentuadas de temperatura.

Se realizó un recorrido Drive-Test longitudinal de las calles céntricas y perimetrales, utilizando las transversales solo para movilizarse entre calles, y cuando no hay rutas alternativas. Buscando siempre cubrir la ciudad de la manera más uniforme posible para que los datos obtenidos sean fieles a la realidad.

Cabe mencionar que existieron sectores en los que el acceso se mostró difícil o restringido por la falta de caminos o por ser propiedad privada. Un caso especial representa la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo que por razones de que en las fechas programadas de las campañas de mediciones no se encontraba abierta y se tornó imposible realizar las mediciones, pero si en sus alrededores, por lo que son datos igualmente aceptables.

El límite establecido por el sur fue la Avenida 9 de Octubre conocida como “La Circunvalación”, que conjuntamente con: las avenidas Pedro Vicente Maldonado y Leónidas

Proaño establecen un perímetro adecuado para el proyecto, incluyendo del cantón Riobamba, tanto el sector céntrico como sus alrededores, tal como se puede observar en la **Figura 22-22**.



Figura 22-2.- Perímetro elegido para mediciones en la ciudad de Riobamba
Fuente.- Mapa de OpenStreetMap. Modificación propia

El software MapView permite visualizar una representación gráfica en tiempo real del recorrido, obteniendo datos de mapas desde www.openstreetmap.org, y datos de ubicación GPS, así como valores de Intensidad de Campo obtenidos desde el DDF255. Muestra los datos como una línea de recorrido, uniendo puntos contiguos según el orden cronológico, este método hace necesario que cada jornada de medición comience en donde terminó la anterior, para que se pueda mantener el orden de la gráfica.

En las figuras bajo estas líneas se puede visualizar el inicio del recorrido con las avenidas perimetrales cubiertas, y luego con la campaña de medición concluida de la estación de radiodifusión Riobamba Stereo en la frecuencia 89,3 MHz, con su respectiva representación en colores de la escala de nivel de intensidad de campo eléctrico.

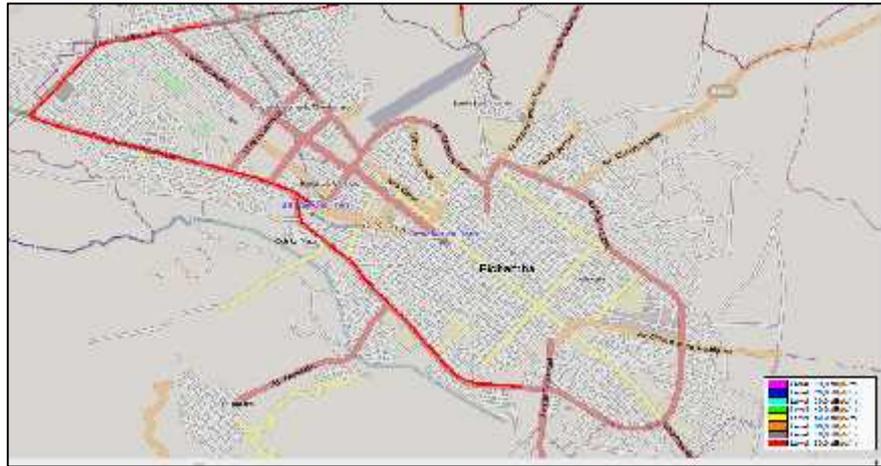


Figura 23-2.- Inicio del recorrido por las avenidas perimetrales de la ciudad de Riobamba. Datos de estación 89,3MHz
Fuente.- Captura de pantalla MapView con mapas de www.openstreetmap.org.. EM

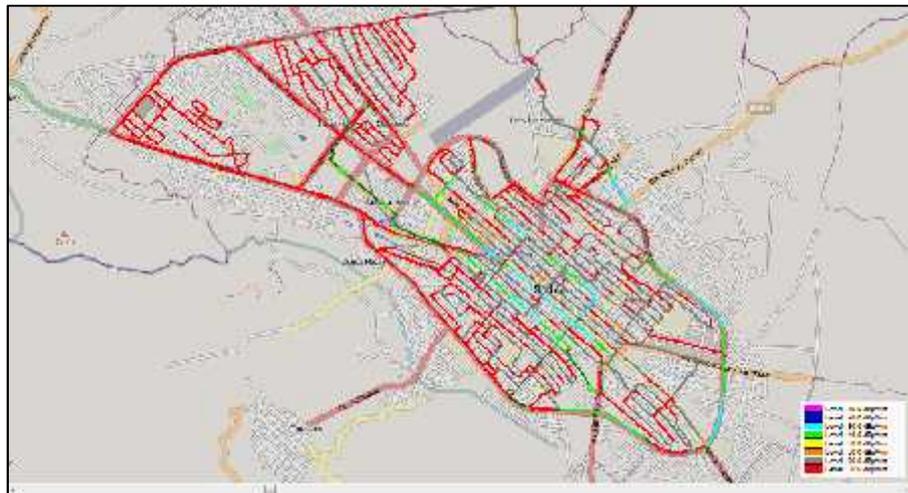


Figura 24-2.- Gráfica de Nivel de intensidad de campo eléctrico estación 89,3. Final de mediciones
Fuente.- Captura de pantalla MapView con mapas de www.openstreetmap.org. Equipo de cómputo a bordo.

2.1.5 Resultados de medición

Tras terminar los tres días planificados para las mediciones se consiguieron datos extra a los que se consideran necesarios para el desarrollo de este proyecto. Los motivos principales son dos: primeramente, se midieron más frecuencias de las elegidas en la Tabla 6-2, y segundo, en ocasiones, por cuestión de horarios de realización de las actividades de campo, el chofer de la EM se veía en la obligación de pasar más de una vez por determinadas calles. Los datos que se obtuvieron se encuentran en orden ascendente de acuerdo a la frecuencia.

Tabla 7-2.- Muestra parcial de los resultados de medición obtenidos

Tiempo Fecha + Hora	Frecuencia (MHz)	Level (dBμV/m)	CI (dB)	Longitud	Latitud	Altitud. sobre NN (m)
22/12/2014 10:54	88,1	89,1	44,8	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	88,5	80,1	30	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	88,9	89,3	36,7	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	89,3	89,6	37	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	90,5	84,9	28,4	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	90,9	49,8	-6,7	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	91,3	81	26,9	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	91,7	90,4	36,3	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	92,1	93	38	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	92,9	76	15,5	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	93,3	91,6	37,6	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	93,7	80	22,4	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	95,3	90,8	32,4	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	95,7	77	23,6	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	96,1	87,6	30,9	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	96,5	95,5	38,8	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	96,9	77,3	20,8	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	97,7	99,9	38,1	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	98,5	85,5	36,6	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	98,9	87,5	38,6	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	99,7	80,9	35,8	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	100,1	48	2,9	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	100,9	50,9	3,4	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	101,3	84,9	32	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	101,7	84,4	31,5	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9

Fuente.- Resultados entregados por R&S ARGUS en la EM

Tabla 7-2.- Muestra parcial de los resultados de medición obtenidos (Continuación)

Tiempo Fecha + Hora	Frecuencia (MHz)	Level (dBμV/m)	CI (dB)	Longitud	Latitud	Altít. sobre NN (m)
22/12/2014 10:54	102,5	48,9	-3,4	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	102,9	79,9	27,5	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	103,7	86,4	26,4	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	104,5	86,3	31,6	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	105,3	84,7	25,5	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	105,7	81,1	35,9	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	106,1	87,9	42,7	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	106,9	76,3	33	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9
22/12/2014 10:54	107,3	79,9	35,9	078°39'01,9"W	01°41'08,2"S	2770,9

Fuente.- Resultados entregados por R&S ARGUS en la EM

En la Tabla 7-2 se puede encontrar un ejemplo de un solo punto de medición para todas las frecuencias medidas, en donde coinciden tanto el tiempo como la ubicación geográfica para todas las frecuencias.

La información obtenida se almacena en la base de datos de R&S ARGUS y puede ser procesada en el mismo sistema o exportada a varios formatos comunes. En este caso se extrajo los datos de la EM para procesarlos en la *Estación scd-w01* del SACER, el proceso seguido se detalla a continuación:

En la ventana de **Navegador** seleccionar la opción **Crear archivos de respaldo** lo que abre una ventana en la cual se eligieron los archivos de interés con nombre **CMM_Proj_1412aa_bb**, donde **aa** representa los días de medición (22, 23 y 30), y **bb** representa el número de medición en ese día.

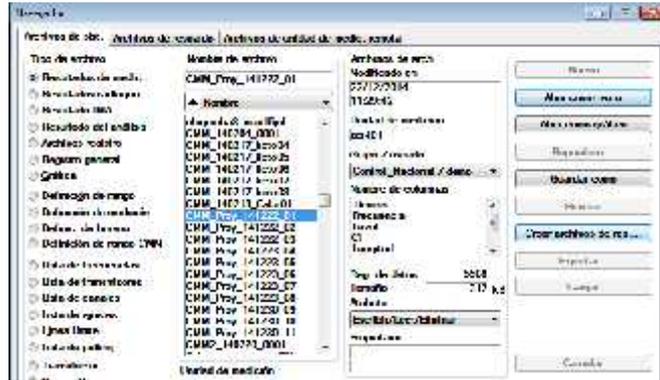


Figura 25-2.- Ventana del Navegador de R&S ARGUS en la EM
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

La Figura 26- muestra la ventana en donde se realiza dicho proceso, y las opciones seleccionables del mismo.

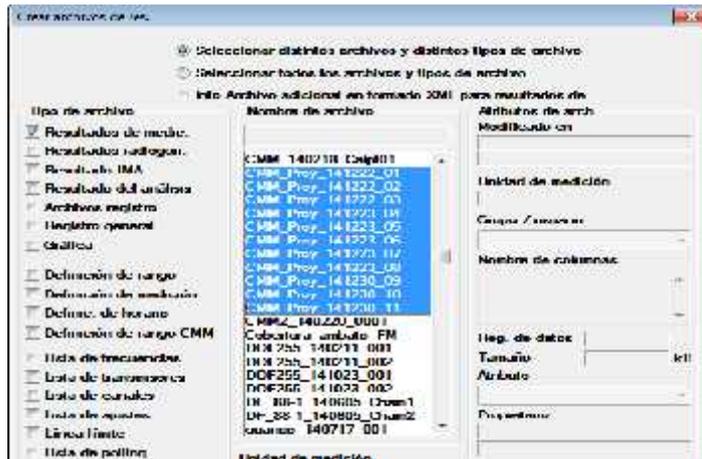


Figura 26-2.- Ventana Crear archivos de respaldo
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo a bordo. EM

Una vez creados los archivos en la EM del SACER se procedió a llevarlos a la unidad de medición scd-w01 situada en las instalaciones de ARCOTEL, para ser procesados. Para ello, es necesario cargarlos en el sistema de la siguiente manera:

En el **Navegador** elegir la pestaña **Archivos de respaldo** en donde se puede seleccionar los archivos recién obtenidos en la EM buscando simplemente la carpeta en donde se guardó, y seleccionando los de interés.

En la ventana de procesamiento de archivos de resultado de medición se concatenan todos los archivos, al seleccionar las filas de interés, elegir las unidades en las que se presentan los datos, y definir un nombre para el nuevo archivo.

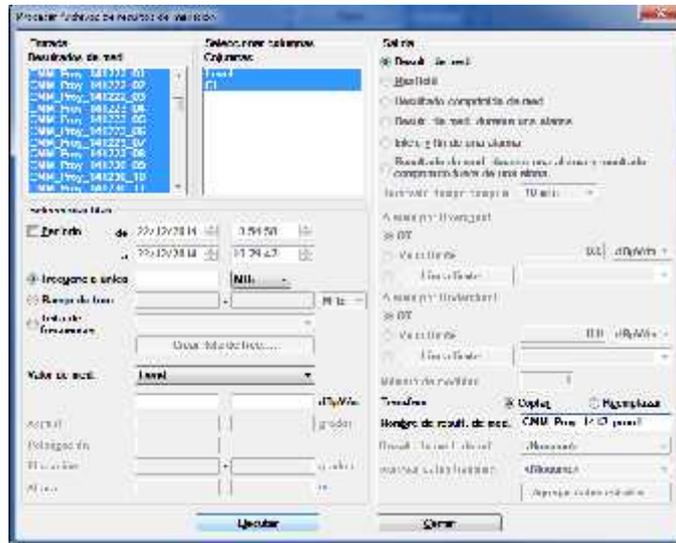


Figura 29-1.- Ventana Procesar Archivos de Resultado de medición
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo sistema scd-w01 SACER. ARCOTEL

Al presionar el botón **Ejecutar** los cambios son aplicados, y un nuevo archivo con el nombre elegido es creado.

Finalmente el archivo creado puede ser exportado a un archivo en formato compatible con Excel para poder aprovechar los datos en otros softwares. Para ello en la ventana de **Navegador** hay que seleccionar el nuevo archivo y dar clic en el botón **Exportar...** Una muestra del formato en que los datos son guardados en el archivo Excel final se muestra en la Tabla 7-2.

2.1.5.2 Depuración de datos

Dada la gran cantidad de datos obtenidos, fue necesaria la selección de los que sean útiles para el proceso para lo cual se realizó una depuración exhaustiva de los mismos:

- Se filtraron las frecuencias de las estaciones presentes en la Tabla 6-2, de la totalidad de las frecuencias medidas.

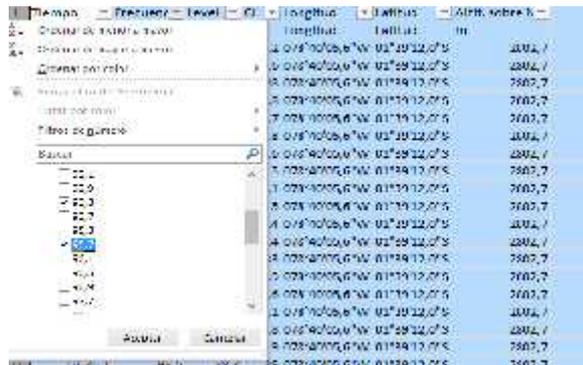


Figura 30-2.- Selección de estaciones de interés según la **Tabla 6-2**
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo propio

El documento exportado por R&S ARGUS entrega un conjunto de datos ordenados cronológicamente, sin embargo en el desarrollo de este proyecto se necesitaba analizar las estaciones por separado, así que se organizó a cada estación en una hoja de cálculo individual. Y finalmente se eliminaron datos duplicados basándose en los parámetros de latitud y longitud, originados cuando se midió en el mismo punto en más de una ocasión.

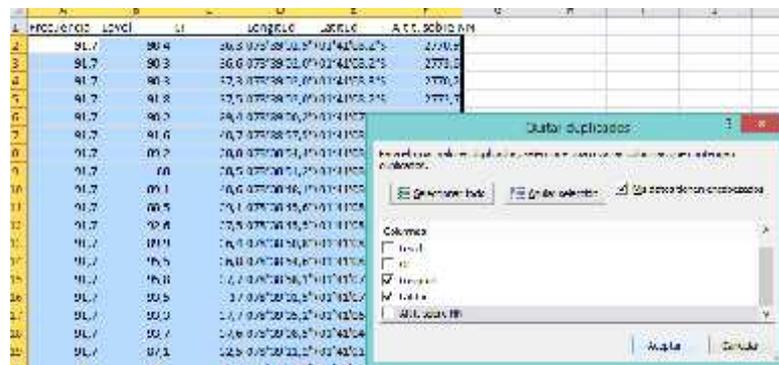


Figura 31-2.- Eliminación de datos duplicados con relación al punto de medición (Latitud y Longitud)
Fuente.- Captura de pantalla. Equipo de cómputo propio

Finalmente los datos obtenidos tienen un formato con el que se puede trabajar, y la información con la que se cuenta se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 8-2.- Datos de interés disponibles luego de la depuración de datos

Datos	Valor
Total de datos	13050
Total de señales medidas	5 frecuencias
Datos por estación	2610
Magnitudes medidas	Nivel de intensidad de campo eléctrico (dBuV/m), C/I (dB), latitud, longitud, altitud sobre el nivel del mar (m)

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

En la siguiente tabla se muestra a manera de ejemplo una muestra de los resultados en un solo formato de la estación radiodifusora 89,3 MHz.

Tabla 9-2.- Muestra de los datos de la estación 89,3 MHz después de la depuración

Frecuencia(MHz)	Level(dBuV/m)	CI(dB)	Longitud	Latitud	Altitud sobre NN(m)
89,3	89,6	37	-78,650528	-1,685611	2770,9
89,3	89,1	37,9	-78,650556	-1,685611	2773,6
89,3	89,4	37,5	-78,650556	-1,685639	2770,2
89,3	81,1	33,4	-78,650056	-1,685472	2771,2
89,3	81,3	33,9	-78,649306	-1,685556	2768,1
89,3	81,3	32,6	-78,648444	-1,685611	2765,4
89,3	80,5	33	-78,647556	-1,685639	2765,1
89,3	76,8	29,8	-78,646694	-1,685694	2763,3
89,3	80,6	33,4	-78,646000	-1,685694	2761,2
89,3	91,5	39,4	-78,645972	-1,685694	2760,8

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

2.1.5.3 *Análisis estadístico de los resultados de medición.*

Todo resultado es útil luego de analizarlo, a manera de resumen se tomaron algunos datos estadísticos de las mediciones realizadas para cada estación.

El valor promedio se obtiene con la siguiente fórmula:

$$x_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Los valores de desviación estándar () se pueden calcular con la fórmula:

$$\sigma = \left[\frac{\sum (x_i - x_{prom})^2}{n - 1} \right]^{1/2}$$

En donde (n) es el número total de datos existentes y (x_i) es el valor de la intensidad de campo para cada punto muestral.

Tabla 10-2.- Resumen estadístico de los resultados por estación radiodifusora FM

Frecuencia	89,3 MHz		91,7 MHz		93,3 MHz		95,7 MHz		97,7 MHz	
Magnitud	Nivel	C/I								
Mínimo	59,6	8	59,7	11,3	58,9	-2,20	57,5	5,1	45,3	-0,5
Mediana	76,60	30,3	81,0	32,4	81,2	30,2	73,5	26,4	84,6	36,2
Promedio	76,78	29,53	81,58	32,21	81,93	29,87	74,72	26,52	85,1	35,44
Máximo	100,6	43,30	104,5	44,4	100,4	45,7	100,2	44,00	102,1	43,3
Desviación estándar ()	6,5	5,74	5,97	4,76	5,54	4,85	7,005	6,25	5,77	3,99

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R

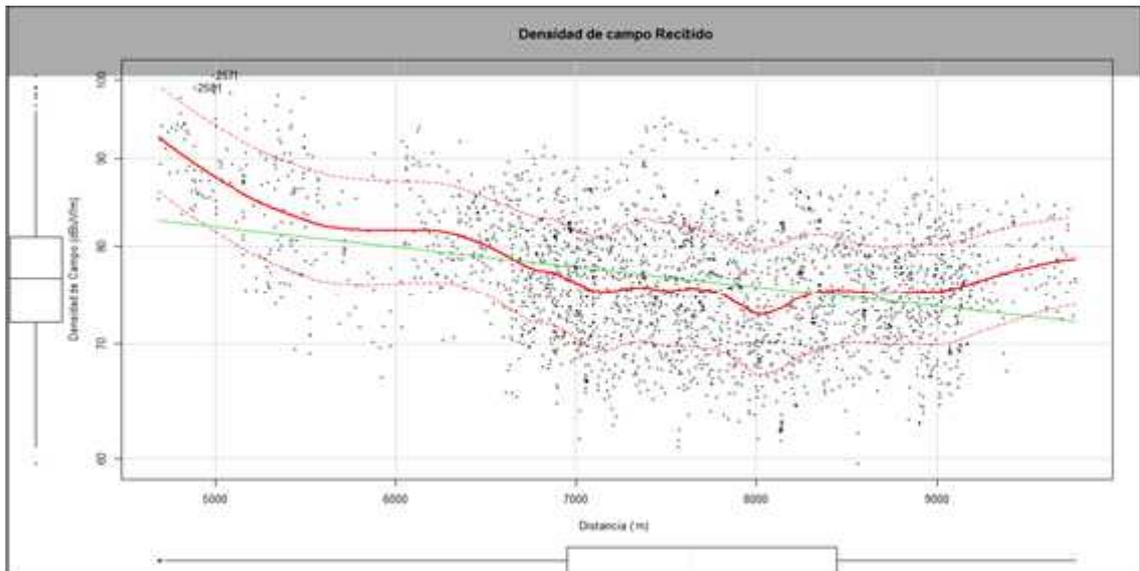


Figura 32-2.- Diagrama de Dispersión. Distancia vs. Intensidad de campo recibido. 89,3MHz

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R

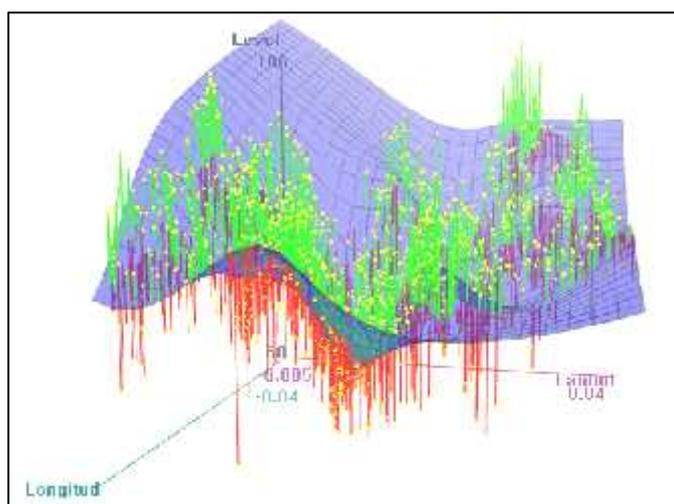


Figura 33-2.- Diagrama de Dispersión en 3D. Intensidad de campo recibido
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R

2.2 Análisis teórico de la propagación

2.2.1 Cálculo teórico con los puntos de medición

El cálculo de las pérdidas por propagación predichas por cada modelo se vuelve requisito indispensable para su evaluación comparativa. Las predicciones realizadas por cada modelo se calculan en cada uno de los puntos en donde se realizó las mediciones, por la relativa facilidad con la que se puede obtener su distancia transmisor-receptor.

2.2.1.1 Cálculo de distancias Transmisor-Receptor

La distancia en línea recta desde el transmisor de una señal hasta el receptor es un requisito solicitado por todos los modelos de propagación para la predicción de las pérdidas por trayectoria. En la campaña de mediciones se recogieron datos en diversos puntos de la ciudad de Riobamba conjuntamente con la ubicación geográfica de éstos, así que para calcular la distancia entre dichos puntos (del receptor móvil) y el transmisor respectivo se utilizó trigonometría simple.

El primer cálculo corresponde a la distancia desde el punto con coordenadas geográficas (longitud, latitud) del transmisor hasta cada uno de los puntos (longitud, latitud) donde midió el receptor, dicha distancia se designa con el nombre de Distancia 2D, dado que no se toma en

cuenta las alturas de dichos puntos y por su relativa cercanía no se considera la redondez de la tierra. Para efecto de cálculo se requiere la transformación de las unidades angulares (grados sexagesimales) en que se encuentran las magnitudes de longitud y latitud. La distancia que representa un grado de Latitud no cambia si se mide en el ecuador o en los polos ya que es el resultado de dividir equitativamente la circunferencia de la tierra de 40036,457 Kilómetros para los 360 grados sexagesimales que tiene.

Tabla 11-2.-Equivalencia en distancia de las unidades sexagesimales de las coordenadas geográficas (Latitud)

Unidad sexagesimal	Equivalencia distancia
Grado	111,2124 Kilómetros
Minuto	1853,54 metros
Segundo	30,892 metros

Fuente.- Conversiones frecuentes, Equivalencia de un Grado de Latitud o de Longitud en Distancia:
<https://sites.google.com/site/antoniopadillac/Home/pesosymedidas/meridianosyparalelos>

La equivalencia de longitud irá disminuyendo conforme se mida más cerca de los polos, y se calcula multiplicando los valores anteriores por el coseno de la latitud en donde se realice la medida, generalmente se aceptan las siguientes aproximaciones de equivalencias.

Tabla 12-2.- Aproximaciones de equivalencias de grados sexagesimales en distancia, longitud dependiendo de la latitud. Hasta los 45°

Latitud (Grados)	Distancia en Metros entre Meridianos para		
	Un Grado	Un Minuto	Un Segundo
0	111 212.4 km	1 853.54 m	30.89 m
5	110 901.37 km	1 848.36 m	30.81 m
10	109 633.72 km	1 827.23 m	30.45 m
15	107 531.69 km	1 792.19 m	29.87 m
20	104 611.28 km	1 743.52 m	29.06 m
25	100 894.71 km	1 681.58 m	28.03 m
30	96 410.28 km	1 606.84 m	26.78 m
35	91 192.10 km	1 519.87 m	25.33 m
40	85 279.90 km	1 421.33 m	23.69 m
45	78 718.66 km	1 311.98 m	21.87 m

Fuente.- Conversiones frecuentes, Equivalencia de un Grado de Latitud o de Longitud en Distancia.
<https://sites.google.com/site/antoniopadillac/Home/pesosymedidas/meridianosyparalelos>

Los valores de las latitudes en todo el proyecto no sobrepasan el 1 grado sexagesimal, por lo que las transformaciones de la longitud pueden basarse también en la Tabla 11-2.

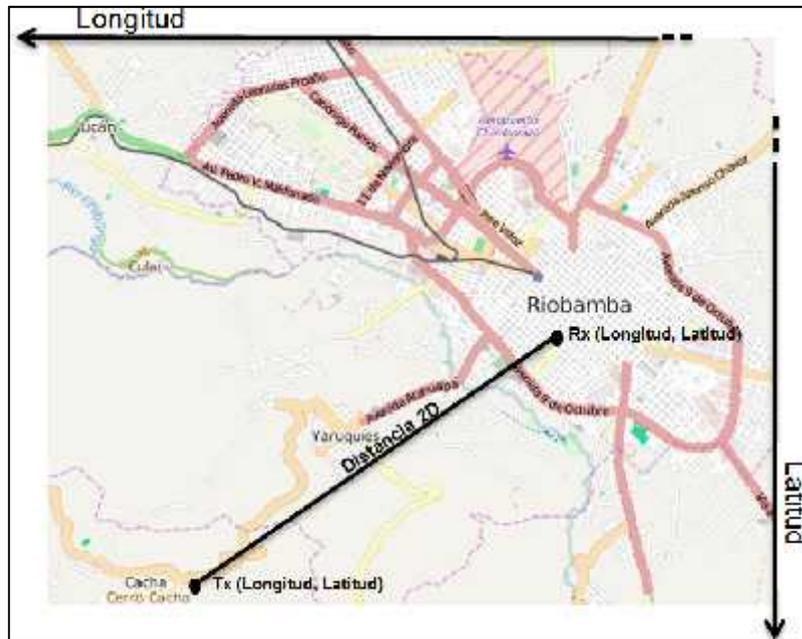


Figura 34-2.- Representación de la distancia 2D de un punto muestra 1 de la ciudad

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Mapa de www.openstreetmap.org

El proceso para la obtención de la distancia en 2D consistió en realizar una resta de los valores de latitud y longitud entre los dos puntos respectivamente, de donde se obtiene un vector con un eje de coordenadas en el transmisor.

$$\Delta Latitud_n = Latitud_{Cacha} - Latitud_{EM}$$

$$\Delta Longitud_n = Longitud_{Cacha} - Longitud_{EM}$$

Finalmente se tiene la longitud buscada, como si de un vector de 2 dimensiones se tratara, con la fórmula:

$$distancia2D = \sqrt{\Delta longitud^2 + \Delta latitud^2}$$



Figura 35-2.- Representación del cálculo de la distancia 2D
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Mapa de www.openstreetmap.org

Así a manera de muestra se presenta la siguiente tabla con los primeros diez resultados de distancias 2D de la frecuencia 97,7 MHz desde su respectiva estación difusora ubicada en las coordenadas: Latitud 1,691930556°S, Longitud 78,71610556°O.

Tabla 13-2.- Muestra de los resultados de cálculo de distancia en 2D. Frecuencia 97,7MHz

Longitud	Latitud	Distancia 2D			
		longitud	latitud	Distancia 2D (grados sexagesimales)	D2D (metros)
-78,634889	-1,690167	0,081217	0,001764	0,08123582	9034,428740
-78,634500	-1,690139	0,081606	0,001792	0,08162522	9077,735134
-78,635389	-1,690139	0,080717	0,001792	0,08073655	8978,903764
-78,633556	-1,690083	0,082550	0,001847	0,08257067	9182,880175
-78,633917	-1,690083	0,082189	0,001847	0,08220964	9142,730244
-78,635889	-1,690056	0,080217	0,001875	0,08023858	8923,523109
-78,636194	-1,689972	0,079911	0,001958	0,0799351	8889,773085
-78,633028	-1,689889	0,083078	0,002042	0,08310286	9242,066989
-78,632639	-1,689861	0,083467	0,002069	0,08349232	9285,379311
-78,636806	-1,689778	0,079300	0,002153	0,07932922	8822,390869

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

Los modelos de propagación requieren de la distancia en línea recta desde el emisor hasta el receptor, por lo cual, con los resultados anteriores de distancia 2D se necesitó calcular la distancia 3D que incluye las alturas respectivas de los puntos en cuestión. Con el conocimiento

de que el transmisor se encuentra a una mayor altura que el receptor entonces se puede representar las distancias 2D y 3D de la siguiente manera.

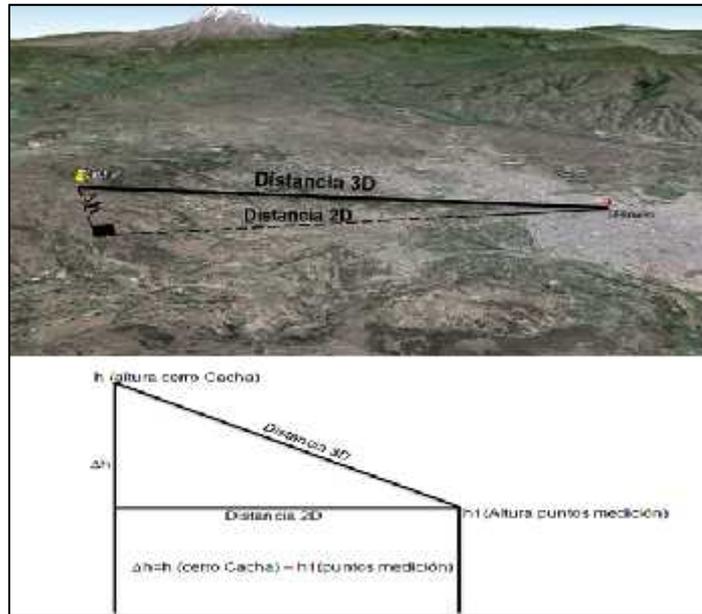


Figura 36-2.- Representación de distancias, arriba sobre el mapa, y abajo diagrama plano
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Mapa de www.google.maps.com

Entonces el cálculo de la distancia en 3D se obtiene, una vez más, con el teorema de Pitágoras, en donde, la variable buscada es la hipotenusa y los catetos son la distancia 2D y la diferencia de alturas entre el transmisor y los puntos medidos, es decir, los catetos son la distancia 2D y la altura efectiva de la antena transmisora.

La distancia 3D entonces, se calcula con la siguiente fórmula:

$$distancia3D = \sqrt{\Delta h^2 + Distancia\ 2D^2}$$

La muestra de los diez primeros resultados de la frecuencia 89,3 MHz se muestran en la tabla siguiente, en donde se pueden encontrar las alturas de los diez primeros puntos de medición (*Altitud sobre nivel del mar*), la altura de la base transmisora (*alt.base*) y la altura de la antena, por lo cual la altura del transmisor (*alt. Tx*) se define como la suma de altura base y altura de la antena.

Tabla 14-2.- Muestra del cálculo de los diez primeros valores de las distancias 3D para la frecuencia 89,3 MHz

Datos Radiodifusora (Tx)			Datos EM (RX)	Cálculo de distancia 3D		
ALT BASE	ALT ANTENA	ALT TX	Altitud sobre nivel del mar (m)	Distancia 2D (m)	altura (m)	Distancia 3D (m)
3556msnm	30metros	3586m	2770,9	7373,224599	815,1	7418,141883
			2773,6	7370,150319	812,4	7414,789915
			2770,2	7369,847314	815,8	7414,862040
			2771,2	7427,012081	814,8	7471,573294
			2768,1	7509,103684	817,9	7553,515642
			2765,4	7603,830132	820,6	7647,981239
			2765,1	7701,951741	820,9	7745,575346
			2763,3	7796,733036	822,7	7840,017941
			2761,2	7873,641464	824,8	7916,724382
			2760,8	7876,717932	825,2	7919,825783

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

2.2.1.2 Potencia radiada

Otro dato necesario para el cálculo teórico con los modelos de propagación es la potencia radiada por las antenas de los sistemas de radiodifusión FM. En propagación FM se usan, generalmente, arreglos de cuatro antenas dipolo.

Para conocer la potencia radiada se partió de la potencia entregada por los amplificadores, a la cual había que restarle las pérdidas producidas por los conectores, cables y sumarle la ganancia del arreglo de antenas, para este punto fue necesaria la visita a las estaciones de radiación de las Emisoras FM en el Cerro Cacha, la cual se detalla en el punto 2.1.1.1, los resultados de esta actividad de campo se encuentran disponibles en la Tabla 2 2.

Las marcas y modelos de los equipos facilitan el acceso a sus datos técnicos disponibles en los sitios web de las compañías que los producen, como se explicó anteriormente, éste fue un criterio importante al momento de elegir las estaciones para el análisis.

A continuación se muestran los valores de las pérdidas de cables y conectores de acuerdo a su marca y modelo, así como también las ganancias de los arreglos de antenas.

Tabla 15-2.- Pérdidas de cables y conectores en los sistemas radiantes

F (MHz)	Cable	Longitud (m)	L (dB/100m)	L cab (dB)	Conector	L conector (dB)
89,3	Andrew Heliax LDF4-50 A	27,5	2,031	0,56	Flange L44R 7/8	0,05
91,7	Andrew Heliax RG-319 A/V	39	1,3	0,5	EIA Flange 7/8	0,05
93,3	Andrew Heliax LDF5-50 A	51,5	1,19	0,61	EIA Flange 7/8	0,05
95,7	Draka RFA	15,5	2,15	0,33	EIA Flange 7/8	0,05
97,7	Andrew Heliax	39	1,3	0,5	Flange L45R 7/8	0,05

Fuente.- Documentos de información técnica

Cables: http://www.datasheets.pl/coaxial_cables/COAXIAL_CABLE_SELECTION_GUIDE.pdf

http://radio.passus.pl/files/RFA_1_2.pdf

http://www.commscope.com/catalog/andrew/product_details.aspx?id=1329

Conectores: http://www.commscope.com/catalog/andrew/product_details.aspx?id=9393

http://es.commscope.com/catalog/andrew/product_details.aspx?id=9393

<http://www.rfparts.com/connectors/connectors-eia/l44r.html>

Tabla 16-2.- Ganancias de los arreglos de antenas

F (MHz)	Antena	Ganancia x4 (dBd)
89,3	RVR ACP1	1,5
91,7	Nautel Shevel	1,5
93,3	RVR Ferrara ACP0	3,2
95,7	RVR ACP1	1,5
97,7	RVR ACP1	1,5

Fuente.- Documentos de información técnica

<http://www.rvr.it/en/d/antenna.pdf>

Las ganancias de las antenas están referenciadas a un dipolo de media onda, por lo cual la potencia PER se encontrará en dBm.

La figura siguiente muestra una representación de la conexión entre los dispositivos y elementos en una estación transmisora FM, útil para un cálculo claro de la potencia radiada por cada estación.

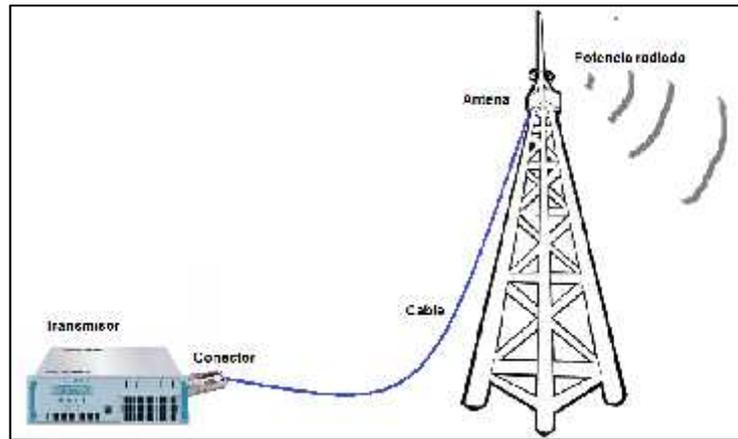


Figura 37-2.- Diagrama de conexión de elementos en estación de radiodifusión FM

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

El proceso para encontrar la potencia radiada se puede encontrar en la tabla siguiente:

Tabla 17-2.- Cálculo de potencias radiadas en las estaciones a analizarse

F (MHz)	Potencia salida del amplificador (W)	P (dBW)	P (dBm)	L cab (dB)	L conect (dB)	G.antena x4 (dBd)	Ptx (dBm)
89,3	936	29,7127	59,7127	0,56	0,05	1,5	60,604233
91,7	1000	30	60	0,5	0,05	1,5	60,950000
93,3	930	29,6848	59,6848	0,61	0,05	3,2	62,221979
95,7	908	29,5808	59,5808	0,33	0,05	1,5	60,697608
97,7	1020	30,0860	60,0860	0,5	0,05	1,5	61,036002

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

La potencia de salida del amplificador se transformó a dBm mediante la siguiente expresión:

$$P(\text{dBm}) = P(\text{dBW}) + 30 = 10 \log(W) + 30$$

La potencia radiada finalmente se encontró con la expresión:

$$P_{tx}(\text{dBm}) = P(\text{dBm}) - L_{\text{cable}} - L_{\text{conector}} + G_{\text{antena}}$$

Al conocer el nivel de recepción de la señal (dBuV/m), para definir la potencia real (dBm), se utilizó la siguiente fórmula:

$$Prx(dBm) = (dBuV/m) - dB - 107 = (dBuV/m) - 0,1875 - 107$$

$$Prx(dBm) = (dBuV/m) - 107,1875$$

Conociendo los valores de potencias de transmisión reales, se procedió a realizar los balances de potencia para determinar la pérdida real en cada caso, simplemente restando la potencia recibida de la radiada, a manera de muestra se presentan los cinco primeros resultados para la frecuencia 89,3 MHz cuya potencia radiada es 60,604233dBm. Posteriormente se procedió a encontrar las pérdidas mediante los cálculos teóricos con cada modelo de propagación.

Tabla 18-2.- Cálculo de la pérdida de potencia para la frecuencia 89,3MHz

Level (dBuV/m)	Potencia Recibida (dBm)	Pérdida de potencia (dB)
89,6	-17,5875	78,191733
89,1	-18,0875	78,691733
89,4	-17,7875	78,391733
81,1	-26,0875	86,691733
81,3	-25,8875	86,491733

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

2.2.1.3 Modelo Okumura

El primer modelo a analizar fue el más conocido y utilizado de los modelos de propagación empíricos, el modelo Okumura, las fórmulas a utilizarse son:

Para las pérdidas por propagación:

$$L_p(dB) = L_0 + A_{mi} - G(h_t) - G(h_r) - G_{\text{área}}$$

Pérdidas por espacio libre:

$$L_o = 32,44 + 20 \log_{10} d(\text{km}) + 20 \log_{10} f (\text{MHz})$$

La atenuación relativa promedio A_{mu} se extrae del set de curvas realizado por Okumura, que se muestra en la **Figura 12-**. Para el rango de frecuencias que se utilizaron en el proyecto y el promedio de distancias en 7 Km, el valor extraído fue $A_{mu} = 24\text{dB}$.

Las ganancias por altura se obtienen por las siguientes fórmulas:

$$G(h_t) = 20 \log(h_t/200) \quad \text{Para} \quad 30\text{m} < h_t < 1000\text{m}$$

$$G(h_r) = 10 \log(h_r/3) \quad \text{Para} \quad h_r < 3\text{m}$$

$$G(h_r) = 20 \log(h_r/3) \quad \text{Para} \quad 3\text{m} < h_r < 10\text{m}$$

La ganancia por área se obtiene del set de curvas proporcionadas en la **Figura 13-1**, y el valor obtenido para la frecuencia y las distancias promedio es el siguiente:

$$G_{\text{área}} = 5\text{dB}$$

Con esta formulación se obtienen los valores necesarios para el desarrollo, la Ganancia por altura del receptor $G(h_r)$ permanece constante porque el receptor (EM) mantiene su altura desde el suelo fija en 2,5 metros, mientras que la altura efectiva del transmisor va cambiando dependiendo de la altura de referencia a la que se encuentre el receptor.

Tabla 19-2.- Datos para el cálculo de Okumura.

A_{mu}	h_r	$G(h_t)$	$G_{\text{área}}$
24dB	2,5m	0,79181246 dB	5 dB

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

A manera de ejemplo se aprecia la muestra de los primeros puntos correspondientes a la frecuencia 89,3 MHz.

Tabla 20-2.- Muestra del cálculo con el modelo Okumura. Frecuencia 89,3MHz

Distancia [m]	H _{ef} [m]	$K_1(f)$ [dB]	Lo [dB]	L [dB]
7373,224599	815,1	12,203618	88,810178	96,398372
7370,150319	812,4	12,174798	88,806556	96,423570
7369,847314	815,8	12,211074	88,806199	96,386937
7427,012081	814,8	12,200420	88,873312	96,464703
7509,103684	817,9	12,233404	88,968791	96,527199
7603,830132	820,6	12,262030	89,077677	96,607459
7701,951741	820,9	12,265205	89,189045	96,715652
7796,733036	822,7	12,284230	89,295282	96,802864
7873,641464	824,8	12,306373	89,380542	96,865981
7876,717932	825,2	12,310584	89,383935	96,865163

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

2.2.1.4 Modelo Okumura-Hata

Las pérdidas totales por el trayecto se expresan con la siguiente fórmula:

$$L_{50}(\text{urb})(\text{dB}) = 69,55 + 26,16 \log f(\text{MHz}) - 13,82 \log h_t(\text{m}) + \log d(\text{Km})(44,9 - 6,55 \log h_t(\text{m})) - a(h_r)$$

Siendo Riobamba una ciudad relativamente pequeña, se utiliza la fórmula del coeficiente $a(h_r)$ establecida para ciudades pequeñas y medianas. La altura del receptor se mantiene en 2,5(m) desde el nivel del suelo. Por lo tanto el valor del coeficiente, en el caso de la radiodifusora 89,3 MHz es:

$$a(h_r) = (1,1 \log f_c - 0,7) h_r - (1,56 \log f_c - 0,8) [\text{dB}]$$

$$a(h_r) = (1,1 \log (89,3) - 0,7)(2,5) - (1,56 \log(89,3) - 0,8) [\text{dB}] = 1,371513 [\text{dB}]$$

Se presenta una muestra de los diez primeros valores de las pérdidas para la frecuencia 89,3MHz.

Tabla 21-2.- Muestra del cálculo con el modelo Okumura Hata. Frecuencia 89,3MHz

F(MHz)	Distancia2D(m)	hef (m)	L(dB)
89,3	7,373224599	815,1	101,392780
	7,370150319	812,4	101,416203
	7,369847314	815,8	101,380370
	7,427012081	814,8	101,477443
	7,509103684	817,9	101,568517
	7,603830132	820,6	101,681059
	7,701951741	820,9	101,821677
	7,796733036	822,7	101,940080
	7,873641464	824,8	102,028287
	7,876717932	825,2	102,028517

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

2.2.1.5 Modelo Walfisch Bertoni

Las pérdidas por la trayectoria se representan como:

$$L = L_0 + L_{ex}$$

(L_0) pérdida por espacio libre

$$L_0(dB) = 32,44 + 20 \log f(MHz) + 20 \log R(Km)$$

(L_{ex}) se define como:

$$L_{ex} = 57,1 + A + \log f + 18 \log R - 18 \log(h_t - h) - 18 \log\left(1 - \frac{R^2}{17(h_t - h)}\right).$$

$$A = 5 \log \left[\frac{d^2}{4} + (h - h_r)^2 \right] - 9 \log d + 20 \log \left[\tan^{-1} \left(\frac{2(h - h_r)}{d} \right) \right]$$

A continuación se muestran los valores fijos utilizados, seguidos de una muestra del cálculo de los diez primeros datos de la frecuencia 89,3MHz.

Tabla 22-2.- Datos para el cálculo de Walfisch-Bertoni. Frecuencia 89,3MHz

h_r (m)	d(m)	h(m)	h-h_r (m)	A(dB)
2,5	20	10	7,5	30,593269

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

Tabla 23-2.- Muestra del cálculo con el modelo Walfisch Bertoni. Frecuencia 89,3MHz

hef tx (m)	hef-h(m)	R(Km)	Lo(dB)	Lex(dB)	L(dB)
815,1	805,1	7,373225	88,810178	52,987771	141,797949
812,4	812,4	7,370150	88,806556	52,913643	141,817406
815,8	815,8	7,369847	88,806199	52,880542	141,783539
814,8	814,8	7,427012	88,873312	52,951049	141,921284
817,9	817,9	7,509104	88,968791	53,007869	142,073221
820,6	820,6	7,603830	89,077677	53,080804	142,254731
820,9	820,9	7,701952	89,189045	53,179010	142,464280
822,7	822,7	7,796733	89,295282	53,258253	142,649558
824,8	824,8	7,873641	89,380542	53,315646	142,791971

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

2.2.1.6 Modelo de Ericsson

Las pérdidas se calculan con la siguiente fórmula:

$$L = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log h_t + a_3 \log h_t \log d - 3,2 \log((11,75h_r)^2) + g(f_c)$$

$$g(f) = 44,9 \log f_c - 4,78(\log f_c)^2$$

Los valores a_0 , a_1 , a_2 y a_3 son coeficientes de expresión de pérdidas y se encuentran disponibles en la Tabla 1-1, para el caso de la ciudad de Riobamba se utilizaron los valores para entorno urbano, por tanto los valores utilizados para el cálculo fueron los siguientes:

Tabla 24-2.- Datos para el cálculo del Modelo Ericsson.

h_r (m)	a0(dB)	a1(dB)	a2(dB)	a3(dB)
2,5	36,2	30,2	-12	0,1

Fuente.- Quintana, R., Bordón, R., Montejo, S., (2013).“Estudio comparativo de los modelos de propagación del canal inalámbrico”

Como muestra se presentan los diez primeros datos del cálculo con el modelo Ericsson para la frecuencia 89,3MHz, cuyo factor $g(fc)$ es 69,401404 (dB).

Tabla 25-2.- Muestra del cálculo con el modelo Ericson. Frecuencia 89,3MHz

d (Km)	h_t (m)	L(dB)
7,373	815,1	87,727664
7,370	812,4	87,739308
7,370	815,8	87,717155
7,427	814,8	87,825819
7,509	817,9	87,951736
7,604	820,6	88,100691
7,702	820,9	88,268588
7,797	822,7	88,419224
7,874	824,8	88,536022
7,877	825,2	88,538687

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

2.2.1.7 Modelo de Walfisch-Ikegami

Las pérdidas por trayecto, están determinadas por la expresión:

$$L = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{mds} & l_{rts} + l_{mds} > 0 \\ L_0 & L_{rts} + L_{mds} \leq 0 \end{cases}$$

Pérdidas por espacio libre L_0

$$L_0 = 32,4 + 20 \log d(km) + 20 \log f(MHz)$$

Pérdidas azotea - nivel de la calle L_{rts} (dB)

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log w(n) + 10 \log f(\text{MHz}) + 20 \log h_n(n) + L_i$$

$$L_i = \begin{cases} -10 + 0,354 & 0^\circ < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\theta - 35^\circ) & 35^\circ < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\theta - 55^\circ) & 55^\circ < 90^\circ \end{cases}$$

Las pérdidas por difracción en múltiples pantallas, quedan expresadas por la siguiente ecuación:

$$L_{msd} = L_{ht} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b$$

(L_{ht}) son las pérdidas debido a la altura de la antena de la estación base en dB

$$L_{ht} = \begin{cases} -18 \log(1 + h_t) & h_t > h_{techo} \\ 0, & h_t \leq h_{techo} \end{cases}$$

(k_a) es el incremento de las pérdidas para las estaciones base que están por debajo de la altura de las azoteas de los edificios adyacentes

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_t > h_{techo} \\ 54 - 0,8 h_t & d \geq 0,5 y h_t \leq h_{techo} \\ 54 - 1,6 h_t & d < 0,5 y h_t \leq h_{techo} \end{cases}$$

El término (k_d) y el término (k_f) se definen bajo las siguientes condiciones:

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_t > h_{techo} \\ 18 - 15 \left(\frac{\Delta h_t}{h_{techo}} \right) & h_t < h_{techo} \end{cases}$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), & \text{suburbano} \\ -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), & \text{urbano} \end{cases}$$

Una muestra de los diez primeros cálculos para la frecuencia 97,7MHz se presentan conjuntamente con los valores de cada variable. Los valores que se toman para el presente modelo, considerando que las alturas de las antenas son mayores que las de los edificios, son:

Tabla 26-2.- Datos para el cálculo con el Modelo Walfisch-Ikegami

hr(m)	w(m)	htecho(m)	hm(m)	b(m)	ka	kd	kf2
2,5	10	10	7,5	20	54	18	-5,35519

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

El ángulo de incidencia () sobre la calle se obtiene con la función trigonométrica tangente, utilizando la distancia en 2D desde el transmisor hasta cada punto de medición y la altura efectiva del transmisor.

Tabla 27-2.- Muestra del cálculo con el modelo Walfisch-Ikegami. Frecuencia 89,3MHz

D2D(m)	h ef tx (m)	hpiso(m)	Lo(dB)	(grados)	Lori	Lrst	ht	Lht	Lmsd	L(dB)
7373,	815,1	817,6	88,77	6,328	9,549	20,627	805,1	-52,315	-4,854	104,544
7370,1	812,4	814,9	88,767	6,309	9,550	20,629	802,4	-52,289	-4,831	104,565
7370	815,8	818,3	88,76	6,336	9,548	20,627	805,8	-52,322	-4,864	104,529
7427	814,8	817,3	88,83	6,279	9,554	20,634	804,8	-52,312	-4,794	104,672
7509	817,9	820,4	88,93	6,235	9,559	20,638	807,9	-52,342	-4,738	104,829
7604	820,6	823,1	89,04	6,178	9,566	20,645	810,6	-52,368	-4,666	105,016
7701	820,9	823,4	89,15	6,102	9,574	20,653	810,9	-52,371	-4,569	105,234
7797	822,7	825,2	89,26	6,042	9,581	20,660	812,7	-52,388	-4,490	105,425
7874	824,8	827,3	89,34	5,998	9,586	20,665	814,8	-52,409	-4,434	105,572
7877	825,2	827,7	89,34	5,999	9,586	20,665	815,2	-52,412	-4,435	105,574

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

2.2.2 Comparación de modelos con datos obtenidos con el sistema SACER y selección de modelos con mejor aproximación.

Los diferentes modelos de propagación muestran resultados diferentes, lo cual genera la necesidad de compararlos entre sí y a su vez compararlos con las mediciones reales; esta comparación se realizó tanto gráfica como numéricamente, tal que al final se determine los modelos más apropiados para el entorno.

2.2.2.1 Comparación gráfica.

Utilizando el software R para análisis estadístico se realizaron gráficas que explican la relación entre los aspectos de propagación.

Distancia vs. Pérdidas

Siendo la distancia un aspecto primordial en la propagación de ondas electromagnéticas, se comparó con los resultados de las predicciones de los modelos de propagación y los valores reales medidos.

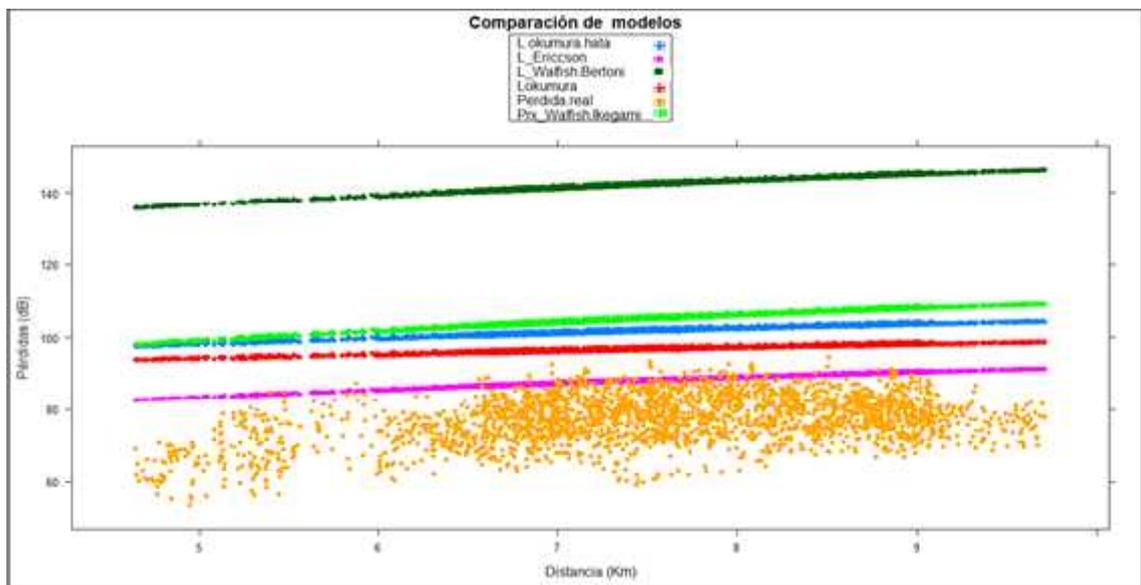


Figura 38-2.- Gráfica. Distancia vs. Pérdida 89,3MHz

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

En la gráfica anterior se puede observar que el modelo que predice mayores pérdidas es el de Walfisch-Bertoni, lo cual se debe a que es un modelo para ambientes urbanos densos, Riobamba es, sin embargo, un ambiente urbano medianamente denso, lo cual hace que los resultados se alejen del valor real. El modelo cuyas predicciones de pérdidas son menores, es el Ericsson que, en este caso, es también el que más se acerca a los valores reales.

Otro dato que se observa es la anchura de la nube de datos, lo que se refleja en el alto valor de la varianza. La altura del receptor se mantiene constante en 2,5 metros.

Familia de curvas del rango de interés

Con la finalidad de cohesionar el trabajo entre todas las frecuencias, se muestra la familia de curvas de predicción de pérdidas, para toda la banda FM.

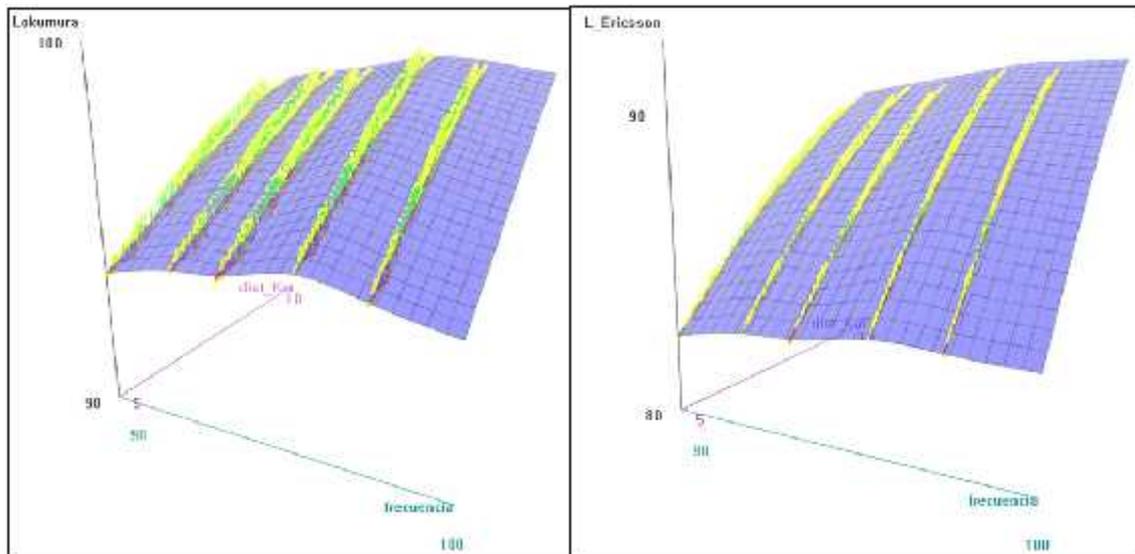


Figura 39-2.- Familia de curvas para los rangos de interés. Modelos Okumura (Izquierda) y Ericsson (derecha)

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

Tal y como se observo en la **Figura 38-2**, aquí también se nota un aumento proporcional de las perdidas con respecto a la distancia; con respecto a la frecuencia se puede observar poca variación en ambos modelos, un ligero aumento en la frecuencia de 95,7 MHz.

A continuación se muestra la misma gráfica pero con los valores reales medidos.

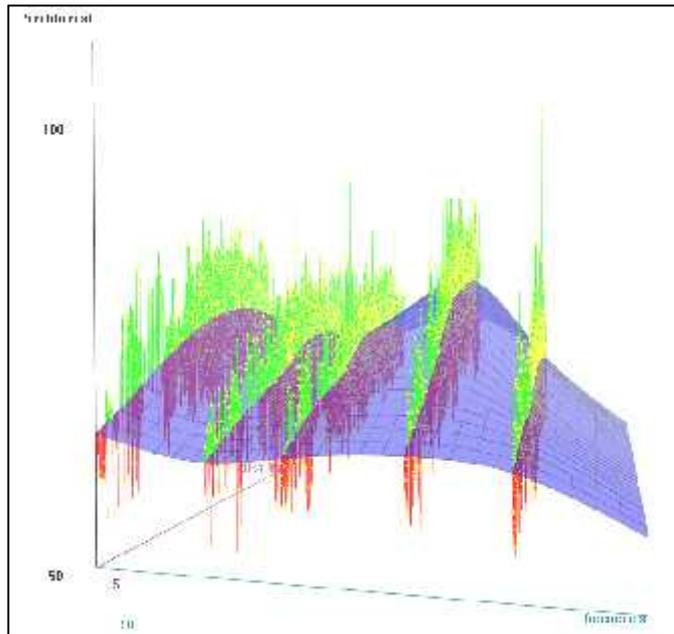


Figura 40-2.- Familia de curvas para los rangos de interés con valores reales medidos

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

Se observa la variación en 95MHz un poco mas notoria, y un decrecimiento a partir de ese rango de frecuencias, similar al que presenta el modelo Okumura, lo cual debe ser considerado en el modelamiento final.

Gráficamente, los modelos Okumura y Ericsson son los que mayor aproximación a la realidad tienen, por lo tanto, sus parámetros deben ser tomados en cuenta en el modelamiento específico para Riobamba.

2.2.2.2 Comparación numérica

Para la comparación numérica de los datos obtenidos se utilizó el valor de la media cuadrática o RMS que mide la eficiencia de un modelo, entre menor sea el valor mejor será dicho modelo estadístico.

Se define de la siguiente manera:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xm_i - xc_i)^2}{n}}$$

En donde (xm) son los valores medidos (reales) y (xc) son los valores calculados por el modelo, n es el número de puntos de medición. En este caso se obtiene el error RMS de cada uno de los modelos analizados a fin de compararlos entre si y decidir el de mejor aproximación.

Se utilizó también la desviación estándar con la finalidad de establecer que tan dispersos están los valores de las mediciones, será un valor complementario, que además mide un cierto nivel de confiabilidad del modelo. También se calculó, con el mismo objetivo, el valor de la desviación promedio, que es la distancia promedio desde la media de los valores calculados por el modelo.

En la **Tabla 28-2** se muestra la comparación realizada, en donde se obtuvo los valores del error RMS, y la desviación estándar de cada modelo en cada una de las frecuencias medidas, al final se realizó un promedio de todos los valores, a fin de obtener un valor que pueda representar el nivel de efectividad de cada modelo, para poder elegir los dos mejor aproximados a la realidad.

Tabla 28-2.- Resultado de comparación numérica entre modelos

	89,3	91,7	93,3	95,7	97,7	
OKUMURA	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	PROM RMSE
	20,4068929	24,7426667	23,6025516	18,8451502	27,6198153	23,04341532
	DESV EST	PROM DESV EST				
	1,06888882	1,05699354	1,07473317	1,06418238	1,07926075	1,068811733
	0,85036206	0,84122303	0,85542523	0,84746222	0,85838133	0,850570773
OKUMURA-HATA	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	PROM RMSE
	25,2297903	29,7194392	28,5828763	23,7042787	32,7393746	27,99515183
	DESV EST	PROM DESV EST				
	1,45541808	1,44314291	1,46747211	1,46166517	1,46623274	1,458786204
	1,14990074	1,14050602	1,15987778	1,15559602	1,15826032	1,152828178

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

Tabla 28-2.- Resultado de comparación numérica entre modelos (continuación)

	89,3	91,7	93,3	95,7	97,7	
ERICSSON	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	PROM RMSE
	12,3533596	16,4000298	15,1742839	10,8605363	19,4186166	14,84136527
	DESV EST	PROM DESV EST				
	1,831699	1,81568865	1,84342455	1,83299251	1,84570332	1,833901607
	1,44075096	1,42821694	1,45051292	1,44230908	1,45180424	1,442718829
WALFISCH-BERTONI	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	PROM RMSE
	65,2622285	69,8986964	68,6932882	63,472961	72,811806	68,02779601
	DESV EST	PROM DESV EST				
	2,25166673	2,2313666	2,26573682	2,25175273	2,26940568	2,25398571
	1,77370965	1,75791564	1,78550479	1,77467962	1,78762243	1,775886425
WALFISCH-IKEGAMI	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	PROM RMSE
	28,4010176	32,9707276	31,7422858	26,7856266	34,9903505	30,9780016
	DESV EST	PROM DESV EST				
	2,33076135	2,3073456	2,34443773	2,32605082	2,35123761	2,331966621
	1,83482289	1,81665636	1,84633894	1,83214552	1,85082149	1,836157039

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

Tales resultados demostraron que los modelos con mejor aproximación son **OKUMURA** y **ERICSSON**, con los valores de error RMS de 23,043 y 14,841 respectivamente, confirmando lo observado de manera gráfica.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Planteamiento y formulación del modelo

El modelo Okumura se basa en una serie de curvas diseñadas para el ambiente específico de Japón, abarca grandes rangos de frecuencias lo que le resultó complejo a su desarrollador, para este caso, el rango es limitado a la banda FM, lo cual evitará gran complejidad en su desarrollo. El modelo Ericsson, creado por la empresa homónima, está basado enteramente en el modelo Okumura-Hata lo cual permite utilizar ciertas características propias del mismo.

Todo modelamiento busca una formulación relativamente simple y accesible para su aplicación, por tanto se buscará esta característica.

3.1.1 Parámetros analizados en cada modelo

3.1.1.1 Modelo Okumura

El modelo Okumura, considera para el cálculo de pérdidas, los siguientes aspectos.

$$L_p(dB) = L_0 + A_{mi} - G(h_t) - G(h_r) - G_{\text{area}}$$

(L_0): Las pérdidas por espacio libre, basadas en cálculo numérico:

$$L_0 = 32,44 + 20 \log_{10} d (K\pi) + 20 \log_{10} f (MHz)$$

(A_{mi}): La atenuación relativa promedio relaciona las pérdidas por frecuencia y distancia, pero en los rangos analizados varía muy poco, por lo cual se le puede obviar como factor individual.

(G_{ht} , G_{hr}): las ganancias por alturas de transmisor y receptor se analizarán individualmente.

($G_{\text{área}}$): Al igual que la atenuación relativa promedio, varían muy poco en el rango designado para radiodifusión FM. Y al analizar únicamente el área de Riobamba, se dejó este factor para que el proceso de formulación lo incluya como constante.

3.1.1.2 Modelo Ericsson

Está basado en el modelo Okumura-Hata, se formuló mediante métodos de regresión múltiple, su formulación es la siguiente:

$$L = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log h_t + a_3 \log h_r \log d - 3,2 \log((11,75h_r)^2) + g(f_c)$$
$$g(f_c) = 44,9 \log f_c - 4,78(\log f_c)^2$$

Los coeficientes (a_0 , a_1 , a_2 , a_3), se obtuvieron con la regresión.

$g(f_c)$: es un factor dependiente de la frecuencia.

Las variables que se acompañan de los coeficientes (a_0 , a_1 , a_2 , a_3) se tomarán en cuenta para la formulación del presente modelo.

3.1.2 Formulación del modelo de propagación

El proceso elegido para el modelamiento de las pérdidas por propagación fue la regresión múltiple, un proceso estadístico completo, el cual ha sido utilizado en variedad de procesos complejos, entregando resultados confiables y bastante acertados (Quintana, et al, 2013: p. 16).

El método de regresión simple consiste en ajustar una ecuación de una recta a un conjunto de datos, en el caso de la regresión múltiple, se utilizan más variables, lo cual permite mayor aproximación a la realidad. Dichas variables deben elegirse cuidando que tengan una influencia importante en el fenómeno que se desea explicar o modelar.

Todo modelo de Regresión Lineal múltiple tiene una variable respuesta (en este caso las pérdidas por propagación L), y dos o más variables explicativas.

La formulación, de manera general, para la regresión lineal múltiple es la siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_{n-1}x_{n-1} + \varepsilon$$

En donde se puede observar que hay un valor (β_0) libre de variable x , el cual expresa el punto de intersección de la ecuación con el eje vertical. El error (ε) se podrá encontrar siempre, y son los valores que no se pueden considerar en el estudio. El resto de elementos de la ecuación corresponden a cada una de las variables acompañada por una constante, que define su nivel de afectación sobre la variable explicada.

Para el desarrollo del modelo de Propagación estadístico para la ciudad de Riobamba, se utilizó el procedimiento fundamental de un modelo de regresión, que incluye cuatro pasos:

1. Análisis preliminar (Gráfico-numérico)
2. Ajuste del modelo
3. Análisis de la Bondad del ajuste
4. Diagnóstico del modelo.

Para el desarrollo de cada uno de los pasos se utilizó el software estadístico R, el cual facilita el trabajo con gran cantidad de datos.

3.1.2.1 Análisis preliminar

Consiste en verificar que existe una relación entre la variable explicada y las variables explicativas. Para hacerlo se utilizan dos métodos, gráfico y numérico, de modo que se pueda observar la relación entre variables y luego comprobarla numéricamente.

Para la elección de variables se utilizará lo encontrado en el punto 2.2.2 (*Comparación de modelos con datos obtenidos con el sistema SACER y selección de modelos con mejor aproximación.*), en donde se comprobó que los modelos mejor aproximados a la realidad del entorno de Riobamba eran Okumura y Ericsson, por tanto sus variables se tomaron en cuenta.

El modelo Ericsson cumple con el formato básico de una regresión y sus variables son: $\log d$, $\log h_t$, $\log h_t \log d$ y un factor que incluye la altura del receptor. ($3,2 \log((11,75h_r)^2)$). Del modelo de Okumura se tomaron en cuenta las ganancias por alturas, el resto de factores son representados por curvas, en donde se puede verificar que varían poco en los rangos de trabajo tomados en cuenta en este proyecto. Su fórmula es:

$$G(h_t) = 20 \log(h_t/200) \quad \text{Para} \quad 30m < h_t < 1000m$$

Por tanto, utilizando hojas de cálculo, se encontraron los valores de dichas variables en cada una de las frecuencias. A modo de ejemplo se muestran los diez primeros resultados de la frecuencia 89,3MHz.

Tabla 1-3.- Obtención de variables explicativas. Frecuencia 89,3MHz

Distancia (Km)	h ef tx (m)	Pérdida real (dB)	log _d	log h _t	Log _d log h _t	G(ht)
7,32684539	825,1	64,553762	0,86491703	2,91650659	2,52253621	12,3095318
7,32377041	822,4	65,053762	0,86473472	2,9150831	2,52077357	12,2810621
7,32347461	825,8	64,753762	0,86471718	2,91687488	2,52227182	12,3168977
7,38060905	824,8	73,053762	0,8680922	2,91634865	2,53165952	12,3063731
7,46274069	827,9	72,853762	0,87289835	2,91797788	2,54709808	12,3389577
7,55750218	830,6	72,853762	0,87837828	2,91939193	2,56433046	12,3672386
7,65565181	830,9	73,653762	0,88398217	2,91954876	2,58082906	12,3703753
7,75046682	832,7	77,353762	0,88932786	2,92048856	2,59727185	12,3891714
7,82739087	834,8	73,553762	0,89361702	2,92158244	2,6107758	12,4110489
7,83046796	835,2	62,653762	0,89378772	2,92179049	2,61146045	12,4152098

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

Una vez calculados los valores de las variables, se analizó su relación con las pérdidas reales medidas, que es la variable que se pretende explicar.

El software R nos facilita el proceso mediante la creación de una matriz de diagramas de dispersión, que muestra la relación entre todas las variables elegidas.

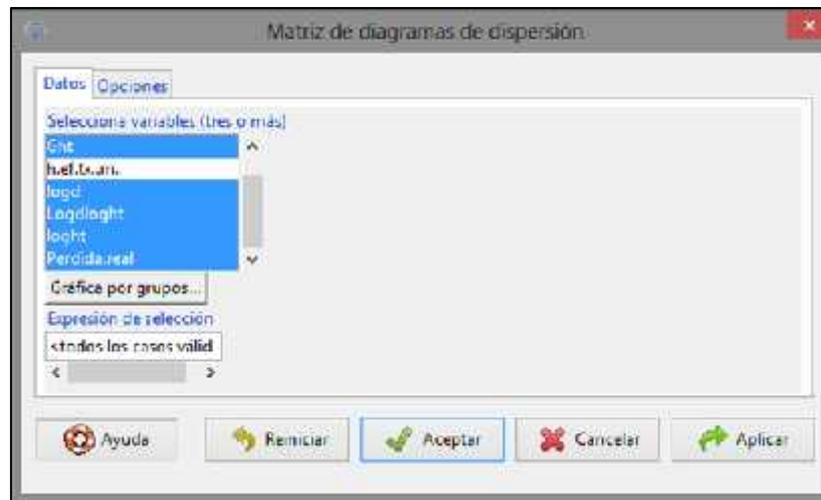


Figura 1-3.- Utilidad Matriz de diagramas de dispersión. Software R.
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

Lo cual arroja como resultado la siguiente matriz.

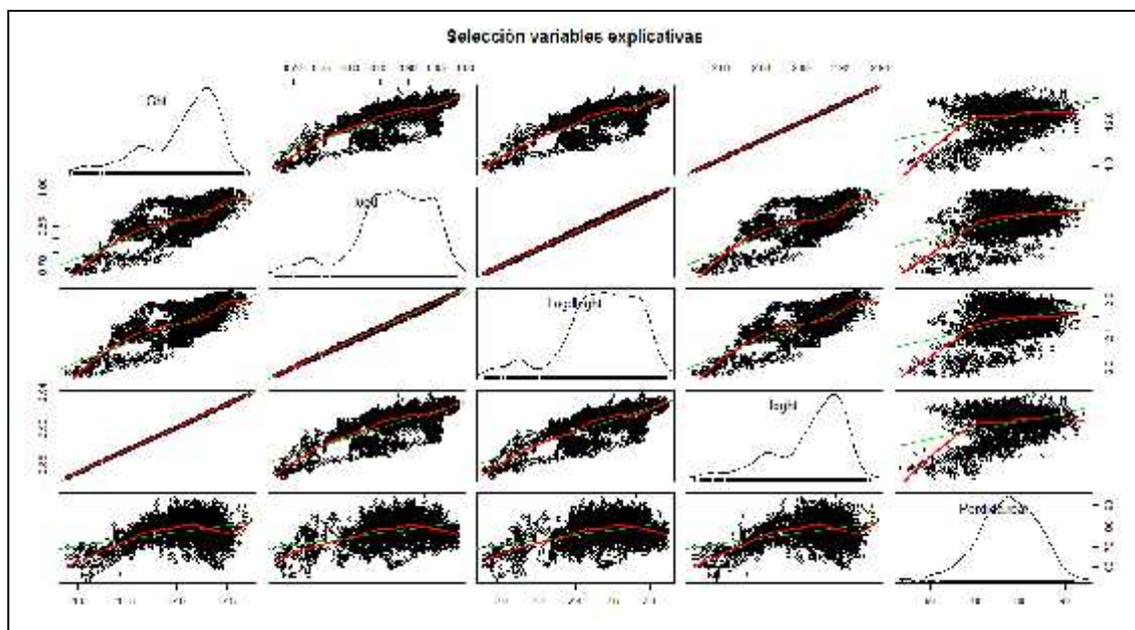


Figura 2-3.- Matriz de diagramas de dispersión. 89,3MHz
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

Como se observa en la figura anterior, se puede analizar cada una de las relaciones entre variables, así como también la distribución de cada una de ellas, no obstante las de interés para el presente trabajo son solo las que explican el comportamiento de la pérdida real, las cuales se encuentran en la última fila de abajo.

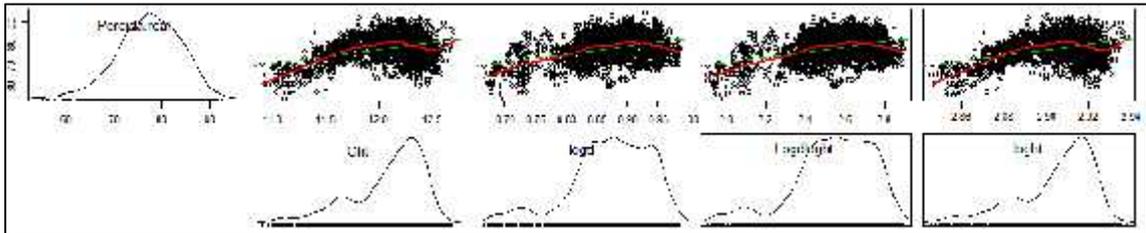


Figura 3-3.- Diagramas de Dispersión. Pérdida real vs variables consideradas. 89,3MHz
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

La primera apreciación denota la amplitud de la nube de datos, que una vez más recuerda la dificultad del modelamiento de fenómenos naturales como la propagación. Pero luego se puede visualizar que hay una tendencia de los datos a cambiar respecto a cada variable, lo cual indica su relación con las pérdidas reales.

Se analizó individualmente cada variable, para constatar la relación con las pérdidas reales.

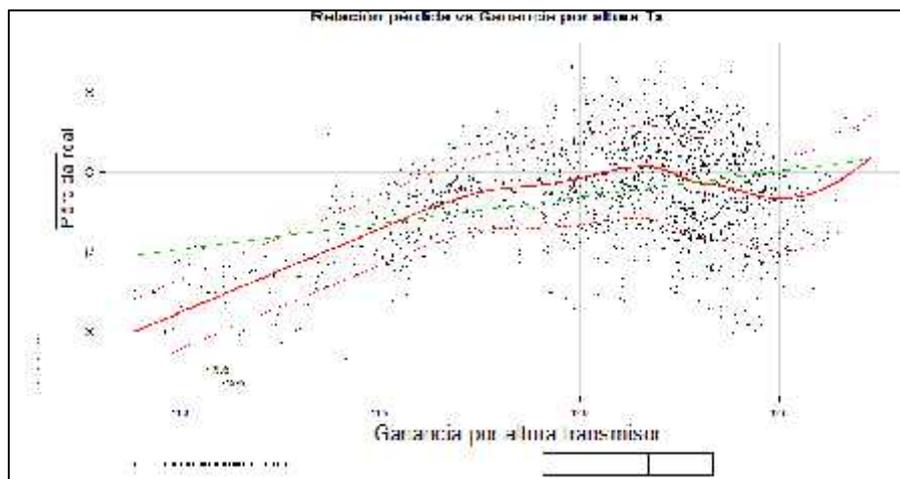


Figura 4-3.- Relación Pérdida real vs Ganancia por altura. 89,3 MHz
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

Se puede observar que este factor extraído del modelo Okumura, efectivamente guarda relación con la pérdida por propagación, ya que ésta última aumenta conforme aumenta la ganancia por

altura, lo cual lo convierte en un factor a considerar en la regresión final, pero al ser directamente proporcional a las pérdidas entonces se crearía confusión al llamarla ganancia, así que para efecto de este trabajo se le llamará Factor de Altura (*Fht*).

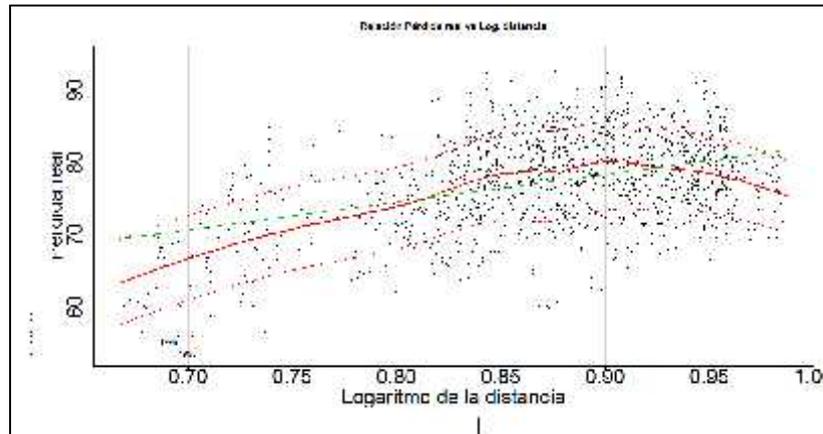


Figura 5-3.- Relación Pérdida real y Logaritmo distancia. 89,3MHz
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

La relación entre el logaritmo de la distancia y las pérdidas de propagación ha sido establecida en todos los modelos, así que de manera análoga, el presente modelo también la considera luego de observar gráficamente su relación.

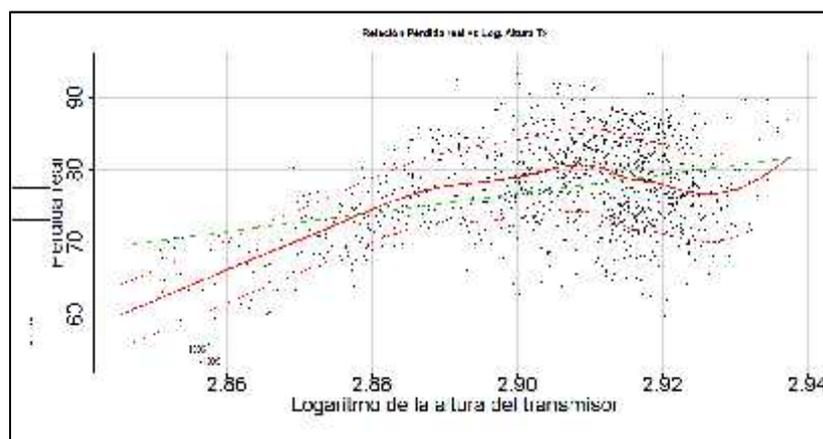


Figura 6-3.- Relación pérdida real y logaritmo de la altura del transmisor. 89,3 MHz
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

Una observación importante en esta gráfica es la similitud con la Figura 4-3, ya que utiliza el mismo factor, con la diferencia de un cociente en la Ganancia de altura, lo cual hizo pertinente

el análisis del comportamiento del modelo con cada uno de los dos factores solo y en conjunto, para elegir la opción más favorable para las predicciones.

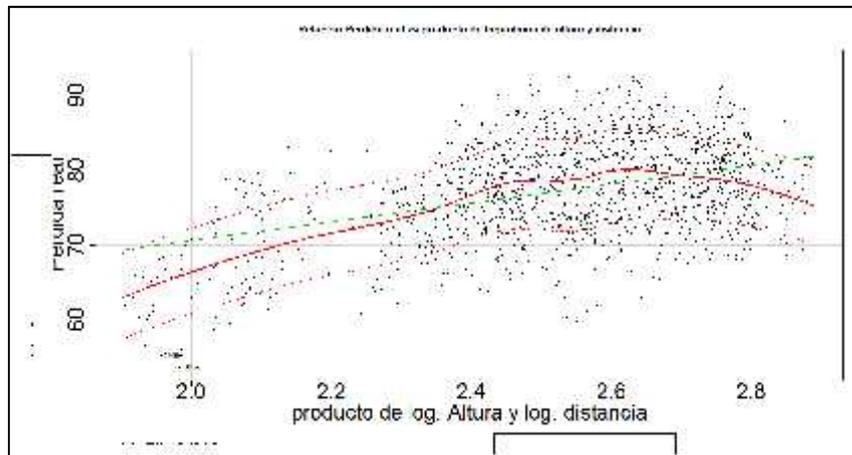


Figura 7-3.- Relación pérdida real vs producto de logaritmos de altura y distancia. 89,3MHz

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

El producto mantiene una relación lineal hasta cierto punto, en donde comienza a decrecer, razón por la cual se utilizó este, como factor de corrección de prueba, si es más conveniente en el modelamiento final, se lo eliminará o modificará de manera que beneficie la predicción.

Una vez observado gráficamente el comportamiento de las variables con respecto a las pérdidas, se realizó un análisis numérico. Dicho análisis consistió en hallar la correlación existente entre cada variable y el valor de las pérdidas, para ello, el software R tiene la herramienta *cor()* que halla, una vez más, una matriz, pero esta vez de correlaciones entre cada variable.

Tabla 2-3.- Matriz de correlaciones entre las variables. 89,3MHz

Correlación	Pérdida real	logd	loght	Logd*loght	Fht
Pérdida real	1.0000000	0.3844225	0.3533897	0.3873877	0.3533897
logd	0.3844225	1.0000000	0.7281336	0.9987103	0.7281336
loght	0.3533897	0.7281336	1.0000000	0.7616407	1.0000000
Logd*loght	0.3873877	0.9987103	0.7616407	1.0000000	0.7616407
Fht	0.3533897	0.7281336	1.0000000	0.7616407	1.0000000

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

La primera fila contiene los datos de interés para el desarrollo del modelo, los valores óptimos de correlación son 1 y -1, que indican relación directa entre variables, los valores cercanos a “0” indican poca relación y cero indica relación inexistente.

Muchos de los valores encontrados, oscilan entre 0,35 y 0.39, lo cual podría indicar que la relación que guardan entre si es poca, pero se debe a la amplia dispersión de los datos de entrada. Este fue el motivo por el cual se buscaron los modelos con mejor aproximación a los valores reales, para utilizar sus variables y dar mayor sustento a la relación que guardan con las pérdidas de propagación reales.

Con la información obtenida en este apartado se concluye que es viable realizar un modelo con las variables obtenidas. El proceso mostrado pertenece únicamente a la frecuencia 89,3MHz, y se utilizó como ejemplo. Para cohesionar la banda de radiodifusión FM se ingresa una nueva variable en el proceso realizado anteriormente, $\log f (MHz)$, ya que la frecuencia es sin duda un factor determinante en todo modelo, se lo utilizó directamente en el proceso de regresión sin la necesidad de comprobar su correlación.

Entonces se eligen las siguientes variables como definitivas en el proceso:

Tabla 3-3.- Variables utilizadas en el modelo

Variab les	Origen/Observación
Logf(MHz)	Análisis intrínseco en un modelo de propagación.
Logd(Km)	Análisis intrínseco en un modelo de propagación. Demostrada su necesidad.
Logd(Km)*loght(m)	Modelo Ericsson. Verificada su correlación.
Fht(dB) / loght(m)	Se verificará en el ajuste del modelo, cuál de las dos variables es la mejor opción.

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

3.1.2.2 Ajuste del modelo

En el presente modelo se pretende ajustar una ecuación que explique o prediga las pérdidas por propagación en función de las variables obtenidas anteriormente.

Para realizar el ajuste del modelo con las variables ingresadas se utiliza el software R, que permite realizar dicho proceso de manera ordenada y directa. El formato requerido del modelo es el siguiente:

$$L = \beta_0 + \beta_1 F_{ht}(dB) + \beta_2 \log d(Km) + \beta_3 \log d(Kn) \log h_t(m) + \beta_4 \log h_t(m) + \beta_5 \log f(MHz) + \varepsilon$$

El método utilizado para ajustar el modelo es el de Máxima verosimilitud, un método cuya idea fundamental es tomar como estimación del parámetro estudiado (en este caso pérdidas de potencia), el valor que tenga la máxima probabilidad de obtener la muestra obtenida. Y se ingresa en el software de la siguiente manera:



Figura 8-3.- Herramienta de regresión lineal. Software R
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015.

La variable explicada es la que se busca predecir y las variables explicativas son aquellas que realizarán distintos procesos para predecirla. Como resultado se obtiene un resumen, en donde se muestran los datos del modelo:

Tabla 4-3.- Resumen del ajuste del modelo

	Estimación	Std. Error	T value	Pr(> t)
(Intersección)	-170.929	20.579	-8.306	<2e-16
Fht (dB)	30.194	1.606	18.806	<2e-16
Log d(Km)	1909.284	109.363	17.458	<2e-16
Logd(Km)*loght(m)	-647.617	37.748	-17.156	<2e-16
log f(MHz)	-72.375	3.988	-18.146	<2e-16
log ht(m)	NA	NA	NA	NA

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

Los valores de la columna *Estimación* corresponden a los coeficientes β_n del modelo teórico al que se pretende alcanzar, por tanto el modelo estimado, es el siguiente:

$$L(dB) = -170,929 + 30,194F_{ht}(dB) + 1909,284 \log d(Km) - 647,17 \log d(Kn) \log h_t(n) - 72,375 \log f(MHz) + \epsilon$$

Como se mencionó anteriormente, los valores del logaritmo de la altura del transmisor, junto con la ganancia de altura del transmisor de Okumura, tenían la posibilidad de ser mutuamente excluyentes ya que tomaban en cuenta la misma variable, esto se vio reflejado en el resultado del ajuste del modelo, en donde resulta más eficiente utilizar solamente el valor del Factor por altura del transmisor.

Con cada elemento de la ecuación resta calcular los intervalos de confianza en los cuales podría encontrarse cada valor. Un intervalo de confianza es un rango de valores donde es más probable que se encuentre el valor de una variable, entre más amplio menos probabilidad de error existe.

Se hallaron los intervalos de confianza al 97,5% utilizando R, tal porcentaje hace que los datos tengan buena posibilidad de acertar y a la vez que el intervalo declarado sea lo suficientemente pequeño para ser de interés. El contraste utilizado para el cálculo del intervalo de confianza es un test bilateral de dos colas.

Tabla 5-3.- Intervalos de confianza al 97,5% de las variables

	2.5 %	97.5 %
(Intersección)	-211.26718	-130.59035
Fht	27.04665	33.34086
logd	1694.91609	2123.65180
Logdloght	-721.60933	-573.62466
LogF	-80.19310	-64.55719

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

De donde se expresan los resultados de la siguiente manera:

$$IC_{97,5\%}(\text{Intersección}) = (-211.26718, -130.59035)$$

$$IC_{97,5\%}(\text{Fht}) = (27.04665, 33.34086)$$

$$IC_{97,5\%}(\text{logd}) = (1694.91609, 2123.65180)$$

$$IC_{97,5\%}(\text{logd*loght}) = (-721.60933, -573.62466)$$

$$IC_{97,5\%}(\text{logf}) = (-80.19310, -64.55719)$$

Contraste de hipótesis

Es el proceso de verificación de variables, en donde se determina si sus coeficientes pueden ser 0 (cero) o no, sin afectar la confiabilidad del ajuste del modelo, es decir, se analiza la relevancia de cada variable.

El modelo ajustado cuenta con cuatro variables, cada una acompañada de un coeficiente, y un coeficiente libre, éste último representa el punto de intersección de la función con el eje “y” en caso de que las variables sean nulas, es decir, el valor de las pérdidas de potencia si es que el resto de factores son nulos. Este coeficiente no acompaña a ninguna variable, por tanto si su valor es cero, ninguna variable desaparecería o se descartaría, por ende es innecesario su análisis en el contraste de hipótesis.

Las hipótesis a contrastar o analizar, son las siguientes.

$$\begin{cases} H_0: \beta_n = 0 \\ H_1: \beta_n \neq 0 \end{cases}$$

Para realizar el contraste de hipótesis, se utiliza el **p-valor** de los coeficientes, el cual indica la probabilidad de obtener, al menos un resultado extremo que cause que el coeficiente analizado sea cero, lo cual haría que no sea lo suficientemente confiable. *Por definición:* El p-valor es el nivel de significación más pequeño que conduce al rechazo de H_0 .

Para calcular el p-valor se utiliza el tipo de contraste, en este caso bilateral o de dos colas. El software R lo calculó automáticamente al realizar el ajuste del modelo y se lo puede hallar en el resumen del modelo, en la **Tabla 4-3** en la columna *Pr (>|t|)*.

El criterio de decisión por tanto, es el siguiente:

$$\begin{cases} \text{si } p - \text{valor} < \alpha & \Rightarrow \text{Se rechaza } H_0 \\ \text{si } p - \text{valor} \geq \alpha & \Rightarrow \text{Se acepta } H_0 \end{cases}$$

En donde, se utiliza el valor α que es la diferencia entre el valor máximo significación (100%) y el porcentaje de significación utilizado (nivel de confianza), que en este caso es 97,5%, por tanto $\alpha = 0,025$.

Utilizando los datos de la **Tabla 4-3**, se verificaron las hipótesis en cada coeficiente:

Tabla 6-3.- Contraste de hipótesis con coeficientes

	Estimación	p-valor	<	Hipótesis aceptada
Fht(dB)	30.194	<2e-16	Si	H_1
Log d(Km)	1909.284	<2e-16	Si	H_1
Logd(Km)*loght(m)	-647.617	<2e-16	Si	H_1
log f(MHz)	-72.375	<2e-16	Si	H_1

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

Por tanto, no se puede aceptar la hipótesis nula, es decir se rechaza H_0 , y los coeficientes de cada variable son significativos. De darse el caso opuesto con algún coeficiente, significa que la información contenida en la variable asociada, podría solaparse con la información otorgada por el resto de variables.

3.1.2.3 Bondad del modelo

Para determinar, de manera general, si el modelo es o no válido se utilizan tres criterios:

- **El error estándar residual.**- que es la estimación puntual de la desviación típica del modelo. Al ser un error se busca que sea el menor posible. Se lo puede hallar en el resumen del modelo, entregado por el software R.

```

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -170.929    20.579  -8.306  <2e-16 ***
Ght          30.194     1.606  18.806  <2e-16 ***
logd        1909.284   109.363  17.458  <2e-16 ***
logdloght   -647.617    37.748 -17.156  <2e-16 ***
LogF        -72.375     3.988 -18.146  <2e-16 ***
loght       NA         NA      NA      NA
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.236 on 13045 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5175, Adjusted R-squared:  0.5173
F-statistic: 906.6 on 4 and 13045 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 9-3.- Resumen del modelo
Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

En la parte inferior se encuentra el valor **Residual standard error: 6,236** que es el de interés en este punto.

Para determinar si el error es grande o no, es necesario obtener el coeficiente de variación, el cual es la relación entre el error estándar residual y la media de la variable explicada, en este caso, Pérdidas reales de potencia. Con el comando **mean ()**, R devuelve el valor de la media del grupo de valores de la variable indicada, la media obtenida de la variable pérdida de potencia fue:

$$Media_{97,5\%} = 75,04405$$

El coeficiente de variación se define con la siguiente fórmula:

$$cv = 100 \left(\frac{RSE}{Media} \right) \%$$

El valor obtenido tiene que ser menor al 10% para verificar que el modelo es factible y confiable. En este caso el valor obtenido:

$$cv = 100 \left(\frac{6,236}{75,04405} \right) \%$$

$$cv = 8,31\%$$

El valor es menor a 10%, por tanto el modelo es confiable de acuerdo a este criterio.

- **Tabla de ANOVA**

Consiste en un análisis de varianzas en conjunto (ANalysis Of VAriance), el cual determinará si es que todas las variables pueden ser cero, es decir, que el modelo no exista y la variable buscada (pérdida de potencia), no dependa de ninguna otra (sea constante).

Por simple inspección se puede definir que la información de la variable pérdida de potencia en el modelo, no es un valor constante, sino más bien, una función variable, pero es necesaria su verificación numérica.

Para comprobar la necesidad de las variables en el modelo, se utilizó un contraste de hipótesis que exprese dicha condición.

$$\begin{cases} H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0 \\ H_1 = \text{Lo contrario} \end{cases}$$

Una vez más se utilizó un **p-valor** para aceptar o rechazar H_0 , el cual se obtiene del resumen del ajuste en la parte inferior derecha de la **Figura 9-3**.

$$P\text{-valor} = 2e-16$$

Nuevamente el criterio de decisión fue el siguiente:

$$\begin{cases} \text{si } p\text{-valor} < \alpha & \Rightarrow \text{Se rechaza } H_0 \\ \text{si } p\text{-valor} \geq \alpha & \Rightarrow \text{Se acepta } H_0 \end{cases}$$

Dado de $\alpha = 0,025$, entonces:

$$p\text{-valor} < \alpha$$

Se rechaza H_0 , lo cual indica que el modelo es **aceptado** por este criterio.

- **El coeficiente de determinación R^2** : Mide la variabilidad total de los datos que predice el modelo, por tanto mientras más cercano a “1” sea, mejor será el modelo.

El valor de R^2 se puede encontrar en el resumen del modelo (*Tabla 3-9.-*), y se verifica $R^2=0,5175$, el cual es un valor aceptable considerando la cantidad de datos, y significa que el modelo de regresión puede predecir más del 51% de los datos.

El coeficiente R^2 puede mejorarse mediante un truco estadístico, que consiste en el ingreso de variables explicativas en la ecuación, aún si éstas no tienen relación con la variable explicada. Para evitar esto se desarrolló el método de R^2 ajustado, el cual penaliza el valor del coeficiente de acuerdo al número de variables explicativas, mientras más variables se ingrese para mejorar R^2 mayor es la penalización en R^2 ajustado. Si la diferencia entre ambos coeficientes es demasiado grande, se debe utilizar el valor ajustado, en este caso el número de variables explicativas es relativamente pequeño por lo que ambos coeficientes son prácticamente iguales, así que se utilizó el valor inicial.

En este punto, en cuanto a bondad del ajuste, se concluyó que el modelo cumplió con las exigencias estadísticas para ser confiable.

Concluido el procedimiento fundamental de un modelo de regresión, finalmente el modelo estadístico de propagación diseñado, al que denominaremos **GMC-FM-R**, abreviatura de “Gabriela Martínez y Mauro Caluña – Frecuencia Modulada en Riobamba”, queda definido como:

$$L(dB) = -170,929 + 30,194F_{ht}(dB) + 1909,284 \log d(Km) \\ - 647,17 \log d(Kn) \log h_t(n) - 72,375 \log f(MHz)$$

3.2 Validación del modelo de propagación

El proceso de validación del modelo consistió en los dos pasos que se realizaron para analizar los demás modelos, primero de manera gráfica y luego de manera numérica conjuntamente con los otros modelos, para verificar si efectivamente se logró el objetivo de mejorar la efectividad de las predicciones de pérdidas de potencia por propagación.

3.2.1 Análisis gráfico

Pérdidas vs distancia.

Para poder demostrar la mejor aproximación del modelo diseñado (GMC-FM-R) con respecto al resto de modelos, se los ingresó en una misma gráfica con cada una de las frecuencias analizadas. A manera de ejemplo, se muestra el análisis con la frecuencia 89,3MHz.

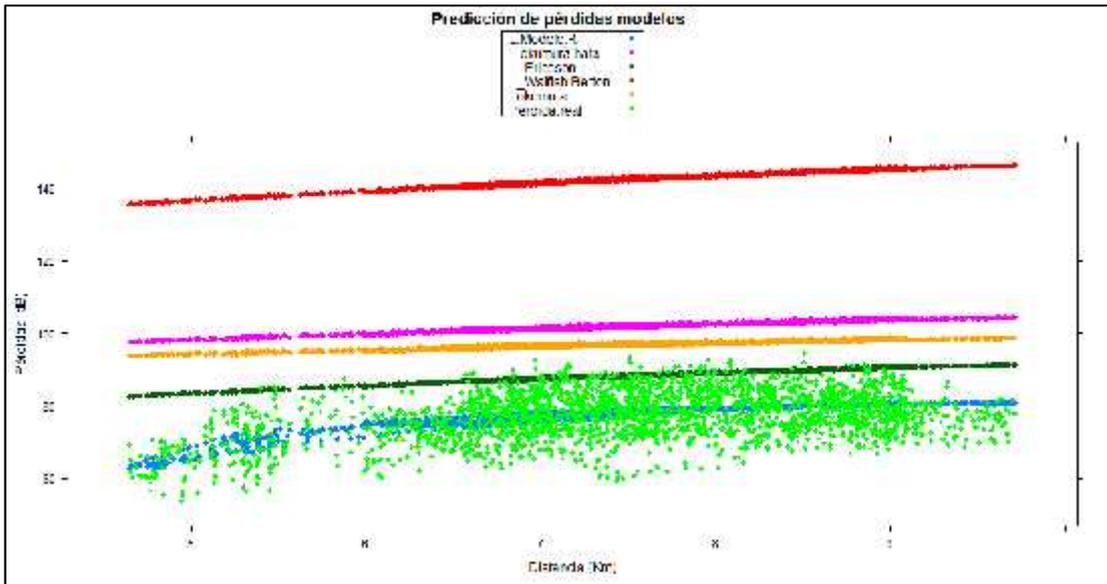


Figura 10-3.- Comparación de predicciones entre modelos con modelo GMC-FM-R.
 Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

Por simple inspección se observa que las predicciones del modelo diseñado GMC-FM-R, se encuentran entre los valores reales, lo cual implica una disminución sustancial en la desviación estándar de los datos y por tanto mejor exactitud de los mismos.

Se analizó también su desempeño en toda la familia de curvas, lo cual también describirá su eficiencia en toda la banda FM.

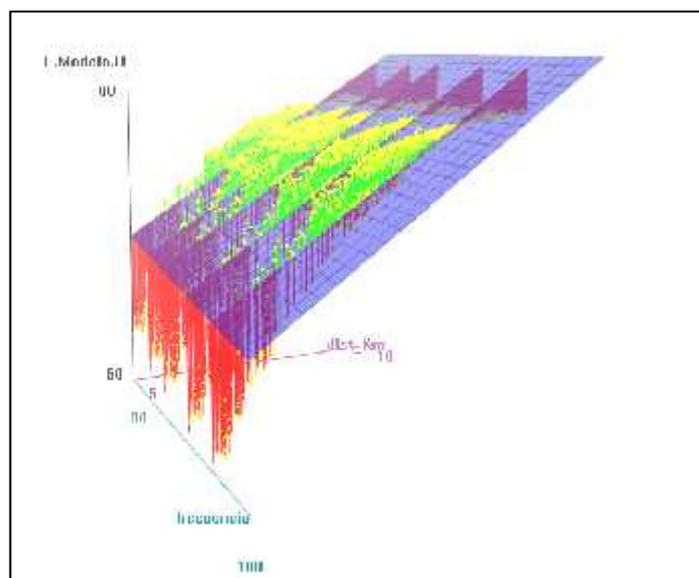


Figura 11-3.- Familia de curvas, predicciones Modelo GMC-FM-R.
 Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

La relación de las pérdidas y la distancia se ve claramente, y la variación con respecto a la frecuencia es poca, lo que se puede explicar por la relativamente poca anchura de la banda de frecuencias analizada.

3.2.2 Análisis numérico

La verificación que resta al modelo GMC-FM-R y que comprueba la hipótesis, es el análisis numérico del error RMS y su comparación con los demás modelos.

La fórmula del error RMS es la siguiente:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xm_i - xc_i)^2}{n}}$$

Y aplicándola sobre los valores calculados por el modelo GMC-FM-R, los resultados (comparados con los demás modelos) fueron los siguientes:

Tabla 7-3.- Resultados de la comparación entre modelos

	Magnitud	Valor
Okumura	RMSE	23,04341532
	DESV EST	1,068811733
Okumura-Hata	RMSE	27,99515183
	DESV EST	1,458786204
Ericsson	RMSE	14,84136527
	DESV EST	1,833901607
Walfisch-Bertoni	RMSE	68,02779601
	DESV EST	2,25398571
Walfisch-Ikegami	RMSE	30,9780016
	DESV EST	2,331966621
Modelo GMC-FM-R	RMSE	6,338761
	DESV EST	1,00233

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015

Los resultados son claros, tanto el error RMS como la desviación estándar son menores en el modelo GMC-FM-R, con lo cual se verifica que el modelo diseñado es más eficiente para el ambiente de Riobamba que los modelos existentes.

3.2.3 Comparación con Software Radio Mobile

Finalmente se comparan los resultados obtenidos por la predicción del modelo GMC-FM-R, con las predicciones realizadas por el software Radio Mobile y los valores reales, todo esto con la finalidad de verificar la aproximación.

Software Radio Mobile

Radio Mobile es un software de simulación de radio-propagación, de acceso libre, desarrollado por Roger Coudé para predecir el comportamiento de sistemas radio, simular radioenlaces y representar el área de cobertura de una red de radiocomunicaciones, entre otras funciones.

El software trabaja en el rango de frecuencias entre 20 MHz y 20 GHz y está basado en el modelo de propagación ITM (Irregular Terrain Model) o modelo Longley-Rice.

Se ingresó los mismos datos en ambos modelos y se comparan los resultados en la tabla siguiente:

Riobamba Stereo: 89,3MHz

Ubicación del transmisor: 01°41'30,95" 78°42'57,98" Altura: 3556m

Potencia Radiada: 936W

Tabla 8-3.- Comparación Resultados: Modelo GMC-FM-R con Radio Mobile.

Distancia (Km)	h ef tx (m)	Pérdida real (db)	L Modelo R (dB)	L. Radio Mobile (Longley-Rice) (dB)
5,41917955	724,3	67,75376	68,263850	99,2
6,55599574	804,4	78,253762	76,5300006	95,9
7,28010532	793,1	74,653762	77,5649791	96,8
7,32347461	825,8	64,753762	78,4265565	96,4
7,32377041	822,4	65,053762	78,3476494	96,5
7,32684539	825,1	64,553762	78,4146139	96,4
8,16453358	797,6	76,853762	79,2381604	97,7
8,35713311	841,6	68,753762	79,7222565	97,5
9,04987949	843,2	79,253762	80,2714765	100,2
9,21270357	846,7	80,653762	80,3567203	100,8

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015.

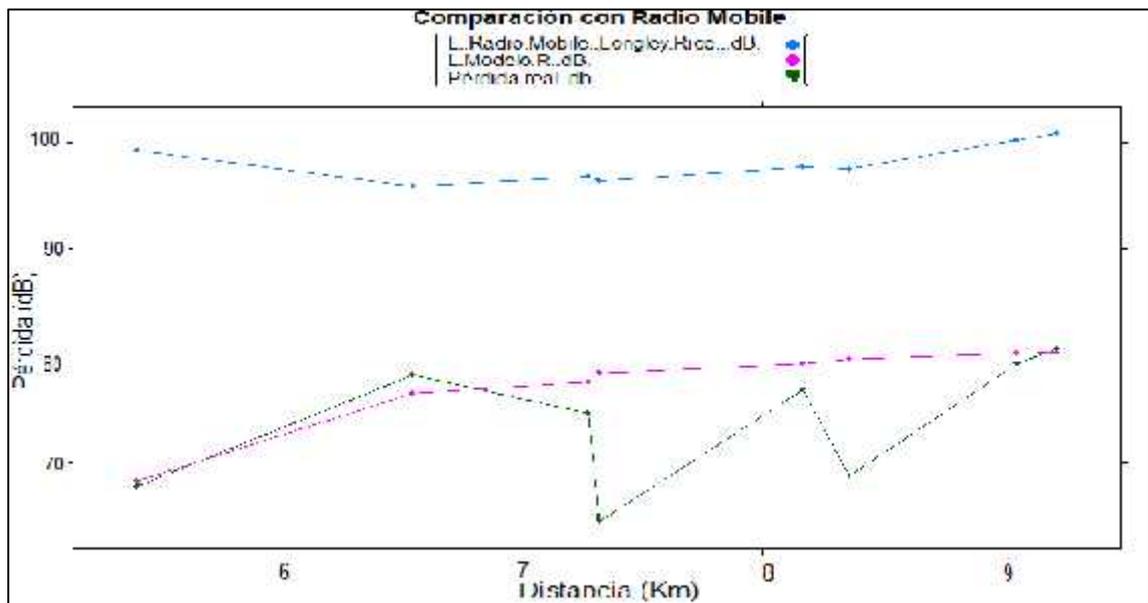


Figura 12-3.- Comparación Modelo GMC-FM-R con Radio Mobile

Realizado por: Martínez, G. Caluña, M. 2015. Software R.

Es fácilmente observable que el modelo diseñado GMC-FM-R es más aproximado a los valores reales medidos, oscilando entre valores de 68 dB a 80 dB, contra el Software Radio Mobile que

predice valores entre 95dB y 100dB, que son valores muy altos en comparación con valores medidos.

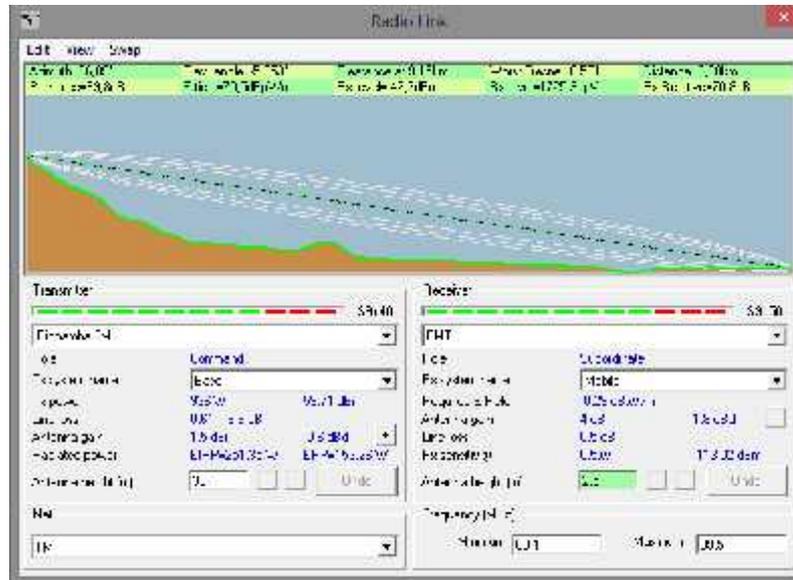


Figura 13-3.- Ejemplo Perfil de enlace entre Riobamba Stereo y un punto aleatorio en Riobamba

Realizado por.- Martínez, G. Caluña, M. 2015. Radio Mobile.

3.2.4 Desarrollo de una aplicación en C# para aplicación y comparación del modelo.

C# es un lenguaje de programación orientado a objetos, diseñado para la infraestructura de lenguaje común. En el contexto de validación del modelo GMC-FM-R se diseñó una aplicación que permite ingresar datos referentes al sistema de comunicaciones, calcular las pérdidas de potencia predichas por el modelo diseñado y posteriormente, comparar con el resto de modelos. De esta manera se pretende realizar comprobaciones rápidas que validen el modelo.

Manual

Al iniciarse el programa, aparece la pantalla de ingreso de datos para el cálculo de pérdidas por el modelo diseñado para Riobamba, al mismo tiempo se visualiza la fórmula en la parte superior.

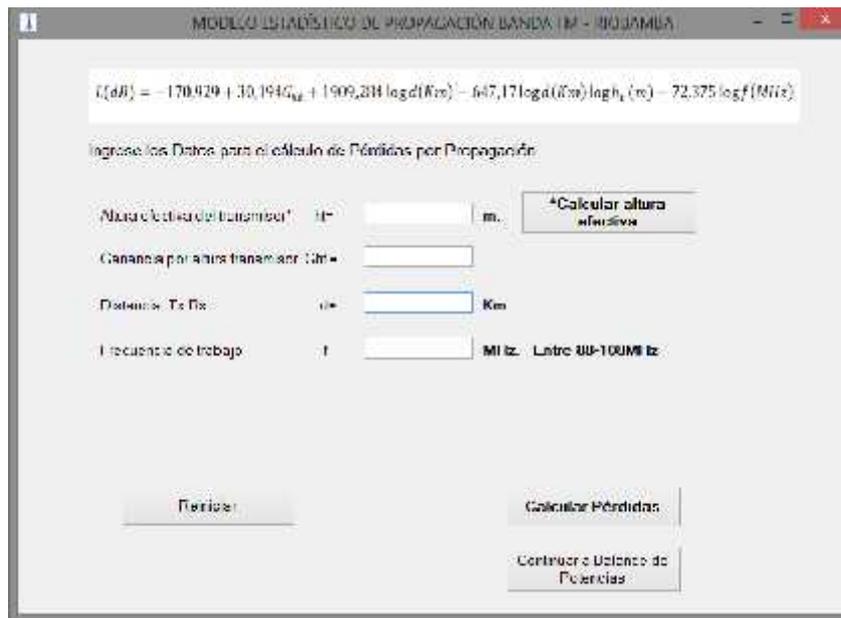


Figura 14-3.- Formulario principal, aplicación para validar el modelo GMC-FM-R
Realizado por.- Martínez, G. Caluña, M. 2015. C#

El botón **Calcular altura efectiva**, permite el acceso a un formulario en donde se realiza el cálculo correspondiente, usando las alturas del transmisor y receptor. En el mismo se muestra un diagrama que ayuda a colocar los valores correctamente.

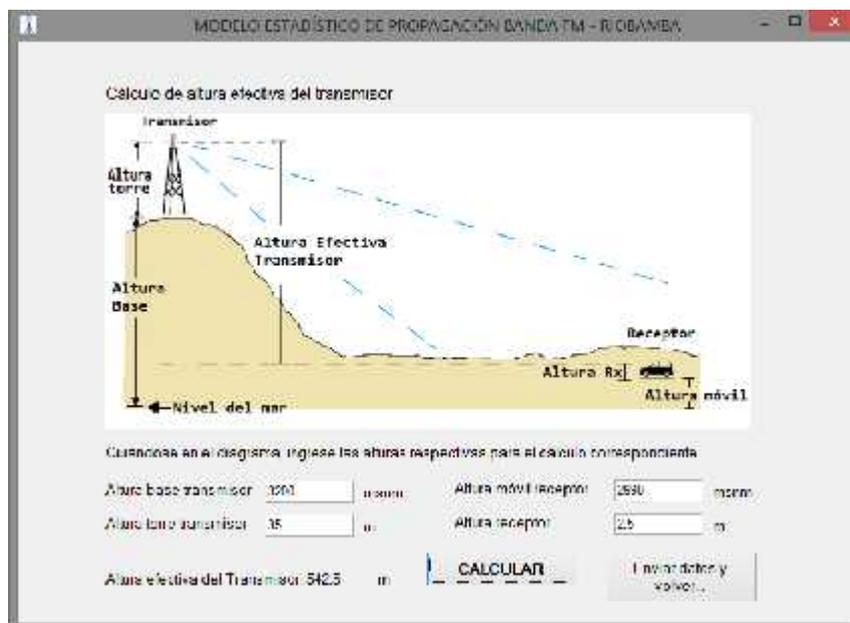


Figura 15-3.- Formulario Cálculo de altura efectiva del transmisor
Realizado por.- Martínez, G. Caluña, M. 2015. C#

El botón **Calcular**, muestra la altura efectiva calculada en metros, y el botón **Enviar datos y volver** comparte el valor calculado con el formulario principal, a la vez que calcula el factor por altura del transmisor.

Figura 16-3.- Formulario Principal con datos ingresados
Realizado por.- Martínez, G. Caluña, M. 2015. C#

En el formulario principal el Botón **Calcular pérdidas** muestra la predicción de pérdidas por propagación según el modelo GMC-FM-R, y el botón **Continuar a Balance de potencias** envía los datos calculados al siguiente formulario en donde se podrá obtener la potencia recibida.

Figura 17-3- Formulario Balance de potencias
Realizado por.- Martínez, G. Caluña, M. 2015. C#

Los datos que deben ingresarse en esta ventana corresponden al presupuesto de enlace, ganancias y pérdidas de los dispositivos para finalmente Calcular Potencia Recibida en dBm; el botón Comparar con otros modelos muestra los cálculos con todos los modelos analizados en el trabajo para realizar una comparación final.

	Potencia de Potencia	Potencia de Señal
Modelo Clamart	107.51470 dB	-42.3457 dBm
Modelo Okumura	108.1158 dB	46.7158 dBm
Modelo Walford (derecha)	147.1118 dB	20.0140 dBm
Modelo Emission	11.1111 dB	11.4111 dBm
Modelo Walford (izquierda)		
Modelo ITU-R	76.00000 dB	18.00000 dBm

Calcular

Figura 18-3.- Formulario Comparación de GMC-FM-R con otros modelos de Propagación
Realizado por.- Martínez, G. Caluña, M. 2015. C#

CONCLUSIONES

- Con la utilización de la EM del SACER facilitada por la ARCOTEL, se realizó una campaña de mediciones en el casco urbano de la ciudad de Riobamba obteniendo valores que constituyeron la base del desarrollo del proyecto.
- Al realizar la comparación entre las predicciones de pérdidas por propagación de los modelos analizados en el proyecto con los valores reales obtenidos en base a las mediciones, se obtuvo que los modelos más aproximados son: Okumura y Ericsson, los cuales se utilizaron en el proceso de formulación del nuevo modelo.
- El modelo diseñado GMC-FM-R mejoró notablemente el nivel de predicción de pérdidas por propagación en el entorno de Riobamba, disminuyendo el error RMS hasta 6,34 y la desviación estándar de los datos a un valor de 1,00233, lo que lo convierte en el modelo más adecuado para la banda FM en la ciudad de Riobamba.
- El desarrollo del modelo estadístico de propagación para la banda FM GMC-FM-R ayudará a los interesados en conseguir una concesión para radiodifusión FM en la ciudad de Riobamba, a realizar sus estudios de ingeniería con mejor aproximación y efectividad, lo cual se traducirá en el aprovechamiento óptimo de los recursos que deban utilizar, asimismo los actuales concesionarios de servicios de radiodifusión FM, pueden utilizarlo para configurar sus equipos en funcionamiento, de manera que incrementen su eficiencia, tanto energética como funcional.
- La efectividad del modelo GMC-FM-R, al igual que en todos los modelos de propagación empíricos, disminuirá conforme aumenten las diferencias entre el ambiente donde se desarrolló y el ambiente donde se aplique.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda desarrollar modelos de propagación propios para ciudades, tanto grandes como medianas, para mejorar la eficiencia de los servicios de telecomunicaciones.
- Un proceso de regresión lineal múltiple puede entregar resultados aparentemente exactos, pero debe comprobarse primero la bondad del modelo ajustado.
- Al diseñar un modelo se recomienda que el número de variables explicativas para ajustarlo sean las mínimas posibles, dado que, al usar muchas, aparentemente se logra exactitud, pero solo se dificulta el proceso sin mejorarlo considerablemente.
- La utilización de equipos seriados en los sistemas de transmisión es una práctica recomendable, que permite un control preciso de la potencia radiada y por ende de los recursos utilizados.
- El modelo GMC-FM-R centra su desarrollo en mediciones de señales outdoor y se podría complementar analizando el comportamiento de las señales en entornos indoor.
- Se recomienda ampliar el uso del modelo GMC-FM-R mediante el desarrollo de una aplicación que permita, mediante sus predicciones de pérdidas por propagación, graficar la cobertura y el perfil topográfico de sistemas de radiodifusión en la ciudad de Riobamba.

GLOSARIO

Espectro radioeléctrico.- Conjunto de ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin necesidad de guía artificial utilizado para la prestación de servicios de telecomunicaciones, radiodifusión sonora y televisión, seguridad, defensa, emergencias, transporte e investigación científica, entre otros.

Estaciones locales: Aquellas utilizadas para cubrir las cabeceras cantonales o sectores de baja población que no sean capitales de provincia, cuya frecuencia pueda ser reutilizada en otro cantón de la misma área de operación independiente , conforme las características técnicas descritas en la Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica.

Estación matriz: Es el conjunto del control máster, transmisor y demás instalaciones necesarias para la operación de la estación de radiodifusión sonora FM dentro de su área de cobertura autorizada.

Estación repetidora: Es la estación de radiodifusión sonora FM que recepta la totalidad de la programación de la estación matriz y la transmite simultáneamente en su área de cobertura autorizada.

Línea de transmisión: La línea que se utilice para alimentar la antena debe ser guía de onda o cable coaxial, con características de impedancia que permitan un acoplamiento adecuado entre el transmisor y la antena, con el fin de minimizar las pérdidas de potencia.

Radiodifusión.- Servicio cuyas emisiones se destinan a ser recibidas directamente por el público en general, abarcando emisiones sonoras, de televisión o de otro género.

Sistema radiante: Constituye el arreglo de antenas utilizadas para la transmisión de las señales, el cual dará lugar a patrones de radiación y estarán orientadas para irradiar a sectores poblacionales de acuerdo a los requerimientos y autorizaciones establecidas en el contrato.

Telecomunicaciones.- es toda transmisión, emisión o recepción de signos, señales, textos, vídeo, imágenes, sonidos o informaciones de cualquier naturaleza, por sistemas alámbricos, ópticos o inalámbricos, inventados y por inventarse.

Sistema de radiodifusión sonora FM: Es el conjunto de la estación matriz y sus repetidoras, que emiten la misma y simultánea programación con carácter permanente.

Enlaces auxiliares: Son los enlaces físicos o radioeléctricos necesarios para la operación y funcionamiento de las estaciones y sistemas de radiodifusión sonora FM; estos enlaces sirven para la conectividad entre el control máster y transmisor, con las estaciones repetidoras y entre los estudios de producción y control máster de una misma estación, para la conformación de redes eventuales y permanentes, así como para los sistemas de operación remota y para conexión ascendente y descendente satelital.

RDS: Sistema que incorpora nuevos servicios y contenidos en la recepción FM, tales como: identificación de programas, nombre del servicio de programa, y radio-búsqueda de estaciones de un mismo sistema (donde sea aplicable).

BIBLIOGRAFÍA

BALANIS, Constantine. *Antenna Theory, Analysis and Design*. 3ra ed. New Jersey - Estados Unidos : John Wiley & Sons, 2005 pp. 27-85.

BONASTRE, Jordi. *Propagación de ondas electromagnéticas*. [En línea]. Barcelona - España: Publicaciones y Recursos académicos, 2001, pp. 3 – 23. [Consulta: 26 de Enero de 2015.] Disponible en: [https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica_II_ES/Fisica_II_ES_\(Modulo_5\).pdf](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica_II_ES/Fisica_II_ES_(Modulo_5).pdf).

CHENG, David. *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería*. Mexico DF - México: Addison-Wesley Iberoamericana, 1997 pp. 426-465.

Datos completos Ciudad de Riobamba. [blog]. 2015. [Consulta: 11 de Mayo de 2015.] Disponible en: http://docsetools.com/articulos-enciclopedicos/article_84007.html.

FLORIAN, M. *Propagación de Señales*. [En línea]. Puebla - México: Repositorio Universidad de las Americas, 2005, pp. 2 – 18. [Consulta: 01 de Mayo de 2015.] Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/florian_m_a/capitulo3.pdf.

GARCÍA, A; ORTEGA, H; NAVARRO, A; RODRÍGUEZ, A. *Efectos del terreno en la propagación electromagnética en entornos urbanos sobre la región andina, usando el modelo Cost-231-Walfisch-Ikegami y herramientas de planificación basadas en GIS*. [En línea] Bucaramanga-Colombia: Universidad Industrial de Santander. 2008, pp. 15-29. [Consulta: 23 de Marzo de 2015.] Disponible en: http://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/sistemas_teleomatica/article/view/921/946.

GARCÍA, J, RODRÍGUEZ, O y CASTILLO, J. *Propagación Electromagnética*. [En línea]. Buenos Aires – Argentina: Universidad Pedro de Valdivia. 2002, pp. 12 – 34. [Consulta: 03 de Mayo de 2015.] Disponible en: <http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%de20Consulta/Telecomunicaciones/Articulos%20de%20telecomunicaciones/ID016.pdf>.

GUZMÁN, Juan. *Estandarización de los parámetros técnicos de operación de las estaciones de Radiodifusión FM con cobertura en la provincia de Pichincha.* (Tesis Pregrado) [En línea]. Ingeniería. Sangolquí – Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Ejército. Departamento de Eléctrica y Electrónica. 2012, pp. 5 – 16. [Consulta: 27 de Febrero de 2015.]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5740/1/T-ESPE-034214.pdf>.

HAYT, William; & BUCK, John. *Teoría Electromagnética.* 8va ed. Mexico DF - México: McGraw-Hill, 2004, pp. 347 - 440.

HERRERA, J; & PÉREZ, N. [En línea]. Santander – Colombia: *Repositorio Universidad de Pamplona.* 1998, pp. 4 – 29. [Consulta: 01 de Mayo de 2015.]. Disponible en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/02_v07_12/revista_12/16112011/v12_18.pdf.

ITU-R REC-P 1546-1. *Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 300 MHz.*

JARRIN, Jaime. *Desarrollo del Simulador para un modelo de propagación del análisis de cobertura en conformidad con el estándar IEEE 802.16-2009 (Fixed Wireless MAN OFDM).* [En línea]. Sangolquí – Ecuador: Repositorio Escuela Superior Politécnica del Ejército. 2013, pp. 7 – 28. [Consulta: 24 de Marzo de 2015.]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/5590/T-ESPE-033736.pdf?sequence=1>

KRAUSS, John; & FLEISCH, D. *Electromagnetismo.* 5ta ed. México DF. - México: McGraw-Hill, 2005, pp. 41-89.

MARKOV, G; & SAZNONOV. *Antenas.* Moskú - Rusia: Editorial Mir, 1978, pp. 115 - 132.

MEDIAVILLA, A; & SALAZAR, J. *Historia de la Radiodifusión.* [blog]. Valladolid – España: Web Universidad de Valladolid. 2012, pp. 1 – 4. [Consulta: 11 de Noviembre de 2014.]. Disponible en: http://www.lpi.tel.uva.es/~miguel/io2/trabajos0506/historia_radiodifusion/#_Toc136070202.

PARSON, J. *Propagación Electromagnética*. [En línea]. 2da ed. Chichester – Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd. 2000, pp. 15 – 68. [Consulta: 03 de Mayo de 2015.] Disponible en: <http://twanclik.free.fr/electricity/electronic/pdfdone15/The%20Mobile%20Radio%20Propagation%20Channel%20-%20Second%20Edition%20-%20Wiley.pdf>.

PÉREZ, Constantino; CASANUEVA, López. “Propagación Electromagnética”. En: *Sistemas de Telecomunicaciones*. [En línea]. Santander (Cantabria - España): Universidad de Cantabria, 2007, pp. 50 - 61. [Consulta: 01 de Mayo de 2015.] Disponible en: http://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH11ST_Web.pdf

QUINTANA, Reinier, BORDÓN, Raikel; & MONTEJO, Samuel. “Estudio comparativo de los modelos de propagación del canal inalámbrico”. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. [En línea], Abril de 2013, (Santa Clara – Cuba) XXXIV(1), pp. 12 – 26. [Consulta: 02 de Abril de 2015]. ISSN: 1815-5928. Disponible en: <http://rielac.cujae.edu.cu/index.php/riec/article/download/150/pdf>.

RES ARCOTEL-2015-0061. *Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica*.

SANTA CRUZ, Oscar. *Modulación Angular*. [En línea]. Ciudad Universitaria (Córdoba - Argentina): Web Universidad Tecnológica Nacional. 2010, pp. 1 – 4. [Consulta: 12 de Mayo de 2015.] Disponible en: <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Aplicada/Cap06FM1-1.pdf>.

SORIANO, J. “Modelos de Propagación”. En: *Propagación electromagnética*. [En línea]. Puebla – México: Web Universidad de las Américas Puebla. 2009, pp. 1 – 7. [Consulta: 03 de Mayo de 2015.] Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/soriano_m_jc/capitulo2.pdf.

SUPERTEL. *sitio web SUPERTEL*. [En línea] 2013. Disponible en: http://www.supertel.gob.ec/pdf/publicaciones/cuadernillo_6.pdf.

SUPERTEL. “Radiodifusión FM en Ecuador”. *Revista SUPERTEL*. [En línea]. 2012, (Ecuador) 1(15), pp. 5 - 18. [Consulta: 23 de Octubre de 2014.] Disponible en: http://www.supertel.gob.ec/pdf/publicaciones/revista_supertel15.pdf.

VILA, B. “Propagación de ondas”. En: *Propagación electromagnética*. [En línea]. Puebla – México: Web Universidad de las Américas Puebla. 2009, pp. 1 - 21. [Consulta: 12 de Mayo de 2015.] Disponible en: http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/vila_b_ca/capitulo1.pdf.

VILLAREAL, Jesús Ramón. *Algoritmos de Propagación para Comunicaciones Inalámbricas*. (Tesis Post Grado) [En línea]. Maestría. Tijuana - México: Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital. 2005, pp. 37 - 48. [Consulta: 12 de Mayo de 2015.] Disponible en: http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/758/423_2005_CITEDI_MAESTRIA_jesus_villareal.pdf?sequence=1

ANEXOS

Anexo A: Fotografías Antenas radiantes estaciones



Ingreso Cerro Cacha



Arreglos de antenas de radiodifusión



Conjunto de equipos transmisores y receptores de microonda



Equipo receptor de enlace microondas



Conectores en equipo transmisor



Cable de transmisión señales. DRAKA rfa 1/2"

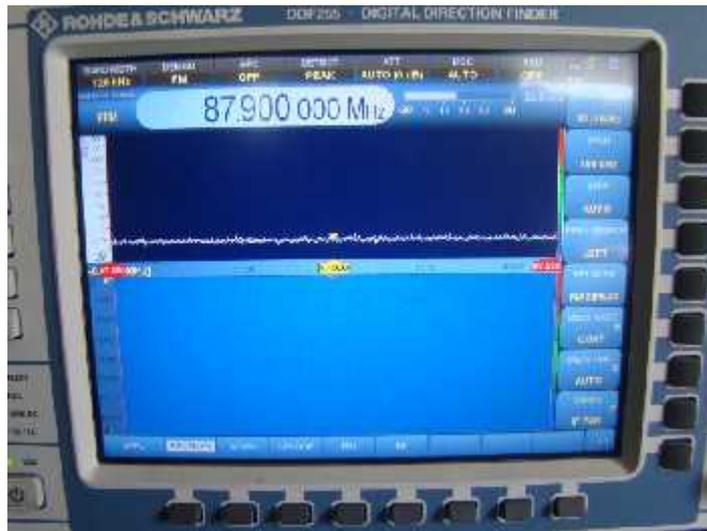
Anexo B: Mediciones en la ciudad de Riobamba



Vehículo EM vista lateral



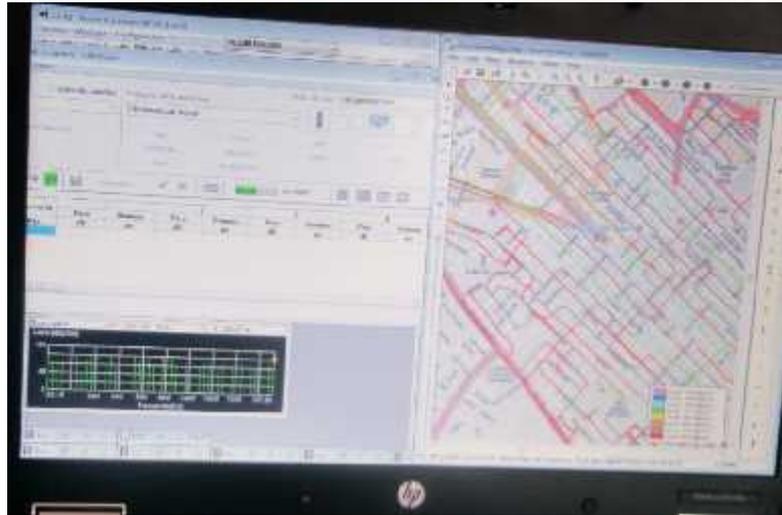
Vehículo EM vista frontal



Sistema DDF-255 encendido



Sistema DDF-255 en funcionamiento



Software ARGUS en funcionamiento enlace con Map View

Anexo C.- Código de programa Modelo Estadístico de Propagación banda FM – Riobamba

Program C#

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace Tesis_Demostracion
{
    static class Program
    {
        /// <summary>
        /// Punto de entrada principal para la aplicación.
        /// </summary>
        [STAThread]
        static void Main()
        {
            Application.EnableVisualStyles();
            Application.SetCompatibleTextRenderingDefault(false);
            Application.Run(new demo1());
        }
    }
}
```

Form 1 (Principal)

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace Tesis_Demostracion
{
    public partial class demo1 : Form
    {
        float distancia;
        float alturax;
        double galt;
        float frecuencia;
        double perd;
        public demo1()
    }
}
```

```

    {
        InitializeComponent();
    }

    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (string.IsNullOrEmpty(txt1.Text) || string.IsNullOrEmpty(txt2.Text) ||
string.IsNullOrEmpty(txt3.Text))
        {
            MessageBox.Show("Favor de llenar todos los campos");
            return;
        }
        else
        {
            distancia = float.Parse(txt1.Text);
            alturax = float.Parse(txt2.Text);
            frecuencia = float.Parse(txt3.Text);
            galt = 20 * Math.Log10(alturax / 200);
            perd = -170.929 + 30.194 * galt + 1909.284 * Math.Log10(distancia) - 647.17 *
Math.Log10(distancia) * Math.Log10(alturax) - 72.375 * Math.Log10(frecuencia);
            lbltiqueta.Text = "Pérdidas de Potencia          L=";
            lbldB.Text = "dB.";
            perd = Math.Round(perd, 5);
            lblperdidas.Text = perd.ToString();
        }
    }
}

```

Form 2 (Balance de potencias)

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace Tesis_Demostracion
{
    public partial class Form2 : Form
    {
        public Form2()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void button1_Click_1(object sender, EventArgs e)

```

```

{
    demo1 f1 = new demo1();
    f1.Show();
    this.Hide();
}

private void btn_calc_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (string.IsNullOrEmpty(txt_potencia.Text) || string.IsNullOrEmpty(txt_perdt.Text) ||
string.IsNullOrEmpty(txt_gaint.Text) || string.IsNullOrEmpty(txtvalor.Text) ||
string.IsNullOrEmpty(txt_gainr.Text) || string.IsNullOrEmpty(txt_perdr.Text))
    {
        MessageBox.Show("Favor de llenar todos los campos");
        return;
    }
    else
    {
        float pot_w = float.Parse(txt_potencia.Text);
        double pot_dB = 10 * Math.Log10(pot_w) + 30;
        float perdt = float.Parse(txt_perdt.Text);
        float gaint = float.Parse(txt_gaint.Text);
        float perdida = float.Parse(txtvalor.Text);
        float gainr = float.Parse(txt_gainr.Text);
        float perdr = float.Parse(txt_perdr.Text);
        double pot_rec = pot_dB - perdt + gaint - perdida + gainr - perdr;
        pot_rec = Math.Round(pot_rec, 5);
        lbl_etiqueta.Text = "Potencia Recibida ";
        lbl_valor.Text = pot_rec.ToString();
        lbl_dB.Text = "dBm";
    }
}

private void btn_comparar_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Comparar f4 = new Comparar();
    float pot_w = float.Parse(txt_potencia.Text);
    double pot_dB = 10 * Math.Log10(pot_w) + 30;
    float perdt = float.Parse(txt_perdt.Text);
    float gaint = float.Parse(txt_gaint.Text);
    float perdida = float.Parse(txtvalor.Text);
    float gainr = float.Parse(txt_gainr.Text);
    float perdr = float.Parse(txt_perdr.Text);

    float altt = float.Parse(lbl_alturat.Text);
    float dist= float.Parse(lbl_distancia.Text);
    float frec= float.Parse(lbl_frecuencia.Text);
    float altr= float.Parse(lbl_alturar.Text);
    f4.Show();
    f4.modelo.Text = txtvalor.Text;
    //Espacio Libre
    double lo = 32.44 + 20 * Math.Log10(dist) + 20 * Math.Log10(frec);
}

```

```

//Modelo Okumura
double okumura = lo+21-20*Math.Log10(altr/200)-10*Math.Log10(altr/3);
okumura = Math.Round(okumura, 5);
f4.okumura.Text = okumura.ToString();
double okumurap = pot_dB - perdt + gaint - okumura + gainr - perdr;
okumurap = Math.Round(okumurap, 5);
f4.txt_okumura.Text = okumurap.ToString();

//Modelo Hata
double hata = 69.5 + 26.16 * Math.Log10(frec) - 13.82 * Math.Log10(altr) +
Math.Log10(dist) * (44.9 - 6.55 * Math.Log10(altr)) - ((1.1 * Math.Log10(frec) - 0.7) * altr -
(1.56 * Math.Log10(frec) - 0.8));
hata = Math.Round(hata, 5);
f4.hata.Text = hata.ToString();
double hatap = pot_dB - perdt + gaint - hata + gainr - perdr;
hatap = Math.Round(hatap, 5);
f4.txt_hata.Text = hatap.ToString();

//Modelo Bertoni
double bertoni = lo + 57.1 + 5 * Math.Log10(100 + 7.5 * 7.5) - 9 * Math.Log10(20) +
20 * Math.Log10(Math.Atan(0.75) * 180 / Math.PI) + Math.Log10(frec) + 18 *
Math.Log10(dist) - 18 * Math.Log10(altr - 10) - 18 * Math.Log10(1 - (Math.Pow(dist, 2) /
(17*(altr-10)))));
bertoni = Math.Round(bertoni, 5);
f4.bertoni.Text = bertoni.ToString();
double bertonip = pot_dB - perdt + gaint - bertoni + gainr - perdr;
bertonip = Math.Round(bertonip, 5);
f4.txt_bertoni.Text = bertonip.ToString();

//Modelo Ericsson
double ericson = 36.2 + 30.2 * Math.Log10(dist) - 12 * Math.Log10(altr) + 0.1 *
Math.Log10(altr) * Math.Log10(dist) - 3.2 * Math.Log10(Math.Pow(11.75 * altr, 2)) + 44.9 *
Math.Log10(frec) - 4.78 * Math.Pow(Math.Log10(frec), 2);
ericson = Math.Round(ericson, 5);
f4.ericson.Text = ericson.ToString();
double ericsonp = pot_dB - perdt + gaint - ericson + gainr - perdr;
ericsonp = Math.Round(ericsonp, 5);
f4.txt_ericson.Text = ericsonp.ToString();

//Modelo diseñado
double pot_rec = pot_dB - perdt + gaint - perdida + gainr - perdr;
pot_rec = Math.Round(pot_rec, 5);
f4.txt_modelo.Text = pot_rec.ToString();
}

}
}

```

Form 3 (Altura eficaz)

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace Tesis_Demostracion
{
    public partial class Form3_alt : Form
    {
        float alt_ef = 0;
        public Form3_alt()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            if (alt_ef == 0)
            {
                MessageBox.Show("Por favor, realice un cálculo primero");
                return;
            }
            else
            {
                demo1 f1 = new demo1();
                f1.txt2.Text = alt_ef.ToString();
                f1.lbl_alt.Text = txt_Rx.Text;
                f1.Show();
                double galt = 20 * Math.Log10(alt_ef / 200);
                galt = Math.Round(galt, 5);
                f1.txt_ght.Text = galt.ToString();
                this.Hide();
            }
        }

        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            if (string.IsNullOrEmpty(txt_base_tx.Text) || string.IsNullOrEmpty(txt_torre.Text) ||
                string.IsNullOrEmpty(txt_movil.Text) || string.IsNullOrEmpty(txt_Rx.Text))
            {
                MessageBox.Show("Favor de llenar todos los campos");
                return;
            }
            else
            {
```

```

    {
        float baset = float.Parse(txt_base_tx.Text);
        float torre = float.Parse(txt_torre.Text);
        float movil = float.Parse(txt_movil.Text);
        float tx = float.Parse(txt_Rx.Text);
        alt_ef = baset+torre-movil-tx;
        lbl1.Text = "Altura efectiva del Transmisor: ";
        lbl_altura.Text = alt_ef.ToString();
        lbl_m.Text = "m";
    }
}
}
}

```

Form 4 (Comparación modelos)

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace Tesis_Demostracion
{
    public partial class Comparar : Form
    {
        public Comparar()
        {
            InitializeComponent();
        }
        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            this.Hide();
        }
    }
}

```