

# **Predicción de Cobertura para un Sistema de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada (FM) utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG)**



**Erney Oswaldo Ceron Muñoz  
Diego Alexander Vega Tello**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e InALámbricas - GRIAL  
Línea de Investigación en Señales y Sistemas de Acceso y  
Difusión Basados en Radio  
Popayán, Septiembre 2010**

# **Predicción de Cobertura para un Sistema de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada (FM) utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG)**



**Trabajo de Grado**

**Erney Oswaldo Ceron Muñoz  
Diego Alexander Vega Tello**

**Director: Víctor Manuel Quintero Flórez**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e InALámbricas - GRIAL  
Línea de Investigación en Señales y Sistemas de Acceso y  
Difusión Basados en Radio  
Popayán, Septiembre 2010**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, Roca y Fortaleza mía.

A mi madre y mi padre, por su apoyo incondicional, su fe y su amor.

A mis hermanos, por contagiarme su alegría.

*Diego*

A mi familia por el esfuerzo, amor y dedicación, los cuales fueron tan grandes y decisivos en la consecución de este objetivo, que no cuento con palabras para agradecerles. Lo único que puedo es dedicarles este trabajo y todos mis logros conseguidos pues todos ellos se deben en gran medida a su inmensa colaboración.

A Sergio por convertirse en la razón de todo lo que hago y soy.

*Oswaldo*

A nuestro director, que desde el inicio del proyecto nos brindó su asesoría y colaboración.

Al Ingeniero Daniel Díaz, por su colaboración en la etapa inicial del proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
<b>1. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. GENERALIDADES .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 COMPONENTES DE UN SIG.....</b>	<b>5</b>
1.2.1 Hardware.....	5
1.2.2 Software.....	5
1.2.3 Datos.....	6
1.2.4 Recurso Humano.....	6
1.2.5 Métodos.....	6
<b>1.3 MODELADO DE DATOS EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
1.3.1 Vectorial.....	6
1.3.2 Ráster.....	7
<b>1.4 VENTAJAS Y APLICACIONES DE LOS SIG .....</b>	<b>9</b>
<b>1.5 ARCGIS .....</b>	<b>11</b>
1.5.1 ArcGIS Desktop.....	11
1.5.2 Aplicaciones de ArcGIS Desktop.....	12
1.5.3 Extensiones de ArcGIS .....	12
1.5.4 ArcObjects.....	13
<b>1.6 SISTEMAS DE COORDENADAS Y SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL .....</b>	<b>13</b>
<b>2. MODELOS DE PREDICCIÓN DE PROPAGACIÓN PARA SISTEMAS DE RADIODIFUSIÓN SONORA EN FRECUENCIA MODULADA (FM) .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 GENERALIDADES .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 DEFINICION DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE PROPAGACIÓN.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 MODELO DE PROPAGACIÓN DE ESPACIO LIBRE.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4 MODELO DE LONGLEY RICE .....</b>	<b>21</b>
2.4.1 Atenuación de Referencia.....	23
2.4.1.1 Atenuación de referencia para la región de difracción Adiff.....	24
2.4.1.2 Atenuación de referencia para la región línea de vista Alos .....	28
<b>2.5 MODELO 2D ANDERSON .....</b>	<b>29</b>
2.5.1 En Modo LOS.....	30
2.5.1.1 Atenuación debida a la reflexión Areflection.....	31
2.5.1.2 Atenuación debida a la obstrucción parcial de la zona Fresnel.....	33
2.5.2 En Modo NLOS.....	34
<b>2.6 MÉTODO GENERAL PARA UNO Ó MÁS OBSTÁCULOS REC UIT-R 526.....</b>	<b>35</b>
2.6.1 Difracción en una Tierra Esférica .....	35
2.6.1.1 Pérdida por difracción en trayectos transhorizonte.....	35
2.6.2 Pérdidas por Difracción en Trayectos con Visibilidad Directa.....	37
2.6.3 Método General para uno o más Obstáculos.....	38
<b>2.7 MODELO PARA PROPAGACIÓN EN EXTERIORES EN EL RANGO DE 50 MHZ A 1GHZ.....</b>	<b>40</b>

<b>2.8</b>	<b>MÉTODO GENERAL PARA DETERMINAR EL NIVEL DE CAMPO ELECTRICO HACIENDO USO DE LAS CURVAS E(50,50)</b> .....	42
<b>2.9</b>	<b>PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN</b> .....	49
2.9.1	<i>Obstáculo Aislado</i> .....	49
2.9.1.1	Obstáculo agudo.....	49
2.9.2	<i>Dos Obstáculos Aislados</i> .....	50
2.9.2.1	Método Wilkerson.....	51
2.9.2.2	Método de Epstein-Peterson .....	51
2.9.2.3	Método EMP .....	52
2.9.3	<i>Múltiples Obstáculos</i> .....	52
<b>3</b>	<b>HERRAMIENTA FMPREDICTION</b> .....	<b>54</b>
3.1	<b>REQUERIMIENTOS</b> .....	54
3.2	<b>DOCUMENTACIÓN E INFORMACIÓN</b> .....	54
3.3	<b>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA</b> .....	54
3.3.1	<i>Interfaz Gráfica de Usuario</i> .....	54
3.3.2	<i>Entrada-Salida del Sistema</i> .....	55
3.3.3	<i>Diseño de la Herramienta</i> .....	56
3.3.3.1	Área de cobertura.....	58
3.3.3.2	Intensidad de campo .....	59
3.3.3.3	Perfil del Terreno y pérdidas por difracción .....	59
<b>4</b>	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	<b>61</b>
4.1	<b>CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR.</b> .....	61
4.1.1	<i>Sistema de Transmisión.</i> .....	61
4.2	<b>CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA RECEPTORA.</b> .....	62
4.2.1	<i>Frecuencia de Operación</i> .....	63
4.2.2	<i>Ganancia de la Antena Receptora</i> .....	64
4.2.3	<i>Espectro</i> .....	69
4.2.4	<i>Impedancia</i> .....	70
4.3	<b>MEDIDAS DE CAMPO</b> .....	73
4.4	<b>COMPARACIÓN DEL NIVEL DE CAMPO ELÉCTRICO ENTRE LAS MEDIDAS REALES Y LOS RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE.</b> .....	76
4.5	<b>ÁREA DE COBERTURA</b> .....	79
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....	<b>89</b>
5.1	<b>CONCLUSIONES</b> .....	89
5.2	<b>TRABAJOS FUTUROS</b> .....	90

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b>	Capas Superpuestas en un SIG.....	4
<b>Figura 1.2.</b>	Componentes de un SIG.....	5
<b>Figura 1.3.</b>	Formatos de Datos más Importantes en un SIG.....	8
<b>Figura 1.4.</b>	Herramientas Ofrecías por ArcGIS Desktop para desarrollar SIG .....	11
<b>Figura 1.5.</b>	Representación Gráfica de los Paralelos para Medir la Latitud. ....	14
<b>Figura 1.6.</b>	Representación Gráfica de los Meridianos para Medir la Longitud. ....	14
<b>Figura 1.7.</b>	Sistemas de Coordenadas Rectangulares. ....	15
<b>Figura 1.8.</b>	Receptor GPS Garmin.....	16
<b>Figura 2.1.</b>	Atenuación de Referencia en Función de la Distancia. ....	24
<b>Figura 2.2.</b>	Propagación con Línea de Vista.....	37
<b>Figura 2.3.</b>	Geometría para una Sola Arista. ....	39
<b>Figura 2.4.</b>	Pérdidas por Difracción en Función de $v$ .....	39
<b>Figura 2.5.</b>	Aplicación del Parámetro $\Delta h$ para Sistemas de Radiodifusión. ....	43
<b>Figura 2.6.</b>	Angulo de Despeje $\theta$ . ....	44
<b>Figura 2.7.</b>	Factores de Corrección en Función del Angulo $\theta$ .....	44
<b>Figura 2.8.</b>	Diagrama con la Geografía Original Existente en un Radioenlace.....	45
<b>Figura 2.9.</b>	Intensidad de Campo Eléctrico para 1 KW de PRA.....	47
<b>Figura 2.10.</b>	Factor de Corrección en Función de la Distancia $d$ y $\Delta h$ .....	48
<b>Figura 2.11.</b>	Obstáculo Agudo. ....	50
<b>Figura 2.12.</b>	Dos Obstáculos Aislados. ....	50
<b>Figura 2.13.</b>	Representación Gráfica del Método Wilkerson. ....	51
<b>Figura 2.14.</b>	Representación Gráfica del Método Epstein-Peterson.....	51
<b>Figura 2.15.</b>	Representación Gráfica del Método EMP.....	52
<b>Figura 2.16.</b>	Atenuación por Difracción Debida a Múltiples Obstáculos. ....	52
<b>Figura 3.1.</b>	Interfaz Grafica de Usuario – Ventana Principal .....	55
<b>Figura 3.2.</b>	Esquema General de Funcionamiento.....	57
<b>Figura 3.3.</b>	Patrón de Análisis para el Área de Cobertura .....	59
<b>Figura 4.1.</b>	Patrón de Radiación Horizontal de Antena Transmisora.....	61
<b>Figura 4.2.</b>	Patrón de Radiación Vertical de Antena Transmisora .....	62
<b>Figura 4.3.</b>	Dipolo Plegado de Lambda Medios. ....	62
<b>Figura 4.4.</b>	Balun y Conectores Tipo N y Tipo BNC Macho. ....	63
<b>Figura 4.5.</b>	Patrón de Radiación de un Dipolo Típico .....	66
<b>Figura 4.6.</b>	Sección Transversal del Dipolo .....	67
<b>Figura 4.7.</b>	Espectro de las Distintas Estaciones de Radio FM en Popayán. ....	69
<b>Figura 4.8.</b>	Representación Gráfica de los Componentes de Impedancia $Z$ .....	70
<b>Figura 4.9.</b>	Componente Real de $Z$ . ....	71
<b>Figura 4.10.</b>	Componente Imaginario de $Z$ . ....	71
<b>Figura 4.11.</b>	Magnitud de $Z$ . ....	72
<b>Figura 4.12.</b>	Fase de $Z$ . ....	73
<b>Figura 4.13.</b>	Comparación Niveles de Campo Eléctrico en Sena Norte.....	76
<b>Figura 4.14.</b>	Comparación Niveles de Campo Eléctrico en el Colegio Seminario. ....	76
<b>Figura 4.15.</b>	Comparación Niveles de Campo Eléctrico en Campo Real.....	77
<b>Figura 4.16.</b>	Comparación Niveles de Campo Eléctrico en el CDU.....	77
<b>Figura 4.17.</b>	Atenuación de Referencia en Función de la Distancia. ....	78
<b>Figura 4.18.</b>	Area de Cobertura Obtenida con el Modelo de Espacio Libre para 300W .....	80
<b>Figura 4.19.</b>	Area de Cobertura Obtenida con el Modelo de Espacio Libre para 5 KW.....	80
<b>Figura 4.20.</b>	Area de Cobertura Obtenida con las Curvas E(50,50) para 300w. ....	81

<b>Figura 4.21.</b>	Area de Cobertura Obtenida con las Curvas E(50,50) para 5 KW.....	81
<b>Figura 4.22.</b>	Area de Cobertura con Modelo Propuesto en Rec. ITU. 526-10 para 300w. ....	82
<b>Figura 4.23.</b>	Area de Cobertura con Modelo Propuesto en Rec.ITU.526-10 para 5KW.....	82
<b>Figura 4.24.</b>	Area de Cobertura Obtenida con el Modelo Longley Rice para 300W. ....	83
<b>Figura 4.25.</b>	Area de Cobertura Obtenida con el Modelo Longley Rice para 5 KW.....	83
<b>Figura 4.26.</b>	Área de Cobertura para Unicauca Estéreo con Radiomobile para 300W. ....	84
<b>Figura 4.27.</b>	Área de Cobertura para Unicauca Estéreo con Radiomobile para 5KW.....	85
<b>Figura 4.28.</b>	Área de Cobertura Obtenida con el modelo 2D Anderson para 300W.....	86
<b>Figura 4.29.</b>	Area de Cobertura Obtenida con el Modelo 2D Anderson para 5KW.....	86
<b>Figura 4.30.</b>	Area de Cobertura Obtenida con las Curvas F(50,50) para 300W. ....	87
<b>Figura 4.31.</b>	Área de Cobertura con F(50,50) para una Potencia de 5KW.....	87
<b>Figura 4.32.</b>	Diferencias entre los Niveles de Campo Medidos y Calculados. ....	88

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Ventajas y Desventajas de los Formatos Raster y Vectorial.....	9
<b>Tabla 2.1.</b> Parámetros del Modelo Longley Rice. ....	21
<b>Tabla 2.2.</b> Coeficientes para el Cálculo del Factor de Atenuación $n$ .....	42
<b>Tabla 2.3.</b> Factores Típicos de Ganancias $C$ . ....	43
<b>Tabla 2.4.</b> Figura de Mérito para Antenas Típicas. ....	49
<b>Tabla 3.1.</b> Datos contenidos en el archivo generado por la herramienta.....	56
<b>Tabla 4.1.</b> Patrón de Radiación Medido Entre Cero y Noventa Grados.....	64
<b>Tabla 4.2.</b> Patrón de Radiación Medido Entre Cero y Menos Noventa Grados. ....	65
<b>Tabla 4.3.</b> Sitios Propuestos para Encontrar su Nivel de Campo Eléctrico. ....	74
<b>Tabla 4.4.</b> Medidas de Campo Eléctrico Reales. ....	75
<b>Tabla 4.5.</b> Niveles de Campo Eléctrico con la Herramienta Software y Radiomobile.....	85
<b>Tabla 4.6.</b> Diferencias Entre los Niveles de Campo Medidos y Calculados. ....	88

## LISTA DE ACRONIMOS

<b>API</b>	Application Programming Interface (Interfaces de Programación de Aplicaciones).
<b>CGIS</b>	Canadian Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica de Canadá).
<b>COM</b>	Component Object Model (Modelo de Objetos de Componentes).
<b>DTM</b>	Digital Terrain Maps (Mapas Digitales de Terreno).
<b>ESRI</b>	Environmental Systems Research Institute (Instituto de Investigación en Sistemas Ambientales).
<b>FCC</b>	Federal Communications Commission (Comisión Federal de Comunicaciones).
<b>FM</b>	Frequency Modulation (Modulación en Frecuencia).
<b>GIS</b>	Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica).
<b>GPS</b>	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global).
<b>GTD</b>	Geometrical Theory of Diffraction (Teoría Geométrica de la Difracción).
<b>GUI</b>	Graphical User Interface (Interfaz Gráfica de Usuario).
<b>ITM</b>	Irregular Terrain Model (Modelo de Terreno Irregular).
<b>ITS</b>	Institute for Telecommunication Sciences (Instituto para las Ciencias de las Telecomunicaciones).
<b>LOS</b>	Line Of Sight (Línea de Vista).
<b>LUNR</b>	Land Use and Resource Information System (Sistema de Información de Recursos y Uso del Terreno).
<b>MLMIS</b>	Minnesota Land Management Information System (Sistema de Información de Administración del Terreno de Minnesota).
<b>NLOS</b>	Non Line Of Sight (Sin Línea de Vista).
<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant (Asistente Digital Personal).
<b>PIOS</b>	Polygon Information Overlay System (Sistema de Información de Superposición Poligonal).
<b>PIRE</b>	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva.
<b>PRA</b>	Potencia Radiada Aparente.
<b>SGBD</b>	Database Management System (Sistema de Administración de Base de Datos).
<b>VBA</b>	Visual Basic for Applications (Visual Basic para Aplicaciones).
<b>VBE</b>	Visual Basic Editor (Editor de Visual Basic).
<b>VR-GIS</b>	Virtual Reality – GIS.
<b>API</b>	Application Programming Interface (Interfaces de Programación de Aplicaciones).
<b>CGIS</b>	Canadian Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica de Canadá).
<b>COM</b>	Component Object Model (Modelo de Objetos de Componentes).
<b>DTM</b>	Digital Terrain Maps (Mapas Digitales de Terreno).

## INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Radiodifusión Sonora con Modulación en Frecuencia (FM, *Frequency Modulation*) son ampliamente utilizados en Colombia.

Con el objetivo de permanecer acorde a los avances tecnológicos, los diseñadores e implementadores de los Sistemas de Radiodifusión Sonora en FM necesitan contar con herramientas automatizadas para determinar el área de cobertura de una estación radial, dado que en muchos casos este procedimiento es realizado de manera manual convirtiéndose en un método poco práctico y tedioso.

Por lo tanto es necesario diseñar e implementar una herramienta informática basada en un Sistema de Información Geográfica (GIS, *Geographic Information System*) que permita estimar la cobertura teniendo en cuenta las características geográficas de la región y las características de transmisión de un sistema de radiodifusión sonora en FM.

En este trabajo de grado se desarrolló una herramienta informática para determinar el área de servicio de una estación de radiodifusión sonora en FM, en la cual se implementan seis modelos distintos de predicción de propagación, cuyos resultados fueron comparados entre sí y con medidas de campo con el objetivo de determinar cuál de ellos es el más apropiado para ser utilizado en el departamento del Cauca.

El documento principal consta de cuatro capítulos que documentan la realización del trabajo de grado y la implementación de la herramienta software. En los dos primeros se hace una referencia teórica sobre los Sistemas de Información Geográfica, los sistemas de coordenadas, el Sistema de Posicionamiento Global (*GPS, Global Positioning System*) y los modelos de predicción de propagación para sistemas de radiodifusión sonora en FM. En el capítulo 3 se presenta la caracterización de la antena utilizada, las medidas de campo realizadas, la comparación de las medidas con los resultados obtenidos en la herramienta software, y el área de cobertura generada con cada uno de los seis modelos de predicción de propagación. Finalmente en el capítulo cuatro se presentan las conclusiones para este trabajo de grado. Los capítulos en mención se complementan con dos anexos donde se presenta el diseño y manual de usuario de la herramienta software.

# 1. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

## 1.1. GENERALIDADES

Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas que permiten almacenar, consultar, analizar y mapear características de un lugar. Estas herramientas cuentan con la capacidad de realizar representaciones del mundo real por medio de capas; cada una con un tipo diferente de información relacionada con una localización geográfica específica [1]. Un SIG puede analizar cualquier información almacenada en plantillas o bases de datos con componentes geográficos, permitiendo ver patrones, relaciones y tendencias que no podrían verse en un formato de tabla o lista, haciendo que la información se maneje de forma dinámica, facilitando, con esto la toma de decisiones [2,3].

El primer uso de los SIG se realizó en los años 60 con el Sistema de Información Geográfica de Canadá (CGIS, *Canadian Geographic Information System*), el cual fue orientado a la gestión de los recursos naturales de ese país, de manera simultánea se realizaron en Estados Unidos proyectos de este tipo como el Sistema de Información de Recursos y Uso del Terreno (LUNR, *Land Use and Resource Information System*), el Sistema de Información de Gestión del Terreno de Minnesota (MLMIS, *Minnesota Land Management Information System*) y el Sistema de Información de Superposición Poligonal (PIOS, *Polygon Information Overlay System*) [4].

A finales de la década de los 70, el avance tecnológico, el uso y acceso a los computadores permitió el desarrollo de sistemas informáticos para aplicaciones cartográficas. En un principio, estos desarrollos provocaron una duplicación de esfuerzos en las distintas disciplinas relacionadas, pero a medida que se incrementaron y se adquirió experiencia, surgió la posibilidad de articular los distintos tipos de representación digital de información espacial, convirtiéndolos en verdaderos sistemas de información geográfica de propósito general [5].

Hoy día, existen múltiples herramientas software orientadas a los SIG en la industria, el gobierno y la educación. Empresas comerciales como ESRI<sup>1</sup>, Intergraph<sup>2</sup>, Mapinfo<sup>3</sup>, Autodesk<sup>4</sup>, ofrecen un completo conjunto de aplicaciones

---

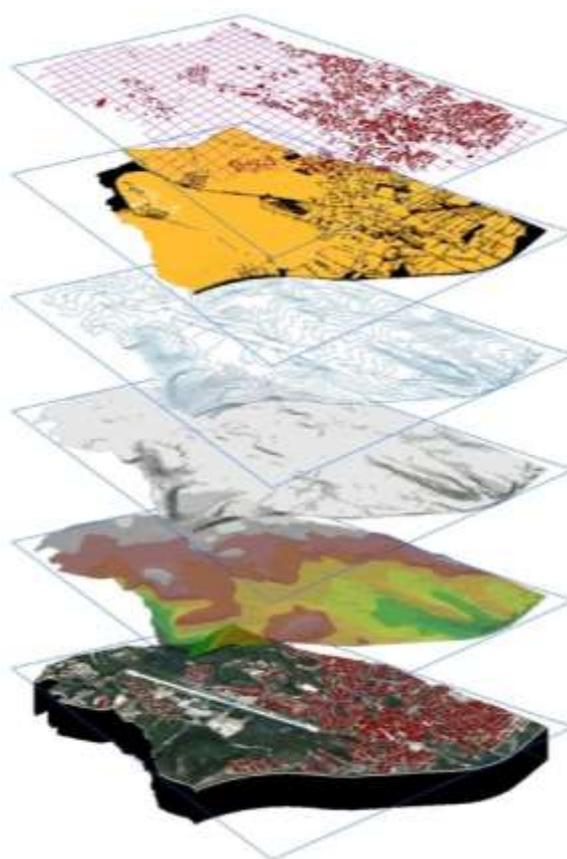
<sup>1</sup> <http://www.esri.com>, <http://www.esri.es>

<sup>2</sup> <http://www.intergraph.com>

<sup>3</sup> <http://www.mapinfo.com>

versátiles, pero de alto costo. Existen también aplicaciones de distribución gratuita y código abierto como Quantum<sup>5</sup>, Mapserver<sup>6</sup>, GeoServer<sup>7</sup> o Sextante<sup>8</sup>, las cuales brindan herramientas útiles para el desarrollo de SIG. En ocasiones estas herramientas están en proceso de desarrollo, no son lo suficientemente robustas y/o carecen de aplicaciones.

Un SIG permite descomponer y/o clasificar la abstracción de la realidad en distintos temas, es decir en capas o niveles de información del área que se desea estudiar. Cada capa representa una característica diferente del sector analizado. Por ejemplo, relieve, uso de suelos, vías, estratos sociales, densidad poblacional, entre otros, tal como se indica en la Figura 1.1.



**Figura 1.1.** Capas Superpuestas en un SIG<sup>9</sup>.

<sup>4</sup> <http://usa.autodesk.com>, <http://latinoamerica.autodesk.com>

<sup>5</sup> <http://www.qgis.org>

<sup>6</sup> <http://www.mapserver.org>

<sup>7</sup> <http://www.geoserver.com>

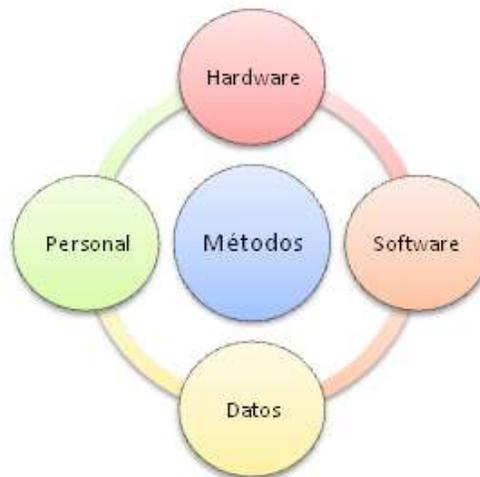
<sup>8</sup> <http://www.sextantegis.com>

<sup>9</sup> Imagen disponible en <http://www.civilju.com-a.googlepages.com/sig2>

Actualmente la limitante a la hora de afrontar cualquier proyecto basado en SIG lo constituye la disponibilidad de datos geográficos del territorio a estudiar, mientras que hace una par de décadas lo era la disponibilidad de computadores potentes que permitieran afrontar los procesos de cálculo involucrados en el análisis de datos geográficos.

## 1.2 COMPONENTES DE UN SIG

Un SIG está compuesto por 5 elementos principales que hacen posible su desarrollo y funcionamiento [6]. Tal como se indica en la Figura 1.2.



**Figura 1.2.** Componentes de un SIG.

### 1.2.1 Hardware.

Hace referencia a los equipos en los cuales operan los SIG, que van desde servidores hasta computadores personales. Además existen dispositivos móviles, todos de gama alta, capaces de ejecutar aplicaciones basadas en SIG.

### 1.2.2 Software.

Contiene las funciones y herramientas que permiten almacenar, analizar y visualizar la información. Los componentes principales de los programas son:

- ✓ Sistema de manejo de base de datos.
- ✓ Una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, *Graphical User Interface*).
- ✓ Herramientas para captura y manejo de información geográfica.
- ✓ Herramientas para búsquedas, análisis y visualización de datos.

### 1.2.3 Datos.

Los datos constituyen una representación del mundo real, donde se modelan sus entornos, situaciones y problemas. En un SIG la información puede ser de 2 tipos:

- ✓ Gráfica: Contiene información referente a los mapas digitales en sí. Donde especifica la ubicación de una característica o fenómeno utilizando un sistema de coordenadas.
- ✓ Alfanumérica: Conjunto de datos geográficos interrelacionados que representan propiedades de las entidades espaciales y que han sido seleccionados con una finalidad determinada.

### 1.2.4 Recurso Humano.

Hace referencia al personal que opera, desarrolla y administra el sistema. La capacidad e idoneidad de éste es un elemento de gran importancia en el logro de un buen funcionamiento y la obtención de buenos resultados.

### 1.2.5 Métodos.

Presentan las actividades, modelos, prácticas operativas y reglas características de cada organización. Permiten el funcionamiento exitoso del SIG.

## **1.3 MODELADO DE DATOS EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

Los SIG relacionan simultáneamente, por medio de capas, diferentes tipos de información con una localización geográfica. Esto permite comparar y estudiar información con el fin de revelar causas y efectos muy difíciles de determinar con métodos cuantitativos tradicionales.

De esta manera, para el análisis y almacenamiento de datos, cada capa puede estar constituida con tres formatos diferentes: vectorial, raster y orientado a objetos. A continuación se abordarán los dos primeros dado que son los más utilizados en los sistemas SIG actuales [7].

### 1.3.1 Vectorial.

En una capa con formato vectorial se usan una serie de puntos, líneas y polígonos gráficamente conocidos como entidades, las cuales son usadas para modelar determinados aspectos del medio y están constituidas por información gráfica y

alfanumérica con las que se describen determinadas características en el mapa. La información alfanumérica se encuentra en una tabla, donde a cada entidad le corresponde una celda dentro de dicha tabla. A continuación se definen estas entidades.

- ✓ Puntos: Con puntos se marca la posición de un elemento geográfico sobre la superficie de la tierra mediante un par de coordenadas. Tales como pozos, fuentes, manantiales, o en general un punto de interés. Los puntos por su misma naturaleza transmiten una cantidad de información limitada y no permiten la realización de medidas.
- ✓ Líneas o Polilíneas: Esta entidad es unidimensional, es utilizada para modelar componentes lineales como ríos, caminos, ferrocarriles, líneas topográficas, entre muchos otros. Es posible medir su distancia. Las entidades lineales están compuestas por arcos, nodos y vértices, descritos así:

Arco o Línea: segmento que se extiende entre dos nodos.

Nodo: puntos iniciales y finales de uno o varios arcos.

Vértice: puntos intermedios de un arco.

- ✓ Polígonos: Los polígonos están formados por entidades cerradas que delimitan y modelan superficies. Se representan mediante una serie de arcos o líneas que constituyen su perímetro y se utilizan básicamente para almacenar información sobre el territorio permitiendo modelar suelos, montes, lagos, ciudades, países, curvas de nivel, etc.

Los polígonos delimitan áreas con características comunes preseleccionadas por el usuario para una determinada aplicación. Por su constitución transmiten la mayor cantidad de información y es posible medir tanto su perímetro como su área. Los SIG vectoriales se ajustan mejor a la descripción de aspectos no variables, generalmente cualitativos y tienen la capacidad de modelar cualquier característica del medio.

### 1.3.2 Ráster.

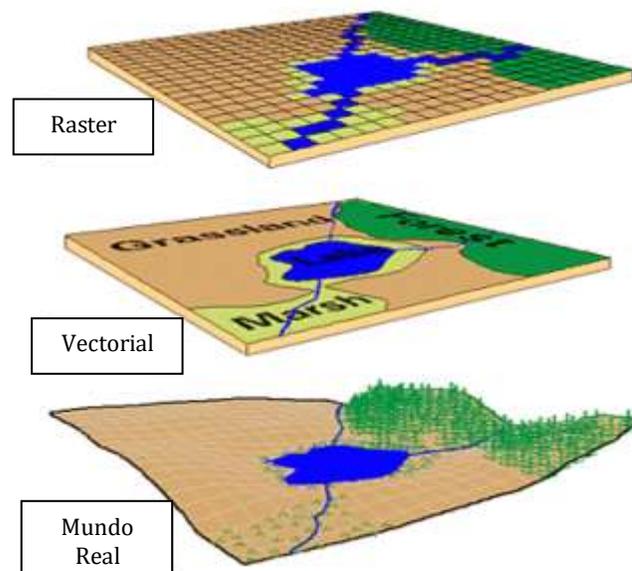
Consiste en un arreglo (malla) rectangular de celdas cuadradas o píxeles. Cada celda es representada por un número, este número contiene la información necesaria para modelar el medio. La entidad gráfica es el pixel, una unidad de imagen, donde la precisión de la representación digital del mapa depende del tamaño de este pixel. Su uso es apropiado para modelar aspectos variables del medio generalmente cuantitativos. Así los factores como altitud, pendiente,

temperatura, precipitación, contaminación, la dirección del viento, el contenido de humedad, entre otros, se deben modelar siguiendo esta estructura de datos.

La georeferenciación se realiza del siguiente modo: las filas y las columnas coinciden paralelamente a los ejes x e y del sistema de coordenadas. La localización de una celda se determina conociendo su posición (x, y) en la matriz de datos.

El modelo matricial puede representar entidades como puntos, líneas y superficies del territorio. El punto se representa mediante una celda con un valor determinado dependiendo de su localización. Las líneas se representan mediante una serie de celdas conectadas de forma continua. En el caso de superficies que pueden ser o no regulares, se unen una gran cantidad de celdas donde se modela de manera exacta una entidad del mundo real, donde cada celda es representada por un valor numérico, conociendo así su ubicación y su información contenida.

En la Figura 1.3 se muestra gráficamente la representación de elementos del mundo real mediante el formato raster y el formato vectorial.



**Figura 1.3.** Formatos de Datos más Importantes en un SIG<sup>10</sup>.

Teniendo en cuenta la importancia de los formatos de datos en el funcionamiento y construcción de un SIG, es necesario evaluar las características principales de cada uno de ellos para determinar cuál se ajusta mejor a las necesidades existentes. Esta decisión depende de múltiples criterios como: información

<sup>10</sup> Imagen adaptada de: <http://bgis.sanbi.org/GIS-primer/images/pic068.jpg>

disponible, finalidad del SIG, medios técnicos, capacidad de equipos, tipo de actividad, entre otros. En la tabla 1.1 se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de estos formatos según [8].

<b>FORMATOS</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>Raster</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Estructura de datos simple.</li> <li>➤ Las operaciones de superposición de mapas se implementan con mayor eficiencia.</li> <li>➤ Cuando la variación espacial de los datos es muy alta la representación raster es más eficiente.</li> <li>➤ El formato raster es requerido para el tratamiento de las imágenes digitales tales como fotos de satélites.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La estructura de datos del formato raster es poco compacta. Aunque con las técnicas de compresión actuales este problema puede ser superado o al menos reducido.</li> <li>➤ Algunas relaciones topológicas son más difíciles de representar que en el modelo vectorial.</li> <li>➤ Las graficas son de menor calidad a las obtenidas con el modelo vectorial.</li> </ul>
<b>Vectorial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La estructura de datos es compacta, por tanto los archivos son mucho más pequeños que los generados por el formato raster.</li> <li>➤ La superposición de mapas en las distintas capas de información que componen un SIG es eficiente.</li> <li>➤ Las graficas son de gran calidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La estructura de datos es compleja.</li> <li>➤ Las operaciones de superposición de mapas son más difíciles de implementar.</li> <li>➤ Resulta poco eficiente cuando la variación espacial de los datos es alta.</li> <li>➤ El tratamiento de imágenes digitales no se realiza de forma eficiente.</li> </ul>

**Tabla 1.1.** Ventajas y Desventajas de los Formatos Raster y Vectorial.

#### 1.4 VENTAJAS Y APLICACIONES DE LOS SIG

Debido al desarrollo de herramientas software que permiten realizar SIG y al aumento en su demanda, estos han evolucionado de manera rápida e importante. Como consecuencia han reducido sus precios, han mejorado su usabilidad y los resultados que se obtienen con estas herramientas, estableciendo claras ventajas con relación a la forma clásica con que se trataba a la información geográfica [3].

Entre las múltiples ventajas ofrecidas por los SIG [5], se tiene:

- ✓ Realización de un gran número de procesamientos, debido a la superposición de capas en corto tiempo.
- ✓ Representación gráfica y gestión de bases de datos.
- ✓ Consultas rápidas de bases de datos.
- ✓ Realización de pruebas analíticas complejas.
- ✓ Minimización de costos de operación e incremento de la productividad.
- ✓ Ayuda en la toma de decisiones.
- ✓ Realización de análisis temporales.
- ✓ Integración de información complementaria en cualquier momento.

Gracias a esto, los SIG han alcanzado múltiples esferas de las actividades humanas, siendo utilizadas en campos como la demografía, ingeniería, minería, biología, medio ambiente, entre otras. A continuación se presentan algunas de las aplicaciones más representativas de esta herramienta [9].

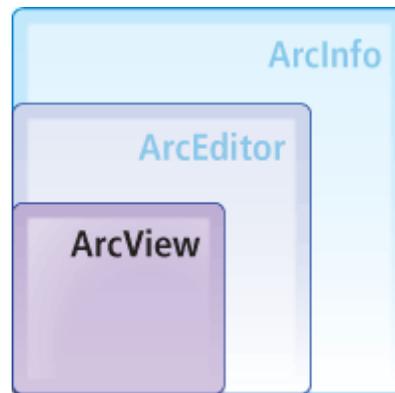
- ✓ Administración Local: Permite a políticos y administradores municipales contar con herramientas para el análisis sociodemográfico, facilitando así la toma de decisiones.
- ✓ Redes de Distribución: Debido a su capacidad y facilidad de análisis, los SIG brindan la posibilidad de optimizar la coordinación y la planificación de los trabajos de mantenimiento, reparación y expansión de empresas de servicios públicos (agua, gas, energía y telefonía).
- ✓ Brigadas de Trabajo: Mediante las herramientas en dispositivos móviles se pueden calcular y determinar las rutas que permitan aprovechar al máximo el tiempo, los recursos y equipos.
- ✓ Medio Ambiente: Existen aplicaciones dirigidas a la evaluación del impacto ambiental causado por la ejecución de proyectos, además permiten planificar procesos de reforestación y explotación agrícola y minera.
- ✓ Demografía: Se presenta un conjunto de aplicaciones relacionadas con la población y sus características, así se pueden determinar zonas de estratificación, densidad poblacional, niveles de natalidad y mortalidad, cobertura en servicios públicos, entre otros.
- ✓ Tráfico: Los SIG se pueden utilizar para modelar el comportamiento del tráfico vehicular en función de algunas condiciones preseleccionadas mediante el establecimiento de modelos de circulación.
- ✓ GeoMarketing: Una base de datos bien construida es de gran importancia y ayuda al planificar una campaña publicitaria, determinando la población objetivo, las rutas de entrega de las mercancías, los intereses de los habitantes de cada zona, etc.

## 1.5 ArcGIS

ArcGIS es una colección integrada de herramientas software. Dichas herramientas son desarrolladas y comercializadas por el Instituto de Investigación en Sistemas Ambientales (ESRI, *Environmental Systems Research Institute*). Con arcGIS es posible realizar Sistemas de Información Geográfica en distintos ámbitos: para uso en red (ArcGIS Server, ArcIMS), para el despliegue en dispositivos móviles (ArcGIS Mobile), para aplicaciones móviles y de escritorio (ArcGIS Desktop) [10,11,12].

### 1.5.1 ArcGIS Desktop.

ArcGIS Desktop es un software propietario de alto costo en el mercado, por ello se utilizó una versión con licencia gratuita por 60 días para el desarrollo de la herramienta software<sup>11</sup>. Comercialmente ArcGIS Desktop es distribuido bajo tres herramientas principalmente: ArcView, ArcEditor y ArcInfo, las cuales poseen distintas aplicaciones escalables entre sí, permitiendo al usuario accederlas según sus necesidades. Además están conformadas en orden creciente de funcionalidades y costos, tal como se indica en la Figura 1.4.



**Figura 1.4.** Herramientas Ofrecías por ArcGIS Desktop para desarrollar SIG<sup>12</sup>.

ArcView es un conjunto de herramientas diseñadas para soportar aplicaciones SIG tales como, visualización, creación, análisis y gestión de información georeferenciada, permitiendo así el análisis de relaciones, patrones y tendencias que conlleven a formular soluciones acertadas. ArcEditor está conformado por herramientas para construir, mantener y actualizar bases de datos geográficas permitiendo analizar y explorar datos. Por último ArcInfo es la herramienta más especializada de ArcGIS Desktop para el manejo, visualización, modelado y

<sup>11</sup> Disponible en <http://www.esri.com/apps/products/offers/av93dvd/index.cfm>

<sup>12</sup> Imagen disponible en <http://www.esri.com.co>

análisis de información geográfica. Además agrega capacidad de geoprocesamiento y manejo complejo de datos.

### 1.5.2 Aplicaciones de ArcGIS Desktop

**ArcMap.** Esta aplicación permite la realización de mapas de alta calidad, donde es posible editar y visualizar datos geográficos, además de realizar consultas de datos espaciales y la elaboración de informes.

**ArcCatalog** como aplicación permite organizar y administrar los datos contenidos en ArcGIS Desktop. Contiene herramientas especializadas para explorar y encontrar información geográfica. Además permite grabar y visualizar metadatos<sup>13</sup>.

**ArcToolbox.** Aplicación que contiene gran variedad de herramientas destinadas al geoprocesamiento o procesamiento de datos geográficos. Esta herramienta está dividida en dos versiones. La versión especializada y por tanto más completa que viene con ArcInfo y la versión que viene con ArcView y ArcEditor. La primera de ellas además de tener capacidad de geoprocesamiento, realiza conversión de datos, administración de capas, análisis de coberturas, proyección de mapas, etc. La segunda versión principalmente contiene herramientas para la conversión y administración de datos.

### 1.5.3 Extensiones de ArcGIS

Las extensiones son un complemento a las funciones ya existentes de ArcGIS. Estas extensiones contienen herramientas especializadas para la solución de problemas puntuales a usuarios ArcGIS. Algunos ejemplos de las extensiones ArcGIS Desktop son: ArcGIS 3D Analyst la cual permite generar, visualizar y analizar de forma interactiva información tridimensional. Maplex la cual es una extensión con la que es posible colocar textos y etiquetas dentro de un mapa facilitando su producción y alta calidad cartográfica donde la interfaz es altamente intuitiva. ArcGIS Data Interoperability la cual permite hacer lectura de los distintos formatos espaciales, permitiendo la generación de formatos de datos personalizados y la transformación de los ya existentes. En realidad el número de extensiones es amplio y se incrementa cada vez, con la realización de nuevas aplicaciones enfocadas a solucionar y satisfacer las necesidades del mercado SIG, las cuales son presentadas con cada nueva versión de ArcGIS.

---

<sup>13</sup> Metadatos: Información que describe la calidad, distribución, actualidad y referencia espacial de un conjunto de datos.

También es posible el desarrollo de nuevas extensiones por parte de usuarios que pueden ser implementadas en entornos ArcGIS Desktop. Esto es posible haciendo uso de la librería de componentes ArcObjects de ESRI.

#### 1.5.4 ArcObjects

ArcObjects es la librería de componentes de software ESRI diseñada para extender y personalizar aplicaciones de ArcGIS, tales como ArcMap y ArcCatalog. Para ello se pueden utilizar varios lenguajes de programación, tales como Visual Basic, Java, C++, C# y Visual Basic .NET. Visual Basic es el lenguaje que ESRI ha integrado dentro de su estructura, es decir, es el lenguaje que se ha incorporado por defecto para realizar extensiones o personalizar aplicaciones. El componente Visual Basic para Aplicaciones (VBA, *Visual Basic for Applications*) es incorporado por ArcGIS permitiendo crear comandos especializados denominados UIControls. VBA contiene un ambiente de programación integrado llamado Editor de Visual Basic (VBE, *Visual Basic Editor*) en el cual es posible desarrollar aplicaciones SIG.

## 1.6 SISTEMAS DE COORDENADAS Y SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

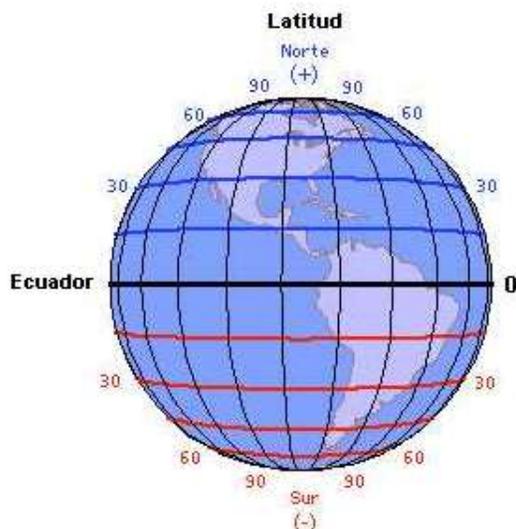
A continuación se hará una breve descripción sobre la definición y los tipos de coordenadas utilizadas en el presente trabajo de grado.

Un sistema de coordenadas es un conjunto de valores y puntos con los cuales es posible ubicar exactamente una posición dentro de un mapa. Estas coordenadas son únicas con lo cual se garantiza que no existan dos puntos con iguales coordenadas. En realidad existen varios tipos de coordenadas pero para ser explícitos se hará una breve descripción sobre las coordenadas geográficas y planas que son las utilizadas en la herramienta software para determinar el área de cobertura de un sistema de radiodifusión en FM.

El sistema de coordenadas geográficas utiliza las dos coordenadas angulares: latitud (norte, sur) y longitud (este, oeste), para determinar una posición sobre la tierra.

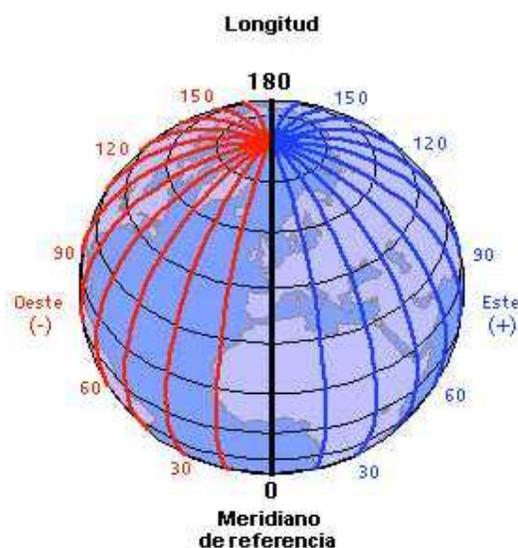
Latitud: Es la distancia angular que existe entre un punto sobre el globo terráqueo y el Ecuador, medida a lo largo del meridiano que pasa por dicho punto. Las líneas de latitud se llaman paralelos y son círculos paralelos imaginarios al Ecuador. La latitud puede ser medida entre cero y noventa grados. Los puntos que se encuentran por encima del Ecuador se denominan Norte (N) y los que se

encuentran por debajo del Ecuador reciben la denominación Sur (S). Los polos Norte y Sur tienen latitud noventa grados Norte y noventa grados Sur, respectivamente, tal como se observa en la Figura 1.5.



**Figura 1.5.** Representación Gráfica de los Paralelos para Medir la Latitud.

Longitud: es la distancia angular entre un punto de la superficie terrestre y el meridiano de Greenwich. Dicho meridiano es la semicircunferencia imaginaria que une los polos y que pasa por Greenwich, tal como se indica en la Figura 1.6, es decir, es a partir de este meridiano que se miden las longitudes y por tanto le corresponde la longitud cero.



**Figura 1.6.** Representación Gráfica de los Meridianos para Medir la Longitud.

En el sistema de coordenadas rectangulares se ubica un punto sobre un plano, el cual está formado por dos ejes perpendiculares entre sí, que se cortan en el

origen. Los ejes dividen el plano en cuatro cuadrantes donde los signos de las coordenadas alternan de positivo a negativo, con el objetivo de conocer la ubicación exacta del punto sobre el plano, tal como se indica en la Figura 1.7.

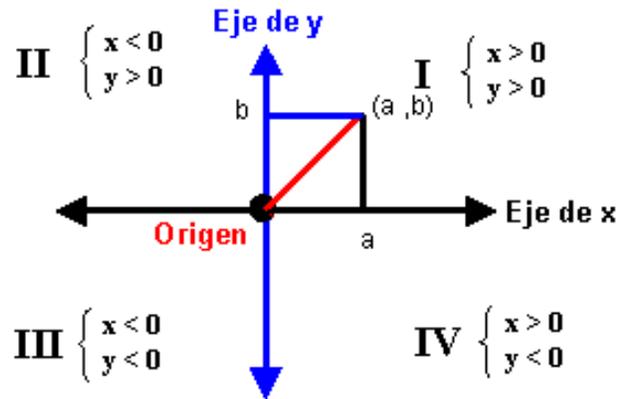


Figura 1.7. Sistemas de Coordenadas Rectangulares<sup>14</sup>.

Debido a la necesidad de ubicar elementos propios de un sistema de radiodifusión FM tales como el transmisor y receptor dentro de un mapa geográfico, es necesario conocer sus coordenadas, la forma más fácil de hacerlo es utilizando un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*). Dicho sistema permite determinar la posición de un objeto, persona, o cualquier elemento de interés, con una precisión de hasta unos pocos centímetros, aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión como corresponde al presente caso.

El GPS funciona mediante una red de 32 satélites. Cuando se desea determinar la posición, el receptor GPS localiza de forma automática como mínimo tres satélites y de esta forma determinar su ubicación mediante triangulación. El receptor GPS utilizado para conocer las coordenadas del transmisor de la emisora de la Universidad del Cauca y otros puntos de interés es un equipo marca Etrex GARMIN, el cual está configurado para que las coordenadas mostradas sean planas, el cual es presentado a continuación en la Figura 1.8.

Este equipo además de proveer las coordenadas de un punto determinado, indica la altura de éste sobre el nivel del mar, la altura promedio y su altura máxima, si el usuario se mueve el GPS presenta la velocidad a la que lo hace, permite marcar

<sup>14</sup> Las imágenes de las figuras 1.5 y 1.6 están disponibles en moonjf3a.blogspot.com y la figura 1.7 fue adaptada de <http://www.slideshare.net/edvinogo>

puntos estratégicos con el objetivo de volver a ellos en caso de pérdida, tiene la capacidad de proveer la trayectoria seguida por un móvil.



**Figura 1.8.** Receptor GPS Garmin<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Imagen disponible en : <http://www.garmin.com>

## **2. MODELOS DE PREDICCIÓN DE PROPAGACIÓN PARA SISTEMAS DE RADIODIFUSIÓN SONORA EN FRECUENCIA MODULADA (FM)**

### **2.1 GENERALIDADES**

La transmisión de audio en sistemas de radiodifusión sonora en FM se hace a través de ondas electromagnéticas. Este tipo de ondas se propaga por el espacio a la velocidad de la luz, independiente de su frecuencia. La onda atraviesa distintos medios y puede encontrarse con diferentes obstáculos, como resultado de ello presentará distintos niveles de atenuación y/o cambios en su dirección. Las características de propagación de la onda están directamente relacionadas con su longitud de onda y con el medio por el cual se propagan [13].

Con los modelos de predicción de propagación se estima la atenuación de la señal a determinada distancia de un transmisor, incluyendo las variaciones en el nivel de la señal en puntos determinados [14]. Cuando la distancia entre transmisor y receptor es grande, los modelos que se utilizan para estos casos son llamados modelos de propagación de gran escala, los cuales tienen aplicación importante en el cálculo de áreas de cobertura para sistemas de radiodifusión sonora en FM, siendo este de especial importancia para este trabajo de grado. Cuando las distancias entre transmisor y receptor son cortas, los modelos utilizados en estos casos son llamados de pequeña escala [15].

Los diferentes modelos de predicción de propagación son aplicables bajo ciertas características tales como: rango de frecuencia, distancia entre transmisor y receptor, altura de la antena transmisora, altura de la antena receptora, tipo de terreno (liso, montañoso o cuasi liso), entorno (urbano, suburbano o ambiente rural), características de la atmosfera (índice de refracción e intensidad de lluvias), propiedades eléctricas del suelo (conductividad, permitividad, constante dieléctrica), material y tipo de construcciones, etc. Entonces los factores o características que intervienen en un modelo de predicción de propagación son variados y dependen en gran medida de las características de una región.

Una manera de determinar la efectividad de un modelo de predicción de propagación es comparando sus resultados con medidas reales de campo y así dependiendo de qué tan cercanos sean sus resultados se establece si es o no apropiado para ser aplicado en determinada región y para determinado sistema de radiodifusión sonora en FM.

Los modelos de predicción de propagación con los que se determina el área de cobertura para sistemas de radiodifusión sonora en FM se clasifican en: empíricos, determinísticos o teóricos y semideterminísticos. Los modelos empíricos se basan en mediciones realizadas durante una cantidad considerable de tiempo y su correlación. Los modelos teóricos se basan fundamentalmente en los principios de los fenómenos de propagación de ondas electromagnéticas y los semideterminísticos son aquellos que incluyen fundamentos físico teóricos y se complementan con factores de corrección de tipo empírico.

## 2.2 DEFINICION DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE PROPAGACIÓN

Un modelo de predicción de propagación incluye expresiones matemáticas y algoritmos que predicen el comportamiento de una señal radio en un ambiente determinado [14].

A continuación se presentan una serie de modelos de predicción de propagación, los cuales operan además de otras frecuencias entre los 88 y 108 MHz, con los cuales se determinará el área de servicio para un sistema de radiodifusión sonora en FM.

## 2.3 MODELO DE PROPAGACIÓN DE ESPACIO LIBRE

El modelo de espacio libre corresponde a un caso ideal donde no existen obstáculos entre el transmisor y receptor que atenúen la señal [16].

Para determinar el nivel de campo eléctrico en función de la potencia de transmisión, se define la densidad de flujo de potencia  $\phi$  como se indica en la ecuación 2.1.

$$\phi \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \frac{pire}{4\pi d^2} \quad (2.1)$$

La Potencia Radiada Isotrópica Efectiva, *pire* (EIRP, *Effective Isotropic Radiated Power*), es dada en vatios y *d* es la distancia, expresada en metros, desde el radiador isotrópico hasta el punto de análisis. Se debe tener en cuenta que la expresión  $4\pi d^2$  es la superficie de una esfera sobre la cual se distribuye la potencia radiada por el transmisor.

Una definición alternativa de la densidad del flujo de potencia en términos del campo eléctrico *e* y la impedancia *z*, se indica en la ecuación 2.2.

$$\phi \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \frac{e^2}{z} \quad (2.2)$$

Con el nivel de campo eléctrico  $e$  dado en voltios por metro y la impedancia  $z$  en ohmios.

La ecuación 2.3 presenta el resultado de igualar las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$\frac{pire}{4\pi d^2} = \frac{e^2}{z} \quad (2.3)$$

La impedancia del espacio libre se indica en la ecuación 2.4, que reemplazada en la ecuación 2.3 da como resultado la expresión indicada en la ecuación 2.5.

$$z = 120\pi \quad (2.4)$$

$$e^2 = \frac{120\pi pire}{4\pi d^2} \quad (2.5)$$

El nivel de campo eléctrico en el receptor es calculado a partir de la relación matemática indicada en la ecuación 2.6 [17].

$$e \left[ \frac{V}{m} \right] = \frac{\sqrt{30pire}}{d} \quad (2.6)$$

Así  $e$  representa la intensidad de campo eléctrico en voltios por metro,  $pire$  en vatios y  $d$  la distancia de separación entre el transmisor y receptor en metros.

Expresando la ecuación 2.6 en unidades logarítmicas se obtiene la ecuación 2.7.

$$E[dBuV / m] = 104.76 + 10\log(pire) - 20\log d \quad (2.7)$$

Donde la  $pire$  se expresa en kilovatios y  $d$ , la distancia entre el transmisor y receptor, en kilómetros.

Cambiando la forma en la que se presenta la ecuación 2.7 se indica esta misma relación en la ecuación 2.8

$$E[dBuV / m] = 104.76 + PIRE - 20 \log d \quad (2.8)$$

Donde  $PIRE$  es el valor de la  $pire$  en unidades logarítmicas.

Las pérdidas básicas de propagación en condiciones de espacio libre son calculadas en términos de la relación entre la potencia radiada y la potencia recibida. La potencia recibida  $p_r$  se determina en función de la densidad del flujo de potencia  $\phi$  y del área efectiva de la antena receptora  $s_{eq}$ , como se indica en la ecuación 2.9 y 2.10

$$p_r [W] = \phi s_{eq} \quad (2.9)$$

$$p_r [W] = \left( \frac{pire}{4\pi d^2} \right) \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) g_r \quad (2.10)$$

La potencia recibida y la potencia radiada son dadas en vatios, el área efectiva de la antena receptora en metros cuadrados y la densidad del flujo de potencia en vatios sobre metro cuadrado.

Asumiendo que la antena receptora es un radiador isotrópico, se tiene la expresión indicada en la ecuación 2.11.

$$p_r [W] = pire \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.11)$$

En la ecuación 2.12 se indica la expresión para el cálculo de las pérdidas básicas de propagación  $l_{fs}$ , a partir de la ecuación 2.11.

$$l_{fs} = \frac{pire}{p_r} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.12)$$

Expresando las pérdidas básicas de propagación  $l_{fs}$  en unidades logarítmicas se obtiene la ecuación 2.13 llamada ecuación de Friss.

$$L_{fs} [dB] = 32.45 + 20 \log f + 20 \log d \quad (2.13)$$

La frecuencia  $f$  es dada en megahertz y la distancia  $d$  en kilómetros.

Al reemplazar la densidad de flujo de potencia definida en la ecuación 2.2 en la ecuación 2.9, se obtiene la expresión indicada en la ecuación 2.14.

$$P_r [W] = \left( \frac{e^2}{120\pi} \right) \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} g_{rx} \right) \quad (2.14)$$

Con el nivel de campo eléctrico  $e$  dado en voltios sobre metro y la longitud de onda  $\lambda$  en metros. Expresando la ecuación 2.14 en unidades logarítmicas se obtiene la ecuación 2.15, con la cual es posible calcular el nivel de campo eléctrico en función de la potencia en el receptor [20].

$$E [dBuV / m] = P_r + 20 \log f + 77.2 \quad (2.15)$$

Donde,  $P_r$  está dado en  $dBm$  y  $f$  en megahertz.

## 2.4 MODELO DE LONGLEY RICE

El modelo Longley-Rice o Modelo de Terreno Irregular (ITM, *Irregular Terrain Model*), fue creado en los años 60s por el Instituto para las Ciencias de las Telecomunicaciones (ITS, *Institute for Telecommunication Sciences*) en Boulder Estados Unidos. Longley Rice predice el nivel de atenuación, el cual es utilizado para determinar el área de cobertura para sistemas de radiodifusión sonora en FM. Cabe resaltar que este modelo es utilizado por otros sistemas dado su amplio rango de frecuencias de aplicación. Sus principales parámetros son indicados en la tabla 2.1 [18,19,20].

Parámetros	Valor
Frecuencia	20 MHz a 20 GHz
Distancia	1 km a 2000 km
Altura de antenas	0.5 m a 3000 m
Polarización	Horizontal ó Vertical

Tabla 2.1. Parámetros del Modelo Longley Rice.

El modelo Longley Rice está en función de la altura media del terreno, la conductividad y permitividad del suelo, las características refractivas de la troposfera y las características geométricas del terreno entre transmisor y receptor, las cuales son tenidas en cuenta para calcular la atenuación de la onda transmitida. Longley Rice presenta dos modos de operación: el modo punto a punto y el modo de predicción de área. En el modo punto a punto a partir del perfil

del terreno se predicen las pérdidas de propagación. En el modo de predicción de área se genera una proyección del área de cobertura a partir del transmisor. El procedimiento que describe el funcionamiento del modelo es:

La refractividad de la superficie  $N_s$  se indica en la ecuación 2.16.

$$N_s = N_{oe}^{-Z_s/Z_1} \quad (2.16)$$

Donde,  $N_o$  es la refractividad de la superficie a nivel del mar,  $N_s$  y  $N_o$  son cantidades adimensionales,  $Z_s$  es la altura promedio de la región de interés en kilómetros y  $Z_1 = 9.46 \text{ Km}$ .

La curvatura efectiva de la tierra  $\gamma_e$  se indica en la ecuación 2.17 y se expresa en términos de la curvatura actual  $\gamma_a$  y el factor radio efectivo de la tierra  $K$ .

$$\gamma_e [\text{Km}] = \frac{\gamma_a}{K} \quad (2.17)$$

La curvatura actual  $\gamma_a$  es determinada en kilómetros.

La curvatura efectiva de la tierra  $\gamma_e$  se representa normalmente por la refractividad de la superficie haciendo uso de la formula empírica como se indica en la ecuación 2.18.

$$\gamma_e = \gamma_a \left( 1 - 0.04665 e^{\left( \frac{-N_s}{N_1} \right)} \right) \quad (2.18)$$

De donde,  $N_1$  es una constante igual a 179.3  $N$  unidades o partes por millón y la curvatura actual  $\gamma_a$  es igual  $157 \times 10^{-9} \text{ 1/m}$ .

La impedancia de transferencia  $Z_g$ , se define en términos de la permitividad relativa  $\epsilon_r$ , la conductividad de la tierra  $\sigma$  y la polarización de las ondas de radio, como se indica en la ecuación 2.19.

$$Z_g [\Omega] = \begin{cases} \sqrt{(\epsilon_r' - 1)} & \text{polarización horizontal} \\ \sqrt{(\epsilon_r' - 1)} \frac{1}{\epsilon_r'} & \text{polarización vertical} \end{cases} \quad (2.19)$$

La permitividad relativa  $\epsilon_r$  es dada en  $pF/m$  y la conductividad de la tierra  $\sigma$  en siemens sobre metro.

La permitividad relativa compleja  $\epsilon'_r$  se indica en la ecuación 2.20.

$$\epsilon'_r \left[ \frac{F}{m} \right] = \epsilon_r + iZ_0 \frac{\sigma}{K}, \text{ con } Z_0 [\Omega] = 376.2 \quad (2.20)$$

Se define el parámetro de irregularidad del terreno  $\Delta h(s)$  en función de la distancia  $s$ , como se indica en la ecuación 2.21

$$\Delta h(s) [Km] = (1 - 0.8e^{(-\frac{s}{D})}) \Delta h \quad (2.21)$$

La distancia  $D$  es igual a  $50 Km$  y  $\Delta h$  es el parametro de irregularidad del terreno dado en kilómetros.

Por último se define el número de onda  $k$  tal como se indica en la ecuación 2.22.

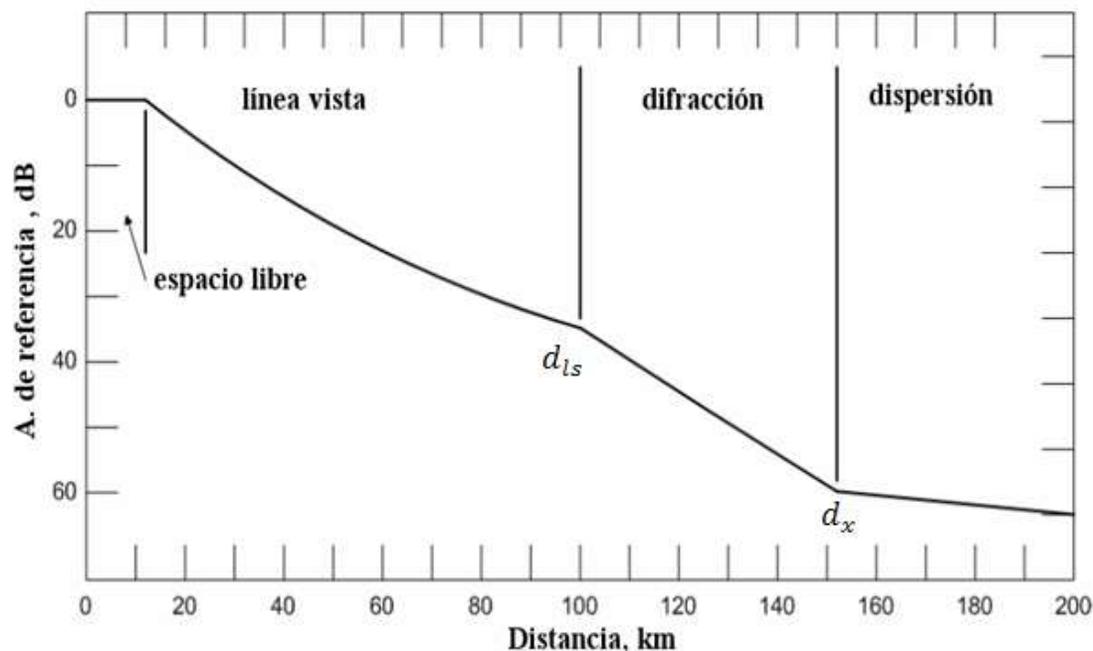
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.22)$$

#### 2.4.1 Atenuación de Referencia.

La atenuación de referencia  $A_{ref}$ , representa las pérdidas de la onda transmitida y se determinan como una función de la distancia  $d$ , es decir depende de la región en la que se encuentre el enlace, como se indica en la ecuación 2.23.

$$A_{ref} = \begin{cases} \max(0, A_{el} + K_1 d + K_2 \ln(d / d_{Ls})) & d \leq d_{Ls} \\ A_{ed} + m_d d & d_{Ls} \leq d \leq d_x \\ A_{es} + m_s d & d_x \leq d \end{cases} \quad (2.23)$$

En la ecuación 2.23 se indican tres intervalos o regiones descritos así: línea de vista la cual corresponde a distancias hasta el horizonte  $d < d_{Ls}$ , la región de difracción que corresponde a distancias más allá del horizonte hasta un punto denominado  $d_x$ , y la región de dispersión donde  $d_x \leq d$ . En la Figura 2.1 se indica el resultado de comparar la atenuación de referencia y la distancia entre transmisor y receptor según [19].



**Figura 2.1.** Atenuación de Referencia en Función de la Distancia.

En la figura 2.1 se observa que, hasta los 12 Km, el modelo de Longley Rice se comporta de manera similar al de espacio libre, la región de línea de vista se extiende hasta los 100 Km y la región de dispersión se encuentra entre los 100 y 152 Km aproximadamente. Sin embargo esta figura no representan de manera general el comportamiento del presente modelo ya que existen parámetros como las alturas y ganancias de las antenas, potencia del transmisor, conductividad, constante dieléctrica y rugosidad del terreno, que hacen variar el valor de atenuación de referencia a medida que se incrementa la distancia entre transmisor y receptor.

#### 2.4.1.1 Atenuación de referencia para la región de difracción $A_{diff}$

La función  $X_{ae}$  se encuentra en términos de la curvatura efectiva de la tierra  $\gamma_e$  y el número de onda  $k$ , como se indica en la ecuación 2.24.

$$X_{ae} = (k\gamma_e^2)^{\frac{1}{3}} \quad (2.24)$$

$X_{ae}$  es adimensional.

Se define la distancia  $d_3$ , como se indica en la ecuación 2.25.

$$d_3 [m] = \max(d_{ls}, d_l + 1.3787 X_{ae}) \quad (2.25)$$

La distancia de línea de vista  $d_{LS}$  y la distancia total al horizonte  $d_L$  son dadas en metros. La distancia  $d_4$  en función de  $d_3$ , se define en la ecuación 2.26.

$$d_4 [m] = d_3 + 2.7574 X_{ae} \quad (2.26)$$

En las ecuaciones 2.27 y 2.28 se definen los términos  $A_3$  y  $A_4$  en función de las distancias  $d_3$  y  $d_4$  respectivamente.

$$A_3 = A_{diff}(d_3) \quad (2.27)$$

$$A_4 = A_{diff}(d_4) \quad (2.28)$$

Las funciones  $m_d$  y  $A_{ed}$  se indican en las ecuaciones 2.29 y 2.30 respectivamente, las cuales se utilizan para encontrar el nivel de atenuación en condiciones de línea de vista en 2.4.3.

$$m_d = \frac{(A_3 - A_4)}{(d_3 - d_4)} \quad (2.29)$$

$$A_{ed} = A_3 - (m_d d_3) \quad (2.30)$$

Para encontrar la atenuación de referencia para la región de difracción, se define el factor de peso  $w$ , de acuerdo a la ecuación 2.31.

$$w = \frac{1}{(1 + 0.1\sqrt{Q})} \quad (2.31)$$

$$Q = \min\left(\frac{k}{2\pi} \Delta h(s), 1000\right) \left(\frac{h_{e1} h_{e2} + C}{h_{g1} h_{g2} + C}\right)^{1/2} + \frac{d_L + \frac{\theta_e}{\gamma_e}}{s} \quad (2.32)$$

$k$  es el número de onda definido en la ecuación 2.22,  $\Delta h(s)$  es el parámetro de irregularidad del terreno definido en la ecuación 2.21,  $h_{e1}$  y  $h_{e2}$  son las alturas efectivas de las antenas transmisora y receptora en metros respectivamente,  $h_{g1}$  y  $h_{g2}$ <sup>16</sup> corresponden a la altura de las antenas transmisora y receptora en metros,  $d_L$  es la distancia total al horizonte en metros,  $\theta_e$  es el ángulo total en radianes,  $\gamma_e$  es la curvatura efectiva de la tierra definida en la ecuación 2.18 y  $C$  tal como se indica en la ecuación 2.33.

<sup>16</sup>  $h_{g1}$  y  $h_{g2}$  hacen referencia a la altura estructural de la antena

$h_{e1}$  y  $h_{e2}$  representan la altura efectiva obtenida a partir del perfil entre transmisor y receptor

$$C = \begin{cases} 0 & \text{Modo predicción de área} \\ 10m^2 & \text{Modo punto a punto} \end{cases} \quad (2.33)$$

Las pérdidas por difracción se indican en la ecuación 2.34.

$$A_{diff}(s)[dB] = (1-w)A_k + wA_r + A_{fo} \quad (2.34)$$

De donde,  $A_{fo}$  es el factor de ruido debido a las reflexiones de la onda en obstáculos entre el transmisor y receptor, definido como se indica en la ecuación 2.35.

$$A_{fo}[dB] = \min(15,5 \log(\alpha k h_{g1} h_{g2} \sigma_h(d_{LS}))) \quad (2.35)$$

$$\alpha[m^{-2}] = 4.77 \times 10^{-4} \quad (2.36)$$

$A_k$  es la atenuación por doble filo de cuchilla y se indica en la ecuación 2.37.

$$A_k[dB] = F_n(v_1) + F_n(v_2) \quad (2.37)$$

$$\theta = \theta_e + s\gamma_e \quad (2.38)$$

$$v_j = \frac{\theta}{2} \left( \frac{kd_{Lj}(s-d_L)}{\pi(s-d_L+d_{Lj})} \right)^{1/2}, \quad j=1,2 \quad (2.39)$$

$F_n(v)$  es denominada la integral de Fresnel, la cual se indica en la ecuación 2.40.

$$F_n(v) = 20 \log \left| \frac{1}{\sqrt{2i}} \int_v^\infty e^{\frac{im^2}{2}} du \right| \quad (2.40)$$

Las pérdidas por curvatura de la tierra  $A_r$ , se calculan a partir de la ecuación 2.41.

$$\gamma_0 = \frac{\theta}{(s-d_L)}, \quad \gamma_j = 2 \frac{h_e}{d_{Lj}^2}, \quad j=1,2 \quad (2.41)$$

$$\alpha_j = \left( \frac{k}{\gamma_j} \right)^{1/3}, \quad j=0,1,2 \quad (2.42)$$

$$k_j = \frac{1}{i\alpha_j Z_g}, \quad j=0,1,2 \quad (2.43)$$

$k_j$ , es un número complejo.

$$x_j = AB(K_j)\alpha_j\gamma_j d_{Lj}, \quad j=1,2 \quad (2.44)$$

$A$  es una constante adimensional igual a 151.003, y  $B$  es una función definida en la ecuación 2.45.

$$B = 2^{-\frac{1}{3}} \text{Im}\{t_0\} \quad (2.45)$$

De esta manera se calcula  $A_r$  mediante la expresión matemática que se indica en la ecuación 2.46.

$$A_r [dB] = G(x_0) - F(x_1, K_1) - F(x_2, K_2) - C_1(K_0) \quad (2.46)$$

Las funciones  $G(x_0)$ ,  $F(x, k)$  y  $C_1(K)$  se indican en las ecuaciones 2.47, 2.48 y 2.49 respectivamente.

$$G(x) = 20 \log(x^{-\frac{1}{2}} e^a) \quad (2.47)$$

$$F(x, K) = 20 \log \left| \left( \frac{\pi}{2^{\frac{1}{3}} AB} \right)^{1/2} \text{Wi} \left( t_0 - \left( \frac{x}{2^{1/3} AB} \right) \right) \right|^2 \quad (2.48)$$

$$C_1(K) = 20 \log \left| \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2^{1/3} AB} \right)^{1/2} (2^{2/3} K^2 t_0 - 1) \text{Wi}'(t_0) \right|^2 \quad (2.49)$$

De donde  $\text{Wi}(z)$  es una función definida en la ecuación 2.50 y 2.51.

$$\text{Wi}(z) = \text{Ai}(z) + i\text{Bi}(z) \quad (2.50)$$

$$\text{Wi}(z) = 2\text{Ai}(e^{\frac{2\pi i}{3}} z) \quad (2.51)$$

Así.

$$w''(z) - zw(z) = 0 \quad (2.52)$$

$$\text{Wi}(t_0) = 2^{\frac{1}{3}} K \text{Wi}'(t_0) \quad (2.53)$$

### 2.4.1.2 Atenuación de referencia para la región línea de vista $A_{los}$

Para determinar la atenuación  $A_{los}$  se define el factor de peso  $w$ , con  $D_1 = 47 \text{ m}$  y  $D_2 = 10.000 \text{ m}$ , como se indica en la ecuación 2.54.

$$w = \frac{1}{1 + \frac{D_1 k \Delta h}{\max(D_2, d_{LS})}} \quad (2.54)$$

$\Delta h$  es definido en la ecuación 2.21,  $d_{LS}$  corresponde a la distancia hasta el horizonte y  $\lambda$  es la longitud de onda en metros.

La función  $A_{los}$  se define en la ecuación 2.55.

$$A_{los} = (1 - w)A_d + wA_t \quad (2.55)$$

La ecuación 2.56 define la atenuación por difracción extendida  $A_d$ .

$$A_d = A_{ed} + m_d s \quad (2.56)$$

$m_d$  y  $A_{ed}$  son definidos en las ecuaciones 2.29 y 2.30 respectivamente. La atenuación de dos rayos  $A_t$  es definida mediante las ecuaciones 2.57 a 2.63.

$$\sin \psi = \frac{h_{e1} + h_{e2}}{\sqrt{s^2 + (h_{e1} + h_{e2})^2}} \quad (2.57)$$

$$R'_e = \frac{\sin \varphi - Z_g}{\sin \varphi + Z_g} \exp[-k \sigma_h(s) \sin \varphi] \quad (2.58)$$

Donde la función  $\sigma_h(s)$  se indica en la ecuación 2.59.

$$\sigma_h(s) = 0.78 \Delta h(s) \exp[-(\Delta h(s) / H)^{1/4}] \quad (2.59)$$

$H$  es igual a un metro. Es de anotar que  $R'_e$  es complejo debido a que está definido en función de la impedancia de transferencia de superficie compleja  $Z_g$ , como se indica en la ecuación 2.60.

$$R_e = \begin{cases} R_e^* & R_e^* \geq \max(1/2, \sqrt{\sin \varphi}) \\ (R_e^*/R_e^*)\sqrt{\sin \psi} & \text{para cualquier otro valor} \end{cases} \quad (2.60)$$

También

$$\delta' = \frac{2kh_{e1}h_{e2}}{s} \quad (2.61)$$

$$\delta = \begin{cases} \delta' & \text{Si } \delta' \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \frac{(\pi/2)^2}{\delta'} & \text{En caso contrario} \end{cases} \quad (2.62)$$

Finalmente,

$$A_t [dB] = -20 \log |1 + R_e e^{i\delta}| \quad (2.63)$$

Las pérdidas básicas  $L_b$  para el modelo Longley Rice se definen en la ecuación 2.64.

$$L_b [dB] = L_{fs} + L_{LR} \quad (2.64)$$

Donde  $L_{fs}$  son las pérdidas de espacio libre definidas en la ecuación 2.13 y  $L_{LR}$  son las pérdidas estimadas con el modelo Longley Rice, dadas en  $dB$ .

Para calcular el nivel de campo eléctrico en función de las pérdidas básicas determinadas en la ecuación 2.64, se utiliza la ecuación 2.15.

## 2.5 MODELO 2D ANDERSON

El modelo 2D Anderson es un modelo de radio propagación con el cual se predice la intensidad de campo eléctrico y las pérdidas de trayecto, se basa en la Teoría de la Óptica Geométrica (*GTD, Geometrical Theory of Diffraction*) para el estudio del comportamiento de los rayos directos y reflejados presentes en la transmisión de ondas electromagnéticas entre transmisor y receptor. Su frecuencia de funcionamiento se encuentra entre los 30 MHz y 60 GHz. Este modelo cuenta con dos modos de operación: con Línea de Vista (*LOS, Line Of Sight*) y Sin Línea de Vista (*NLOS, Non Line of Sight*) [21].

Para definir la existencia de línea de vista se realiza el procedimiento matemático como se indica en las ecuaciones 2.65 y 2.66.

$$\theta_{t-r} = \frac{h_r - h_t}{d_r} - \frac{d_r}{2a} \quad (2.65)$$

De donde  $\theta_{t-r}$  es el ángulo relativo de depresión con respecto a la horizontal desde el transmisor al receptor, dado en radianes.  $h_t$  es la elevación del centro de la antena transmisora en metros sobre el nivel del mar.  $h_r$  es la elevación del centro de la antena receptora en metros sobre el nivel del mar.  $d_r$  es la distancia desde el transmisor hasta el receptor en metros.  $a$  es el radio efectivo de la tierra en metros teniendo en cuenta la refractividad atmosférica  $K$ . Si  $k = 1.33$  se tiene que  $a$  es igual a  $8451 \text{ Km}$ .

$$\theta_{t-p} = \frac{h_p - h_t}{d_p} - \frac{d_p}{2a} \quad (2.66)$$

$\theta_{t-p}$  es el ángulo de depresión relativo a la horizontal para el rayo entre el transmisor y el punto sobre el perfil del terreno en radianes.  $h_p$  es la elevación de un punto en el terreno sobre el nivel medio del mar en metros.  $d_p$  es la distancia desde el transmisor hasta el punto sobre el perfil del terreno en metros.

Si  $\theta_{tr} > \theta_{tp}$  para cada punto de elevación del perfil del terreno, entonces se garantiza la existencia de línea de vista LOS. Si por el contrario ocurre que  $\theta_{tp} > \theta_{tr}$  en al menos un punto de elevación del perfil del terreno, entonces no existe línea de vista NLOS. A continuación se expone los dos modos de funcionamiento del modelo 2D Anderson.

### 2.5.1 En Modo LOS

En el modo línea de vista LOS, la señal está compuesta por la suma de los componentes vectoriales del rayo reflejado y el rayo directo. Si la primera zona de Fresnel es obstruida en 60% o más, entonces se adiciona hasta  $6 \text{ dB}$  a las pérdidas del sistema.

La intensidad de campo eléctrico del rayo directo, se indica en la ecuación 2.67.

$$e_r \left[ \frac{v}{m} \right] = \frac{1}{d_r} \sqrt{\frac{p_t g_t n}{4\pi}} \quad (2.67)$$

Donde  $e_r$  es la intensidad de campo eléctrico en el receptor,  $p_t$  es la potencia del transmisor medida en los terminales de la antena transmisora dada en vatios,  $g_t$  es la ganancia de la antena transmisora en la dirección del lóbulo principal,  $\eta$  es la impedancia de espacio libre en ohmios y  $d_r$  es la distancia entre transmisor y receptor en metros. Expresando la ecuación 2.67 en unidades logarítmicas se obtiene la ecuación 2.68.

$$E_r [dBuV / m] = 76.92 - 20 \log d + P_T \quad (2.68)$$

$P_T$  es la potencia radiada efectiva en  $dBW$  y  $d$  es la distancia que separa al transmisor y receptor en kilómetros.

Una expresión alternativa para encontrar el nivel de campo eléctrico en función de las pérdidas por reflexión, por obstrucción de la zona Fresnel y por clutter se indica en la ecuación 2.69.

$$E \left[ \frac{dBuV}{m} \right] = 76.92 - 20 \log d_r + P_T - A_{reflection} - A_{Fresnel} - A_{Clutter} \quad (2.69)$$

$A_{reflection}$  es la atenuación debida a la componente reflejada,  $A_{Fresnel}$  es la atenuación por la obstrucción parcial de la zona Fresnel,  $A_{clutter}$  hace referencia a las pérdidas debidas al tipo de terreno donde se encuentra el receptor, estas atenuaciones son dadas en  $dB$ ,  $P_T$  es la potencia del transmisor en  $dBW$  y la distancia  $d_r$  en kilómetros.

#### 2.5.1.1 Atenuación debida a la reflexión $A_{reflection}$ .

El coeficiente de reflexión complejo  $R$  es descrito en la ecuación 2.70.

$$R = R_s g \quad (2.70)$$

$R_s$  es el coeficiente de reflexión para superficie lisa entre el transmisor y receptor.  $R_{s||}$  y  $R_{s\perp}$  es el coeficiente de reflexión para polarización horizontal y vertical, tal como se indican en las ecuaciones 2.71 y 2.72, además  $g$  es el factor de atenuación para superficies con rugosidad.

$$R_{s||} = \frac{\sin \gamma_0 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma_0}}{\sin \gamma_0 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma_0}} \text{ Polarización horizontal} \quad (2.71)$$

$$R_{s\perp} = \frac{\varepsilon \sin \gamma_0 - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma_0}}{\varepsilon \sin \gamma_0 + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma_0}} \text{ Polarización vertical} \quad (2.72)$$

$\gamma_0$  es el ángulo de incidencia en radianes y  $\varepsilon$  es la permitividad compleja en  $pF/m$  como se indica en la ecuación 2.73.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - j60\sigma_1\lambda \quad (2.73)$$

$\varepsilon_1$  es la constante dieléctrica relativa de la superficie reflectora entre el transmisor y el receptor dada en  $pF/m$ ,  $\sigma_1$  es la conductividad de la superficie en siemens por metro, y  $\lambda$  es la longitud de onda del rayo incidente en metros. La magnitud de los dos rayos que se encuentran en el receptor (directo y reflejado) se suman vectorialmente como se indica en la ecuación 2.74.

$$E_r = E_d \sin(\omega t) + E_d R \sin(\omega t + \Delta\varphi) \quad \text{ó} \quad (2.74)$$

$$E_r = E_d(1 + |R| \angle(\varphi_r + \Delta\varphi)) \quad (2.75)$$

$E_d$ , es la magnitud del rayo directo,  $\omega$  es el ángulo de la portadora en radianes,  $R$  es el coeficiente de reflexión complejo y  $\Delta\varphi$  es la diferencia de fase del rayo reflejado en radianes.  $\varphi_r$  es definido como el ángulo de fase del coeficiente de reflexión en radianes,  $\Delta r$  es la diferencia de longitud del trayecto en metros, definida como se indica en la ecuación 2.76.

$$\Delta_r [m] = \frac{2h'_t h'_r}{d_r} \quad (2.76)$$

De donde  $h'_t$  es la altura de la antena transmisora por encima del plano reflector y  $h'_r$  es la altura de la antena receptora por encima del plano reflector, ambas en metros.

En la ecuación 2.77, se define a  $\Delta\varphi$ .

$$\Delta\varphi [rad] = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} \quad (2.77)$$

Para el caso del modelo 2D Anderson el punto de reflexión se encuentra evaluando el ángulo de incidencia y de reflexión en todos los puntos de elevación del terreno entre el transmisor y el receptor. El ángulo de incidencia en cualquier

punto a lo largo del perfil es encontrado geoméricamente, como se indica en las ecuaciones 2.78 y 2.79.

$$\gamma_t = \tan^{-1}(h_t / d_t) \quad \text{Para el transmisor} \quad (2.78)$$

$$\gamma_r = \tan^{-1}(h_r / d_r) \quad \text{Para el receptor} \quad (2.79)$$

Los términos  $h_t$  y  $h_r$  en metros corresponden a la altura del transmisor y receptor por encima del punto de evaluación respectivamente.  $d_t$  y  $d_r$  son las distancias para el punto de evaluación del transmisor y receptor en metros. El punto de evaluación donde ( $\gamma_t = \gamma_r$ ) es considerado el punto de reflexión.

La atenuación por reflexión se indica en la ecuación 2.80 y su valor se encuentra entre los 6 y 25  $dB$ .

$$A_{reflection} [dB] = 20 \log(1 + |R| \angle(\varphi_r + \Delta\varphi)) \quad (2.80)$$

#### 2.5.1.2 Atenuación debida a la obstrucción parcial de la zona Fresnel.

A la señal recibida no se le realiza modificaciones siempre y cuando en el trayecto de propagación no existan elementos que obstruyan más del 60% de la primera zona de Fresnel. De lo contrario se agrega de 0 a 6  $dB$ , dependiendo que tan obstruida este dicha zona. El factor de atenuación por obstrucción parcial de la zona de Fresnel se define en la ecuación 2.81.

$$A_{Fresnel} [dB] = 6 \left( \frac{C_{obs}(d_p)}{R_{FR}(d_p)} \right) \quad (2.81)$$

$C_{obs}(d_p)$  es la diferencia de altura en metros entre el trayecto del rayo y la elevación del terreno a una distancia  $d_p$  y  $R_{FR}(d_p)$  es el 60% del primer radio de Fresnel en función de  $d_p$ . Estos valores son calculados teniendo en cuenta el radio efectivo de la tierra  $K = 1.333$ . La atenuación por difracción se indica en la ecuación 2.82.

$$A_{diff} [dB] = \sum_{n=1}^n A_n(v, \rho) R_{FR}(d_p) = 6 \left( 549.367 \sqrt{\frac{d_p(d_r - d_p)}{fd_r}} \right) \quad (2.82)$$

La frecuencia  $f$  está dada en megahertz y las distancias  $d_r$  y  $d_p$  en kilómetros. En términos de las pérdidas de trayecto entre dos antenas se presenta la ecuación 2.83.

$$L_{LOS} [dB] = 32.45 + 20 \log f + 20 \log d_r + A_{reflection} + A_{Fresnel} + A_{Clutter} \quad (2.83)$$

La frecuencia del sistema  $f$  es dada en megahertz, la distancia  $d_r$  tiene unidades de kilómetros y las atenuaciones  $A_{reflección}$ ,  $A_{Fresnel}$ ,  $A_{clutter}$ , son dadas en  $dB$ .

### 2.5.2 En Modo NLOS

En este modo, la intensidad de campo eléctrico, se reduce debido a la atenuación por presencia de obstáculos entre el transmisor y el receptor. El cálculo de pérdidas por obstrucción de más de un obstáculo se hace asumiendo que dicha obstrucción es un conductor eléctrico perfecto. Además las pérdidas por difracción se calculan asumiendo obstáculos redondeados e individuales.

La ecuación 2.84 describe la intensidad de la señal que llega al receptor en el modo NLOS.

$$E_r [dBuV / m] = 104.77 - 20 \log d_r + P_T - A_{diff} - A_{TFresnel} - A_{RFresnel} - A_{Clutter} \quad (2.84)$$

Donde  $d_r$  es la distancia que separa al transmisor del receptor en kilometros,  $P_T$  es la PRA en  $dBW$  y las atenuaciones  $A_{diff}$ ,  $A_{TFresnel}$ ,  $A_{RFresnel}$ ,  $A_{clutter}$  son dadas en  $dB$ .

Para encontrar las pérdidas por difracción se tiene la expresión matemática como se indica en la ecuación 2.85.

$$A_{diff} [dB] = \sum_{n=1}^n A_n(v, \rho) \quad (2.85)$$

$A_n(v, \rho)$ , corresponde a las pérdidas por difracción de cada uno de los obstáculos entre el transmisor y el receptor.  $A_{TFresnel}$  y  $A_{RFresnel}$  corresponden a la atenuación por obstrucción desde el transmisor hasta la primera obstrucción y desde la última obstrucción hasta el receptor, siendo estos últimos calculados de la misma forma en que se calcula  $A_{Fresnel}$  para el caso en que existe LOS.

Por último la atenuación se define mediante la ecuación 2.86.

$$L_{NLOS} [dB] = 32.45 + 20 \log f + 20 \log d_r + A_{diff} + A_{TFresnel} + A_{RFresnel} + A_{Clutter} \quad (2.86)$$

Donde las atenuaciones son dadas en  $dB$ , la distancia en kilometros y la frecuencia en megahertz.

## 2.6 MÉTODO GENERAL PARA UNO Ó MÁS OBSTÁCULOS REC UIT-R 526

La propagación de las ondas electromagnéticas sobre la tierra se ven afectadas por las irregularidades presentes en el terreno. Para calcular dichos efectos, se exponen los métodos propuestos en la recomendación UIT-R 526-10 para el cálculo de la intensidad de campo eléctrico, a partir de las pérdidas por difracción [22].

### 2.6.1 Difracción en una Tierra Esférica

Este método se utiliza para calcular las pérdidas en terrenos lisos y puede realizarse mediante la fórmula de la serie de residuos. El programa informático GRWAVE<sup>17</sup> proporciona la metodología para el cálculo de dicha serie. En la recomendación UIT-R P.368 se presentan los resultados de este programa.

#### 2.6.1.1 Pérdida por difracción en trayectos transhorizonte.

Las pérdidas por difracción se pueden obtener mediante el uso de un factor de admitancia de la superficie  $K$ , que se obtiene mediante las ecuaciones 2.87 y 2.88 dependiendo de la polarización que utilice el sistema.

$$K_H(S) = \left(\frac{2\pi a_e}{\lambda}\right)^{-1/3} \left[ (\varepsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma) \right]^{-1/4} \quad \text{Polarización Horizontal} \quad (2.87)$$

$$K_V(s) = K_H \left[ \varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2 \right] \quad \text{Polarización Vertical} \quad (2.88)$$

La admitancia de la superficie  $K$  es dada en siemens.

$a_e$  es el radio ficticio de la tierra en kilómetros,  $\varepsilon$  es la permitividad en  $\sigma$  es la conductividad efectiva en siemens sobre metro y  $\lambda$  es la longitud de onda en metros.

Si los valores de  $K$  son inferiores a 0.001, las características eléctricas de la tierra tienen muy poca importancia. La ecuación 2.89 representa el valor relativo de la intensidad de campo eléctrico por difracción  $E$  en voltios sobre metro, con respecto a la intensidad de campo eléctrico en el espacio libre  $E_0$ .

<sup>17</sup> Disponible en <http://www.itu.int/oth/R0A0400000F/es>

$$20 \log \frac{E}{E_0} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2) \quad (2.89)$$

$X$  es el valor normalizado de las distancias entre las antenas de alturas  $Y_1$  y  $Y_2$ , como se indica en las ecuaciones 2.90 y 2.91 respectivamente.

$$X [Km] = 2.2 \beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d \quad (2.90)$$

$$Y [m] = 9.6(10^{-3}) \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h \quad (2.91)$$

La frecuencia  $f$  está dada en megahertz.  $A$  es el radio ficticio de la tierra en kilómetros,  $d$  es la distancia entre transmisor y receptor en kilómetros y  $h$  es la altura de las antenas en metros.

$\beta$  es un parámetro que tiene en cuenta la naturaleza del suelo y se puede calcular a partir de  $K$  como se indica en la ecuación 2.92.

$$\beta = \frac{1 + 1.6K^2 + 0.75K^4}{1 + 4.5K^2 + 1.35K^4} \quad (2.92)$$

Se puede considerar que  $\beta$  es igual a uno con polarización horizontal en todas las frecuencias, o con polarización vertical por encima de 20 MHz sobre la tierra o de 300 MHz sobre el mar. En el resto de los casos se debe calcular  $\beta$  en función de  $K$  tal como se indica en la ecuación 2.93.

$$K^2 \approx 6.89 \frac{\sigma}{k^{(2/3)} f^{(5/3)}} \quad (2.93)$$

Los valores de la distancia  $F(X)$  y la ganancia de altura de antena  $G(Y)$  se calculan mediante las ecuaciones 2.94 y 2.95.

$$F(X) = 11 + \log X - 17.6 \quad (2.94)$$

$$G(Y) \cong 17.6(Y - 1.1)^{1/2} 5 \log(Y - 1.1) - 8 \quad \text{Para } Y > 2 \quad (2.95)$$

$F(X)$  es dado en kilómetros.

Los valores de  $G(Y)$  para ( $Y < 2$ ) se calculan tal como se indica en las ecuaciones 2.96, 2.97 y 2.98.

$$G(Y) \cong 20 \log(Y + 0.1Y^3) \quad \text{Para } 10K < Y < 2 \quad (2.96)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log k + 9 \log\left(\frac{Y}{K}\right) \left[ \log\left(\frac{Y}{K}\right) + 1 \right] \quad \text{Para } K/10 < Y < 10K \quad (2.97)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log K \quad \text{Para } Y < K/10 \quad (2.98)$$

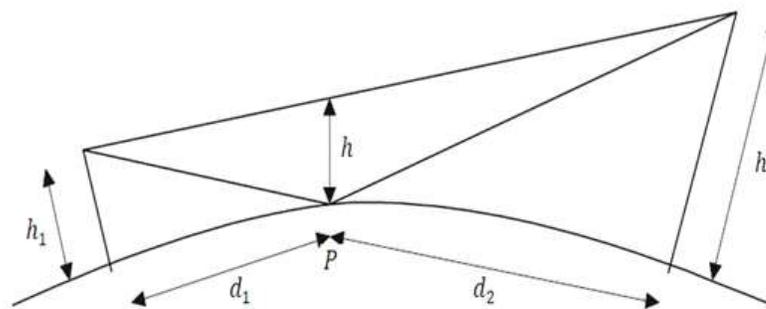
Los cálculos anteriores se pueden obtener mediante el uso de nomogramas<sup>18</sup>, pero su uso no es de interés para este trabajo de grado debido a la necesidad de conocer los procedimientos matemáticos para ser implementados en la herramienta software.

### 2.6.2 Pérdidas por Difracción en Trayectos con Visibilidad Directa.

Para casos con línea de vista como el presentado en la figura 2.2, los cálculos pueden ser hallados utilizando una interpolación lineal entre el límite de la zona de difracción, donde la atenuación correspondiente al espacio libre es cero y el horizonte radioeléctrico se determina por la expresión que se indica en la ecuación 2.99.

$$A[dB] = \left(1 - \frac{5h}{3R_1}\right) A_h \quad (2.99)$$

$h$  es el trayecto libre de obstáculos entre 0 y 0.6 de  $R_1$ ,  $A_h$  son las pérdidas por difracción en el horizonte.



P: punto de reflexión

**Figura 2.2.** Propagación con Línea de Vista<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> Un nomograma es un método gráfico de cálculo con precisión limitada.

<sup>19</sup> Figura 2.2 y 2.3 disponibles en: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.526-10-200702-III!PDF-S.pdf>

$$h = \frac{(h_1 - \frac{d_1^2}{2a_e})d_2 + (h_2 - \frac{d_2^2}{2a_e})d_1}{d} \quad (2.100)$$

De donde,

$$d_1 = \frac{d}{2}(1-b) \text{ si } (h_1 \leq h_2) \quad (2.101)$$

$$d_1 = \frac{d}{2}(1+b) \text{ en otro caso} \quad (2.102)$$

$$d_2 = d - d_1 \quad (2.103)$$

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(1+m)^3}} \right) \right\} \quad (2.104)$$

$$c = \frac{|h_1 - h_2|}{h_1 + h_2} \quad (2.105)$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \quad (2.106)$$

$$R_1 = \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda}{d}} \quad (2.107)$$

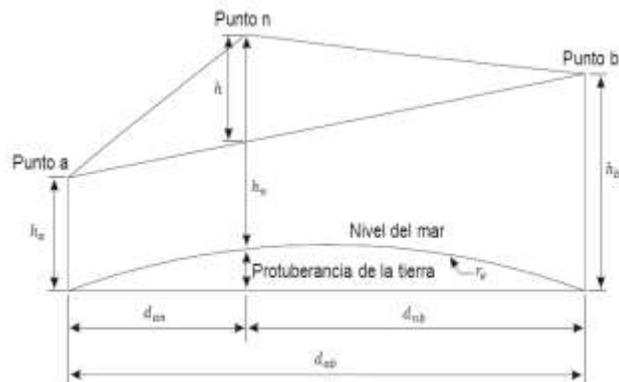
### 2.6.3 Método General para uno o más Obstáculos

Para la aplicación de este método se debe disponer de un perfil del trayecto que conste de muestras del medio y distancias al transmisor. El método se basa en un procedimiento utilizado hasta tres veces dependiendo del perfil del trayecto [18]. Este consiste en determinar el valor máximo del parámetro  $v_n$  y la sección del perfil que debe considerarse, el cual se define desde el punto de índice  $a$  hasta  $b$  donde  $a < b$  tal como se indica en la figura 2.3. Si  $a + 1 = b$  la pérdidas por difracción es igual a cero. El valor de  $v_n$  para el punto del perfil  $n$ -ésimo viene dado por la expresión matemática, como se indica en la ecuación 2.108 y 2.109.

$$v_n = h \sqrt{\frac{2b_{ab}}{\lambda d_{an} d_{nb}}} \quad (2.108)$$

$$h = h_n + \left( \frac{d_{an} d_{nb}}{2r_e} \right) - \left( \frac{h_a d_{nb} + h_b d_{an}}{d_{ab}} \right) \quad (2.109)$$

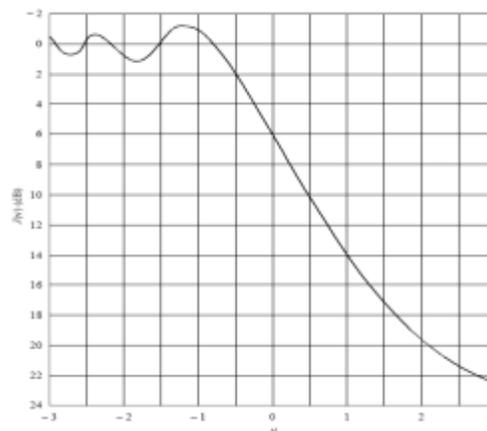
$h$ ,  $h_a$  y  $h_b$  son dadas en metros,  $d_{an}$ ,  $d_{nb}$  y  $d_{ab}$  en kilómetros,  $r_e$  es el radio ficticio de la tierra en kilómetros y  $\lambda$  es la longitud de onda en metros. El procedimiento anterior se aplica inicialmente a todo el perfil del transmisor al receptor. Al punto con el valor más alto de  $v_n$  se le llama arista principal  $p$  y la pérdida correspondiente es  $J(v_p)$ . Si  $v_p > -0.78$  el procedimiento se aplica dos veces más, así: del transmisor al punto  $p$  para obtener  $v_t$  y a continuación  $J(v_t)$  y del punto  $p$  al receptor para obtener  $v_r$  y a continuación  $J(v_r)$ . Las pérdidas por difracción serán función de  $v$  según la ecuación 2.110 para los casos donde  $v > -0.78$



**Figura 2.3.** Geometría para una Sola Arista.

$$j(v)[dB] = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(v+0.1)^2 + 1} + (v-0.1)) \quad (2.110)$$

En otros casos la función de pérdidas de difracción se hace cero. Gráficamente las pérdidas por difracción se representan en la figura 2.4.



**Figura 2.4.** Pérdidas por Difracción en Función de  $v^{20}$ .

<sup>20</sup> Figura disponible en: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.526-10-200702-!!!PDF-S.pdf>

Finalmente el exceso de pérdidas por difracción en el trayecto de propagación viene dado por la expresión indicada en la ecuación 2.111.

$$L = J(v_p) + T [J(v_t) + J(v_r) + C] \text{ Para } v_p > -0.78 \quad (2.111)$$

$C$  es la corrección empírica y se define en la ecuación 2.112.

$$C = 10 + 0.04D \quad (2.112)$$

$D$  es la longitud del trayecto en kilómetros y

$$T = 1 - \exp(-J(v_p) / 6) \quad (2.113)$$

## 2.7 MODELO PARA PROPAGACIÓN EN EXTERIORES EN EL RANGO DE 50 MHZ A 1GHZ

Este modelo se basa en las curvas de propagación de la Comisión Federal de Comunicaciones (*FCC, Federal Communications Commission*) F(50,50). Presenta la caracterización matemática de dichas curvas y permite la estimación del valor medio de la atenuación, como función de la distancia y altura de la antena transmisora. Estas curvas fueron desarrolladas con medidas realizadas en distintas zonas geográficas y en diferentes épocas del año. Permiten calcular los valores medios para dar servicio al 50% de las ubicaciones durante el 50% del tiempo como factores de calidad, por lo tanto reflejan datos experimentales reales y no obtenidos a partir de desarrollos teóricos [23, 24].

Teniendo en cuenta la caracterización de dichas curvas, en este modelo se asume que la potencia isotrópica recibida  $p_r$  en condiciones normales de propagación se define como se indica en la ecuación 2.114.

$$p_r [W] = \frac{pire}{d^n} \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad (2.114)$$

Donde  $pire$  se expresa en vatios,  $d$  es la distancia entre las antenas transmisora y receptora en metros,  $\lambda$  es la longitud de onda en metros y  $n$  es el índice de atenuación tal que entre mayor sea la dispersión mayor es su valor, el cual se define en la ecuación 2.115.

$$n = \frac{P_r - PIRE - L_0}{10 \log d} \quad (2.115)$$

Tanto la potencia  $P_r$  como la potencia  $PIRE$  son dadas en  $dBW$ .

La atenuación en el canal de propagación se calcula mediante la ecuación 2.116.

$$L[db] = 10n \log(d) + L_0 \quad (2.116)$$

La atenuación a un metro de la antena transmisora  $L_0$ , se indica en la ecuación 2.117.

$$L_0[db] = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \quad (2.117)$$

El modelo que aquí se presenta es independiente de si el sistema es analógico o digital y no proporciona información adicional referente a los aspectos del canal como retardo, dispersión o fase de llegada; sin embargo, el valor medio de la atenuación proporcionado es suficiente para la mayoría de los casos prácticos.

Las curvas ya referidas proporcionan valores medianos de la intensidad de campo eléctrico  $e$  en voltios sobre metro, para una  $pire$  de 1 kilovatio a una distancia  $d$  en metros y una altura de la antena transmisora  $h$  en metros, de manera que la potencia recibida se pueda calcular directamente de los valores de  $e$ , tal como se indica en la ecuación 2.118.

$$p_r[w] = \frac{1}{480} \left( \frac{e\lambda}{\pi} \right)^2 \quad (2.118)$$

Los valores de  $e$  utilizados en el desarrollo del modelo se obtuvieron de versiones ampliadas de las curvas F(50,50). La primera de ellas manteniendo constante la altura de la antena transmisora y variando la distancia, la segunda manteniendo constante la distancia y variando la altura de la antena; estas dos formas combinadas permiten una tercera forma en un modelo bidimensional que es el que se presenta en este modelo, en el cual se utilizaron más de 4000 valores de  $e$  ajustados a un modelo polinomial de cuarto grado, donde  $n$  se define en la ecuación 2.119:

$$n = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 a_{ij} h^i d^j \quad (2.119)$$

Donde  $h$  y  $d$  se expresan en metros,  $a_{ij}$  representa los coeficientes de ajuste obtenidos mediante el programa Stanford Graphics<sup>21</sup>®, y son indicados en la tabla 2.2.

$a_{ij}$	0	1	2	3	4
0	2.30685	$2.33037 \times 10^{-2}$	$-2.29522 \times 10^{-4}$	$9.47471 \times 10^{-7}$	$-1.34347 \times 10^{-9}$
1	$-2.41422 \times 10^{-2}$	$-2.71179 \times 10^{-5}$	$7.27952 \times 10^{-7}$	$-4.02123 \times 10^{-9}$	$6.57089 \times 10^{-12}$
2	$5.20309 \times 10^{-6}$	$-6.02053 \times 10^{-9}$	$-8.36706 \times 10^{-10}$	$5.79115 \times 10^{-12}$	$-1.03827 \times 10^{-14}$
3	$4.4030 \times 10^{-9}$	$2.7287 \times 10^{-11}$	$4.26606 \times 10^{-13}$	$-3.71837 \times 10^{-15}$	$7.15914 \times 10^{-18}$
4	$1.2550 \times 10^{-12}$	$1.1005 \times 10^{-14}$	$7.88452 \times 10^{-17}$	$8.74816 \times 10^{-19}$	$-1.78038 \times 10^{-21}$

**Tabla 2.2.** Coeficientes para el Cálculo del Factor de Atenuación  $n$ .

Finalmente se obtiene el nivel de campo eléctrico en términos de la potencia  $P_r$ , como lo indican las ecuaciones 2.120 y 2.121.

$$P_r [dBW] = PIRE - L \quad (2.120)$$

La potencia  $PIRE$  es dada en  $dBW$  y las pérdidas  $L$  en  $dB$ .

$$e [V/m] = \left(\frac{\pi}{\lambda}\right) \sqrt{480 p_r} \quad (2.121)$$

La longitud de onda es dada en metros y la potencia  $p_r$  en vatios.

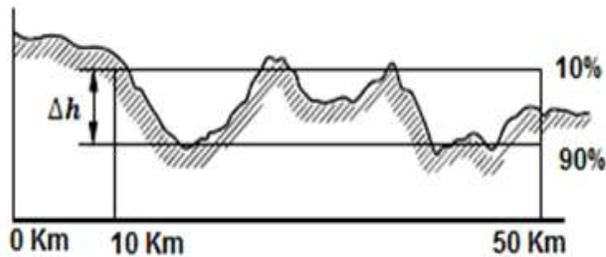
## 2.8 MÉTODO GENERAL PARA DETERMINAR EL NIVEL DE CAMPO ELECTRICO HACIENDO USO DE LAS CURVAS E(50,50)

Estas curvas y procedimientos fueron diseñados para la predicción de la intensidad del campo eléctrico en sistemas de radiodifusión para ondas métricas y decimétricas en todas las condiciones climáticas, para frecuencias comprendidas entre los 30 y 1000 MHz y para distancias de hasta 1000 Km [25].

<sup>21</sup> Stamford Graphics. Es una herramienta diseñada para la creación de gráficos técnicos exigidos por la comunidad científica. Disponible en: <http://www.agocg.ac.uk/train/stanford/stanford.htm>

Las curvas se basan en el análisis estadístico de una gran cantidad de datos obtenidos de manera experimental, para una PRA de 1 KW.

Para definir el grado de irregularidad del terreno se utiliza el parámetro  $\Delta h$  (medida de la irregularidad del terreno) el cual es un parámetro estadístico que caracteriza las variaciones de la altura del suelo a lo largo de las partes o del total de un trayecto de propagación. Específicamente para servicios de radiodifusión este parámetro se aplica solamente para distancias comprendidas entre 10 y 50 kilómetros desde el transmisor tal como se indica en la figura 2.5.



**Figura 2.5.** Aplicación del Parámetro  $\Delta h$  para Sistemas de Radiodifusión<sup>22</sup>.

La intensidad de campo eléctrico en el receptor está directamente relacionada con la altura de la antena receptora y la naturaleza de su entorno. Así una variación entre 1.5 y 40 metros en la altura de la antena receptora  $h_2$  puede generar una modificación en la intensidad del campo eléctrico, como se indica en la ecuación 2.122.

$$G(h_2)[dB] = \frac{C}{6} 20 \log\left(\frac{h_2}{10}\right) \quad (2.122)$$

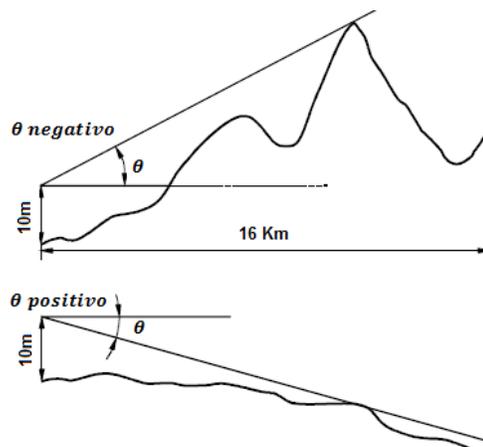
La tabla 2.3 contiene los valores de  $C$  que corresponde a factores típicos de ganancias teniendo en cuenta la altura de la antena receptora, para distintas zonas.

Zona	Ondas métricas (dB)	Ondas decimétricas (dB)
Rural	4	4
Suburbana	5	6
Urbana	6	8

**Tabla 2.3.** Factores Típicos de Ganancias  $C$ .

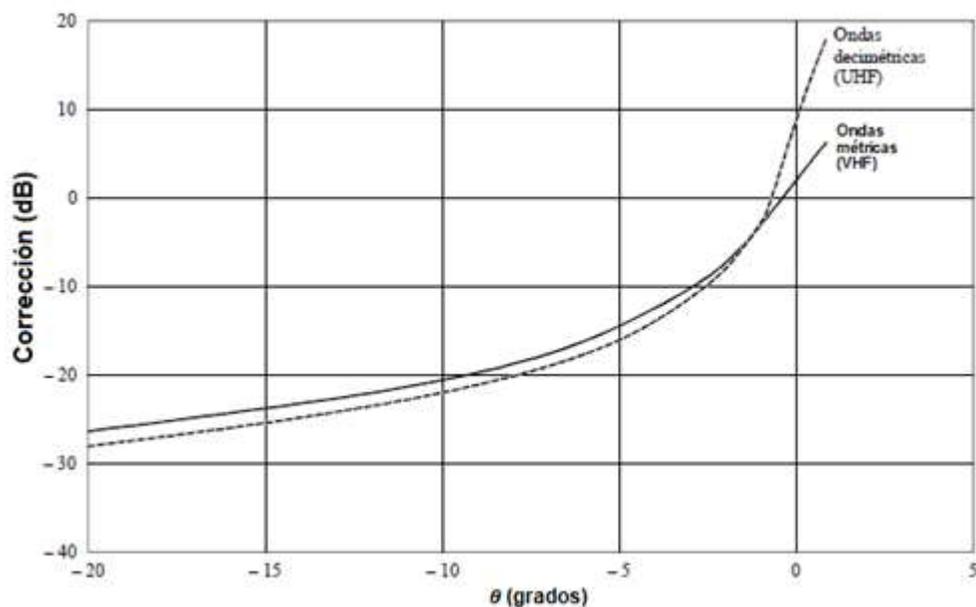
<sup>22</sup> Imagen disponible en: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/>

La intensidad de campo eléctrico puede ser encontrada con un mayor grado de exactitud teniendo en cuenta el terreno donde se encuentra el receptor. Para ello se realiza una corrección basada en el ángulo de despeje  $\theta$ , el cual es medido entre la horizontal de la antena receptora y la línea que une al receptor con el obstáculo más alto, tal como se indica en la figura 2.6.



**Figura 2.6.** Ángulo de Despeje  $\theta$ <sup>23</sup>.

En la figura 2.7 se indican los factores de corrección apropiados, los cuales son obtenidos a partir del ángulo de despeje.



**Figura 2.7.** Factores de Corrección en Función del Ángulo  $\theta$ <sup>24</sup>.

<sup>23</sup> Imagen disponible en <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/>

<sup>24</sup> Imagen disponible en: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/>

Las curvas de corrección del ángulo  $\theta$  pueden ser expresadas matemáticamente tal como se indica en la ecuación 2.123.

$$\text{Corrección} = 8.1(6.9 + 20 \log(\sqrt{(v-0.1)^2 + 1}) + v - 0.1) \quad (2.123)$$

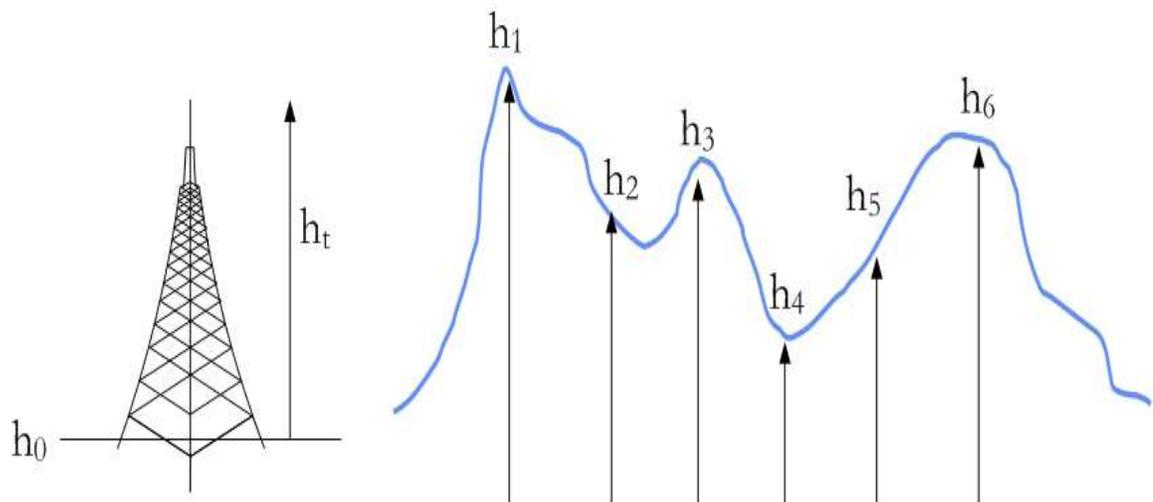
$v$  se define en la ecuación 2.124.

$$v = -\theta \sqrt{(4000 \times 95 / 300)} \quad (2.124)$$

$\theta$  es dada en radianes.

Las curvas E(50,50) representan valores de intensidad de campo eléctrico, estimado para el 50% de los sitios y para un 50% del tiempo [26]. Con distintas alturas para antenas transmisoras y 10 m de altura para la antena receptora el cual es un valor normalizado para aplicaciones de radiodifusión, con una medida de irregularidad del terreno  $\Delta h$  igual a 50 m el cual se considera un valor representativo y que corresponde a terrenos medianamente ondulados.

El concepto de altura efectiva se usa cuando se desea encontrar la cobertura en un sistema de radiodifusión como corresponde al presente trabajo de grado. Para el cálculo de la altura efectiva se tienen en cuenta las alturas más importantes entre el transmisor y receptor, como se indica en la figura 2.8.



**Figura 2.8.** Diagrama con la Geografía Original Existente en un Radioenlace<sup>25</sup>.

<sup>25</sup> Imagen disponible en: <http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/6/65/AnexoJKL-Marcomun.pdf>

Así la altura efectiva  $h_{ef}$  en metros se calcula como se indica en la ecuación 2.125

$$h_{ef} = h_t - \sum_i (h_i - h_0) \quad (2.125)$$

Donde  $h_t$  es la altura real de la antena en metros,  $h_0$  es la altura de la base de la antena con respecto al nivel del mar en metros y  $h_i$  son las alturas con respecto al nivel del mar consideradas dentro del área de cobertura en metros.

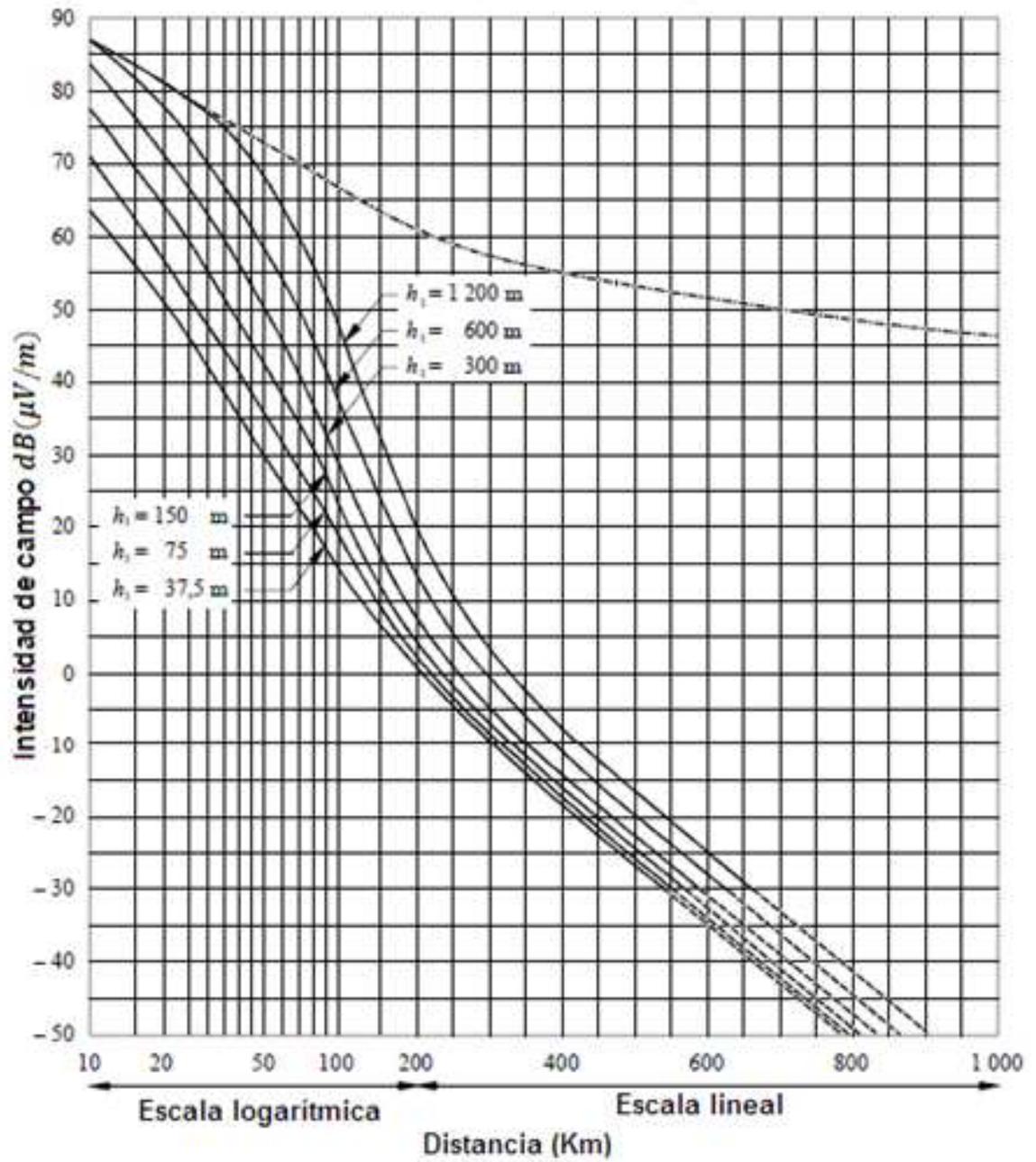
En las curvas E(50,50) se indican las alturas efectivas para la antena transmisora entre 37.5 y 1200 m. Cuando se utilice una altura efectiva distinta para el transmisor entonces se hace uso del método de interpolación lineal entre los valores inmediatamente superior e inferior del valor que se esté utilizando. Cuando la altura efectiva para el transmisor  $h_1$  se encuentra entre 0 y 37.5 m, la intensidad de campo eléctrico a una distancia  $x$  del transmisor se considera que es la misma dada por la curva de 37.5 m para una distancia  $d_r$  mostrada en la ecuación 2.126.

$$d_r = (x + 25 - 4.1\sqrt{h_1}) \quad (2.126)$$

Este procedimiento es válido para distancias superiores a la del horizonte radioeléctrico el cual se calcula por medio de la ecuación 2.127.

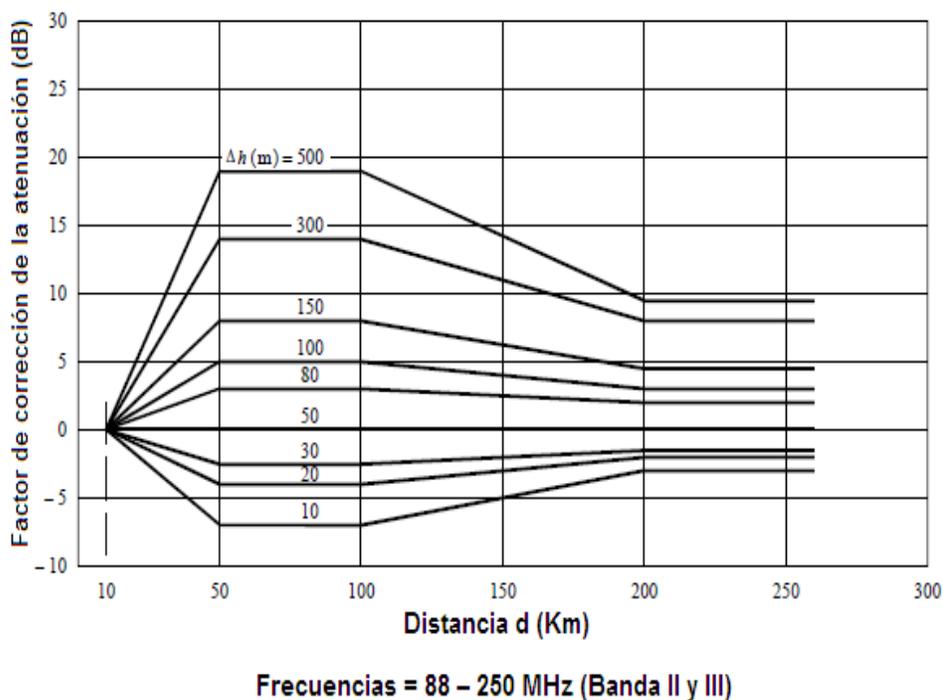
$$d > 4.1\sqrt{h_1} \quad (2.127)$$

En la figura 2.9 se presentan las curvas para calcular de manera gráfica el nivel de campo eléctrico E(50,50). Con una frecuencia de 30 a 250 MHz, en tierra, usualmente en estas curvas se utiliza un  $\Delta h = 50$  m por considerarlo un valor representativo, pero existen ocasiones en que este valor es diferente, en dichos casos se recomienda utilizar una corrección a las curvas conforme se indica en la figura 2.10.



**Figura 2.9.** Intensidad de Campo Eléctrico para 1 KW de PRA<sup>26</sup>.

<sup>26</sup> Las figuras 2.9 y 2.10 están disponibles en: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/>



**Figura 2.10.** Factor de Corrección en Función de la Distancia  $d$  y  $\Delta h$ .

La intensidad de campo eléctrico  $E(x, h_1)$ , se define en las ecuaciones 2.128 y 2.129.

$$E(x_1, h_1) [dBuV / m] = E(x + 25 - 4.1\sqrt{h_1}, 37.5) \quad \text{para } x \geq 4.1\sqrt{h_1} \quad (2.128)$$

$$E(x, h_1) = E(x, 37.5) - E(4.1\sqrt{h_1}) + E(25, 37.5) \quad \text{para } x < 4.1\sqrt{h_1} \quad (2.129)$$

Donde  $x$  es la distancia dada en kilómetros y  $h_1$  es la altura efectiva de la antena transmisora en metros.

En el caso en que la potencia radiada aparente (PRA) sea diferente a 1 KW se utiliza la ecuación 2.130 para calcular el nivel de campo eléctrico.

$$E [dBuV / m] = E_r [dBuV / m] + 20 \log \left( \frac{M \sqrt{PRA}}{300} \right) \quad (2.130)$$

$E_r$  es el nivel de campo eléctrico cuando la PRA es igual a 1 KW,  $M$  es la figura de mérito la cual depende del tipo de antena tal como se indica en la tabla 2.4 y la PRA es dada en kilovatios.

Tipo de Antena	Figura de Mérito M
Estándar	300
Isotrópica	173
$\lambda/4$	314
$\lambda/2$	222

**Tabla 2.4.** Figura de Mérito para Antenas Típicas.

## 2.9 PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN

Las pérdidas por difracción complementan los modelos de predicción de propagación para calcular el nivel de campo eléctrico, a partir del cual se determina el área de cobertura de una estación de radio FM. A continuación se indican un conjunto de métodos con su descripción matemática, los cuales permiten calcular la atenuación por difracción que producen distintos obstáculos [20].

### 2.9.1 Obstáculo Aislado

Este caso se aplica a trayectos donde este obstáculo es el único que impide la visibilidad directa entre el transmisor y receptor.

#### 2.9.1.1 Obstáculo agudo

La atenuación por un obstáculo agudo está en función de  $v$ , el cual es un parámetro adimensional definido como se indica en la ecuación 2.131.

$$v = 2.58 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{fd}{d_1 d_2}} h \quad (2.131)$$

$h$  es la diferencia entre la altura máxima del obstáculo y una línea trazada desde el transmisor hasta el receptor en metros,  $d_1$  es la distancia desde el transmisor al obstáculo,  $d_2$  es la distancia desde el obstáculo hasta el receptor,  $d$  corresponde a la distancia del enlace;  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d$  son dadas en kilómetros y  $f$  es la frecuencia del sistema en megahertz, tal como se indica en la figura 2.11.

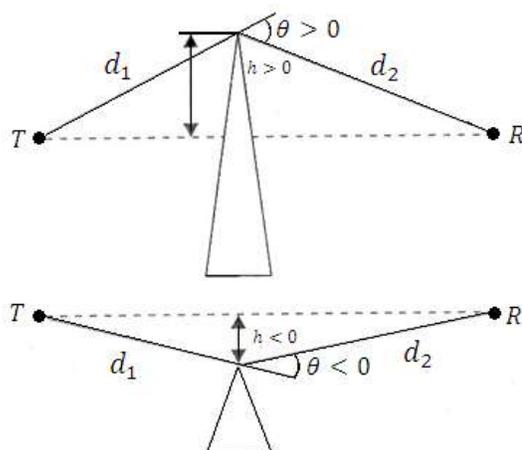


Figura 2.11. Obstáculo Agudo<sup>27</sup>.

La atenuación por difracción es calculada mediante la ecuación 2.132.

$$L_D(v)[dB] = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + (v-0.1)) \quad (2.132)$$

### 2.9.2 Dos Obstáculos Aislados

En la figura 2.12 se ilustra la geometría que representa el modelo actual.  $z_0$  es la altura absoluta de la antena transmisora,  $z_1$  es la altura del obstáculo  $o_1$ ,  $z_2$  es la altura del obstáculo  $o_2$ ,  $z_3$  es la altura absoluta de la antena receptora,  $x_1$  es la distancia del transmisor a  $o_1$  y  $x_2$  es la distancia del transmisor al obstáculo  $o_2$ . Donde la altura absoluta es la distancia medida desde el nivel del mar hasta el punto en cuestión.

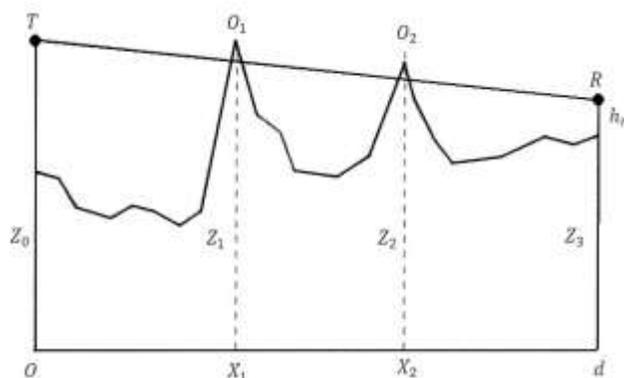
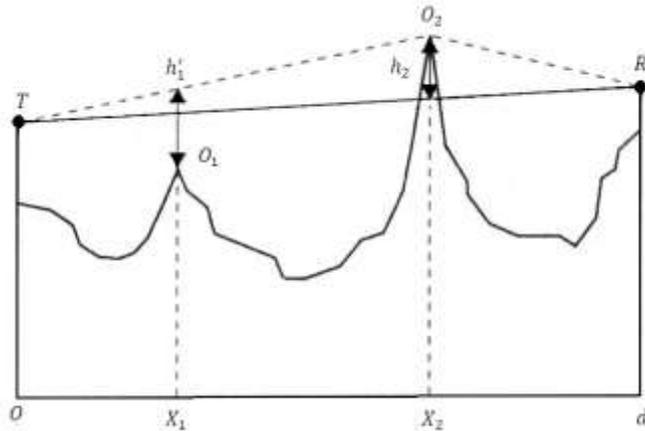


Figura 2.12. Dos Obstáculos Aislados.

<sup>27</sup> Las imágenes de las figuras 2.11 a 2.16 están disponibles en: Comunicaciones Móviles [20].

Para el cálculo de la atenuación generada por dos obstáculos, se utilizan tres métodos aquí expuestos que proporcionan resultados acordes a las mediciones.

### 2.9.2.1 Método Wilkerson

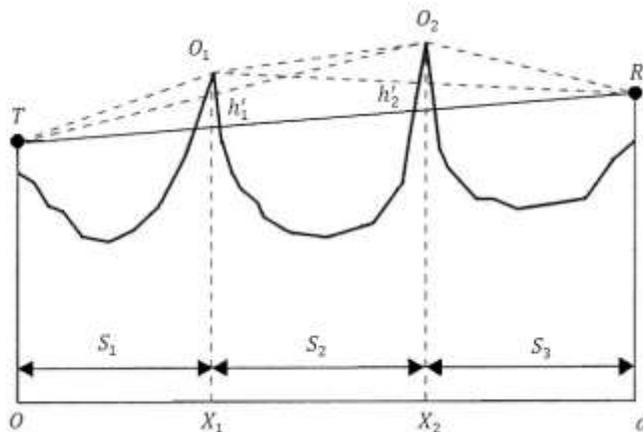


**Figura 2.13.** Representación Gráfica del Método Wilkerson.

Es utilizado cuando el rayo corta a un solo obstáculo y la zona Fresnel es obstruida por el segundo obstáculo como se muestra en la figura 2.13. La atenuación por difracción correspondiente se define como se indica en la ecuación 2.133.

$$L_D = L_D(v_2) + L_D(v_1) \quad (2.133)$$

### 2.9.2.2 Método de Epstein-Peterson



**Figura 2.14.** Representación Gráfica del Método Epstein-Peterson.

Este método es utilizado cuando el rayo corta a los dos obstáculos como en la figura 2.14. La atenuación por difracción se indica en la ecuación 2.134.

$$L_D = L_D(v_1') + L_D(v_2') + L_c \quad (2.134)$$

$$L_c = 10 \log \left( \frac{(s_1 + s_2)(s_2 + s_3)}{s_2(s_1 - s_2 + s_3)} \right) \quad (2.135)$$

### 2.9.2.3 Método EMP

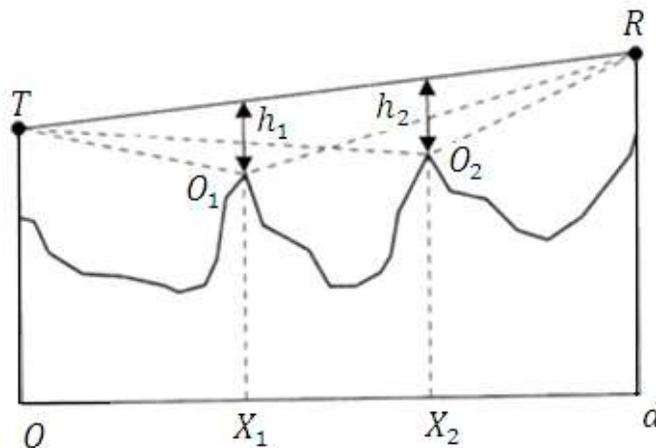


Figura 2.15. Representación Gráfica del Método EMP.

Este método es aplicado cuando el rayo no corta a ningún obstáculo, pero existe obstrucción de la zona Fresnel como en la figura 2.15, la atenuación se define por la expresión matemática, indicada en la ecuación 2.136.

$$L_D = L_D(v_1) + L_D(v_2) \quad (2.136)$$

### 2.9.3 Múltiples Obstáculos

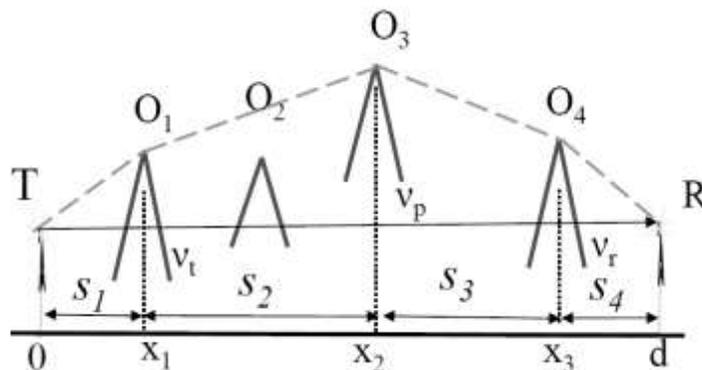


Figura 2.16. Atenuación por Difracción Debida a Múltiples Obstáculos.

Para determinar la atenuación por múltiples obstáculos como se indica en la figura 2.16, es necesario conocer el más alto de ellos. La forma de hacerlo es determinar en qué emplazamiento se presenta el valor más alto del parámetro  $v$ , definido en la ecuación 2.131.

La atenuación es calculada como se indica en la ecuación 2.137.

$$L = L_D(v_p) + T(L_D(v'_i) + L_D(v'_r) + C) \quad (2.37)$$

Donde,

$$T = 1 - e^{-\frac{L_D(v_p)}{6}} \quad (2.138)$$

$$C = 10 + 0.04d \quad (2.139)$$

$$v_p = L_D(TO_3R) \quad (2.140)$$

$$L_D(v'_i) = L_D(TO_1O_3) \quad (2.141)$$

$$L_D(v'_r) = L_D(O_3O_4R) \quad (2.142)$$

### **3 HERRAMIENTA FMPrediction**

#### **3.1 Requerimientos**

La herramienta desarrollada debe permitir al usuario determinar la zona de servicio de una Estación de Radiodifusión Sonora en FM, haciendo uso de un Mapa Digital de Elevación y/o un Sistema de Información Geográfica, mediante la selección de diferentes modelos de predicción de propagación habilitados para FM. Para esto, es necesario implementar funciones de lectura, manipulación y control de mapas digitales de elevación del terreno, así como también el acceso a los datos contenidos en los mismos. Además, es importante que el usuario pueda conocer el nivel de intensidad de Campo Eléctrico o de Potencia de Recepción en una ubicación específica.

#### **3.2 Documentación e información**

La herramienta FMPrediction cuenta con un manual de usuario<sup>28</sup> que describe sus componentes principales, los requisitos mínimos necesarios para su funcionamiento y, a modo de ejemplo, los pasos necesarios para graficar el área de cobertura de una Estación de Radiodifusión Sonora en FM.

#### **3.3 Descripción del Sistema**

La aplicación se desarrolló bajo el lenguaje de programación Visual Basic 6.0, incluyendo bibliotecas de ESRI necesarias para el acceso y la manipulación de los mapas.

##### **3.3.1 Interfaz Gráfica de Usuario**

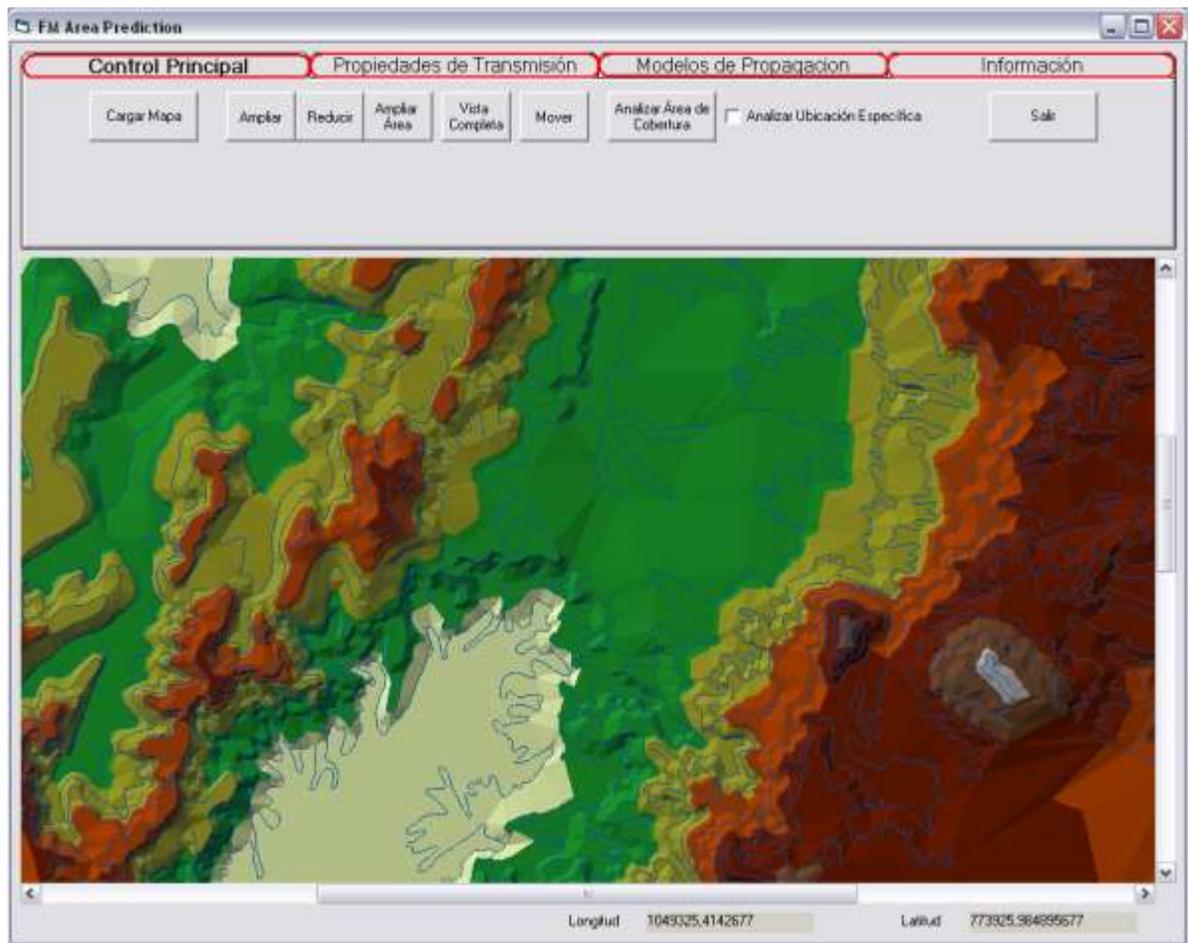
La interfaz gráfica de usuario cuenta con una ventana principal estilo Windows como la que se presenta en la figura 3.1 y tiene 4 secciones importantes.

- Barra de Título: Presenta el nombre de la herramienta y los botones minimizar, restaurar y cerrar.

---

<sup>28</sup> Documento disponible en el Anexo A

- Barra de Herramientas: Está dividida en 4 pestañas y permiten al usuario manipular el mapa y la aplicación, ingresar datos al sistema y determinar el modo de operación.
- MapControl: Permite visualizar y manipular el mapa cargado, así como también el transmisor y el receptor.
- Barra de estado: Presenta la posición del ratón sobre el mapa en coordenadas rectangulares UTM.



**Figura 3.1.** Interfaz Grafica de Usuario – Ventana Principal

### 3.3.2 Entrada-Salida del Sistema

- Entrada: Para el correcto funcionamiento del programa, este necesita contar con datos como:
  - ✓ El Mapa Digital de Elevación en formato TIN

- ✓ La posición del transmisor para el análisis de área de cobertura
  - ✓ La posición del transmisor y receptor para el análisis en ubicación específica.
  - ✓ Las características de transmisión
  - ✓ El modelo de predicción a utilizar y sus características complementarias.
- Salida: Los datos obtenidos como resultado de los cálculos de intensidad de potencia y/o intensidad de campo eléctrico se presentan de la siguiente manera:
    - ✓ En un documento de texto plano con formato TXT, con los resultados para cada punto analizado debidamente georeferenciado. Estos datos están organizados de la siguiente manera

ID	XCoordinate	XCoordinate	dBuVm	dBm
Identificación del punto	Coordenada X del punto (UTM)	Coordenada Y del punto (UTM)	Intensidad de campo Eléctrico	Intensidad de Potencia

**Tabla 3.1.** Datos contenidos en el archivo generado por la herramienta

- ✓ En una ventana emergente con los valores calculados para una ubicación específica.

### 3.3.3 Diseño de la Herramienta

La herramienta FMPrediction se desarrolló bajo principios del Proceso Unificado de Desarrollo de Rational (RUP, *Rational Unified Process*), y para su descripción bajo el Lenguaje Unificado de Modelado<sup>29</sup> (UML, *Unified Modeling Language*).

<sup>29</sup> Modelado disponible en el Anexo B



**Figura 3.2.** Esquema General de Funcionamiento

El funcionamiento general de la herramienta, en un esquema por bloques, se ilustra en la figura 3.2. Las funciones y características de cada componente, así como también su grado de interacción se describen a continuación.

**Control Principal:** Administra el funcionamiento general de la herramienta, hace uso de los modelos de propagación y las funciones de Localización y Ubicación para los puntos de análisis. Además crea el documento que contiene los resultados obtenidos.

**Modelos de Propagación:** Ejecutan del proceso para determinar el nivel de intensidad de campo eléctrico en un punto determinado. Estos algoritmos se inicializan de acuerdo al modelo de propagación seleccionado que puede ser:

- ✓ Espacio Libre: Calcula la intensidad de campo eléctrico en el punto e incluye las pérdidas por difracción halladas como se describe en la sección 2.9.
- ✓ Longley Rice: En modo de área determina la zona en la cual se encuentra el punto, determina la atenuación de referencia y añade las pérdidas por difracción.
- ✓ 2D Anderson: Determina si existe o no línea de vista, incluye en el modelo el cálculo de las pérdidas por difracción o por obstrucción parcial de la zona de Fresnel o por rayo reflejado.
- ✓ E(50,50): Mediante un proceso de interpolación determina el nivel de intensidad de campo eléctrico a partir de la altura efectiva y la distancia.

- ✓ F(50,50): No incluye proceso para pérdidas por difracción ya que está en función de la altura efectiva de la antena transmisora.
- ✓ Recomendación UIT-R 526: Método para determinar el nivel de campo eléctrico en un punto y determinar las pérdidas de trayecto.

**Localización y Ubicación:** Contiene funciones que retornan las coordenadas de los puntos a analizar.

**Matemáticas:** Son métodos utilizadas por algunos modelos de propagación que permiten realizar cálculos con números complejos.

**Perfil del terreno:** En estas funciones se determinan los obstáculos presentes entre 2 puntos, la altura efectiva y la distancia entre transmisor y receptor y se calculan las pérdidas por difracción en este trayecto.

**Distribución:** Determina los puntos que van a ser analizados por la herramienta y la distancia entre ellos.

**Puntos de Análisis:** Retornan las coordenadas de puntos de prueba ubicados entre dos puntos. Se utilizan para el cálculo de la altura promedio entre dos puntos.

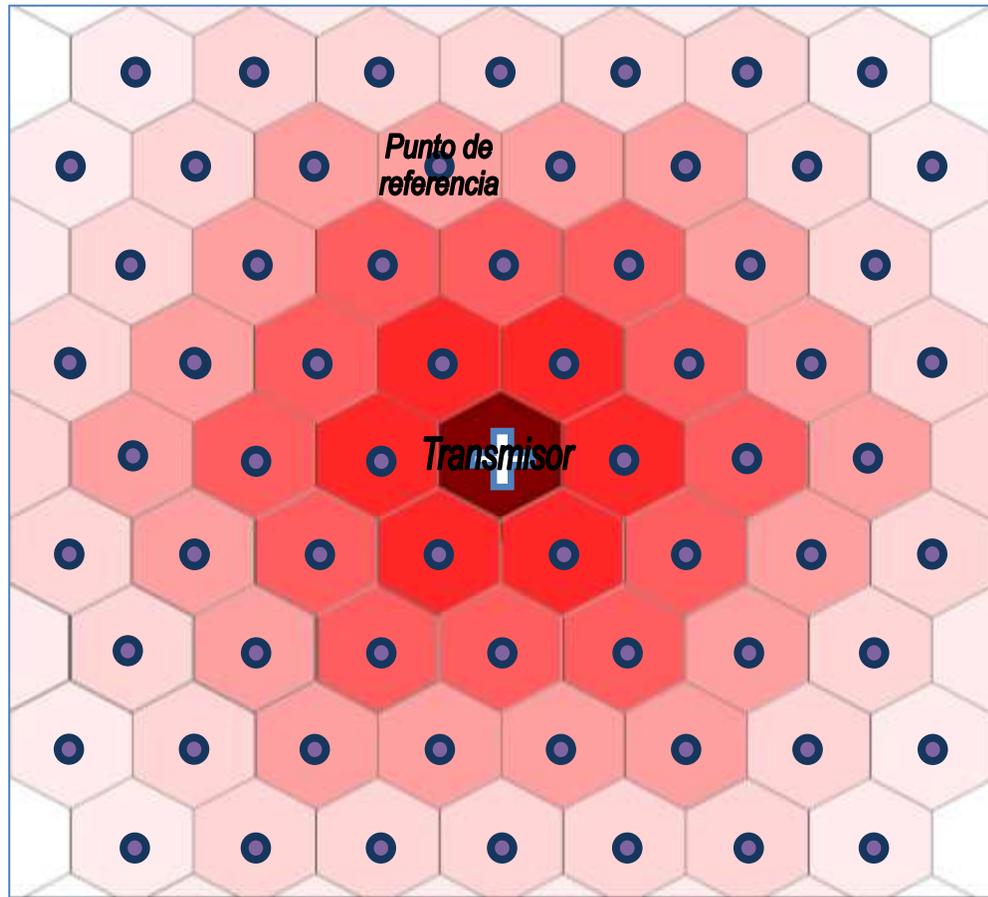
#### 3.3.3.1 Área de cobertura

Para determinar el área de cobertura, la herramienta crea un patrón de análisis sobre el terreno teniendo en cuenta la distancia uniforme entre los puntos.

De esta manera, se garantiza un menor error en las aproximaciones realizadas por la herramienta SIG cuando se interpolan los valores para graficar dicha zona.

Para realizar esto, se utilizó un patrón basado en las celdas de telefonía celular como se muestra en la figura 3.3; el tamaño de estas células se determinó teniendo en cuenta la eficiencia y el tiempo utilizado por la herramienta para realizar los cálculos; de esta manera, la distancia del centro al perímetro de la misma es de 850m y la distancia entre 2 puntos de análisis aledaños es de 1475m aproximadamente.

Finalmente, la distancia máxima desde el transmisor hasta el perímetro analizado por la herramienta es de 120Km.



**Figura 3.3.** Patrón de Análisis para el Área de Cobertura

Estas “celdas” se encuentran a igual distancia unas de otras, y el cálculo de la intensidad de campo eléctrico se realiza individualmente para cada una de ellas tomando como referencia la posición del transmisor.

### 3.3.3.2 Intensidad de campo

Para obtener la intensidad de campo en cada punto, la herramienta realiza un algoritmo independiente para cada modelo de propagación. Si el modelo no hace uso de la información contenida en el mapa digital de elevación, a éste se le incluyen las pérdidas por difracción del trayecto transmisor – punto de análisis.

### 3.3.3.3 Perfil del Terreno y pérdidas por difracción

Para obtener el perfil del terreno y calcular las pérdidas por difracción, estos algoritmos avanzan entre el transmisor y el receptor tomando muestras de la elevación del terreno y determinando cuales son los obstáculos existentes.

Con esta información calcula la elevación promedio entre dos puntos ó retorna una matriz con la información de la ubicación y elevación de los obstáculos.

Los modelos que incluyen las perdidas por difracción son:

- Espacio Libre
- Longley Rice en modo análisis de área
- 2D Anderson (implementa su propio método)
- Recomendación UIT-R 526

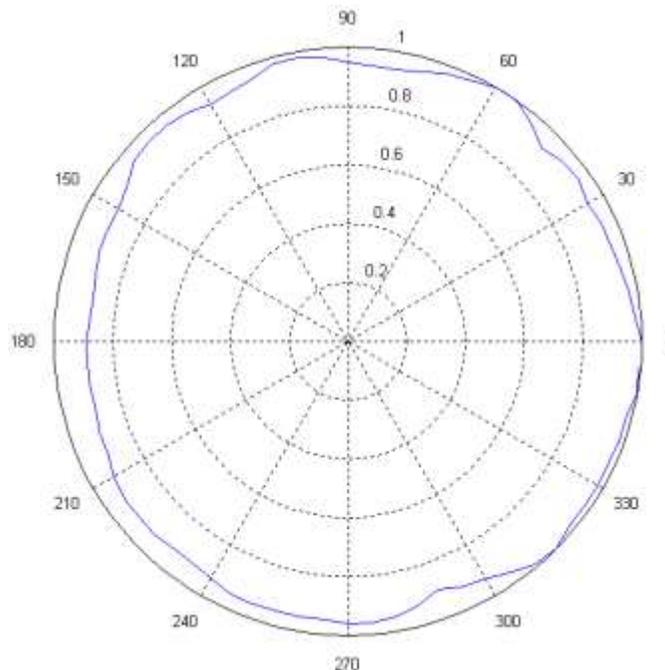
## 4 PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR.

La estación de radio Universitaria, Unicauca Estéreo, está ubicada en el municipio de Popayán, el cual se encuentra a una altura media de 1738 *m* sobre el nivel del mar. La localización del transmisor, en coordenadas planas es 769.797 *m Norte* y 1.054.329 *m Este* y la elevación de este punto sobre el nivel del mar es 1794 *m*.

#### 4.1.1 Sistema de Transmisión.

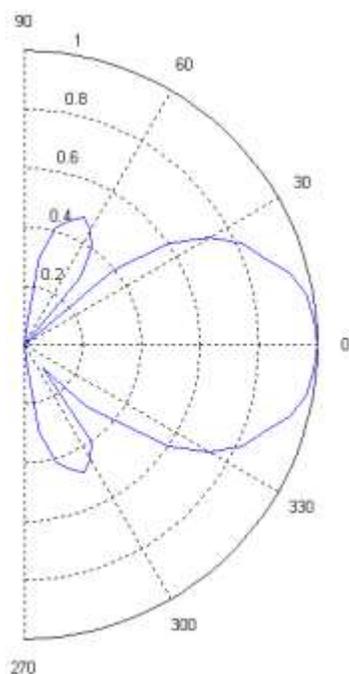
El transmisor de emergencia, Marca RVR, Modelo TEX300 LCD, opera en la frecuencia 104.1MHz con una potencia nominal de 300W. La línea de transmisión para este sistema, de marca Heliax, referencia LDF7-50, presenta atenuación de 0.8 dB por cada 100 *m* a la frecuencia de operación y tiene una longitud de 65 *m*. La antena empleada para la transmisión, marca OMB, referencia SGP-2R<sup>30</sup>, presenta una ganancia de 3 *dBi* y un patrón de radiación omnidireccional con distribución uniforme de potencia en 360° como se indica en la Figura 4.1.



**Figura 4.1.** Patrón de Radiación Horizontal de Antena Transmisora

<sup>30</sup> Estudio técnico Radio Universidad del Cauca. Víctor Manuel Quintero Florez  
Documento disponible en <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/>

En la Figura 4.2 se muestra el patrón de radiación vertical para esta antena.



**Figura 4.2.** Patrón de Radiación Vertical de Antena Transmisora

#### 4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA RECEPTORA.

Para obtener medidas de campo, fue necesario contar con una antena receptora diseñada especialmente con el objetivo de obtener resultados coherentes y apropiados en sistemas de radiodifusión sonora en FM. Para efectos prácticos se utilizó un dipolo plegado de lambda medios, el cual se indica en la Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Dipolo Plegado de Lambda Medios.

#### 4.2.1 Frecuencia de Operación

Con el objetivo de que la antena diseñada sea útil para toda la banda de radiodifusión FM, se eligió la frecuencia de funcionamiento de esta antena en el centro de dicha banda, como se indica en la ecuación 4.1.

$$f [MHz] = \left( \frac{88+108}{2} \right) = 98 \quad (4.1)$$

Para determinar la longitud de la antena se tiene en cuenta la longitud de onda  $\lambda$  en función de la velocidad de la luz  $c$  y la frecuencia de operación  $f$ , como se indica en la ecuación 4.2.

$$\lambda [m] = \frac{c}{f} = 3.06 \quad (4.2)$$

En la cual, la velocidad de la luz es igual  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  y la frecuencia es dada en megahertz. Para obtener las dimensiones del dipolo plegado basta con dividir entre dos la longitud de onda, como se indica en la ecuación 4.3.

$$\frac{\lambda}{2} [m] = 1.53 \quad (4.3)$$

Lo cual quiere decir que el dipolo plegado de lambda medios debe medir  $1.53 \text{ m}$  entre sus extremos.

Mediante el uso de un balun<sup>31</sup> se adapta la impedancia del dipolo plegado de  $300 \Omega$  a  $75 \Omega$  y se une al cable coaxial mediante un conector tipo N macho. El otro extremo del cable coaxial es conectado al equipo medidor de voltaje por medio del conector tipo BNC macho. El balun y los conectores utilizados se indican en la Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Balun y Conectores Tipo N y Tipo BNC Macho<sup>32</sup>.

<sup>31</sup> Dispositivo adaptador de impedancias

<sup>32</sup> Imágenes disponibles en <http://www.e1comm.com/index1.html> y <http://www.e1comm.com/index1.html>

#### 4.2.2 Ganancia de la Antena Receptora

Para determinar la ganancia de la antena receptora se implementó un sistema de transmisión, con un transmisor de radiofrecuencia marca Hewlett Packard 8656B y su rango de frecuencia de operación se encuentra entre los 10 KHz y los 999 MHz.

Como receptor se utilizó la antena ya mencionada, conectada al equipo medidor de voltaje. Este sistema se ubicó sobre un trípode para medir el ángulo de rotación de la antena receptora con respecto a la posición del transmisor.

Para obtener las medidas de ganancia de la antena se utilizó un valor de frecuencia igual a 120 MHz. Este valor se tomó debido a que el equipo medidor de voltaje es poco selectivo en frecuencia y al sintonizarlo en un valor de frecuencia dentro del rango de FM se generan interferencias por las señales provenientes de las distintas estaciones de radio que operan en la región, generando resultados erróneos.

Angulo ( $\alpha^\circ$ )	$V$ [dBuV]	$V$ [dBuV] Normalizado	$f(\theta, \varphi)$
0	74	0	1
5	54.5	- 19.5	0.106
10	54	- 20	0.1
15	53.5	- 20.5	0.095
20	53	- 21	0.090
25	52.5	- 21.5	0.085
30	52	- 22	0.080
35	51	- 23	0.070
40	50	- 24	0.064
45	48	- 26	0.050
50	47	- 27	0.045
55	45	- 29	0.035
60	44	- 30	0.031
65	43	- 31	0.028
70	42	- 32	0.025
75	39	- 35	0.018
80	35	- 39	0.012
85	29	- 45	0.005
90	27	- 47	0.0046

**Tabla 4.1.** Patrón de Radiación Medido Entre Cero y Noventa Grados.

En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan los valores del voltaje medidos entre 0 y 90 grados y entre 0 y - 90 grados respectivamente, donde el ángulo del plano horizontal se incrementa o decrementa de manera gradual cada 5 grados.

Adicionalmente las tablas 3.1 y 3.2 contiene el valor normalizado del voltaje, el cual se calcula por medio de la ecuación 4.4, considerando que para el ángulo de cero grados se obtiene la mayor ganancia.

$$V_{norm} [dBuV / m] = V(\Delta \square^0) - V(\square^0 = 0) \quad (4.4)$$

En la ecuación 4.4 los voltajes  $V$  son dados en  $dbuV/m$ . Los valores para el patrón de radiación de campo  $f(\theta, \varphi)$  se calculan como se indica en la ecuación 4.5, considerando  $\varphi = 0^\circ$ .

$$f(\theta, \varphi) = 10^{\left(\frac{V}{20}\right)} \quad (4.5)$$

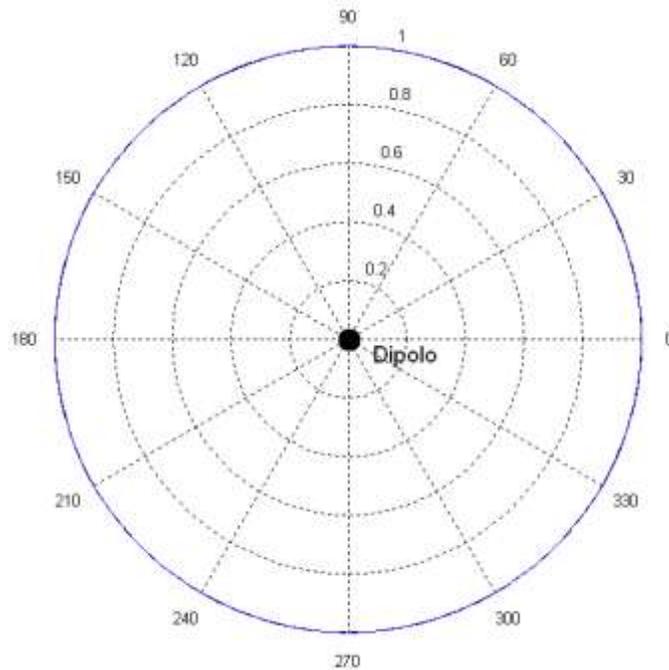
Angulo ( $\varphi^\circ$ )	$V [dBuV]$	$V [dBuV]$ Normalizado	$f(\theta, \varphi)$
0	74	0	1
- 5	54.5	- 19.5	0.106
-10	54.3	- 19.7	0.104
-15	54	- 20	0.1
-20	53.5	- 20.5	0.095
-25	53	- 21	0.090
-30	52.5	- 21.5	0.085
-35	52	- 22	0.080
-40	51	- 23	0.070
-45	50	- 24	0.063
-50	49	- 25	0.056
-55	48	- 26	0.050
-60	47	- 27	0.045
-65	45	- 29	0.035
-70	43.5	- 30.5	0.030
-75	41	- 33	0.022
-80	38	- 36	0.015
-85	34	- 40	0.01
-90	30	- 44	0.006

**Tabla 4.2.** Patrón de Radiación Medido Entre Cero y Menos Noventa Grados.

Donde el ángulo solido  $\Omega_A$  [27] se calcula como se indica en la ecuación 4.6.

$$\Omega_A = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f^2(\theta, \varphi) \sin(\theta, \varphi) d\varphi d\theta \quad (4.6)$$

La integral de  $f^2(\varphi)$  entre 0 y  $2\pi$  es  $2\pi$ , debido a que el patrón de radiación vertical se puede considerar 1 para todo  $\varphi$ , como se observa en la Figura 4.5. El resultando se indica en la ecuación 4.7.



**Figura 4.5.** Patrón de Radiación de un Dipolo Típico

$$\Omega_A = (2\pi) \int_0^\pi f^2(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (4.7)$$

La integral se describe en términos de una sumatoria, como se indica en la ecuación 4.8.

$$\Omega_A = (2\pi) \sum_{k=1}^{36} f_k^2 \Delta\theta, \quad \text{donde } \Delta\theta = 5 \quad (4.8)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 4.8, se calcula el valor del ángulo sólido, como se indica en la ecuación 4.9.

$$\Omega_A = 8.13 \quad (4.9)$$

La directividad  $D$  de la antena es definida en la ecuación 4.10 y 3.11.

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (4.10)$$

$$D = 1.54 \quad (4.11)$$

Por último se encuentra la ganancia por medio de la ecuación 4.12, donde  $\varepsilon$  es la eficiencia [27].

$$g = \varepsilon D \quad (4.12)$$

La eficiencia de una antena se define en la ecuación 4.13.

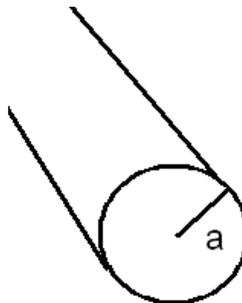
$$\varepsilon = \frac{R_r}{R_r + R_d} \quad (4.13)$$

De donde, la resistencia de radiación  $R_r$  y la resistencia de disipación  $R_d$  son dadas en ohmios. La resistencia de disipación se define en la ecuación 4.14.

$$R_d [\Omega] = \frac{\left(\frac{\lambda}{4}\right) R_s}{2\pi a} \quad (4.14)$$

La longitud de onda  $\lambda$ , es determinada en la ecuación 4.2.

$a$  es el radio del grosor del dipolo, como se ve en la Figura 4.6 y su valor se indica en la ecuación 4.15 para el caso de la antena construida.



**Figura 4.6.** Sección Transversal del Dipolo

$$a [m] = 0.005 \quad (4.15)$$

La resistencia de superficie  $R_s$  se define en la ecuación 4.16.

$$R_s [\Omega] = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (4.16)$$

Donde, la frecuencia angular  $\omega$ , la permeabilidad  $\mu$  y la conductividad del material de la antena a caracterizar  $\sigma$ , se definen en las ecuaciones 3.17, 3.18 y 3.19 respectivamente.

$$\omega \left[ \frac{rad}{seg} \right] = 2\pi f \quad (4.17)$$

Donde la frecuencia  $f$  es dada en hertz.

$$\mu \left[ \frac{N}{A^2} \right] = 4\pi \times 10^{-7} \quad (4.18)$$

$$\sigma \left[ \frac{S}{m} \right] = 3.5 \times 10^7 \quad (4.19)$$

El valor de la resistencia de superficie  $R_s$  se indica en la ecuación 4.20.

$$R_s [\Omega] = 3.67 \times 10^{-3} \quad (4.20)$$

Realizando los cálculos de la ecuación 4.14, se obtiene el valor para la resistencia de disipación, como se muestra en la ecuación 4.21.

$$R_d [\Omega] = 0.008 \quad (4.21)$$

La resistencia de radiación  $R_r$ , es determinada mediante la relación  $a/\lambda$  [27], su resultado se muestra en la ecuación 4.22.

$$R_r [\Omega] = 63 \quad (4.22)$$

Mediante la ecuación 4.13 se calcula el valor de la eficiencia; el cual se muestra en la ecuación 4.23.

$$\varepsilon = 0.99 \quad (4.23)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 4.12, se calcula la ganancia del dipolo, como se muestra en la ecuación 4.24.

$$g = 1.5246 \quad (4.24)$$

Para obtener el valor de ganancia del receptor, en la dirección de máxima radiación, dado en unidades logarítmicas se realiza el cálculo mostrado en la ecuación 4.25.

$$G_{rx} [dB] = 10 \log(g) = 1.83 \quad (4.25)$$

### 4.2.3 Espectro

En la Figura 4.7 se observa el espectro generado por las emisoras FM que operan en Popayán (Cauca). Cada una de las estaciones radiales es representada con un máximo donde el punto más alto corresponde a la frecuencia de funcionamiento de cada estación. Unicauca Estéreo por ejemplo, tiene un marcador llamado M2, el cual indica una frecuencia de 104.1 MHz. De aquí se puede apreciar que esta emisora presenta uno de los niveles más bajos de potencia, esto se debe a que en el momento se encuentra operando con un equipo transmisor de emergencia a una potencia nominal de 300W.

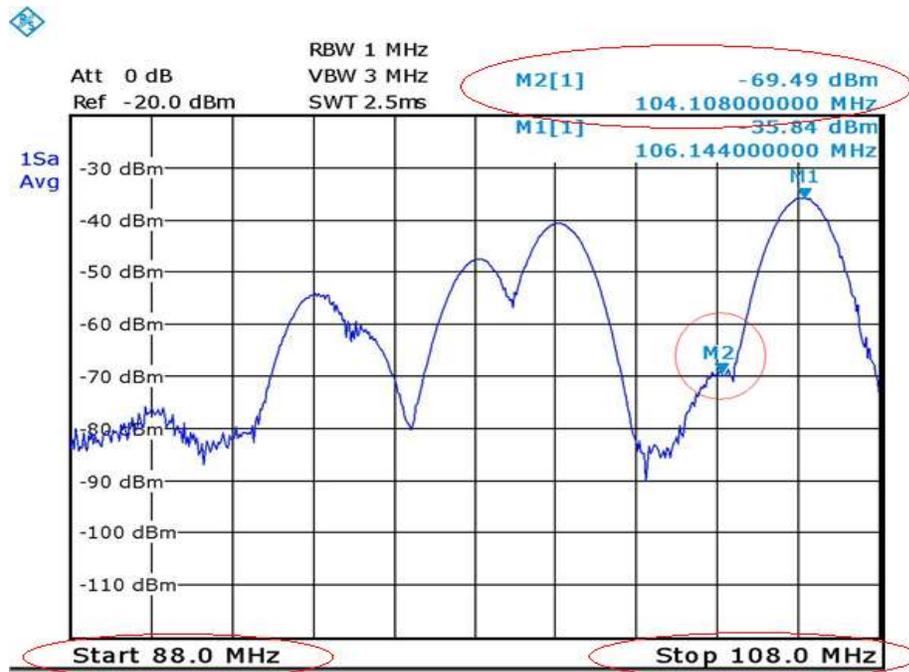


Figura 4.7. Espectro de las Distintas Estaciones de Radio FM en Popayán.

#### 4.2.4 Impedancia

La impedancia característica de la antena es de  $300 \Omega$  y este valor se reduce hasta los  $75 \Omega$  haciendo uso de un balun, siguiendo una relación de cuatro a uno. Obtener este último valor es importante dado que el equipo con el cual se mide el nivel de voltaje es diseñado para una  $Z = 75 \Omega$ , y al ser estos dos valores iguales se logra máxima transferencia de potencia.

Para conocer el valor de impedancia se utilizó el analizador de redes marca Rohde & Schwarz R&S ZVL Network Analyzer, el cual es configurable como analizador de redes o como analizador de espectro en sistemas que operan a frecuencias entre los 9 KHz y 6 GHz.

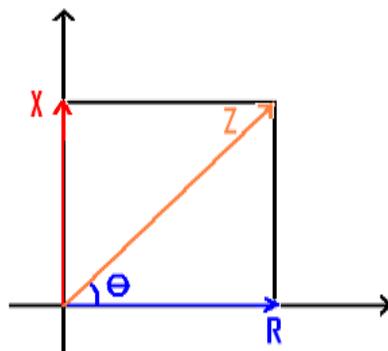
La impedancia puede representarse como la suma de una parte real y una parte imaginaria, como se indica en la ecuación 4.26.

$$Z[\Omega] = R + jX \quad (4.26)$$

Donde  $R$  es la resistencia y  $X$  la reactancia, estos valores son dados en ohmios. La resistencia es el valor de oposición al paso de la corriente que tiene el resistor, y la reactancia es el valor de oposición al paso de la corriente alterna que tienen los condensadores (reactancia capacitiva) y los inductores (reactancia inductiva).

Gráficamente la ecuación 4.26 se representa mediante la Figura 4.8, la magnitud de  $Z$  dada en ohmios es calculada como se muestra en la ecuación 4.27.

$$Z[\Omega] = \sqrt{(R)^2 + (X)^2} \quad (4.27)$$



**Figura 4.8.** Representación Gráfica de los Componentes de Impedancia  $Z$ .

La fase  $\theta$  se calcula mediante la ecuación 4.28.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{X}{Z}\right) \quad (4.28)$$

El valor real e imaginario de  $Z$  obtenido con el analizador de redes se indica en las Figura 4.9 y Figura 4.10 respectivamente, para la frecuencia de 104.1 MHz.



Figura 4.9. Componente Real de  $Z$ .

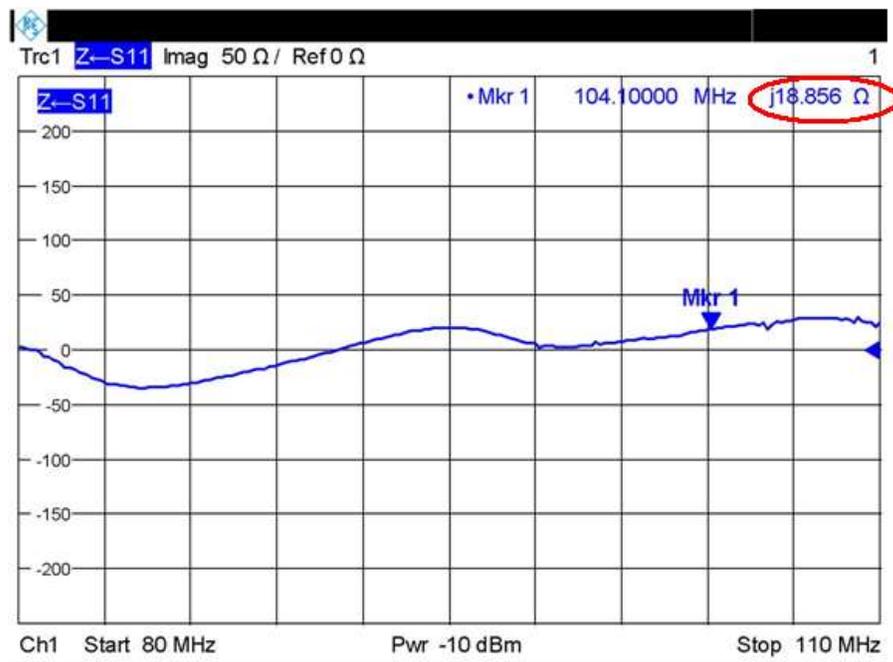


Figura 4.10. Componente Imaginario de  $Z$ .

Donde,

$$Z = 72.232 + j18.856 \quad (4.29)$$

La magnitud de la impedancia  $Z$  es calculada en la ecuación 4.27 y su resultado se indica en la ecuación 4.31.

$$Z[\Omega] = \sqrt{(72.232)^2 + (18.856)^2} \quad (4.30)$$

$$Z[\Omega] = 74.65 \quad (4.31)$$

Se esperaría la impedancia fuera de  $75 \Omega$  como valor resistivo puro, aunque el valor obtenido en la ecuación 4.29 es aproximado. El valor de la fase se obtiene a partir de la ecuación 4.28 y es indicado en la ecuación 4.32.

$$\theta[\text{grados}] = \sin^{-1}\left(\frac{18.856}{74.65}\right) = 14.63 \quad (4.32)$$

En las Figura 4.11 y Figura 4.12 se ilustran los valores de magnitud y fase obtenidos del analizador de redes.

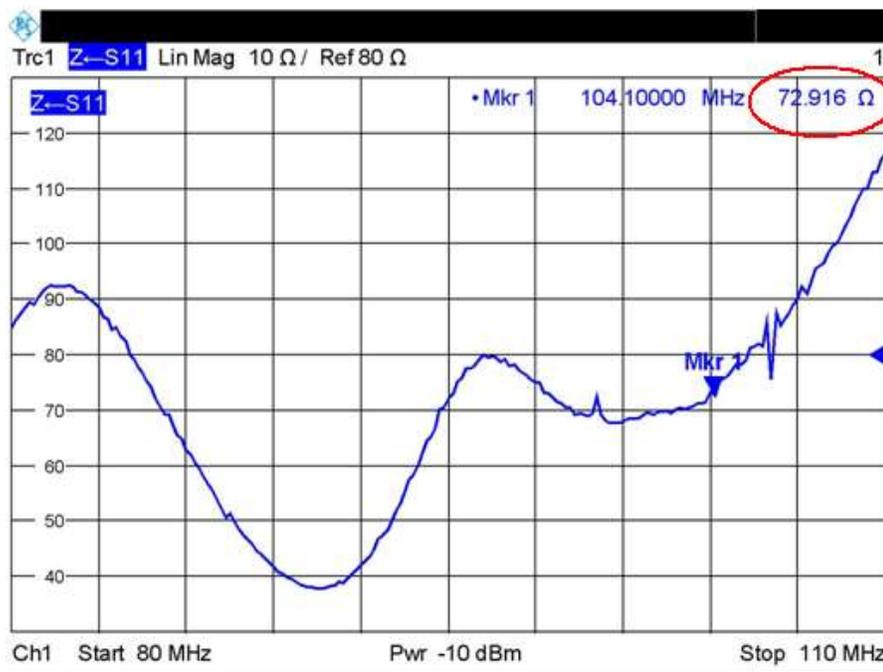


Figura 4.11. Magnitud de  $Z$ .



**Figura 4.12.** Fase de  $Z$ .

Para obtener los valores de magnitud y fase de la impedancia el analizador de redes caracteriza la antena como un circuito de dos puertos y analiza la respuesta general del sistema. En este caso el parámetro  $S_{11}$  mide la cantidad de potencia reflejada en comparación con la aplicada en el puerto 1. A este parámetro se le conoce como “coeficiente de reflexión de puerto de entrada”.

La Figura 4.11 muestra la magnitud de la impedancia para las diferentes frecuencias entre 80 MHz y 110 MHz, y la Figura 4.12 es una gráfica de la fase versus la frecuencia.

Comparando los resultados obtenidos con el analizador de redes en cuanto a magnitud y fase con los obtenidos en las ecuaciones 3.31 y 3.32, se observa que son levemente diferentes, estas diferencias se deben a que el nivel de corriente en la antena esta cambiando constantemente y por tanto el valor de la impedancia también lo hace, es decir las medidas cambian con el tiempo.

### 4.3 MEDIDAS DE CAMPO

El medidor de voltaje utilizado para determinar los niveles de señal, marca Venneta, referencia MC-87/EV, funciona en el rango de 46 MHz a 860 MHz, tiene

un margen de error inferior a 3 dB en las bandas I y III<sup>33</sup>, y presenta una impedancia de 75 Ω.

En la Tabla 4.3 se ilustran las coordenadas, distancias al transmisor y alturas sobre el nivel del mar de los sitios seleccionados para conocer su nivel de campo eléctrico a una frecuencia de 104.1 MHz, para posteriormente ser comparados con los datos obtenidos de la herramienta software.

Sitio	Localización Coordenadas planas		Distancia al Transmisor (Km)	Altura msnm
	Norte	Este		
Transmisor la Rejoya	0769797	1054329	0	1785
SENA Norte	0766003	1057798	5.1408	1845
Colegio Seminario Menor	0763815	1054382	5.9822	1765
Conjunto Cerrado Campo Real	0762489	1054517	7.3104	1747
Coliseo CDU	0762164	1053557	7.6699	1778

**Tabla 4.3.** Sitios Propuestos para Encontrar su Nivel de Campo Eléctrico.

El medidor utilizado presenta los resultados en términos de voltaje<sup>34</sup>, por lo que es necesario, a partir de este valor, encontrar el nivel de campo eléctrico haciendo uso de la ecuación 4.33, tomada del manual de usuario de dicho equipo.

$$E[dBuV / m] = V + 20\text{Log}(f) - 33.6 \quad (4.33)$$

Donde el nivel de voltaje  $V$  es dado en dBuV y la frecuencia  $f$  en megahertz.

Teniendo en cuenta los resultados de la ecuación 4.33, se determina el valor de  $E$  para cada uno de los sitios propuestos. Estos resultados se indican en la tabla 4.4.

- SENA Norte: las medidas se realizaron en una zona con presencia de arboles.

$$V[dBuV] = 53 \quad (4.34)$$

$$E[dBuV / m] = 59.75 \quad (4.35)$$

<sup>33</sup> Banda I de 46 MHz a 106 MHz, Banda II de 106 MHz a 290 MHz.

<sup>34</sup> dBuV

- Colegio Seminario Menor de Popayán: las medidas se realizaron en una zona con poca presencia de vegetación.

$$V [dBuV] = 57 \quad (4.36)$$

$$E [dBuV / m] = 63.75 \quad (4.37)$$

- Conjunto Cerrado Campo Real: esta medida se realizó en una zona abierta y libre de obstáculos cercanos al receptor:

$$V [dBuV] = 65 \quad (4.38)$$

$$E [dBuV / m] = 71.74 \quad (4.39)$$

- Coliseo Centro Deportivo Universitario: Las medidas se realizaron en la parte de atrás del coliseo.

$$V [dBuV] = 35 \quad (4.40)$$

$$E [dBuV / m] = 41.75 \quad (4.41)$$

Sitios	Nivel de campo Eléctrico en dBuV/m
Sena Norte	59.75
Colegio Seminario menor	63.75
Conjunto Cerrado Campo Real	71.74
Coliseo Centro Deportivo Unicauca	41.75

**Tabla 4.4.** Medidas de Campo Eléctrico Reales.

En general las medidas de campo eléctrico mostradas en la tabla 4.4 a excepción del conjunto cerrado campo real se encuentran por debajo de los 66  $dBuV/m$  lo cual indica que están por fuera del área de cobertura de la emisora Unicauca estéreo, pero no implica que los sitios donde el nivel de campo eléctrico no alcanza este valor la calidad de la señal no sea buena, como se comprobó en el sitio Sena Norte donde se sintonizó un radio en 104.1  $MHz$  y se logró obtener una calidad de audio aceptable.

#### 4.4 COMPARACIÓN DEL NIVEL DE CAMPO ELÉCTRICO ENTRE LAS MEDIDAS REALES Y LOS RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE.

En las Figura 4.13 a Figura 4.16 se presentan los resultados gráficos de comparar las medidas reales y las obtenidas con la herramienta software por medio de cada uno de los modelos implementados. Dichos resultados se obtuvieron de la emisora Unicauca Estéreo 104.1 MHz, donde sus características de funcionamiento son: potencia de transmisión igual a 300 vatios, ganancia de la antena 3 dBi, altura de su antena 50 m, el cable que conecta el transmisor a la antena tiene una longitud de 60 m.

##### Comparación Niveles de Campo Eléctrico (SENA Norte)

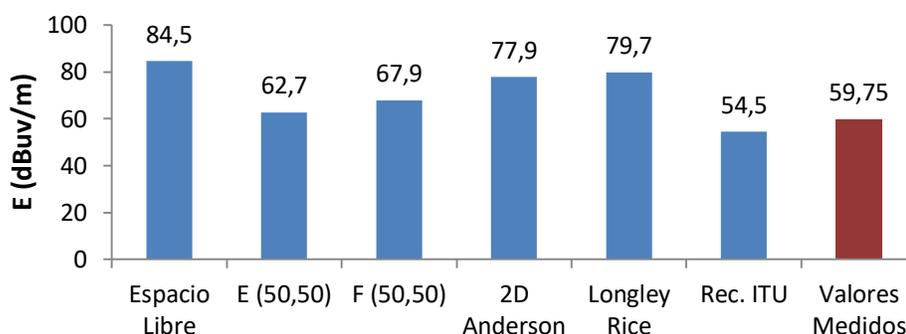


Figura 4.13. Comparación Niveles de Campo Eléctrico en Sena Norte.

##### Comparación Niveles de Campo Eléctrico (Colegio Seminario Menor)

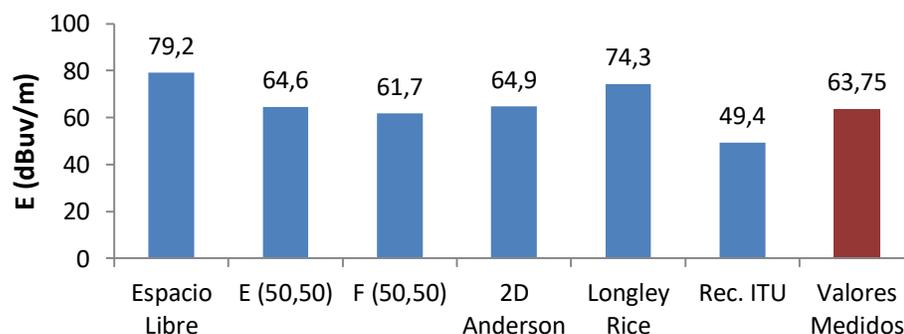


Figura 4.14. Comparación Niveles de Campo Eléctrico en el Colegio Seminario.

### Comparación Niveles de Campo Eléctrico (Conjunto Cerrado Campo Real)

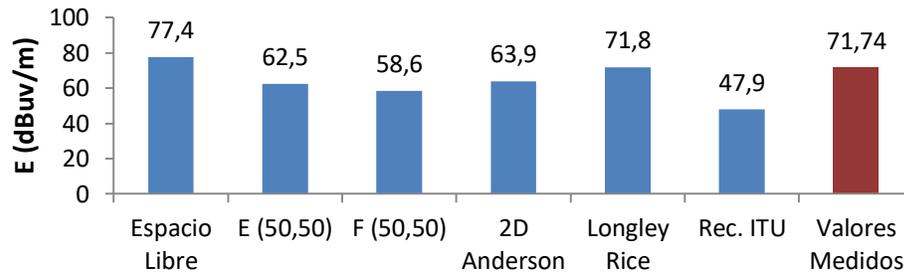


Figura 4.15. Comparación Niveles de Campo Eléctrico en Campo Real.

### Comparación Niveles de Campo Eléctrico (CDU Tulcan)

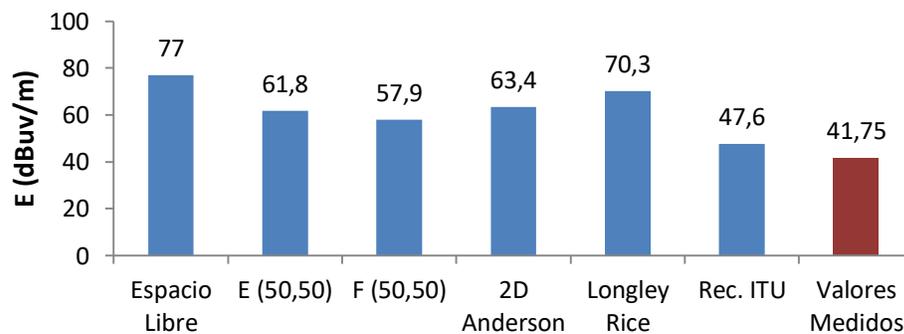


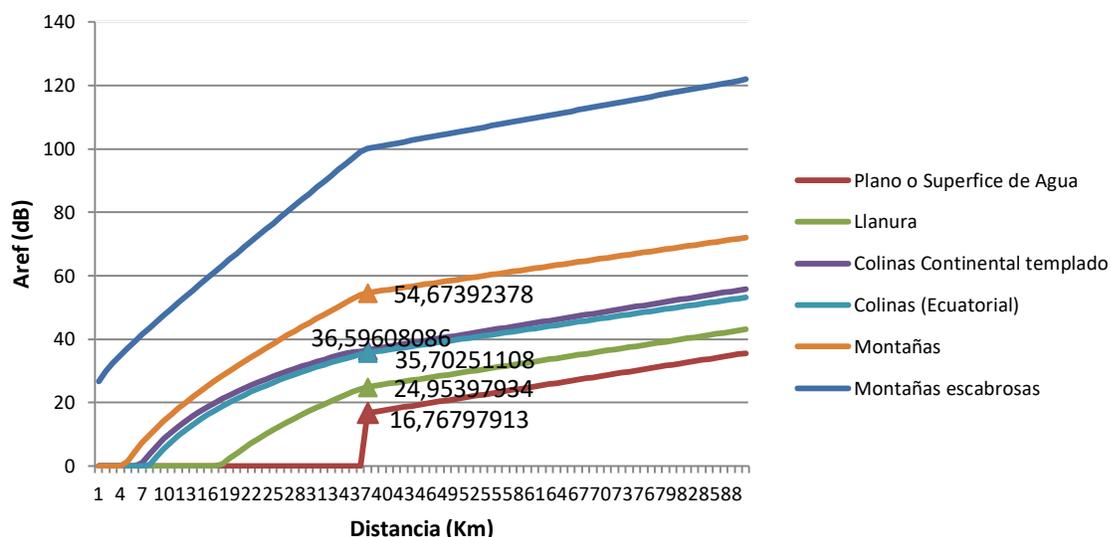
Figura 4.16. Comparación Niveles de Campo Eléctrico en el CDU

Teniendo en cuenta los resultados de las figuras 4.13 a 4.16 se observa que el modelo de predicción propuesto en la Recomendación UIT- R P.526 – 10, provee una medida menor comparada con los otros modelos y las medidas de campo eléctrico reales.

Además, el modelo de espacio libre presenta los niveles de campo eléctrico más altos, debido a que supone un modelo de tierra plana donde no existen obstáculos que atenúen la señal, generando así bajas pérdidas de propagación.

Por otro lado el valor de campo eléctrico determinado a través del modelo 2D Anderson, es generalmente mayor a las medidas reales y comparando este valor con el de los modelos propuestos, este se encuentra en general, en un nivel promedio.

Las pérdidas de propagación planteadas en el modelo Longley Rice dependen de la región en la que se encuentre el enlace (línea de vista, difracción o dispersión). En la Figura 4.17 se observa el comportamiento de las pérdidas generales obtenidas con la herramienta software con relación a la distancia y la rugosidad del terreno, que para este caso se seleccionó colinas (Ecuatorial).



**Figura 4.17.** Atenuación de Referencia en Función de la Distancia.

En la Figura 4.17 se ilustra un hecho interesante. El modelo de Longley Rice se comporta de manera similar al de espacio libre en los primeros Kilómetros, lo cual es coherente con lo presentado en la figura 2.1.

A partir de las figuras 4.13 a 4.16 se observa que los modelos E(50,50), F(50,50) y 2D Anderson presentan resultados similares y más aproximados a los obtenidos en las medidas reales, que los modelos de espacio libre, Longley Rice y la recomendación UIT- R P.526 – 10.

Es importante indicar que los resultados obtenidos en esta sección corresponden a una situación característica particular y no reflejan realmente el comportamiento general de los modelos de propagación para grandes distancias ya que, en el caso de la Emisora Unicauca Estéreo el área de cobertura es pequeña y la cantidad de muestras tomadas fueron pocas, debido a que los equipos utilizados fueron prestados por la Universidad del Cauca, estos equipos son costosos y no cuentan con un seguro en caso de presentarse un robo, por lo que se consideró pertinente llevarlos a sitios cercanos con la compañía de un funcionario de la Universidad.

## 4.5 ÁREA DE COBERTURA

Las Figura 4.18 a Figura 4.30 presentan los resultados obtenidos en la herramienta software utilizando los diferentes modelos de predicción de propagación, para el caso de la emisora Unicauca Estéreo 104.1 *MHz* para una *PRA* igual a 300 *W*, donde se indica la ubicación del perímetro urbano de la ciudad de Popayán, el transmisor y los distintos sitios mencionados en la tabla 4.2. El área de cobertura es delimitada por un nivel de campo eléctrico mayor o igual a 66 *dBuV/m* [28, 29] y la intensidad de campo eléctrico se representa por una escala de colores como se indica en el extremo derecho de cada figura<sup>35</sup>.

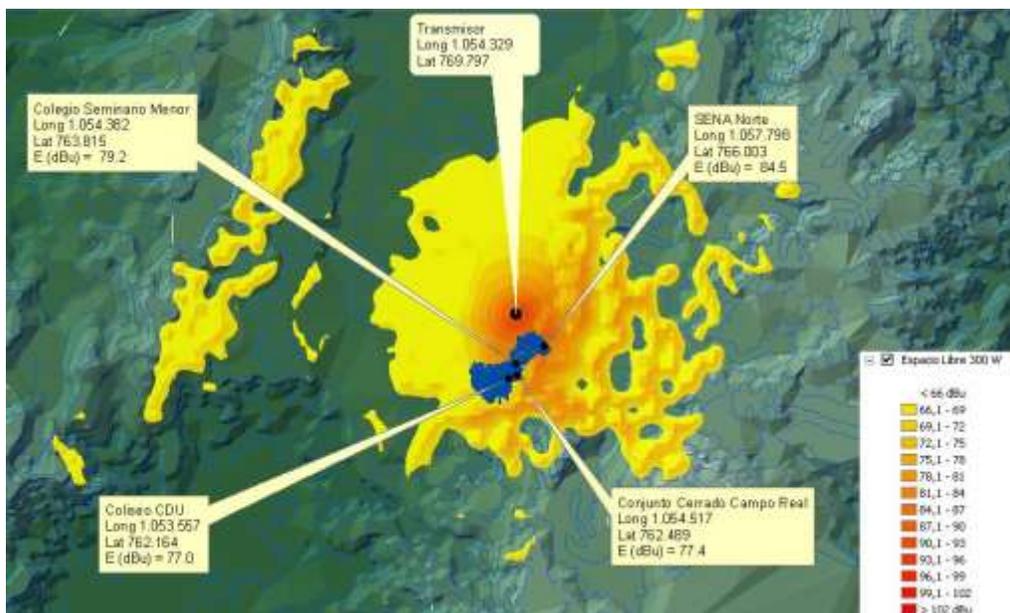
Para determinar el área de servicio de Unicauca Estéreo fue necesario incluir las pérdidas por difracción debidas a obstáculos en algunos de los modelos de predicción de propagación, para así tener en cuenta la geografía de la región en el cálculo del nivel de intensidad de campo eléctrico [20], puesto que de no hacerlo el área de cobertura obtenida tendrá forma circular lo cual no corresponde a la realidad.

Los modelos en los cuales fue necesario incluir las pérdidas por difracción propuestas en la sección 2.9 de este documento son aquellos que no tienen en cuenta la topografía del terreno, como es el caso del modelo de Espacio Libre, Longley Rice y el modelo mejorado para propagación en exteriores a frecuencias de 50 *MHz* a 1000 *MHz* basado en las curvas *F(50,50)*.

A partir del modelo de espacio libre se genera un área de cobertura que se extiende hasta regiones muy accidentadas geográficamente. En la Figura 4.18 se puede apreciar que bajo las condiciones de este modelo, los sitios seleccionados en la tabla 4.2 se encuentran dentro de la región del área de servicio de la emisora Unicauca Estéreo; además, dicha zona se extiende más hacia la dirección oeste debido que esta región presenta una topografía uniforme y la presencia del volcán Puracé en la dirección este, hace que se presente un nivel de atenuación importante debido a su altura predominante. Cabe anotar que este comportamiento se presenta en todos los modelos de predicción de propagación propuestos.

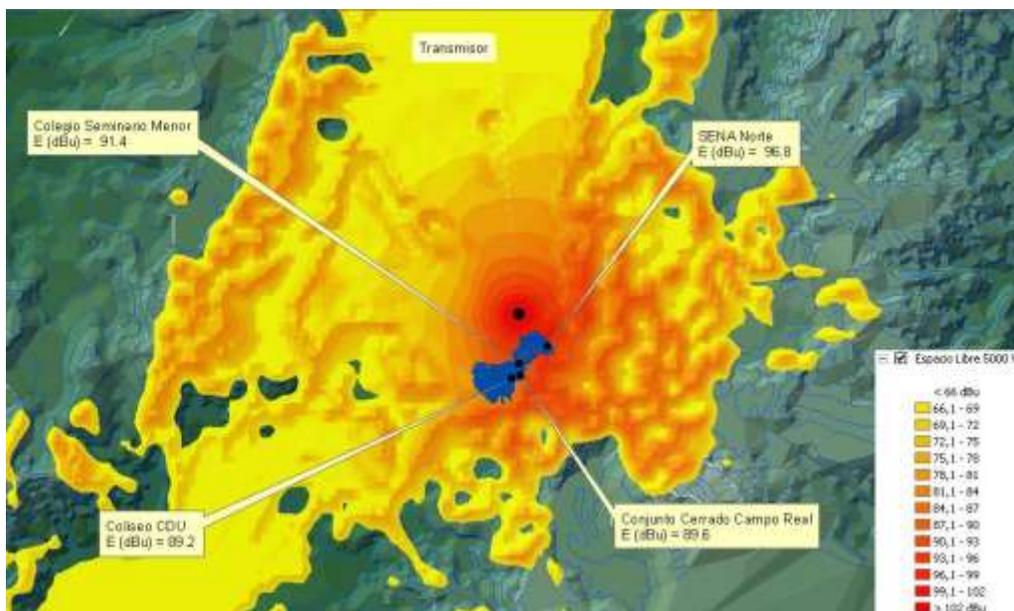
---

<sup>35</sup> Estos valores pueden ser expresados en términos de intensidad de campo eléctrico (*dBuV/m*) o de la potencia (*dBm*)



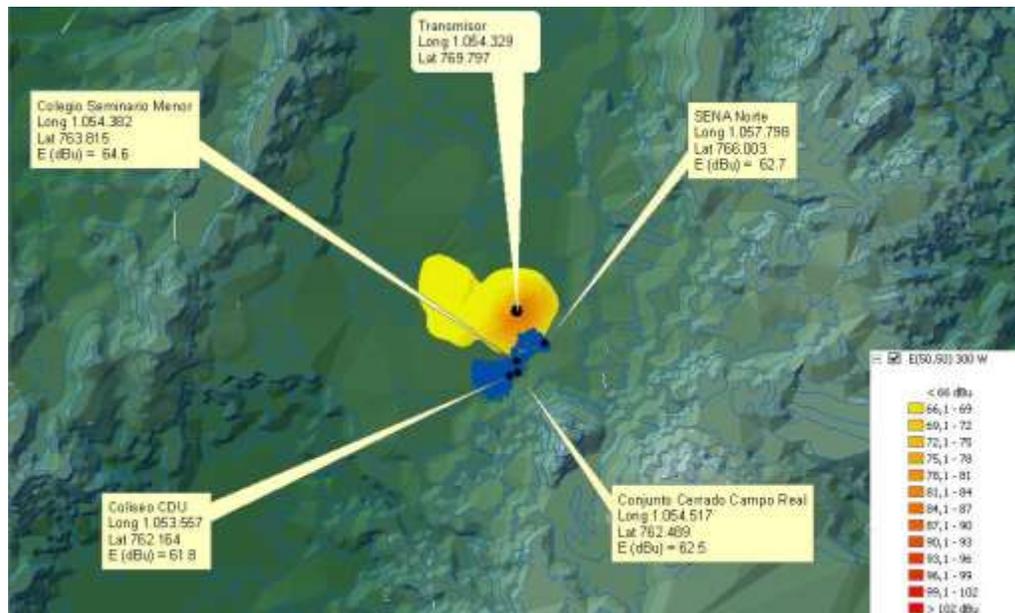
**Figura 4.18.** Área de Cobertura Obtenida con el Modelo de Espacio Libre para 300W

En la Figura 4.19 se muestran los resultados para este modelo con una potencia de 5 KW.



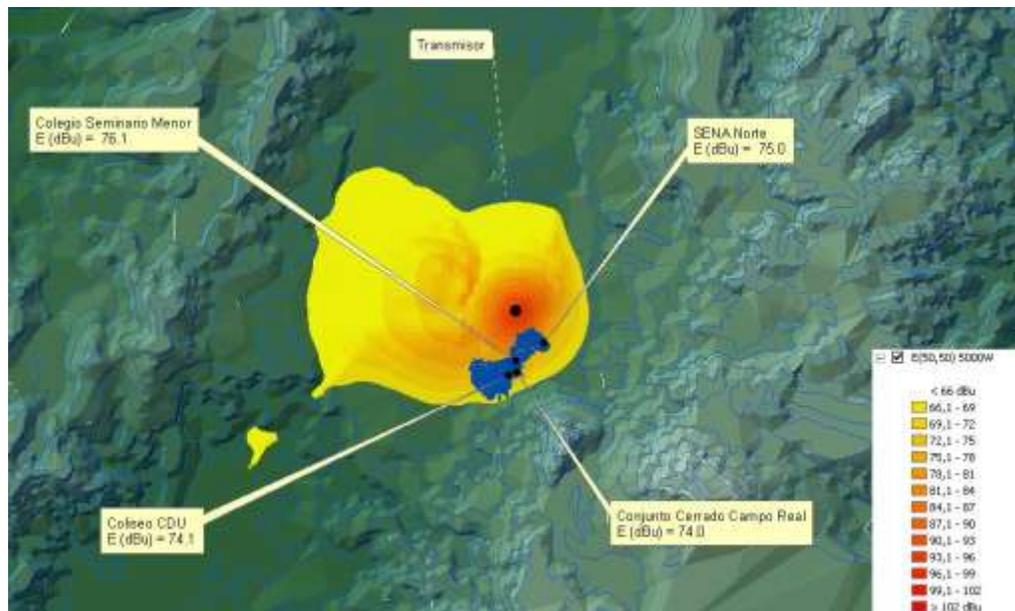
**Figura 4.19.** Área de Cobertura Obtenida con el Modelo de Espacio Libre para 5 KW.

Teniendo en cuenta los mismos parámetros que en el modelo anterior, en la Figura 4.20 se muestra el área de cobertura obtenida en la herramienta software a partir de las curvas E(5,50).



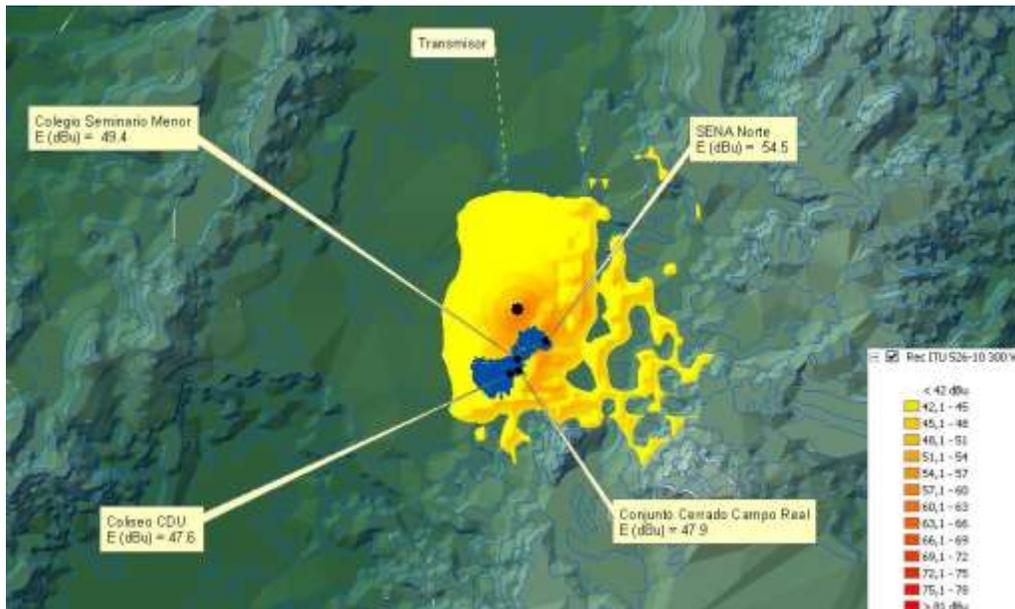
**Figura 4.20.** Área de Cobertura Obtenida con las Curvas E(50,50) para 300W.

Para el modelo E(50,50), con una potencia de transmisión 5KW se obtiene el resultado presentado en la Figura 4.21.



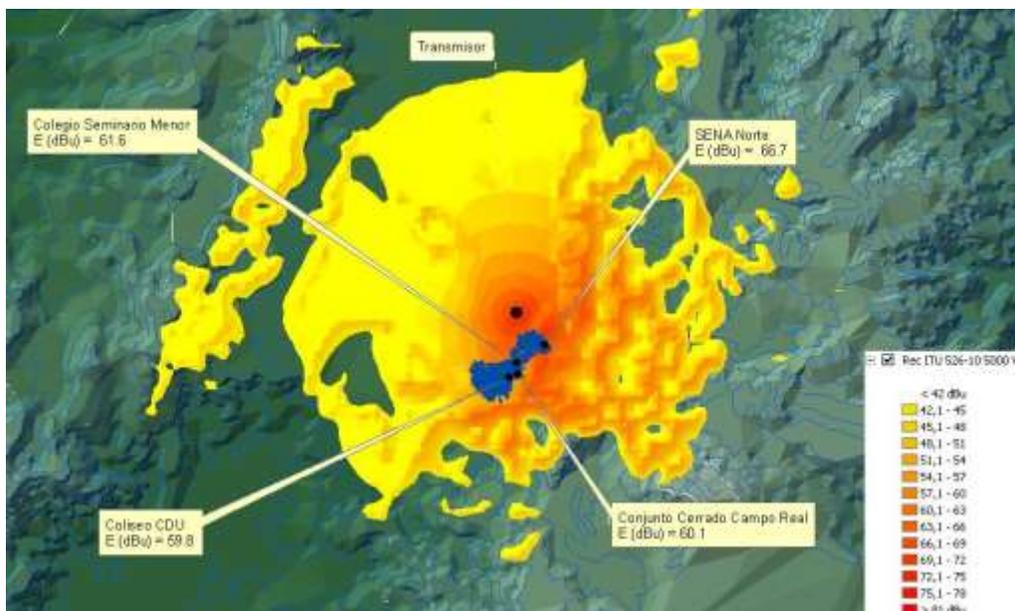
**Figura 4.21.** Área de Cobertura Obtenida con las Curvas E(50,50) para 5 KW.

La Figura 4.22 presenta el área de cobertura encontrada mediante el modelo propuesto en la recomendación Rec. ITU. 526-10, donde el nivel de campo eléctrico es inferior a los 66  $dBuV/m$  para casi todos los lugares del mapa, por lo que fue necesario graficar el área de servicio en una escala diferente, hasta un valor de campo eléctrico mayor a 42  $dBuV/m$ , con el objetivo de visualizarla.



**Figura 4.22.** Área de Cobertura con Modelo Propuesto en REC. ITU. 526-10 para 300W.

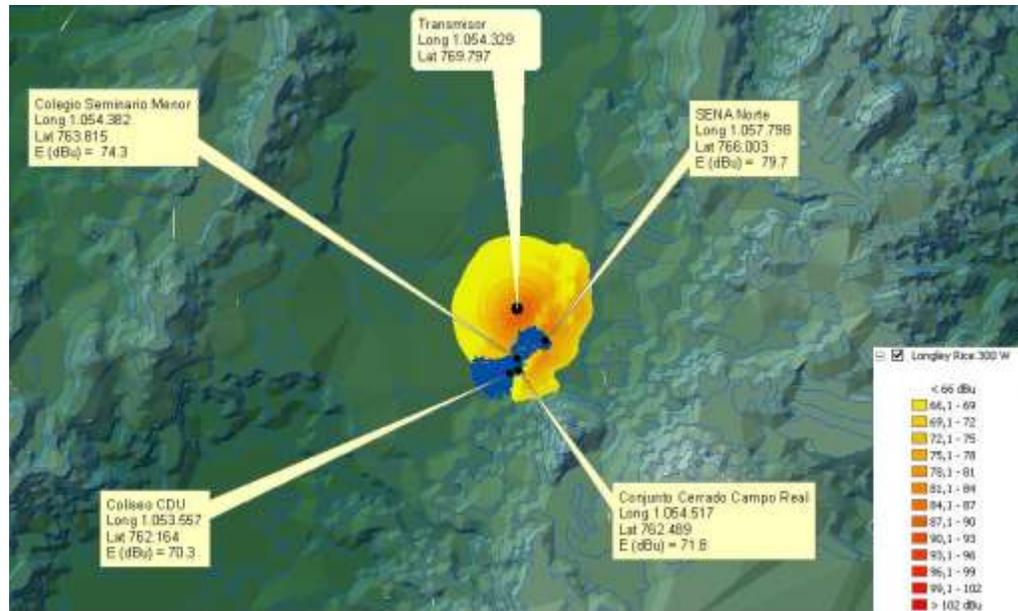
Del mismo modo, se obtuvo el área de cobertura para 5 KW de potencia y el resultado se muestra en la Figura 4.23.



**Figura 4.23.** Área de Cobertura con Modelo Propuesto en REC.ITU.526-10 para 5KW.

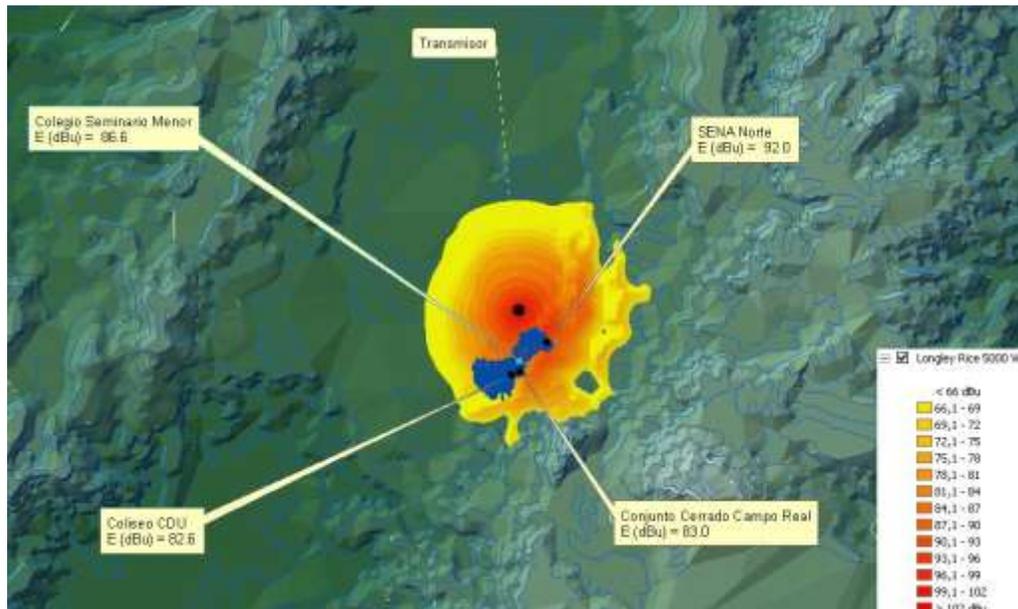
Al igual que en el área de cobertura generada con el modelo de espacio libre los modelos de Longley Rice (Figura 4.24 y Figura 4.25) y 2D Anderson (Figura 4.28 y Figura 4.29) presentan áreas de cobertura mayores comparadas con el resto de

los modelos de predicción. Su cobertura alcanza distintas regiones con variadas características geográficas incluyendo los sitios mencionados en la tabla 4.2.



**Figura 4.24.** Área de Cobertura Obtenida con el Modelo Longley Rice para 300W.

Así mismo, la Figura 4.25 presenta los resultados del modelo Longley Rice que se obtienen con 5 KW de potencia transmitida.



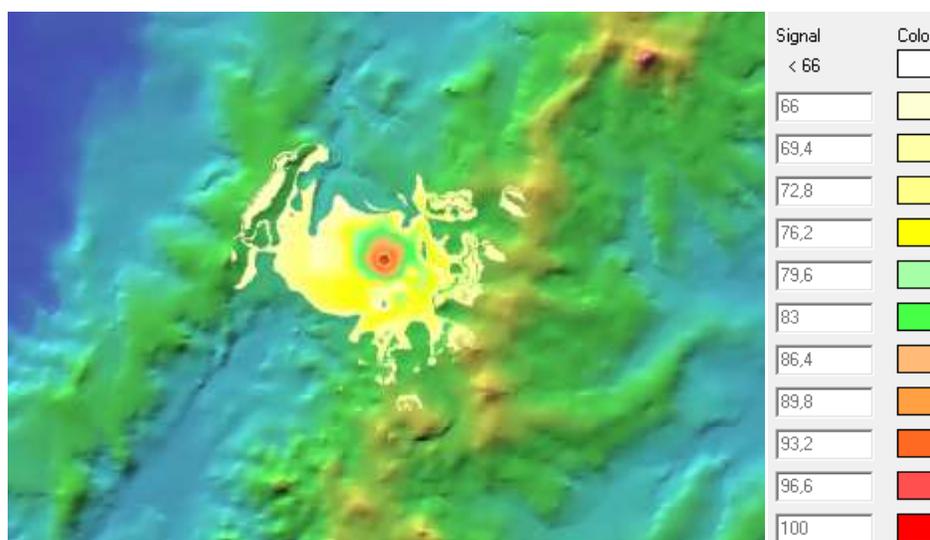
**Figura 4.25.** Área de Cobertura Obtenida con el Modelo Longley Rice para 5 KW.

Otra herramienta desarrollada con base en el Modelo de Terreno Irregular de Longley Rice es Radiomobile<sup>36</sup>, utilizada para determinar la zona de servicio o el nivel de intensidad de campo eléctrico en una ubicación específica en sistemas con una frecuencia de operación entre los 20 MHz y los 20 GHz.

En la Figura 4.26 se observa el área de cobertura de la emisora Unicauca Estéreo en el departamento del Cauca, realizada con Radiomobile, teniendo en cuenta los mismos parámetros utilizados en el modelo Longley Rice de la Herramienta desarrollada. Estos parámetros son: frecuencia de funcionamiento del sistema entre los 88 y 108 MHz, refractividad de la superficie  $N_s$ , en función del clima igual a 360, conductividad de la tierra igual a 0.005 S/m, permitividad relativa de la tierra 15 pF/m, polarización vertical, clima continental templado, pérdidas adicionales por zona urbana 5%, potencia del transmisor 300 W, altura de la torre 50 m, ganancia de la antena transmisora 3 dBi, pérdidas por cable 0.5 dB.

Comparando los resultados obtenidos en las Figura 4.24 y Figura 4.26 se observa que, en ambos casos, los distintos sitios propuestos en la tabla 4.2 se encuentran dentro del área de servicio de la emisora Unicauca Estéreo 104.1 MHz.

Al determinar el nivel de campo eléctrico con las dos herramientas en mención, existe una diferencia la cual puede presentarse por las múltiples formas en que se analizan los datos del terreno y cómo se determinan las pérdidas por difracción. Un aspecto a tener en cuenta es que la herramienta desarrollada en este proyecto modela todos los obstáculos como filo de cuchillo.



**Figura 4.26.** Área de Cobertura para Unicauca Estéreo con Radiomobile para 300W.

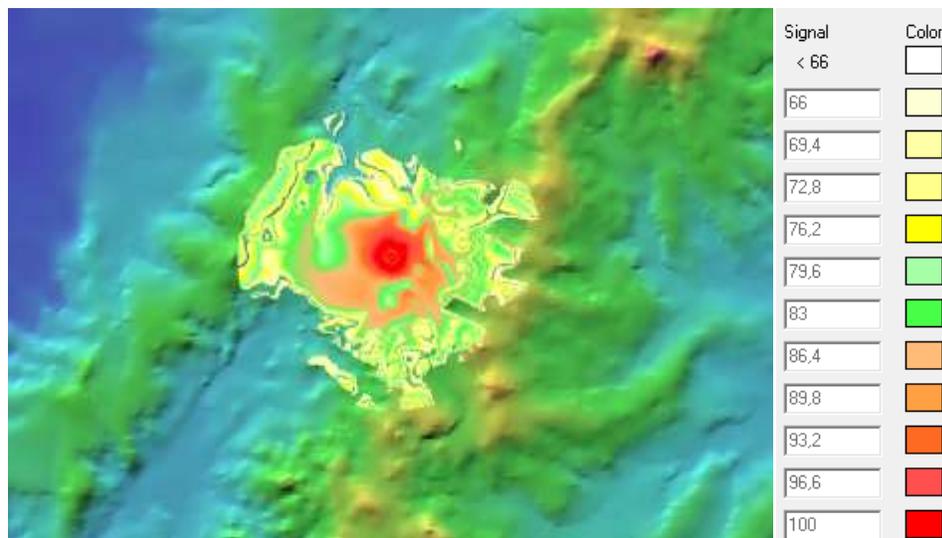
<sup>36</sup> Software libre, diseñado por Roger Coudé VE2DBE.  
Disponible en <http://www.cplus.org/rmw/download/download.php?S=1>

En la tabla 4.5 se indican los niveles de campo obtenidos con la herramienta software desarrollada en el presente proyecto de grado y Radiomobile.

Sitios	$E(\text{dbuV/m})$ medido	$E(\text{dbuV/m})$ con SW proyecto	$E(\text{dBuV/m})$ con Radiomobile
<b>Sena Norte</b>	59.75	79.7	89.3
<b>Colegio Menor</b>	63.75	74.3	88
<b>Conjunto Cerrado</b>	71.74	71.8	82.9
<b>CDU</b>	41.75	70.3	72.1

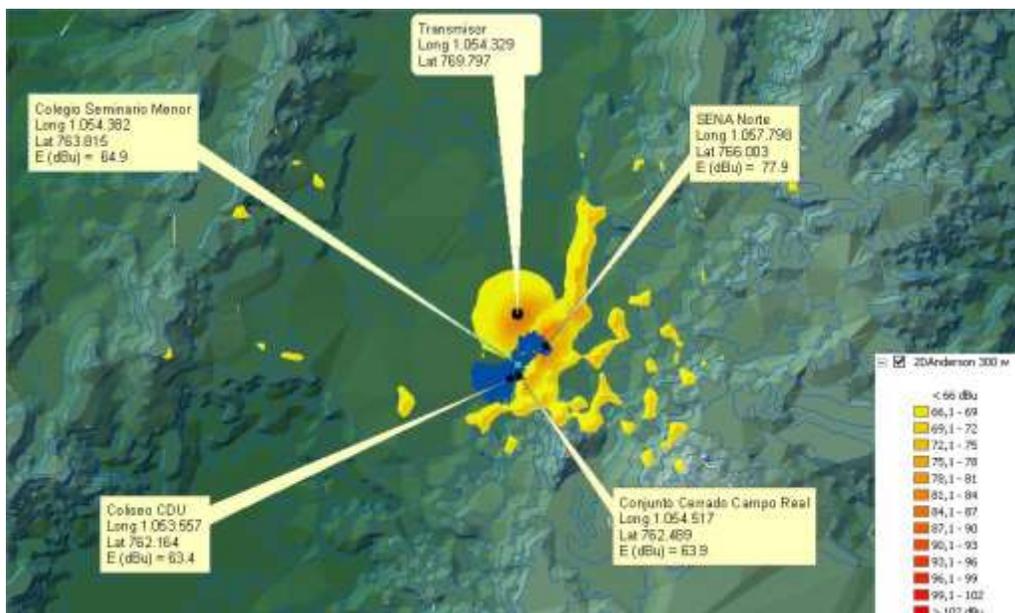
**Tabla 4.5.** Niveles de Campo Eléctrico con la Herramienta Software y Radiomobile.

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con la herramienta desarrollada y RadioMobile, en la Figura 4.27 se indica la gráfica generada para 5KW con esta última.



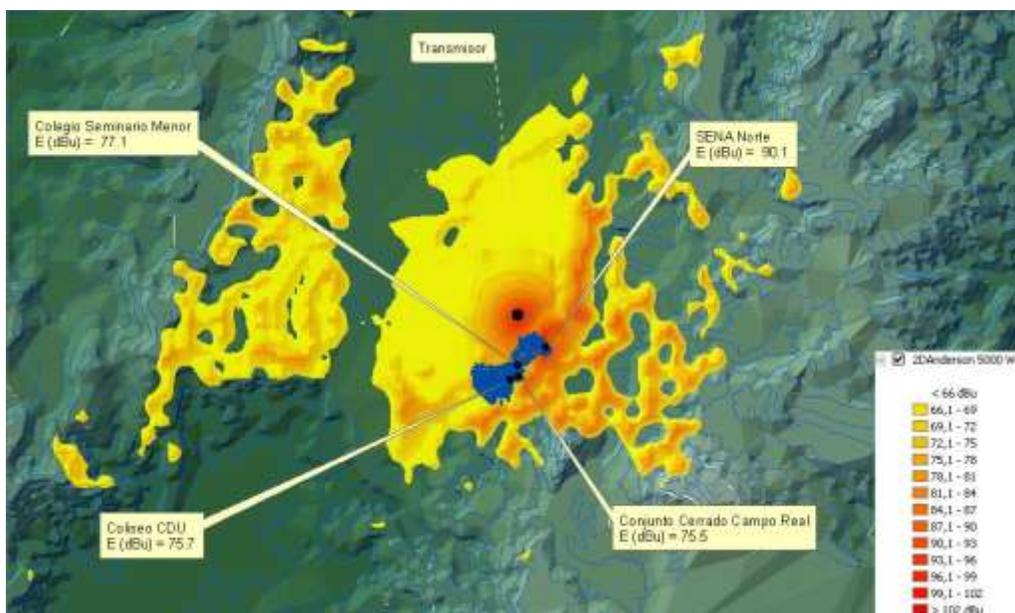
**Figura 4.27.** Área de Cobertura para Unicauca Estéreo con Radiomobile para 5KW.

En la Figura 4.28 se observa el área de cobertura obtenida a partir del modelo de predicción de propagación 2D Anderson para una potencia de 300W, donde se observan pequeñas zonas donde existe cobertura debido a la altura a la que se encuentran.



**Figura 4.28.** Área de Cobertura Obtenida con el modelo 2D Anderson para 300W.

Utilizando una potencia de 5 KW se muestra en la Figura 4.29 el area de cobertura para el modelo 2D Anderson.

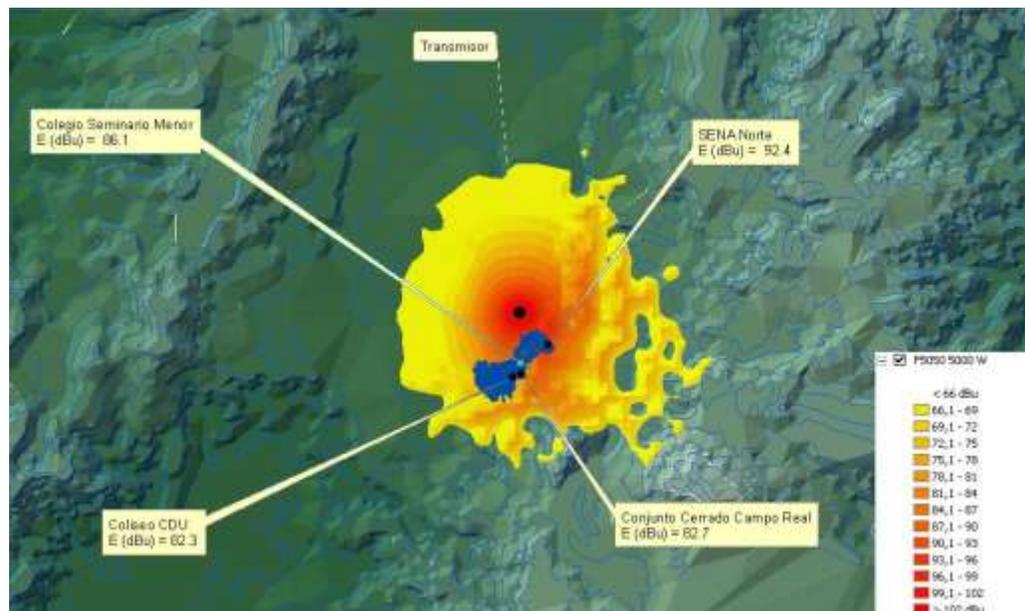


**Figura 4.29.** Area de Cobertura Obtenida con el Modelo 2D Anderson para 5KW.

Finalmente, el modelo F(50,50) presenta un área de cobertura como la que se indica en la Figura 4.30 para una potencia de 300 W. Se puede apreciar en ésta, que la zona de cobertura es menor a la presentada por la mayoría de los modelos. En la Figura 4.31 se muestra el resultado de graficar el area de servicio con el modelo F(50,50) a una potencia de 5 KW.



**Figura 4.30.** Área de Cobertura Obtenida con las Curvas F(50,50) para 300W.



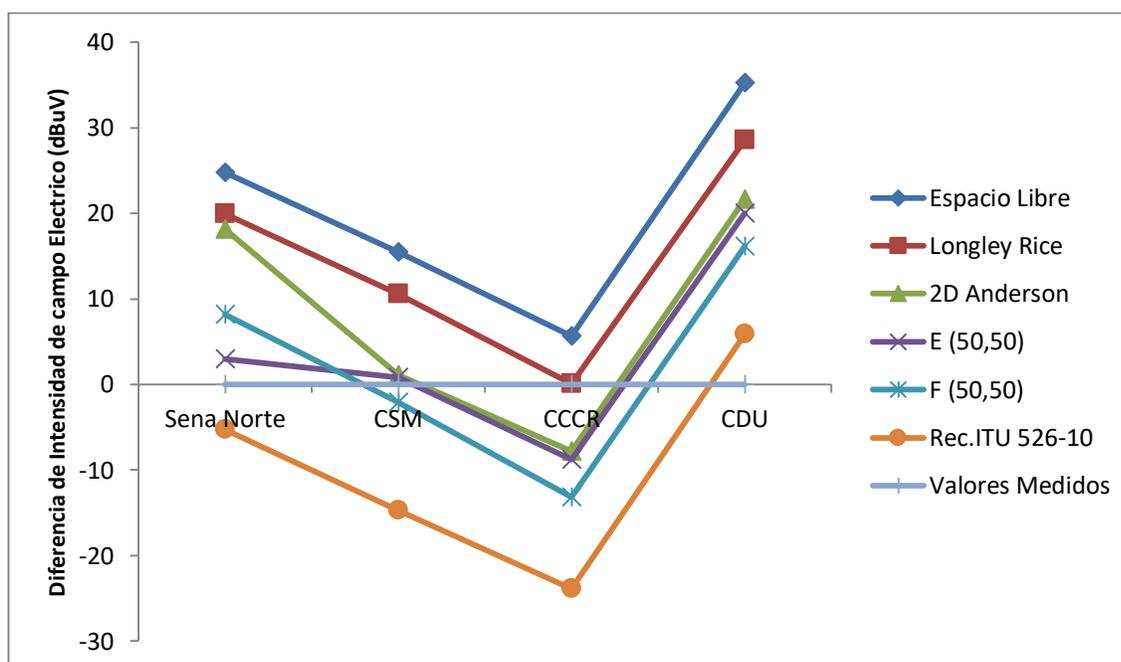
**Figura 4.31.** Área de Cobertura con F(50,50) para una Potencia de 5KW.

De manera general se observa que el área de cobertura aumenta conforme se incrementa la potencia de transmisión.

Finalmente, las diferencias obtenidas entre los valores de intensidad de campo eléctrico obtenidos con los diferentes modelos de la herramienta desarrollada y los niveles medidos se presentan en la tabla 4.6 y su gráfica en la Figura 4.32.

	Espacio Libre	Longley Rice	2D Anderson	E (50,50)	F (50,50)	Rec.ITU 526-10
<b>Sena Norte</b>	24.75	19.95	18.15	2.95	8.15	-5.25
<b>CSM<sup>37</sup></b>	15.45	10.55	1.15	0.85	-2.05	-14.75
<b>CCCR<sup>38</sup></b>	5.66	0.06	-7.84	-8.74	-13.14	-23.84
<b>CDU<sup>39</sup></b>	35.25	28.55	21.65	20.05	16.15	5.85
<b>Promedio absolutos</b>	20.28	14.78	12.19	<b>8.14</b>	<b>9.87</b>	12.42

**Tabla 4.6.** Diferencias Entre los Niveles de Campo Medidos y Calculados.



**Figura 4.32.** Diferencias entre los Niveles de Campo Medidos y Calculados.

En la última fila de la tabla 4.6 se calcula el promedio de la proximidad<sup>40</sup> entre los valores medidos y los valores calculados por la herramienta para cada modelo en todos los puntos analizados. En ésta, se puede observar claramente que los modelos E(50,50), F(50,50) y 2D Anderson presentan los valores más cercanos a los niveles de intensidad de campo eléctrico medidos.

<sup>37</sup> Colegio Seminario Menor

<sup>38</sup> Conjunto residencial Campo Real

<sup>39</sup> Centro Deportivo Universitario

<sup>40</sup> Para este cálculo se utilizan los valores absolutos

## 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSIONES

- Los SIG permiten consultar información georreferenciada, muy útil a la hora de implementar los modelos de predicción de propagación, ya que en estos se requieren parámetros como la altura de un punto y la distancia entre transmisor y receptor, necesarios para el cálculo de atenuaciones y niveles de campo eléctrico.
- La herramienta software implementada permite predecir la cobertura de una estación de radiodifusión sonora en FM de manera automática evitando así el uso de nomogramas y/o cálculos manuales, facilitando el proceso de gestión ante el Ministerio de Comunicaciones para la concesión o renovación de la licencia de funcionamiento.
- El área de cobertura es delimitada por un valor de campo eléctrico mayor o igual a 66 dBuV/m como lo estipula el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para la Republica de Colombia<sup>41</sup>. Esto no implica que para un nivel de campo eléctrico menor, la calidad de la señal necesariamente no sea buena, como se constato en el sitio SENA Norte donde se sintonizó un radio a 104.1 MHz y la calidad de la señal de audio era aceptable.
- Una limitante del software lo constituye el hecho de que no permite utilizar una antena directiva y tener en cuenta el patrón de radiación de la misma, lo cual sólo permite realizar cálculos del área de cobertura para una antena isotrópica.
- Para determinar el área de cobertura fue necesario incluir en algunos de los modelos propuestos las pérdidas por difracción debidas a obstáculos. De no hacerlo el área de cobertura se obtiene de forma simétrica en todas las direcciones, lo cual no corresponde con la realidad.
- Una conclusión obtenida a partir del comportamiento de un modelo de predicción de propagación sobre una región específica, es válida para dicha

---

<sup>41</sup>[http:// www.mintic.gov.co](http://www.mintic.gov.co)

región. Es decir esta conclusión puede cambiar si la región y los parámetros del radioenlace también cambian.

- Analizando y comparando las medidas de campo con los resultados obtenidos de la herramienta informática, se concluye que E(50,50) es el modelo más acertado y apropiado para determinar el área de cobertura en la región especificada y para el caso de la emisora Unicauca estéreo 104.1 MHz. Aunque el modelo 2D Anderson se aproxima bastante a este, excepto en un punto.
- Aunque la recomendación de la UIT que propone el uso del modelo E(50,50) para el cálculo de la zona primaria de servicio de una Estación Radial en FM no se encuentra en vigencia, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para la Republica de Colombia lo mantiene habilitado para estos fines.
- Comparando los resultados obtenidos en la herramienta informática, se aprecia que estos presentan un comportamiento acorde al desarrollo matemático descrito en los distintos modelos de predicción de propagación implementados, con lo que se puede asegurar un algoritmo de desarrollo coherente.
- Los resultados obtenidos corresponden a una situación característica particular y no reflejan el comportamiento general de los modelos de predicción propagación para grandes distancias ya que, en el caso de la Emisora Unicauca Estéreo el área de cobertura es pequeña y la cantidad de muestras tomadas fueron pocas.
- Al aumentar el nivel de potencia en el transmisor de la Emisora Unicauca Estéreo y generar las gráficas, en la predicción se muestran las regiones que deberían estar cubiertas por la estación y que actualmente no tienen cobertura de la estación radial, debido a que el transmisor utilizado es de reserva y de menor potencia.

## 5.2 TRABAJOS FUTUROS

- Para implementar la herramienta software se utilizaron los paquetes de ArcGIS Desktop para desarrollar SIG, el cual es un software propietario de alto costo en el mercado. Por tanto sería útil diseñar e implementar la aplicación basándose en una herramienta de distribución libre.

- Para facilitar el acceso a los mapas digitales de elevación, que en algunos casos son licenciados y difíciles de conseguir, la herramienta debería permitir cargar otros formatos de mapas, como los soportados por Google Maps y RadioMobile.
- Adicionalmente para calcular el área de cobertura se podría implementar en la herramienta software parámetros como: directividad de la antena transmisora, sensibilidad del receptor, margen de desvanecimiento, el punto más alto en determinada zona como punto tentativo para ubicar un transmisor, perfil del terreno, definición de la primera zona de Fresnel y en general parámetros necesarios que intervienen en un Sistema de Radiodifusión Sonora en FM.
- En una segunda versión de la herramienta, sería útil desarrollar en ésta la opción de mostrar automáticamente los resultados para evitar hacer uso de otra herramienta cuando se intentan graficar y así mejorar la usabilidad de la herramienta.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Geotecnologías S.A., “Generalidades de los SIG”, Geotecnologías S.A., 2010. [En línea]. Disponible: <http://www.geotecnologias.com/Documentos/GIS.pdf>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [2] A. Garrido, “SIG y Medio Ambiente, Principios Básicos”, Un intento de Definición. [En línea]. Disponible: <http://www.escuelanaval.edu.co/docfof/SIG.pdf>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [3] ITC-Faculty, “Aplicación de Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos para el Análisis de Amenazas y Riesgos”, ITC. [En línea]. Disponible: <http://www.itc.nl/external/unescorapca/start.html>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [4] Universidad de Cádiz, “Historia de los SIG, Cartografía y SIG en España”, Universidad de Cádiz, [en línea]. Disponible: <http://www2.uca.es/dept/filosofia/TEMA%202.pdf>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [5] Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, “ Los Sistemas de Información Geográfica SIG”, Instituto Humboldt. [En línea]. Disponible: <http://www.humboldt.org.co/humboldt/mostrarpagina.php?codpage=70001>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [6] Monografías, “Sistemas de Información Geográficos”, SIG. [En línea]. Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos/gis/gis.shtml>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [7] Q. S. Mancebo, “Aprendiendo a Manejar los SIG en la Gestión Ambiental”, Archivo Digital UPM, 2008. [En línea]. Disponible: [http://oa.upm.es/1244/1/Mancebo\\_Quintana\\_SIG\\_2008a.pdf](http://oa.upm.es/1244/1/Mancebo_Quintana_SIG_2008a.pdf). [Consultado: Julio 12, 2010].
- [8] K. Bart, “Spatial and Spatio-Temporal Data Models for GIS”, Limburgs Universitair Centrum. [En línea]. Disponible: <http://alpha.uhasselt.be/~lucp1265/pubs.html#spatial>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [9] GeoInfo, “Sistemas de Información Geográficos”, GeoInfo, 1998. [En línea]. Disponible en: <http://www.geoinfo.cl/pdf/sig.pdf>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [10] Instituto de Investigación en Sistemas Ambientales, “Productos y descripción”, ESRI, [En línea]. Disponible: [www.esri.com](http://www.esri.com). [Consultado: Julio 12, 2010].
- [11] Sistemas de Información Geográfica de España, “Productos Software ESRI”, ESRI, [En línea]. Disponible: [www.esri.es](http://www.esri.es). [Consultado: Julio 12, 2010].
- [12] GeoTecnologías S.A., “Características de ArcGIS”, GeoTecnologías S.A. [En línea]. Disponible: <http://www.geotecnologias.com/Documentos/what-is-arcgisspanish>. 2010. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [13] G. L. Gerardo, “Tópicos Avanzados de Comunicaciones”, Universidad de las Américas Puebla 2006. [En línea]. Disponible: [http://hosting.udlap.mx/profesores/luisg.guerrero/Cursos/IE454/ApuntesIE454/ie454\\_home.htm](http://hosting.udlap.mx/profesores/luisg.guerrero/Cursos/IE454/ApuntesIE454/ie454_home.htm). [Consultado: Julio 12, 2010].

- [14] J. C. García, O. A. Rodríguez, J. L. Castillo, "Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la Zona de Caldas", Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. [En línea]. Disponible: <http://www.docentes.unal.edu.co/jcgarciaa/docs/Papers/IDO16.pdf>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [15] J. Teodoro, "Modelos de Propagación", UDLAP. [En línea]. Disponible: [http://catrina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/trevino\\_c\\_jt/capitulo\\_5.html](http://catrina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/capitulo_5.html). [Consultado: Julio 12, 2010].
- [16] UIT-R, "Calculo de la atenuación en el Espacio Libre Rec. UIT-R PN 525-2". Universidad de Vigo. [En línea]. Disponible: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [17] J. Alpuente, "Propagacion en el Espacio Libre", Propagacion en el espacio libre. [En línea]. Disponible: <http://www.scribd.com/doc/13724582/Propagacion-en-el-espacio-libre-cap9>. [Consultado: Julio 19, 2010]
- [18] J. M. Hernando, Comunicaciones Móviles. Madrid España: Centro de Estudios Ramón Areces, 1997, pp. 32-36, 137-147.
- [19] G. Hufford, "The ITS Irregular Terrain Model, Version 1.2.2. The Algorithm", TA Services Support Contacts. [En línea]. Disponible: [http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm/itm\\_alg.pdf](http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm/itm_alg.pdf). [Consultado: Julio 12, 2010].
- [20] Softwright , "Notes on Longley-Rice Propagation", Longley Rice Propagation. [En línea]. Disponible: [http://www.softwright.com/faq/engineering/prop\\_longley\\_rice.html](http://www.softwright.com/faq/engineering/prop_longley_rice.html). [Consultado: Julio 12, 2010].
- [21] TIA TR8 Working Group 8.8 y Technology Compatibility, "A Report on Technology Independent Methodology for the Modeling, Simulation and Empirical Verification of Wireless Communications System Performance in Noise and Interference Limited Systems Operating on Frequencies Between 30 and 1500 MHz", Advanced Network Technologies, 20 de Mayo de 1997. [En línea]. Disponible: [http://www.antd.nist.gov/wctg/manet/docs/TIAWG88\\_20.pdf](http://www.antd.nist.gov/wctg/manet/docs/TIAWG88_20.pdf). [Consultado: Mayo 22, 2010].
- [22] UIT-R, "Propagación por Difracción Rec. UIT-R P.526-10", Universidad de Vigo. [En línea]. Disponible: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.526-10-200702!!!PDF-.pdf>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [23] C. Pérez Vega, J. M. Zamanillo, A. Silvia, "Versión Mejorada de un Modelo de Propagación para Exteriores a Frecuencias de 50 MHz a 1 GHz", CSIC. [En línea]. Disponible: [http://w3.iec.csic.es/URSI/articulos\\_modernos/articulos\\_gandia\\_2005/articulos/RP3/129.pdf](http://w3.iec.csic.es/URSI/articulos_modernos/articulos_gandia_2005/articulos/RP3/129.pdf). [Consultado: Julio 12, 2010].
- [24] Code of Federal Regulations, "Radio Broadcast Services", Path-Loss Model for UHF [En línea]. Disponible: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1504019>. [Consultado: Julio 12, 2010].
- [25] UIT-R, "Curvas de Propagación en Ondas Métricas y Decimétricas para la Gama de Frecuencias Comprendidas entre 30 y 1 000 MHz, Recomendación p.370-7",

Universidad de Vigo, [En línea]. Disponible: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/>. [Consultado: Julio 12, 2010].

- [26] H. A. Romo Romero, Fundamentos de Radiopropagación para Onda Terrestre y Línea de Vista. Popayán Colombia: Universidad del Cauca, pp. 37.
- [27] J. D. Krauss, Antennas, 2ª Edición. Nueva York: McGraw Hill, 1997, pp. 28.
- [28] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada”. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2009. [En línea]. Disponible: <http://www.mintic.gov.co/mincom/documents/portal/documents/root/Radiodifusion%20Sonora/Archivos%20PDF/PlanTecnicoFM.pdf>. [Consultado: Agosto 30, 2010].
- [29] UIT-R, “Normas para la Planificación de la Radiodifusión Sonora con Modulación de Frecuencia en Ondas Métricas, Recomendación BS.412-9”, Universidad de Vigo, [En línea]. Documento disponible en: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/>. [Consultado: Julio 12, 2010].