

ANÁLISIS DE LAS ÁREAS DE SERVICIO Y DE INTERFERENCIA DE
SISTEMAS DE COMUNICACIÓN EN FRECUENCIAS DE 30 MHZ A
466 MHZ EN COLOMBIA



Trabajo de Grado en modalidad investigación

Juan José Tobar Muñoz
Tania Andrea Burbano Bastidas

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas – GRIAL
Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos
Popayán, Cauca, 2022

ANÁLISIS DE LAS ÁREAS DE SERVICIO Y DE INTERFERENCIA DE
SISTEMAS DE COMUNICACIÓN EN FRECUENCIAS DE 30 MHz A
466 MHz EN COLOMBIA

Juan José Tobar Muñoz
Tania Andrea Burbano Bastidas

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad
del Cauca como requisito para obtener el título de:
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas – GRIAL
Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos
Popayán, Cauca, 2022

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XII
INTRODUCCIÓN	1
1 MARCO TEÓRICO	3
1.1 INFORMACIÓN GENERAL DE LA HERRAMIENTA	3
1.1.1 Sistemas de Información Geográfica	3
1.1.1.1 Datos GIS.....	3
1.1.1.2 Datos ráster	4
1.1.1.3 Uso de datos ráster	5
1.1.1.4 Mapa base.....	5
1.1.1.5 Mapas de superficie	6
1.1.1.6 Mapas temáticos	7
1.1.2 QGIS	8
1.2 CONCEPTOS DE RADIOPROPAGACIÓN	9
1.2.1 Influencia del Terreno en la Propagación.	9
1.2.2 Horizonte Radioeléctrico	11
1.2.3 Efectos de la Refracción Troposférica en la Propagación.....	13
1.2.3.1 Factor de curvatura terrestre	13
1.2.4 Protuberancia de la Tierra	15

1.3	MODELOS DE PÉRDIDAS POR PROPAGACIÓN	16
1.3.1	Modelo de Pérdidas por Propagación en Espacio Libre	17
1.3.2	Modelo de Pérdidas por Propagación de Dos Rayos	18
1.3.3	Modelo de Tierra Curva	23
1.3.4	Modelo de Pérdidas por Propagación de Pendiente Única	26
1.3.5	Modelo de Pérdidas por Propagación Lineal por Segmentos (Múltiples Pendientes)	27
1.3.6	Modelo de Pérdidas por Propagación de Egli.	28
1.3.7	Modelo de Pérdidas por Propagación de Okumura-Hata.	29
1.3.8	Modelo de Pérdidas por Propagación de Longley-Rice.	32
1.4	MODELOS DE PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN.....	33
1.4.1	Zonas de Fresnel.	33
1.4.2	Difracción en Obstáculos.....	35
1.4.2.1	Obstáculo aislado	35
1.4.2.2	Obstáculo agudo	35
1.4.2.3	Dos obstáculos aislados	37
1.4.3	Cálculo de las Pérdidas por Difracción	38
1.4.3.1	Método EMP.....	38
1.4.3.2	Método de Epstein-Peterson.	39
1.4.3.3	Método recomendación ITU-R P.256.....	40
1.4.3.4	Método de Bullington.....	41
1.4.3.5	Método de Deygout	42
1.5	MÉTODOS PARA LA COORDINACIÓN DE USO DE FRECUENCIAS Y LA DEFINICIÓN DE ÁREAS DE SERVICIO Y CONTORNOS INTERFERENTES	43
1.6	RECOMENDACIONES DE MÍNIMA SEPARACIÓN EN DISTANCIA Y FRECUENCIA.....	46
1.6.1	Método de la Recomendación ITU-R SM.337-6	49
1.7	INTERFERENCIA	50
1.7.1	Interferencia Cocanal	52
1.7.2	Interferencia de Canal Adyacente	53
1.7.2.1	Desensibilización o bloqueo	53
1.7.3	Interferencia Admisible	54
1.7.4	Interferencia Aceptada	54
1.7.5	Interferencia Perjudicial	54
1.7.6	Zona de Servicio	54

1.7.7	Contorno de interferencia	54
1.7.8	Zona de Coordinación	55
1.7.8.1	Zona de coordinación para estaciones del servicio radio móvil terrestre	55
2	ADAPTACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE PREDICCIÓN DE COBERTURA	57
2.1	METODOLOGIA DE DESARROLLO	57
2.2	ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS.....	59
2.3	DISEÑO DE LA HERRAMIENTA	61
2.3.1	Descripción General de la Herramienta.....	61
2.3.2	Modificación en el Diseño de la Herramienta.....	64
2.4	IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA	66
2.4.1	Escenario de Implementación	66
2.4.2	Descripción del Funcionamiento de la Herramienta.....	67
2.4.3	Proceso de Generación de Zonas de Cobertura.....	68
2.4.4	Características y Parámetros Técnicos a Considerar.	68
2.4.4.1	Bandas de frecuencia de operación.	68
2.4.4.2	Potencia.	69
2.4.4.3	Ganancia de antena.	69
2.4.4.4	Sensibilidad.	70
2.4.4.5	Software	71
2.4.4.6	Interfaz	72
2.4.4.7	Escenario	74
2.5	PRUEBAS DE VALIDACIÓN.....	80
3	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	85
1.1	PLAN DE PRUEBAS.....	85
3.1	ESTACIÓN BASE O REPETIDORA EN ZONA DE VALLE	90
3.2	ESTACIÓN BASE O REPETIDORA CERCA DE OBSTRUCCIONES GEOGRAFICAS.....	95
3.3	ESTACIÓN BASE O REPETIDORA EN ZONA ENTRE CORDILLERAS	99
3.4	ESTACIÓN BASE O REPETIDORA EN ZONA PREDOMINANTE.....	101

4	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	104
4.1	CONCLUSIONES	104
4.2	TRABAJOS FUTUROS	106
5	REFERENCIAS	107
A.	INSTALACIÓN DE LA HERRAMIENTA Y CONFIGURACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA	112
A.1	INSTALACIÓN DE LA HERRAMIENTA	112
A.2	CONFIGURACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA	115
A.2.1	CREACIÓN DEL ESCENARIO DE TRABAJO	115
B.	GENERACIÓN DE COBERTURA	121

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Recorrido de la información geográfica hasta la base de datos The Living Atlas of the World.....	4
Fig. 2. Representación didáctica de un dato ráster	5
Fig. 3. Representación ráster de una fotografía aérea	6
Fig. 4. Representación ráster de los valores de elevación en la superficie de la tierra	7
Fig. 5. Mapa temático de Vocación de Uso de las Tierras.....	8
Fig. 6 Estación de transmisión y recepción sobre la superficie terrestre.....	10
Fig. 7. Representación gráfica para distancia de visibilidad.	11
Fig. 8. Curvatura de una señal	14
Fig. 9. Perfil del terreno con corrección de radio terrestre.	16
Fig. 10 Representación gráfica del modelo de Dos Rayos.	19
Fig. 11. Trayecto de propagación por reflexión en tierra curva.....	23
Fig. 12. Principio de elipsoides de Fresnel.	34
Fig. 13. Geometría obstáculo agudo $h>0$	35
Fig. 14. Geometría obstáculo agudo $h<0$	36
Fig. 15. Geometría de dos obstáculos aislados.	37
Fig. 16. Geometría de dos obstáculos aislado con despeje negativo.	38
Fig. 17. Geometría de dos obstáculos aislados con despeje positivo.	39
Fig. 18. Geometría de dos obstáculos aislados con un obstáculo dominante.....	40
Fig. 19. Concepto del método de Bullington.....	42
Fig. 20. Concepto del método de Deygout.	43

Fig. 21. Representación de dos enlaces, interferente y deseado.	51
Fig. 22. Fases de la metodología de desarrollo.	58
Fig. 23. Módulos de la herramienta de estimación cobertura.	61
Fig. 24. Diagrama de flujo para el desarrollo de una herramienta de análisis de zonas de cobertura alrededor de una BS ubicada en zona rural.....	63
Fig. 25. Módulos que deben ser modificados.	64
Fig. 26. Mapa de elevación geográfica de Colombia.	67
Fig. 27. Diagrama de flujo para aplicación del modelo de pérdidas por propagación de Dos Rayos. ...	72
Fig. 28. Modelos de propagación agregados a la herramienta y a la interfaz gráfica	73
Fig. 29. Exponente de propagación y distancia de referencia.	73
Fig. 30. Rango de frecuencias.	73
Fig. 31. Distancia de cobertura.	74
Fig. 32. Estilo de mapas de cobertura.	74
Fig. 33. Comparación de escenarios de la Herramienta.....	75
Fig. 34. Representación de las alturas del escenario de implementación inicial.....	75
Fig. 35. Delimitaciones territoriales de Colombia.....	76
Fig. 36. Tamaño de cada celda.....	77
Fig. 37. Comparación de mapa de cobertura entre la herramienta original y la herramienta después de los cambios.	78
Fig. 38. Visualización de un Mapa de cobertura en Google Maps.	78
Fig. 39. Diagrama de comparación entre la herramienta modificada y la herramienta original	79
Fig. 40. Comparación entre las Herramientas Visor y la herramienta modificada.....	81

Fig. 41. Comparación de mapas de cobertura de las herramienta Radio Mobile y la herramienta utilizada.....	83
Fig. 42. Escenarios de prueba.	85
Fig. 43. BS zona Valle.....	86
Fig. 44. BS cerca a grandes obstrucciones geográficas.....	87
Fig. 45. BS entre Cordilleras.	88
Fig. 46. BS en zona predominantemente alta.....	89
Fig. 47. Estimación de cobertura en una zona de valle con los modelos de propagación de Espacio libre, Dos Rayos y Okumura-Hata para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.	91
Fig. 48. Estimación de cobertura en una zona de valle con los modelos de propagación de Pendiente única con $n=3$ y $n=4$ y Egli para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.....	92
Fig. 49. Dos estaciones base ubicadas a una distancia tal que se garantiza el criterio de compatibilidad entre servicio móviles.	94
Fig. 50. Estimación de cobertura cerca de obstrucciones geográficas con los modelos de propagación de Espacio libre, Dos Rayos y Okumura-Hata para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.	96
Fig. 51. Estimación de cobertura cerca de obstrucciones geográficas con los modelos de propagación de Pendiente única con $n = 3$ y $L_o = 70$ y $n = 4$ y $L_o = 100$ y Egli para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.....	97
Fig. 52. Ejemplo de dos estaciones base o repetidoras ubicadas en el departamento del Meta y Cundinamarca operando a la misma frecuencia.....	98
Fig. 53. Estimación de cobertura entre cordilleras con los modelos de propagación de Pendiente única con $n = 3$ y $L_o = 70$ y $n = 4$ y $L_o = 100$, y Egli para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.	99
Fig. 54. Estimación de cobertura entre cordilleras con los modelos de propagación de Espacio libre, Dos Rayos y Okumura-Hata para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.....	100
Fig. 55. Estimación de cobertura en zona predominante con los modelos de propagación de Espacio libre, Dos Rayos y Okumura-Hata para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.	102

Fig. 56 Estimación de cobertura en zona predominante con los modelos de propagación de Pendiente única con $n = 3$ y $L_0 = 70$ y $n = 4$ y $L_0 = 100$ y Egli para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.	103
Fig. 57. Paquete de instalación para la herramienta de estimación de cobertura.	112
Fig. 58. Ruta de la ubicación de los complementos a instalar.	113
Fig. 59. Instalación de los complementos dentro del software QGIS.	113
Fig. 60. Ubicación de la carpeta de administración de los complementos instalados.	114
Fig. 61. Activación de complementos.	114
Fig. 62. Información topográfica necesaria para la caracterización del escenario colombiano.	115
Fig. 63. Mapas temáticos de elevación y sombras de Colombia cargados en QGIS.	115
Fig. 64. Mapa temático de división política de Colombia cargado en QGIS.	116
Fig. 65. Configuración para el despliegue de las etiquetas en la capa de división política de Colombia.	116
Fig. 66. Proceso de carga de estilos.	117
Fig. 67. Escenario aplicando el estilo "dem.qml".	117
Fig. 68. Carga de transmisores a el escenario de trabajo.	118
Fig. 69. Pestaña para la parametrización de los transmisores del escenario.	118
Fig. 70. Pestaña para activar edición del transmisor.	119
Fig. 71. Pestaña para mover los transmisores.	119
Fig. 72. Escenario de trabajo finalizado.	120
Fig. 73. Ventana "Caja de herramientas de Procesos".	121
Fig. 74. Ruta para uso de los escenarios de cobertura.	122
Fig. 75. Ventana de parámetros para la cobertura.	123

Fig. 76. Ejemplo de estimación de cobertura en el escenario colombiano..... 123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores típicos del exponente de propagación n para diferentes escenarios.....	27
Tabla 2. Requerimientos.....	59
Tabla 3. Modificaciones y adaptaciones de la herramienta	65
Tabla 4. Bandas de frecuencia para operación del servicio de radio móvil en la banda de 30 MHz a 466 MHz.....	68
Tabla 5. Parámetros y valores a utilizar en la generación de mapas de cobertura.....	71
Tabla 6. Coordenadas de los escenarios de prueba para validación.....	80
Tabla 7. Relación entre los resultados de intensidad de campo eléctrico y potencia considerados en la herramienta Visor y la herramienta modificada.....	82
Tabla 8. Coordenadas de la BS en zona valle	86
Tabla 9. Coordenadas de BS cerca de obstrucciones geográficas	88
Tabla 10. Coordenadas de la BS entre cordilleras	89
Tabla 11. Coordenadas de la BS en zona predominantemente alta.....	90
Tabla 12. Distancia mínima que debe existir entre estaciones base o repetidoras que operan a la misma frecuencia según el criterio de compatibilidad entre servicios móviles.....	95

LISTA DE ACRÓNIMOS

EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> , Compatibilidad Electromagnética.
ERP	<i>Effective Radiated Power</i> , Potencia Radiada Aparente.
FD	<i>Frequency-Distance</i> , Frecuencia-Distancia.
FDR	<i>Frequency Dependent Rejection</i> , Rechazo en Función de la Frecuencia.
FM	<i>Frequency modulation</i> , Frecuencia Modulada.
GIS	<i>Geographical Information System</i> , Sistemas de Información Geográfica.
ILS	<i>Instrumental Landing System</i> , Sistema de Aterrizaje por Instrumentos.
ITM	<i>Irregular Terrain Model</i> , Modelo de Terreno Irregular.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LOS	<i>Line of Sight</i> , Línea de Vista.
OCR	<i>Off-Channel-Rejection</i> , Rechazo Fuera de Canal.
OFR	<i>Off-Frequency Rejection</i> , Rechazo Fuera de Banda.
OTR	<i>On-Tune Rejection</i> , Rechazo Dentro de Banda.

PAMR	<i>Public Access Mobile Radio</i> , Radio Móvil de Acceso Público.
PIRE	Potencia Isótropa Radiada Equivalente.
PMR	<i>Private Mobile Radio</i> , Radio Móvil Privado.
PRA	Potencia Radiada Aparente.
PTNRS	Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora.
SINAD	<i>Signal to Noise and Distortion Ratio</i> , Relación Señal a Ruido más Distorsión.
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , Ultra Alta Frecuencia.
VHF	<i>Very High Frequency</i> , Muy Alta Frecuencia.

INTRODUCCIÓN

El espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado a cargo del estado y muy importante para su desarrollo, ya que por su uso, brinda conectividad y acceso a la información a los ciudadanos [3, 4]. Actualmente, el espectro radioeléctrico es muy utilizado por diferentes sistemas y servicios de telecomunicaciones, por ejemplo, difusión de audio y video, telemetría y control, seguridad electrónica, sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas, investigación científica, y diversas aplicaciones industriales, entre otras.

En lo que a sistemas de comunicaciones inalámbricos respecta, cada día hay mayor demanda y solicitudes para hacer uso del espectro radioeléctrico, debido a la aparición de nuevos sistemas, servicios y aplicaciones, y, a la creciente demanda de usuarios ya existentes [5]. Esto hace que el ambiente electromagnético se torne cada vez más complejo, por la aparición y existencia de un mayor número de señales de radiofrecuencia, y se opte por reutilizar frecuencias, lo que es una buena salida si se aplican buenas estrategias de reúso, pero en ocasiones se presentan áreas bastante congestionadas con señales que no están lo suficientemente aisladas entre sí, y es ahí donde empiezan a aparecer las interferencias y los efectos no deseados entre sistemas.

Por lo anterior, es de suma importancia analizar las zonas de servicio e interferencias de señales que trabajan en la misma frecuencia, con la ayuda de diferentes métodos y procedimientos que permitan la estimación de pérdidas por propagación y con ello determinar el alcance de los sistemas de comunicación inalámbricos, considerando adicionalmente la relación de protección adecuada y necesaria para asegurar una prestación de servicios eficiente y de calidad.

Muchos de estos métodos son dispendiosos de implementar a “mano” y algunos de ellos solo tienen en cuenta características o fenómenos específicos, ya sea del terreno o climáticos, como una aproximación o acercamiento a la realidad. Es aquí donde las herramientas de estimación de cobertura empiezan a tener un papel destacado, ya que permite mediante diferentes algoritmos que modelan métodos de propagación, obtener resultados de una manera más eficiente y efectiva, tomando en cuenta los diferentes accidentes geográficos en un escenario específico y representar los resultados numéricos gráficamente y a gran escala, de tal manera que se facilite a sus usuarios una mejor comprensión de la información y por ende un análisis más completo de esta.

Un inconveniente con muchas herramientas de estimación de cobertura es que son propiedad de empresas privadas y las licencias de uso tienen un costo elevado. Esta situación llevó a buscar soluciones alternativas de las cuales surgió la idea de generar herramientas de estimación de cobertura soportadas en Sistemas de Información Geográfica (GIS, *Geographical Information System*), los cuales brindan la posibilidad de crear y modificar información especializada y real de los escenarios y hacer uso

de herramientas complementarias para su uso y procesamiento. A nivel académico, este tipo de herramientas son un buen soporte para la investigación y la docencia, porque permiten mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje, y facilitan las labores relacionadas con la determinación de las áreas de servicio de sistemas de telecomunicaciones.

En el presente trabajo de grado, el cual hace parte del proyecto de investigación: “Recomendaciones sobre Parámetros Técnicos Esenciales de Operación y Análisis de Interferencia para Sistemas de Comunicaciones VHF en Colombia” [6], proyecto financiado por la Agencia Nacional del Espectro (ANE), se realiza el estudio, análisis y aplicación de diferentes modelos de pérdidas por propagación, aplicables a las bandas de frecuencia de 30 MHz a 466 MHz, para estimar las áreas de servicio especialmente de sistemas de radio móvil en las diferentes condiciones que presentan las diversas regiones de Colombia, y así mismo y de esta manera considerar las posibles interferencias cocanal y con ello estimar la mínima separación en distancia entre sistemas operando en la misma frecuencia, teniendo en cuenta factores tales como ubicación, potencia y frecuencia de operación, entre otros.

Para lo anterior, se toma como herramienta base, una herramienta prototipo software para la estimación de cobertura radioeléctrica [7], la cual fue previamente desarrollada en la Universidad del Cauca, sobre la cual se le aplicaron modificaciones para que, además de los modelos de pérdidas por propagación ya disponibles, considere los modelos referentes a las bandas que el presente trabajo considera, además de tener en cuenta las pérdidas por difracción, el efecto de la curvatura de la tierra y las características de la geografía colombiana.

El trabajo de grado consta de los siguientes capítulos: Capítulo 1, en el cual se contextualiza al lector por medio de conceptos teóricos considerados importantes para comprender el presente trabajo de grado; Capítulo 2, en el cual se introduce la herramienta software empleada para estimar la cobertura, que incluye una descripción general de la misma y las modificaciones que se realizaron, además, se presenta el escenario de trabajo, sus características y el plan de pruebas que se llevó a cabo con algunos conceptos importantes y los parámetros técnicos considerados; Capítulo 3, en el cual se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de cobertura y se realiza un análisis detallado de estos en cada uno de los casos de análisis sobre el territorio colombiano y considerando los modelos de propagación seleccionados; Capítulo 4 y Capítulo 5, los cuales presentan las conclusiones del trabajo de grado con respecto al análisis de cobertura y de interferencia, los trabajos futuros y las referencias bibliográficas, respectivamente.

CAPITULO I

1 MARCO TEÓRICO

1.1 INFORMACIÓN GENERAL DE LA HERRAMIENTA

1.1.1 Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (GIS, *Geographical Information System*) son un entorno muy usado en la actualidad por organizaciones nacionales e internacionales con diferentes enfoques de investigación, para generar y procesar mapas, y con ello analizar y resolver problemas de aspecto geográfico que sean de su interés. Los GIS se utilizan para recopilar, gestionar y analizar datos geográficos de diversos tipos, tales como ubicación espacial y organización de capas de información en visualizaciones 3D, entre otros, facilitando con esto, el análisis de los datos y la observación de patrones, relaciones y situaciones particulares [8].

1.1.1.1 Datos GIS

Una de las principales características que posee un SIG es la de ser capaz de representar a los objetos del mundo real (calles, tipos de terreno, elevaciones, etc.), mediante diferentes capas temáticas (capas de cartografía) almacenadas en bases de datos geográficas¹. Dichos objetos se clasifican en dos grupos diferentes: aquellos que son continuos (como las elevaciones) y aquellos que son discretos (como un edificio). Los SIG manejan dos tipos de información principalmente: la información espacial y la información descriptiva [7]. La Fig. 1 presenta un ejemplo de la transformación de la información hasta llegar a los datos disponibles en cada base de datos geográfica [9].

¹ Que la información esté geográficamente referenciada implica que las coordenadas de todos los elementos gráficos son conocidas bajo un sistema de referencia [52].

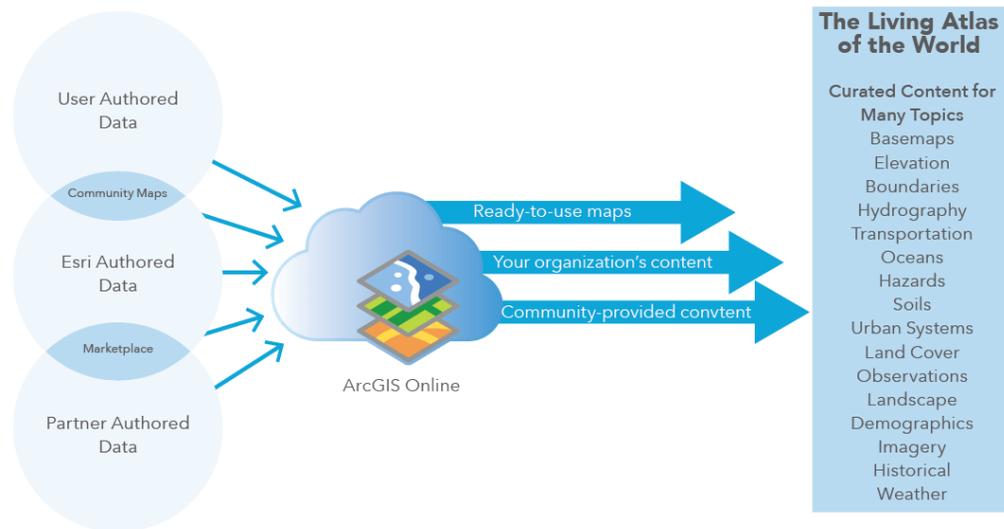


Fig. 1. Recorrido de la información geográfica hasta la base de datos The Living Atlas of the World²

Fuente : Tomada de [9]

1.1.1.2 Datos ráster

Son datos usados para representar información^{3 4} del mundo real en forma de fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados, en una matriz de píxeles

² Living Atlas of the World es una sección depurada del ecosistema de datos de ArcGIS Online, de mayor tamaño, que contiene datos creados por los usuarios, ESRI y los asociados.

³ La información corresponde al conjunto de datos que se han organizado de modo que tengan significado y valor para el receptor [10] (2018). *Manual Práctico para el Despliegue y Manejo de Información Cartográfica*. [Online] Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/299001/Manual_Pra_ctico_Guia_PMDU_REV.pdf

⁴ La Información almacenada en formato ráster puede contener: datos temáticos (datos discretos) que representan, por ejemplo, información sobre el uso de la tierra; datos continuos que representan fenómenos como la temperatura y la elevación del terreno; e imágenes que incluyen mapas escaneados, dibujos y fotografías de edificios.

o celdas como se presenta en la Fig. 2, celdas organizadas en filas y columnas, cada una con un valor que representa las características de la zona cubierta por dicha celda [11, 12].

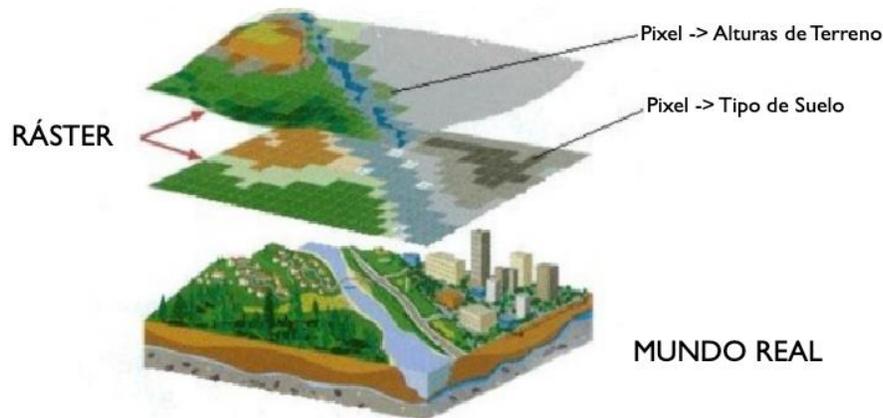


Fig. 2. Representación didáctica de un dato ráster

Fuente: Tomada de [10]

1.1.1.3 Uso de datos ráster

Los datos ráster tienen amplia variedad de aplicaciones, tales como, la identificación de cuencas hidrográficas; zonas utilizadas en agricultura y silvicultura para gestionar la producción de cultivos; y la identificación de áreas susceptibles de inundación en la gestión de desastres, entre otros. A continuación, se presentan las principales categorías en que se pueden dividir los datos ráster empleados en GIS.

1.1.1.4 Mapa base.

Un uso muy común de los GIS es la visualización de diferentes capas por medio de vectores y matrices, las cuales se alinean espacialmente y pueden representar tanto objetos reales como información adicional sobre los mismos. Las tres fuentes principales de mapas base ráster son las ortofotografías de fotografías aéreas (ver Fig. 3), imágenes de satélite y mapas escaneados.

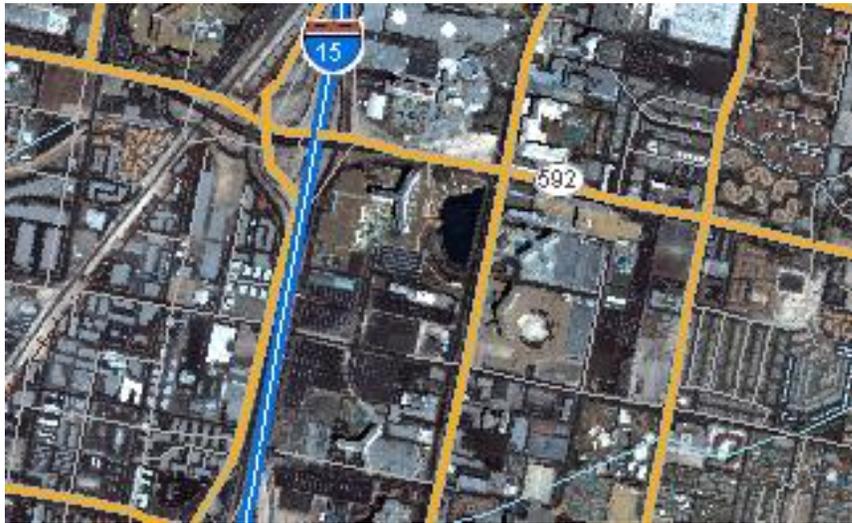


Fig. 3. Representación ráster de una fotografía aérea

Fuente: Tomada de [12]

1.1.1.5 Mapas de superficie

Los mapas de superficie permiten representar superficies con figuras regulares. Los valores de elevación medidos desde la superficie de la tierra son la aplicación más común de los mapas de superficie y la cual hará parte importante del presente trabajo de grado, pero, otros valores como las precipitaciones, la temperatura, la concentración y la densidad poblacional también pueden definir superficies que se pueden analizar espacialmente. La Fig. 4 presenta un ejemplo de un dato ráster que permite la visualización de las elevaciones, en la cual a los menores valores de elevación se asigna el color verde y para los mayores valores de elevación se asignan los colores rosa y blanco.

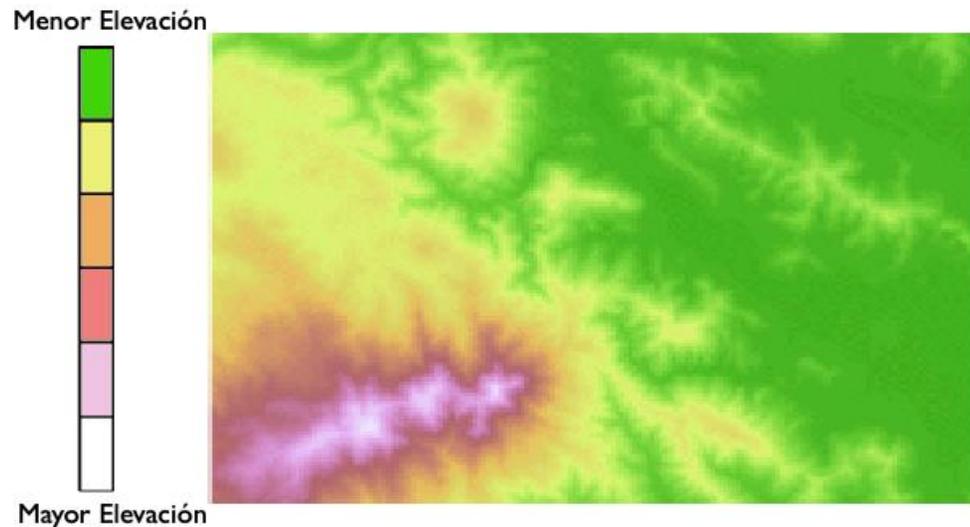


Fig. 4. Representación ráster de los valores de elevación en la superficie de la tierra

Fuente : Tomada de [12].

1.1.1.6 Mapas temáticos

Los mapas temáticos reflejan un aspecto particular de la zona geográfica bajo estudio, pudiendo enfocarse en variables físicas, sociales, políticas, culturales, económicas, sociológicas y cualquier otra relacionada con un territorio en concreto, además. Los mapas temáticos se diseñan con un propósito específico o para ilustrar un tema determinado, clasificando los datos por temáticas. En la Fig. 5, se presenta un ejemplo de un mapa temático de uso de suelo, el cual proporcionan información esencial sobre los tipos de suelos existen tales como: césped, agua, urbano, mixto, etc., en una determinada zona.

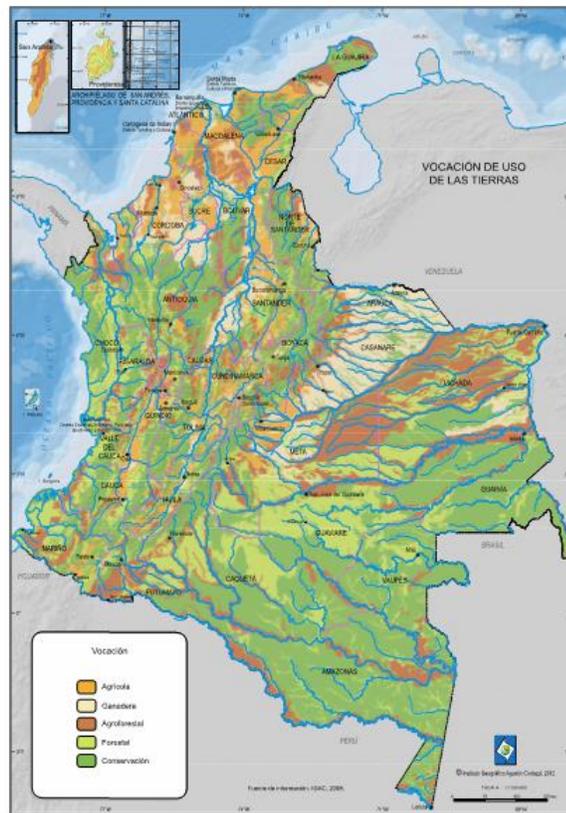


Fig. 5. Mapa temático de Vocación de Uso de las Tierras.

Fuente : Tomada de [13] .

1.1.2 QGIS

Es el principal SIG basado en software libre y de código abierto, el cual funciona sobre plataformas Linux, Unix, Mac OSX y Windows. QGIS proporciona una creciente gama de funciones básicas y avanzadas tales como: visualizar, gestionar, analizar datos, exportar datos geoespaciales, procesamiento de imagen, producción de gráficos y mapas, entre otros. QGIS cuenta con una gran

estabilidad y potentes algoritmos de cálculo, además, posee una comunidad amplia y activa de desarrolladores y es una herramienta soportada por muchas organizaciones⁵ alrededor del mundo [7].

1.2 CONCEPTOS DE RADIOPROPAGACIÓN

El análisis de interferencia y el uso coordinado de frecuencias es muy importante para garantizar la correcta operación de los sistemas de comunicación, especialmente los sistemas inalámbricos. Como parte del ejercicio de análisis de compatibilidad y en la búsqueda de los canales de frecuencia más adecuados, es común utilizar herramientas software que permitan estimar la cobertura de los diferentes sistemas de comunicaciones, y para ello se hace uso de diferentes métodos de pérdidas por propagación, diferentes consideraciones sobre fenómenos de propagación, mapas, visualizaciones e ilustraciones gráficas [14], todos ellos basados en características y comportamientos reales de la propagación de las ondas radioeléctricas y la influencia de la tierra y los diferentes accidentes geográficos. Por lo anterior, se hace importante comprender algunos conceptos de radiopropagación.

En esta sección se presentan algunos conceptos de radiopropagación relevantes para la comprensión de secciones posteriores.

1.2.1 Influencia del Terreno en la Propagación.

Las características de propagación de una onda dependen de las condiciones del trayecto. Cuando el transmisor y el receptor están situados sobre la superficie terrestre y existe visibilidad directa entre ambos [15, 16], esto puede ser modelado por un rayo directo y otro reflejado en el suelo, como se presenta en la Fig. 6.

⁵ Un grupo de institutos, asociaciones, universidades, congresos, etc, unidos para realizar intercambio de ideas y aportes en pro de los GIS.

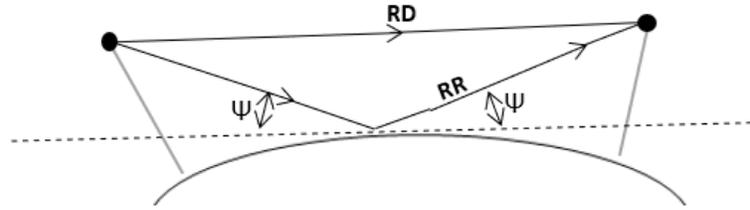


Fig. 6 Estación de transmisión y recepción sobre la superficie terrestre.

Fuente: Tomada de [2].

Debido a la naturaleza del terreno, la frecuencia y polarización de la onda, puede existir un componente de onda de superficie.

La expresión general de campo eléctrico incidente, en estas condiciones, viene determinada por la siguiente expresión:

$$e = e_0[1 + R \exp(-j\Delta) + (1 - R)A \exp(-j\Delta)], \quad (1)$$

donde, e (en V/m) es la intensidad de campo eléctrico incidente en recepción en las condiciones reales; e_0 (en V/m) es la intensidad de campo eléctrico incidente en condiciones de espacio libre; R es el coeficiente de reflexión en el suelo; A es un término de atenuación asociado a la onda de superficie; y Δ es el ángulo de diferencia de fase entre la componente directa y la reflejada, el cual se calcula haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda}, \quad (2)$$

donde, Δl (en m) es la diferencia recorrida entre el rayo reflejado y el rayo directo; y λ (en m) es la longitud de onda.

El coeficiente de reflexión complejo, R , se especifica en términos de su modulo y su fase de la siguiente forma:

$$R = |R|e^{-j\beta}, \quad (3)$$

donde, $|R|$ y β están en función de la frecuencia, polarización, características eléctricas del suelo y ángulo de incidencia Ψ .

1.2.2 Horizonte Radioeléctrico

Es el lugar geométrico de los puntos en que los rayos directos procedentes de una fuente puntual de ondas radioeléctricas son tangentes a la superficie de la Tierra. Por regla general, los horizontes radioeléctrico y geométrico son diferentes debido a la refracción atmosférica [17].

Para el caso de las antenas, se llama distancia de visibilidad o de horizonte [2] a la distancia entre el pie de la antena y el punto S de tangencia con la superficie terrestre de un rayo trazado desde la antena. Se llama distancia de visibilidad radioeléctrica para dos antenas a la suma de sus distancias de horizonte Fig. 7.

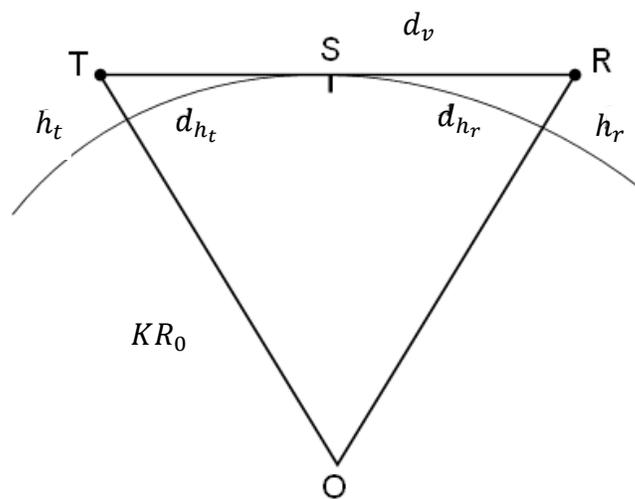


Fig. 7. Representación gráfica para distancia de visibilidad.

Fuente: Tomado de [2].

La distancia de horizonte del transmisor se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$(KR_0 + h_t)^2 = d_{h_t}^2 + (KR_0)^2, \quad (4)$$

donde, K es el factor de corrección de la tierra; R_0 (en m) representa el valor del radio real de la tierra; h_t (en m) es la altura de la antena transmisora; y d_{h_t} (en Km) es la distancia al horizonte transmisor.

Desarrollando y simplificando la expresión y teniendo en cuenta que $2KR_0h_t \gg h_t^2$ se tiene que:

$$d_{h_t}^2 \approx 2Kh_t, \quad (5)$$

y efectuando un cambio de unidades y sustituyendo R_0 , la expresión resultante es la siguiente:

$$d_{h_t} = 3.57 \sqrt{Kh_t}. \quad (6)$$

Análogamente,

$$d_{h_r} = 3.57 \sqrt{Kh_r}. \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que la distancia de visibilidad d_v (en Km) es la suma de las expresiones (6) y (7), se obtiene lo siguiente:

$$d_v = 3.57 (\sqrt{Kh_t} + \sqrt{Kh_r}). \quad (8)$$

Para $K = \frac{4}{3}$, la expresión resultante es:

$$d_v = 4.1 (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}). \quad (9)$$

A continuación, se presenta un ejemplo del cálculo de horizonte radioeléctrico, con valores de antena de transmisión y recepción tales como: 40 m y 1.5 m, respectivamente, y usando la ecuación (9).

$$d_v = 4.1(\sqrt{40} + \sqrt{1.5}) = 30.9 \text{ Km} \quad (10)$$

1.2.3 Efectos de la Refracción Troposférica en la Propagación

Para frecuencias superiores a 30 MHz, se descartan los modos de propagación por onda de superficie y se toman en cuenta los que tienen que ver con ondas troposféricas, por ello, es necesario conocer la trayectoria de la onda y su posición relativa respecto a los accidentes del terreno, ya que éstos pueden interceptar la señal y producir una atenuación importante.

También pueden producirse modos de propagación por trayectos múltiples como consecuencia de la reflexión de las ondas en el suelo, o en las fronteras de separación entre las capas de una atmósfera estratificada y esto puede desencadenar la formación de conductos troposféricos, y cuando una señal es encerrada en un conducto troposférico, es posible que tenga un alcance superior al previsto y genere interferencias.

Las ondas que viajan por la tropósfera experimentan una refracción a causa de la no uniformidad de las capas atmosféricas, que se manifiesta como una variación en el índice de refracción con la altura. Debido a la refracción que se produce, la trayectoria del rayo es curvilínea, lo cual puede influir sobre el efecto de los obstáculos del terreno.

La radio comunicaciones por la tropósfera tienen un alcance del orden de la distancia de visión óptica entre las antenas, y, más allá de esta distancia, llamada horizonte óptico, pueden lograrse enlaces pero con pérdidas adicionales por difracción[2].

1.2.3.1 Factor de curvatura terrestre

Para radioenlaces en distancias largas, las ondas que viajan por la troposfera experimentan refracción a causa de la no uniformidad de las capas atmosféricas, lo cual se manifiesta como una variación del índice de refracción con la altura, debido fundamentalmente a variaciones de temperatura y de presión [7]. En la Fig. 8 representa una trayectoria del rayo directo de manera curvilínea debido a la refracción. Por lo anterior, es de gran importancia de tener en cuenta la curvatura terrestre, y más aún en el caso de radioenlaces a grandes distancias, en los cuales la curvatura de la tierra hace que los accidentes geográficos tengan una mayor incidencia sobre la propagación, hasta el punto que puede definirse un horizonte radioeléctrico por encima del cual se crea una zona de sombra en la cual no es posible la comunicación.

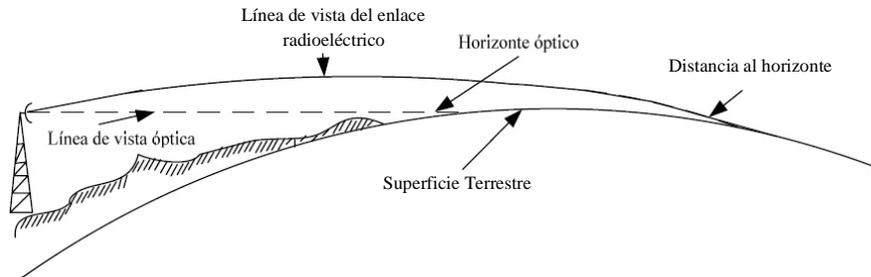


Fig. 8. Curvatura de una señal

Fuente: Tomada de [7] .

Debido a lo anterior, se debe considerar un factor de radio ficticio o mejor conocido como factor K, el cual se multiplica con el radio de la tierra para dar como resultado un radio ficticio de la tierra. El factor K esta definido como la relación entre dos radios, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} , \quad (11)$$

$$\frac{1}{KR_0} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} , \quad (12)$$

$$K = \frac{R}{(R - R_0)} , \quad (13)$$

donde, R_0 (en Km) es el radio real de la tierra, aproximadamente 6370 Km; R_e (en Km) es el radio ficticio de la curvatura de la tierra; y R (en Km) es la curvatura del haz, el cual está definido por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{-10^6}{\Delta N} , \quad (14)$$

donde, ΔN es el gradiente vertical del co-índice en la capa inferior de la atmosfera y viene dado por:

$$\Delta N = N_s - N_1, \quad (15)$$

donde, N_s es la refractividad en la superficie terrestre; y N_1 es la refractividad a 1 Km de altura sobre la superficie terrestre, los cuales pueden ser calculados mediante la siguiente expresión:

$$N_s(h) = N_o \exp(-0.136h), \quad (16)$$

donde, N_o es el valor medio de la refractividad atmosférica extrapolada al nivel del mar; y h (en Km) la altura sobre el nivel del mar del punto de la superficie terrestre en el que se calcula la refractividad.

De las ecuaciones (13) y (14) se obtiene la siguiente expresión del factor K :

$$K = \frac{157}{157 + \Delta N}. \quad (17)$$

Según la recomendación UIT-R P.453 [18], en climas templados como los de los escenarios colombianos se tiene un $\Delta N = -39$, reemplazando este valor en (17), se obtiene $K = \frac{4}{3}$.

1.2.4 Protuberancia de la Tierra

Se denomina protuberancia de la tierra o flecha ($f(x)$) a la elevación de la superficie terrestre sobre la línea horizontal que une las bases de las antenas de transmisión y recepción [2], como se presenta en la Fig. 9, donde, T es el transmisor; R es el receptor; h_t (en m) es la altura de la antena de transmisión; h_r (en m) es la altura de la antena de recepción; x (en Km) es la distancia desde la antena de transmisión a un punto entre T y R; $z(x)$ (en m) es la altura del terreno sobre la base en el punto de análisis entre T y R; $c(x)$ (en m) es la altura el terreno sobre el nivel del mar en el punto de análisis entre T y R; d (en m) es la distancia del enlace; $Y_R(x)$ (en m) es la altura del rayo directo sobre la base en el punto de

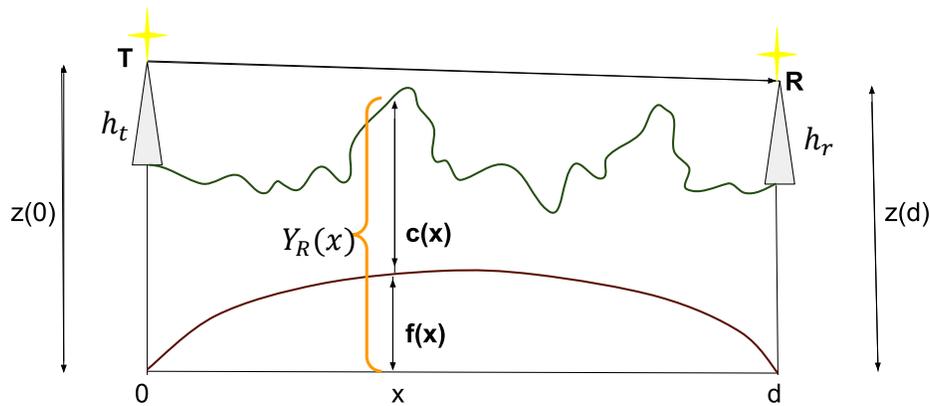


Fig. 9. Perfil del terreno con corrección de radio terrestre.

análisis entre T y R; y $f(x)$ (en m) es la protuberancia de la tierra o flecha en el punto de análisis entre T y R y está dada por (18).

$$f(x) = 0.07849 \frac{x(d-x)}{K}, \quad (18)$$

donde, K es un factor de corrección por curvatura terrestre, el cual para el caso colombiano $K = \frac{4}{3}$, como se mencionó anteriormente.

1.3 MODELOS DE PÉRDIDAS POR PROPAGACIÓN

La propagación de ondas electromagnéticas se modela haciendo uso de las ecuaciones de Maxwell, las cuales pueden ser aplicadas en distintos escenarios. Sin embargo, debido a la complejidad de los canales inalámbricos por fenómenos de propagación tales como: reflexión, difracción y dispersión de las señales transmitidas [4, 19, 20], entre otros, el análisis de propagación basado en las ecuaciones de Maxwell es complejo e impráctico por el número considerable de supuestos. En el rango de frecuencias de 30 MHz a 466 MHz, la propagación, en la mayoría de los casos, hace uso del mecanismo de propagación de onda espacial o línea de vista. La propagación por onda celeste o ionosférica

generalmente no sucede, excepto en las frecuencias bajas del rango⁶ [21]. En algunas épocas del año, es probable que las señales puedan alcanzar distancias considerables gracias a la propagación a través de ductos troposféricos [20]. De forma más específica, se deben tener en cuenta los efectos de la dispersión troposférica y la difracción causada por obstáculos, incluyendo la curvatura de la tierra, los perfiles de terreno y las edificaciones.

En esta sección se describen algunos de los modelos más importantes para estimar las pérdidas por propagación en escenarios rurales y urbanos, en el rango de frecuencias de 30 MHz a 466 MHz, muchos de los cuales son empíricos. Los métodos empíricos proporcionan una estimación rápida de la pérdida básica de propagación o, alternativamente, del valor de potencia recibida o intensidad de campo eléctrico incidente en cualquier punto alrededor de un transmisor. Estos modelos son sencillos de usar y su exactitud puede ser mejorada modificando parámetros dentro de los mismos al considerar medidas reales de campo. Adicionalmente, se presenta el modelo de espacio libre, el cual es un modelo teórico que considera las mínimas pérdidas por propagación, que sirve de referencia en los diferentes procedimientos para estimar cobertura y la mínima separación en distancia entre estaciones que operan en la misma frecuencia.

1.3.1 Modelo de Pérdidas por Propagación en Espacio Libre

Modelo que permite estimar las mínimas pérdidas por propagación en un escenario de exteriores o abierto (sin obstrucciones, sin reflexiones, sin difracciones), al considerar que la señal se dispersa en diferentes direcciones desde la antena transmisora y que una muy pequeña parte de la energía que ha sido radiada puede ser captada por la antena receptora. Este modelo no considera los efectos del clima o la atenuación que puede sufrir la señal por absorción de energía en la atmósfera.

Las pérdidas por propagación en unidades logarítmicas se calculan haciendo uso de la siguiente expresión matemática [22]:

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \log(d) + 20 \log(f), \quad (19)$$

⁶ Durante ciertas épocas del año y horas del día, la capa E esporádica de la ionosfera puede aparecer y permitir la comunicación a grandes distancias en frecuencias de hasta 70 MHz.

donde, d (en Km) es la distancia entre el transmisor y el receptor; y f (en MHz) es la frecuencia de operación.

Para estimación de las pérdidas por propagación en distancias mayores a la Línea de Vista⁷ (LOS, *Line of Sight*), se debe tener en cuenta un modelo de pérdidas por difracción⁸ [23-25], que considere el efecto de la curvatura de la Tierra o el efecto de los obstáculos sobre la propagación de las ondas de radiofrecuencia.

Debido a su carácter básico y fundamental, el modelo de pérdidas en espacio libre es utilizado como una herramienta para determinar los límites teóricos de operación en escenarios con interferencia.

1.3.2 Modelo de Pérdidas por Propagación de Dos Rayos

En un canal de radio móvil rara vez suele haber una sola ruta o un solo trayecto entre la estación base (BS, *Base Station*) y la estación móvil (MS, *Mobile Station*). La Fig. 10 presenta el modelo de reflexión de dos rayos, donde, h_t (en m) y h_r (en m) son las alturas de las antenas de transmisión y recepción, respectivamente; d (en m) es la distancia entre el transmisor y receptor; θ_1 (en rad) es el ángulo de incidencia; θ_2 (en rad) es el ángulo de reflexión; d_1 (en m) es la distancia del rayo directo; d_2 (en m) es la distancia del rayo reflejado; y T y R son el transmisor y receptor respectivamente [26].

⁷ La propagación por línea de vista es una característica de la radiación electromagnética en la cual la onda viaja en línea directa de la antena de transmisión a la antena de recepción y entre las dos no existe obstáculo.

⁸ La difracción es el fenómeno que ocurre cuando una onda encuentra un obstáculo y hace referencia al efecto de la onda de bordear el obstáculo. El objeto de difracción se convierte en una segunda fuente de la onda de propagación.

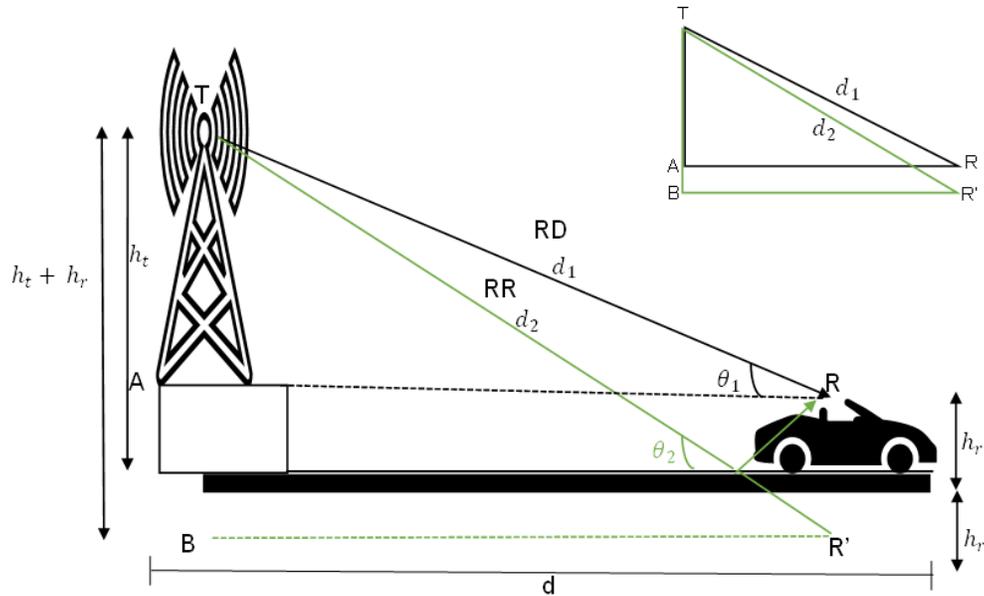


Fig. 10 Representación gráfica del modelo de Dos Rayos.

Fuente: Tomada de [26].

Este modelo de pérdidas por propagación está basado en la óptica geométrica que considera las rutas de propagación directa y reflejada entre el transmisor y receptor. A partir de la Fig. 10 se puede calcular la distancia del rayo directo y reflejado como se presenta en las siguientes expresiones:

$$TR^2 = AR^2 + TA^2, \quad (20)$$

$$d_1^2 = d^2 + (h_t - h_r)^2, \quad (21)$$

$$d_1 = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}. \quad (22)$$

Similarmente, la distancia de propagación del rayo reflecto d_2 se puede obtener del triángulo TBR' de la siguiente manera:

$$d_2 = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2}. \quad (23)$$

Dado que la longitud de onda es muy pequeña en comparación con d , un pequeño cambio en d puede generar un gran cambio en la fase de la señal recibida [26]. Dependiendo de la diferencia de fase entre los rayos RD y RR, estas componentes se pueden interferir constructivamente o destructivamente. Teniendo en cuenta la diferencia de fase, la potencia recibida viene dada por:

$$p_r = \frac{p_t g_t g_r \lambda}{(4\pi d)^2} |1 + a_v e^{j\Delta\theta}|^2, \quad (24)$$

donde, a_v es el coeficiente de reflexión, el cual es -1 en un entorno de radio móvil; y $\Delta\theta$ es la diferencia de fase entre los dos rayos recibidos, el cual es función de la diferencia entre las dos distancias de propagación d_1 y d_2 .

De la ecuación (24) se puede obtener la siguiente expresión:

$$p_r = \frac{p_t g_t g_r \lambda}{(4\pi d)^2} |1 - e^{j\Delta\theta}|^2, \quad (25)$$

$$= \frac{p_t g_t g_r \lambda}{(4\pi d)^2} |1 - \cos\Delta\theta + j\sin\Delta\theta|^2, \quad (26)$$

$$= \frac{p_t g_t g_r \lambda}{(4\pi d)^2} |1 - \cos\Delta\theta|^2, \quad (27)$$

Usando la expansión binomial, se obtiene:

$$p_r = 2 \frac{p_t g_t g_r \lambda}{(4\pi d)^2} 2(1 - \cos \Delta_\theta). \quad (28)$$

Aplicando identidades trigonométricas, se obtiene:

$$p_r = \left[4 \frac{p_t g_t g_r \lambda}{(4\pi d)^2} \right] \left[\sin \left(\frac{\Delta_\theta}{2} \right) \right]^2. \quad (29)$$

Sí $\Delta_\theta < 0.6$ rad, entonces $\sin \left(\frac{\Delta_\theta}{2} \right) \approx \frac{\Delta_\theta}{2}$, de lo cual se obtiene la siguiente expresión:

$$p_r = \left[4 \frac{p_t g_t g_r \lambda}{(4\pi d)^2} \right] \left(\frac{\Delta_\theta}{2} \right)^2. \quad (30)$$

Ahora, la diferencia de fase Δ_θ entre las señales correspondientes a los dos rayos recibidos está relacionada con la diferencia entre las dos distancias de propagación d_1 y d_2 , por lo tanto:

$$\Delta_\theta = \theta_2 - \theta_1 = \frac{2\pi(d_2 - d_1)}{\lambda}. \quad (31)$$

Reemplazando (22) y (23) en (31), se obtiene:

$$\Delta_\theta = \frac{2\pi (\sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2} - \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2})}{\lambda}. \quad (32)$$

Racionalizando, simplificando y asumiendo que $d \gg h_t h_r$ y $d_1 \approx d$, $d_2 \approx d$, se obtiene que:

$$\Delta_\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2 h_t h_r}{d}, \quad (33)$$

la cual se puede expresar como:

$$\left(\frac{\Delta_\theta}{2}\right)^2 = \frac{4\pi^2 h_t^2 h_r^2}{(\lambda d)^2}, \quad (34)$$

Remplazando (34) en (30), se obtiene:

$$p_r = \left[4 \frac{p_t g_t g_r \lambda}{(4\pi d)^2} \right] \left(\frac{4\pi^2 h_t^2 h_r^2}{(\lambda d)^2} \right)^2, \quad (35)$$

$$p_r = \left[\frac{p_t g_t g_r h_t^2 h_r^2}{d^4} \right], \quad (36)$$

y en unidades logarítmicas, la expresión resultante es la siguiente:

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r - 40 \log d. \quad (37)$$

Mediante la comparación con un balance del enlace, se tiene que las pérdidas por propagación son:

$$L_b = 40 \log d + 20 \log h_t + 20 \log h_r. \quad (38)$$

1.3.3 Modelo de Tierra Curva

Este modelo se aplica cuando a una distancia desde el transmisor se tiene una protuberancia de la tierra⁹ mayor a 5 metros, i.e., $f(x) > 5$, la cual se calcula con (18). Esta situación corresponde a distancias del orden de visibilidad radioeléctrica¹⁰ o mayor [2]. Este modelo considera una trayectoria rectilínea y una tierra ficticia de radio $K \cdot R_0$, donde, K es el factor de corrección del radio de la tierra y R_0 es el radio de la tierra.

La Fig. 11 presenta el modelo de propagación por dos rayos con reflexión sobre tierra curva, donde, h_t (en m) y h_r (en m) son las alturas absolutas de las antenas de transmisión y recepción sobre el nivel del mar, respectivamente; h'_t (en m) y h'_r (en m) son las alturas relativas de las antenas de transmisión y recepción con respecto al terreno, respectivamente; T y R son las ubicaciones del transmisor y del receptor, respectivamente; RD (en Km) es la distancia que recorre el rayo directo; RR (en Km) es la distancia que recorre el rayo reflejado; d_1 (en Km) es la distancia desde el transmisor hasta el punto de reflexión; d_2 (en Km) es la distancia entre el punto de reflexión y el receptor; d (en Km) es la longitud del enlace; y ψ (en rad) es el ángulo de incidencia.

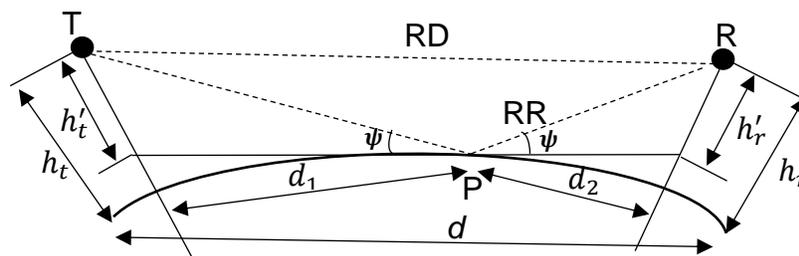


Fig. 11. Trayecto de propagación por reflexión en tierra curva.

Fuente: Tomada de [2].

⁹ Ver Sección 1.2.4.

¹⁰ Ver Sección 1.2.2.

La atenuación por propagación depende, como en el caso de tierra plana, de la interacción entre el rayo directo y el rayo reflejado. Inicialmente, se calculan las distancias d_1 y d_2 las cuales separan al transmisor (T) y al receptor (R), haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$d_1 = \left(\frac{d}{2}\right) + p \cos\left(\frac{\pi + \phi}{3}\right), \quad (39)$$

donde,

$$p = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \left[6.37 K(h_t + h_r) + \left(\frac{d}{2}\right)^{2\frac{1}{2}}\right] \quad (40)$$

y

$$\phi = \cos^{-1} \left[\frac{12.74 k (h_t - h_r) d}{p^3} \right]. \quad (41)$$

A partir de d_1 y d_2 se calculan las alturas relativas de las antenas sobre el plano tangente a la tierra en el punto de incidencia mediante las expresiones:

$$h'_t = h_t - \frac{4d_1^2}{51K}, \quad (42)$$

$$h'_r = h_r - \frac{4d_2^2}{51K}, \quad (43)$$

donde, K es el factor de curvatura de la tierra¹¹.

El ángulo de incidencia esta dado por la siguiente expresión:

$$\psi = \frac{h'_t - h'_r}{d}.$$

La teoría de la reflexión óptica geométrica es aplicable siempre que ψ sea superior a un valor limite, el cual está dado por:

$$\psi_{lim} = \left(\frac{5,400}{f} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (44)$$

donde, f (en MHz) es la frecuencia del enlace.

Dado que la reflexión se produce en una superficie esférica, el rayo reflejado experimenta una divergencia¹² (D), la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$D = \left[1 + \left(\frac{5}{16 K} \right) \left(\frac{d_1^2 d_2}{d h'_t} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (45)$$

Se evalúa la diferencia de fase entre el rayo directo y el rayo reflejado, para ello primero se calcula la diferencia entre trayectos, la cual está representada por Δl (en m) y viene dada por:

$$\Delta l = \frac{2h'_t h'_r}{d} 10^{-3}. \quad (46)$$

¹¹ Ver Sección 1.2.3.1.

¹² Separación de las ondas al incidir en el medio.

Por lo tanto, la diferencia de fase Δ se obtiene como:

$$\Delta = \frac{\pi f \Delta l}{150}. \quad (47)$$

El coeficiente de reflexión tiene una magnitud y un ángulo de fase dados por (3).

Las pérdidas por reflexión en el modelo de tierra curva están dadas por la siguiente expresión:

$$L_b = L_{fS} - 10 \log[1 + |R_e|^2 + 2|R_e| \cos(\Delta + \beta)], \quad (48)$$

donde, L_{fS} (en dB) son las pérdidas por espacio libre y se calculan con (1); y R_e es el coeficiente de

$$R_e = RD, \quad (49)$$

reflexión multiplicado por la divergencia como se presenta en la siguiente ecuación:

donde, R es el radio real de la tierra (6,378 Km) y D se obtiene de (45).

1.3.4 Modelo de Pérdidas por Propagación de Pendiente Única

Es uno de los modelos básicos para la estimación de pérdidas por propagación, en el cual la expresión matemática solo depende de la distancia, como se presenta a continuación:

$$L_b = L_0 + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (50)$$

donde, n corresponde al exponente de propagación; y d_0 (en m) es una distancia de referencia en la cual se conoce la pérdida de propagación, i.e., L_0 . Los valores de L_0 y n se pueden obtener experimentalmente y dependen de las características del escenario. En la Tabla 1 se presentan los valores típicos del exponente de propagación n para distintos escenarios.

Tabla 1. Valores típicos del exponente de propagación n para diferentes escenarios.

Fuente : Tomada de [27].

Escenario	Valor de n
Espacio libre	2
Urbano	2.7 - 3.5
Urbano con grandes edificios	3 - 5
Interior de edificios	1.6 - 1.8
Interior de edificios con sombras	2 - 3
Escenario suburbano	2 - 3
Zonas industriales	2.2

1.3.5 Modelo de Pérdidas por Propagación Lineal por Segmentos (Múltiples Pendientes)

Método empírico que modela las pérdidas por propagación en diferentes segmentos lineales en función del logaritmo de la distancia. Este modelo es una generalización del modelo de pendiente única y puede considerar el número de segmentos que sean necesarios, obteniendo las características de cada segmento de manera experimental y haciendo uso de herramientas matemáticas como la regresión

lineal. Un caso especial es el modelo de propagación de doble pendiente, el cual se presenta a continuación:

$$L_b = \begin{cases} L_0 + 10n_1 \log\left(\frac{d}{d_0}\right), & d_0 \leq d \leq d_c \\ L_0 + 10n_1 \log\left(\frac{d_c}{d_0}\right) + 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_c}\right), & d > d_c \end{cases} \quad (51)$$

donde, n_1 y n_2 corresponden a los exponentes de propagación; d_0 y d_c son distancias de referencia en las cuales se conocen las pérdidas por propagación, i.e., L_0 y $10n_1 \log\left(\frac{d_c}{d_0}\right)$, respectivamente. Los parámetros d_0 , d_c , L_0 , n_1 y n_2 se obtienen experimentalmente y dependen de las características del escenario.

1.3.6 Modelo de Pérdidas por Propagación de Egli.

El modelo empírico de propagación Egli es un modelo para estimar la cobertura de sistemas de transmisión de televisión en VHF y UHF, resultado de campañas de medición realizadas en varias ciudades grandes de los Estados Unidos [28]. Este modelo estima la pérdida de propagación de un trayecto en un enlace punto a punto, trayectos punto a multipunto, y normalmente se utiliza en transmisiones con línea de vista sobre terrenos ligeramente ondulados, con variaciones en alturas no mayores a 15.24 m (50 pies), aproximadamente. Las pérdidas por propagación en unidades logarítmicas se calculan haciendo uso de la siguiente expresión matemática:

$$L_b = 40 \log(d) + 20 \log(f) - 20 \log(h_t) + L_m, \quad (52)$$

con:

$$L_m = \begin{cases} 76.3 - 10 \log(h_r), & h_r \leq 10 \\ 85.9 - 20 \log(h_r), & h_r > 10 \end{cases} \quad (53)$$

donde, d (en Km) es la distancia entre el transmisor y el receptor; h_t (en m) y h_r (en m) son las alturas de las antenas de transmisión y recepción con respecto a la altura promedio del escenario, respectivamente; y f (en MHz) es la frecuencia de operación.

El rango de valores para los cuales el modelo de Egli es aplicable es el siguiente:

$$40 \leq f \leq 1000$$

$$1 \leq d \leq 60$$

1.3.7 Modelo de Pérdidas por Propagación de Okumura-Hata.

El modelo de propagación de Okumura-Hata es un modelo basado en una amplia campaña de medidas en escenarios urbanos, compuesto por una serie de curvas [29] y sus correspondientes expresiones matemáticas [30].

Las curvas normalizadas de Okumura corresponden a valores de la intensidad de campo eléctrico, inicialmente en escenarios urbanos para diferentes alturas efectivas de antenas de transmisión, en bandas de frecuencia de 50 MHz, 450 MHz y 900 MHz, para una potencia radiada aparente¹³ (PRA) de 1 KW, y una altura de antena en recepción de 1.5 m.

Se han realizado diferentes modificaciones en el modelo dependiendo del escenario: tierra, aire o mar, la ondulación del terreno, la presencia de obstáculos significativos, la altura de la antena de recepción, el valor de la PRA, la orientación de las calles o la densidad de edificios, en el caso de zonas urbanas. Con el propósito de hacer más sencilla la predicción de propagación haciendo uso de las curvas obtenidas por Okumura [29], Hata desarrolló una serie de expresiones que proporcionan las pérdidas básicas de propagación, L_b , para escenarios urbanos y adaptable a escenarios suburbanos y rurales [30].

La fórmula básica de pérdidas por propagación de Hata, L_b , para un escenario urbano, es la siguiente:

¹³ La Potencia Radiada Aparente (PRA) (en inglés *Effective Radiated Power (ERP)*) es el producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia en comparación a un radiador dipolo de media onda en una dirección dada, en unidades lineales.

$$L_{b,urbano} = 69.55 + 26.26 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \log(h_t)][\log(d)]^b. \quad (54)$$

donde, d (en Km) es la distancia entre el transmisor y el receptor; h_t (en m) y h_r (en m) son las alturas de las antenas de transmisión y recepción con respecto a la altura promedio del escenario, respectivamente; f (en MHz) es la frecuencia de operación; a es un factor de corrección por altura de la antena de recepción, el cual depende del tipo de ciudad, y se calcula para ciudad media o pequeña mediante (57), y para ciudad grande mediante (58), y b es un parámetro adimensional que hace que el modelo considere el efecto de curvatura de la tierra en distancias mayores a 20 Km y que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$b = \begin{cases} 1, & d \leq 20 \\ 1 + (0.14 + 0.000187 f + 0.00107 h'_t)[\log(0.05d)]^{0.8}, & d > 20 \end{cases} \quad (55)$$

donde:

$$h'_t = \frac{h_t}{\sqrt{1 + 0.000007 h_t^2}}. \quad (56)$$

La siguiente expresión matemática permite calcular el factor de corrección por altura de la antena de recepción para ciudades pequeñas o medianas:

$$a(h_r) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_r - (1.56 \log(f) - 0.8), \quad (57)$$

y la siguiente expresión matemática permite calcular el factor de corrección por altura de la antena de recepción para para ciudades grandes:

$$a(h_r) = a(h_r) = \begin{cases} 8.29 [\log(1.54h_r)]^2 - 1.1, & f \leq 300 \\ 3.2 [\log(11.75h_r)]^2 - 4.97, & f > 300 \end{cases} \quad (58)$$

Si el receptor se encuentra en una zona suburbana, caracterizada por edificaciones de baja altura y calles relativamente anchas, las pérdidas por propagación en unidades logarítmicas se expresan como:

$$L_{b,suburbano} = L_{b,urbano} - 2 \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5.4. \quad (59)$$

Si el receptor se encuentra en una zona rural, abierta, y sin obstrucciones en su entorno inmediato, las pérdidas por propagación son:

$$L_{b,rural} = L_{b,urbano} - 4.78 [\log(f)]^2 + 18.33 \log(f) - K, \quad (60)$$

donde, K puede tomar valores desde 35.94 (campo) a 40.94 (desierto).

Los rangos de valores para los cuales el modelo de Okumura-Hata es aplicable son los siguientes:

$$150 \text{ MHz} \leq f \leq 1500 \text{ MHz}$$

$$1 \text{ Km} \leq d \leq 100 \text{ Km}$$

$$30 \text{ m} \leq h_t \leq 100 \text{ m}$$

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

En la actualidad, Okumura-Hata es uno de los modelos más usados por su sencillez, razonable precisión y versatilidad. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, dado que las medidas se tomaron en Tokio,

la correlación entre las medidas reales y la predicción es muy dependiente de la similitud con el escenario de dicha ciudad.

1.3.8 Modelo de Pérdidas por Propagación de Longley-Rice.

El modelo de Longley-Rice o Modelo de Terreno Irregular (ITM, *Irregular Terrain Model*) es un modelo de gran importancia debido a que en su estudio [31] acoge gran variedad de perfiles y regiones [32], razón por la cual es utilizado por gran número de herramientas de predicción de propagación y de interferencias en servicios de enlaces punto a punto y punto a multipunto, en VHF y UHF [33]. El modelo de Longley-Rice se basa en la teoría electromagnética y el análisis estadístico, tanto de las características del terreno, como de las señales radioeléctricas y sus mediciones, permitiendo estimar la atenuación media de la señal radioeléctrica en función de la distancia y la variabilidad de la señal en tiempo y espacio [23]. El modelo de propagación incluye los efectos de refracción y difracción, modelando en este último caso objetos lejanos como filo de cuchillo [34] y objetos cercanos de forma cilíndrica, y es uno de los modelos de predicción de propagación más utilizados debido a que tiene en cuenta la rugosidad del terreno. El modelo de propagación fue considerado en el pasado en la Recomendación ITU-R P.1812 [24].

El modelo de propagación se compone de 2 algoritmos diferentes que se usan en distintas circunstancias y que se exponen a continuación [23]:

- Modelo de predicción de zonas de cobertura [23]: Este modelo solamente se aplica cuando se tiene información general sobre el escenario de implementación de sistemas de comunicaciones móviles y de radiodifusión, en el diseño general de los sistemas y en la discusión de problemas de interferencia entre este tipo de sistemas. Para el modelo de propagación es de gran importancia el factor de rugosidad del terreno (ΔH), la refractividad de la superficie (N_s) y las alturas medidas del terreno en función de las opciones que se busquen.
- Modelo de predicción punto a punto [23]: Este modelo de propagación se aplica cuando se tienen trayectos fijos y se conocen características generales del perfil del terreno. Se obtienen buenos resultados particularmente en el caso de evaluación de enlaces de comunicación específicos y al

resolver problemas de interferencia. No es válido sobre los estándares de enlaces de línea de vista y generalmente no se usa para estos casos¹⁴.

El modelo de Longley-Rice tiene en cuenta la información del perfil del terreno, para determinar aspectos importantes como la distancia al horizonte¹⁵ con respecto a la longitud total del enlace, considerando si en el trayecto hay línea de vista o si se presentan obstrucciones.

El rango de valores de frecuencia (en MHz) para el cual el modelo de Longley-Rice es aplicable es el siguiente:

$$20 \leq f \leq 20000 \quad (61)$$

1.4 MODELOS DE PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN

La difracción es el mecanismo por el cual las ondas de cualquier tipo se propagan alrededor de los obstáculos. En los trayectos obstruidos, la difracción es normalmente el mecanismo de propagación más importante y tiene lugar cuando en la trayectoria entre transmisor y receptor se encuentra un obstáculo de dimensiones considerablemente mayores que la longitud de onda de la señal [35]. En frecuencias altas, la difracción depende de la geometría del objeto, así como de la amplitud, fase y polarización de la onda incidente en el punto de difracción. El fenómeno de difracción se rige por el principio de Huygens, en el cual cada elemento de un frente de onda en un instante de tiempo puede ser considerado como el centro de una fuente secundaria, la cual genera nuevas ondas esféricas y un frente de onda conformado por la suma de éstas.

1.4.1 Zonas de Fresnel.

El impacto de un obstáculo puede ser evaluado cualitativamente e intuitivamente por el concepto de las zonas de Fresnel. La Fig. 12, presenta el principio básico al considerar la propagación de las ondas

¹⁴ El análisis de los enlaces por línea de vista es normalmente diferente del enfoque de ITM. Los niveles de señal estimados están cerca de los valores estimados por el modelo de espacio libre.

¹⁵ Distancia al horizonte es la distancia cubierta por una onda que se propaga en línea recta desde la antena transmisora hasta rozar tangencialmente la superficie de la Tierra.

radioeléctricas entre una antena transmisora y una antena receptora, se puede subdividir el espacio en un grupo de elipsoides, llamados elipsoides de Fresnel o zonas de Fresnel [36]. Las zonas de Fresnel corresponden a elipsoides cuyos focos se encuentran en los puntos de transmisión y recepción. La medida de la zona de Fresnel calculada en un valor específico de distancia entre el transmisor y el receptor, permite predecir si las obstrucciones en el trayecto de propagación afectarán el enlace de comunicación. Por definición de un elipsoide, todos los rayos que son reflejados en puntos del elipsoide tienen la misma longitud y por lo tanto el mismo tiempo de propagación. La excentricidad del elipsoide¹⁶ determina la longitud extra de propagación en comparación con la longitud de propagación LOS entre transmisor y receptor. Los elipsoides en los cuales esta distancia extra es igual a un entero múltiplo de $\lambda/2$ son los llamados elipsoides de Fresnel. La longitud adicional que debe ser recorrida por los rayos implica un cambio de fase, de tal manera que los elipsoides pueden ser descritos por los cambios de fase que ellos generan. Específicamente, el n -ésimo elipsoide de Fresnel genera un cambio de fase de $n \cdot \pi$ [1], [2]. Las zonas de Fresnel pueden ser utilizadas para explicar la ley de propagación d^{-4} indicada en el modelo de pérdidas por propagación de Dos Rayos (o modelo de tierra plana), considerando que la primera zona de Fresnel toca la tierra.

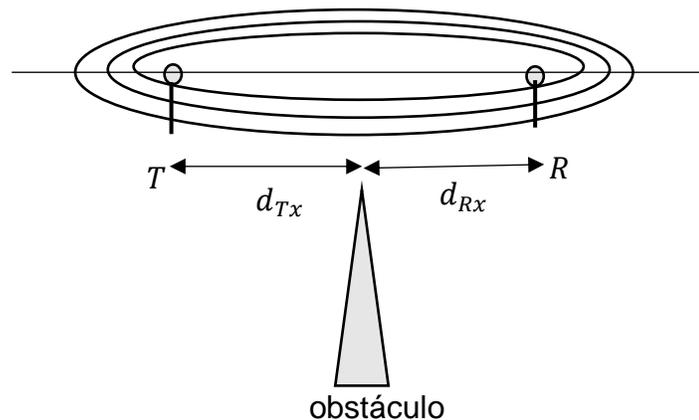


Fig. 12. Principio de elipsoides de Fresnel.

Fuente: Tomada de [1]

¹⁶Cociente entre la distancia de un foco de la elipse al centro y la longitud del semieje mayor, que indica cuánto se aparta una elipse de ser una circunferencia.

1.4.2 Difracción en Obstáculos

En trayectos de propagación se pueden encontrar uno o más obstáculos, y es importante considerar las pérdidas que éstos introducen. Los obstáculos pueden ser modelados en forma de una arista aguda (cuña) o filo de cuchillo, y una arista gruesa o redonda con un cierto grado de curvatura [36].

1.4.2.1 Obstáculo aislado

El modelo de obstáculo aislado resulta aplicable en los trayectos que, salvo esta obstrucción, son de visibilidad directa [2], es decir, la atenuación del trayecto se debe únicamente al obstáculo y el terreno que lo rodea no contribuye a dicha atenuación.

El cálculo de las pérdidas por difracción sigue la metodología de la Recomendación ITU-R P.256 [36] que distinguen dos casos de obstáculos aislados: obstáculo agudo y obstáculo redondeado.

1.4.2.2 Obstáculo agudo

En la Fig. 13 y Fig. 14, se ilustran los parámetros geométricos básicos para el estudio del obstáculo agudo [36], donde, T es el punto de transmisión; R es el punto de recepción; h (en m) es la altura del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto; d_1 (en Km) y d_2 (en Km) son las distancias desde los dos extremos del trayecto a la cima del obstáculo; θ (en rad) es el ángulo de difracción; y α_1 y α_2 (en rad) son los ángulos que desde los extremos permiten ver la cima del obstáculo.

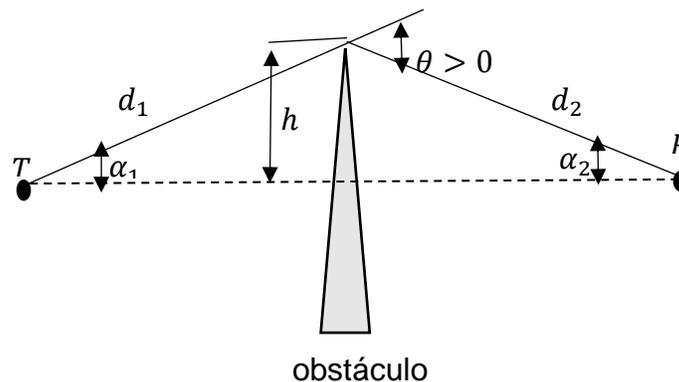


Fig. 13. Geometría obstáculo agudo $h > 0$.

Fuente: Tomada de [36].

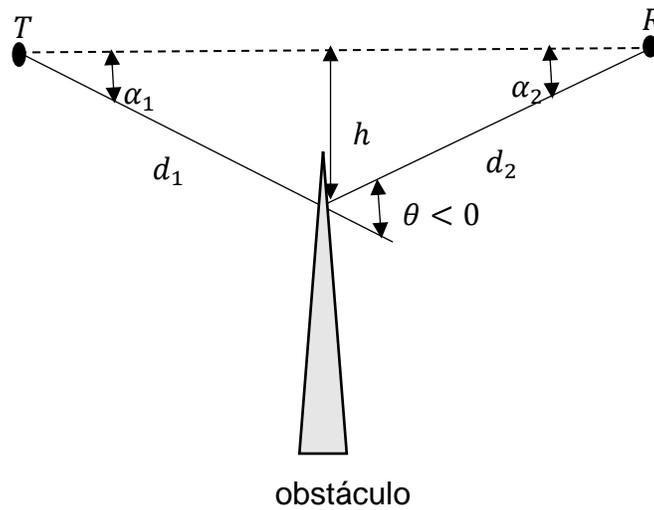


Fig. 14. Geometría obstáculo agudo $h < 0$.

Fuente: Tomada de [36].

Los anteriores parámetros geométricos se agrupan en un solo parámetro adimensional, que generalmente se designa por v y que se puede calcular de distintas maneras en función de los parámetros geométricos elegidos, tal como se presenta a continuación:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)}, \quad (62)$$

o

$$v = \theta \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}}, \quad (63)$$

$$v = \begin{cases} \sqrt{\frac{2h\theta}{\lambda}} & (v \text{ tiene el mismo signo que } h \text{ y } \theta) \\ \sqrt{\frac{2d}{\lambda} \alpha_1 \alpha_2} & (v \text{ tiene el mismo signo que } \alpha_1 \text{ y } \alpha_2) \end{cases} \quad (64)$$

En radiocomunicaciones, las pérdidas por difracción debido a un obstáculo agudo se calculan en función de v . Para v mayores que -0.7 , las pérdidas por difracción (en dB) pueden obtenerse de forma aproximada mediante la siguiente ecuación:

$$L_D = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right), \quad (65)$$

donde v esta dada por (64).

1.4.2.3 Dos obstáculos aislados

La Fig. 15 representa la geometría para dos obstáculos aislados que se encuentran dentro de una trayectoria de la señal, donde, $z_1 = z(0)$ (en m) es la altura absoluta de la antena transmisora; $z_2 = z(x_1)$ (en m) es la altura absoluta del obstáculo O_1 ; $z_3 = z(x_2)$ (en m) es la altura absoluta del obstáculo O_2 ; $z_4 = z(d)$ (en m) es la altura absoluta de la antena receptora; x_1 (en m) y x_2 (en m) son las distancias desde el punto T al obstáculo O_1 y al obstáculo O_2 , respectivamente.

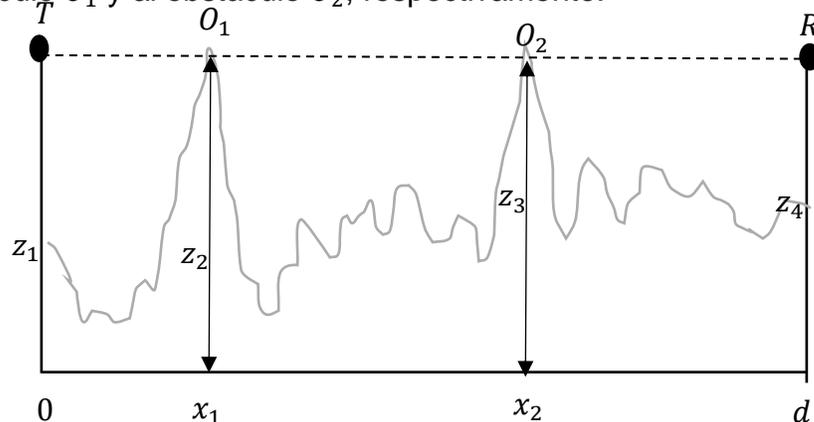


Fig. 15. Geometría de dos obstáculos aislados.

Fuente: Tomada de [2].

1.4.3 Cálculo de las Pérdidas por Difracción

A continuación, se indican cinco métodos y sus modelos para el cálculo de las pérdidas por difracción.

1.4.3.1 Método EMP

El método EMP se aplica cuando el rayo TR no corta a ningún obstáculo [2], sino que existe despeje negativo en ambos obstáculos como se presenta en la Fig. 16, esto es, para cada obstáculo se cumple que $-0.7 < v \leq 0$.

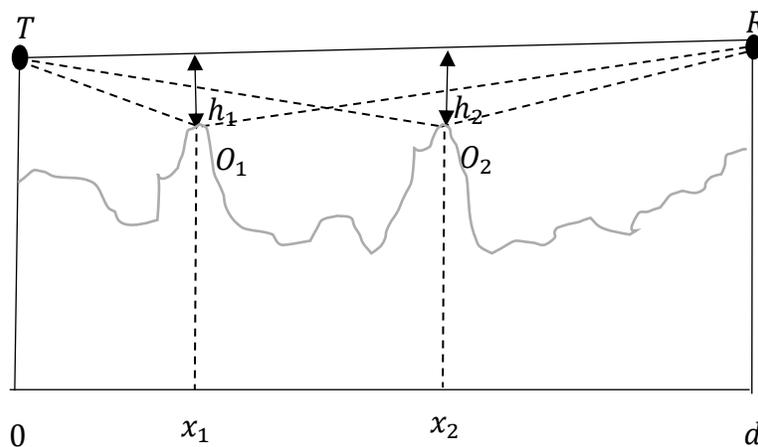


Fig. 16. Geometría de dos obstáculos aislado con despeje negativo.

Fuente: Tomada de [2].

En este caso las pérdidas por difracción son iguales a la suma de las pérdidas por difracción producidas por cada obstáculo de manera independiente o aislada, lo cual se indica en la siguiente expresión:

$$L_D = L_D(TO_1R) + (TO_2R) = L_D(v_1) + L_D(v_2), \quad (66)$$

donde, v_1 y v_2 se calculan con (64).

1.4.3.2 Método de Epstein-Peterson.

El método de Epstein-Peterson resulta apropiado cuando las pérdidas por difracción en cada obstáculo son similares [2]. Este método se utiliza cuando el rayo corta a los dos obstáculos como se presenta en la Fig. 17.

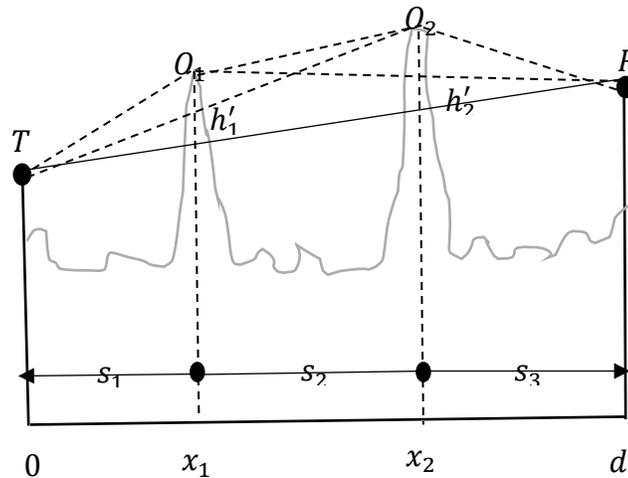


Fig. 17. Geometría de dos obstáculos aislados con despeje positivo.

Fuente: Tomada de [2].

La atenuación o pérdidas por difracción son iguales a las pérdidas en el subvano TO_1O_2 interceptado por O_1 con altura h'_1 , más las pérdidas en el subvano O_1O_2R interceptado por O_2 con altura h'_2 más un término de correlación L_c . Matemáticamente, las pérdidas por difracción se calculan haciendo uso de la siguiente expresión:

$$L_D = L_D(TO_1O_2) + L_D(O_1O_2R) = L_D(v'_1) + L_D(v'_2) + L_c, \quad (67)$$

donde, v'_1 y v'_2 se calculan con (64) y deben ser calculadas para h'_1 y h'_2 en O_1 y O_2 , respectivamente; y el término de corrección L_c se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_c = 10 \log \frac{(s_1 + s_2)(s_1 + s_2)}{s_2(s_1 + s_2 + s_3)}, \quad (68)$$

teniendo en cuenta que el término de correlación L_c se calcula cuando $L_D(v'_1)$ y $L_D(v'_2)$ son del orden de los 15 dB o mayores.

1.4.3.3 Método recomendación ITU-R P.256.

Si uno de los obstáculos es claramente dominante, se utiliza el método descrito en la Recomendación ITU-R P.256 [36], el cual evalúa su influencia con su altura real h_1 (en m) en el trayecto o vano total TR .

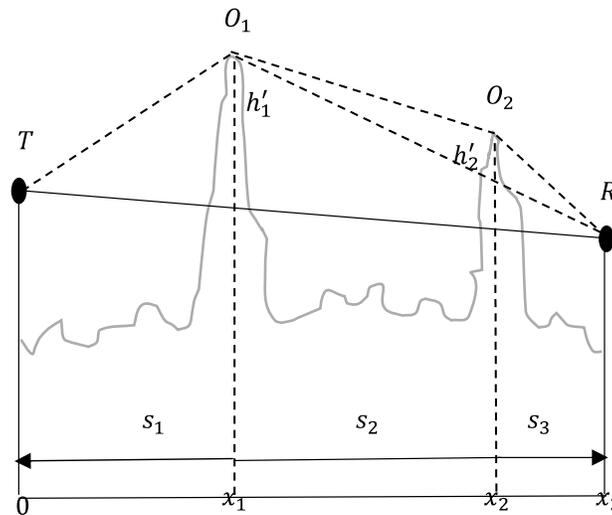


Fig. 18. Geometría de dos obstáculos aislados con un obstáculo dominante.

Fuente: Tomada de [2].

El método consiste en aplicar de manera independiente el método de pérdidas por difracción en un obstáculo agudo o filo de cuchillo a los dos obstáculos como se presenta en la Fig. 18, por lo tanto, las pérdidas por difracción se pueden expresar mediante la siguiente ecuación:

$$L_D = L_D(TO_1O_2) + L_D(O_1O_2R) = L_D(v_1') + L_D(v_2') - L_c, \quad (69)$$

donde, el termino de corrección L_c depende de la localización de los obstáculos y de sus alturas, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$L_c = \left[12 - 20 \log \left(\frac{2}{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \right) \right] \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{2v_1}, \quad (70)$$

donde, v_1 y v_2 se calculan con (64) para las alturas h_1 y h_2 , respectivamente; y α viene dado por:

$$\alpha = \arctan \sqrt{\frac{s_2(s_1 + s_2 + s_3)}{s_1s_3}}. \quad (71)$$

1.4.3.4 Método de Bullington.

El método de Bullington [1] consiste en modelar los múltiples obstáculos que están presentes entre el punto de transmisión T y el punto de recepción R por un obstáculo equivalente, el cual tiene una altura h y una posición dada por el cruce de líneas tangentes trazadas desde el punto de transmisión T y el punto de recepción R a los obstáculos de mayor elevación visibles por ellos, respectivamente, de tal forma que todos los obstáculos toquen las líneas o queden debajo de ellas, como se presenta en la Fig. 19 la difracción resultante se puede calcular con el procedimiento de obstáculo agudo (Ver Sección 1.4.2.2).

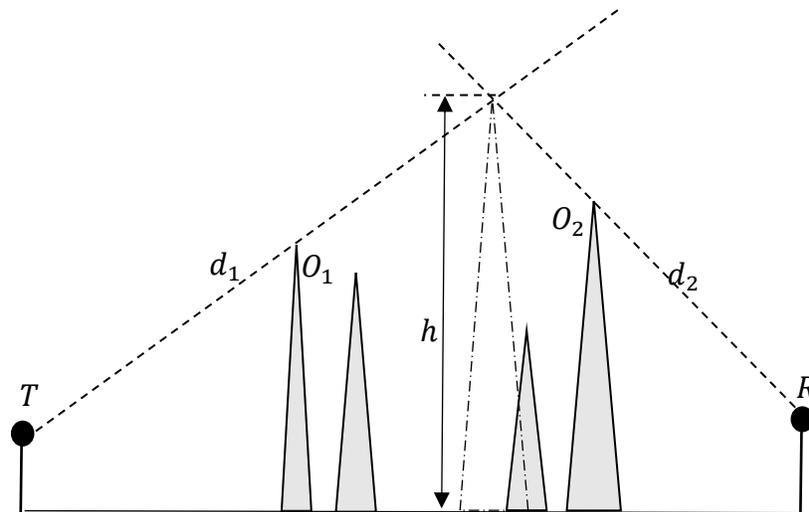


Fig. 19. Concepto del método de Bullington.

Fuente: Tomada de [1].

1.4.3.5 Método de Deygout

El método de Deygout [34] consiste en calcular el parámetro v en (64) para cada obstáculo individualmente, como si los otros obstáculos no existieran, es decir, el parámetro v se calcula para los trayectos $T-O_1-R$, $T-O_2-R$ y $T-O_3-R$, considerando la Fig. 20. El obstáculo con el mayor valor del parámetro v se identifica como el obstáculo principal e inicialmente se calculan las pérdidas por difracción para este obstáculo, esto es, considerando el trayecto $T-O_2-R$. Adicionalmente, se calculan las pérdidas por difracción de manera independiente usando (65) para cada uno de los obstáculos secundarios incluyendo el obstáculo principal, esto es, en el trayecto $T-O_1-O_2$ y en el trayecto O_2-O_3-R . La suma de las tres pérdidas por difracción calculadas permite determinar las pérdidas por difracción, tal como se presenta a continuación:

$$L_D = L_{O_1} + L_{O_2} + L_{O_3}, \quad (72)$$

donde, L_{O_1} (en dB) son las pérdidas por difracción del trayecto $T-O_2-R$; L_{O_2} (en dB) son las pérdidas por difracción del trayecto $T-O_1-O_2$; y L_{O_3} (en dB) son las pérdidas por difracción del trayecto O_2-O_3-R .

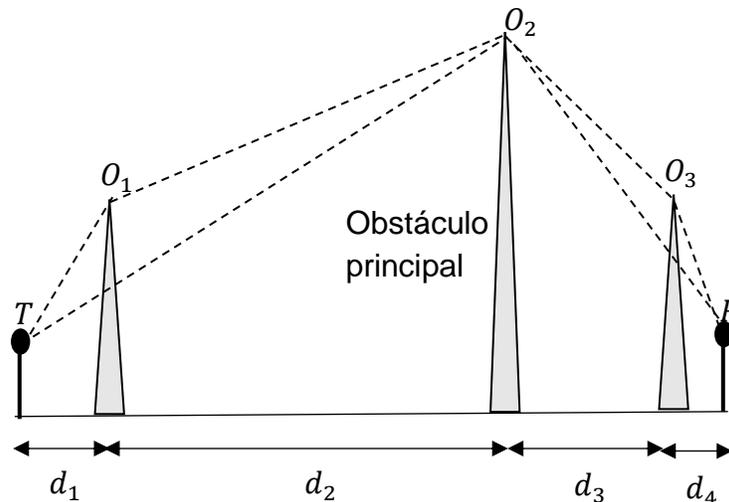


Fig. 20. Concepto del método de Deygout.

Fuente: Tomada de [34].

1.5 MÉTODOS PARA LA COORDINACIÓN DE USO DE FRECUENCIAS Y LA DEFINICIÓN DE ÁREAS DE SERVICIO Y CONTORNOS INTERFERENTES

Debido al congestionamiento del espectro por la demanda de frecuencias asociadas a los existentes y nuevos servicios de telecomunicaciones, se hace necesario coordinar el uso de las bandas de frecuencia y buscar nuevas formas para su compartición, de tal manera que se haga un uso eficiente de los recursos radioeléctricos, lo que a su vez implica niveles de interferencia por debajo de los valores aceptables. Para garantizar que los servicios coexistan de la mejor manera, se necesita estimar y analizar las áreas de servicio, los contornos interferentes, y las posibles interferencias entre servicios [4, 19, 20].

En VHF y UHF operan principalmente sistemas de radiodifusión (sonora y video) y sistemas de radio móvil. La compartición de frecuencias y la separación espacial entre servicios móviles terrestres y servicios de radiodifusión (sonora y televisión) en las bandas VHF y UHF se describen en la

Recomendación UIT-R SM.851 [37]. El funcionamiento satisfactorio de ambos servicios se especifica por la máxima intensidad del campo eléctrico interferente incidente en los receptores, lo que determina el contorno interferente. Los servicios de radiodifusión basados en modulación angular definen el valor medio de campo eléctrico que asegura su protección frente a interferencia, lo que permite definir el área de servicio. En el caso específico de la televisión, los valores de campo eléctrico son definidos por la Recomendación UIT-R BT.417 [38].

En Colombia, y en el caso específico de los sistemas de radiodifusión sonora en frecuencia modulada (FM), el valor de campo eléctrico mínimo utilizable que permite definir el área de servicio es de 66 dBuV/m, el cual se encuentra especificado en el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora (PTNRS) en FM [39]. El área de servicio de un sistema de radiodifusión sonora en FM se determina en función de: la Potencia Isótropa Radiada Equivalente¹⁷ (PIRE) o Potencia Radiada Aparente (PRA); la ubicación de las antenas y sus características físicas y eléctricas; de las características topográficas de la zona a cubrir; de la intensidad de campo eléctrico mínimo utilizable; del nivel máximo de señal interferente; de la distancia entre transmisores que operen en el mismo canal o canales adyacentes, y de factores relacionados con la propagación de ondas electromagnéticas, entre otros [39]. Procedimientos muy similares se aplican para sistemas de televisión en VHF. En los sistemas y servicios de Radio Móvil Privado (PMR, *Private Mobile Radio*) y de Radio Móvil de Acceso Público (PAMR, *Public Access Mobile Radio*) se tienen en cuenta parámetros de los elementos de transmisión y recepción, tales como la PIRE o la PRA y la sensibilidad del receptor¹⁸, los cuales permiten determinar el área de servicio o el alcance de este tipo de sistemas de comunicación.

La radiodifusión representa un ejemplo de compartición de una banda de frecuencias por parte del mismo servicio (compartición intraservicio). Para garantizar la Compatibilidad Electromagnética (EMC, *Electromagnetic Compatibility*) entre diferentes estaciones debe haber una adecuada separación en frecuencia y en distancia, el cual es el principio fundamental para asegurar que las asignaciones no produzcan interferencias mutuas. Una de las reglas básicas de compartición de frecuencias es el cumplimiento de un plan de asignación de canales bien definido, el cual puede incluir normas

¹⁷ Potencia Isótropa Radiada Equivalente (PIRE) (en inglés *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP)) es el producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia en comparación a una antena dipolo de media onda en una dirección dada, , en unidades lineales.

¹⁸ La sensibilidad de los receptores de radio móvil se define como el mínimo valor de voltaje (en μV) en la entrada del receptor que permite lograr una Relación Señal a Ruido más Distorsión (SINAD, *Signal to Noise and Distortion Ratio*) de 12 dB, a partir de la cual se puede determinar la mínima potencia de la señal a la entrada del receptor o el mínimo valor de campo eléctrico incidente utilizable en la antena de recepción. Este mínimo valor de campo eléctrico utilizable puede ser transformado en un valor de campo eléctrico mediano al considerar factores de degradación relacionados a ruido, interferencia y multitrayectoria, entre otros.

secundarias específicas para cada país. Cuando se cumple con estas reglas básicas se evita interferencias, aunque no se asegura un uso o asignación eficiente de los recursos espectrales. Para estaciones de radiodifusión sonora en FM existen recomendaciones de separación como las establecidas en la Recomendación UIT-R BS.412 [40]. Una circunstancia especial en el caso de la banda de radiodifusión sonora en FM es que se encuentra junto a la banda de radionavegación aeronáutica, la cual se encuentra por encima de los 108 MHz y puede conducir a situaciones en las que una estación de FM de gran alcance podría afectar el funcionamiento de los Sistemas de Aterrizaje por Instrumentos (ILS, *Instrument Landing System*). En Colombia, y en el caso específico de los sistemas de radiodifusión sonora en FM, existe un plan de canales en el Apéndice A del PNTRS en FM, el cual es un plan de distribución de canales [41].

La coordinación internacional en la asignación de frecuencias es de suma importancia para garantizar un funcionamiento estable y libre de interferencias de los servicios de radio cerca de las zonas fronterizas.

La relación de protección es el valor mínimo de la relación entre la potencia de la señal deseada y la potencia de la señal de interferencia a nivel de radiofrecuencia, que permite garantizar una calidad de recepción dada, en condiciones determinadas y en un punto específico [42] y se convierten en uno de los criterios principales para la protección contra la interferencia de los servicios de radiocomunicaciones. A menudo, las relaciones de protección necesarias para proteger a un determinado servicio de radiocomunicaciones o aplicación se establecen a través de procesos experimentales. Las relaciones de protección se presentan a menudo en forma de tabulaciones que muestran una relación de protección variable en función de la separación entre frecuencias centrales del servicio víctima de interferencia y los servicios interferentes. La relación de protección brinda protección al área de servicio, que corresponde al contorno que define el mínimo campo eléctrico utilizable alrededor del transmisor. En el caso de los sistemas de radiodifusión sonora en FM, los estudios técnicos deben incluir los parámetros técnicos esenciales de la estación, lo que incluye las características técnicas de los equipos de transmisión y el patrón de radiación de la antena, de tal forma que se demuestre que desde el sitio de ubicación del sistema de transmisión cubre el 100% del área de servicio asignada y cumple con las protecciones a las estaciones de radiodifusión sonora en el mismo canal y en canales adyacentes a 100 KHz, 200 KHz, 300 KHz y 400 KHz [39]. Específicamente en Colombia, para sistemas de radiodifusión sonora en FM, las relaciones de protección para estaciones clases A, B y C¹⁹ a fin de evitar interferencias objetables entre estaciones que operan en el mismo canal y en canales adyacentes a más o menos 100

¹⁹ PRA desde 250 W hasta 100 KW.

KHz, 200 KHz, 300 KHz y 400 KHz son 37 dB, 25 dB, 7 dB, -7 dB y -20 dB, respectivamente, y para estaciones clase D²⁰, las relaciones de protección son 6 dB, 3 dB, 0 dB, -7 dB y -20 dB, respectivamente [39].

A modo de ejemplo, las siguientes recomendaciones pueden ser mencionadas al final de esta sección: las Recomendaciones ITU-R BS.216 [43] e ITU-R BS.641 [44] relacionadas con la relación de protección para radiodifusión sonora; la Recomendación ITU-R BS.412 [40] relacionada con estándares de planeación de radiodifusión sonora terrestre en FM y en VHF; la Recomendación ITU-R BT.417 [38] relacionada con intensidades de campo eléctrico mínimas para solicitar protección en la planificación de un servicio de televisión analógica terrestre; la Recomendación ITU-R F.1670 [45] relacionada con la protección de sistemas inalámbricos fijos de vídeo digital terrestre y los sistemas de radiodifusión sonora en bandas compartidas en VHF y UHF; la Recomendación ITU-R M.441 [46] relacionada con la relación señal a interferencia e intensidades del campo necesarias en el servicio móvil aeronáutico (R) por encima de 30 MHz; y las Recomendaciones ITU-R M.1802 [47] e ITU-R M.1462 [48] relacionada con características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radio localización en la banda de frecuencias 30-300 MHz y 420-450 MHz, respectivamente, entre muchas otras.

1.6 RECOMENDACIONES DE MÍNIMA SEPARACIÓN EN DISTANCIA Y FRECUENCIA

Las reglas de separación en frecuencia y distancia son un elemento importante del proceso de gestión del espectro radioeléctrico. La separación en distancia es la distancia de separación mínima que se requiere entre fuentes en sistemas de comunicación inalámbricos operando en la misma frecuencia. La separación en frecuencia es la separación mínima entre fuentes en sistemas de comunicación inalámbricos operando desde un mismo sitio o región en canales adyacentes. Estas separaciones en frecuencia y distancia son el principio fundamental para asegurar la operación de sistemas de comunicaciones sin interferencias mutuas [4].

Existen principios en los criterios de planeación y asignación de frecuencias que permiten determinar la distancia de separación entre sistemas de comunicación operando en la misma frecuencia. Para proteger un servicio con un área de cobertura operacional circular (servicio circular), se recomienda de

²⁰ PRA menor a 250 W.

manera general una separación desde su área de servicio no menor a 5 veces el radio de servicio con respecto al área de servicio de otros sistemas operando en la misma frecuencia y en algunos casos específicos incluye distancias del horizonte radioeléctrico [49]. Para establecer distancias de separación geográfica entre estaciones que operan en la misma frecuencia en VHF, cuya área de servicio se extiende hasta el horizonte radio eléctrico, se recomienda una relación de protección de 14 dB (relación de distancia de 5 a 1) respecto a las señales deseadas/ no deseadas (D/U), para así proporcionar frente a las interferencias cocanal. Una manera de hacerlo es empleando la fórmula de atenuación en el espacio libre (FSL) a efectos de calcular la atenuación en el espacio libre de la señal deseada (FSL_D) y la atenuación en el espacio libre de la señal no deseada (FSL_U) como se muestra a continuación:

$$FSL = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d), \quad (73)$$

donde f (en MHz) es la frecuencia y d es la distancia en Km.

Comparando FSL_D en función de FSL_U , la sustracción de estas fórmulas da como resultado:

$$FSL_U - FSL_D = 20 \log dU - 20 \log dD, \quad (74)$$

$$= 20 \log \left(\frac{dU}{dD} \right), \quad (75)$$

Si:

$$FSL_U - FSL_D = 14 \text{ dB}, \quad (76)$$

$$\log \left(\frac{dU}{dD} \right) = \frac{14}{20} = 0.7; \quad (77)$$

En tal caso:

$$\frac{dU}{dD} = 5.01. \quad (78)$$

Cuando los sistemas operan en el mismo sitio y en frecuencias cercanas, las frecuencias de operación se asignan considerando los posibles efectos de interferencia de canal adyacente debida a la selectividad de los filtros empleados en transmisión y recepción [4]. Los siguientes factores cuantifican los efectos correlacionados entre transmisores interferentes y receptores víctimas para varias separaciones en distancia y frecuencia: Rechazo en Función de la Frecuencia (FDR, *Frequency Dependent Rejection*), la cual es una medida de rechazo producida por la curva de selectividad de un receptor sobre una transmisión no deseada; y la Frecuencia-Distancia (FD, *Frequency-Distance*), la cual es una medida de la mínima separación en distancia que es requerida entre un receptor víctima y un transmisor interferente como función de la diferencia entre sus frecuencias de operación [50].

FD y FDR pueden brindar soluciones de mínima separación en frecuencia y distancia a problemas de interferencia co-canal e interferencia de canal adyacente, las cuales son requeridas para lograr un adecuado desempeño de los receptores. El FDR puede ser obtenido a través del análisis de las características espectrales de las señales radio o por medidas de campo con equipo especializado. La FDR puede ser dividida en dos términos: el Rechazo Dentro de Banda (OTR, *On-Tune Rejection*) y el Rechazo Fuera de Banda (OFR, *Off-Frequency Rejection*). El OTR es el rechazo brindado por la selectividad del receptor a un transmisor que opera en la misma frecuencia como resultado de una señal transmitida que excede el ancho de banda del receptor. El OFR es un rechazo adicional que resulta de la transmisión fuera de banda del transmisor interferente al receptor [50].

En el caso de facilidades de comunicaciones en frecuencias de 30 MHz a 466 MHz proveyendo servicios más allá del horizonte radioeléctrico [51] y en los cuales no existe un requerimiento operacional para el uso de frecuencias comunes por grupos de facilidades, la separación geográfica entre facilidades operando en la misma frecuencia debe ser no menor a la requerida para lograr una relación de protección igual a 14 dB. Si existe un requerimiento operacional para el uso de frecuencias comunes por grupos de facilidades, la distancia de separación debe ser no menor que la suma de distancia desde cada punto al horizonte radioeléctrico asociado [52].

Para un uso eficiente de las frecuencias y asegurar una operación libre de interferencia, la planeación de sistemas radio debe estar basada sobre el conocimiento preciso de los equipos y elementos utilizados y de las características del escenario de implementación.

La Recomendación ITU-R SM.337 [53] define los factores o criterios a tener en cuenta para asegurar una adecuada separación FD. Desde el punto de vista del receptor se tienen en cuenta: potencia de señal recibida, selectividad del receptor, potencia y distribución espectral del ruido, nivel de las señales interferentes captadas por el receptor, características del receptor, entre otros. Desde el punto de vista del transmisor se tienen en cuenta: radiaciones fuera del ancho de banda ocupado por la emisión y características del transmisor. Desde el punto de vista del canal se deben tener en cuenta: las propiedades del medio de transmisión (las cuales son variables) y las pérdidas por propagación de las señales radio en función de la frecuencia y la distancia.

1.6.1 Método de la Recomendación ITU-R SM.337-6

La Recomendación ITU-R SM.337-6 [53] describe los procedimientos para calcular la separación en frecuencia y en distancia entre sistemas de transmisión a fin de lograr un nivel de interferencia aceptable.

El cálculo de interferencia se basa en dos factores: espectral y espacial. El factor espectral viene representado por el factor de Rechazo Fuera de Canal (OCR, *Off-Channel-Rejection*), $OCR(\Delta f)$, que se define por la siguiente expresión:

$$OCR(\Delta f) = -10 \log \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) df}, \quad (79)$$

donde, $P(f)$ (en W/Hz) es la densidad espectral de potencia de la señal interferente; $H(f)$ es la respuesta en frecuencia intermedia (FI) del receptor víctima de interferencia; y Δf es la diferencia entre la frecuencia de recepción del receptor interferido y la frecuencia del transmisor interferente. El factor $OCR(\Delta f)$ depende en gran medida de la magnitud de la señal interferente y la banda de paso del receptor víctima de interferencia. Cuando Δf aumenta, el resultado del producto y su área bajo la curva disminuye, lo que implica una potencia de interferencia más baja o, de manera equivalente, valores más elevados de $OCR(\Delta f)$. El factor espacial de la metodología se refiere al cálculo de la atenuación de la señal en función de la distancia. Este factor se encuentra estrechamente relacionado con el modelo de pérdidas por propagación bajo consideración y la distribución estadística de la señal interferente en la entrada del receptor víctima de interferencia.

La interferencia se considera tolerable si se satisface la siguiente desigualdad:

$$P_d - P_i \geq \alpha, \quad (80)$$

donde, P_d (en dBW) es el nivel de la señal deseada; P_i (en dBW) es el nivel de la señal interferente; y α (en dB) es la relación de protección [17].

La Recomendación describe un procedimiento para determinar la mínima separación en frecuencia y en distancia, el cual puede resumirse en dos etapas.

Etapa 1: Determinar el nivel de la señal deseada, P_d (en dBW), en la etapa de entrada del receptor interferido.

Etapa 2: Se calcula el nivel de potencia de interferencia resultante en la entrada del receptor víctima de interferencia, aplicando el siguiente balance de enlace:

$$P_i = P_t + G_r - L_p - OCR(\Delta f), \quad (81)$$

donde, P_t (en dBW) es la PIRE del transmisor interferente; G_r (en dBi) es la ganancia de la antena receptora en comparación a un radiador isótropo; L_p (dB) es la pérdida de propagación en el trayecto; y $OCR(\Delta f)$ es el factor de rechazo fuera de canal para una separación de frecuencia Δf expresado en (79).

1.7 INTERFERENCIA

La calidad de funcionamiento de un sistema radioeléctrico, debido a que depende tanto de la potencia de la señal portadora, como de la señal interferente (relación portadora / interferencia) [54], es altamente afectada por la interferencia procedente de otro u otros sistemas [2].

Para estudiar y evaluar la interferencia, se hace uso del modelo expuesto en la Fig. 21, en el cual se representan dos enlaces: uno deseado (ED) y otro interferente (EI), y sus parámetros radioeléctricos de interés se denotan con los subíndices 'D' e 'I', respectivamente.

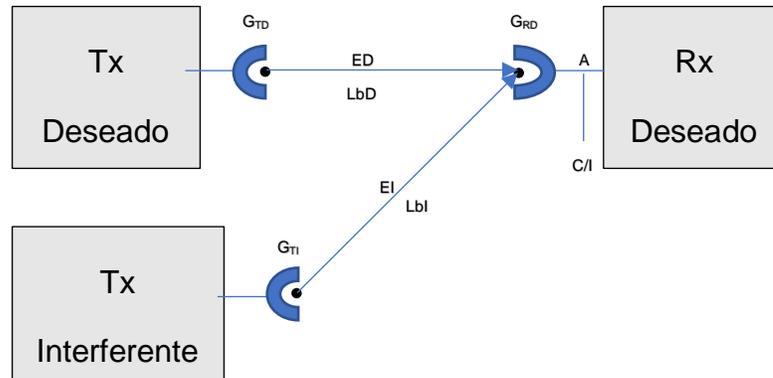


Fig. 21. Representación de dos enlaces, interferente y deseado.

Fuente : Tomada de [2].

Las interferencias se pueden clasificar según el número de fuentes, así, se tienen las simples que es cuando hay una sola señal interferente, y las múltiples que es cuando existen varias fuentes interferentes. También se distingue entre interferencia cocanal, que es la interferencia que se produce en la misma frecuencia portadora de la señal deseada, e interferencia de canal adyacente, en la cual la frecuencia de la señal interferente corresponde a canales contiguos al de la señal deseada, como se explicará en sus correspondientes subsecciones.

Aplicando las ecuaciones de balance del enlace a los enlaces deseado e interferente del modelo de la Fig. 21, se tiene en la interfaz A del sistema receptor del enlace deseado lo siguiente:

a. Potencia recibida de señal deseada:

$$P_{rD} = P_{tD} + G_{tD} - L_{bD} + G_{rD}, \quad (82)$$

donde, P_{rD} (en dBm) es la potencia recibida de la señal deseada; P_{tD} (en dBm) es la potencia de transmisión de la señal deseada; G_{rD} (en dBi) y G_{tD} (en dBi) son las ganancias de recepción y de transmisión respectivamente; y L_{bD} (en dB) son las pérdidas básicas.

b. Potencia recibida de señal interferente:

$$P_{rI} = P_{tI} + G_{tI} - L_{bI} + G_{rI}, \quad (83)$$

donde, P_{rI} (dBm) es la potencia recibida de la señal interferente; P_{tI} (en dBm) es la potencia de transmisión de la señal interferente; G_{rI} (en dBi) y G_{tI} (en dBi) son las ganancias de recepción y de transmisión de las antenas respectivamente; y L_{bI} (en dB) son las pérdidas básicas.

En (82) y (83) se deben evaluar las ganancias de antena en la dirección de los trayectos deseado e interferente. La relación portadora/interferencia es entonces:

$$\frac{C}{I} = P_{rD} - P_{rI} = P_{tD} - P_{tI} + (G_{tD} + G_{rD}) - (G_{tI} + G_{rI}) + (L_{bI} - L_{bD}). \quad (84)$$

donde, $\frac{C}{I}$ (en dB) es la relación portadora/interferencia; P_{rD} (dBm) es la potencia recibida de la señal deseada; y P_{rI} (dBm) es la potencia recibida de la señal interferente.

La relación C/I considerando varias fuentes interferentes se presenta en la siguiente ecuación:

$$\frac{C}{I} = P_{rD} - 10 \log \left(\sum_{i=1}^n p_{rI_i} \right), \quad (85)$$

donde,

$$p_{rI_i} = 10^{0.1P_{rI_i}} \quad (86)$$

y

$$P_{rI_i} = P_{tI_i} + G_{tI_i} - L_{bI_i} + G_{rI_i}. \quad (87)$$

1.7.1 Interferencia Cocanal

La interferencia cocanal es causada por la presencia de señales deseadas e interferentes que operan en la misma frecuencia en un receptor.

El nivel de esta interferencia depende de las frecuencias de operación, de las características del escenario de despliegue, de las características de transmisión y recepción.

Un caso especial de interferencia cocanal se presenta en el momento de planificar e implementar sistemas de comunicación móvil celular, ya que estos sistemas hacen reuso de frecuencias [4].

1.7.2 Interferencia de Canal Adyacente

Esta interferencia se puede presentar debido a una señal interferente que opera en el canal adyacente y su nivel depende de las características de rechazo o filtrado del receptor víctima de interferencia. Sus efectos son el resultado de la interacción entre las señales deseadas, la interferencia y las características del receptor víctima de interferencia para varias separaciones en frecuencia. Estos pueden ser expresados en términos de separación frecuencia-distancia²¹, el requerimiento FDR²² o la relación de protección de canal adyacente específica del sistema [4].

1.7.2.1 Desensibilización o bloqueo

Es un caso especial de interferencia de canal adyacente, que puede ocurrir cuando un transmisor interferente opera en estrecha proximidad física a un receptor, haciendo que la señal interferente sea lo suficientemente fuerte en el receptor, conduciéndolo a una condición de saturación, y no permitiéndole captar las señales deseadas.

El nivel de desensibilización depende de la capacidad del receptor para resistir un impacto tan fuerte, que suele ser descrito por una función de rechazo, la cual depende de la separación en frecuencia entre la frecuencia central del receptor víctima de interferencia y la frecuencia de la señal interferente [4].

²¹ Hace referencia a la distancia de separación mínima que se requiere entre un receptor y un transmisor interferente en función de la separación entre sus frecuencias [4] Unión Internacional de Telecomunicaciones and Ministerio de Tecnologías de Información y las Comunicaciones de Colombia, *Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico: Ingeniería del Espectro Radioeléctrico (Título II)*, Bogotá, Colombia, 2012.

²² Filtro de atenuación, parámetro de selectividad del receptor víctima de interferencia [4]Ibid. (Ver Sección 1.6.)

1.7.3 Interferencia Admisible

Interferencia observada o prevista que satisface los criterios cuantitativos de interferencia y de compartición que figuran en el Reglamento de Radiocomunicaciones [55].

1.7.4 Interferencia Aceptada

Interferencia con un nivel de potencia mayor al definido como interferencia admisible, que ha sido acordada entre dos o más administraciones sin perjuicio para otras administraciones [55].

1.7.5 Interferencia Perjudicial

Interferencia que compromete, degrada, interrumpe repetidamente, o impide el funcionamiento de un servicio de radiocomunicación explotado de acuerdo con el reglamento de radiocomunicaciones [55].

1.7.6 Zona de Servicio

Zona asociada a una estación para un servicio dado y una frecuencia específica en el interior de la cual y en condiciones técnicas determinadas, puede establecerse una comunicación vía radio con una o varias estaciones ya existentes o previstas, y en la que debe respetarse la protección fijada por un plan de asignación o adjudicación de frecuencias, o por cualquier otro acuerdo entre las partes interesadas [42].

1.7.7 Contorno de interferencia

Contorno de los puntos que rodean a un transmisor, en los cuales el valor medio de intensidad de campo eléctrico es el máximo valor que se considera no causa interferencias dentro del área de servicio de otro transmisor [56].

1.7.8 Zona de Coordinación

Es el área que rodea a una estación de radio móvil terrestre que comparte la misma banda de frecuencias con otras estaciones móviles terrestres, fuera de la cual no se rebasa el nivel de interferencia admisible. La zona de coordinación se determina sobre la base de las características conocidas de la estación móvil terrestre coordinadora, los parámetros de otras estaciones terrestres, o de estaciones receptoras que comparten la misma banda de frecuencias, y sobre hipótesis prudentes de estimación de propagación de las señales. Cabe resaltar que la zona de coordinación no es una zona de exclusión, dentro de la cual se prohíbe compartir frecuencias entre estaciones terrestres, sino que es una zona dentro de la cual hay que realizar cálculos y medidas adicionales que permitan demostrar que es posible compartir frecuencias dentro de la zona de coordinación [55].

1.7.8.1 Zona de coordinación para estaciones del servicio radio móvil terrestre

Para una estación del servicio radio móvil terrestre, la zona de coordinación se determina ampliando la zona de servicio especificada, abarcando otras estaciones de otro operador del servicio radio móvil terrestre, y considerando la distancia de coordinación o de separación mínima predeterminada por normas internacionales o de una administración local.

CAPITULO II

2 ADAPTACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE PREDICCIÓN DE COBERTURA

Una de las principales preguntas que se abordan en cuanto al tema de interferencia es: ¿cuál es la ubicación de los sistemas que afectan y se ven afectados por interferencia?. En la mayoría de los casos, esto implica analizar la propagación de las señales radio a lo largo de una línea o en un área alrededor de las estaciones de transmisión, lo cual se puede realizar mediante el uso de herramientas de estimación de cobertura, las cuales permiten a los operadores y reguladores dimensionar la complejidad de los despliegues necesarios para cubrir la demanda de servicio o analizar la EMC entre las emisiones que comparten el espectro radioeléctrico.

La mayoría de las herramientas para la estimación de cobertura radioeléctrica actuales son usadas generalmente por grandes empresas del sector de las telecomunicaciones. Estas utilizan modelos de propagación adaptados para escenarios específicos y poseen licencias de uso cuyo costo es proporcional a la calidad de los resultados obtenidos, sin embargo, muchas de estas herramientas no son de código abierto, es decir que no permiten ser utilizadas o modificadas para adaptarse de mejor manera a características específicas, en este caso, de los escenarios colombianos, a los parámetros de operación, y a las características de equipos y elementos que hacen parte de las redes de comunicación móvil en frecuencias desde 30 MHz a 470 MHz. Por lo tanto, para el presente trabajo se hace uso de una herramienta de estimación de cobertura radioeléctrica de código abierto desarrollada como un trabajo de investigación previo en la Universidad del Cauca [7], la cual se basa en un GIS de uso libre, y es adaptada para utilizar información geográfica de Colombia y aplicar principios generales de propagación y modelos de pérdidas por propagación para estimar la cobertura de los sistemas de comunicación en las frecuencias ya mencionadas, con el fin de obtener resultados que permitan analizar de forma gráfica la cobertura de las Estaciones Base o Estaciones Repetidoras (RS, *Repeater Station*) de los sistemas de radio móvil considerando el escenario Colombiano.

2.1 METODOLOGIA DE DESARROLLO

Para realiza el análisis de interferencia con ayuda de los modelos de propagación, se hizo uso de una herramienta prototipo software desarrollada en un trabajo de grado de la Universidad del Cauca [7], la cual lleva el nombre de “Herramienta Prototipo Software de Estimación de Cobertura Radioeléctrica para

la Planificación de una Red IoT” y debido a que la herramienta se diseñó para fines de sistemas IoT, hubo la necesidad de modificarla.

La modificación de la herramienta se llevó a cabo bajo la metodología del Proceso Unificado Ágil (AUP, *Agile Unified Process*), la cual es una metodología iterativa e incremental, en la cual el trabajo se divide en proyecto más pequeños, los cuales contienen especificaciones y por medio de iteraciones se va incrementando la funcionalidad del sistema de manera progresiva. La metodología incluye las siguientes fases: requerimientos, diseño, implementación, pruebas y resultados, como se presenta en la Fig. 22.

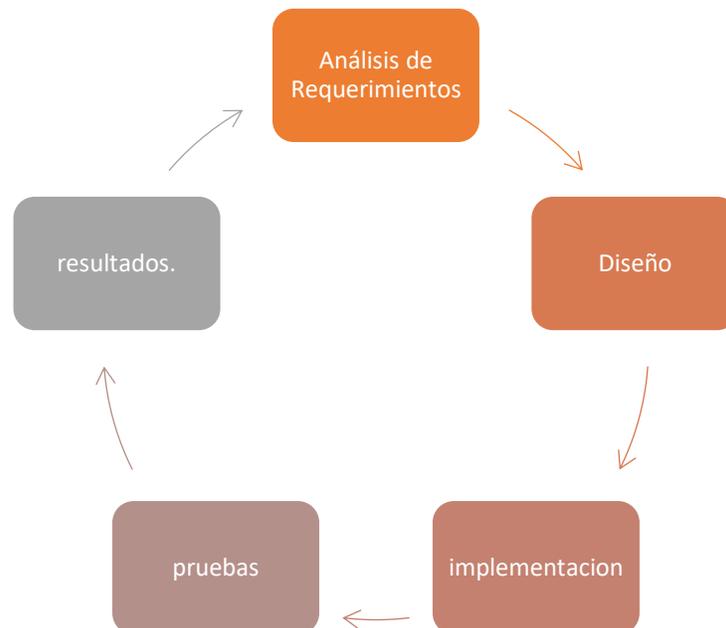


Fig. 22. Fases de la metodología de desarrollo.

Fuente: Elaboración propia.

2.2 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Partiendo del hecho de que este trabajo de grado hace parte del proyecto de la ANE de la convocatoria de 2021, como proyecto titulado: “Análisis de Interferencia de Sistemas de Comunicaciones Operando en VHF en Función de la Frecuencia y la Distancia” [6], se tuvo en cuenta que los sistemas de comunicación de mayor interés para la ANE son los sistemas de radio móvil convencional²³. Por lo anterior, se consideró de gran importancia identificar, seleccionar y caracterizar parámetros técnicos de análisis, en especial, aquellos que permiten el análisis de la señal en el peor de los casos, es decir, teniendo en cuenta parámetros con valores extremos (máximos o mínimos), los cuales en un análisis de interferencia garantizan el mayor aislamiento de los sistemas de comunicaciones frente a la interferencia.

Por lo anterior, se hizo necesario buscar una herramienta software adecuada que, permitiera caracterizar a detalle el territorio colombiano y su orografía; introducir códigos de los modelos de propagación útiles en las bandas de interés; considerar los parámetros del sistema de comunicaciones; y estimar la cobertura, con posibilidad de edición de estilos. Los requerimientos establecidos para la herramienta se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos.

Fuente: Elaboración propia.

REQUERIMIENTOS
<ul style="list-style-type: none"> • Búsqueda de una herramienta de estimación de cobertura existente que permitiera ser modificada, sobre la cual puedan ser adicionados nuevos bloques de código.
<ul style="list-style-type: none"> • Identificar, seleccionar y caracterizar parámetros técnicos de sistemas de radio móvil convencional.

²³ En la Tabla 4 se pueden observar las bandas de frecuencia de operación del servicio de radio móvil entre 30 MHz y 466 MHz.

<ul style="list-style-type: none">• Modificar la herramienta para la estimación de cobertura en las frecuencias de interés del trabajo de grado.
<ul style="list-style-type: none">• Obtener mapas de Colombia y de su orografía en formatos estándar con una muy buena resolución.
<ul style="list-style-type: none">• Codificar en la herramienta los modelos de pérdidas por propagación.
<ul style="list-style-type: none">• Considerar la curvatura de la tierra.
<ul style="list-style-type: none">• Considerar las pérdidas por difracción.
<ul style="list-style-type: none">• Crear estilos para la identificación apropiada del mapa de alturas del territorio colombiano.
<ul style="list-style-type: none">• Crear un estilo para la identificación apropiada de la potencia de recepción a diferentes distancias y orientaciones desde las estaciones base o repetidoras
<ul style="list-style-type: none">• Analizar las estimaciones de cobertura de las estaciones base o repetidoras.
<ul style="list-style-type: none">• Realizar pruebas de cobertura y comparar sus resultados con el de otras herramientas de predicción de cobertura.
<ul style="list-style-type: none">• Definir un plan de pruebas (escenarios) y de simulación para determinar la mínima separación en distancia de servicio radio móviles operando en la misma frecuencia.

2.3 DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

Después de finalizar el proceso de búsqueda de la herramienta se tomó como mejor opción una herramienta prototipo software desarrollada como trabajo de grado en la Universidad del Cauca [7], de la cual se adaptarán y modificarán algunos módulos²⁴ con el fin de cumplir con las necesidades y requerimientos del presente trabajo de grado.

2.3.1 Descripción General de la Herramienta

La herramienta de estimación de cobertura utilizada como base para este trabajo de grado, en una visión general, cuenta con módulos tales como: módulo de cobertura, módulo de perfil, módulo interfaz, módulo de difracción, módulo de modelos de pérdidas por propagación, módulo de caracterización del terreno, y módulo de curvatura de la tierra, los cuales se representan en la Fig. 23.

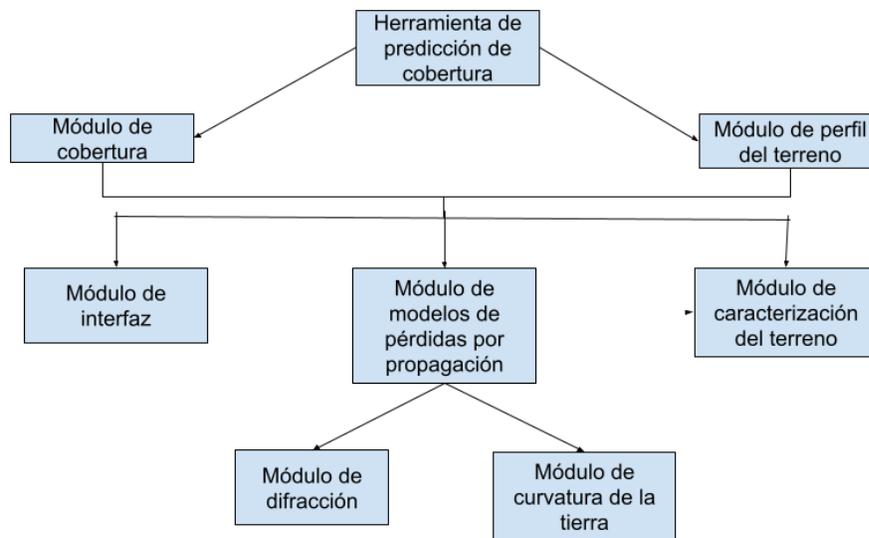


Fig. 23. Módulos de la herramienta de estimación cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

²⁴ Para el presente trabajo de grado se va a llamar módulos a los componentes del software agregados y abordados por separado, que en su integración van a dar solución a los requerimientos descritos en la Sección 2.2.

La herramienta fue desarrollada gracias al GIS de código abierto: QGIS, el cual mediante el lenguaje de programación Python, permitió la construcción de la misma y la creación de complementos²⁵. Teniendo en cuenta que en el diseño e implementación de cualquier sistema de radio móvil y en el análisis de interferencia, es de gran importancia tanto la determinación de la ubicación del transmisor y del receptor o los receptores, como del escenario de implementación, lo primero que se buscó fue recopilar datos referentes a lugares y distancias de ubicación, y elevación del terreno, ya que estos ayudan a calcular, predecir y visualizar la cobertura radio alrededor de un punto (cobertura zonal) o entre dos puntos (enlace punto a punto). El GIS permite hacer uso de imágenes satelitales que contienen información completa y detallada de la zona a estudiar con información suficiente para modelar el escenario (orografía, presencia de edificios, vegetación, etc.) en el que se planearán y desplegarán sistemas de radio móvil.

Considerando lo anterior, la herramienta inicialmente cuenta con dos complementos previamente desarrollados en el trabajo de investigación [7]: el primero, permite obtener un perfil de terreno; y el segundo, permite visualizar la cobertura de los transmisores. Para usar los complementos, estos deben ser instalados²⁶ por el usuario antes de ejecutar QGIS, ya que son implementados por desarrolladores externos y por tanto no se incluyen en el paquete básico de descargas, y una vez instalados, se puede dar paso a la ejecución de QGIS para realizar los análisis de perfil y de cobertura que sean requeridos, aunque, cabe resaltar que las pruebas que requiere este trabajo de grado se realizan con el complemento de cobertura.

La herramienta presenta un módulo de interfaz que brinda la posibilidad al usuario de agrupar las capas ráster necesarias para el análisis y caracterización del escenario, como lo son mapas de alturas hillshade²⁷, ubicación de transmisores, mapas de estilo que permiten por medio de colores representar las alturas del territorio e incluir su división política. En el momento de seleccionar la opción de cobertura rural el usuario puede ingresar los parámetros con los que las BS o RS, y las MS trabajan, tales como: altura de las antenas, potencias y frecuencias de operación, tipos de enlaces a analizar, sensibilidad de los equipos receptores, pérdidas totales o misceláneas referentes a pérdidas en condiciones reales de

²⁵ QGIS ha sido diseñado con una arquitectura de complementos. Estos complementos permiten añadir funciones y características nuevas a la aplicación.

²⁶ Para saber más detalles del proceso de instalación, ver en el documento anexo B en [7] E. O. Navarro Astudillo, "Herramienta Prototipo Software de Estimación de Cobertura Radioeléctrica para la Planificación de una Red IoT," ed, 2019. o el Anexo A del presente trabajo de grado.

²⁷ Hillshade, también conocido como orientación de laderas, muestra el modelo digital asignando un valor de píxel y color en función de su posición espacial respecto al norte, sur, este y oeste.

instalación, propagación y explotación, radios de cobertura, y permite seleccionar la capa ráster para la cual se va a realizar el estudio y el modelo de propagación con el cual se va a realizar la estimación de cobertura. La herramienta cuenta con módulos que se encargan de modelar la curvatura de la tierra, módulos que implementan modelos de pérdidas por propagación como Okumura-Hata, espacio libre y Egli, y un modelo de difracción para todos los modelos de pérdidas por propagación, y que gracias a él es posible saber el número de obstrucciones dentro del rango de cobertura de la señal en cuestión. La herramienta da la opción de modificar la visualización de los mapas de cobertura con un estilo personalizado. La Fig. 24 presenta un diagrama de flujo que sigue la herramienta para estimar las zonas de cobertura.

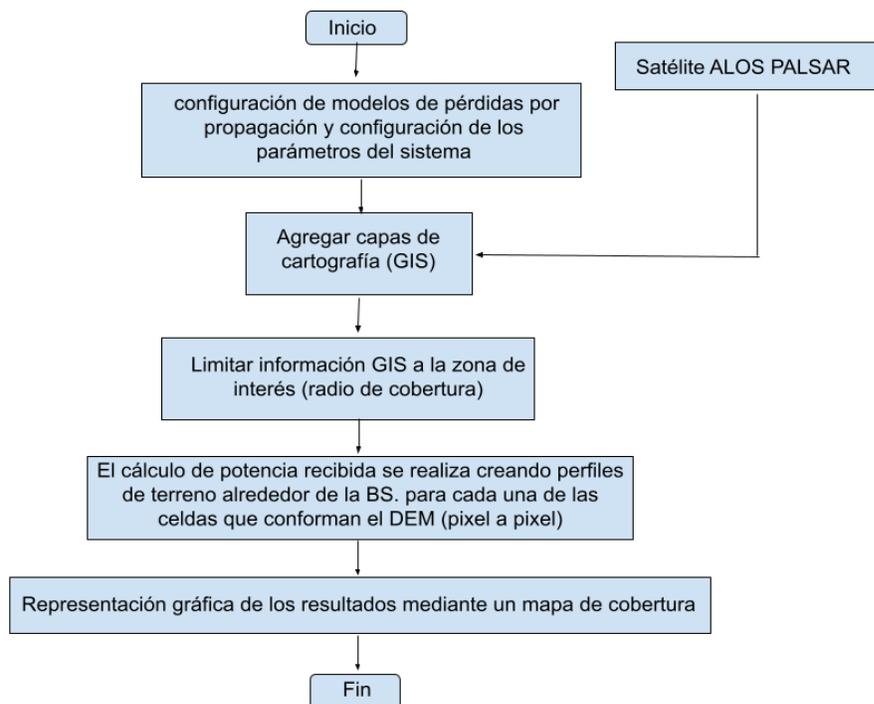


Fig. 24. Diagrama de flujo para el desarrollo de una herramienta de análisis de zonas de cobertura alrededor de una BS ubicada en zona rural.

Fuente: Tomado de [7].

2.3.2 Modificación en el Diseño de la Herramienta

Para este trabajo de grado, y en el proceso de modificación y adaptación de la herramienta ya existente, y debido a los requerimientos vistos en la Sección 2.2 de este capítulo, se hace necesario modificar y agregar características software adicionales. En la Fig. 25 se muestra los módulos que serán modificados.

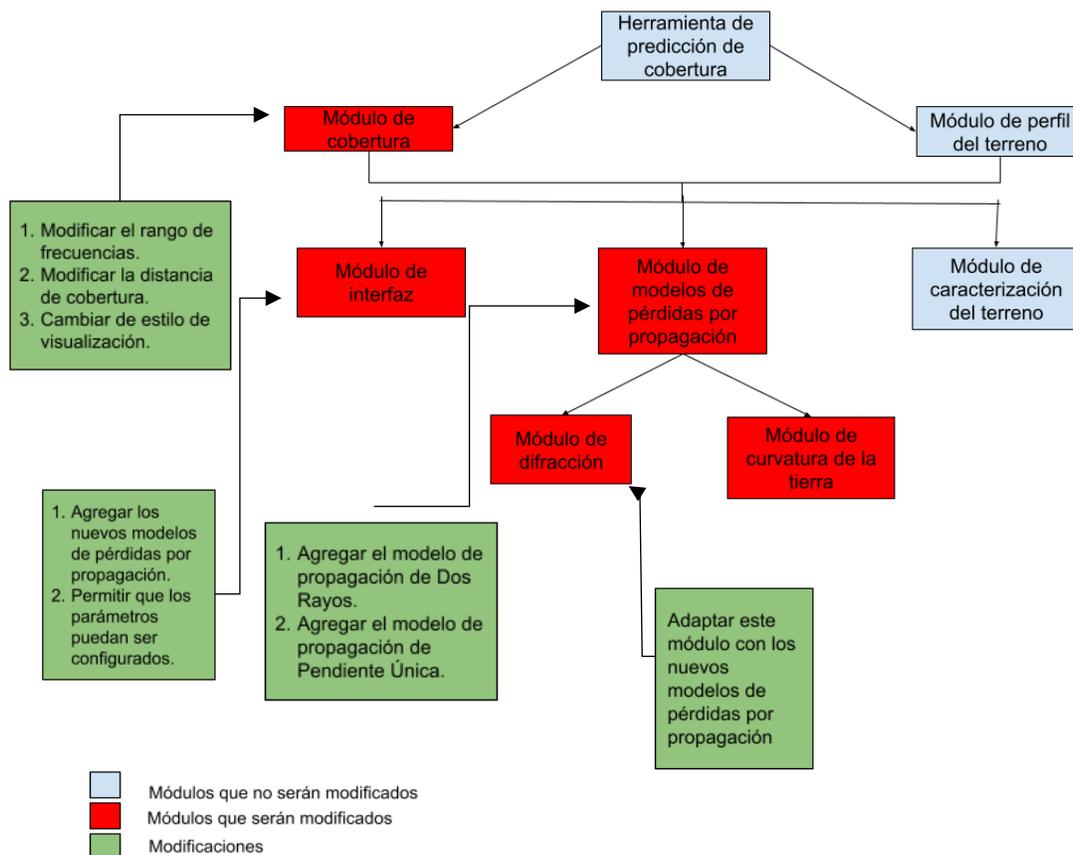


Fig. 25. Módulos que deben ser modificados.

Fuente: Elaboración propia.

Se hace una lista de las adaptaciones y adiciones de características a implementar sobre la herramienta, las cuales se diferencian en tres diferentes aspectos, tales como: software, interfaz y escenario, tal y como se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Modificaciones y adaptaciones de la herramienta

Fuente: Elaboración Propia.

SOFTWARE
<ul style="list-style-type: none"> • Agregar el modelo de pérdidas por propagación de Dos Rayos.
<ul style="list-style-type: none"> • Agregar el modelo de pérdidas por propagación de Pendiente Única.
<ul style="list-style-type: none"> • Agregar los factores de importancia para el modelo de Pendiente Única.
<ul style="list-style-type: none"> • Modificar el rango de frecuencias.
<ul style="list-style-type: none"> • Modificar la máxima distancia de análisis de cobertura.
<ul style="list-style-type: none"> • Cambiar el estilo de visualización.
INTERFAZ
<ul style="list-style-type: none"> • Agregar los nuevos modelos de pérdidas por propagación. • Permitir que los parámetros puedan ser configurados.
ESCENARIO
<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de escenario de implementación.

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Cambio de estilo de escenario de implementación. |
| <ul style="list-style-type: none">• Nuevas demarcaciones departamentales del territorio colombiano. |
| <ul style="list-style-type: none">• Cambio de resolución del escenario. |

2.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Una vez listo el plan de diseño de la herramienta software se procede a llevar a cabo el proceso de implementación que para el presente trabajo de grado es de gran importancia, ya que permitirá un análisis detallado de coberturas, el cual debido a la complejidad de los escenarios, y en este caso específico del escenario Colombiano, es uno de los aspectos que definen la efectividad de los modelos de propagación a analizar, la exactitud en sus predicciones y la consideración de los parámetros definidos en el análisis de interferencia entre sistemas de radio móvil. Por lo anterior en esta sección se mostrará todo el proceso de implementación de la herramienta, desde la construcción del escenario de implementación y la definición de los parámetros tomados en cuenta para el análisis de los sistemas de interés, hasta la ubicación y definición de los escenarios de prueba.

2.4.1 Escenario de Implementación

Para el análisis se consideró como escenario de implementación el territorio colombiano, el cual corresponde a un capa de modelo digital de elevación (DEM, *Digital Elevation Model*) construido a partir de datos topográficos gratuitos proporcionados por el satélite ALOS PALSAR²⁸, el cual brinda una resolución de 250 metros por pixel, cuenta con datos de división política y datos catastrales proporcionados de manera libre por el geoportal DANE [58], y la información suficiente para caracterizar con detalle los escenarios de análisis. En la Fig. 26 se presenta la información geográfica utilizada en

²⁸ El Satélite Avanzado para la Observación de la Tierra (ALOS, Advanced Land Observing Satellite), también conocido como DAICHI, fue desarrollado para recolectar imágenes de Radar en escenas de 50 Km x 70 Km de todo el planeta cada 45 días a través de su Radar proporcionando datos de observación de la Tierra de alta calidad para mapeo topográfico, monitoreo de desastres, medio ambiente y estudios de cambio climático [57] ALOS. "Alaska Satellite Facility." ALOS PALSAR – About – ASF (alaska.edu) (accessed 25 Octubre, 2021)..

los cálculos de cobertura, en la cual se observan las elevaciones geográficas del territorio colombiano, y en la cual los colores representan los diferentes valores de altura sobre el nivel del mar.

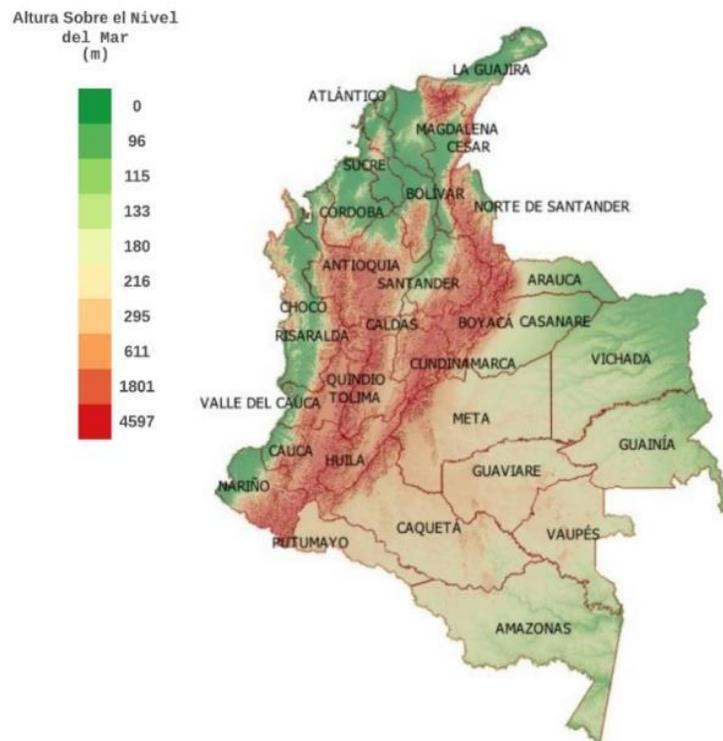


Fig. 26. Mapa de elevación geográfica de Colombia.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Descripción del Funcionamiento de la Herramienta.

La herramienta permite realizar procesos de estimación de mapas de cobertura teóricos alrededor de una BS o RS tanto para zonas rurales como urbanas, los cuales son desarrollados en lenguaje Python. La estimación de cobertura en este trabajo de grado considera Colombia como un escenario rural.

En esta sección se hace una descripción general de proceso, limitaciones y requerimientos para el correcto funcionamiento de la herramienta.

2.4.3 Proceso de Generación de Zonas de Cobertura.

La herramienta de predicción de cobertura permite obtener mapas de cobertura en torno a las BS o RS.

El cálculo se realiza utilizando modelos de propagación cuyos parámetros pueden ser modificados por el usuario, dependiendo del escenario de despliegue que se está considerando. La cobertura se estima utilizando parámetros de transmisión de la BS, y de recepción de las MS.

2.4.4 Características y Parámetros Técnicos a Considerar.

Teniendo en cuenta que para el presente trabajo de grado se requiere modelar un escenario en el cual se pueda estudiar el comportamiento de una señal radio de sistemas radio móvil en Colombia, esta subsección define los parámetros técnicos característicos de este tipo de sistemas con el objeto de estimar las áreas de servicio (cobertura) que permitan un análisis de interferencias entre sistemas de radio móvil.

2.4.4.1 Bandas de frecuencia de operación.

En Colombia, el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF) [59] define las bandas de frecuencia para operación del servicio de radio móvil en la banda de 30 MHz a 470 MHz, las cuales se presentan en la Tabla 4 [60].

Tabla 4. Bandas de frecuencia para operación del servicio de radio móvil en la banda de 30 MHz a 466 MHz.

CNABF	Banda de frecuencia	Servicio
Tabla 3 ^a	138-174 MHz	Servicios de radiocomunicaciones móviles y fijos.
Tabla 4	380-398 MHz	Frecuencias asignadas para servicios de comunicaciones móviles de banda ancha que se ofrecen por medio de redes locales privadas (no prestación de servicios a terceros) en configuración de

		Duplexación por División de Tiempo (TDD, <i>Time Division Duplexing</i>).
Tabla 11	(412-420) MHz y (422-430) MHz	Frecuencias para servicios fijos y móviles de radio troncalizado
Tabla 13	(440-470) MHz	Servicios de radiocomunicaciones móviles y fijos.

De manera general, las bandas de (410-430) MHz y (440-470) MHz son utilizadas por sistemas privados y públicos de radio móvil, en los cuales estas bandas de frecuencias han sido utilizadas por sistemas celulares para brindar servicios en zonas rurales, por lo cual han sido consideradas como una opción de espectro viable para servicios de Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas (IMT-Advanced, *International Mobile Telecommunications – Advanced*) o IMT-2020 [61]. Para el análisis de aislamiento mostrado en el presente trabajo de grado se consideran las bandas con los valores en frecuencia más bajos y más altos dentro de la banda de interés en el análisis, i.e., (138 – 174) MHz y (440 – 470) MHz.

2.4.4.2 Potencia.

La potencia de transmisión es el valor medio de potencia suministrado por un transmisor a la línea de transmisión que lo conecta con la antena [62]. Particularmente, en sistemas de radio móvil las potencias de transmisión pueden tomar valores entre 1 W y 50 W, siendo los valores típicos para BS o RS de 20 W y 40 W [63]. Por lo tanto, para el análisis de cobertura y aislamiento se hace uso de un valor de potencia de transmisión de 50 W (47 dBm).

2.4.4.3 Ganancia de antena.

La ganancia de una antena es la capacidad que tiene una antena para dirigir la energía suministrada por el transmisor en una determinada dirección del espacio [62]. En el manual de comprobación técnica del

espectro se define la ganancia para antenas directivas trabajando en ondas métricas y decimétricas [64], en el cual un valor máximo de ganancia para las antenas de BS o RS es de 7 dBd (9.2 dBi) y un valor máximo de ganancia para las antenas de MS es de 0 dBd (2.2 dBi). Por lo tanto, para el análisis de cobertura y aislamiento se consideran valores de ganancia de 10 dBi para antenas de BS o RS y de 3 dBi para antenas de MS, valores que son soportados por sistemas de antenas de diferentes fabricantes [65].

2.4.4.4 Sensibilidad.

La sensibilidad se define como el mínimo nivel de señal (en μV , $\text{dB}\mu\text{V}$ o dBm) a la entrada de un receptor que le permite garantizar la demodulación y la obtención de la información recibida con un cierto grado de calidad. La sensibilidad se ve afectada por el ruido captado y el ruido generado dentro del propio receptor [66]. Particularmente en sistemas de radio móvil, el valor de sensibilidad de un receptor se define de tal manera que la señal a la salida del receptor tenga un valor de Relación Señal a Ruido y Distorsión (SINAD, *Signal to Noise and Distortion Ratio*) de 12dB [67]. La sensibilidad puede ser estática o dinámica: la primera es la definida por el fabricante y medida en condiciones controladas de laboratorio; y la segunda, es la medida en condiciones de operación real, la cual considera degradación por ruido, multitrayectoria y factores estadísticos. La sensibilidad estática de un receptor de radio móvil profesional comercial en las bandas mencionadas está entre los valores de 0.25 μV (-12.04 $\text{dB}\mu\text{V}$) y 0.275 μV (-11.21 $\text{dB}\mu\text{V}$) para una SINAD de 12 dB, los cuales corresponden a un nivel de potencia medido sobre una impedancia de 50 ohms de -119.04 dBm y -118.21 dBm , respectivamente [68]. Por lo tanto, para el análisis de cobertura y aislamiento se hace uso de un valor de sensibilidad estático de -120 dBm , sin considerar factores de degradación.

Los valores utilizados para la generación de coberturas se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros y valores a utilizar en la generación de mapas de cobertura.

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	50 W (47dBm)
Sensibilidad de receptor móvil	-120 dBm
Ganancia de antena repetidora o estación base	10 dBi
Ganancia de antena móvil	3 dBi
Frecuencias de trabajo	138 MHz y 470 MHz
Altura de antena repetidora o estación base	40 m ²⁹
Altura de antena móvil	1.5 m ³⁰

2.4.4.5 Software

Se construyó los códigos en el lenguaje de programación Python para los modelos de propagación de Dos Rayos el cual, para este trabajo de grado, se compone de los modelos de dos rayos, tierra plana y tierra curva vistos en las secciones 1.3.2, y 1.3.3 y se puede ver de forma gráfica en la Fig. 27. Además, el código del modelo de propagación de Pendiente Única con los parámetros vistos en 0. Para este último modelo se programaron las variables relacionadas con el exponente de propagación (n) y las pérdidas por propagación a una distancia de referencia (L_0), además se modificó el módulo de modelos de pérdidas por propagación para incluir estos dos nuevos modelos de propagación en la herramienta

²⁹ se utiliza valores de alturas de antenas de transmisión obtenidas de la plataforma Visor, lo anterior con el fin de analizar el efecto de los diferentes principios generales de propagación que afectan la cobertura de los sistemas de comunicación en las frecuencias indicadas (curvatura de la tierra, refracción y difracción), efectos que se reducirían considerablemente si se utiliza una altura máxima de antena de transmisión de 200 m.

³⁰ Se utiliza valores de alturas de antenas de los receptores móviles típicas con el fin de analizar el efecto de los diferentes principios generales de propagación. Para sistemas de radio móvil la altura estándar de los dispositivos móviles es de 1.5 m sobre el nivel del suelo.

ya existente. Adicionalmente, Se modificó las variables de entrada para incluir los parámetros del modelo de Pendiente Única y se amplió la distancia de análisis de cobertura para simular cobertura de 120 Km.

Dado que la herramienta inicialmente se diseñó para otro tipo de servicios, esta solo consideraba frecuencias alrededor de los 900 MHz, por lo tanto, se hizo necesario un ajuste en el algoritmo para que se pudiera considerar frecuencias en el rango de 138 MHz a 470 MHz.

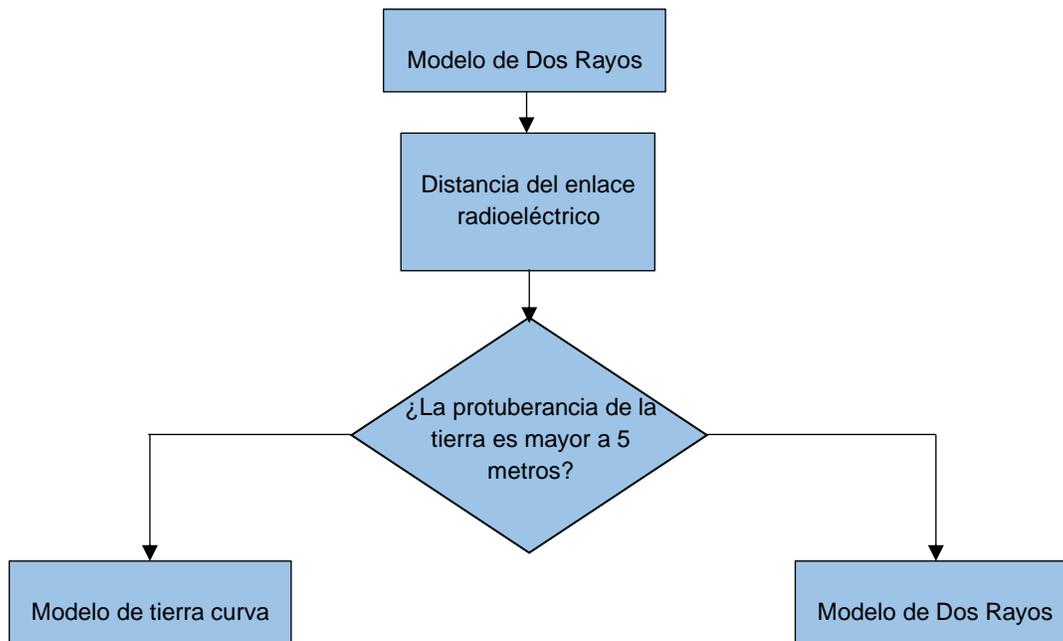


Fig. 27. Diagrama de flujo para aplicación del modelo de pérdidas por propagación de Dos Rayos.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4.6 Interfaz

Después de haber agregados los códigos de los modelos de pérdidas por propagación y sus parámetros a la herramienta, se tuvo que modificar la interfaz gráfica para hacer usos de los mismos como se presenta en la Fig. 28, además, se agregaron las variables exponente de propagación (n) y pérdidas por propagación a una distancia de referencia (L_0) en la interfaz, como se presenta en la Fig. 29.

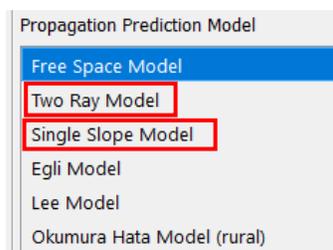


Fig. 28. Modelos de propagación agregados a la herramienta y a la interfaz gráfica

Fuente: Elaboración propia

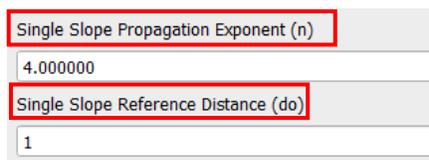


Fig. 29. Exponente de propagación y distancia de referencia.

Fuente: Elaboración propia.

Dado que se modificó el rango de frecuencia en el algoritmo, se hizo necesario un ajuste en campos de frecuencia en la interfaz gráfica para considerar valores en el rango de 30 MHz a 470 MHz, como se presenta en la Fig. 30.



Fig. 30. Rango de frecuencias.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se tuvieron los algoritmos completos se procedió a realizar las pruebas de validación³¹ de cobertura en la herramienta y en el transcurso de este proceso surgió la necesidad de ampliar la distancia de cobertura a 120 Km, lo que se modificó tanto en el código como en la interfaz, tal como se presenta en la Fig. 31.

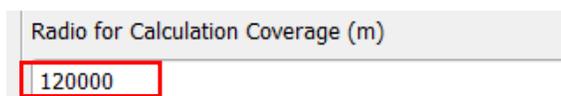


Fig. 31. Distancia de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

Además, para facilitar la observación de los resultados se realizó la creación de un nuevo estilo³² que hiciera énfasis en las frecuencias de interés del presente trabajo de grado, como se presenta en la Fig. 32.

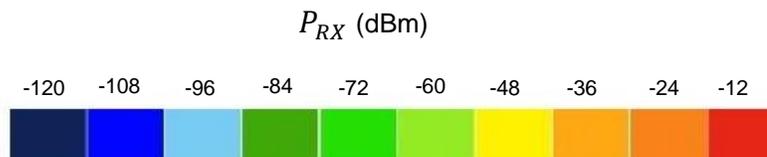


Fig. 32. Estilo de mapas de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4.7 Escenario

En la Fig. 33 se observa una comparación entre los escenarios originales de la herramienta, los cuales fueron los departamentos del Cauca y Valle del Cauca, y el nuevo escenario de interés para este trabajo de grado, el cual comprende todo el territorio colombiano.

³¹ Ver Sección 2.5.

³² Estilo se refiere al conjunto de colores los cuales representan niveles por ejemplo niveles de altura o potencia.

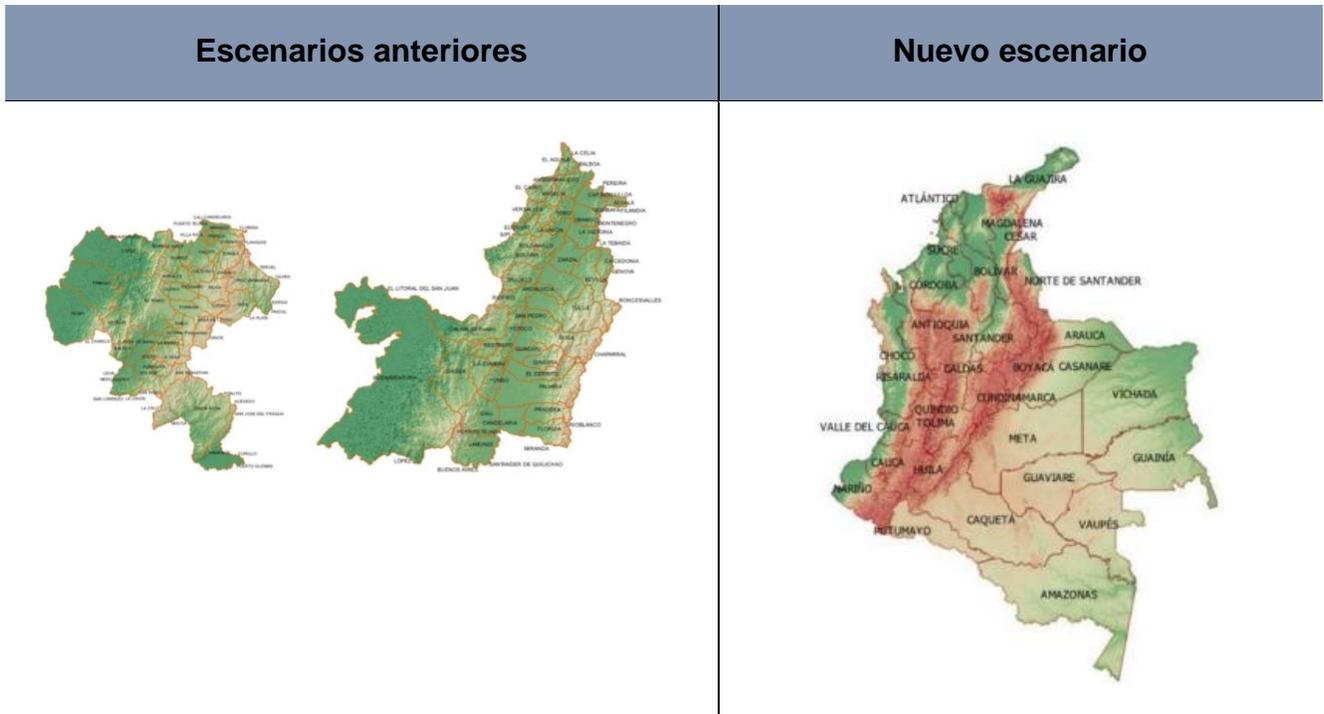


Fig. 33. Comparación de escenarios de la Herramienta.

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar y representar las alturas del escenario de implementación se hizo necesario la creación de un nuevo estilo o paleta de colores como se presenta en la Fig. 34.

Altura sobre el nivel del mar (m)

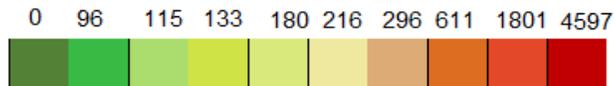


Fig. 34. Representación de las alturas del escenario de implementación inicial.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el nuevo escenario de interés es completamente diferente al anterior, fue necesario recrear las demarcaciones territoriales de los departamentos colombianos, como se presenta en la Fig. 35, eso con el fin obtener una guía de la ubicación de las estaciones bases o repetidoras.



Fig. 35. Delimitaciones territoriales de Colombia.

Fuente: Elaboración propia.

La resolución o tamaño de la celda fue modificado de 100 metros por 100 metros píxel a 250 metros por 250 metros por píxel, como se observa en la Fig. 36, esto debido a que el escenario de implementación es considerablemente mayor al original, y por lo tanto, se debió disminuir la resolución del píxel para que el proceso de generación de mapas de cobertura tomará un tiempo de procesamiento aceptable.

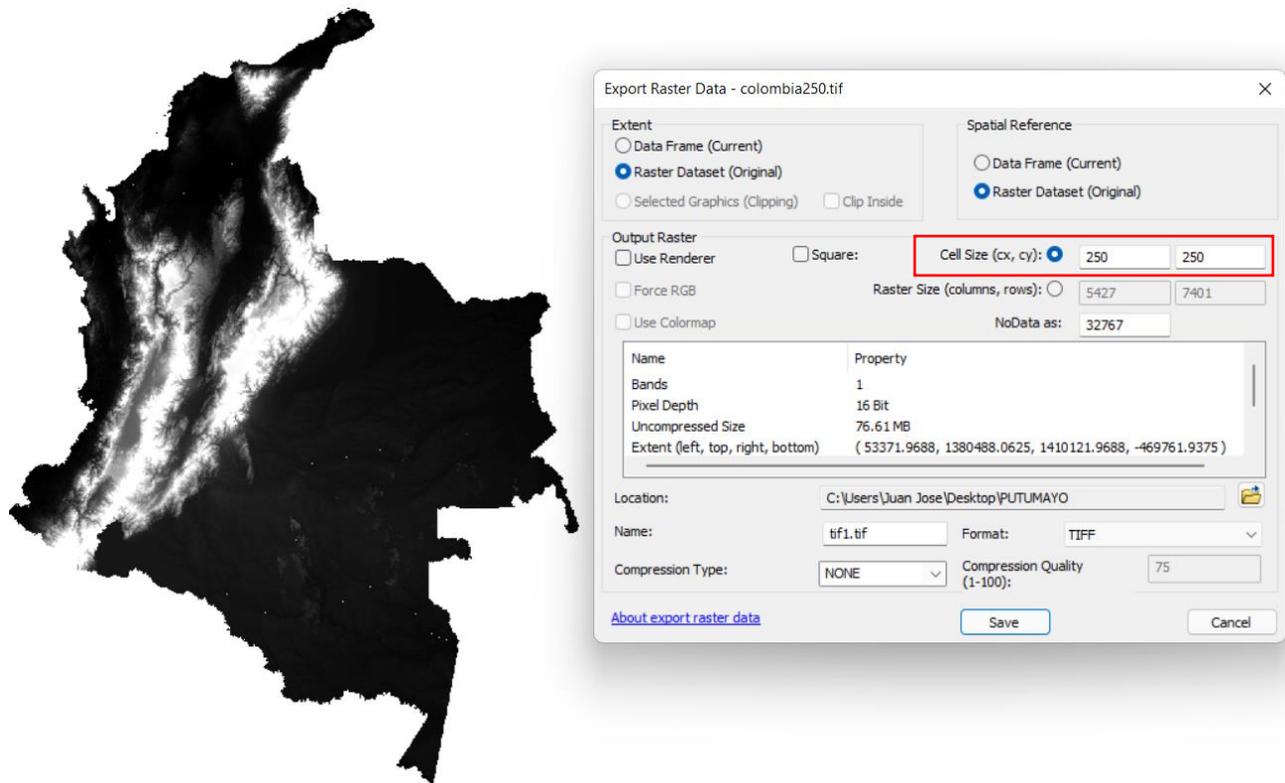


Fig. 36. Tamaño de cada celda.

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 37 presenta un ejemplo grafico de los cambios en los mapas de cobertura, la cual presenta una cobertura básica en comparación con una cobertura de la herramienta original.

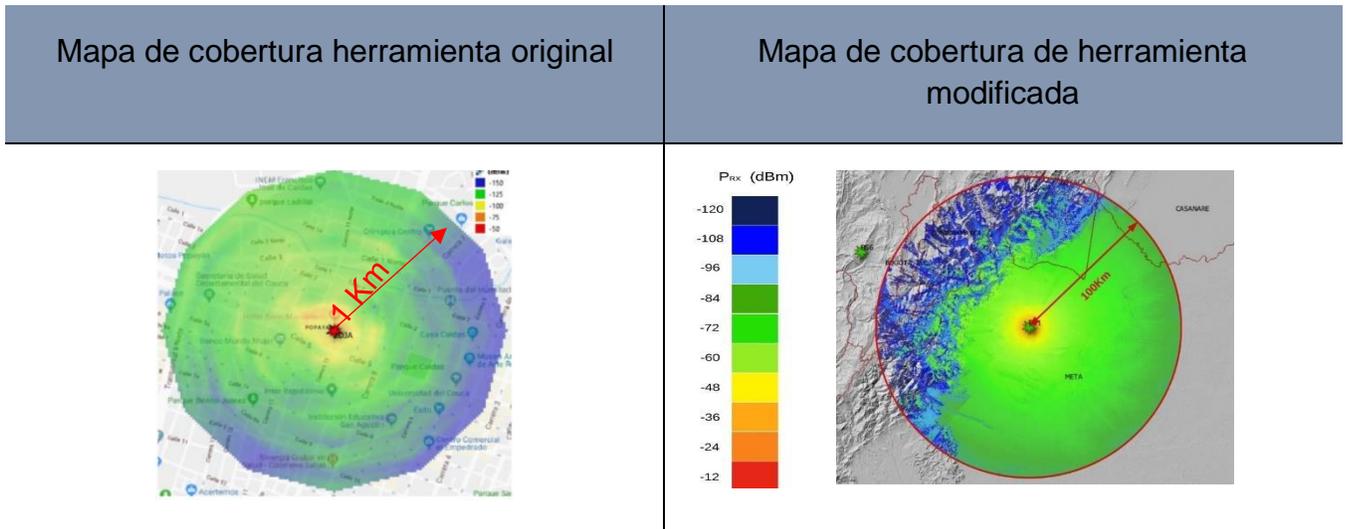


Fig. 37. Comparación de mapa de cobertura entre la herramienta original y la herramienta después de los cambios.

Fuente: Elaboración propia.

software QGIS tiene una herramienta la cual permite proyectar los mapas de cobertura obtenidos en mapas brindados por Google Maps como se muestra en la Fig. 38.

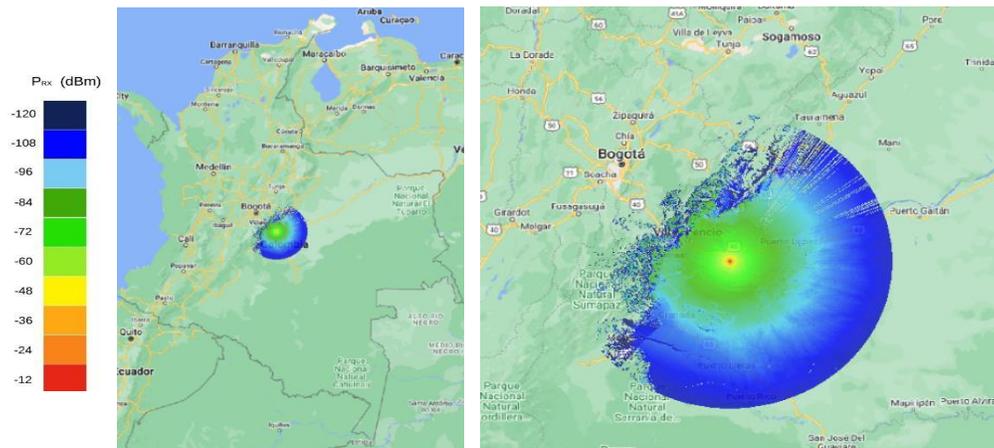


Fig. 38. Visualización de un Mapa de cobertura en Google Maps.

Fuente: Elaboración propia.

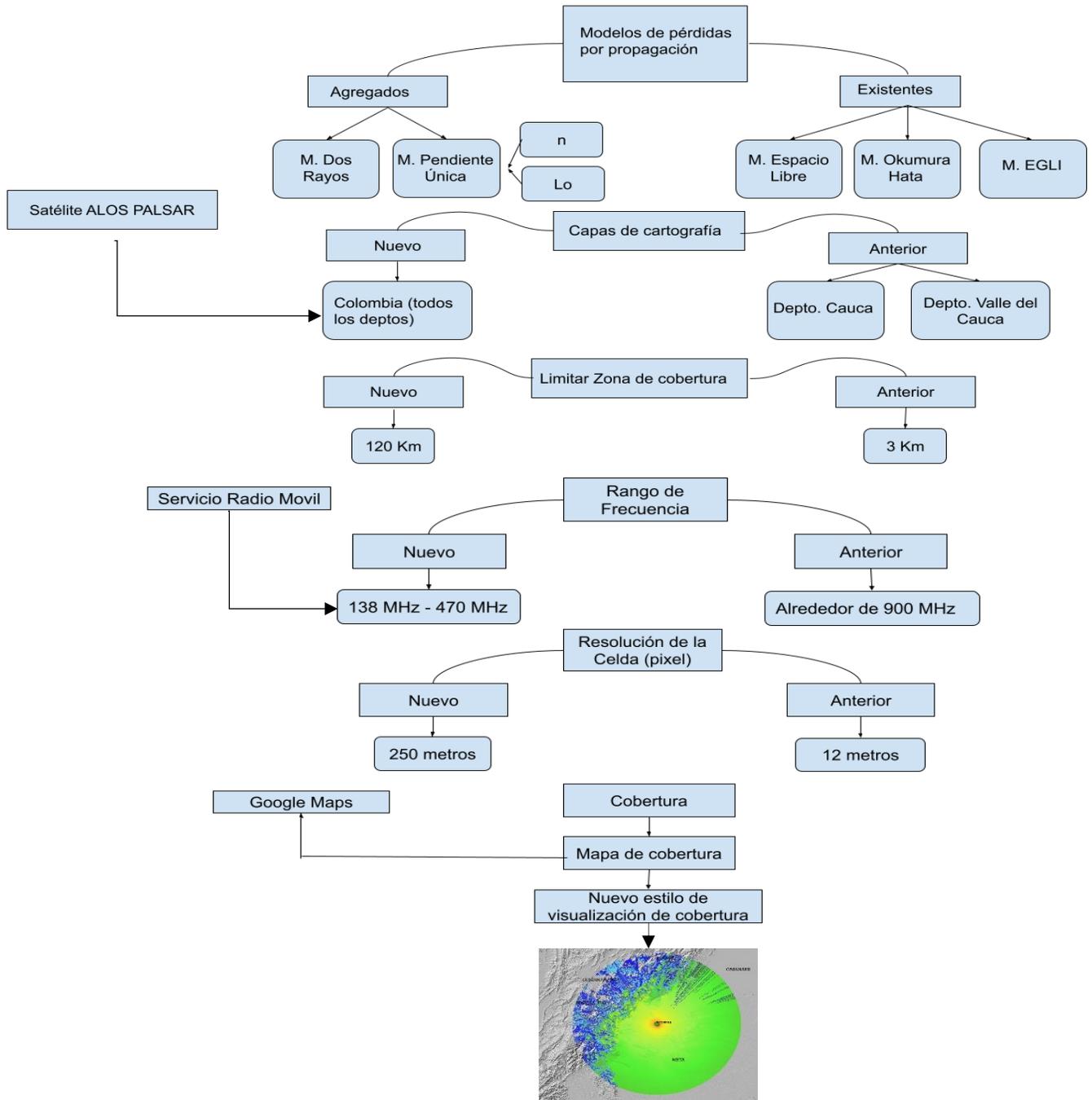


Fig. 39. Diagrama de comparación entre la herramienta modificada y la herramienta original

Fuente Elaboración propia.

2.5 PRUEBAS DE VALIDACIÓN

Para la validación de correcto funcionamiento de la herramienta usada en este trabajo de grado, se comparó los resultados de una simulación básica de la herramienta modificada con la herramienta Visor de la ANE [63] y la herramienta Radio Mobile [69].

La Tabla 6, representa las coordenadas de un escenario específico en el cual se analizó la cobertura radioeléctrica con los tres diferentes softwares.

Tabla 6. Coordenadas de los escenarios de prueba para validación.

Fuente: Elaboración Propia.

	Grados	minutos	segundos	Hemisferio
Latitud	5	41	40.46	N
Longitud	70	40	6.1862	W

Los parámetros de simulación son los presentados en la Tabla 5.

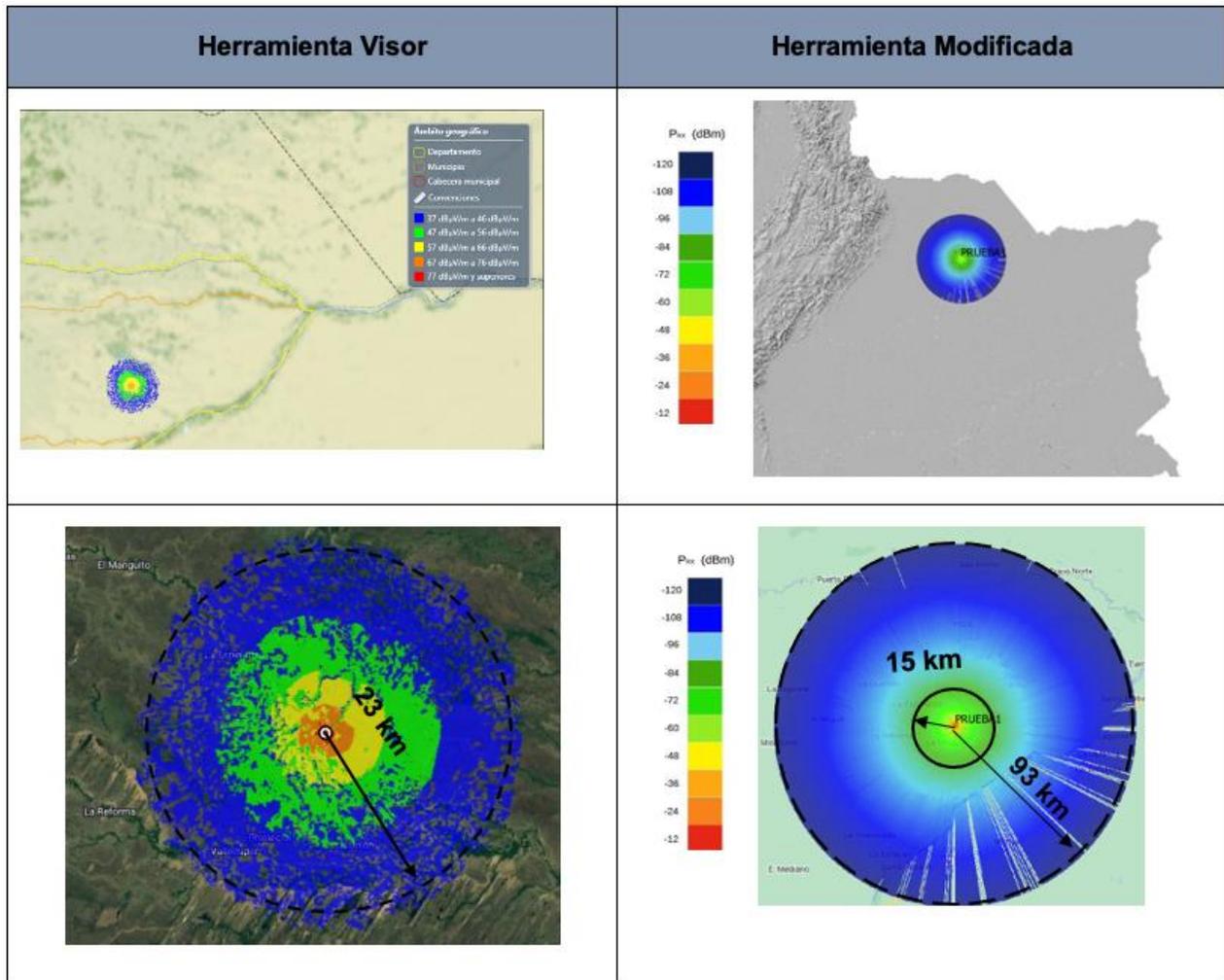


Fig. 40.Comparación entre las Herramientas Visor y la herramienta modificada.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de potencia de recepción dados por la herramienta Visor son presentados en términos de campo eléctrico ($dB\mu V/m$) y los resultados de la herramienta modificada son presentados en términos de potencia (dBm), por lo que se debe hacer una conversión de los resultados para poder realizar la comparación entre ellas. Para esto se hace uso de la siguiente ecuación:

$$P_r = E - 20 \log(f) - 77.2 + G_r, \quad (88)$$

donde, P_r (en dBm) es la potencia de recepción; E (en dB μ V/m) es el campo eléctrico incidente que en este caso está dado por la herramienta visor; f (en MHz) es la frecuencia del sistema, para este caso de 138 MHz; y G_r (en dBi) es la ganancia neta de la antena de recepción y que considera el valor en la Tabla 5. Realizando la conversión se obtiene la siguiente tabla comparativa:

Tabla 7. Relación entre los resultados de intensidad de campo eléctrico y potencia considerados en la herramienta Visor y la herramienta modificada.

Fuente: Elaboración Propia.

$\frac{dBuV}{m}$	dBm
37 a 46	-69.99 a -60.99
47 a 56	-59.99 a -50.99
57 a 66	-49.99 a -40.99
67 a 76	-39.99 a -30.99
77 a superiores	-29.99 a superiores

En la Fig. 40 se observa un comportamiento similar en los primeros 23 Km de cobertura entre las dos herramientas, obteniéndose a esta distancia niveles de potencia recibida por las MS entre -60 dBm y -70 dBm aproximadamente. La herramienta usada en este trabajo de grado brinda un mapa de cobertura con distancias mayores que la herramienta Visor.

En la Fig. 41 se presenta una comparación de mapas de cobertura entre la herramienta modificada para este trabajo de grado y el software Radio Mobile, las coordenadas se presentan en la Tabla 9.

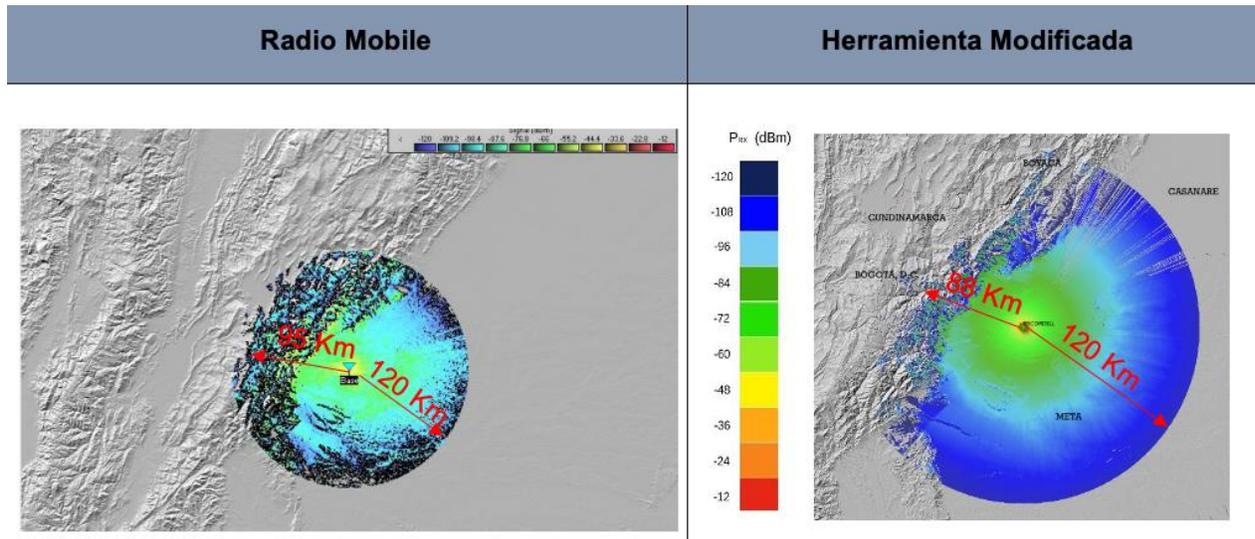


Fig. 41. Comparación de mapas de cobertura de las herramientas Radio Mobile y la herramienta utilizada.

Fuente: Elaboración Propia

En la Fig. 41 se aprecia un comportamiento similar entre los resultados obtenidos de la herramienta Radio Mobile y la herramienta modificada. Los alcances de cobertura obtenidos hacia la cordillera son de 111 Km y 92 Km, respectivamente, y hacia zona de valle son 120 Km en los dos mapas de cobertura, obteniéndose a esta distancia niveles de potencia recibida por los MS entre -120 dBm y -108 dBm.

CAPITULO III

3 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se hace una presentación de los escenarios de pruebas seleccionados para el análisis de interferencia, consideraciones tenidas en cuenta para definir la ubicación de las BS o RS y la elección de los parámetros técnicos, así como también los resultados gráficos de los mapas de coberturas de cada BS o RS y evaluar los modelos de pérdidas por propagación.

1.1 PLAN DE PRUEBAS

Con el fin de analizar de forma gráfica los mapas de cobertura de una BS o RS aplicando los modelos de pérdidas por propagación vistos en la Sección 1.3, en diferentes zonas tales como: zona alta, zona de valle, zona entre cordilleras y zona cerca de grandes obstrucciones geográficas, como se presenta en la Fig. 42, se seleccionaron cuatro escenarios dentro del territorio colombiano para cada una de las zonas de prueba. Los parámetros radioeléctricos generales con los que operan las BS o RS se presentan en la Tabla 5.

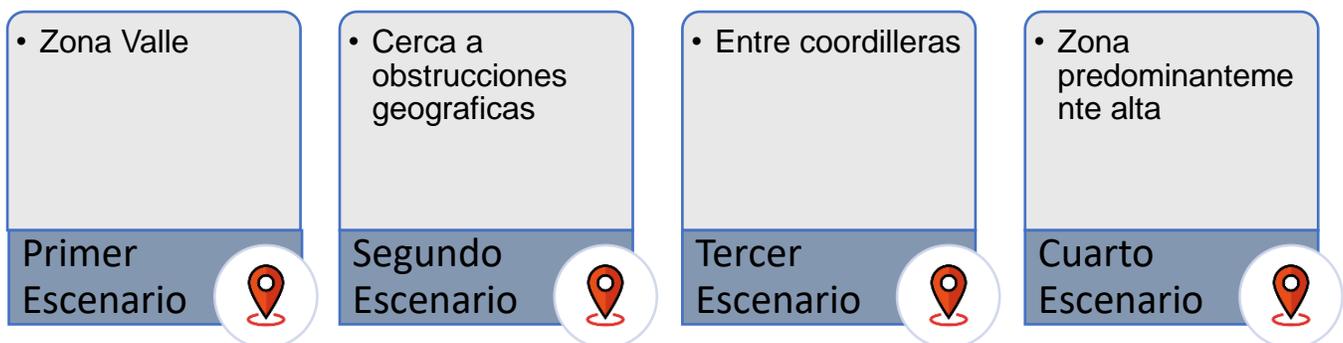


Fig. 42. Escenarios de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

En el primer escenario, la BS o RS se ubica en una zona de valle entre los límites de los departamentos del Casanare y Vichada. Las coordenadas se presentan en la Tabla 8 y de manera gráfica en la Fig. 43. Esta ubicación permite analizar el mapa de cobertura de una BS o RS en una zona de valle y sin cercanías a barreras u obstrucciones naturales. Adicionalmente, el punto considerado tiene una altura aproximada de 112 metros sobre el nivel del mar (msnm).

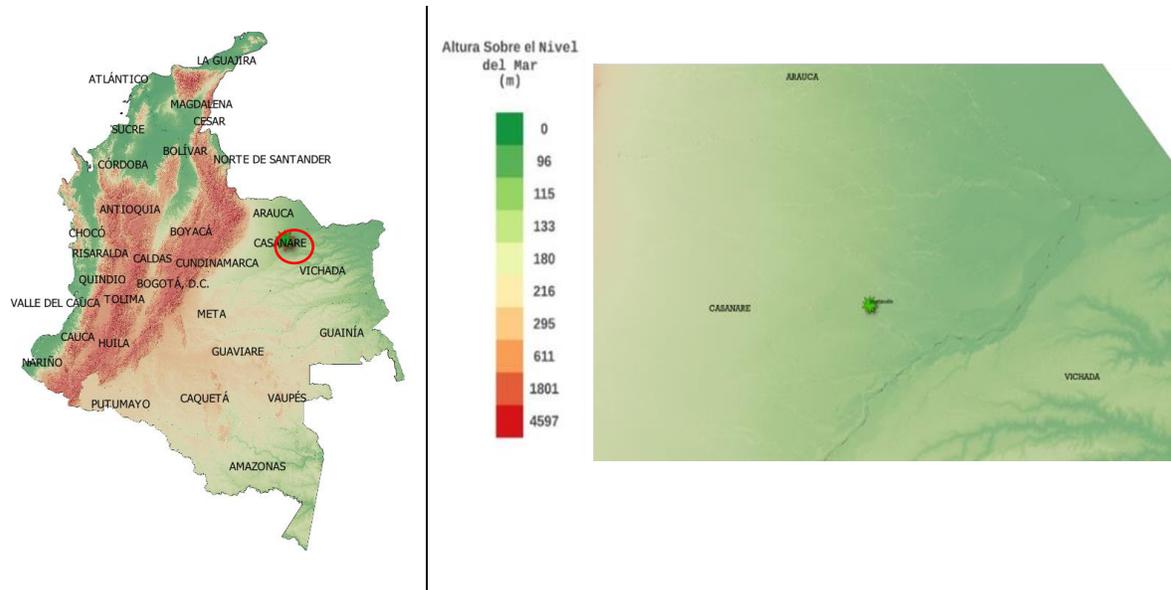


Fig. 43. BS zona Valle

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8. Coordenadas de la estación base en zona valle

Fuente: Elaboración Propia.

	Grados	Minutos	Segundos	Hemisferio
Latitud	5	42	40.80	N
Longitud	71	40	02.25	W

En el segundo escenario, la BS o RS está ubicada en el departamento del Meta y cerca de una obstrucción geográfica la cual en este caso es la cordillera oriental. Las coordenadas se presentan en la Tabla 9 y de manera gráfica en la Fig. 44.

Esta ubicación permite analizar el mapa de cobertura de una BS o RS en una zona cerca de obstrucciones geográficas y barreras naturales. Adicionalmente, el punto seleccionado presenta una altura de aproximadamente de 270 msnm.

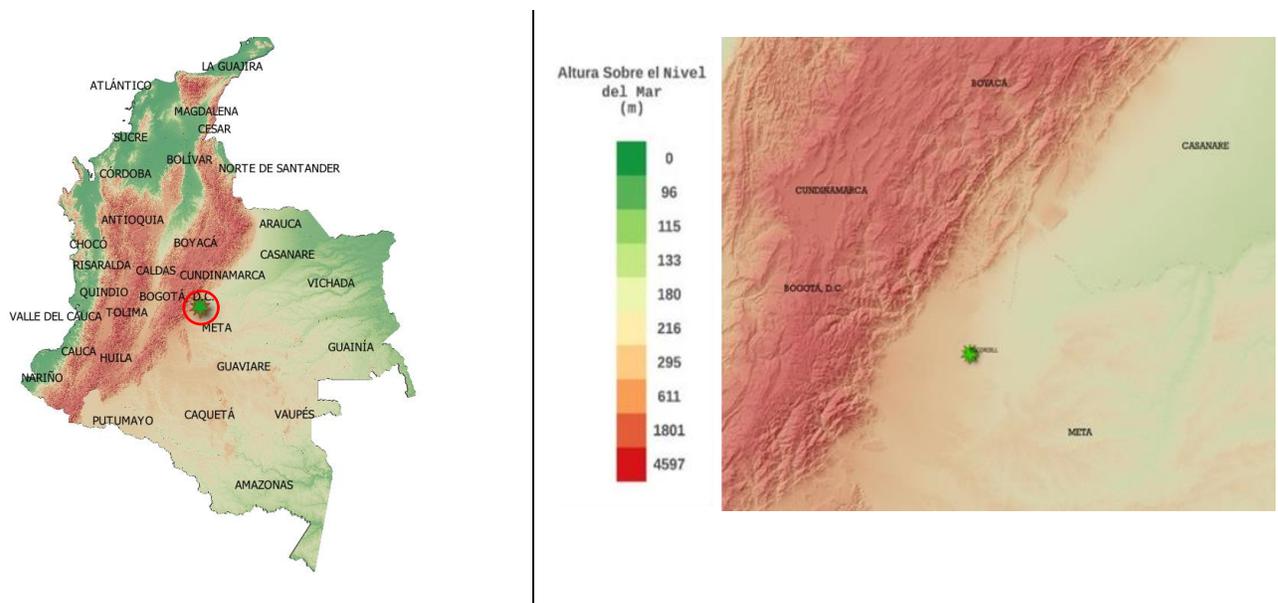


Fig. 44. BS cerca a grandes obstrucciones geográficas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Coordenadas de la estación base cerca de obstrucciones geográficas

Fuente: Elaboración Propia.

	Grados	Minutos	Segundos	Hemisferio
Latitud	3	59	25.7064	N
Longitud	73	20	58.3706	W

En el tercer escenario, la BS o RS está ubicada en una zona alrededor de cordilleras o grandes obstáculos naturales. Esta ubicación se encuentra entre los departamentos del Quindío, Caldas y Cundinamarca. Las coordenadas se presentan en la Tabla 10 y de manera gráfica en la Fig. 45. Esta ubicación permite analizar el mapa de cobertura de una BS o RS en una zona entre cordilleras. Adicionalmente, el punto seleccionado presenta una altura alrededor de 600 msnm, aproximadamente.

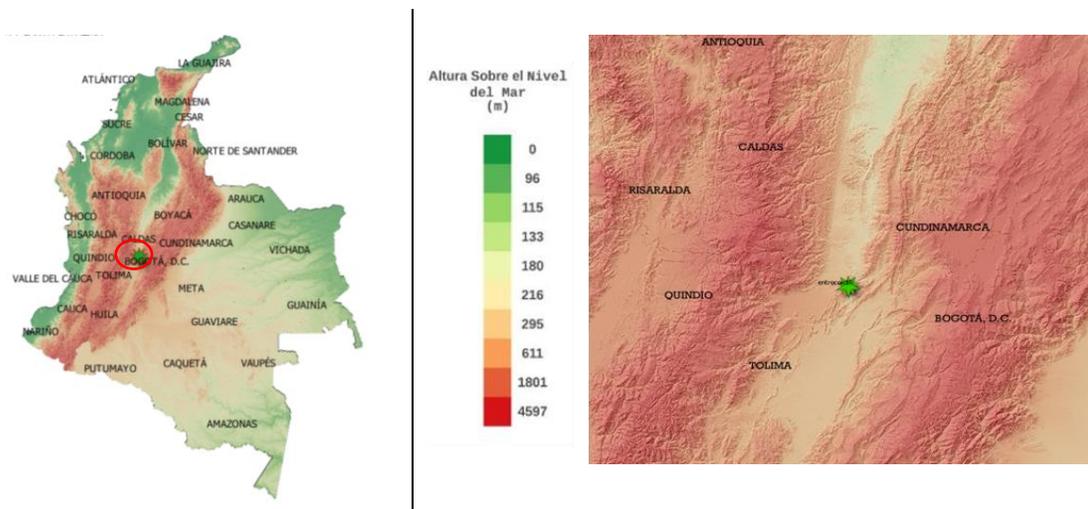


Fig. 45. BS entre Cordilleras.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Coordenadas de la estación base entre cordilleras

Fuente: Elaboración Propia.

	Grados	Minutos	Segundos	Hemisferio
Latitud	5	56	24.808	N
Longitud	74	52	10.9456	W

En el cuarto escenario, la BS y RS está ubicada en la sierra nevada de Santa Marta, ubicación que permite analizar una BS o RS en una zona predominantemente alta con una altura aproximada de 5639 msnm. Las coordenadas se presentan en la Tabla 11 y de manera gráfica en la Fig. 46.

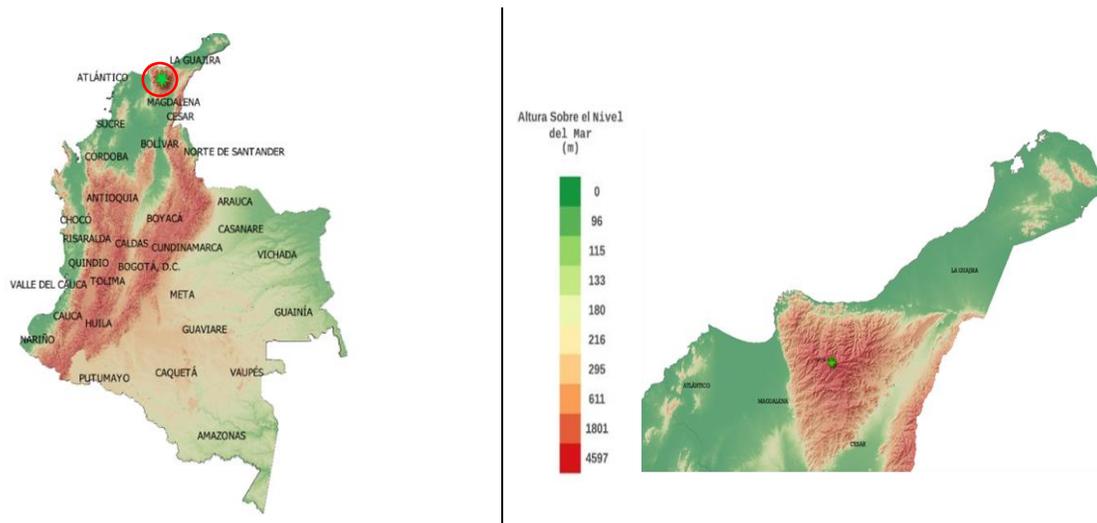


Fig. 46. BS en zona predominantemente alta.

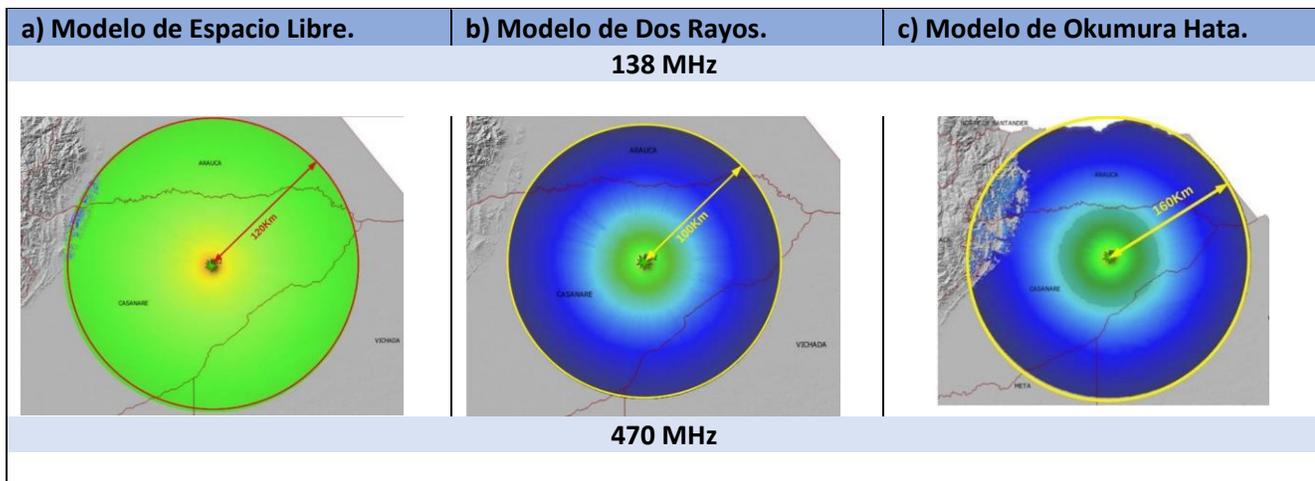
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Coordenadas de la estación base en zona predominantemente alta

Fuente: Elaboración propia.

	Grados	Minutos	Segundos	Hemisferio
Latitud	10	50	16.5634	N
Longitud	73	41	13.8817	W

3.1 ESTACIÓN BASE O REPETIDORA EN ZONA DE VALLE



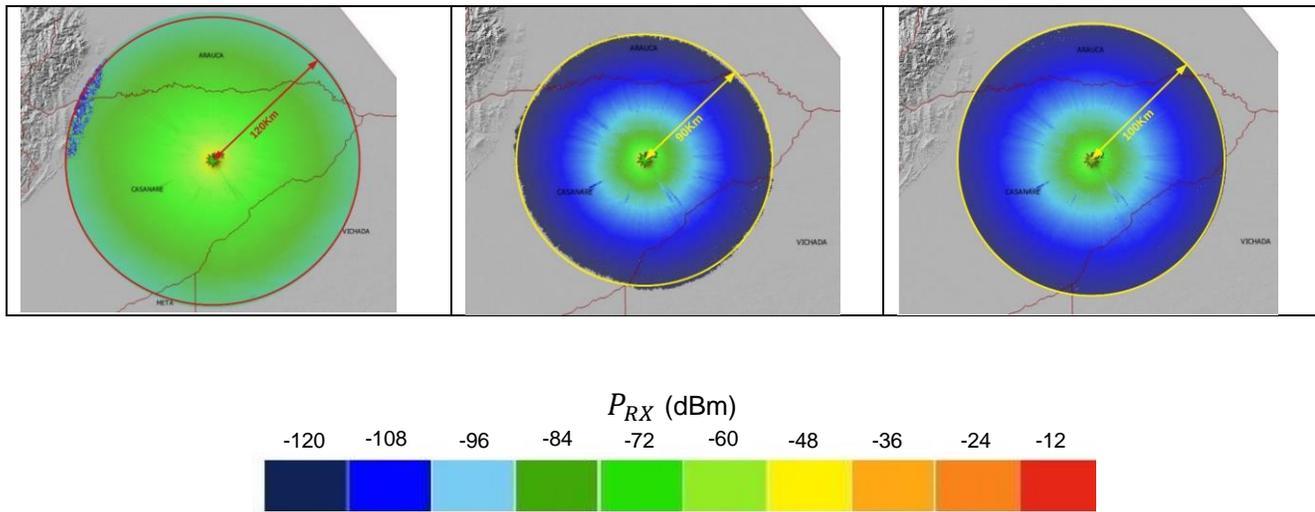


Fig. 47. Estimación de cobertura en una zona de valle con los modelos de propagación de Espacio libre, Dos Rayos y Okumura-Hata para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 47(a) se aprecia el alcance de cobertura haciendo uso del modelo de espacio libre, el cual supera por mucho los 120 Km, obteniéndose a esta distancia niveles de potencia recibida por las MS entre los -84 dBm y los -72 dBm, en función de la frecuencia de operación. Lo anterior se debe a que el modelo de espacio libre considera el mínimo valor de pérdidas por propagación, por lo que no es adecuado para ser considerado en el escenario colombiano, debido a que es un modelo demasiado optimista. Sin embargo, es útil como punto de comparación con los demás modelos de pérdidas por propagación considerados, los cuales ofrecen resultados más cercanos a la realidad.

Un modelo de propagación más adecuado para el escenario de implementación considerado es el modelo de propagación de Dos Rayos, el cual considera que la señal recibida es una combinación de un rayo directo y otro reflejado en el suelo. La Fig. 47(b) presenta los resultados obtenidos con dicho modelo, en la cual se observa que el alcance de cobertura está limitado a una distancia máxima de 100 Km y 90 Km para frecuencias de operación de 138 MHz y 470 MHz, respectivamente. Cabe aclarar que, aunque el modelo de Dos Rayos matemáticamente no involucra la frecuencia de operación del sistema en sus cálculos, la reducción en el área de cobertura se debe al efecto de la curvatura de la Tierra por efecto de difracción, el cual afecta mayormente a la frecuencia de 470 MHz.

El modelo de Okumura-Hata en su expresión para escenarios rurales es también uno de los modelos empíricos más optimistas considerados en el presente trabajo de grado en términos de alcance, sin embargo, el alcance de cobertura para dicho modelo es mucho menor que el obtenido al considerar el

modelo de pérdidas por propagación de espacio libre, puesto que el alcance de cobertura en el cual se logra un valor de potencia recibida mayor al valor de sensibilidad es menor a 160 Km y 100 Km para frecuencias de operación de 138 MHz y 470 MHz, respectivamente, tal como se presenta en la Fig. 47.

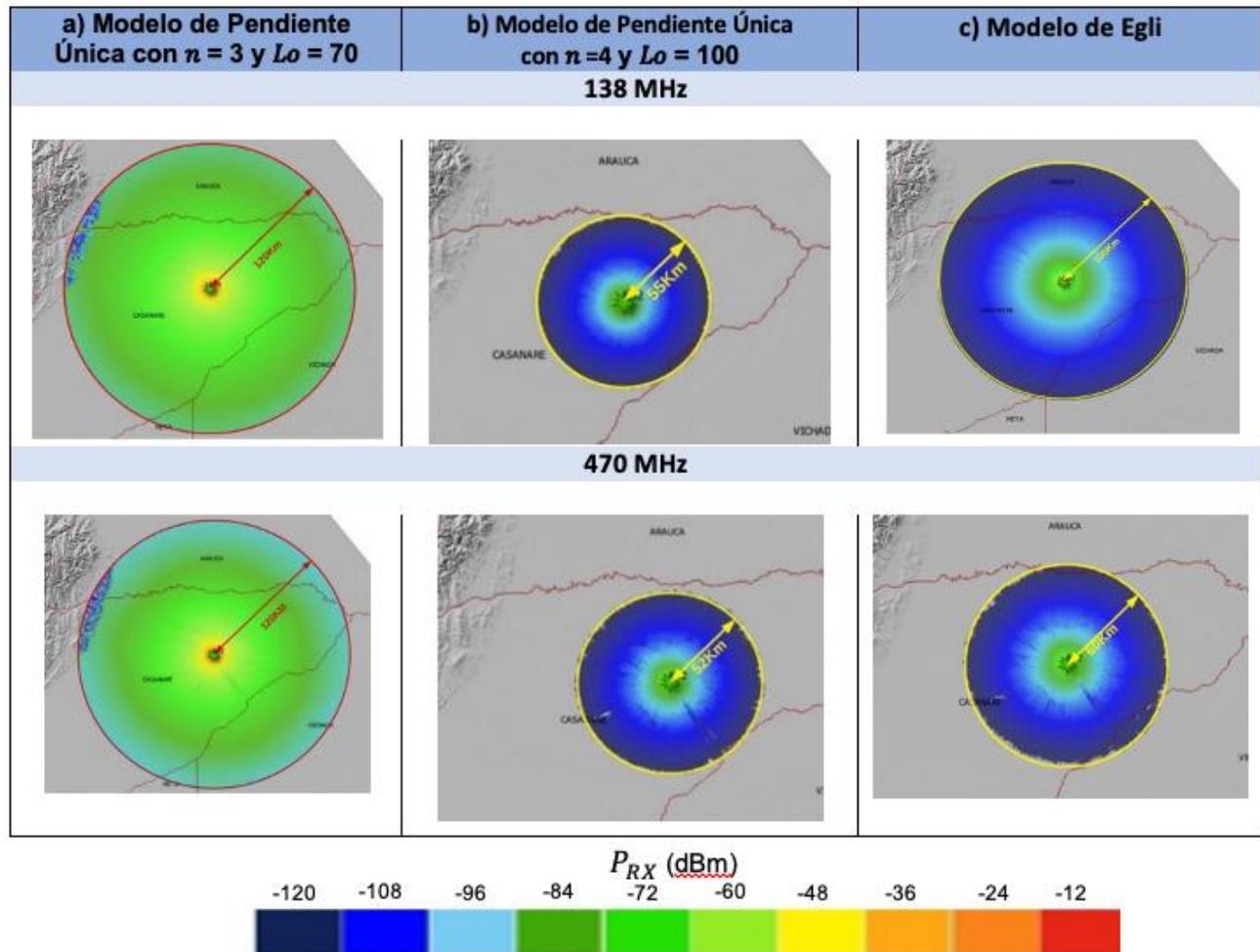


Fig. 48. Estimación de cobertura en una zona de valle con los modelos de propagación de Pendiente única con $n=3$ y $n=4$ y Egli para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de propagación de pendiente única es un modelo que depende principalmente del exponente de propagación (n), del cual depende la rapidez con la que incrementa las pérdidas por propagación en función de la distancia. En la Fig. 48(a) se presentan los resultados de cobertura al utilizar un exponente de propagación $n = 3$ y una pérdida de propagación a una distancia de referencia de 1 Km de $Lo = 70$

dB, los cuales se asemejan a los resultados obtenidos mediante el modelo de propagación de espacio libre, por lo que no es adecuado para ser considerado en el escenario colombiano. Por otro lado, en la Fig. 48(b), se presentan los resultados de cobertura al utilizar un exponente de propagación $n = 4$ y una pérdida de propagación a una distancia de referencia de 1 Km de $L_0 = 100$ dB, los cuales muestran una reducción en el alcance de la cobertura con una distancia máxima entre 55 Km y 52 Km, para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz, respectivamente. Es necesario aclarar que los valores tanto de n como de L_0 han sido asumidos para la obtención de resultados.

El modelo de propagación de Egli considera para los cálculos la frecuencia, la distancia y las alturas de las antenas de BS o RS y de la MS, por lo que al considerar más parámetros el modelo se ajusta de mejor manera al escenario de implementación. La Fig. 48(c), presenta los resultados obtenidos con dicho modelo, en la cual se observa que el alcance de cobertura está limitado a una distancia máxima de 100 Km y 60 Km para frecuencias de operación de 138 MHz y 470 MHz, respectivamente. El efecto de la curvatura de la Tierra y el incremento de la frecuencia de operación del sistema afectan el alcance de la señal.

Según los datos obtenidos se observa que los modelos de pérdidas por propagación más optimistas y en los cuales se obtienen los mayores alcances de cobertura son los modelos de espacio libre, pendiente única con $n = 3$ y $L_0 = 70$ dB, y el modelo de Okumura-Hata para escenarios rurales, alcanzando coberturas superiores a los 100 Km en las frecuencias consideradas. Por otro lado, los modelos de pérdidas por propagación de Dos Rayos, pendiente única con $n = 4$ y $L_0 = 100$ dB, y Egli, consideran un mayor número de parámetros en sus cálculos, y un mayor valor de pérdidas por propagación, por lo tanto, presentan alcances de cobertura limitados con respecto a los primeros modelos. Con los últimos modelos teniendo en cuenta parámetros con valores extremos (máxima potencia de transmisión, máximas ganancias de antenas y mínima sensibilidad) se obtienen alcances de cobertura de máximo 100 Km dependiendo de la frecuencia, siendo un caso particular el obtenido con el modelo de propagación de pendiente única con $n = 4$ y $L_0 = 100$ dB, con el cual se obtiene el menor alcance de cobertura.

Por otro lado, para el proceso de asignación de frecuencias es importante conocer a qué distancia mínima es posible ubicar una BS o RS de otra BS o RS que esté operando en la misma frecuencia, sin que se genere interferencia cocanal considerable en las MS. Para ello se consideran dos BS o RS ubicadas de tal manera que la región en la cual se produce el traslape entre las áreas de cobertura sea menor o igual al 10% del área de cobertura de la señal deseada, tal como se presenta en el ejemplo de la Fig. 49. Este criterio garantiza que la relación C/I sea menor a la relación de protección considerada en un pequeño porcentaje del área de servicio, permitiendo la compatibilidad entre los servicios y el correcto funcionamiento de los sistemas con un nivel de interferencia admisible [70].

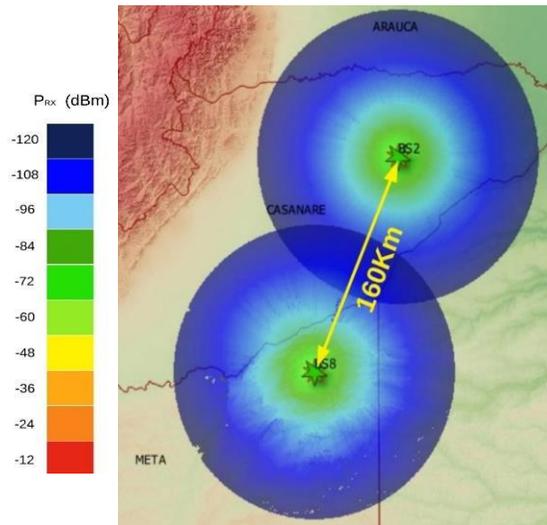


Fig. 49 Dos estaciones base ubicadas a una distancia tal que se garantiza el criterio de compatibilidad entre servicio móviles.

Fuente: Elaboración propia.

En el ejemplo de la Fig. 49, se ha considerado el modelo de propagación de Dos Rayos para la estimación de cobertura de dos BS o RS (una BS o RS ubicada en el departamento del Casanare y otra ubicada en el departamento del Meta), operando a la misma frecuencia (138 MHz) con los valores máximos de los parámetros utilizados en los servicios de radio móvil presentados en la Tabla 5 obteniéndose una distancia mínima de separación entre BS o RS de 160 Km, en la cual los sistemas pueden operar con un nivel de interferencia admisible.

En la Tabla 12 se presentan resultados de distancia mínima que debe existir entre dos BS o RS ubicadas en una zona de valle, las cuales están operando a la misma frecuencia y para la cuales se cumple el criterio de compatibilidad presentado en el ejemplo de la Fig. 49, utilizando para los cálculos los parámetros de la Tabla 5 y los modelos de pérdidas por propagación vistos en la Sección 1.3, exceptuando el modelo de propagación de espacio libre y el modelo de pendiente única con $n = 3$ y $L_0 = 70$ dB, debido a que son modelos demasiado optimistas y no representan de manera adecuada al escenario de implementación considerado, y por lo tanto, solo son utilizados como modelos de referencia.

Tabla 12. Distancia mínima que debe existir entre estaciones base o repetidoras que operan a la misma frecuencia según el criterio de compatibilidad entre servicios móviles.

Fuente: Elaboración propia.

Modelo de Propagación	$f = 138 \text{ MHz}$	$f = 470 \text{ MHz}$
Okumura-Hata (Escenario Rural)	260 Km	160 Km
Dos Rayos	160 Km	150 Km
Egli	160 Km	100 Km
Pendiente Única ($n = 4, L_o = 100$ dB)	90 Km	90 Km

3.2 ESTACIÓN BASE O REPETIDORA CERCA DE OBSTRUCCIONES GEOGRAFICAS

En esta sección se presentan las estimaciones de cobertura obtenidas ubicando una BS o RS en cercanías de grandes accidentes geográficos³³, aplicando los modelos de pérdidas por propagación considerados y utilizando la capa DEM del territorio colombiano, tal como se presenta en la Fig. 50 y la Fig. 51.

³³ Estación Base ubicada en la parte central del departamento del Meta cerca a la Cordillera Oriental

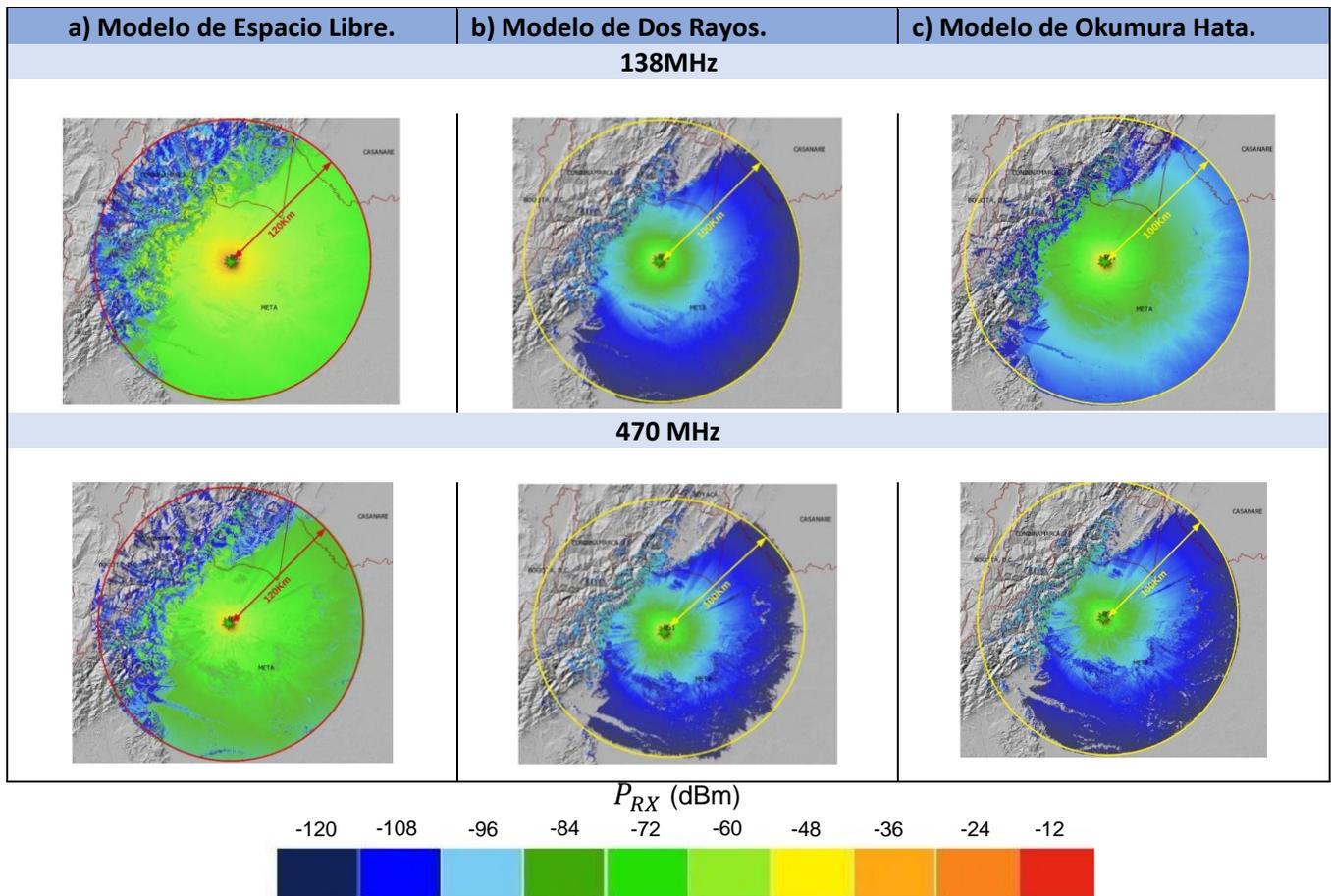


Fig. 50. Estimación de cobertura cerca de obstrucciones geográficas con los modelos de propagación de Espacio libre, Dos Rayos y Okumura-Hata para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.

Fuente: Elaboración propia.

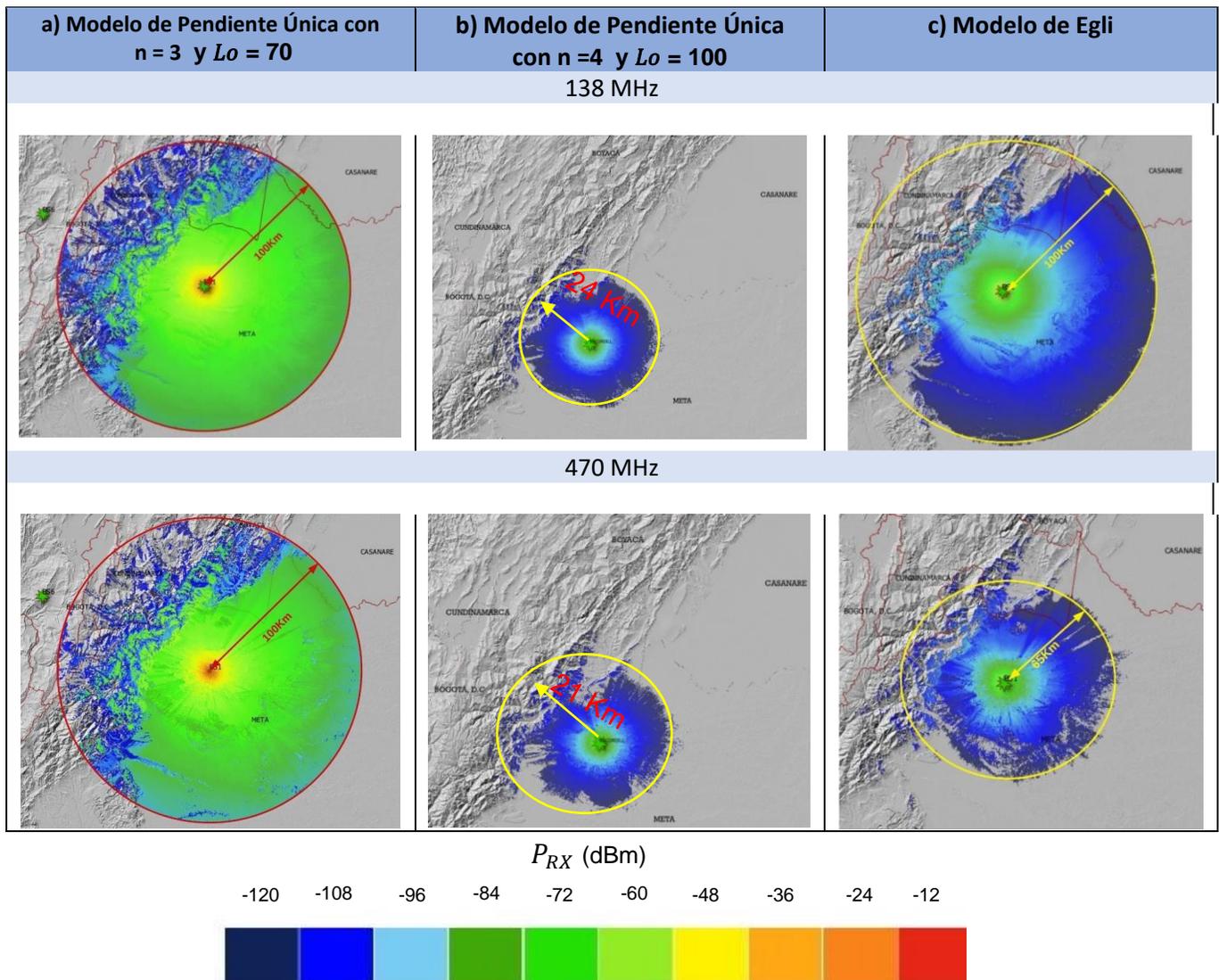


Fig. 51. Estimación de cobertura cerca de obstrucciones geográficas con los modelos de propagación de Pendiente única con $n = 3$ y $L_o = 70$ y $n = 4$ y $L_o = 100$ y Egli para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.

Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar los modelos de pérdidas por propagación se aprecia de manera general que la presencia de la cordillera en la trayectoria de la señal limita su alcance. Esto debido a que las elevaciones de la cordillera son de considerable altura en comparación a la altura de la zona en la cual se ubica la BS o RS (alrededor de 3000 m de diferencia). Por lo que el efecto de la difracción debido

a los obstáculos es significativo bloqueando prácticamente por completo la señal. Incluso considerando las frecuencias más bajas (138 MHz) y los modelos de pérdidas por propagación más optimistas como lo son el modelo de propagación de espacio libre, el modelo de propagación de pendiente única con $n = 3$ y $Lo = 70$ dB y el modelo de propagación de Okumura-Hata para escenarios rurales, se obtiene dicho aislamiento natural.

En la Fig. 52 se presenta un ejemplo en el cual dos BS o RS (una BS o RS ubicada en el departamento del Meta y otra ubicada en el departamento de Cundinamarca) pueden coexistir operando en la misma frecuencia debido a que la presencia de una barrera natural en la trayectoria de la señal de ambas estaciones base, evita la interferencia perjudicial entre los sistemas. Para el cálculo se ha tenido en cuenta el modelo peón de Okumura-Hata para ambas BS o RS y se han considerado los parámetros con valores extremos (máximos o mínimos) descritos en la Tabla 5, los cuales garantizan el mayor aislamiento de los sistemas frente a la interferencia (análisis del peor de los casos).

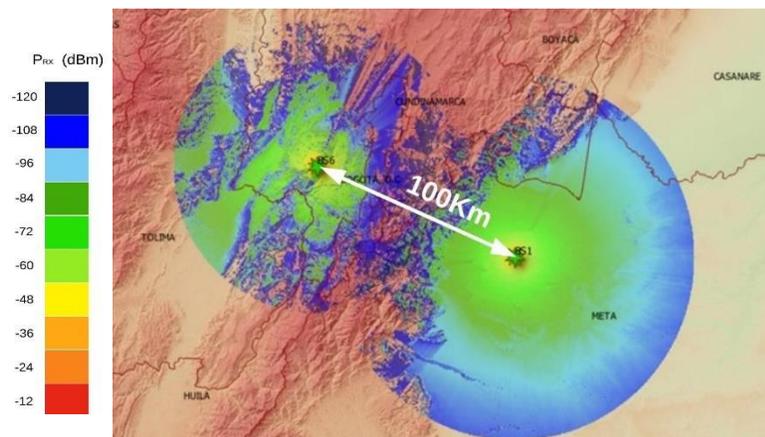


Fig. 52. Ejemplo de dos estaciones base o repetidoras ubicadas en el departamento del Meta y Cundinamarca operando a la misma frecuencia.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 ESTACIÓN BASE O REPETIDORA EN ZONA ENTRE CORDILLERAS

En esta sección se presentan los mapas de estimación de cobertura para una BS o RS ubicadas en una zona entre cordilleras³⁴, aplicando los modelos de propagación ya mencionados anteriormente como se observa en las Fig. 53 y Fig. 54.

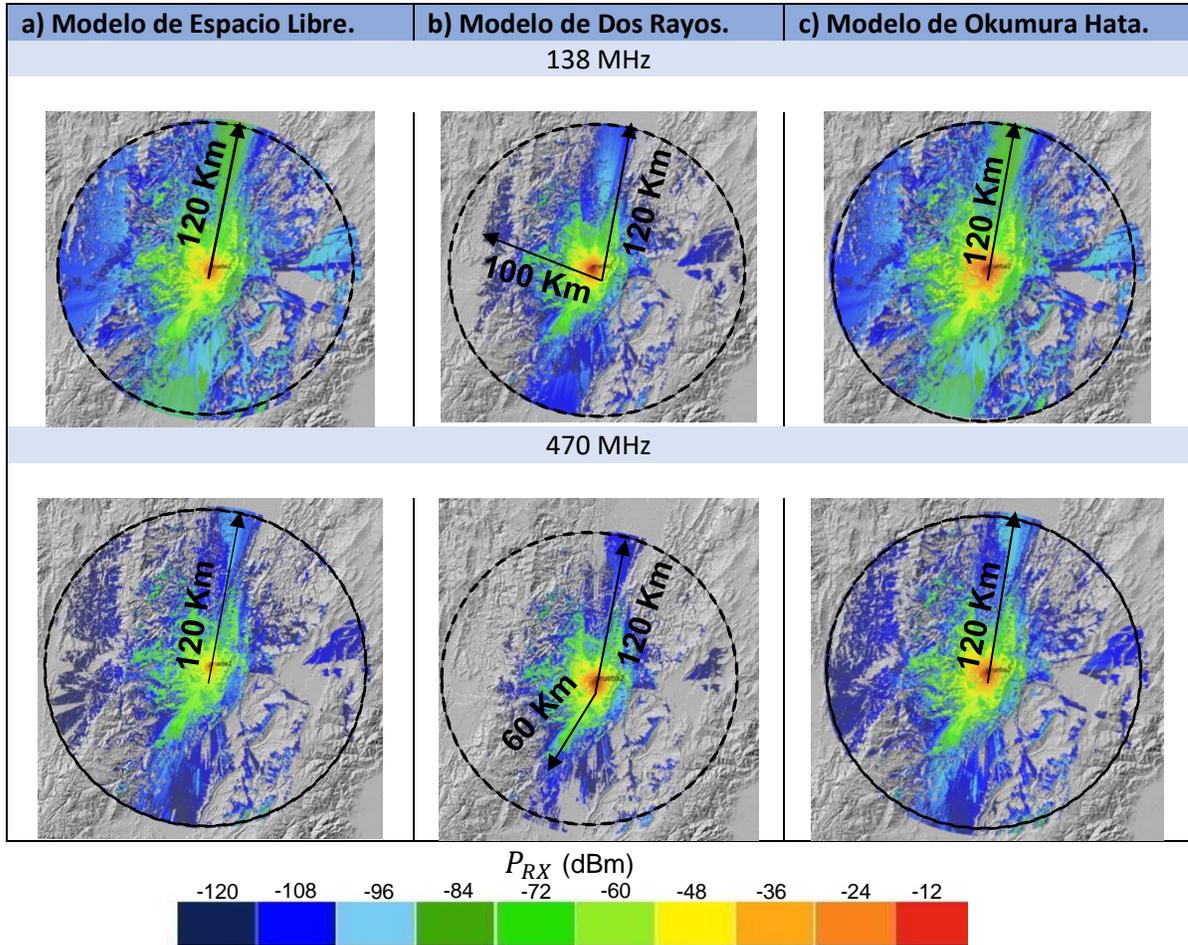


Fig. 53 Estimación de cobertura entre cordilleras con los modelos de propagación de Pendiente única con $n = 3$ y $Lo = 70$ y $n = 4$ y $Lo = 100$, y Egli para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.

Fuente: Elaboración propia.

³⁴ Estación Base ubicada en cercanías a la cordillera central, aproximadamente entre cordillera de los picachos y nevado del huila.

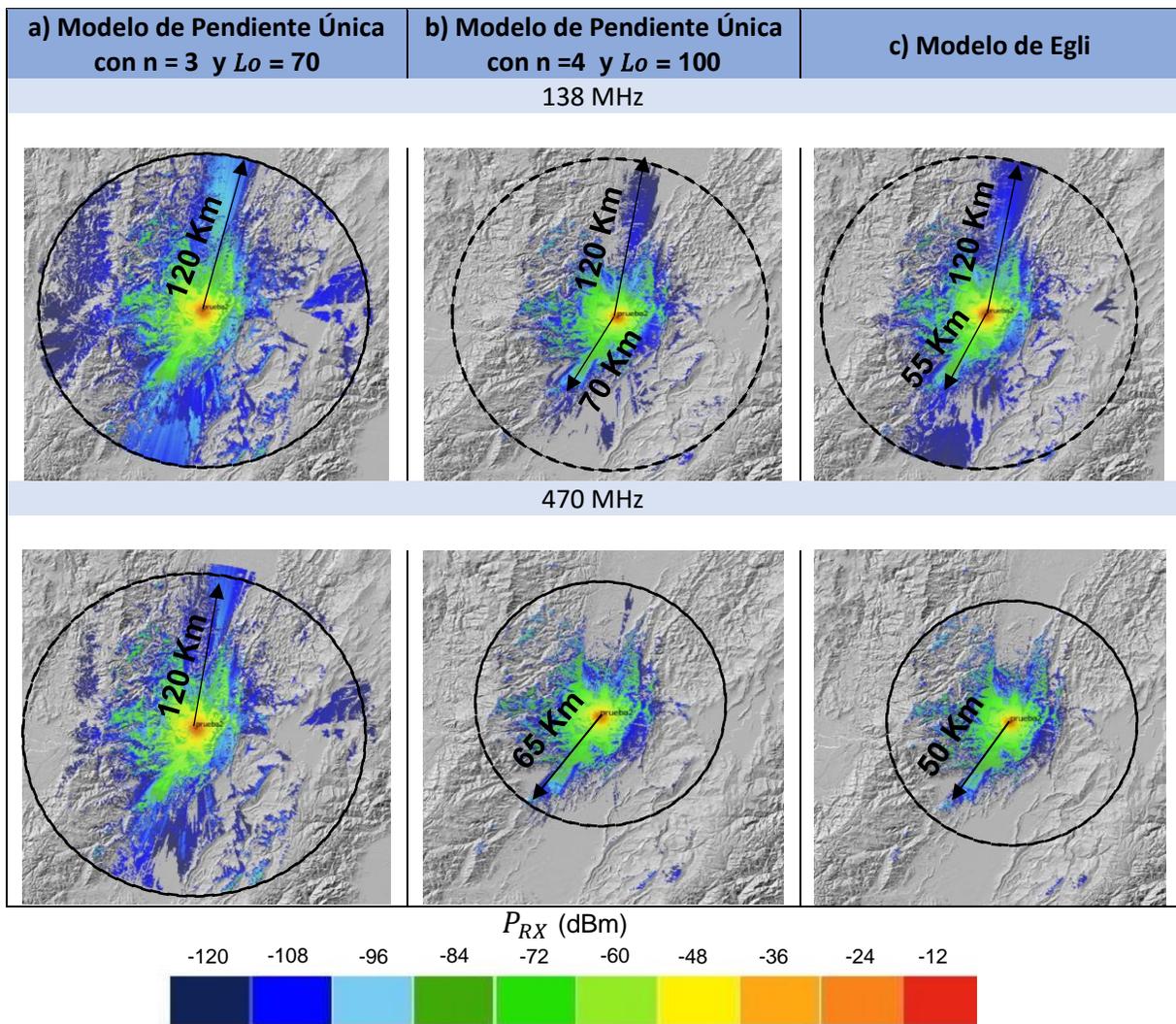


Fig. 54. Estimación de cobertura entre cordilleras con los modelos de propagación de Espacio libre, Dos Rayos y Okumura-Hata para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.

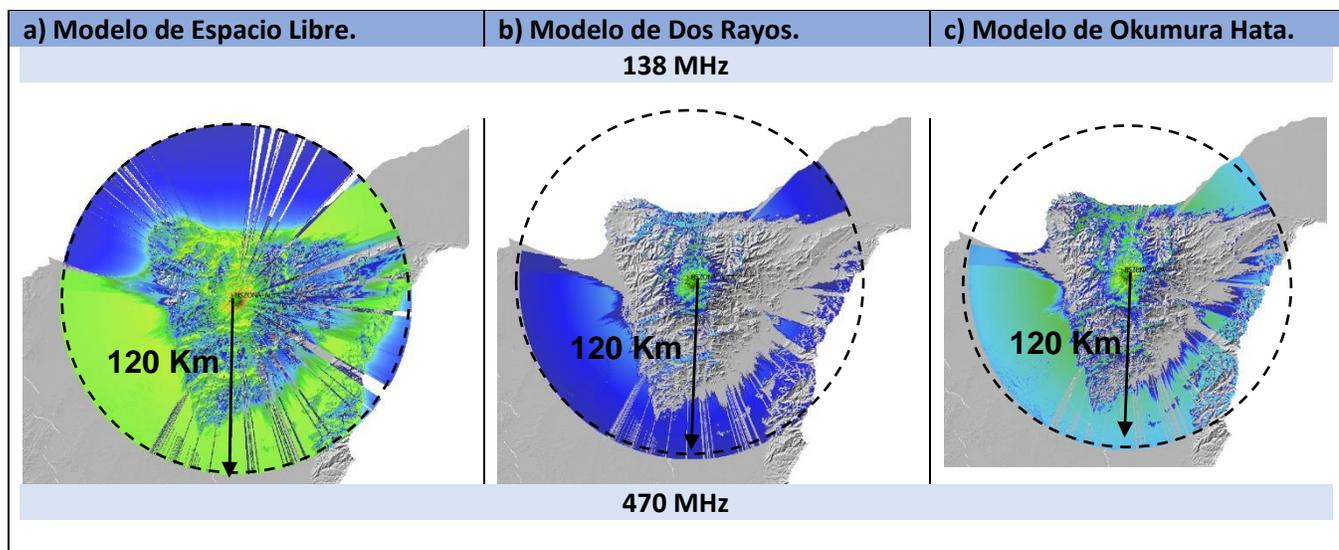
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar las pruebas de estimación de cobertura se puede observar que, en general, se hace más evidente la limitación del alcance de la señal debido a la presencia de las cordilleras. En los modelos de Espacio Libre y Okumura-Hata la señal cubre 120 Km para valores de potencia de -120 dBm, (equivalentes a el valor de la sensibilidad tomado para el análisis de aislamiento Sección 2.4.4.4) en las zonas en donde hay obstrucciones, y, de una potencia de recepción de entre -84 dBm y -72 dBm en zonas libres de obstrucción, como ya se ha mencionado, son modelos bastante optimistas lo que se

corroborar de nuevo en los presentes resultados. Por el contrario, para modelos tales como: Dos Rayos, pendiente única con $n=4$ y $Lo=100$ y Egli, se refleja en los resultados una disminución del alcance de cobertura de la señal bastante significativa, especialmente en la frecuencia de 470 MHz, en donde la cobertura mínima para una potencia con valores mayores a los de la sensibilidad, aproximadamente de -60 dBm, es de 60 Km en el caso del modelo de Dos Rayos, para el modelo de pendiente única con $n=4$ y $Lo=100$ y Egli, es de 70 Km y 65 Km para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz, esto es debido a que, además de que las alturas de las obstrucciones que rodean a la BS son lo suficientemente predominantes para interrumpir la señal, la variabilidad del terreno, los efectos de curvatura de la tierra y de difracción en esta zona específicamente, influyen directamente en el comportamiento de la señal.

3.4 ESTACIÓN BASE O REPETIDORA EN ZONA PREDOMINANTE

En esta sección se presentan las estimaciones de cobertura obtenidas ubicando una BS o RS en una zona predominante del territorio colombiano³⁵. Se presentan los resultados aplicando los modelos de propagación vistos en la Sección 1.3, con el fin de analizar cómo afecta la ubicación de la BS o RS su cobertura.



³⁵ Estación base o repetidora ubicada en la Sierra Nevada de Santa Marta.

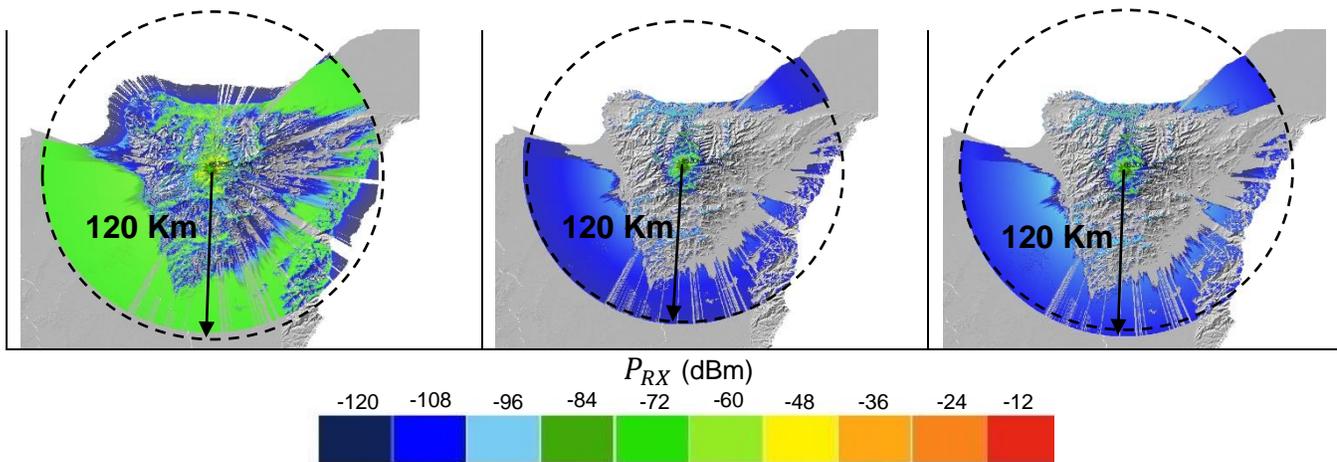
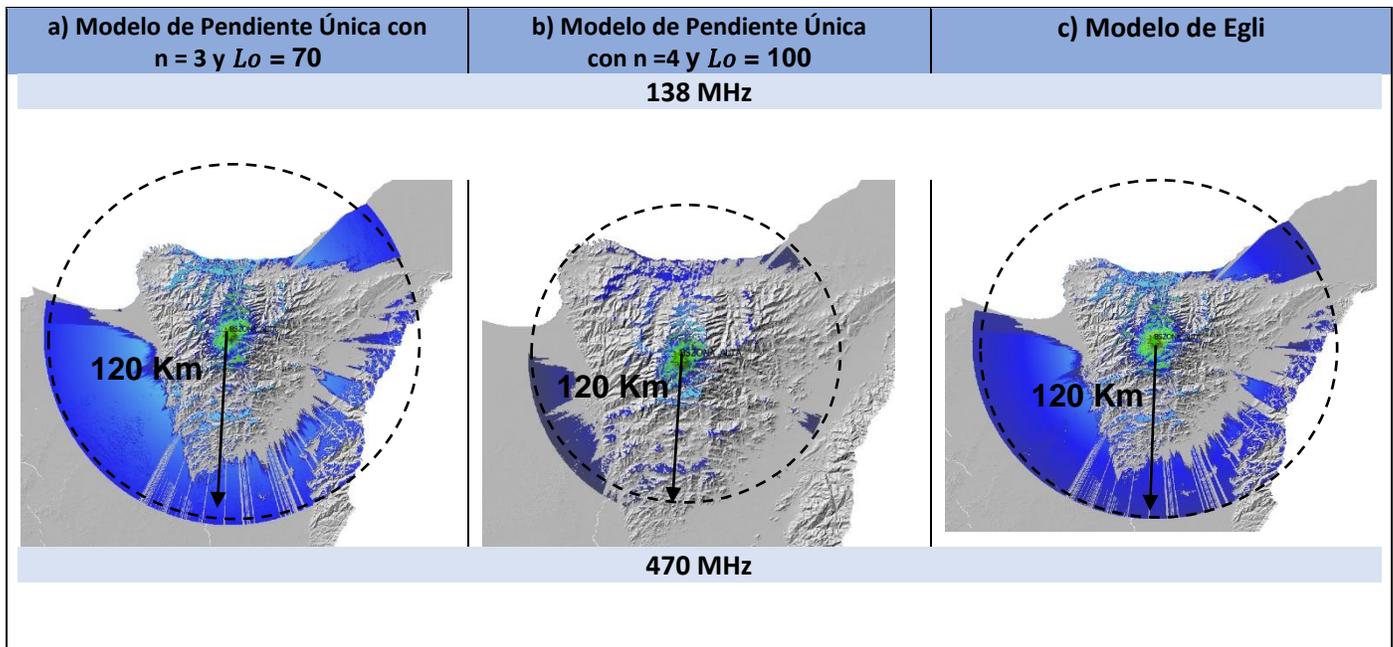


Fig. 55 Estimación de cobertura en zona predominante con los modelos de propagación de Espacio libre, Dos Rayos y Okumura-Hata para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.

Fuente: Elaboración propia.



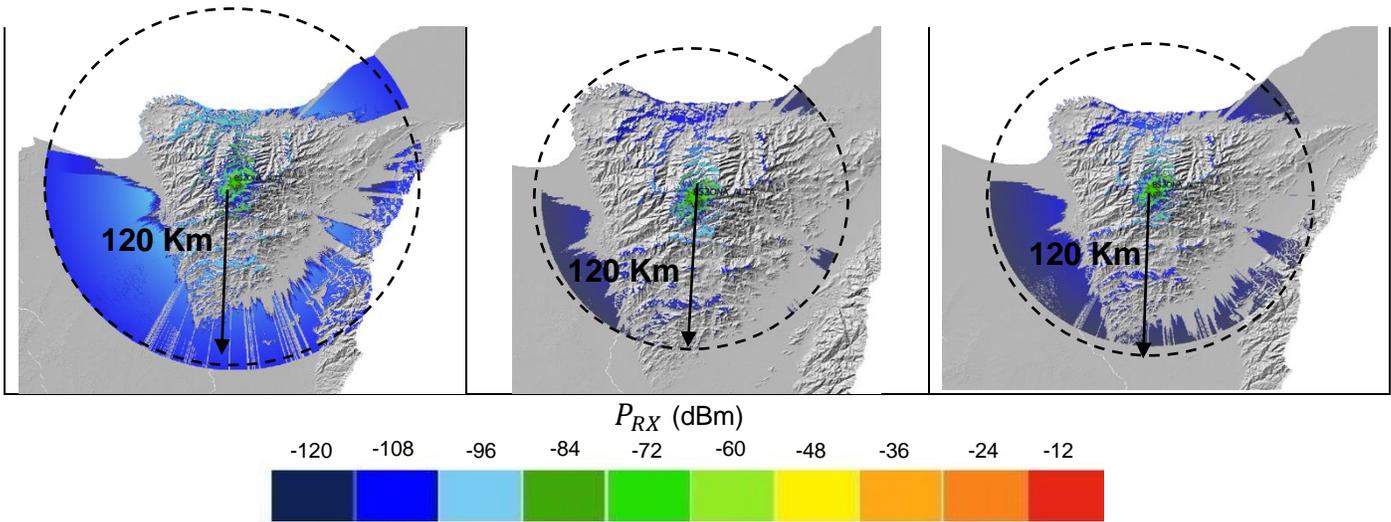


Fig. 56 Estimación de cobertura en zona predominante con los modelos de propagación de Pendiente única con $n = 3$ y $L_o = 70$ y $n = 4$ y $L_o = 100$ y Egli para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 55 y la Fig. 56 se presenta un caso extremo ubicando la BS o RS en la cima de una montaña y se aprecia de manera general que al ubicar la BS o RS en una zona predominante, se obtiene una mayor cobertura de alrededor de un 30% para los modelos considerados, con respecto a los resultados obtenidos ubicando la BS o RS con las mismas características en una zona de valle, lo anterior es debido principalmente a que al estar ubicada en una zona predominante se presenta una mayor visibilidad o más propiamente dicho un mayor despeje para la señal entre la BS o RS y las MS. Por lo tanto, se debe tener en consideración la ubicación de las estaciones base, ya que juega un papel muy importante en el análisis de interferencia.

CAPITULO IV

4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

4.1 CONCLUSIONES

- La herramienta de estimación de cobertura radioeléctrica utilizada en el presente trabajo de grado, al ser de código abierto y ofrecer la posibilidad de trabajar en conjunto con los recursos de GIS, permitió su modificación o adaptación e incluir datos como: valores extremos de los parámetros técnicos de los sistemas en la banda de frecuencia considerada; los modelos de pérdidas por propagación más adecuados; y la mayor cantidad de información geográfica del territorio Colombiano, obteniéndose con ello resultados confiables en lo que respecta al máximo alcance teórico de las señales transmitidas por la BS o RS que hacen parte de los sistemas de comunicación de radio móvil en Colombia, lo que es de gran utilidad para realizar el análisis de interferencia y estimar el adecuado aislamiento teórico entre los sistemas actuales y futuros, especialmente en aquellos que operan en la misma frecuencia.
- En la actualidad, existe un gran número de herramientas para la estimación de cobertura que permiten tanto la caracterización de los escenarios como la inclusión de los diferentes parámetros que se necesiten para determinados análisis, y al usar algunas de estas herramientas para comparar sus resultados con los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado se observa una alta correlación en los resultados.
- La herramienta adaptada y modificada tuvo en cuenta en la estimación de cobertura fenómenos tales como difracción, refracción, reflexión y las restricciones en el alcance de los sistemas de radio terrestre que impone la curvatura de la tierra.
- En el presente trabajo de grado se consideraron los modelos de pérdidas por propagación tales como: Okumura-Hata, Pendiente Única, Dos Rayos, Egli y espacio libre, también, el modelo de pérdidas por difracción de filo de cuchillo y efecto sobre la propagación de la curvatura de la tierra. El trabajo de grado realizó un análisis de estimación de cobertura en distintos escenarios, tales como, transmisor en zona de valle, transmisor en un punto predominante sobre el terreno y transmisor ubicado en una zona entre cordilleras, lo cual hizo posible observar el comportamiento de la señal en diferentes escenarios, considerando situaciones y características de los sistemas de radio móvil al límite, considerando las características del terreno, lo que permitió analizar las áreas de servicios y estimar la mínima distancia que debe haber entre sistemas operando en la misma frecuencia considerando aspectos de compatibilidad electromagnética.

- Para sistemas de comunicaciones móviles que operan en las bandas de frecuencia de VHF y la parte baja de UHF hasta 470 MHz, cualquier obstrucción entre la BS o RS y las MS atenuará la señal transmitida. En este punto, el principio de difracción juega un papel muy importante en la cobertura de un sistema radio móvil, puesto que se convierte en el mecanismo de propagación que permite llegar a ciertos sitios en los cuales no existe línea de vista, en el cual, la atenuación sobre la señal en relación con un escenario con línea de vista puede ser significativo, la cual depende de las características del obstáculo y la geometría de la trayectoria de la señal. Al considerar grandes obstáculos en las estimaciones de cobertura, tales como lo son montañas y cordilleras del escenario colombiano, se observa que estas actúan como pantallas de aislamiento, incluso considerando las frecuencias más bajas y los modelos de pérdidas por propagación más optimistas en términos de cobertura, por lo que dos BS o RS pueden coexistir operando en la misma frecuencia o frecuencias cercanas siempre y cuando exista la presencia de una barrera natural en la trayectoria de la señal de ambas estaciones que evite la interferencia perjudicial entre los sistemas.
- De manera general, los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado muestran que, en el caso del modelo de espacio libre, el comportamiento de la señal es bastante ideal y optimista, ya que se alcanzan potencias mayores a las de la sensibilidad y de hasta -84 dBm y -72 dBm para distancias de 120 Km en zonas sin presencia de obstrucciones y de hasta -120 dBm para zonas en presencia de obstrucciones para las frecuencias de 138 MHz y 470 MHz. De igual manera para los modelos de Okumura-Hata y Pendiente Única para valores de $n = 3$ y $L_o = 70$, en los cuales la distancia de cobertura disminuye un 17% de la distancia cobertura de 120 Km para la frecuencia de 470 MHz en zonas sin presencia de obstrucciones, sin embargo, la potencia de recepción disminuye a valores de hasta -108 dBm. Por otra parte, en lo que respecta a los modelos de Dos Rayos, Egli y Pendiente única para valores de $n = 4$ y $L_o = 100$, se muestra una disminución en la distancia de cobertura, para el modelo de Dos Rayos esta disminución es de 17% y 25% para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz respectivamente, la potencia de recepción presenta una disminución de hasta -120 dBm. En el caso del modelo de propagación de Egli la cobertura presenta una disminución de 17% y 50% para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz respectivamente y la potencia de recepción es muy similar al modelo de propagación de Dos Rayos. El modelo de propagación de Pendiente única presenta una disminución en cobertura de 54% y 56% para frecuencias de 138 MHz y 470 MHz y una disminución en la potencia de recepción de hasta 120 dBm.
- En escenarios donde hay presencia de obstrucciones se presenta una disminución notable en la distancia de cobertura y potencia de recepción para todos los modelos considerados, donde la reducción más significativa en la distancia de cobertura tales como: 45% y 58% para los modelos de pérdidas por propagación tales como: Egli y Pendiente única para valores de para valores de $n = 4$ y $L_o = 100$ respetivamente, para frecuencia de 470 MHz.
- Se observa que los resultados de los modelos de Dos Rayos, Egli y Pendiente Única con $n=4$ y $l_o=100$, describen de una manera más realista el comportamiento estimado de una señal en

el escenario Colombiano en comparación al modelo de propagación de Espacio Libre, esto es debido a que, además de considerar pérdidas por difracción de obstáculos presentes en el trayecto, la refracción atmosférica, parámetros de distancia, frecuencia y pérdidas misceláneas, también tienen en cuenta factores como el principio de curvatura de la tierra y reflexión en el terreno como es el caso del modelo de pérdidas por propagación de Dos Rayos, pérdidas por las alturas de las antenas en el caso del modelo de pérdidas por propagación de Egli, y, exponente de propagación y distancia de referencia en el caso del modelo de Pendiente única con $n=4$ y $Lo=100$.

- Referente a los resultados obtenidos, la distancia mínima sugerida que debe existir entre estaciones base o repetidoras que operan a la misma frecuencia según el criterio de compatibilidad entre servicios móviles son: 260 Km, 160 Km, 160 Km, 90 Km para modelos de pérdidas por propagación de Okumura-Hata (rural), Dos Rayos, Egli y Pendiente Única respectivamente para la frecuencia de operación de 138 MHz y 160 Km, 150 Km, 100 Km, 90 Km para modelos de pérdidas por propagación de Okumura-Hata (rural), Dos Rayos, Egli y Pendiente Única respectivamente para la frecuencia de operación de 470 MHz. Además, es necesario buscar nuevas prestaciones de las tecnologías inalámbricas actuales que permiten optimizar el uso de la eficiencia espectral como lo es multicast el cual permite enviar contenido a diferentes usuarios a través de una única transmisión permitiendo hacer un uso adecuado de espectro de frecuencia.
- El uso de una metodología para el desarrollo de un proyecto de grado proporciona herramientas de organización que permiten la administración y asignación de los tiempos de ejecución del proyecto entre las tareas que lo componen, lo que conlleva a una estandarización de los procesos, formación de una estructura de trabajo, retroalimentación para cada tarea y finalmente el cumplimiento eficiente de las metas propuestas.

4.2 TRABAJOS FUTUROS

A lo largo del proceso de investigación realizado para este trabajo de grado, se observó que en Colombia realmente hay la necesidad de analizar la cobertura de los sistemas de comunicaciones con el fin de mejorar la eficiencia espectral en la asignación de frecuencias de operación para los diferentes sistemas de radio móvil en las distintas regiones, aspectos de interferencia y contribuir a la introducción de nuevos sistemas y tecnologías. Para ello hay diferentes modelos de pérdidas por propagación tales como: Longley Rice u otros que toman en cuenta pérdidas por vegetación que permiten brindar resultados de estimación de cobertura más cercanos a los reales y que pueden ser explorados y evaluados en la herramienta para la estimación de cobertura.

También se considera importante que este tipo de trabajos se complemente con análisis de medidas en campo, lo cual permite una comparación entre las medidas y las estimaciones realizadas.

Además, es importante introducir antenas y patrones de radiación en el análisis de cobertura que permitan una estimación de distancia mínima de separación entre BS o RS que usan la misma frecuencia de operación.

CAPITULO V

5 REFERENCIAS

- [1] A. F. Molisch, *Wireless Communications*. Wiley, 2005.
- [2] J. M. H. Rábanos, *Transmisión por radio*, Madrid: Editorial Universitaria Ramón Araces, 2008.
- [3] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones, "Mediciones del Factor de Utilización y de la Eficiencia en el Uso del Espectro Radioeléctrico," *Manual de Gestión del Espectro Radioeléctrico*, 2012.
- [4] Unión Internacional de Telecomunicaciones and Ministerio de Tecnologías de Información y las Comunicaciones de Colombia, *Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico: Ingeniería del Espectro Radioeléctrico (Título II)*, Bogotá, Colombia, 2012.
- [5] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, *La Evolución de la Gestión del Espectro Radioeléctrico*, GRETEL, ed., 2007.
- [6] C. M. Hernandez Bonilla, V. M. Quintero Florez, and E. O. Navarro Astudillo, "Análisis de Interferencia de Sistemas de Comunicaciones Operando en VHF en Función de la Frecuencia y la Distancia," Universidad del Cauca, 2021.
- [7] E. O. Navarro Astudillo, "Herramienta Prototipo Software de Estimación de Cobertura Radioeléctrica para la Planificación de una Red IoT," Trabajo de grado", Universidad del Cauca, ed, 2019.
- [8] ESRI. "Historia del GIS." <https://www.esri.es/es-es/descubre-los-gis/qu-es-sig/que-es-sig> (accessed).
- [9] ESRI. "La Comunidad de Datos SIG." <https://learn.arcgis.com/es/arcgis-book/chapter4/> (accessed).
- [10] (2018). *Manual Práctico para el Despliegue y Manejo de Información Cartográfica*. [Online] Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/299001/Manual_Pra ctico Guia PMDU RE V.pdf
- [11] QGIS. "Datos Raster." (accessed).
- [12] ArcGIS. "¿Qué Son los Datos Raster?" (accessed).
- [13] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. "Geoportal IGAC." <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/tematicos> (accessed).

- [14] International Telecommunications Union. (2021) Nuevo Mundo, Nueva Radio (Evolución, Innovación, Conexión). *ITU News Magazine*. Available: https://www.itu.int/en/itu/news/Documents/2021/2021-01/2021_ITUNews01-es.pdf
- [15] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Informe 1145," Ginebra, Suiza, 1990.
- [16] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Manual sobre propagación por onda de superficie*, Oficina de Radiocomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2014.
- [17] *Terms and definitions used in frequency planning for sound broadcasting*, Rec. ITU-R BS.638, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1986.
- [18] *The Radio Refractive index: Its Formula and Refractivity Data*, International Telecommunications Union, 2019.
- [19] *Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation*, Rec. ITU-R P.834-9, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2017.
- [20] *Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz*, Rec. ITU-R P.452-16, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2015.
- [21] *Method for Calculating Sporadic-E Field Strength*, Rec. ITU-R P.534-5, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2012.
- [22] *Calculation of free-space attenuation*, Rec. ITU-R P.525-4, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2019.
- [23] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Handbook on Terrestrial Land Mobile Radiowave Propagation in the VHF/UHF bands*, Ginebra, Suiza, 2002.
- [24] *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands*, Rec. ITU-R P.1812-5, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2019.
- [25] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [26] T. L. Signal, *Wireless Communications*, McGraw-Hill Education, India, 2010.
- [27] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*, Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR, 2002.
- [28] J. J. Egli, "Radio propagation above 40 MC over Irregular Terrain," in *Proc. of the IRE*, IEEE, Ed., Oct. 1957, vol. 45, pp. 1383-1391.
- [29] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fakuda, "Field strength and its variability in VHF and UHF mobile service," *Rev. Elect. Comm. Lab.*, vol. 16, no. 9-10, pp. 825-875, 1968.
- [30] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-29, no. 3, pp. 317-325, 1980.
- [31] G. Hufford, "The ITS Irregular Terrain Model, version 1.2.2 The Algorithm,"

- [32] A. G. Longley and P. L. Rice, "Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain. A Computer Method.," NTIS, 1968.
- [33] Federal Communications Commission, "Longley-Rice Methodology for Predicting Inter-Service Interference to Broadcast Television from Mobile Wireless Broadband Services in the UHF Band," 2015.
- [34] J. Deygout, "Multiple Knife-Edge Diffraction of Microwaves," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-14, no. 4, 1966.
- [35] C. Huygens., *Traité de la lumiere*. Leiden, 1690.
- [36] *Propagation by diffraction*, Rec. ITU-R P.526-15, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2019.
- [37] *Sharing between the broadcasting service and the fixed and/or mobile services in the VHF and UHF bands*, ITU-R SM.851, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1993.
- [38] *Minimum field strengths for which protection may be sought in planning an analogue terrestrial television service*, Rec. ITU-R BT.417, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2002.
- [39] *Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora Frecuencia Modulada (FM)*, Ministerio de Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones and Agencia Nacional del Espectro, 2020.
- [40] *Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF*, Rec. ITU-R BS.412, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1998.
- [41] *Apéndice A del Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en FM*, Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones and Agencia Nacional del Espectro, 2021.
- [42] *Radiocommunication Vocabulary*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2015.
- [43] *Protection ratio for sound broadcasting in the Tropical Zone*, Rec. ITU-R BS.216, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1982.
- [44] *Determination of radio-frequency protection ratios for frequency-modulated sound broadcasting*, Rec. ITU-R BS.641, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1986.
- [45] *Protection of fixed wireless systems from terrestrial digital video and sound broadcasting systems in shared VHF and UHF bands*, Rec. ITU-R F.1670, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2006.
- [46] *Signal-to-Interference Ratios and Minimum Fields Strengths Required in the Aeronautical Mobile (R) Service Above 30 MHz*, Rec. ITU-R M.441, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1982.
- [47] *Characteristics and protection criteria for radars operating in the radiolocation service in the frequency band 30-300 MHz*, Rec. ITU-R M.1802, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2010.

- [48] *Characteristics of and protection criteria for radars operating in the radiolocation service in the frequency range 420-450 MHz*, Rec. ITU-R M.1462, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2019.
- [49] Organización de Aviación Civil Internacional, *EUR Frequency Management Manual for Aeronautical Mobile and Aeronautical Radio Navigation Services*, Neuilly-sur-Seine Cedex, Francia: ICAO, 2019.
- [50] Organización de Aviación Civil Internacional, *Handbook On Radio Frequency Spectrum Requirements For Civil Aviation*, Neuilly-sur-Seine Cedex, Francia: OACI, 2020.
- [51] *Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media*, Rec. ITU-R P.310, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2019.
- [52] International and I. Civil Aviation Organization, *Handbook On Radio Frequency Spectrum Requirements For Civil Aviation.*, 2020.
- [53] *Frequency and distance separations*, Rec. UIT-R SM.337-6, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2020.
- [54] *Cálculo de la Relación Portadora/Interferencia Entre Estaciones Terrestres del Servicio Fijo por Satélite y Sistemas de Radioenlaces*, U. I. d. Telecomunicaciones, 1995.
- [55] *Reglamento de Radiocomunicaciones, Resoluciones y recomendaciones*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2020.
- [56] F. C. Commission, *FCC Record: A Comprehensive Compilation of Decisions, Reports, Public Notices, and Other Documents of the Federal Communications*. 2008.
- [57] ALOS. "Alaska Satellite Facility." ALOS PALSAR – About – ASF (alaska.edu) (accessed 25 Octubre, 2021).
- [58] DANE. "Geoportal DANE." <https://geoportal.dane.gov.co/> (accessed).
- [59] *Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias*, A. N. d. Espectro, Bogotá, Colombia, 2021.
- [60] *Resolución 105 de 2020*, Agencia Nacional del espectro, Bogotá, Colombia, 2020.
- [61] *Technical and Operational Information for Identifying Spectrum for the Terrestrial Component of Future Development of IMT-2000 and IMT-Advanced*, ITU-R M.2079, Unión Internacional de telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2006.
- [62] *Vocabulario de Radiocomunicaciones*, ITU-R V.573-6, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2015.
- [63] Agencia Nacional del Espectro (ANE). "Visor de Espectro." https://espectro-co.ane.gov.co/TesMonitorPlanning/TesMonitorPlanningWeb/#TMP_Main (accessed 21 Oct, 2021).

-
- [64] *Manual Comprobación Técnica Del Espectro*, R-HDB-23-2011, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza., 2011.
- [65] L. Connectivity, "Find an Antenna."
- [66] Universidad Tecnológica Nacional, "Electrónica Aplicada III," in *Receptores de Radio Frecuencia*, ed. Mendoza, Argentina, 2004.
- [67] *Relaciones de Protección e Intensidades Mínimas de Campo Necesarias en os Servicios Móviles*, I. ITU-R M.358-5, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 1986.
- [68] Hytera, "Datos técnicos TC-508," Shenzhen ed. China: Hytera.
- [69] "Radio Mobile Online." https://www.ve2dbe.com/rmonline_s.asp (accessed.
- [70] J. M. H. Rábanos, *Comunicaciones Móviles*. 2004.

ANEXO A

A. INSTALACIÓN DE LA HERRAMIENTA Y CONFIGURACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA

En este anexo se presenta una guía³⁶ de instalación de los complementos presentados para la estimación de cobertura radioeléctrica en el software QGIS, así como también, la configuración para el uso de la topografía en dicha herramienta. La herramienta ha sido implementada y probada en la versión 3.6 de QGIS y por lo tanto debe ser instalada en dicha versión o en versiones posteriores del software.

A.1 INSTALACIÓN DE LA HERRAMIENTA

En la carpeta llamada “PaqueteDeInstalación” se encontrarán las carpetas que incluyen tanto los complementos a instalar para la estimación de cobertura, como la topografía adquirida gratuitamente del satélite ALOS PALSAR, como se muestra en la Fig. 57.

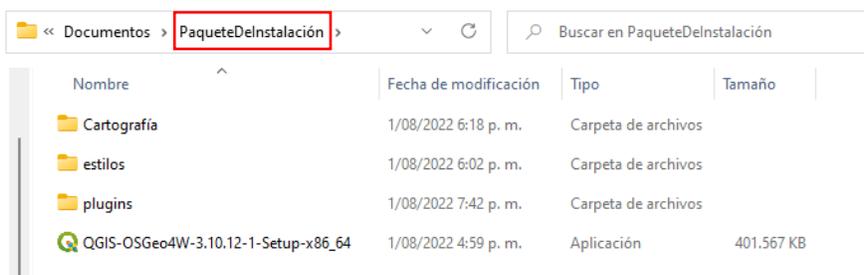


Fig. 57. Paquete de instalación para la herramienta de estimación de cobertura.

Fuente: Elaboración propia

Para comenzar, se debe instalar QGIS. Una vez instalado se abre y se busca la pestaña de “configuración” en la parte superior del programa [7], como se observa en la Fig. 58, se buscan los perfiles de usuario y se va al perfil activo.

³⁶ Esta guía de instalación se ha basado en el anexo B del trabajo de grado [7] E. O. Navarro Astudillo, "Herramienta Prototipo Software de Estimación de Cobertura Radioeléctrica para la Planificación de una Red IoT,", Trabajo de Grado, Universidad del Cauca ed, 2019.

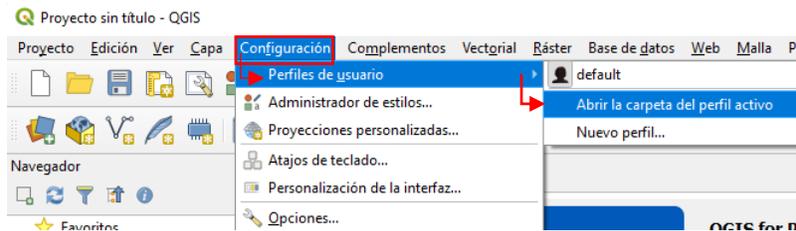


Fig. 58. Ruta de la ubicación de los complementos a instalar.

Fuente: Elaboración propia.

Cuando se ingresa en la carpeta del perfil activo, se busca la carpeta “python” y luego la subcarpeta “plugins”³⁷, en donde se deben copiar los dos complementos del paquete de instalación que se encuentran en la ruta “PaqueteDeInstalación/plugins” en las carpetas “VHF-UHFcoverage” y “VHF-UHFprofiletool”. Cuando se ingresa en la carpeta del perfil activo, se busca la carpeta “python” y luego la subcarpeta “plugins”³⁸, en donde se deben copiar los dos complementos del paquete de instalación que se encuentran en la ruta “PaqueteDeInstalación/plugins” en las carpetas “VHF-UHFcoverage” y “VHF-UHFprofiletool”, tal como se presenta en la fig. 59.

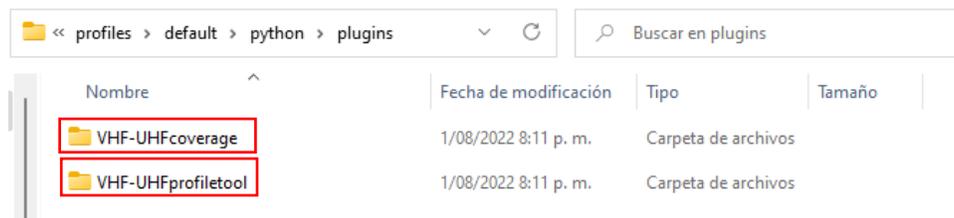


Fig. 59. Instalación de los complementos dentro del software QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

Ya copiados los complementos se procede a reiniciar QGIS³⁹ y una vez abierto, se busca la pestaña “Complementos” en la parte superior del programa y se le da clic a “Administrar e instalar complementos...” como se observa en la Fig. 60.

³⁷ En caso de no estar la subcarpeta “plugins”, debe crearse usando dicho nombre para alojar a los complementos.

³⁸ En caso de no estar la subcarpeta “plugins”, debe crearse usando dicho nombre para alojar a los complementos.

³⁹ Para reiniciar QGIS basta con cerrar y abrir nuevamente el programa.



Fig. 60. Ubicación de la carpeta de administración de los complementos instalados.

Fuente: Elaboración propia.

Al estar dentro de la carpeta de administración e instalación de complementos, se deben activar⁴⁰ los complementos de perfil y cobertura, como se muestra en la Fig. 61.

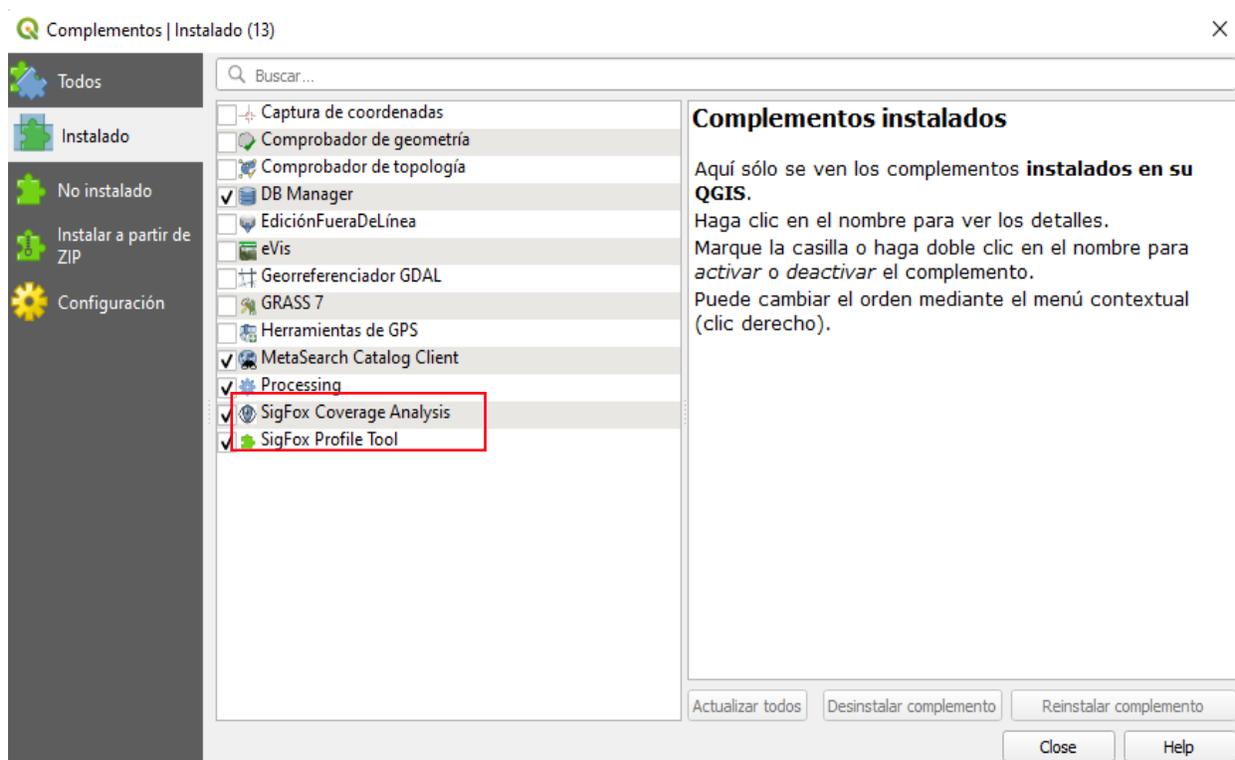


Fig. 61. Activación de complementos.

Fuente: Elaboración Propia.

Y con este paso se finaliza el proceso de instalación de la herramienta de estimación de cobertura.

⁴⁰ Para activar los complementos se da clic en el cuadro vacío junto al complemento y una vez activado aparecerá un “check” dentro del cuadro.

A.2 CONFIGURACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA

En la ruta “PaqueteDeInstalación/Cartografía” se encuentran las carpetas con la información topográfica de Colombia, donde la subcarpeta “Colombia” contiene los archivos de elevación y sombras y la subcarpeta “DivisionPolitica” contiene los archivos de división política, lo que se puede ver en la Fig. 62.

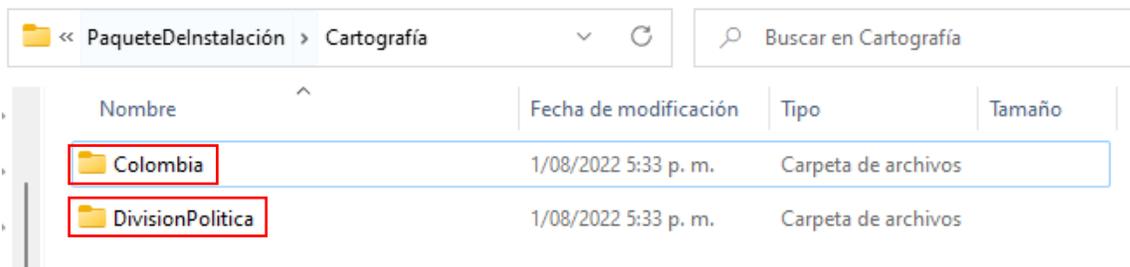


Fig. 62. Información topográfica necesaria para la caracterización del escenario colombiano.

Fuente: Elaboración propia.

A.2.1 CREACIÓN DEL ESCENARIO DE TRABAJO

Es necesario armar el escenario de trabajo, con las respectivas capas temáticas del paquete de instalación, para lo cual, basta con arrastrar dichas capas a la sección “Capas” en QGIS, como se muestra en la Fig. 63 y en la Fig. 64.

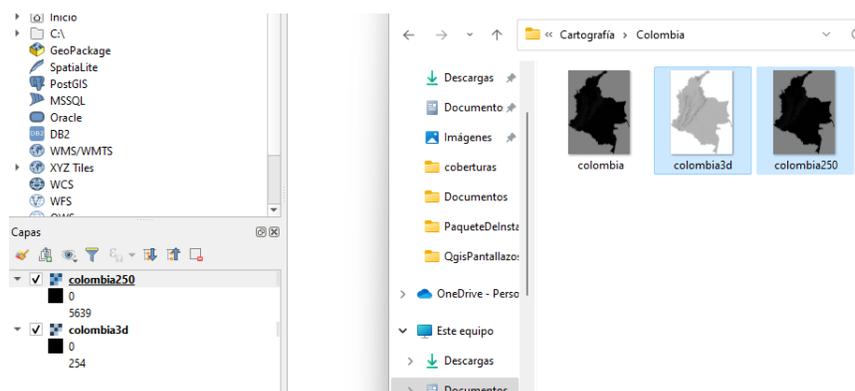


Fig. 63. Mapas temáticos de elevación y sombras de Colombia cargados en QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

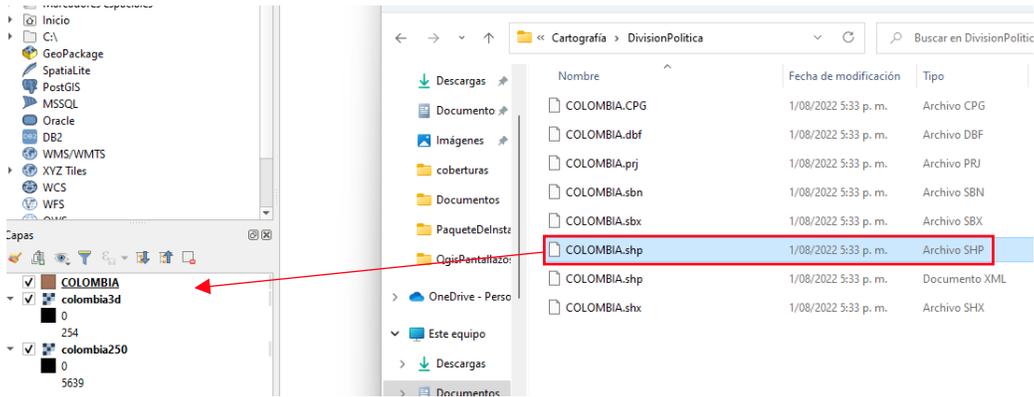


Fig. 64. Mapa temático de división política de Colombia cargado en QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

Después de cargar el archivo de división política, es necesario configurar QGIS para poder observar los nombres de dicha división, así que se hace clic derecho sobre la capa “Colombia”, se busca la pestaña “Propiedades” y se dirige a la sección de etiquetas, en donde se realiza la configuración mostrada en la Fig. 65.

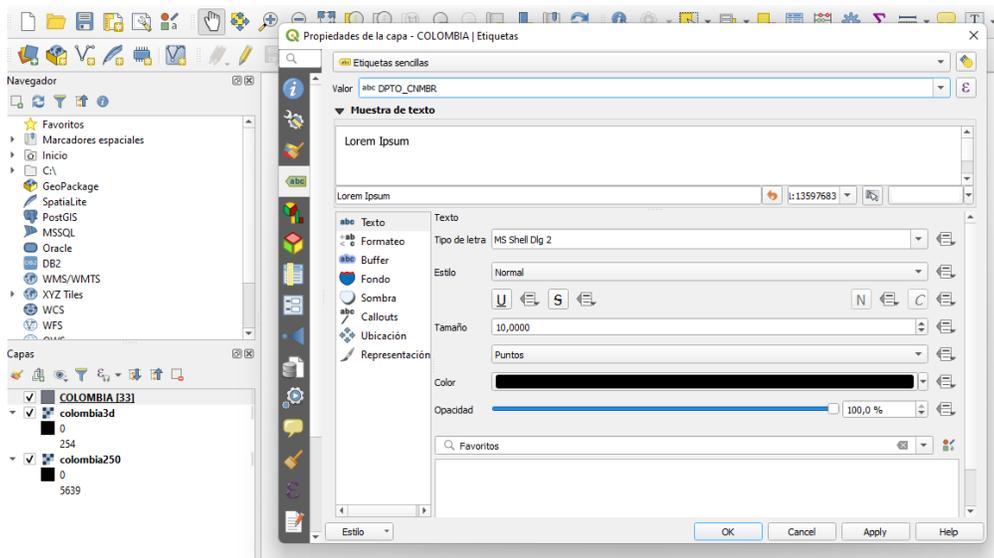


Fig. 65. Configuración para el despliegue de las etiquetas en la capa de división política de Colombia.

Fuente: Elaboración propia.

QGIS brinda la posibilidad de carga y personalización de los estilos de los mapas temáticos, así que, para diferenciar los niveles de alturas del país, coberturas y las BS, se tiene la opción de cargar los estilos incluidos en el paquete de instalación como se ve en la Fig. 66 y en la Fig. 67.

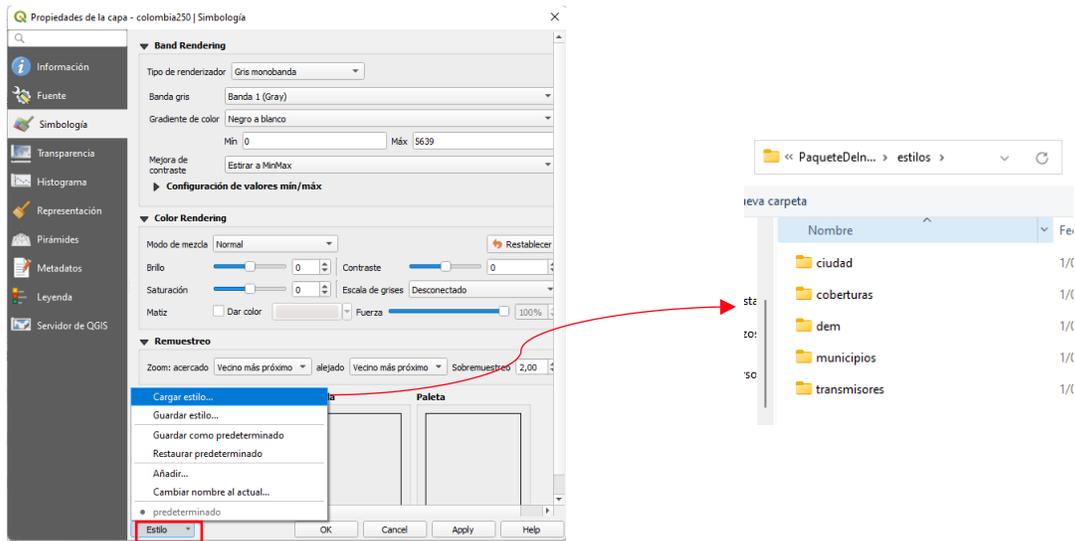


Fig. 66. Proceso de carga de estilos.

Fuente: Elaboración propia.

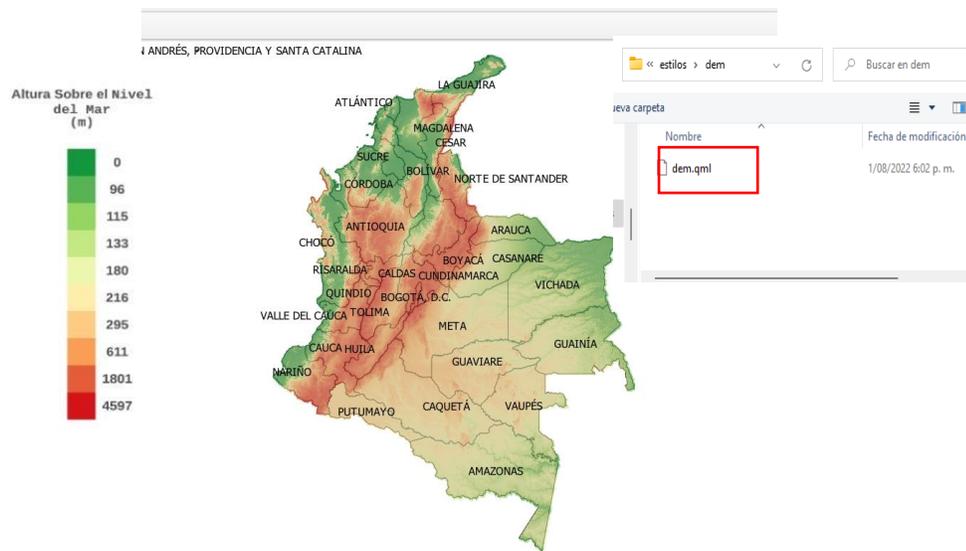


Fig. 67. Escenario aplicando el estilo "dem.qml".

Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar la construcción del escenario de trabajo, se agregan los transmisores base incluidos en el paquete de instalación, tal como se presenta en la Fig. 68, los cuales se pueden editar, parametrizar y mover según la necesidad del análisis que se desee estudiar, tal como se presenta en la Fig. 69, la Fig. 70 y la Fig. 71.

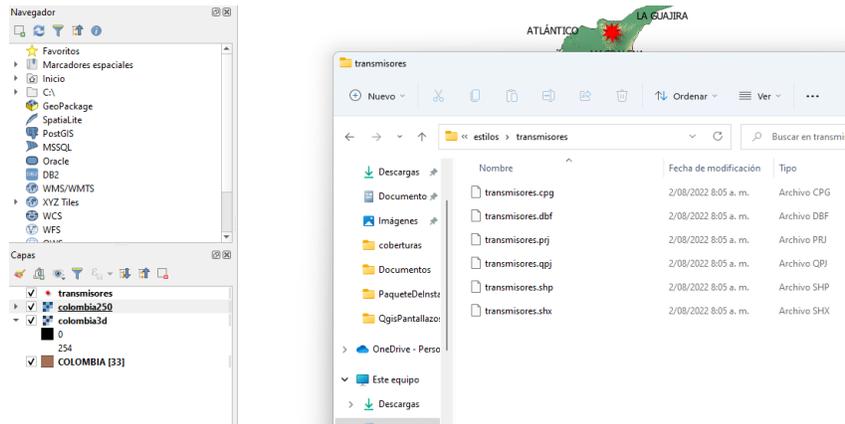


Fig. 68. Carga de transmisores a el escenario de trabajo.

Fuente: Elaboración propia.

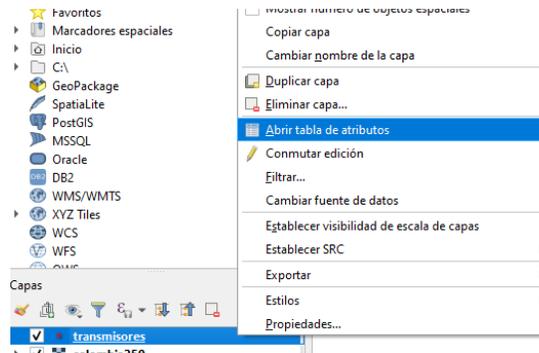


Fig. 69. Pestaña para la parametrización de los transmisores del escenario.

Fuente: Elaboración propia.

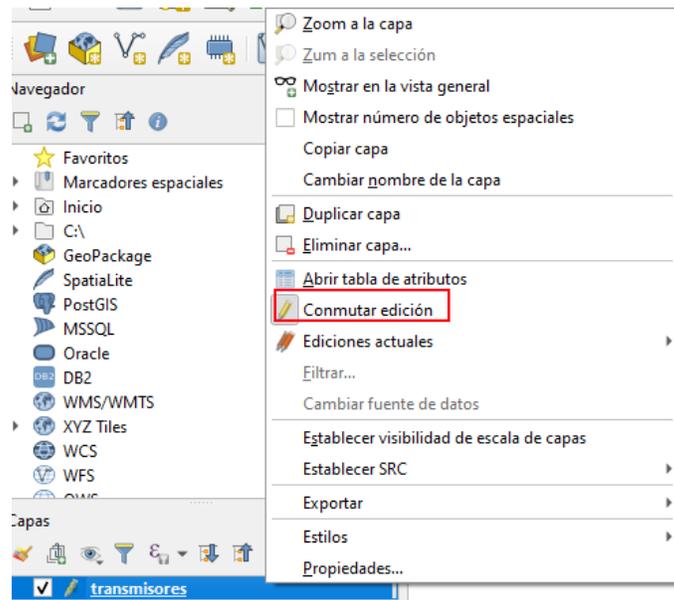


Fig. 70. Pestaña para activar edición del transmisor.

Fuente: Elaboración propia.

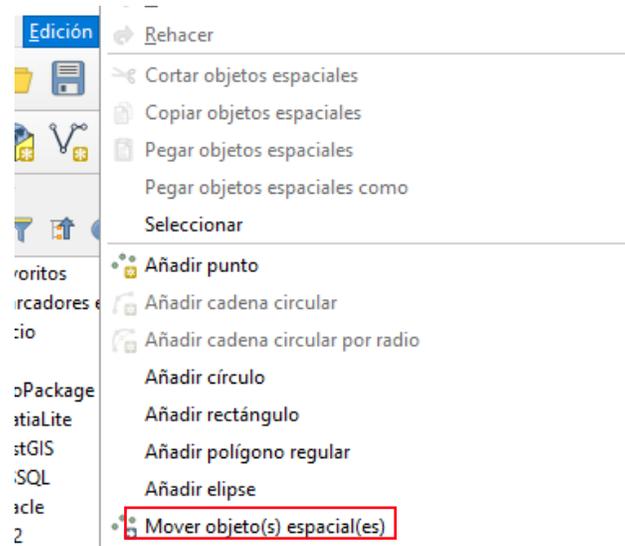


Fig. 71. Pestaña para mover los transmisores.

Fuente: Elaboración propia.

Ya realizados los pasos explicados en esta guía, el escenario de trabajo se verá de la siguiente manera:

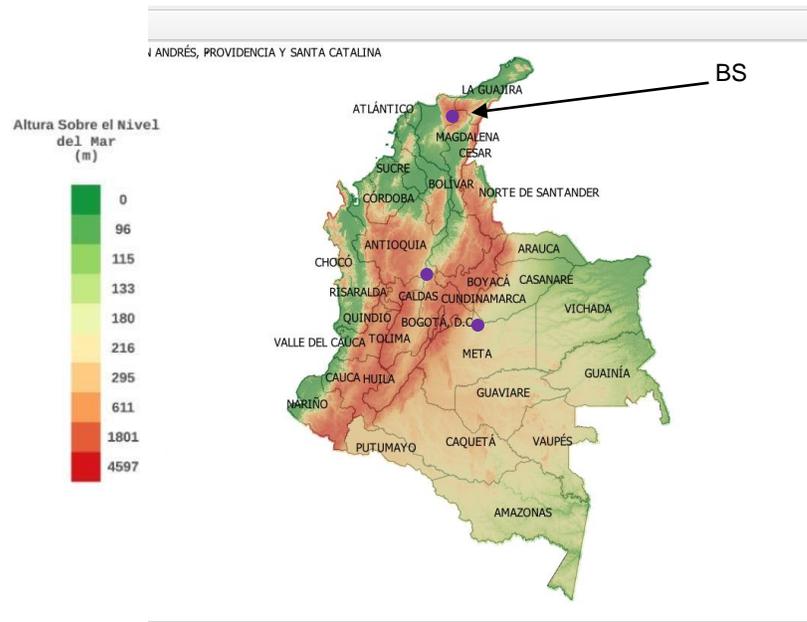


Fig. 72. Escenario de trabajo finalizado.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B

B. GENERACIÓN DE COBERTURA

En este anexo se hará una explicación de uso de la herramienta de estimación de cobertura. Para empezar, se hace clic en el icono con forma de engranaje, como se muestra en la Fig. 73, para que se despliegue la ventana “Caja de herramientas de Procesos”.

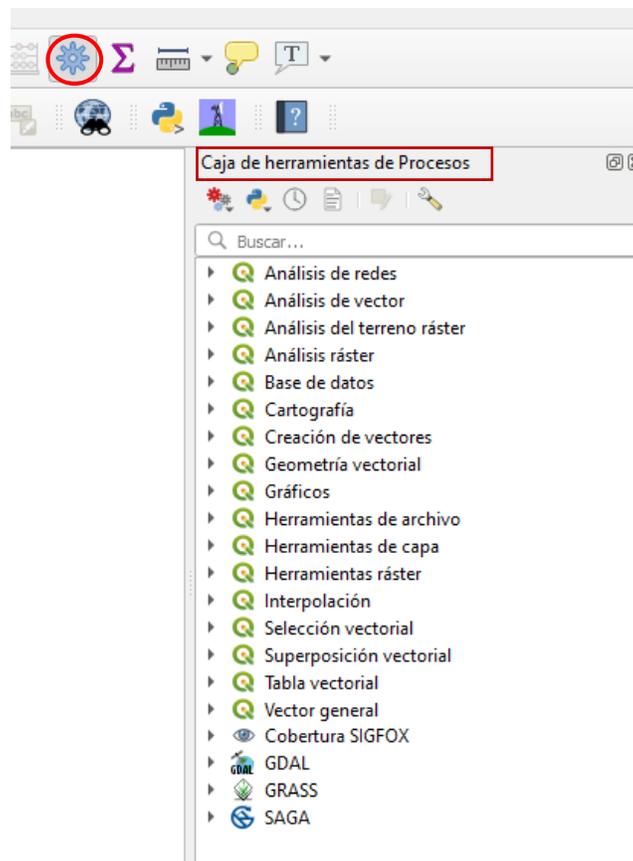


Fig. 73. Ventana “Caja de herramientas de Procesos”.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se despliegue la caja de herramientas, se busca la pestaña “Cobertura”, se hace clic sobre ella y luego se selecciona la sub-pestaña “Análisis de Cobertura”, la cual contiene los escenarios⁴¹ “Rural” y “Urbano”, tal y como se muestra en la Fig. 74.

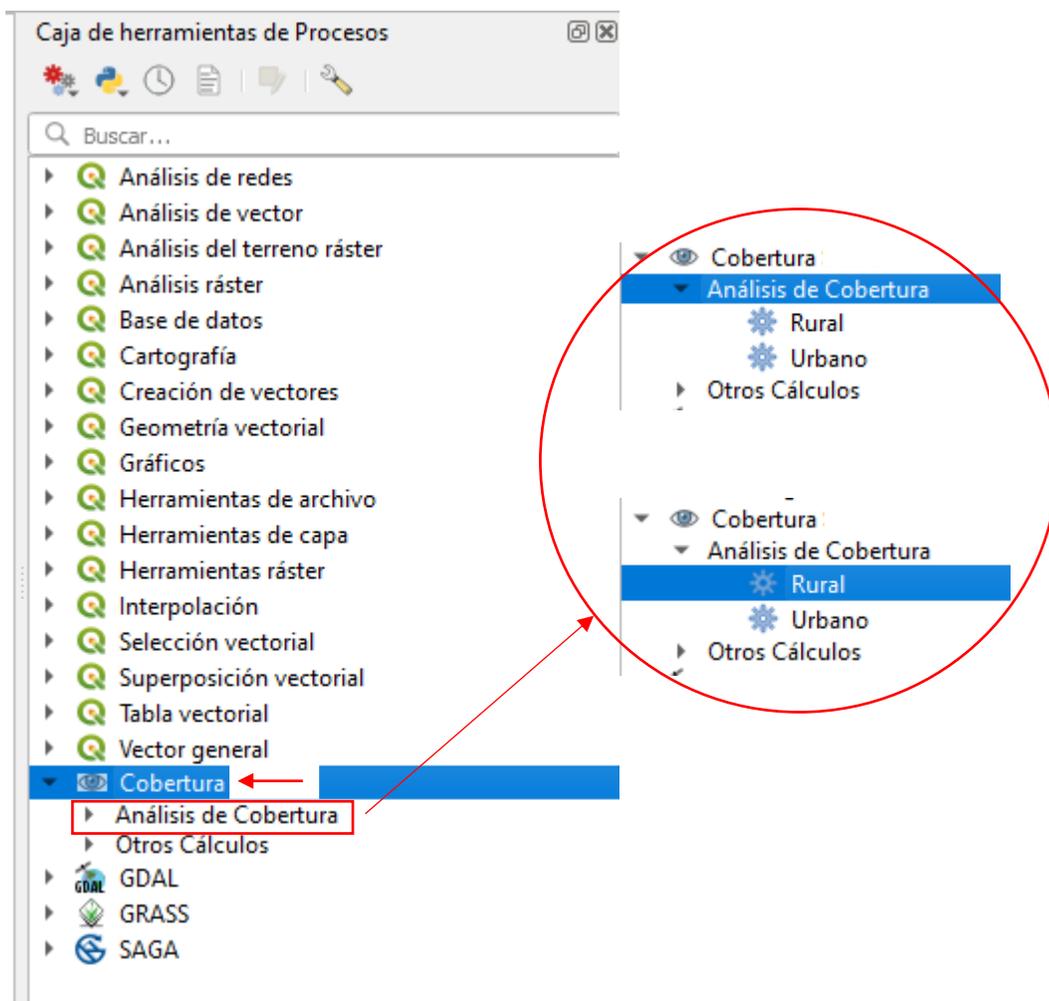


Fig. 74. Ruta para uso de los escenarios de cobertura.

Fuente: Elaboración Propia.

Después de ello, se hace doble clic a “Rural” y aparecerá la ventana para la parametrización del escenario, en donde se configuran parámetros necesarios para realizar la cobertura y en el momento de haber finalizado este paso, se da clic en “Ejecutar”, como se muestra en la Fig. 75.

⁴¹ Para el caso de estudio del presente trabajo de grado, se toma el escenario rural.

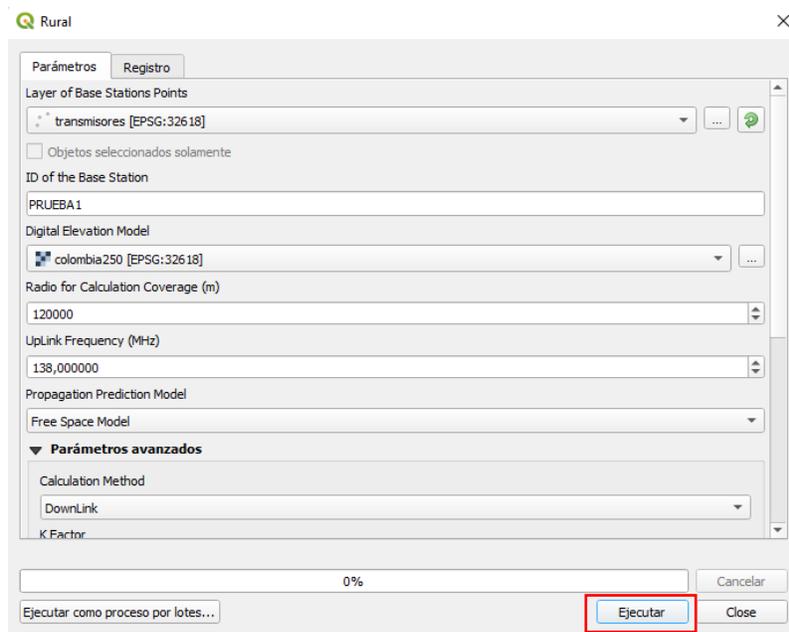


Fig. 75. Ventana de parámetros para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar todos los pasos de la guía es posible obtener resultados de simulación de un mapa de cobertura de una BS o RS, tal y como se muestra en la Fig. 76.

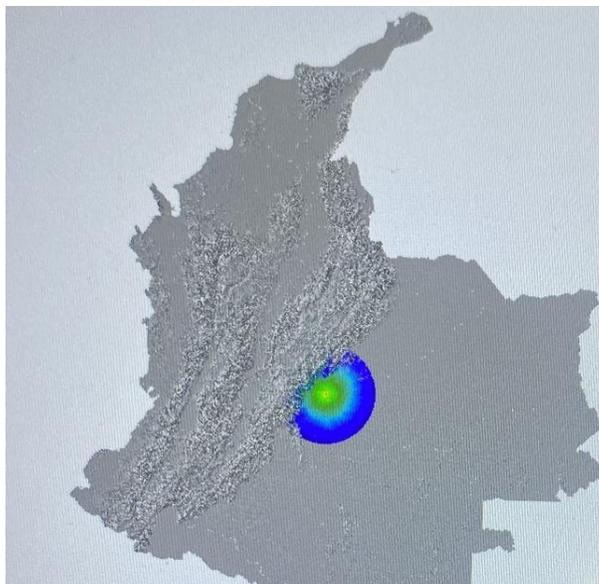


Fig. 76. Ejemplo de estimación de cobertura en el escenario colombiano.

Fuente: Elaboración Propia.