



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
E.T.S.I DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FINAL DE MÁSTER  
MÁSTER EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Recomendaciones sobre parámetros técnicos de operación y  
análisis de interferencia para sistemas de comunicaciones VHF y  
UHF en Colombia

Autor: Carmen Martín Gallo  
Tutor: Alfonso Bahillo Martínez

30 de marzo de 2024



TÍTULO:	Recomendaciones sobre parámetros técnicos de operación y análisis de interferencia para sistemas de comunicaciones VHF y UHF en Colombia
AUTOR:	Carmen Martín Gallo
TUTOR:	Alfonso Bahillo Martínez
DEPARTAMENTO:	Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática

## TRIBUNAL

PRESIDENTE:	D. Ramón J. Durán Barroso
SECRETARIO:	D. Ramón de la Rosa Steinz
VOCAL:	D. Juan C. Aguado Manzano
PRESIDENTE SUPLENTE:	D. Rubén M. Lorenzo Toledo
SECRETARIO SUPLENTE:	D. <sup>a</sup> Patricia Fernández Reguero
VOCAL SUPLENTE:	D. Ignacio de Miguel Jiménez

FECHA:	9 de abril de 2024
CALIFICACIÓN:	



# Resumen

*El presente Trabajo Fin de Máster comprende el análisis de interferencia co-canal y de canal adyacente realizado para las bandas de frecuencia VHF y UHF en los Departamentos del Cauca y Valle del Cauca, Colombia. Este estudio proporciona a la Agencia Nacional del Espectro (ANE) unas recomendaciones que colaboran a mejorar la eficiencia espectral en las bandas de estudio. Para cumplir con este objetivo, desde la Universidad del Cauca realizamos una serie de pruebas de laboratorio y pruebas de campo que nos permitieron evaluar los parámetros técnicos esenciales (entre los que destaca la relación de protección de radiofrecuencia) y obtener los modelos de propagación particulares del territorio analizado diferenciando tres escenarios de propagación: valle, andino y urbano. A partir de los resultados obtenidos, se procede a evaluar el aislamiento mínimo requerido entre estaciones trabajando en la misma frecuencia o en canales cercanos mediante la aplicación de métodos numérico-analíticos, considerando distintos anchos de banda y tecnologías tanto digital como analógica para las dos bandas en cuestión. Las comparativas derivadas de las pruebas de laboratorio y campo, junto con los valores obtenidos de las estimaciones deterministas y probabilísticas, conforman un conjunto de pautas de especial interés para la ANE, en concordancia con los estándares de seguridad y la normativa actual.*

**PALABRAS CLAVE:** Análisis de interferencia, relación de protección de radiofrecuencia, modelo de propagación, VHF, UHF.

## Abstract

*This Master's thesis comprises the co-channel and adjacent channel interference analysis carried out for the VHF and UHF frequency bands in the Departments of Cauca and Valle del Cauca, Colombia. This study provides the National Spectrum Agency (ANE) with recommendations to help improve spectral efficiency in the study bands. To meet this objective, the University of Cauca carried out a series of laboratory and field tests that allowed us to evaluate the essential technical parameters (including the radio frequency protection ratio) and to obtain the propagation models particular to the analysed territory, differentiating among three propagation scenarios: valley, andean and urban. Based on the results obtained, the minimum isolation required between stations working on the same frequency or on nearby channels is evaluated by applying numerical-analytical methods. We considered different bandwidths and both digital and analog technologies for the two bands. The comparisons derived from the laboratory and field tests, together with the values obtained from the deterministic and probabilistic estimations, form a set of guidelines of special interest for the ANE, in accordance with safety standards and current regulations.*

**KEYWORDS:** *Interference analysis, radio frequency protection ratio, propagation model, VHF, UHF.*



# Agradecimientos

*A Alfonso Bahillo Martínez, por ser un referente y modelo a seguir, por hacer posible mi aventura colombiana y por brindarme en todo momento apoyo, asesoramiento y ayuda.*

*A la Universidad del Cauca y al grupo de investigación GRIAL, por hacerme partícipe como una integrante más en este proyecto repleto de crecimiento laboral y personal, además de colaborar activamente a que Colombia se quede a vivir por siempre en mi corazón.*

*A la Universidad de Valladolid por fomentar los convenios y programas de ayuda internacional para jóvenes estudiantes.*

*A mi familia, tanto de sangre como de corazón, por toda la confianza y ánimos recibidos; a pesar de la distancia, a pesar de las dificultades.*

*A todos ellos, gracias por hacer que cada día el sol luzca más bonito.*



# ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	xv
Índice de Tablas	xix
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación . . . . .	2
1.2 Introducción al proyecto . . . . .	3
1.3 Fases de desarrollo y recursos del proyecto . . . . .	6
1.4 Objetivos . . . . .	7
1.4.1 Objetivo principal . . . . .	7
1.4.2 Objetivos secundarios . . . . .	8
1.5 Estructura de la memoria . . . . .	9
1.6 Aportaciones de este TFM y mi rol en el equipo de trabajo del proyecto .	11
<b>2 Marco teórico - Parámetros técnicos esenciales y análisis de interferencia</b>	<b>13</b>
2.1 Introducción . . . . .	15
2.2 Parámetros técnicos esenciales . . . . .	17
2.2.1 Bandas de frecuencia de operación . . . . .	18
2.2.2 Ancho de banda del canal (BW) . . . . .	18
2.2.3 Potencia de transmisión ( $P_t$ ) . . . . .	18
2.2.4 Máscara espectral . . . . .	19
2.2.5 Selectividad y factor de forma . . . . .	20
2.2.6 Relación de protección (RFPR) . . . . .	21
2.2.7 Sensibilidad de los receptores radioeléctricos ( $P_{min}$ ) . . . . .	22
2.2.8 Ganancia de antena repetidora ( $G_r$ ) y ganancia de antena móvil ( $G_t$ )	23
2.2.9 Altura de antena repetidora ( $h_r$ ) y altura de antena móvil ( $h_t$ ) . .	23

2.2.10	Margen de operación para sistemas con múltiples portadoras ( $MC_{INT}$ )	23
2.2.11	Factor de ajuste de ancho de banda ( $dB_{BW}$ )	24
2.2.12	Factor de disponibilidad del sistema interferido ( $N$ )	25
2.3	Modelos de propagación teóricos	27
2.3.1	Modelo de pérdidas de propagación de Espacio Libre	27
2.3.2	Modelo de pérdidas de propagación de Dos Rayos	28
2.3.3	Modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única	29
2.3.4	Modelo de pérdidas de propagación de Egli	29
2.3.5	Modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata	30
2.3.5.1	Zona urbana	31
2.3.5.2	Zona suburbana	32
2.3.5.3	Zona rural	32
2.4	Modelos de propagación experimentales	33
2.4.1	Adquisición de los datos	34
2.4.2	Análisis de los datos: Obtención de pérdidas	35
2.4.2.1	Sistema de Información Geográfico	35
2.4.2.2	Perfil del terreno para cada punto	36
2.4.2.3	Distancia	36
2.4.2.4	Obstáculos	38
2.4.2.5	Pérdidas por difracción	40
2.4.2.6	Condiciones de LOS y NLOS	49
2.4.3	Modelado de las pérdidas: Modelos de propagación	51
2.5	Métodos analíticos	53
2.5.1	Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento	54
2.5.2	Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento Mejorado	54
2.5.2.1	Método de la recomendación ITU-R SM.337-6	56
2.6	Métodos numéricos	58
2.6.0.1	Método numérico de Monte Carlo	59
2.7	Interferencia co-canal	62
2.8	Interferencia de canal adyacente	63
2.8.1	Metodología de evaluación de la interferencia de canal adyacente	64
<b>3</b>	<b>Preparación - Equipamiento y relación de protección</b>	<b>65</b>
3.1	Equipos utilizados	66
3.1.1	Equipos VHF	67
3.1.2	Equipos UHF	67



---

3.2	Programación de equipos . . . . .	68
3.3	Validación de equipos y obtención de parámetros . . . . .	70
3.3.1	Sensibilidad . . . . .	70
3.3.1.1	Sensibilidad VHF . . . . .	70
3.3.1.2	Sensibilidad UHF . . . . .	71
3.3.2	Potencia de transmisión . . . . .	72
3.3.2.1	Potencia de transmisión VHF . . . . .	72
3.3.3	Relación de rechazo de canal adyacente . . . . .	73
3.3.3.1	Relación de rechazo de canal adyacente VHF . . . . .	73
3.4	Relación de protección de radiofrecuencia . . . . .	74
3.4.1	RFPR radiada VHF . . . . .	74
3.4.2	RFPR conducida en VHF . . . . .	75
3.4.3	RFPR conducida en UHF . . . . .	76
3.5	Conclusiones . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Pruebas de campo: Adquisición de datos y modelos de propagación</b>	<b>79</b>
4.1	Python: simplicidad y versatilidad . . . . .	81
4.2	Adquisición de datos . . . . .	81
4.2.1	Emplazamiento de las estaciones repetidoras, planificación de rutas y tipos de escenario . . . . .	82
4.2.2	Procedimiento de recolección de datos . . . . .	84
4.2.3	Correlación analógico-digital . . . . .	84
4.2.4	Comparación radio móvil-radio portátil . . . . .	87
4.2.5	Adquisición de datos en VHF . . . . .	88
4.2.5.1	Topología de la red . . . . .	88
4.2.5.2	Software de gestión radio VHF . . . . .	90
4.2.5.3	Preprocesado y cruce de datos . . . . .	91
4.2.5.4	Promediado espacial . . . . .	93
4.2.6	Adquisición de datos en UHF . . . . .	94
4.2.6.1	Topología de la red UHF . . . . .	94
4.2.6.2	Software de gestión radio UHF . . . . .	96
4.2.7	Glosario de rutas . . . . .	97
4.2.7.1	Rutas finales realizadas en la banda VHF . . . . .	97
4.2.7.2	Rutas finales realizadas en la banda UHF . . . . .	104



4.3	Obtención de modelos de propagación experimentales . . . . .	107
4.3.1	Pérdidas de propagación reales . . . . .	107
4.3.1.1	QGIS: Sistema de Información Geográfica . . . . .	107
4.3.1.2	Separación de los datos según el tipo de escenario . . . . .	108
4.3.1.3	Perfil del terreno: Distancia, obstaculización y pérdidas por difracción . . . . .	110
4.3.1.4	Clasificación en LOS y NLOS . . . . .	112
4.3.1.5	Pérdidas de propagación . . . . .	113
4.3.2	Modelos de propagación según el tipo de escenario . . . . .	114
4.3.2.1	Modelos de propagación en la banda VHF . . . . .	116
4.3.2.2	Modelos de propagación en la banda UHF . . . . .	117
4.3.2.3	Comparativa VHF-UHF de los modelos de propagación . . . . .	118
4.4	Conclusiones . . . . .	120
<b>5</b>	<b>Resultados - Aplicación de métodos analíticos y numérico y estudio de interferencia de canal adyacente</b>	<b>121</b>
5.1	Análisis de interferencia co-canal . . . . .	122
5.1.1	Aplicación de métodos analíticos . . . . .	122
5.1.1.1	Aplicación del método E-MCL . . . . .	125
5.1.1.2	Aplicación del método alternativo de la Rec. ITU SM.337 . . . . .	126
5.1.2	Aplicación del método numérico de Monte Carlo . . . . .	128
5.2	Análisis de interferencia de canal adyacente . . . . .	133
5.2.1	Estudio analógico . . . . .	134
5.2.1.1	Sistemas analógicos operando con un BW de 12.5 kHz . . . . .	135
5.2.1.2	Sistemas analógicos operando con un BW de 25 kHz . . . . .	138
5.2.2	Estudio digital . . . . .	140
5.2.2.1	Sistemas digitales operando con un BW de 12.5 kHz . . . . .	140
5.3	Conclusiones . . . . .	142
<b>6</b>	<b>Discusión de resultados y recomendaciones</b>	<b>143</b>
6.1	Discusión de resultados . . . . .	144
6.1.1	Discusión sobre los resultados del método numérico . . . . .	144
6.1.2	Discusión sobre los resultados de los métodos analíticos . . . . .	146
6.2	Recomendaciones sobre sistemas CLMR realizadas a la ANE . . . . .	147
6.2.1	Recomendaciones sobre sistemas operando en la misma frecuencia . . . . .	147
6.2.2	Recomendaciones sobre sistemas operando en frecuencias adyacentes . . . . .	148
6.2.3	Recomendaciones adicionales sobre sistemas CLMR . . . . .	149

---

6.3 Conclusiones . . . . .	151
<b>7 Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>153</b>
7.1 Conclusiones . . . . .	154
7.2 Líneas futuras . . . . .	156
<b>Bibliografía</b>	<b>159</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Entidades implicadas en el proyecto . . . . .	3
Figura 1.2	Orografía del Departamento del Valle del Cauca [45] . . . . .	4
Figura 1.3	Orografía del Departamento del Cauca [44] . . . . .	5
Figura 2.1	Máscara de emisión tipo B . . . . .	19
Figura 2.2	Máscara de emisión tipo D . . . . .	19
Figura 2.3	Máscara de emisión tipo E . . . . .	20
Figura 2.4	Traslape entre la densidad espectral de potencia deseada e interferente [22] . . . . .	24
Figura 2.5	Parámetros técnicos esenciales para el cálculo de la interferencia . . . . .	26
Figura 2.6	Componentes de la señal en el modelo de propagación de Dos Rayos . . . . .	28
Figura 2.7	Condición de <i>tierra curva</i> para el cálculo de la distancia [9] . . . . .	37
Figura 2.8	Zonas de Fresnel . . . . .	38
Figura 2.9	Obstáculo que suprime la contribución destructiva en la recepción de la señal [9] . . . . .	39
Figura 2.10	Obstáculo que perjudica la recepción de la señal [9] . . . . .	39
Figura 2.11	Obstáculo que impide la recepción de la señal [9] . . . . .	39
Figura 2.12	Geometría de un obstáculo aislado [47] . . . . .	41
Figura 2.13	Pérdidas por difracción en dB de un obstáculo en filo de cuchillo [47] . . . . .	42
Figura 2.14	Método de cálculo de pérdidas por difracción para dos obstáculos en función del despejamiento . . . . .	43
Figura 2.15	Geometría de dos obstáculos aislados con despeje negativo [36] . . . . .	44
Figura 2.16	Geometría de dos obstáculos aislados comparables con despeje positivo [47] . . . . .	45

Figura 2.17 Geometría de dos obstáculos aislados con despeje positivo predominando un obstáculo [47] . . . . .	46
Figura 2.18 Geometría de los obstáculos en el método de Deygout . . . . .	48
Figura 2.19 Clasificación de obstáculos según el criterio de clasificación LOS-NLOS	51
Figura 2.20 Clasificación de obstáculos en LOS según el criterio de clasificación .	51
Figura 2.21 Modelo general del sistema para E-MCL [22] . . . . .	55
Figura 2.22 Diagrama de flujo del método numérico de Monte Carlo [22] . . . . .	60
Figura 2.23 Separación en frecuencia de los distintos canales en el estudio de la interferencia de canal adyacente . . . . .	64
Figura 3.1 Programación de un radio móvil HM786 en el software Hytera CPS .	68
Figura 3.2 Configuración del canal mixto en una estación repetidora RD986 . . .	68
Figura 4.1 Rutas de medición y emplazamientos de las estaciones repetidoras . .	83
Figura 4.2 Ruta seguida para la comparación de potencia recibida entre comunicaciones de tipo analógico y digital . . . . .	85
Figura 4.3 Comparación entre niveles de potencia de señales recibidas para tecnologías CLMR digitales y analógicas . . . . .	85
Figura 4.4 Mapa de cobertura de un equipo de radio móvil (color negro) y uno portátil (color violeta) estableciendo comunicación con la estación repetidora de Siloé o Popayán . . . . .	87
Figura 4.5 Rutas de medición para la banda VHF . . . . .	89
Figura 4.6 Topología de la red VHF . . . . .	89
Figura 4.7 Recursos de SmartPTT Dispatch relacionados con las mediciones realizadas . . . . .	91
Figura 4.8 Promediado espacial de valores de RSS mediante cuadrados de 15 m de lado . . . . .	93
Figura 4.9 Promediado espacial de RSS en conjuntos cuadrados de 500 m de lado	94
Figura 4.10 Topología de la red UHF . . . . .	95
Figura 4.11 Rutas VHF de la zona urbana de Popayán . . . . .	99
Figura 4.12 Rutas VHF de las rutas por Totoró & Piendamó . . . . .	99
Figura 4.13 Rutas VHF de las rutas de Puracé & Coconucos (izquierda) y El Tambo & El Bolsón (derecha) . . . . .	100
Figura 4.14 Rutas VHF de las rutas por Paispamba y alrededores . . . . .	100
Figura 4.15 Rutas VHF de las rutas por Timbío & Rosas . . . . .	101
Figura 4.16 Rutas VHF de las rutas por Provitec & Las Huacas . . . . .	101
Figura 4.17 Rutas VHF de las rutas por el Departamento del Valle del Cauca . .	102

Figura 4.18	Rutas realizadas en el Departamento del Cauca en la banda UHF mostradas con el software UHF Hytera Smart Dispatch Plus . . . . .	105
Figura 4.19	Rutas realizadas en el Departamento del Cauca en la banda UHF mostradas con un mapa de calor . . . . .	105
Figura 4.20	Rutas realizadas en el Departamento del Valle del Cauca en la banda UHF . . . . .	106
Figura 4.21	Perfil de terreno radioeléctrico, distancia y pérdidas por difracción entre los diferentes puntos de medición y la estación repetidora . . . .	110
Figura 4.22	Pérdidas por difracción y características de los obstáculos principales para las mediciones obtenidas en el Departamento del Cauca . . . . .	111
Figura 4.23	Aplicación del criterio LOS-NLOS sobre los datos experimentales . . . .	112
Figura 4.24	Características de propagación para cada punto experimental . . . . .	113
Figura 4.25	Ejemplo de la influencia del factor dispersivo ( $N(0, \sigma^2)$ ) . . . . .	114
Figura 4.26	Modelos de propagación en la banda VHF . . . . .	116
Figura 4.27	Modelos de propagación en la banda VHF . . . . .	117
Figura 4.28	Comparativa de los modelos de propagación en las bandas VHF y UHF	118
Figura 5.1	Método E-MCL para la banda VHF con máscaras espectrales tipo B y tipo D [21] . . . . .	125
Figura 5.2	Método E-MCL para la banda UHF con máscaras espectrales tipo B y tipo D [21] . . . . .	125
Figura 5.3	Método Rec. ITU SM.337 alternativo para la banda VHF [21] . . . . .	126
Figura 5.4	Método Rec. ITU SM.337 alternativo para la banda UHF [21] . . . . .	126
Figura 5.5	Escenario de implementación considerado en la aplicación del método numérico de Monte Carlo . . . . .	129
Figura 5.6	Histograma de la CIR (izquierda) y la CDF (derecha) con BW = 12.5 kHz en VHF . . . . .	131
Figura 5.7	Histograma de la CIR (izquierda) y la CDF (derecha) con BW = 25 kHz en VHF . . . . .	131
Figura 5.8	Histograma de la CIR (izquierda) y la CDF (derecha) con BW = 12.5 kHz en UHF . . . . .	132
Figura 5.9	Histograma de la CIR (izquierda) y la CDF (derecha) con BW = 25 kHz en UHF . . . . .	132
Figura 5.10	Esquema de pruebas para diferentes canales y anchos de banda . . . .	133
Figura 5.11	Canales analógicos utilizados en las bandas VHF (izquierda) y UHF (derecha) operando con un BW de 12.5 kHz . . . . .	135

---

Figura 5.12	Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando simultáneamente con BW de 12.5 kHz en canales inmediatamente adyacentes en VHF (izquierda) y UHF (derecha) . . . . .	136
Figura 5.13	Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando simultáneamente con BW de 12.5 kHz y una separación de 1 canal para las bandas VHF (izquierda) y UHF (derecha) . . . . .	136
Figura 5.14	Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando simultáneamente con BW de 12.5 kHz con una separación de 2 canales para las bandas VHF (izquierda) y UHF (derecha) . . . . .	137
Figura 5.15	Canales analógicos utilizados en las bandas VHF (izquierda) y UHF (derecha) operando con un BW de 25 kHz . . . . .	138
Figura 5.16	Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando simultáneamente con BW de 25 kHz en canales inmediatamente adyacentes en VHF (izquierda) y UHF (derecha) . . . . .	139
Figura 5.17	Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando con BW de 25 kHz y una separación de 1 canal para la banda VHF . . . . .	139
Figura 5.18	Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores digitales operando simultáneamente con BW de 12.5 kHz en canales inmediatamente adyacentes en VHF (izquierda) y UHF (derecha) . . . . .	141

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Factor de forma de las máscaras de emisión para radio móvil . . . . .	21
Tabla 2.2	Resumen de pérdidas por difracción . . . . .	49
Tabla 3.1	Equipos VHF [21] . . . . .	67
Tabla 3.2	Equipos UHF [21] . . . . .	67
Tabla 3.3	Resultados de medida de sensibilidad analógica obtenidos para la banda VHF . . . . .	71
Tabla 3.4	Resultados de medida de sensibilidad analógica obtenidos para la banda UHF . . . . .	71
Tabla 3.5	Resultados de potencia de transmisión obtenidos . . . . .	72
Tabla 3.6	Resultados de la $ACRR_{HIGH}$ y la $ACRR_{LOW}$ . . . . .	73
Tabla 3.7	Umbrales de rechazo de canal adyacente . . . . .	74
Tabla 3.8	Valores de RFPR obtenidos experimentalmente para las bandas VHF y UHF . . . . .	76
Tabla 4.1	Rutas realizadas en la banda VHF . . . . .	98
Tabla 4.2	Rutas realizadas en la banda UHF . . . . .	104
Tabla 4.3	Modelos de propagación, RMSE y $\sigma^2$ en la banda VHF . . . . .	115
Tabla 4.4	Modelos de propagación, RMSE y $\sigma^2$ en la banda UHF . . . . .	115
Tabla 5.1	Parámetros de radio móvil utilizados para el análisis de aislamiento mediante la aplicación de métodos analíticos . . . . .	123
Tabla 5.2	Aislamiento mínimo en VHF y UHF diferenciando espaciados entre canales según la máscara espectral empleando el método E-MCL . . . .	125

Tabla 5.3 Aislamiento mínimo en VHF y UHF diferenciando espaciados entre canales según la máscara espectral empleando el método Rec.ITU SM.337 alternativo . . . . .	126
Tabla 5.4 Parámetros de radio móvil utilizados para el análisis de aislamiento mediante la aplicación del método numérico de Monte Carlo . . . . .	128
Tabla 5.5 Resultados de la aplicación del método numérico de Monte Carlo en la banda VHF . . . . .	131
Tabla 5.6 Resultados de la aplicación del método numérico de Monte Carlo en la banda UHF . . . . .	132
Tabla 5.7 Distancias promedio entre un transmisor interferente y un receptor víctima de interferencia según el método de Monte Carlo para las bandas VHF y UHF . . . . .	133
Tabla 6.1 Distancia promedio mínima que debe existir entre sistemas CLMR que operan en la misma frecuencia para asegurar un aislamiento adecuado .	145
Tabla 6.2 Distancia promedio mínima que debe existir entre sistemas CLMR a medida que se incrementa la separación en frecuencia . . . . .	146



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

1.1	Motivación . . . . .	2
1.2	Introducción al proyecto . . . . .	3
1.3	Fases de desarrollo y recursos del proyecto . . . . .	6
1.4	Objetivos . . . . .	7
1.4.1	Objetivo principal . . . . .	7
1.4.2	Objetivos secundarios . . . . .	8
1.5	Estructura de la memoria . . . . .	9
1.6	Aportaciones de este TFM y mi rol en el equipo de trabajo del proyecto .	11

---

*‘En la era de las telecomunicaciones, quien mejor comunica sigue siendo quien es capaz de mirar a los demás a los ojos.’*

*- Rafael Vídac, 2019*

## 1.1 Motivación

Colombia, conocida como el país más bello del mundo, cautiva por sus impresionantes paisajes y apasionante cultura. Sin embargo, esta joya de biodiversidad y terrenos desafiantes cuenta con una gran extensión y una amplia gama de condiciones topográficas. Esta diversidad le convierte en un tesoro universal, pero también representa un desafío para la conectividad.

Este pequeño gran refugio de naturaleza, que abarca 1.141.749 km<sup>2</sup> con sus imponentes cordilleras, cadenas volcánicas, ríos y playas, supone un reto para la comunicación entre sus habitantes, especialmente en zonas rurales que presentan una densa cobertura vegetal y una infraestructura muy limitada. Por esta razón, las bandas de frecuencia muy alta (*Very High Frequency*, VHF) y ultraalta (*Ultra High Frequency*, UHF) se han convertido en mecanismos indispensables, altamente demandados y ampliamente aceptados en servicios como emergencias, policía, taxistas u organizaciones marítimas, entre otros.

Estas bandas se caracterizan por su alcance extendido al trabajar en frecuencias con longitudes de onda relativamente cortas en comparación con otras frecuencias. Esta característica, junto con sus propiedades de propagación que les permiten circundar obstáculos al difractarse alrededor de ellos, las convierte en un gran aliado para combatir la frondosidad colombiana en un amplio rango de kilómetros.

En este contexto, las instituciones nacionales muestran un interés particular en maximizar el aprovechamiento y garantizar el uso adecuado del recurso natural limitado, el espectro de frecuencias. En respuesta a esta necesidad, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia está trabajando en mejorar la regulación y asignación del espectro, haciendo uso de estudios detallados de propagación e interferencia en estas bandas de estudio. En este sentido, la Universidad del Cauca se posiciona como un aliado fundamental para encontrar soluciones o recomendar prácticas óptimas para el uso eficiente del espectro dado su perfil idóneo para participar en proyectos de investigación, análisis y estudio, contando con equipos de medición especializados y expertos capacitados.



## 1.2 Introducción al proyecto

Respondiendo a la necesidad de realizar un estudio detallado sobre la optimización espectral, la Universidad del Cauca, a través de su reconocido grupo de investigación GRIAL, comienza su andadura en colaboración con la ANE para embarcarse en un proyecto de varias fases donde se explora, primeramente, el estado del arte de los sistemas de comunicaciones operando en VHF y UHF en función de la frecuencia y la distancia para evaluar, seguidamente, la influencia y causas de la interferencia de sistemas de Radio Móvil Terrestre Convencional (*Conventional Land Mobile Radio*, CLMR) en el territorio colombiano para el que se pretende particularizar el análisis.

- La ANE es una entidad que asesora desde el año 2009 al Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones en la planeación, atribución, vigilancia y control del espectro radioeléctrico en Colombia [2]. Su logo se muestra en la Figura 1.1a.



(a) Logo de la ANE



(b) Escudo de la Universidad del Cauca

**Figura 1.1:** Entidades implicadas en el proyecto

- La Universidad del Cauca es una universidad pública de Colombia cuyo campus se encuentra en la ciudad de Popayán y cuyo escudo compone la Figura 1.1b.
- Popayán, con una elevación de 1.760 m y población de aproximadamente 340.000 habitantes, se trata de la capital del departamento del Cauca, donde se encuentra la sede principal del desarrollo del proyecto.
- El Departamento del Cauca es uno de los treinta y dos departamentos que conforman la República de Colombia. Está ubicado al suroccidente del país entre las regiones andina y pacífica. Cuenta con una superficie de 29.308 km<sup>2</sup>, lo que representa el 2.56 % del territorio nacional. Allí nacen las cordilleras central y occidental de Colombia al igual que los dos grandes ríos interandinos colombianos, el Cauca y el Magdalena [8].

- El Departamento del Valle del Cauca, con una extensión de 22.195 km<sup>2</sup> y una altitud promedio de aproximadamente 1.500 m, se distingue por un relieve de menor elevación que el del Departamento del Cauca y considerablemente más estable. Se incorpora en los estudios del marco del proyecto debido al contraste topográfico que ofrece en comparación con el Departamento del Cauca, contrastando *valle* con territorio *andino*, respectivamente.

A continuación, se muestran las Figuras 1.2 y 1.3 representando la orografía de los dos departamentos de estudio, primeramente el Departamento del Valle del Cauca, seguido por el Departamento del Cauca. Nótese la diferencia de altitud entre territorios, así como la mayor ausencia de accidentes geográficos en el Departamento del Valle del Cauca, el cual se extiende hacia el norte con una altitud constante característica de la llanura a lo largo de toda su extensión.

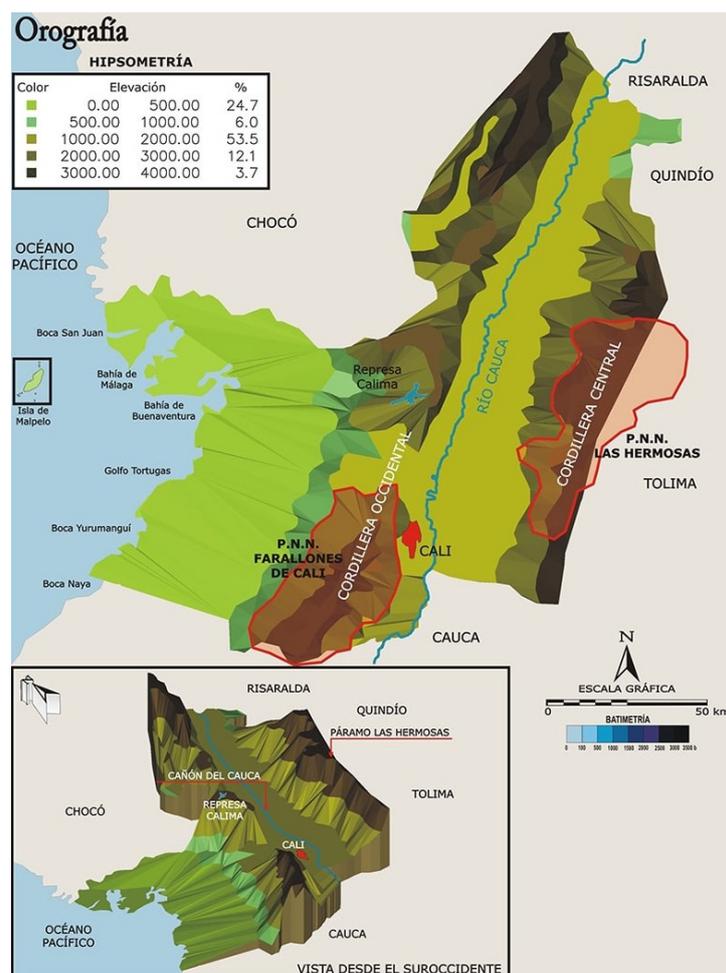


Figura 1.2: Orografía del Departamento del Valle del Cauca [45]

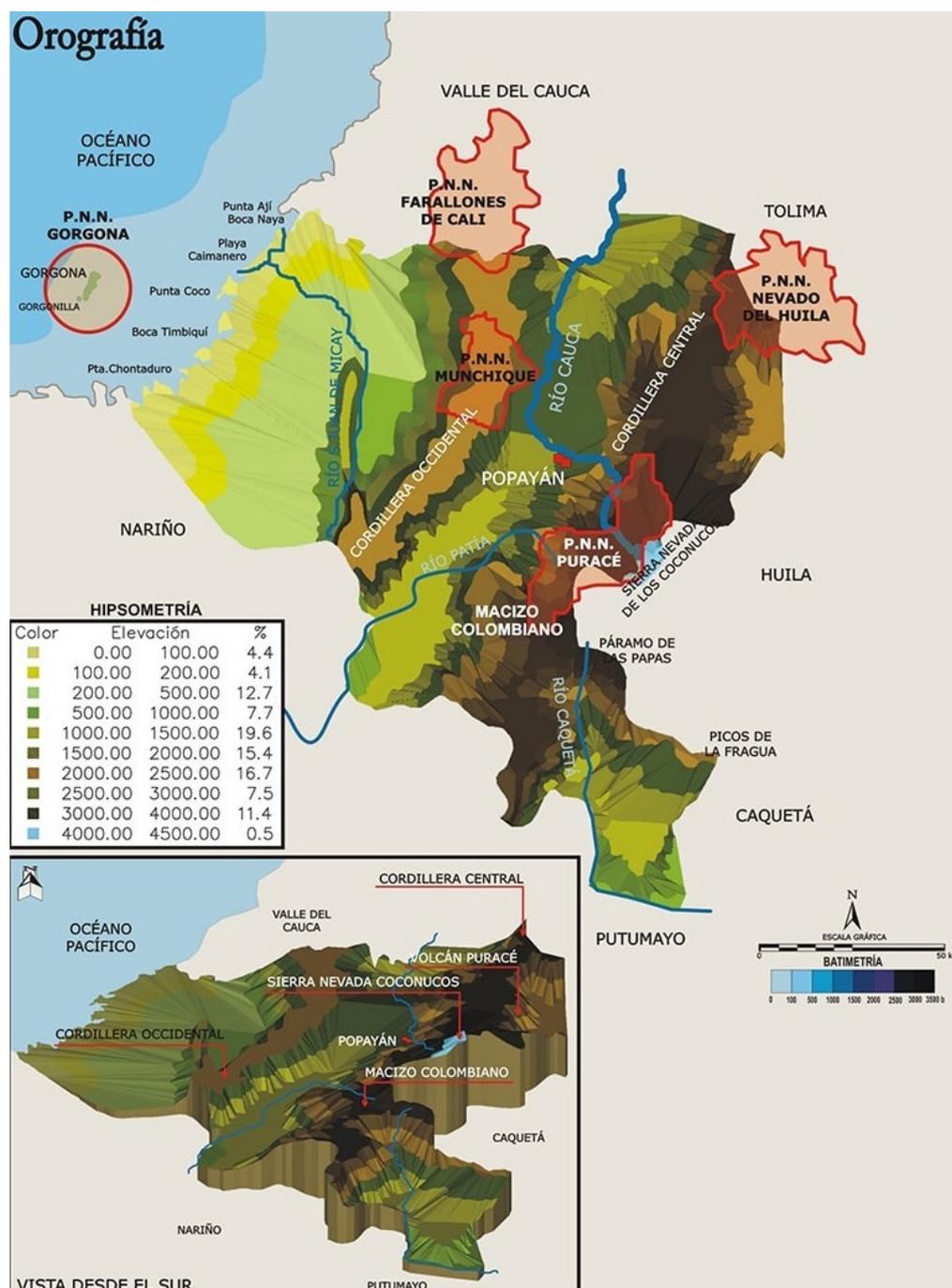


Figura 1.3: Orografía del Departamento del Cauca [44]

Este proyecto, financiado por la ANE y desempeñado por ingenieros de telecomunicación de la Universidad del Cauca, está diseñado para desarrollarse en las instalaciones de la propia universidad con el equipamiento técnico y personal cualificado necesario para llevar a cabo las pruebas pertinentes y elaborar informes sintetizados y precisos de gran relevancia para implementar mejoras en el aprovechamiento del espectro electromagnético.

### 1.3 Fases de desarrollo y recursos del proyecto

Este proyecto se compone de dos fases principales de desarrollo:

1. La primera de las fases, comprende, principalmente, todo el marco teórico asociado al estudio de la interferencia y el análisis de los parámetros principales de operación que influyen en ese efecto, acompañado por la elaboración de *scripts* de los métodos numérico-analíticos explicados en siguientes capítulos de este documento. Esta fase fue realizada en años anteriores, previamente a mi llegada a Colombia.
2. La segunda fase, en la cual yo participé y sobre la cual este TFM está basado, comprende todas las pruebas de campo realizadas para el análisis de interferencia objetivo. Los informes finales de las investigaciones realizadas en esta fase representan las recomendaciones proporcionadas a la ANE con el fin de incluir mejoras en el uso del espectro. Esta fase ha tenido una duración de 3 meses de organización y planificación, seguidos por 4 meses de ejecución en los cuales yo he sido una de las personas colaboradoras en la totalidad del desarrollo de este segundo periodo de estudio.

El presupuesto global de este proyecto, que comprende tanto la primera fase como la segunda, ha sido de en torno a 681 millones de Pesos colombianos (COP). La primera fase, realizada durante 7 meses en el año 2021, contó con un presupuesto cercano a los 277 millones de COP, equivalente a unos 64.500 €. Esta fase estuvo mayormente enfocada en aspectos teóricos, incluyendo algunas simulaciones y estimaciones, dejando las pruebas de campo para la segunda fase de desarrollo.

La segunda fase del proyecto se llevó a cabo durante 7 meses en el año 2023, distribuidos en 3 meses de gestión y planificación, seguidos de 4 meses de ejecución en los cuales participé activamente. Esta fase contó con un presupuesto de alrededor de 410 millones de COP, aproximadamente 97.500 €. En comparación con la primera fase, en esta etapa participaron 3 ingenieros auxiliares y 5 profesores, mientras que en la primera fase se contó con la colaboración de 5 profesores y 2 ingenieros adicionales.



## 1.4 Objetivos

Mi labor en este proyecto de colaboración entre la Universidad del Cauca y la ANE implica formar parte del equipo encargado de llevar a cabo la segunda fase práctica del proyecto, y sobre la cual está basado este TFM. Por lo tanto, mi estancia en Popayán tiene como objetivo principal integrarme en el grupo de trabajo del proyecto como un miembro más del equipo, con el fin de alcanzar una serie de objetivos que se alineen con las metas establecidas en el contrato firmado con la ANE. En consecuencia, el objetivo principal de este TFM coincide con el del proyecto en sí, y se expone a continuación:

### 1.4.1 Objetivo principal

El objetivo principal del TFM consiste en mostrar el estudio de interferencia co-canal y de canal adyacente para las bandas VHF y UHF realizado por la Universidad del Cauca y en el cual he tenido el honor de participar como parte del equipo de trabajo.

Este proyecto tuvo como meta analizar la interferencia producida entre canales adyacentes y la separación espacial y frecuencial mínima requerida entre estaciones repetidoras de radio móvil convencional CLMR trabajando a la misma frecuencia que permita un funcionamiento libre de interferencias.

Para lograr este objetivo, se distinguen dos bloques predominantes que dan lugar a las recomendaciones finales que la Universidad del Cauca sugiere a la ANE:

1. Por una parte, se obtienen resultados teóricos co-canal en base a la ejecución de métodos numérico-analíticos desarrollados en fases previas de este mismo proyecto, los cuales están basados en modelos de propagación reales obtenidos a partir de mediciones realizadas en el territorio colombiano en la segunda fase del proyecto.
2. Por otra parte, se ejecutan una serie de pruebas para analizar el comportamiento de la interferencia de canal adyacente realizando transmisiones simultáneas con estaciones repetidoras situadas en el mismo emplazamiento. Este estudio se realiza tanto en canales digitales como en analógicos, para diversos anchos de banda y separación de canales.

El análisis y recomendaciones sobre estos dos tipos de interferencia, permitirá a la ANE de Colombia hacer un mejor uso del espectro.



### 1.4.2 Objetivos secundarios

Aunque el objetivo principal sea el análisis de la interferencia co-canal y de canal adyacente, en el proceso de lograr dicho cometido, se pretende adquirir información relevante en otras ramas transversales, por lo que el listado de estos objetivos secundarios se incluye a continuación:

- Cumplir los objetivos establecidos dentro de plazos definidos y habilidad para integrarse eficazmente en un nuevo equipo de trabajo multicultural.
- Trabajar en equipo con una metodología de organización basada en tareas nombrando responsables de cada rama de estudio.
- Comparar el desempeño de tecnologías digitales frente a convencionales analógicas.
- Explorar el funcionamiento, programación, mantenimiento y gestión de un sistema CLMR completo.
- Planificar y llevar a cabo pruebas de campo en un entorno real que tenga como resultado la creación de una nueva base de datos referida a los niveles de señal recibidos en el receptor.
- Realizar verificaciones sobre los parámetros técnicos de operación de los equipos empleados en el desarrollo de la segunda fase del proyecto.
- Llevar a cabo pruebas de laboratorio que permitan obtener la relación de protección mínima necesaria de los equipos. Valores de protección menores a los considerados en la literatura resulta en una disminución de la distancia mínima requerida entre repetidoras operando a la misma frecuencia.
- Obtener modelos de propagación que describan correctamente las pérdidas de propagación en función del tipo de escenario.
- Visualizar y analizar la dispersión presente en las pérdidas de propagación calculadas en función de datos experimentales.
- Establecer un criterio para diferenciar las mediciones tomadas en línea de vista directa de aquellas con ausencia de línea directa de visión.
- Analizar el alcance máximo de la señal para los distintos modelos de propagación estimados en el territorio analizado con los accidentes geográficos característicos.



- Comprobar la correlación entre las estimaciones y simulaciones teóricas y los resultados experimentales obtenidos mediante pruebas de campo.
- Redactar una serie de recomendaciones que comprenda los resultados relevantes sobre las tecnologías y bandas de estudio consideradas.

## 1.5 Estructura de la memoria

Este apartado ofrece una visión global de cómo está organizado y presentado el contenido de la memoria del TFM. Se esboza brevemente la disposición de los capítulos principales, así como sus principales secciones, proporcionando al lector una guía sobre qué esperar en cada bloque. Esta introducción facilita la navegación y comprensión del trabajo en su totalidad. Por ello, he optado por estructurar este documento de la siguiente manera:

- El Capítulo 2 está destinado a introducir los conceptos y temas teóricos que serán relevantes para llevar a cabo las pruebas prácticas expuestas en los capítulos posteriores. En términos generales, este primer segmento de contenido se dedica a exponer el marco teórico del proyecto, permitiendo al lector comprender la amplitud de la primera fase teórica llevada a cabo por mis compañeros de la Universidad del Cauca en años anteriores, y que sirve de base para la segunda fase en la que yo he participado.
- En los Capítulos 3 y 4 se exponen los primeros pasos de la segunda fase del proyecto seguidas por las pruebas de campo, respectivamente.
  - Por una parte, el Capítulo 3 narra las pruebas más relevantes de laboratorio en las cuales yo he participado, que aportan resultados importantes, como puede ser la relación de protección. Se describen estas pruebas realizadas distinguiendo la metodología seguida, así como las configuraciones en cuanto a anchos de banda y bandas de estudio.
  - Después, el Capítulo 4 aborda las pruebas de campo realizadas, abarcando el proceso de adquisición de datos, su posterior tratamiento y el modelado necesario para extraer modelos de propagación que describan la tendencia de las pérdidas de propagación de las mediciones capturadas.

En este capítulo, mi contribución es la más significativa para el proyecto, ya que asumo la responsabilidad de la mayoría de las tareas descritas en este bloque al desempeñar el rol de 'responsable'. Este apartado incluye aspectos adicionales, como son los desafíos encontrados a la hora de realizar cruces de datos para asociar valores de intensidad de potencia a localizaciones, o el criterio de clasificación ideado por mis compañeros y yo, donde la información es categoriza en función de las condiciones de propagación.

- Una vez obtenidos los modelos de propagación, el Capítulo 5 ilustra los resultados de la aplicación de los métodos numérico-analíticos programados en la primera fase del proyecto como parte del análisis de interferencia co-canal. Estas ejecuciones, proporcionan valores de distancia-frecuencia que permiten minimizar el aislamiento mínimo requerido entre estaciones CLMR. Por otro lado, se incluyen también los resultados del estudio de interferencia de canal adyacente realizados en la Universidad del Cauca con el sistema CLMR utilizado en las pruebas de campo, tanto para la banda VHF como UHF.
- Por último, el Capítulo 6 recopila los principales resultados obtenidos en los estudios de interferencia expuestos en el capítulo anterior y redacta una serie de recomendaciones que conforman el informe final proporcionado a la ANE que buscan cumplir con el objetivo de eficiencia espectral.
- Para finalizar, el capítulo final asociado a las conclusiones y líneas futuras de investigación, 7, destaca los principales hallazgos obtenidos durante el desarrollo del proyecto, así como las implicaciones de estos resultados. Además, se sugieren posibles áreas de investigación futura basadas en las limitaciones identificadas durante el estudio y en las oportunidades emergentes en el campo.

### 1.6 Aportaciones de este TFM y mi rol en el equipo de trabajo del proyecto

Seguidamente, se resaltan las principales aportaciones de este TFM, tanto el impacto de mi participación como colaboradora en el proyecto de la Universidad del Cauca, como desde la perspectiva única que ofrece este documento:

- En cuanto a mis aportaciones como miembro del equipo, mis responsabilidades principales abarcaron el contenido del Capítulo 4, donde un correcto modelado de los datos para hallar modelos de propagación válidos fue el objetivo principal. Aun siendo responsable de este bloque, la totalidad de la segunda fase del proyecto se ha caracterizado por un gran trabajo en equipo, por lo que ofrecí mi ayuda en las diversas áreas expuestas en este TFM, al igual que recibí apoyo en el desempeño de mis tareas principales.

Cabe destacar que en el proceso de adquisición de datos descrito en ese Capítulo 4 yo he permanecido en la universidad gestionando los software de monitoreo de los sistemas CLMR, verificando la correcta recepción de los datos producto de las mediciones y comunicándome por radio con mis compañeros; sin la posibilidad de viajar en el vehículo encargado de movilizar los radios móviles reportando información. Este hecho se debe a la inseguridad actual que implica recorrer la zona rural del Departamento del Cauca, lo que ha supuesto en más de una ocasión la alteración y/o cancelación de rutas planificadas durante el transcurso del proyecto.

- Por otro lado, de manera más específica, se realizaron pruebas de laboratorio adicionales a las mencionadas en esta memoria, redactando en este escrito únicamente aquellas más relevantes en las que participé. Además, desempeñé un papel significativo en el análisis de la interferencia del canal adyacente, contribuyendo activamente tanto en la realización de pruebas como en las discusiones y los resultados obtenidos.
- A la hora de aplicar los métodos numérico-analíticos, mi participación fue más superficial, ya que mi labor consistió en la revisión de los *scripts* implementados en la primera fase del proyecto desarrollada en años anteriores: cuatro ojos ven más que dos para verificar si todos los parámetros introducidos concuerdan con los extraídos de las pruebas de laboratorio y campo.



Con base en los párrafos anteriores, optaría por definir mi TFM como un compendio del marco teórico explorado en la primera fase previa del proyecto -en la cual no participé-, que sirve como precursor de las pruebas y contenido analizado en la segunda fase donde mi participación ha sido una ayuda sustancial para el cumplimiento de los nuevos objetivos establecidos. Esta memoria resume de forma efectiva pero precisa los procedimientos y resultados encontrados, incluyendo una visión completa del estudio de interferencia realizado por la Universidad del Cauca. Además, ofrece una reflexión crítica sobre los desafíos encontrados durante el desarrollo del proyecto y sugiere posibles áreas de mejora para investigaciones futuras en el ámbito de la interferencia de co-canal y de canal adyacente.



# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO - PARÁMETROS TÉCNICOS ESENCIALES Y ANÁLISIS DE INTERFERENCIA

---

2.1	Introducción . . . . .	15
2.2	Parámetros técnicos esenciales . . . . .	17
2.2.1	Bandas de frecuencia de operación . . . . .	18
2.2.2	Ancho de banda del canal (BW) . . . . .	18
2.2.3	Potencia de transmisión ( $P_t$ ) . . . . .	18
2.2.4	Máscara espectral . . . . .	19
2.2.5	Selectividad y factor de forma . . . . .	20
2.2.6	Relación de protección (RFPR) . . . . .	21
2.2.7	Sensibilidad de los receptores radioeléctricos ( $P_{min}$ ) . . . . .	22
2.2.8	Ganancia de antena repetidora ( $G_r$ ) y ganancia de antena móvil ( $G_t$ ) . . . . .	23
2.2.9	Altura de antena repetidora ( $h_r$ ) y altura de antena móvil ( $h_t$ ) . . . . .	23
2.2.10	Margen de operación para sistemas con múltiples portadoras ( $MC_{INT}$ ) . . . . .	23
2.2.11	Factor de ajuste de ancho de banda ( $dB_{BW}$ ) . . . . .	24
2.2.12	Factor de disponibilidad del sistema interferido ( $N$ ) . . . . .	25
2.3	Modelos de propagación teóricos . . . . .	27
2.3.1	Modelo de pérdidas de propagación de Espacio Libre . . . . .	27
2.3.2	Modelo de pérdidas de propagación de Dos Rayos . . . . .	28

2.3.3	Modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única . . . . .	29
2.3.4	Modelo de pérdidas de propagación de Egli . . . . .	29
2.3.5	Modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata . . . . .	30
2.3.5.1	Zona urbana . . . . .	31
2.3.5.2	Zona suburbana . . . . .	32
2.3.5.3	Zona rural . . . . .	32
2.4	Modelos de propagación experimentales . . . . .	33
2.4.1	Adquisición de los datos . . . . .	34
2.4.2	Análisis de los datos: Obtención de pérdidas . . . . .	35
2.4.2.1	Sistema de Información Geográfico . . . . .	35
2.4.2.2	Perfil del terreno para cada punto . . . . .	36
2.4.2.3	Distancia . . . . .	36
2.4.2.4	Obstáculos . . . . .	38
2.4.2.5	Pérdidas por difracción . . . . .	40
2.4.2.6	Condiciones de LOS y NLOS . . . . .	49
2.4.3	Modelado de las pérdidas: Modelos de propagación . . . . .	51
2.5	Métodos analíticos . . . . .	53
2.5.1	Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento . . . . .	54
2.5.2	Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento Mejorado . . . . .	54
2.5.2.1	Método de la recomendación ITU-R SM.337-6 . . . . .	56
2.6	Métodos numéricos . . . . .	58
2.6.0.1	Método numérico de Monte Carlo . . . . .	59
2.7	Interferencia co-canal . . . . .	62
2.8	Interferencia de canal adyacente . . . . .	63
2.8.1	Metodología de evaluación de la interferencia de canal adyacente . . . . .	64

---

Este segundo capítulo ofrece una descripción detallada a nivel teórico de diversas metodologías empleadas para calcular las pérdidas de propagación en sistemas CLMR. Comienza con la contextualización de los parámetros técnicos esenciales relacionados con esta problemática. Luego, se adentra en el análisis de las pérdidas de propagación desde una perspectiva teórica en un sistema con un único transmisor y un único receptor.

Posteriormente, avanza hacia la evaluación de este sistema mediante el cálculo de un balance de enlace basado en datos experimentales. A continuación, se aborda una estimación más avanzada lograda a través de métodos numérico-analíticos, donde se incluyen múltiples transmisores interferentes para establecer relaciones entre distancia, frecuencia y/o aislamientos mínimos requeridos entre estaciones repetidoras.

Por último, y tomando como base este análisis de la propagación, se examina la principal problemática derivada de este suceso: la interferencia. El objetivo final radica en analizar el impacto de cada tipo de interferencia en la optimización del uso del espectro radioeléctrico.

## 2.1 Introducción

La propagación es un fenómeno esencial en los sistemas de comunicación, ya que determina la forma en que las señales electromagnéticas viajan desde el transmisor hasta el receptor. Este fenómeno, influenciado por diversos factores como la distancia, el terreno y la presencia de obstáculos, puede afectar significativamente la calidad y la fiabilidad de la comunicación. Comprender cómo se comportan las ondas electromagnéticas permite anticipar y mitigar problemas como la atenuación de la señal, el desvanecimiento y la interferencia, aspectos fundamentales para garantizar una comunicación efectiva en entornos variados y en constante evolución.

Este capítulo se enfoca en un procedimiento analítico que parte de premisas básicas de propagación para luego incluir supuestos y aproximaciones a la realidad. A medida que aumenta esta complejidad, se vuelve necesario abordar la problemática resultante de la propagación: la interferencia.



Comenzando por el supuesto más sencillo, donde se parte de la premisa de que un sistema de comunicaciones está formado por un único transmisor y un único receptor, la propagación puede ser modelada mediante un conjunto de expresiones matemáticas que permiten estimar el nivel de señal recibido en un receptor ubicado a una distancia específica de una antena transmisora.

Tras analizar la propagación y sus desafíos en el escenario más básico, surge la pregunta de cómo se comportaría un sistema más complejo, donde no existe un único transmisor interferente para un receptor afectado por interferencia. La evaluación de este proceso en la realidad resulta costosa debido al elevado costo de implementar una red completa para llevar a cabo pruebas experimentales. Es por ello que la simulación y los algoritmos matemáticos se convierten en herramientas fundamentales para abordar esta cuestión de manera viable. Estos métodos, tanto analíticos como numéricos, proporcionan información sobre las relaciones entre la distancia y la frecuencia que deben existir entre los transmisores interferentes para mitigar la interferencia en un receptor víctima de interferencia, una problemática inherente a la propagación.

Los métodos analíticos y numéricos (determinísticos y probabilísticos, respectivamente) permiten evaluar el aislamiento mínimo requerido en sistemas de comunicación inalámbricos más complejos y completos, asegurando así su funcionamiento dentro de la región aceptable e intentando minimizar la distancia entre estaciones trabajando en la misma frecuencia. Estos métodos proporcionan el valor mínimo de aislamiento requerido entre las fuentes y los receptores afectados por interferencias, considerando tanto la distancia geográfica entre sistemas que operan en la misma frecuencia como la separación mínima entre canales de sistemas concurrentes en un mismo lugar.

Uno de los principales desafíos a la hora de abordar esta metodología es la necesidad de contar con todos los parámetros técnicos esenciales. En el contexto del proyecto, es importante garantizar precisión al definir estos parámetros, que serán utilizados en las simulaciones tanto de métodos determinísticos como probabilísticos, puesto que en última instancia se pretende lograr una correspondencia precisa con la realidad para satisfacer una necesidad. En esta primera sección, se describen estos parámetros técnicos esenciales y se relata su importancia y repercusión en la propagación y la interferencia de la señal para, más adelante, embarcarse en el estudio de la propagación comenzando con sistemas que cuentan con un único transmisor y receptor, para finalizar describiendo metodologías de evaluación de sistemas más complejos basadas en los principios establecidos en los casos más simples.



## 2.2 Parámetros técnicos esenciales

La masificación de servicios de comunicaciones en las bandas de frecuencias de 138 a 470 MHz ha generado una congestión del espectro radioeléctrico en dicho rango frecuencial, por lo que es necesario definir criterios que faciliten el análisis de la distribución de canales con el fin de lograr una mayor eficiencia espectral y satisfacer todas las demandas de servicios de comunicación. Todo esto debe realizarse sin perturbar los servicios existentes ni comprometer los futuros debido a la interferencia [22].

La utilización eficiente del espectro dependerá, en gran parte, de los parámetros y características del sistema a implementar, así como del escenario elegido. Por esta última razón, es importante garantizar unos niveles de interferencia admisibles <sup>1</sup> tanto para el nuevo sistema de comunicación como para los sistemas ya operativos.

Las normas existentes garantizan un adecuado aislamiento ante interferencia cuando se cumple con los **parámetros técnicos esenciales de operación**.

La optimización del uso de los recursos radioeléctricos en las bandas de 138 a 470 MHz requiere una cuidadosa consideración de los parámetros técnicos de diseño y especificación de los sistemas de radio licenciados, con el objetivo de evitar tanto la interferencia causada por los licenciatarios como la recibida de otros usuarios.

En Colombia, la entidad encargada de asesorar al Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones en la planeación, atribución, vigilancia y control del espectro radioeléctrico es la ANE, por lo que analizar el impacto de los parámetros técnicos esenciales en el análisis de la propagación y la interferencia es de gran importancia para esta organización.

En el estudio preciso de la propagación de la señal así como de sus pérdidas asociadas, se consideran las más exigentes características de los sistemas de comunicación vía radio para el análisis de aislamiento o interferencia. Por ello, es importante identificar, seleccionar y caracterizar los parámetros de análisis considerando el peor de los casos, es decir, teniendo en cuenta parámetros con valores extremos (máximos o mínimos) que garanticen el mayor aislamiento de los sistemas frente a la interferencia.

<sup>1</sup> Se considera interferencia admisible aquella que satisface los criterios cuantitativos de interferencia y de compartición que figuran en el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) de la ITU, en Recomendaciones ITU-R o en acuerdos especiales según lo previsto en dicho Reglamento [43].

A continuación, se presentan de manera general conceptos y parámetros esenciales en la aplicación de estos métodos [22]:

### **2.2.1 Bandas de frecuencia de operación**

En Colombia, el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF) [13] es la entidad encargada de definir las bandas de frecuencia de operación del servicio de radio móvil. Para el análisis de aislamiento mostrado en el presente TFM, se consideran las bandas con los valores en frecuencia más bajos y más altos dentro de la banda de interés destinada a 'servicios de radiocomunicaciones móviles y fijos' según las tablas 3A y 13 establecidas por el CNABF, siendo dichos rangos de frecuencia 138 – 174 MHz y 440 – 470 MHz, pertenecientes a las bandas VHF y UHF, respectivamente.

### **2.2.2 Ancho de banda del canal (BW)**

En los sistemas de radio móvil terrestre que operan en la banda de frecuencia de 138 a 470 MHz, existen 6 valores de ancho de banda o BW: 6.25 kHz, 12.5 kHz, 25 kHz, 3 MHz, 5 MHz y 10 MHz. Sin embargo, en el presente TFM se consideran únicamente BW relevantes para el estudio de la ANE, es decir, relacionados con servicios de radio móvil profesional o los denominados *sistemas de comunicación de misión crítica*. Dichos BW son 6.25 kHz, 12.5 kHz, y 25 kHz.

### **2.2.3 Potencia de transmisión ( $P_t$ )**

Se refiere al valor medio de potencia suministrado por un transmisor a la línea de transmisión que conecta con la antena, evaluado durante un intervalo de tiempo mayor en comparación con el periodo correspondiente a la componente de frecuencia más baja de la señal moduladora [42]. Particularmente, en sistemas de radio móvil, las potencias de transmisión pueden tomar valores entre 1 W y 50 W, siendo los valores típicos para estaciones repetidoras o estaciones base de 20 W y 40 W [14].

### 2.2.4 Máscara espectral

Las máscaras espectrales son un conjunto de líneas definidas matemáticamente que limitan los niveles de transmisión de las señales radio o sus componentes en frecuencia en función de la separación en frecuencia de cada componente con respecto a la frecuencia central del canal. Busca limitar la interferencia por limitación de la radiación excesiva fuera del BW de canal por medio de la atenuación de emisiones no deseadas -emisiones fuera de banda y emisiones parásitas- realizada generalmente con un filtro pasabanda (BPF, *Band Pass Filter*) sintonizado a la frecuencia central del canal. La máscara espectral se define en términos del BW de los canales o de la separación entre canales y establece el límite de potencia para las emisiones dentro y fuera de banda que son admisibles [46].

En los sistemas de radio móvil existen máscaras espectrales para cada uno de los anchos de banda de canal, siendo la máscara de emisión tipo B para los sistemas con canales de BW igual a 25 kHz cuyos límites se representan en la Figura 2.1; la máscara de tipo D presente en la Figura 2.2 para los sistemas con canales de BW igual a 12.5 kHz y la máscara de emisión tipo E para los sistemas con canales de BW igual a 6.25 kHz representada en la Figura 2.3 [5] [7] [24].

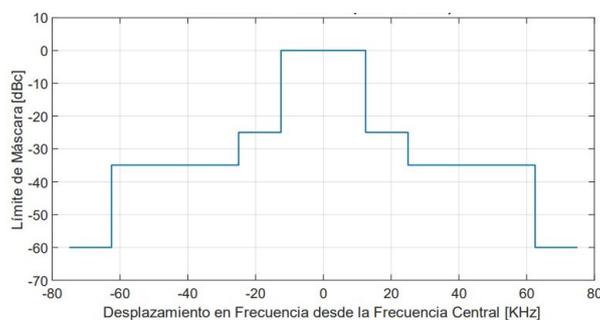


Figura 2.1: Máscara de emisión tipo B

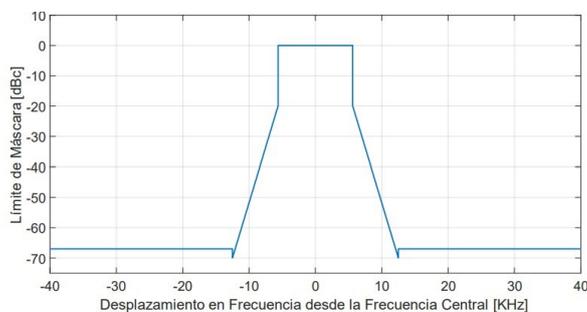
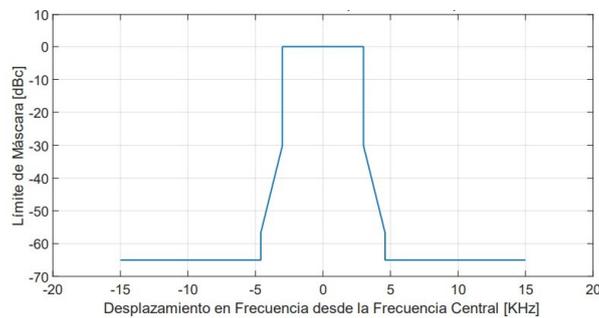


Figura 2.2: Máscara de emisión tipo D



**Figura 2.3:** Máscara de emisión tipo E

### 2.2.5 Selectividad y factor de forma

La selectividad de un receptor se define como la capacidad que tiene el mismo para seleccionar la señal deseada de un conjunto de señales interferentes a partir de filtros [27]. El grado de selectividad de un filtro se puede analizar por medio del factor de calidad del filtro ( $Q$ ), parámetro que relaciona el valor de la frecuencia portadora o frecuencia central de la señal deseada a nivel de radiofrecuencia con respecto al BW del filtro, lo cual, matemáticamente, se define como:

$$Q = \frac{f_c}{BW_{-3dB}} \quad (2.1)$$

donde  $f_c$  es la frecuencia portadora de la señal deseada medida en Hz y  $BW_{-3dB}$  es el BW del filtro medido en Hz considerando como límite aquellos puntos donde la potencia máxima cae 3 dB.

El factor de forma es otra manera de describir la selectividad de un receptor de RF y corresponde a la relación entre los anchos de banda en los puntos de -60 dB y los puntos de potencia mitad -3 dB, tal como se define a continuación [27]:

$$\text{Factor de forma} = \frac{BW_{-60dB}}{BW_{-3dB}} \quad (2.2)$$

Por lo tanto, es posible calcular el factor de forma correspondiente a las máscaras de emisión para los sistemas de radio móvil definidas anteriormente, como se muestra en la Tabla 2.1:

**Tabla 2.1:** Factor de forma de las máscaras de emisión para radio móvil

Máscara de emisión	Factor de forma
Tipo B	5
Tipo D	1.97
Tipo E	1.5

### 2.2.6 Relación de protección (RFPR)

La relación de protección (*RF Protection Ratio*, RFPR) es el mínimo valor expresado en dB entre una señal deseada y una señal interferente a la entrada del receptor, de tal manera que el mensaje original pueda ser obtenido en el proceso de demodulación con unas mínimas características de calidad [38]. El incumplimiento de la RFPR puede tener consecuencias tales como la desensibilización del receptor, causando interferencia cuando la señal interferente satura al receptor y le impide detectar pequeñas señales que en condiciones de no interferencia pueden ser detectadas, o fenómenos como el efecto captura en sistemas que hacen uso de modulación en frecuencia.

Es necesario aclarar que la RFPR y la selectividad son características diferentes dado que la primera es un valor convencional determinado teniendo en cuenta las características de transmisión, propagación y recepción, mientras que la selectividad depende únicamente del receptor [37].

A menudo, la RFPR necesaria para proteger un determinado servicio de radiocomunicación se establece a través de medidas experimentales: la literatura indica valores teóricos para señales analógicas y digitales de banda estrecha de alrededor de 7 dB [6].

La relación de protección es un parámetro esencial para la obtención del aislamiento en los **métodos analíticos**.

En secciones posteriores, se describe la importancia de este parámetro esencial así como la metodología para su obtención empleando los dispositivos radio utilizados en el desarrollo del proyecto.



### 2.2.7 Sensibilidad de los receptores radioeléctricos ( $P_{min}$ )

La sensibilidad se define como el mínimo nivel de señal (en  $\mu\text{V}$ ,  $\text{dB}\mu\text{V}$  o  $\text{dBm}$ ) a la entrada de un receptor que le permite garantizar la demodulación y la obtención de la información recibida con un nivel adecuado de calidad. La sensibilidad se ve afectada por el ruido captado y el ruido generado dentro del propio receptor [32]. Particularmente, en sistemas de radio móvil, la sensibilidad será el valor de señal a la salida del receptor resultado de una SINAD de 12dB [3].

SINAD (*Signal-to-Noise and Distortion Ratio*) se refiere a la relación entre la señal, el ruido y la distorsión en un sistema de comunicaciones. Es una medida de la calidad de la señal, que indica cuánto más fuerte es la señal en comparación con el ruido y la distorsión presentes en el sistema.

$$\text{SINAD} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{señal}} + P_{\text{ruido}} + P_{\text{distorsión}}}{P_{\text{ruido}} + P_{\text{distorsión}}} \right) \quad (2.3)$$

La sensibilidad, por otro lado, se refiere al nivel mínimo de señal que un receptor puede detectar y procesar con éxito. Especifica la mínima potencia de entrada necesaria para producir una señal de salida utilizable.

En sistemas CLMR analógicos, la medida de la sensibilidad de un receptor se asocia al criterio de calidad de la SINAD, mientras que en sistemas CLMR digitales, la medida de la sensibilidad de un receptor se asocia a la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*).

La sensibilidad puede ser estática o dinámica: la primera es la definida por el fabricante y medida en condiciones controladas de laboratorio; 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 de estudio está entre los valores de 0.25  $\mu\text{V}$  (-12.04  $\text{dB}\mu\text{V}$ ) y 0.275  $\mu\text{V}$  (-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  $\text{dBm}$  y -118.21  $\text{dBm}$ , respectivamente [23].

### 2.2.8 Ganancia de antena repetidora ( $G_r$ ) y ganancia de antena móvil ( $G_t$ )

La ganancia de una antena es la medida de la capacidad que tiene una antena para orientar la energía suministrada por el transmisor en una determinada dirección del espacio con respecto a una antena de referencia [42]. En el manual de comprobación técnica del espectro, se define la ganancia para antenas directivas trabajando en ondas métricas y decimétricas [40], donde un valor máximo de ganancia para las antenas de estación base o repetidora es de 7 dBd (9.2 dBi) y un valor máximo de ganancia para las antenas móviles es de 0 dBd (2.2 dBi).

Por lo tanto, para el análisis de aislamiento, se consideran valores de 10 dBi para antenas de estaciones repetidoras,  $G_r$ , y de 3 dBi para antenas móviles,  $G_t$ , valores que soportados por sistemas de antenas de diferentes fabricantes [12].

### 2.2.9 Altura de antena repetidora ( $h_r$ ) y altura de antena móvil ( $h_t$ )

La altura de la antena repetidora,  $h_r$ , se calcula sumando la altura de radiación autorizada de la antena con la elevación sobre el nivel del mar del emplazamiento propuesto y restando la altura media de la cabecera municipal del municipio.

Por otro lado, la altura de la antena móvil,  $h_t$ , se aproxima a la altura promedio de un humano sosteniendo un dispositivo móvil, considerada en el análisis como 1.50 m.

### 2.2.10 Margen de operación para sistemas con múltiples portadoras ( $MC_{INT}$ )

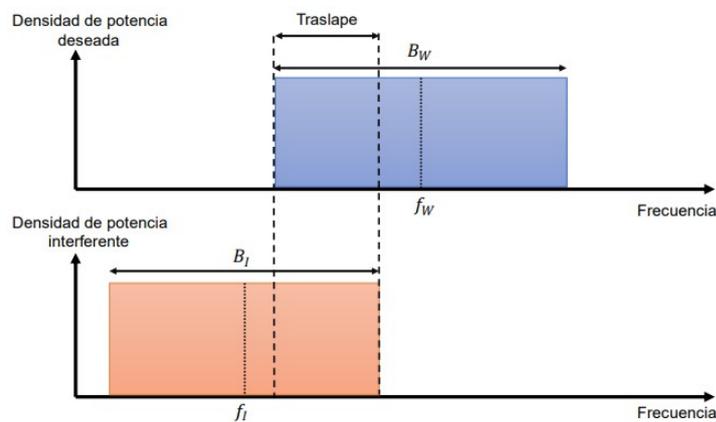
El margen de operación para sistemas con múltiples portadoras,  $MC_{INT}$ , hace referencia a la consideración adicional de aislamiento cuando varios transceptores operan en el mismo sitio o haciendo uso de una misma infraestructura de transmisión.

En la aplicación de los métodos analíticos que están en función de  $MC_{INT}$ , este parámetro es igual a 0 dB, considerando que el transmisor interferente hace uso de una sola portadora, basándose en sistemas de radio móvil convencional.



### 2.2.11 Factor de ajuste de ancho de banda ( $dB_{BW}$ )

En el análisis de escenarios co-canal, es necesario considerar los anchos de banda y el grado de traslape en función de la señal deseada con la señal interferente. De manera ideal, el BW a considerar se modela como un bloque rectangular, tal como se muestra en la Figura 2.4:



**Figura 2.4:** Traslape entre la densidad espectral de potencia deseada e interferente [22]

donde  $B_W$  y  $B_I$  son los BW de la señal deseada e interferente, respectivamente; y  $f_W$  y  $f_I$  son la frecuencia central de la señal deseada e interferente, respectivamente.

El factor de ajuste de ancho de banda considera la existencia de un traslape de las señales en frecuencia, en consecuencia, de interferencia co-canal total o parcial. Por lo tanto, es necesario considerar el grado de traslape para determinar el grado de su efecto, dado que no toda la potencia de la señal interferente va a afectar al receptor víctima de interferencia.

La potencia interferente recibida es una fracción de la potencia de interferencia total y esa fracción es considerada por medio del cálculo del factor de ajuste de ancho de banda,  $dB_{BW}$ , haciendo uso de la siguiente relación:

$$dB_{BW} = 10 \cdot \log \left( \frac{\text{Ancho de Banda de Traslape}}{B_t} \right) \tag{2.4}$$

siendo el valor de ancho de banda de traslape:

$$\text{Ancho de banda de traslape} = \min\{B_W, B_t, (B_W + B_t)/2 - |f_W - f_t|\} \tag{2.5}$$

El ancho de banda de traslape será menor o igual  $B_t$ , por lo tanto, el factor de ajuste de ancho de banda será menor o igual a cero. Cuando no existe traslape, el valor del factor de ancho de banda tendería a infinito (escenario sin interferencia co-canal total o parcial), lo cual disminuiría el aislamiento requerido considerablemente.

En la aplicación de los métodos analíticos que están en función de  $dB_{BW}$ , este parámetro se considera igual a 0 dB, lo cual corresponde a una de las peores situaciones desde el punto de vista del aislamiento frente a interferencia co-canal (traslape total).

### 2.2.12 Factor de disponibilidad del sistema interferido ( $N$ )

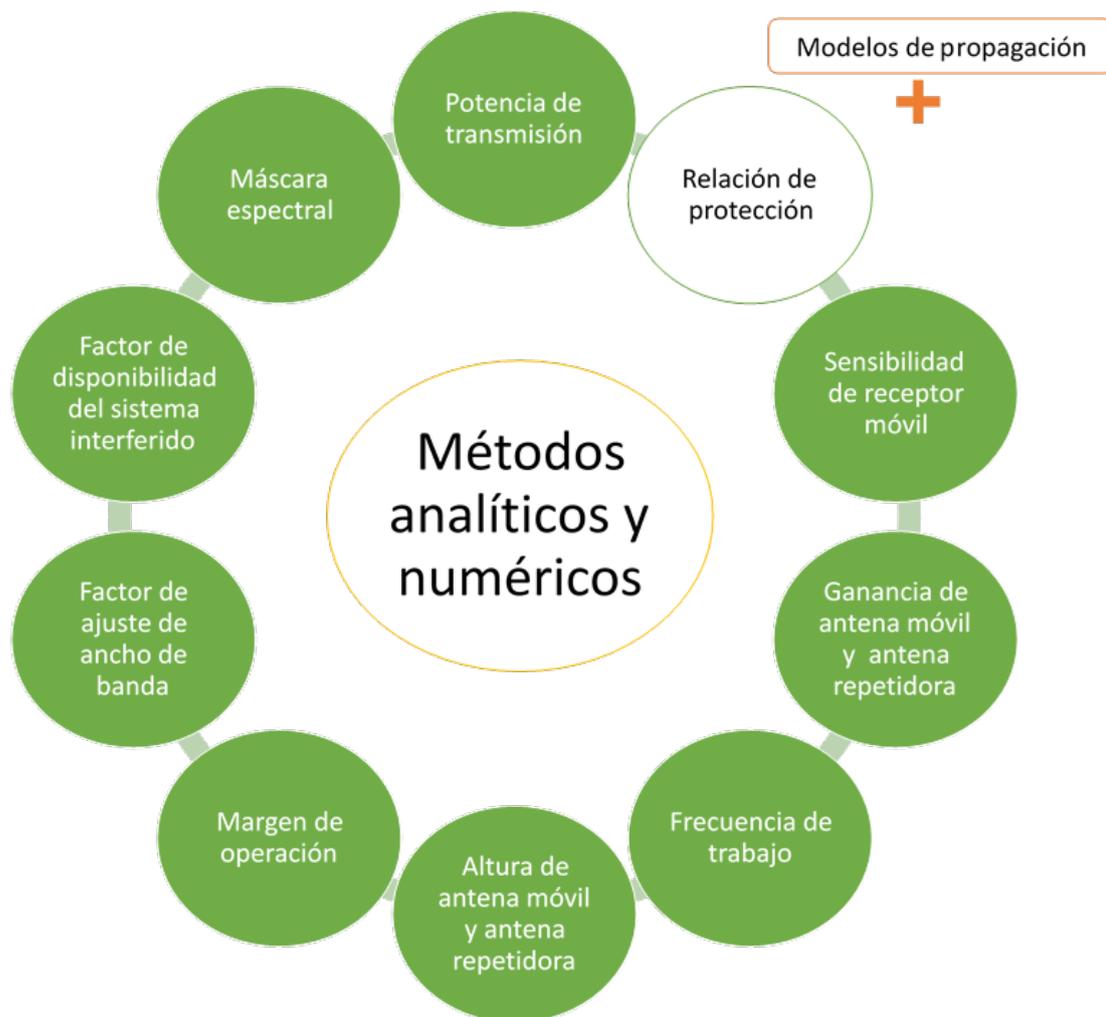
La disponibilidad del enlace asociado al sistema interferente se calcula por medio del método de W. C. Jakes. Modelando el desvanecimiento lento o por sombra<sup>2</sup> mediante una distribución normal con valor medio igual a  $x$  y una desviación estándar igual a  $\theta$  (en dB), W. C. Jakes obtuvo un conjunto de curvas que relacionan el porcentaje de cobertura perimetral con el porcentaje de cobertura zonal, es decir, la calidad de la cobertura dentro de una celda de radio. El factor de disponibilidad del sistema interferido,  $N$ , afecta, por tanto, al valor de sensibilidad del sistema interferido.

En la aplicación de los métodos analíticos, el factor de disponibilidad toma valores iguales a 3 dB, 10 dB y 20 dB.

Un resumen de los parámetros técnicos esenciales descritos se muestra en la Figura 2.5. Estos valores, mostrados en color verde, son de vital importancia para la ejecución de los métodos analíticos y numéricos que colaboran en el análisis de la propagación y la interferencia; en especial, la relación de protección, destacado por ello con una distinción de color. Además de estos parámetros, los métodos analíticos y numéricos dependen a su vez del modelo de propagación elegido, por lo que la Figura 2.5 también considera la dependencia de este factor para la ejecución de los métodos.

---

<sup>2</sup> El desvanecimiento lento o por sombra (*shadowing*) se debe a la presencia de algún obstáculo que impide la visión directa entre el transmisor y el receptor. La reducción en el nivel de la señal por causa de este desvanecimiento es transitoria si el obstáculo en cuestión, el transmisor o el receptor, están en movimiento



**Figura 2.5:** Parámetros técnicos esenciales para el cálculo de la interferencia

Una vez descritos los parámetros técnicos esenciales involucrados en la propagación, en el siguiente punto se prosigue redactando la importancia de estos modelos de propagación tanto desde el enfoque teórico que muestra la literatura como desde el caso práctico, donde es preciso analizar el escenario y modelar las pérdidas reales para analizar y estudiar la propagación de las señales.

## 2.3 Modelos de propagación teóricos

La propagación de ondas electromagnéticas se modela haciendo uso de las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, debido a la complejidad de los canales inalámbricos por fenómenos de propagación tales como reflexión, difracción y dispersión de las señales transmitidas, el análisis basado en las ecuaciones de Maxwell es intrincado e impráctico.

En el rango de frecuencias de 138 a 470 MHz, 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, lo que da lugar al uso de modelos que tengan en cuenta estos factores y aproximen de forma práctica y sencilla el análisis propagativo inviable mediante las ecuaciones de Maxwell.

Los **modelos de propagación** o **modelos de pérdidas de propagación** son un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos que permiten estimar el nivel de señal radio recibido en un receptor ubicado a una distancia determinada desde una antena transmisora. Permiten calcular la reducción de la potencia de la señal de radiofrecuencia, normalmente alterada por el entorno a través del cual se propaga la onda electromagnética, teniendo en cuenta parámetros geoclimáticos, datos sobre el terreno, la frecuencia de operación o las alturas de las antenas, entre otros.

Los métodos empíricos proporcionan una estimación 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 de utilización sencilla y su exactitud puede ser mejorada al considerar medidas reales de campo.

En esta sección, se describen algunos de los modelos más importantes para estimar las pérdidas de propagación teóricas en el rango de frecuencias de 138 a 470 MHz.

### 2.3.1 Modelo de pérdidas de propagación de Espacio Libre

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



Las pérdidas de propagación en unidades logarítmicas se calculan utilizando la siguiente expresión matemática:

$$L_{fs} = 32,45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (2.6)$$

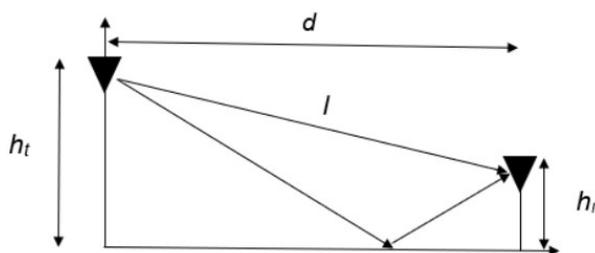
donde  $d$  es la distancia expresada en km entre el transmisor y el receptor y  $f$  es la frecuencia de operación medida en MHz.

Este modelo, aunque simple, ofrece una aproximación relevante para estimar las pérdidas de propagación en distancias en la que la onda viaja en línea directa desde la fuente hasta el receptor, sin obstrucciones significativas entre el transmisor y el receptor, es decir, en condiciones de Línea de Vista (LOS).

Debido a su carácter básico y fundamental, el modelo de pérdidas en espacio libre se utiliza como una herramienta para determinar los límites teóricos de operación en escenarios con interferencia, lo que permite estimar la cobertura y la mínima separación en distancia entre estaciones operando en la misma frecuencia.

### 2.3.2 Modelo de pérdidas de propagación de Dos Rayos

Este modelo, también conocido como modelo de tierra plana, describe analíticamente las pérdidas de propagación al considerar un rayo directo y un rayo reflejado en tierra entre una antena transmisora y una antena receptora, tal como se muestra en la Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Componentes de la señal en el modelo de propagación de Dos Rayos

La señal recibida tiene dos componentes: la componente LOS, que es la señal transmitida a través del espacio libre; y una componente o rayo reflejado, que corresponde a la señal reflejada en la superficie terrestre y que modela la multitrayectoria [18].

Las pérdidas de propagación en unidades logarítmicas,  $L_b$ , se calculan utilizando la siguiente expresión matemática:

$$L_b = 40 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(h_t) - 20 \log_{10}(h_r) \quad (2.7)$$

donde  $d$  es la distancia expresada en km entre el transmisor y el receptor, y  $h_t$  y  $h_r$  son las alturas en metros de las antenas de transmisión y recepción, respectivamente, con respecto a la altura promedio del escenario. La estimación de las pérdidas de propagación es válida sólo cuando  $d$  es mayor que la distancia crítica, definida como:

$$d > d_c = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (2.8)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda medida en metros. En este caso, la potencia recibida es independiente de la frecuencia y decae con una potencia de cuatro con respecto a la distancia.

### 2.3.3 Modelo de pérdidas de propagación de Pendiente Única

Es uno de los modelos básicos para la estimación de pérdidas de propagación en el cual la expresión matemática de dichas pérdidas sólo depende de la distancia:

$$L_b = L_0 + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2.9)$$

donde  $n$  corresponde al exponente de propagación y  $d_0$  es una distancia de referencia en la cual se conoce la pérdida de propagación  $L_0$ . Los valores de  $d_0$ ,  $L_0$  y  $n$  se pueden obtener experimentalmente y dependen de las características del escenario. Los valores sugeridos por la literatura se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} n &= 3 \text{ y } L_0 = 70 \text{ dB} \\ n &= 4 \text{ y } L_0 = 100 \text{ dB} \end{aligned}$$

### 2.3.4 Modelo de pérdidas de propagación de Egli

Este modelo estima la pérdida de propagación en un enlace punto a punto o punto a multipunto y es adecuado para transmisiones con línea de vista sobre terrenos ligeramente ondulados, es decir, con variaciones en alturas no mayores a 15.24 m.



Las pérdidas de propagación en unidades logarítmicas se calculan utilizando la siguiente expresión matemática:

$$L_b = 40 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 20 \log_{10}(h_t) + L_m \quad (2.10)$$

donde  $L_m$  se define como:

$$L_m = \begin{cases} 76,3 - 10 \log_{10}(h_r) & \text{si } h_r \leq 10 \\ 85,9 - 20 \log_{10}(h_r) & \text{si } h_r > 10 \end{cases} \quad (2.11)$$

siendo  $d$  la distancia expresada en km entre el transmisor y el receptor;  $h_t$  y  $h_r$  son las alturas medidas en metros de las antenas de transmisión y recepción, respectivamente, con respecto a la altura promedio del escenario; y  $f$  es la frecuencia de operación en MHz. El rango de valores para los cuales el modelo de Egli es aplicable es el siguiente:

$$\begin{aligned} 40 &\leq f \leq 1000 \\ 1 &\leq d \leq 60 \end{aligned}$$

### 2.3.5 Modelo de pérdidas de 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 [34] y sus correspondientes expresiones matemáticas [19].

Las curvas normalizadas de Okumura corresponden a valores de la intensidad de campo, para diferentes alturas efectivas de antenas de transmisión en bandas de frecuencia de 50 MHz, 450 MHz y 900 MHz, para una Potencia Radiada Aparente (PRA) de 1 KW y una altura de antena en recepción de 1.5 m.

Hata, posteriormente, elaboró una serie de expresiones basadas en las curvas de Okumura para estimar las pérdidas de propagación. Este esfuerzo buscaba ofrecer variantes del modelo que se ajustaran a diferentes condiciones de escenario, con el objetivo de simplificar la predicción de propagación. Las fórmulas básicas de pérdidas de propagación de Hata según el tipo de escenario se muestran a continuación:

### 2.3.5.1 Zona urbana

Si el receptor se encuentra en en una **zona urbana**, las pérdidas de propagación en unidades logarítmicas,  $L_{b,\text{urbano}}$ , son las siguientes:

$$L_{b,\text{urbano}} = 69,55 + 26,26 \log_{10}(f) - 13,82 \log_{10}(h_t) - a(h_r) + [44,9 - 6,55 \log_{10}(h_t)] \frac{\log_{10}(d)}{b} \quad (2.12)$$

donde:

- $d$ : Distancia expresada en km entre el transmisor y el receptor;
- $h_t, h_r$ : Alturas medidas en metros de las antenas de transmisión y recepción, respectivamente, con respecto a la altura promedio del escenario;
- $f$ : Frecuencia de operación en MHz;
- $b$ : Parámetro adimensional que se calcula mediante la Ecuación 2.13 e incluye el efecto de curvatura de la tierra en el modelo para aquellas distancias mayores a 20 km;
- $a(h_r)$ : Factor de corrección por altura de la antena de recepción descrito mediante las siguientes Ecuaciones 2.14 y 2.15 según el tipo de ciudad.

Donde el parámetro  $b$  es igual a:

$$b = \begin{cases} 1 & d \leq 20 \\ 1 + (0,14 + 0,000187f + 0,00107h_t') [\log_{10}(0,05d)]^{0,8} & d > 20 \end{cases} \quad (2.13)$$

con  $h_t' = h_t \sqrt{1 + 0,000007h_t^2}$ ; y siendo  $a(h_r)$ , dependiendo del tipo de ciudad:

- Para ciudades pequeñas o medianas:

$$a(h_r) = (1,1 \log_{10}(f) - 0,7)h_r - (1,56 \log_{10}(f) - 0,8) \quad (2.14)$$

- Para ciudades grandes:

$$a(h_r) = \begin{cases} 8,29 [\log_{10}(1,54h_r)]^2 - 1,10 & \text{si } f \leq 300 \\ 3,2 [\log_{10}(11,75h_r)]^2 - 4,97 & \text{si } f > 300 \end{cases} \quad (2.15)$$



**2.3.5.2 Zona suburbana**

Si el receptor se encuentra en una **zona suburbana**, caracterizada por edificaciones de baja altura y calles relativamente anchas, las pérdidas de propagación en unidades logarítmicas,  $L_{b,\text{suburbano}}$  se expresan como:

$$L_{b,\text{suburbano}} = L_{b,\text{urbano}} - 2 \left[ \log_{10} \left( \frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (2.16)$$

**2.3.5.3 Zona rural**

Si el receptor se encuentra en una **zona rural**, abierta, y sin obstrucciones en su entorno inmediato, las pérdidas de propagación en unidades logarítmicas,  $L_{b,\text{rural}}$ , son:

$$L_{b,\text{rural}} = L_{b,\text{urbano}} - 4,78 \log_{10}(f)^2 + 18,33 \log_{10}(f) - K \quad (2.17)$$

donde  $K$  puede tomar valores desde 35.94 a 40.94 dependiendo del tipo de escenario, siendo dichos extremos campo y desierto, respectivamente.

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

$$\begin{array}{ll} 150 \leq f \leq 1500 & 1 \leq d \leq 100 \\ 30 \leq h_t \leq 100 & 1 \leq h_r \leq 10 \end{array}$$

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.

La selección de un modelo de pérdidas de propagación adecuado puede tener un alto impacto en el estudio de la propagación y la interferencia, hasta el punto de confundir un escenario con interferencia perjudicial en uno sin interferencia significativa y viceversa. Todo estudio de interferencia requiere que se utilicen varios modelos de propagación además de una posterior interpretación de resultados. Por esa razón, los modelos explicados anteriormente serán considerados para realizar comparativas teórico-prácticas junto con datos adquiridos de forma experimental en el Departamento del Cauca, Colombia.

## 2.4 Modelos de propagación experimentales

Continuando el análisis de las pérdidas de propagación, surge la interrogante sobre qué modelo es más adecuado para evaluar una zona específica con el fin de implementar mejoras efectivas. En ocasiones, las aproximaciones matemáticas derivadas de los métodos teóricos expuestos en la sección 2.3 pueden no resultar efectivas para optimizar el uso del espectro en una determinada región. Por este motivo, este proyecto incluye una segunda fase de ejecución puramente práctica, en la cual se busca obtener una representación más precisa del terreno colombiano de estudio. El objetivo es desarrollar un modelo de propagación aplicable tanto a métodos analíticos como numéricos, que ofrezca recomendaciones de distancia-portadora para optimizar el uso del espectro de frecuencias.

Para llevar a cabo un análisis experimental de las pérdidas de propagación, es necesario realizar una fase de adquisición de datos que permita construir una base de datos suficiente para obtener la tendencia de las pérdidas de propagación encontradas para poder extraer conclusiones sobre la ejecución de los métodos analíticos y numéricos, y comparar los resultados empleando tanto los modelos de propagación teóricos como los prácticos.

El balance de enlace a partir del cual se derivan las pérdidas de propagación se incluye a continuación:

$$L_{prop} = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - P_r \quad (2.18)$$

donde todos los términos son parámetros conocidos una vez realizada la adquisición de los datos con los equipos apropiados:

- $L_{prop}$ : Pérdidas de propagación generalmente expresadas dB;
- $P_t$ : Potencia de transmisión medida en dBm;
- $G_t, G_r$ : Ganancias de las antenas de transmisión y recepción, respectivamente;
- $L_t, L_r$ : Pérdidas de transmisión y recepción, respectivamente, medidas en dB. Incluye pérdidas por cableado, conectores, atenuación y obstaculización de la señal, entre otros factores;
- $P_r$ : Potencia de la señal recibida (*Received Signal Strength*, RSS) expresada en dBm;

Este último parámetro,  $P_r$ , se obtiene a partir de pruebas de campo.



Así pues, dentro del marco del proyecto, se describen las pautas a seguir para realizar las pruebas de campo que darán lugar a los modelos de pérdidas de propagación necesarios para analizar la interferencia co-canal en el territorio colombiano de estudio.

### 2.4.1 Adquisición de los datos

En un estudio de interferencia en una región específica, los niveles de señal, determinados por la geografía y la topología de la red, son fundamentales para definir modelos de propagación efectivos. En ausencia de datos adecuados, es conveniente realizar mediciones en campo para recopilar información uniforme y útil que incluya la RSS en dBm, así como detalles sobre la ubicación, el entorno y la distancia a las estaciones repetidoras.

Una serie de criterios apropiados para definir una nueva base de datos formada por valores RSS de señales de radiofrecuencia se exponen a continuación:

1. **Financiación:** Es necesario contar con un importe económico que permita conformar la nueva base de datos en su totalidad cubriendo todos los gastos asociados sin consumir los recursos -ya sean monetarios o temporales- del resto del proyecto.
2. **Topología de la red:** Diseñar una red de comunicación que satisfaga las necesidades del estudio ajustándose a la capacidad económica.
3. **Equipamiento adecuado:** Una correcta elección de los equipos y antenas que conforman la red es de vital importancia para obtener información aprovechable. En caso de ser necesario un medio de transporte o material de protección para los trabajadores, deberá también adquirirse.
4. **Planificación de rutas:** Establecer rutas que permitan caracterizar de la forma más realista posible el patrón de radiación obtenido con la antena de estudio.
5. **Software de gestión y monitoreo:** Utilizar herramientas software adecuadas que permitan registrar información con precisión y rapidez facilitará el proceso de adquisición de datos.
6. **Uniformidad de los datos:** Realizar mediciones de potencia en un intervalo de tiempo o distancia fijos. Es aconsejable establecer un criterio fijo en la fase previa a las pruebas de campo para asegurar dicha estabilidad de medición.

7. **Personal de trabajo:** Contar con personal capacitado, tanto en campo como verificando que la información se registra adecuadamente y bajo los estándares establecidos con anterioridad.
8. **Organización del tiempo:** Establecer marcos temporales y un plan de pruebas permitirá que el proyecto cumpla con sus objetivos en el tiempo estipulado.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, el siguiente paso una vez conformada una buena base de datos será extraer los modelos de propagación necesarios para aplicar los métodos analíticos y numéricos y realizar un análisis de interferencia y propagación.

Para poder obtener las pérdidas de propagación que permitan modelar los datos, se requiere contar con el valor de potencia recibida en dBm para cada medición y la localización precisa de dicho punto. Con estos dos factores y conociendo las coordenadas de la estación repetidora con la que se ha establecido la comunicación, puede definirse el perfil del terreno necesario para clasificar correctamente los puntos según las condiciones de propagación en las que se encuentren, obteniendo también parámetros tan importantes como la distancia entre transmisor y receptor, los obstáculos presentes en la comunicación así como el nivel de obstrucción de estos y las pérdidas por difracción.

## 2.4.2 Análisis de los datos: Obtención de pérdidas

Una de las preguntas más importantes sobre la interferencia es, a menudo, ¿qué ubicaciones podrían verse afectadas? 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 mediante el uso de herramientas de estimación de cobertura, las cuales permiten a los operadores y entes de regulación dimensionar la complejidad de las soluciones de radio móvil o analizar la compatibilidad electromagnética entre las emisiones que comparten el espectro radioeléctrico.

### 2.4.2.1 Sistema de Información Geográfico

A menudo, las herramientas de estimación de cobertura son utilizadas por grandes empresas de telecomunicaciones, que emplean modelos de pérdidas de propagación adaptados a escenarios específicos. Algunas de estas herramientas son costosas, de carácter privativo y no pueden modificarse fácilmente para adaptarse a las características de propagación en los diferentes tipos de escenarios colombianos.



En este contexto, han surgido alternativas en forma de Sistemas de Información Geográfica (GIS) de código abierto, que permiten al usuario utilizar datos del terreno para calcular, predecir y visualizar aspectos como la cobertura radioeléctrica. Un GIS libre y de código abierto permite:

- Representar la ubicación geográfica de las estaciones base o repetidoras;
- Proporcionar la información suficiente para modelar el escenario en el que se produce la propagación de la señal (orografía del terreno, edificios, vegetación, etc.);
- Visualizar los resultados de cobertura.

#### **2.4.2.2 Perfil del terreno para cada punto**

Como aventurábamos previamente, un GIS calcula la potencia recibida utilizando los diferentes modelos de pérdidas de propagación a los cuales se ha agregado el principio de curvatura de la tierra, el principio de refracción en la atmósfera y el principio de difracción debido a obstáculos presentes a lo largo de la trayectoria.

Para realizar estos cálculos de pérdidas asociadas a la comunicación, es imprescindible analizar el perfil del terreno entre el transmisor y el receptor, ya que de ello depende el valor de las pérdidas. Por tanto, es requerido proporcionarle al GIS sus emplazamientos con rigurosa exactitud, así como trabajar sobre un mapa preciso del terreno de estudio.

Se identifican tres aspectos esenciales: la distancia entre estaciones y dispositivos, obstáculos presentes en la comunicación que atenúan la señal, y las pérdidas por difracción alrededor de obstáculos que determinan las condiciones del enlace.

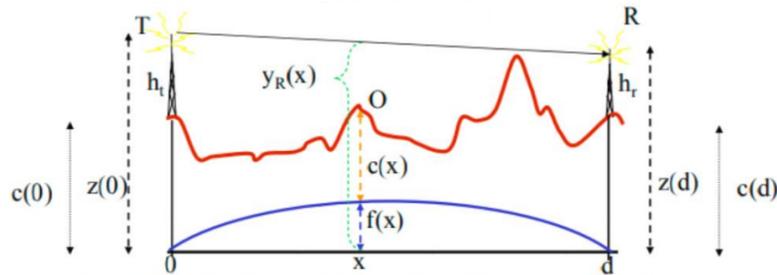
#### **2.4.2.3 Distancia**

La distancia se refiere a la separación en unidades espaciales que existe entre dos puntos -en este caso, transmisor y receptor- trazando una línea recta entre ellos.

Las señales de radio, inicialmente, se propagan en línea recta, pero pueden ser desviadas por la refracción atmosférica resultando en una curvatura del haz expresado mediante el factor  $K$  o índice troposférico. Para incorporar este fenómeno en el análisis del perfil del terreno, se multiplica  $K$  por el radio terrestre, generando una curvatura relativa que se puede visualizar comparando la tierra plana con el haz curvo. Usualmente, se considera  $K = 4/3$  para condiciones atmosféricas normales.



Para calcular la distancia entre transmisor y receptor considerando la curvatura de la Tierra, se aplica el Teorema de Pitágoras, sumando la *flecha* que representa la curvatura con un factor  $K$  de  $4/3$  a la altura vertical entre los puntos. Este cálculo se detalla en la Ecuación 2.22 y se ilustra en la Figura 2.7:



**Figura 2.7:** Condición de *tierra curva* para el cálculo de la distancia [9]

donde:

- $T, R$ : Transmisor y receptor, respectivamente;
- $x$ : Distancia medida en km que une los puntos de transmisión y recepción;
- $c(x)$ : Altura del terreno medida en metros sobre el nivel del mar. Esta información la contiene el mapa de altitud del terreno;
- $f(x)$ : Protuberancia de la Tierra medida en metros. También se denomina a este parámetro *flecha*.

$$f(x) = 0,07849 \frac{[x(x(R) - x)]}{K} \quad (2.19)$$

donde  $K = 4/3$  y  $x(R)$  es la posición en el eje  $x$  del receptor, denominada en la Figura 2.7 como  $d$ ;

- $z(x)$ : Altura del terreno medida en metros sobre la base.

$$z(x) = f(x) + c(x) \quad (2.20)$$

- $y_R(x)$ : Altura del rayo medida en metros sobre la base;
- $h(x)$ : *Despejamiento* o *altura de despeje*. Altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto. Si la cima queda por debajo de esa línea,  $h$  es negativa.

$$h(x) = z(x) - y_R(x) \quad (2.21)$$

Teniendo en cuenta esta notación y haciendo uso del Teorema de Pitágoras, definimos la *distancia* como:

$$distancia = \sqrt{(x_R(R) - x_R(T))^2 + (y_R(R) - y_R(T))^2} \quad (2.22)$$

#### 2.4.2.4 Obstáculos

El análisis de la propagación de señales inalámbricas va más allá del cálculo de distancias entre transmisores y receptores. La presencia de obstáculos en el entorno, como edificios, vegetación y terrenos accidentados, introduce complejidades adicionales que pueden afectar significativamente la calidad y la cobertura de la señal. Estos obstáculos pueden causar efectos nocivos como reflexiones, difracciones y sombras de señal, lo que acaba resultando en interferencias y pérdidas de datos.

Si bien el modelo simple de óptica geométrica sugiere que los obstáculos interrumpen la transmisión directa de la señal, en la realidad todos los puntos de un frente de onda se comportan como frentes de ondas esféricas según el principio de Huygens<sup>3</sup>, lo que permite que la comunicación sea posible por encima de los obstáculos. Sin embargo, esto puede provocar una atenuación en la potencia de la señal de mayor o menor impacto dependiendo de la fase con la que lleguen las ondas al receptor. Las trayectorias con fases opuestas delimitan las llamadas **zonas de Fresnel**<sup>4</sup>, como muestra la Figura 2.8.



**Figura 2.8:** Zonas de Fresnel

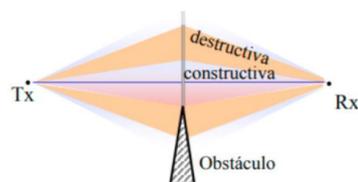
<sup>3</sup> Esta premisa no es válida para frecuencias del orden de GHz, ya que conforme la frecuencia aumenta, la necesidad de una línea de visión directa se vuelve más significativa para lograr una propagación exitosa.

<sup>4</sup> Las zonas de Fresnel son elipsoides que se forman en el medio de propagación donde las señales de RF viajan de emisor a receptor. Los límites se establecen donde las ondas interiores llegan al receptor con la misma fase que la señal transmitida, estando dichas fases alternadas [15]

El campo en recepción coincide, en primera aproximación, con la contribución de la primera zona de Fresnel dado que, si no existe ningún obstáculo en el primer elipsoide, las condiciones serán de *visibilidad directa*.

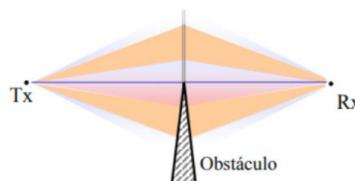
Si los frentes de onda llegan al receptor con fases opuestas, la atenuación depende de en qué zona y en qué medida el obstáculo bloquea las distintas zonas de Fresnel. A continuación, se exponen los distintos casos en función de la situación dentro de las zonas de Fresnel del obstáculo:

**Efecto positivo.** La contribución destructiva se elimina al quedar bloqueada la zona de Fresnel en fase destructiva como ilustra la Figura 2.9.



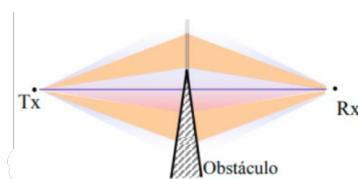
**Figura 2.9:** Obstáculo que suprime la contribución destructiva en la recepción de la señal [9]

**Efecto negativo pero enlace viable.** El obstáculo se encuentra bloqueando parcialmente la primera zona de Fresnel como muestra la Figura 2.10. La señal se verá atenuada en función del porcentaje de obstrucción.



**Figura 2.10:** Obstáculo que perjudica la recepción de la señal [9]

**Efecto muy negativo.** El obstáculo impide que la comunicación sea favorable a causa de bloquear en un alto porcentaje la primera zona de Fresnel. Un ejemplo de este caso es la Figura 2.11



**Figura 2.11:** Obstáculo que impide la recepción de la señal [9]

Si observamos las Figuras 2.9, 2.10 y 2.11, el obstáculo influye en mayor o menor medida según el nivel de obstrucción en las zonas de Fresnel, siendo crítico el bloqueo sobre la primera de estas zonas. El cálculo de los obstáculos, por tanto, tiene mucho que ver con la primera zona de Fresnel -y por ende, con el radio que delimita dicha zona- y con el parámetro  $h(x)$  mencionado en la descripción de la *distancia*.

Para realizar un análisis de pérdidas de propagación la Rec. P.526-11 [47] sugiere que el radio  $R_1$  asociado a la primera zona de Fresnel se calcule con una constante multiplicativa de 550, así como un porcentaje de liberación del 60 % de la primera zona de Fresnel para la evaluación de los obstáculos.

$$R_1 = 550 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f(d_1 + d_2)}} \quad (2.23)$$

Una vez identificados los obstáculos presentes en el perfil del terreno de una comunicación y se ha determinado el grado de obstrucción de la primera zona de Fresnel causada por estos obstáculos, es posible cuantificar el impacto de dichas obstrucciones en la señal durante su transmisión a través de una distancia específica hasta alcanzar el receptor. Estas pérdidas, conocidas como pérdidas por difracción, se manifiestan como una reducción en la potencia recibida en el receptor y están relacionadas de forma directa en la cobertura y la calidad de la señal.

#### 2.4.2.5 Pérdidas por difracción

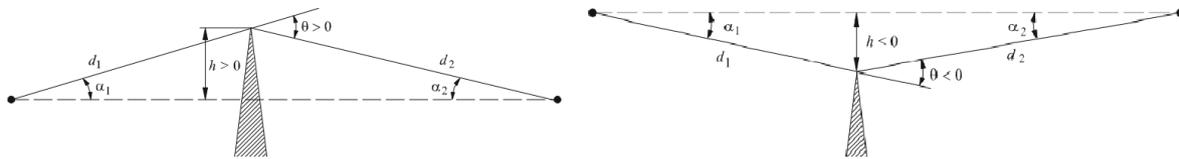
Las pérdidas por difracción son una reducción en la potencia de la señal que ocurre cuando esta se propaga alrededor de obstáculos en su camino desde el transmisor hasta el receptor. Se relacionan con los obstáculos en el sentido de que la presencia de estos últimos en el entorno de transmisión causa la difracción de la onda electromagnética, lo que genera pérdidas en la señal. Estas pérdidas pueden ser cuantificadas y modeladas mediante diversos métodos de cálculo que tienen en cuenta parámetros como la altura y la ubicación de los obstáculos, así como las condiciones de propagación.

Para el modelado de estas pérdidas, se describen distintos métodos matemáticos según el escenario y geometría de los obstáculos presentes en el perfil del terreno, que permiten hallar las pérdidas por difracción de la forma más precisa posible.

En primera aproximación, se realiza la suposición de que los obstáculos se asemejan a una cuña de espesor despreciable, hipótesis denominada *filo de cuchillo*. Además, se considera cada obstáculo de forma aislada.

- **Pérdidas por difracción con un obstáculo**

La Figura 2.12 ilustra la geometría de un obstáculo aislado, donde el despejamiento  $h$  indica si el obstáculo se halla por encima o por debajo de la línea directa que une al transmisor con el receptor.



**Figura 2.12:** Geometría de un obstáculo aislado [47]

La fórmula para obtener las pérdidas por difracción de este tipo de obstáculos depende de la variable  $v$ . La cuantificación de este parámetro tiene en cuenta aspectos tales como la altura del obstáculo, la longitud de onda de la señal y la distancia entre el transmisor y el receptor:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (2.24)$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (2.25)$$

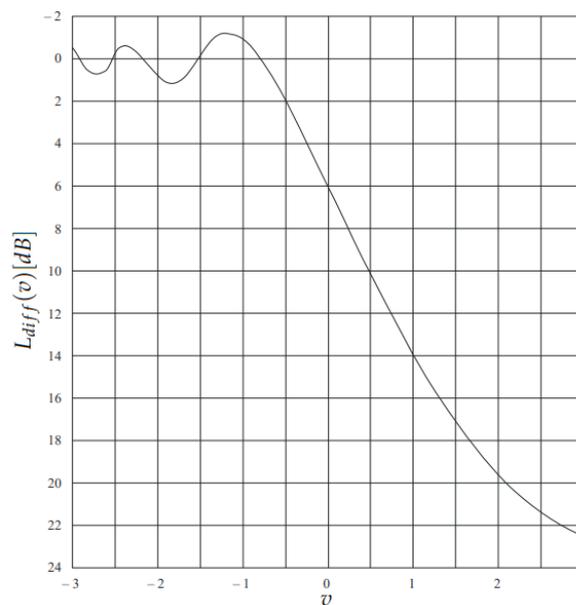
$$v = \sqrt{\frac{2h\theta}{\lambda}}; \quad v \text{ tiene el mismo signo que } h \text{ y } \theta \quad (2.26)$$

$$v = \sqrt{\frac{2d}{\lambda} \alpha_1 \alpha_2}; \quad v \text{ tiene el mismo signo que } \alpha_1 \text{ y } \alpha_2 \quad (2.27)$$

donde:

- $\lambda$ : Longitud de onda relacionada con la frecuencia;
- $h$ : *Despejamiento* definido mediante la Ecuación 2.21;
- $d_1, d_2$ : Distancias desde los dos extremos del trayecto a la cima del obstáculo;
- $d$ : Longitud del trayecto;
- $\theta$ : Ángulo de difracción expresado en rad con el mismo signo que  $h$  y, supuestamente, inferior a unos 0,2 rad, aproximadamente 12°;
- $\alpha_1, \alpha_2$ : Ángulos bajo los que, a partir de un extremo, se ven la cima del obstáculo y el extremo opuesto, coincide en signo con  $h$  en las ecuaciones anteriores.

A partir de  $v$ , se obtienen las pérdidas por difracción  $L_{diff}$  expresadas en dB mediante la gráfica adjunta en la Figura 2.13.



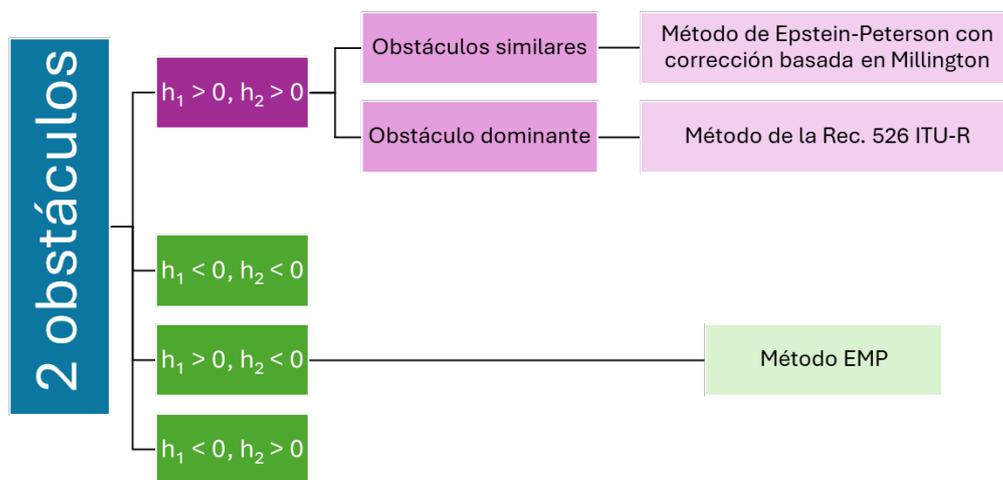
**Figura 2.13:** Pérdidas por difracción en dB de un obstáculo en filo de cuchillo [47]

Cuando el valor de  $v$  es superior a  $-0,78$  puede obtenerse un valor aproximado mediante la expresión [47]:

$$L_{diff}(v) = 6,9 + 20 \log(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1) \quad (2.28)$$

- **Pérdidas por difracción con dos obstáculos**

Siendo el primer obstáculo denotado con subíndice 1 y el segundo con subíndice 2, distinguimos cuatro casos distintos dependiendo de si los obstáculos interfieren o no con el rayo directo entre transmisor y receptor como muestra la Figura 2.14. En caso de bloqueo, el valor de despejamiento  $h$  será positivo.



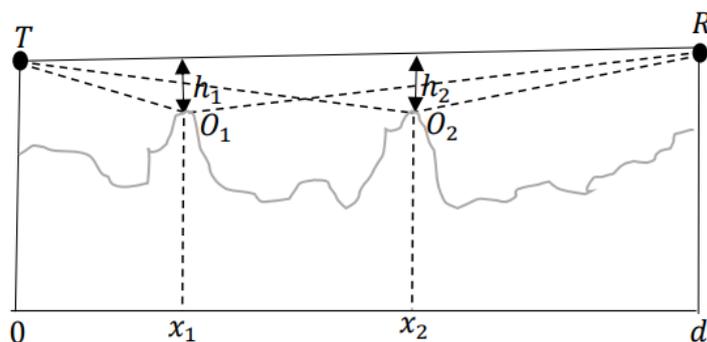
**Figura 2.14:** Método de cálculo de pérdidas por difracción para dos obstáculos en función del despejamiento

A continuación, se detallan los métodos adecuados para calcular las pérdidas por difracción en un escenario con dos obstáculos, diferenciando cada caso según la geometría de dichos obstáculos:

$h_1 < 0, h_2 < 0$		$h_1 > 0, h_2 < 0$		$h_1 < 0, h_2 > 0$
--------------------	--	--------------------	--	--------------------

### 1. Método EMP

Este método se utiliza cuando el rayo directo no corta a ningún obstáculo pero existe despejamiento insuficiente en ambos ( $-0,7 \leq v \leq 0$ ), o bien cuando uno de los obstáculos predomina sobre otro bloqueando la línea de vista directa, es decir, cuando uno de los obstáculos tiene despeje  $h$  positivo y el otro negativo. Un ejemplo de este primer escenario se muestra en la Figura 2.15.



**Figura 2.15:** Geometría de dos obstáculos aislados con despeje negativo [36]

La suma de las pérdidas por difracción individuales constituye el total de pérdidas por difracción,  $L_{diff_{EMP}}$ , del radioenlace. Los dos obstáculos se modelan de forma independiente como obstáculos aislados.

$$L_{diff_{EMP}} = L_{diff1} + L_{diff2} \quad (2.29)$$

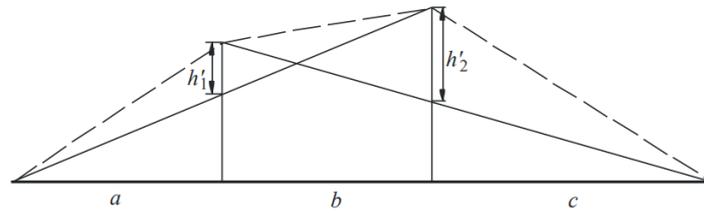
siendo  $L_{diff1}$  y  $L_{diff2}$  las pérdidas por difracción expresadas en dB de cada uno de los obstáculos calculadas mediante 2.28 teniendo en cuenta que  $h$  es el despejamiento: altura entre obstáculo y rayo directo.

$$h_1 > 0, h_2 > 0$$

Los dos obstáculos cortan el rayo directo. En este caso, se añade un factor de corrección que completa las pérdidas a pesar de seguir modelando los obstáculos como aislados/*filo de cuchillo* con  $h$  igual al despejamiento con el rayo directo o bien sobre el subtrayecto, dependiendo de la geometría de los obstáculos, como mostraba la Figura 2.14 en color morado.

### 1. Método de Epstein-Peterson con corrección basada en Millington

Se aplica este método cuando el rayo corta los dos obstáculos y éstos tienen alturas similares. En vez de trabajar sobre el despejamiento  $h$  se trabaja sobre  $h'$  referido a la altura del obstáculo sobre el subtrayecto formado con el obstáculo adyacente. Se ilustra la geometría de los obstáculos requerida para utilizar la metodología de Epstein-Peterson en la Figura 2.16.



**Figura 2.16:** Geometría de dos obstáculos aislados comparables con despeje positivo [47]

Las pérdidas por difracción totales del método de Epstein-Peterson,  $L_{diff_{EP}}$ , serán:

$$L_{diff_{EP}} = L'_{diff1} + L'_{diff2} \quad (2.30)$$

siendo  $L'_{diff1}$  y  $L'_{diff2}$  las pérdidas por difracción expresadas en dB de cada uno de los obstáculos calculadas mediante 2.28 teniendo en cuenta que  $h$  es ahora la altura del obstáculo sobre el subtrayecto denotada por  $h'$ .

Millington demostró que el método de Epstein-Peterson de la Ecuación 2.30 está sujeto a errores de  $\pm 3$  dB. Millington propuso un factor de corrección,  $L_{c_{Millington}}$ , que puede utilizarse con estos trayectos para mejorar la exactitud [39]. Este término de corrección aditivo se calcula como:

$$L_{c_{Millington}} = 10 \log \left[ \frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right] \quad (2.31)$$

siendo  $L_{c_{Millington}}$  el factor de corrección expresado en dB y  $a$ ,  $b$  y  $c$  las distancias resultantes causadas por el bloqueo de los obstáculos siguiendo la notación de la Figura 2.16.

Las pérdidas por difracción totales del método de Epstein-Peterson añadiendo esta corrección,  $L'_{diff_{EP}}$ , serán, por tanto:

$$L_{diff_{EP}} = L'_{diff1} + L'_{diff2} + L_{c_{Millington}} \quad (2.32)$$

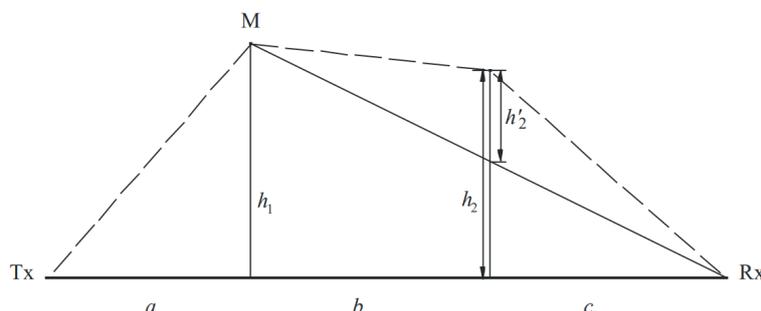
Cabe destacar que, aunque el método de Epstein-Peterson es adecuado para cualquier número de aristas, esta corrección no es recomendable para trayectos con tres o más aristas [39]. Además, solo es válido si tanto  $L'_{diff1}$  como  $L'_{diff2}$  son mayores a 15 dB [47].

El método de Epstein-Peterson modela las pérdidas de cada obstáculo considerando los subtrayectos, por lo que, en el cálculo de  $L_{diffn}$  para cada elemento (siendo  $n$  el subíndice asociado al obstáculo), se utiliza la altura del obstáculo en función del subtrayecto en vez de emplear el rayo directo como referencia. La notación para este despejamiento alternativo es  $h'$ .

## 2. Método de la Rec. 526 ITU-R

Se utiliza esta metodología cuando existe un obstáculo claramente dominante con despejamiento positivo  $v > 0$ .

El método consiste en aplicar sucesivamente la teoría de la difracción en una arista en filo de cuchillo a los dos obstáculos. En primer lugar, la mayor relación  $h/r$  determina el obstáculo principal,  $M$ , donde  $h$  es la altura de la arista medida desde el trayecto directo  $TR$  como muestra la Figura 2.17.



**Figura 2.17:** Geometría de dos obstáculos aislados con despeje positivo predominando un obstáculo [47]

Seguidamente se utiliza  $h'_2$  que es la altura del obstáculo no dominante sobre el subtrayecto  $MR$ , para calcular las pérdidas causadas por este obstáculo secundario. Se debe restar un factor de corrección  $L_{cITU}$ , para tener en cuenta la separación entre las dos aristas así como su altura.

El factor de corrección expresado en dB para un obstáculo dominante,  $L_{cITU}$ , puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$L_{cITU} = \left[ 12 - 20 \log_{10} \left( \frac{2}{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \right) \right] \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{2v_1} \quad (2.33)$$

siendo

$$\alpha = \arctan \left( \sqrt{\frac{b \cdot (a + b + c)}{a \cdot c}} \right) \quad (2.34)$$

Para el código de la herramienta de cobertura, se considera que existe un obstáculo dominante si  $|v_2 - v_1| > 0,5$

Finalmente, las pérdidas por difracción totales del método propuesto por la ITU,  $L_{diff_{ITU}}$ , teniendo en cuenta el factor  $L_{c_{ITU}}$  son:

$$L_{diff_{ITU}} = L_{diff1} + L'_{diff2} - L_{c_{ITU}} \quad (2.35)$$

calculando  $L_{diff1}$  con la altura total del obstáculo principal,  $h_1$ , y  $L'_{diff2}$  con  $h_2'$  siendo la diferencia de altura del segundo obstáculo secundario desde su punto máximo hasta el subtrayecto  $MR$ .

- **Pérdidas por difracción con tres o más obstáculos**

El método de Deygout es apropiado para modelar las pérdidas por difracción con tres o más obstáculos debido a su capacidad para considerar la interacción entre ellos y sus efectos acumulativos en las pérdidas por difracción.

El método de Deygout opera mediante el cálculo individual de las pérdidas para cada arista sin considerar la presencia de las demás e independientemente del signo de  $h$ . La arista que produce la mayor pérdida se identifica como la arista principal. Posteriormente, esta arista principal se trata como un terminal y los subtrayectos a cada lado se analizan de manera similar. Este proceso continúa hasta que se han considerado todas las aristas, y la pérdida total del trayecto se obtiene como la suma de las pérdidas individuales de todas las aristas (en dB) [39]. Un ejemplo de la geometría del enlace se adjunta en la Figura 2.18.

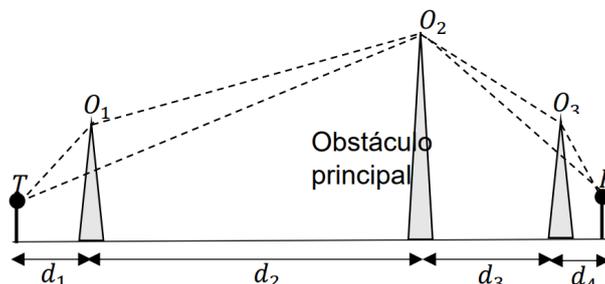


Figura 2.18: Geometría de los obstáculos en el método de Deygout

El método de Deygout tiende a sobrestimar las pérdidas en trayectos con múltiples aristas. Por lo tanto, se pueden aplicar factores de corrección para mejorar su precisión, como el de Causebrook (máximo tres aristas) o el de López, proporcionando resultados más precisos en ciertos escenarios [39].

Las pérdidas por difracción estimadas por el método de Deygout,  $L_{diff_{Deygout}}$ , son:

$$L_{diff_{Deygout}} = L_{Dif_p} + T \cdot (L_{Dif_t} + L_{Dif_r} + C) \quad (2.36)$$

donde:

- $L_{diff_{Deygout}}$ : Pérdida total de difracción en el trayecto;
- $L_{Dif_p}$ : Pérdida de difracción asociada con el obstáculo principal;
- $T$ : Factor de corrección para mejorar la precisión del cálculo;

$$T = 1 - e^{-\frac{L_{Dif_p}}{6,0}} \quad (2.37)$$

- $L_{Dif_t}$ : Pérdida de difracción adicional en el subtrayecto desde la fuente hasta el punto máximo;
- $L_{Dif_r}$ : Pérdida de difracción adicional en el subtrayecto desde el punto máximo hasta el receptor;
- $C$ : Parámetro adicional para mejorar la precisión del cálculo.

$$C = 10 + 0,04 \left( \frac{d_{TxRx}}{1000} \right) \quad (2.38)$$

Una vez descritos todos los métodos utilizados en la obtención de las pérdidas por difracción, como se resume de manera esquemática en la Tabla 2.2, el siguiente paso es analizar los perfiles del terreno para realizar una clasificación dependiendo de si la potencia recibida se registró en condiciones de LOS o NLOS.

**Tabla 2.2:** Resumen de pérdidas por difracción

Obstáculos	Condición	Método	$h$	$L_{\text{diff}}$		Restricción
1	-	-	$h_1$	$L_{\text{diff}}(v)$	[2.28]	-
	$h_1 < 0, h_2 < 0$					
2	$h_1 > 0, h_2 < 0$	EMP	$h_1, h_2$	$L_{\text{diff-nEMP}}$	[2.29]	$-0,7 \leq v_n \leq 0$
	$h_1 < 0, h_2 > 0$					
2	$h_1 > 0, h_2 > 0$	EP*	$h'_1, h'_2$	$L'_{\text{diff-nEP}}$	[2.31]	$L'_{\text{diff-nEP}} \leq 15 \text{ dB}$
	$h_1 > 0, h_2 > 0$	ITU	$h_1, h'_2$	$L_{\text{diff-nITU}}(')$	[2.35]	$ v_2 - v_1  > 0,5$
3 o más	-	Deygout	$h_n$	$L_{\text{diff-nDeygout}}$	[2.36]	-

\*EP: Método de Epstein-Peterson.

siendo el subíndice  $n$  el identificador del obstáculo.

Posteriormente, el paso final es determinar las pérdidas de propagación derivadas de la comunicación, cerrando así el círculo que se inició en la explicación de la sección 2.3.

#### 2.4.2.6 Condiciones de LOS y NLOS

**¿Por qué es importante todo el proceso descrito, empleando una herramienta de visualización de perfiles de terreno radioeléctrico y hallando distancias, obstaculización y pérdidas por difracción, cuando se pueden obtener matemáticamente las pérdidas de propagación a partir de la Ecuación 2.18 teniendo en cuenta las altitudes en función del terreno, ¿Por qué no es posible simplificar este proceso?**

La respuesta reside en la dependencia de las pérdidas de propagación con el escenario y las condiciones de propagación, por lo que realizar una clasificación en LOS y NLOS es crucial para la validez de los futuros modelos. Esta clasificación depende de la distancia, los obstáculos y las pérdidas por difracción, previamente descritos en esta sección.

En condiciones de LOS, la señal se propaga principalmente a través de una trayectoria directa sin obstrucciones significativas, mientras que en condiciones de NLOS, la señal puede experimentar reflexiones y bloqueos debido a obstáculos presentes en el entorno, lo que provoca un deterioro de la señal recibida.

Para determinar si un radio móvil está en condiciones de LOS o NLOS con la estación repetidora, se emplea la altura de despeje ( $h(x)$ ) de los obstáculos interceptados, donde  $h > 0$  indica bloqueo del rayo directo entre transmisor y receptor (despeje positivo), mientras que  $h \leq 0$  indica que el rayo pasa por encima del obstáculo (despeje negativo) pero no garantiza ausencia total de obstrucción. Por lo tanto, se requiere un análisis adicional de otros factores para clasificar los puntos con precisión en LOS o NLOS.

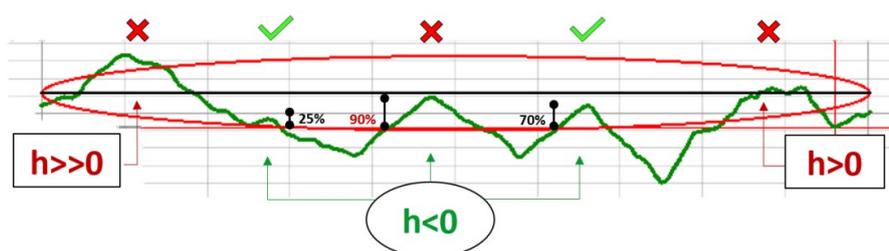
Tras un estudio basado en la simulación, observación y análisis de múltiples perfiles de terreno, el equipo de trabajo de este proyecto establece el siguiente criterio de clasificación para diferenciar las condiciones de LOS y NLOS a partir de la altura de despeje de los obstáculos en el perfil del terreno y de las pérdidas por difracción. Se considera que:

- El radio móvil se encuentra en condiciones de NLOS con la estación repetidora cuando la altura de despeje,  $h$ , sobre al menos uno de los obstáculos presentes en el perfil del terreno, es igual o mayor a cero.
- El punto de medición está en condiciones de LOS cuando:
  1. El valor  $h(x)$  de los tres obstáculos más significativos<sup>5</sup> presentes en el radioenlace debe ser negativo;
  2. Las obstrucciones no bloquean más del 70 % de la primera zona de Fresnel;
  3. Las pérdidas por difracción no superan los 10 dB.

Un ejemplo de la aplicación del criterio establecido se presenta en la Figura 2.19, donde se observan diferentes obstáculos con despejamiento positivo por lo que, según el criterio establecido, el punto de medición se clasifica como NLOS.

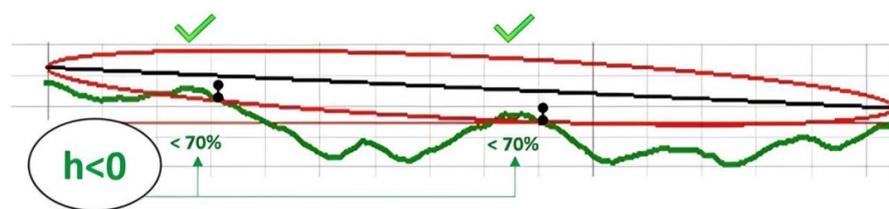
---

<sup>5</sup> Obstáculos que interceptan la primera zona de Fresnel e incrementan las pérdidas por difracción.



**Figura 2.19:** Clasificación de obstáculos según el criterio de clasificación LOS-NLOS

Por otra parte, en la Figura 2.20 se observan varios obstáculos, todos ellos con despejamiento negativo y sin alcanzar a bloquear el 70 % de la zona Fresnel. Si se cumple que las pérdidas por difracción calculadas para estos obstáculos son menores a 10 dB el punto de medición se clasifica como LOS con respecto a la estación repetidora.



**Figura 2.20:** Clasificación de obstáculos en LOS según el criterio de clasificación

Una vez establecido el criterio de clasificación en LOS o NLOS y calculadas las pérdidas de propagación para cada uno de estos dos casos, se procede a obtener la tendencia de estas pérdidas. Como resultado, obtenemos dos ecuaciones distintas, dependiendo de las condiciones de visión del terreno en las que se han categorizado los puntos.

### 2.4.3 Modelado de las pérdidas: Modelos de propagación

En continuidad con la línea de abordaje del estudio, se presenta un enfoque sistemático para desarrollar un modelo de pérdidas a partir de los datos experimentales y pérdidas de propagación calculadas. Este enfoque se fundamenta en el uso de técnicas de regresión con la finalidad de identificar la curva óptima que se ajuste a los datos proporcionados.

La regresión es una herramienta estadística fundamental que permite investigar y modelar la relación entre variables. En este contexto, se consideran distintos tipos de regresión, tales como la regresión lineal, la regresión polinomial y la regresión logarítmica, con el fin de ajustar de manera precisa la tendencia de las pérdidas en función de la distancia. Los tipos de regresión considerados se exponen a continuación:

Regresión Lineal:	$L_{prop} = \alpha + \beta d$
Regresión Polinómica:	$L_{prop} = \alpha + \beta_1 d + \beta_2 d^2$
Regresión Logarítmica:	$L_{prop} = \alpha + \beta \cdot 10 \log_{10}(d)$

Se observa una dependencia tanto en  $\alpha$  como en  $\beta$  para todos los tipos de regresión considerados, donde  $\alpha$  representa un término independiente constante que influye significativamente en los valores iniciales, mientras que  $\beta$  está relacionada con la distancia y representa el crecimiento de las pérdidas, actuando como el exponente de propagación.

En el caso de la regresión polinómica, se limita la búsqueda de coeficientes a valores crecientes de  $\beta$  para modelar las pérdidas de propagación. Sin embargo, aunque esta técnica puede ajustar favorablemente las pérdidas, la expresión de la curva no produce resultados significativos o comparables a otros modelos teóricos, con una única dependencia con la distancia. Por esta razón, esta regresión queda excluida del estudio.

Finalmente, se opta por emplear exclusivamente la técnica de regresión logarítmica para determinar los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  asociados a las expresiones matemáticas que modelan las pérdidas de propagación. Este enfoque se seleccionó debido a su capacidad para facilitar comparaciones analíticas con los modelos teóricos de pérdidas de propagación.

### **RMSE como criterio de elección**

Para evaluar la calidad de ajuste de los coeficientes obtenidos mediante las técnicas de regresión, se emplea el *Root Mean Square Error* (RMSE) como criterio principal. Esta métrica permite medir la discrepancia entre los valores predichos por el modelo y los valores observados en los datos experimentales.

Por lo tanto, la elección de los coeficientes se basa en aquellos que resultan en un RMSE mínimo, asegurando así un modelo de regresión óptimo que se ajuste adecuadamente a los datos disponibles.

El modelo de propagación práctico estimado será la expresión con mínimo RMSE que describa de manera adecuada las pérdidas de propagación para cada escenario.



Como punto adicional, los modelos de propagación pueden completarse con un factor que modele la dispersión correspondiente a una variable aleatoria con distribución normal y media igual a cero,  $N(0, \sigma^2)$ , donde  $\sigma^2$  es la desviación estándar de las medidas con respecto al modelo de pérdidas de propagación propuesto. La ecuación final de pérdidas de propagación incluyendo este factor aleatorio dispersivo se muestra a continuación:

$$L_{prop} = \alpha + \beta \cdot 10 \log_{10}(d) + N(0, \sigma^2) \quad (2.39)$$

Partiendo de estos modelos, la siguiente sección se dedica al refinamiento de la transmisión de señales mediante métodos numéricos y analíticos, estableciendo un puente entre la obtención de modelos empíricos y los rigurosos resultados prácticos. Estos últimos permiten abordar el estudio de la propagación de las señales y la interferencia del espectro, con el fin de lograr mejoras significativas tanto en la calidad de la transmisión como en la eficiente utilización del espectro radioeléctrico.

Siguiendo con el estudio de la propagación y la interferencia, una vez se han obtenido los modelos de propagación reales y se han determinado los parámetros esenciales, se procede a aplicar métodos analíticos, seguidos por numéricos, para obtener resultados significativos basados en datos experimentales.

Los métodos numérico-analíticos hacen uso de los modelos de pérdidas de propagación para traducir un valor de aislamiento en una separación mínima en distancia para diferentes valores de desplazamiento en frecuencia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia.

## 2.5 Métodos analíticos

Los métodos analíticos ofrecen una única solución para condiciones específicas de un sistema de comunicación donde toda la información es conocida. Al ser modelos determinísticos, estos modelos producen el mismo resultado de salida cuando se aplican los mismos parámetros de entrada, sin tener en cuenta aleatoriedad o incertidumbre.

Los métodos analíticos calculan el aislamiento necesario entre una o varias fuentes de interferencia y un receptor afectado, considerando el peor escenario posible.



Entre los métodos determinísticos utilizados para evaluar este aislamiento se encuentran el Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento (MCL), el Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento Mejorado (E-MCL), y el método descrito en la recomendación ITU-R SM.337-6: Separaciones en Frecuencia y Distancia [22].

### **2.5.1 Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento**

El MCL es un enfoque analítico utilizado para estimar el aislamiento necesario entre un transmisor interferente y un receptor víctima de interferencia en sistemas de comunicaciones. Se considera un escenario donde un único transmisor interferente opera a máxima potencia y un receptor víctima opera cerca de su valor de sensibilidad. El objetivo principal del MCL es determinar la separación mínima en frecuencia y distancia requerida para garantizar la relación de protección del receptor.

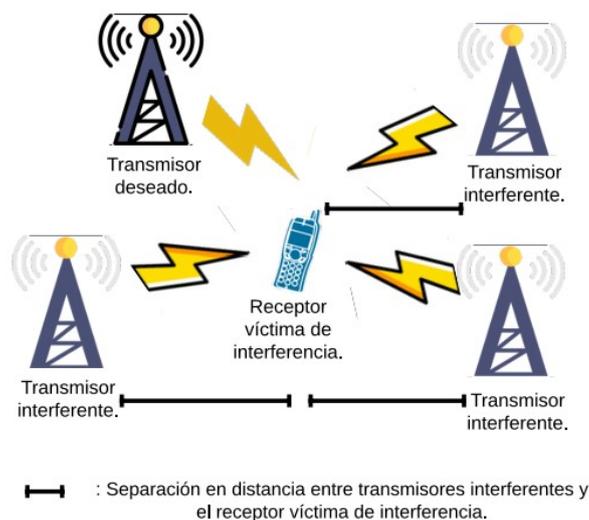
Aunque el método MCL es sencillo de implementar, tiene limitaciones, ya que no considera la disponibilidad de cada enlace, ni incorpora mecanismos de control de potencia para los sistemas interferentes. Además, el MCL tiende a ser conservador al asumir el peor de los casos, lo que puede resultar en una asignación espectralmente ineficiente y excesivamente conservadora. Por esta razón, el método mejorado E-MCL es una alternativa que ofrece resultados de mayor precisión, flexibilidad y adaptabilidad.

### **2.5.2 Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento Mejorado**

El E-MCL es una versión más completa y precisa del MCL que incorpora consideraciones sobre la disponibilidad de enlaces, el control de potencia y los fenómenos de desvanecimiento de la señal.

Los resultados obtenidos a través del E-MCL se traducen en valores de aislamiento, los cuales pueden convertirse en distancias de separación entre el transmisor interferente y el receptor afectado por la interferencia, considerando un único transmisor. En el caso de sistemas con múltiples transmisores interferentes, se asume una distribución uniforme de estos transmisores, ya sea aplicando o no el control de potencia, calculando así aislamientos y distancias de separación correspondientes para cada uno de ellos. Esto permite obtener una distancia de separación promedio, considerando una suma ponderada de las distancias calculadas para cada transmisor interferente. Un esquema del sistema correspondiente a este método se muestra en la Figura 2.21.





**Figura 2.21:** Modelo general del sistema para E-MCL [22]

Considerando la densidad de fuentes de interferencia, esta separación física media se puede convertir en una probabilidad de interferencia.

Como se mencionó anteriormente, el E-MCL considera la disponibilidad de enlaces, el control de potencia y los efectos de desvanecimiento de la señal para una evaluación más completa de la interferencia. También tiene en cuenta la distribución espacial de los transmisores interferentes y la calidad de cobertura de los enlaces, lo que proporciona una visión más realista.

Además, el E-MCL utiliza ecuaciones separadas para el análisis de emisiones no deseadas y el análisis de bloqueo, lo que proporciona una evaluación más detallada y precisa del aislamiento requerido en comparación con el MCL, que solo considera un escenario general.

El análisis de emisiones no deseadas en el E-MCL se expresa como:

$$\begin{aligned}
 \text{Aislamiento} = & P_{INT} + dB_{BW} + MC_{INT} + G_{VICT} + G_{INT} - \\
 & \left( S_{VICT} - \frac{C}{I_{VICT}} \right) + f(dB_{C_{INT}}, P_{INT}) - 10 \log_{10} \left( 10^{\frac{N}{10}} - 1 \right)
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

Mientras que la ecuación para el análisis de bloqueo en el E-MCL se expresa como:

$$\begin{aligned}
 \text{Aislamiento} = & P_{INT} + MC_{INT} + G_{VICT} + G_{INT} - \\
 & f(B_{VICT}, S_{VICT}) - 10 \log_{10} \left( 10^{\frac{N}{10}} - 1 \right)
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

donde:

- $P_{INT}$ : Máxima potencia del transmisor interferente medida en dBm.
- $dB_{BW}$ : Factor de conversión de ancho de banda entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia expresado en dB.
- $MC_{INT}$ : Margen de operación en dB para sistemas con múltiples portadoras, considerado cuando el transmisor interferente es una estación base que transmite múltiples portadoras.
- $G_{VICT}$ : Ganancia en dBi de la antena del receptor víctima de interferencia, en comparación a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).
- $G_{INT}$ : Ganancia en dBi de la antena del transmisor interferente, en comparación a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).
- $S_{VICT}$ : Sensibilidad en dBm del receptor víctima de interferencia.
- $\frac{C}{I_{VICT}}$ : Relación de protección del receptor víctima de interferencia medida en dB.
- $f(dB_{C_{INT}}, P_{INT})$ : Función que define la potencia del ruido de banda ancha expresada en dBc para un desplazamiento de frecuencia dado con respecto a la potencia de la portadora del transmisor interferente.
- $f(B_{VICT}, S_{VICT})$ : Función que define el bloqueo del receptor víctima de interferencia considerando el desplazamiento en frecuencia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia.
- $N$ : Factor asociado a la disponibilidad del sistema interferido, detallado en el punto 2.2.12 de la sección asociada a los parámetros técnicos esenciales, que está directamente relacionado con la cobertura zonal.

### 2.5.2.1 Método de la recomendación ITU-R SM.337-6

La recomendación ITU-R SM.337 define una metodología para determinar un valor de aislamiento, el cual puede ser traducido en una separación en frecuencia y distancia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia, con el fin de lograr un nivel de interferencia aceptable entre dichos sistemas. Para ello, la metodología considera que los principales factores que determinan los criterios de separación en frecuencia o en distancia son [26]:

- Desde el punto de vista del receptor: 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: potencia de señal transmitida, radiaciones fuera del ancho de banda ocupado por la emisión y características del transmisor.
- Desde el punto de vista del canal: propiedades variables del medio de transmisión y las pérdidas de propagación en función de la frecuencia y la distancia.

Esta recomendación incluye un procedimiento estándar y un procedimiento alternativo más completo y más análogo a la realidad al considerar parámetros como el desvanecimiento por sombra. Por esta razón, al igual que ocurría priorizando E-MCL sobre MCL, se hace uso del procedimiento alternativo para la evaluación de los métodos analíticos.

### Procedimiento Alternativo

Los escenarios reales presentan características que afectan un enlace determinado, como es el caso del desvanecimiento por sombra que se manifiesta en el receptor víctima de interferencia. Existen dos maneras de compensar este fenómeno: la primera es que la señal a la entrada del receptor tenga un nivel mayor que el valor de sensibilidad; la segunda es implementar el aislamiento requerido entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia haciendo uso del procedimiento que se muestra a continuación:

En primer lugar, se determina el aislamiento necesario para evitar la interferencia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia. Este aislamiento se calcula haciendo uso de la siguiente expresión:

$$Aislamiento = P_t + G_r - (P_{min} - \alpha) - OCR(\Delta f) - 10 \log_{10}(10^{\frac{N}{10}} - 1) \quad (2.42)$$

donde:

- $P_t$ : Potencia Isótropa Radiada Equivalente (PIRE) medida en dBW;
- $G_r$ : Ganancia en dBi de la antena receptora en comparación a un radiador isótropo;
- $P_{min}$ : Nivel mínimo deseado de la señal, es decir, la sensibilidad del receptor víctima de interferencia;
- $\alpha$ : Relación de protección en dB;
- $OCR(\Delta f)$ : Factor de rechazo fuera del canal medido en dB para una separación de frecuencia  $\Delta f$  en Hz;
- $N$ : Margen de operación del sistema (desvanecimiento lento).

Después, se aplica un modelo de propagación al aislamiento obtenido en 2.42 para obtener la separación en frecuencia y en distancia en las que el nivel de interferencia en el receptor víctima de interferencia es tolerable si cumple la siguiente desigualdad:

$$P_d - P_i \geq \alpha \quad (2.43)$$

donde  $P_d$  es el nivel de la señal deseada y  $P_i$  es el nivel de la señal interferente, ambos expresados en dBW.

Los métodos analíticos que se evaluarán en las fases de ejecución del proyecto en colaboración con la ANE son el método mejorado E-MCL y el método de la recomendación ITU-R SM.337-6 en su procedimiento alternativo.

## 2.6 Métodos numéricos

Un método numérico, también conocido como método probabilístico, se basa en asignar acciones o alternativas de forma aleatoria, lo que implica un comportamiento no determinista. En este enfoque, el siguiente estado del sistema está influenciado tanto por las acciones predecibles del proceso como por factores aleatorios.

Uno de los métodos numéricos más destacados es el método numérico de Monte Carlo, que simula directamente un proceso físico sin necesidad de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema. Este método solo requiere que el sistema físico o matemático, o algunos de sus procesos, puedan ser descritos mediante funciones de densidad de probabilidad. Al conocer estas funciones para los parámetros relevantes, el método numérico de Monte Carlo permite calcular la probabilidad de que ocurra un evento específico con un alto nivel de precisión [10] [4] [35].

El método numérico de Monte Carlo puede aplicarse en el análisis de interferencia de sistemas de comunicación en frecuencias de 138 a 470 MHz. Para ello es importante definir los parámetros variables del sistema, por ejemplo, potencia de transmisión, altura de antenas, ubicación de transmisores y receptores, etc., teniendo en cuenta su función de densidad de probabilidad [22].



### 2.6.0.1 Método numérico de Monte Carlo

El método numérico de Monte Carlo es una herramienta basada en algoritmos computacionales que aprovechan la aleatoriedad para abordar problemas complejos que resultan difíciles de resolver con enfoques determinísticos. Cada realización implica el uso de variables aleatorias como el nivel de interferencia, la intensidad de la señal deseada, la potencia de transmisión y la frecuencia del receptor, entre otros [17].

Este método se puede utilizar en el análisis de la mayoría de las situaciones de interferencia de RF, con una alta flexibilidad gracias a la forma en que se definen los parámetros del sistema, los cuales se pueden analizar considerando su función de distribución estadística. Analizando un número considerable de simulaciones de la red, es factible generar un **histograma** que ilustra la interferencia en el receptor víctima [4].

Este enfoque permite explorar diversas situaciones de interferencia y obtener una tendencia estadística que facilita la evaluación de la probabilidad de eventos específicos y la comprensión del comportamiento del sistema. Además, es posible derivar distribuciones de probabilidad para eventos como la relación señal-interferencia deseada del receptor o la potencia de transmisión de la fuente de interferencia. También se puede cuantificar el efecto de emisiones no deseadas y el bloqueo del receptor, que son análogos a los métodos MCL y E-MCL.

En cada realización, se crea una representación instantánea del escenario, como ilustra el diagrama de flujo de la Figura 2.22 considerando de manera general los pasos del método numérico de Monte Carlo en una simulación.

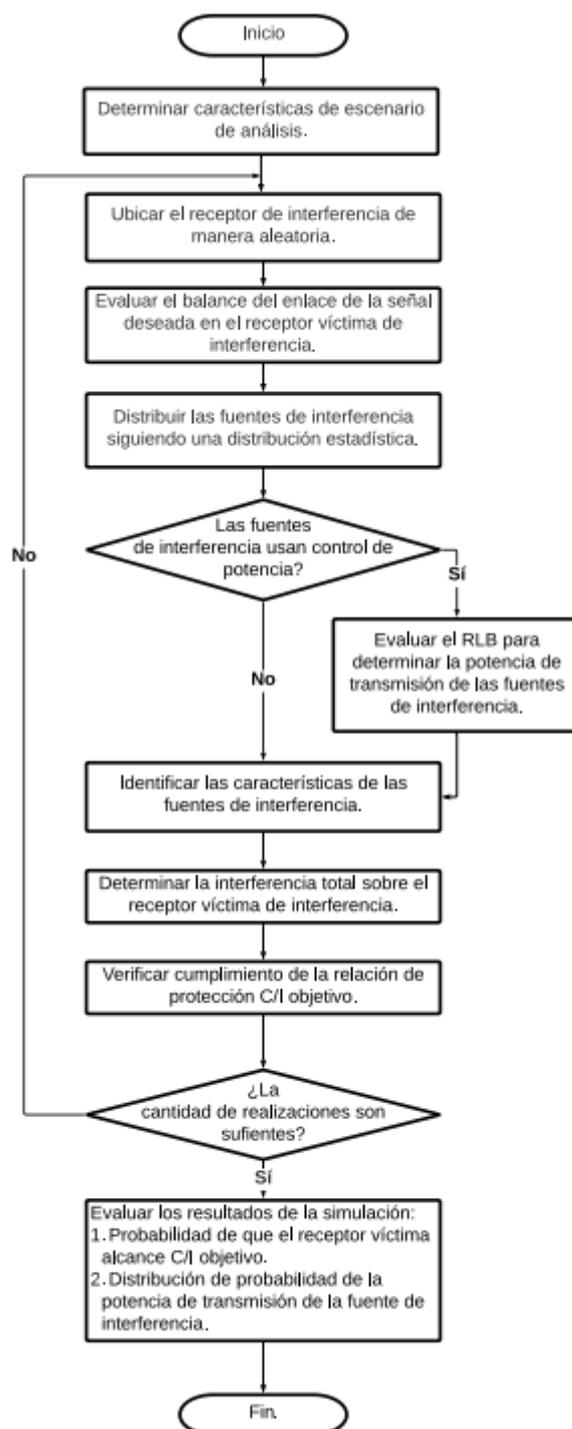


Figura 2.22: Diagrama de flujo del método numérico de Monte Carlo [22]

Se aplican las mismas consideraciones que para el método E-MCL, lo que garantiza una coherencia en el análisis de los datos.

Además, para determinar la relación señal-interferencia ( $C/I$ ) a la entrada del receptor, es imprescindible evaluar meticulosamente los niveles de señal deseada y no deseada en el receptor víctima de interferencia en cada instancia de la simulación. En situaciones donde hay múltiples transmisores móviles potenciales, pero solo algunos están activos simultáneamente y emiten señales no deseadas dentro del ancho de banda del receptor víctima de interferencia, se parte del supuesto de que la interferencia se origina principalmente a partir de emisiones no deseadas del transmisor más influyente, debido a sus bajas pérdidas de propagación en comparación con el receptor víctima.

Para evaluar el método numérico de Monte Carlo, se utiliza SEAMCAT (*Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*). Desarrollada por la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT) en colaboración con el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) y organismos científicos internacionales, SEAMCAT es una herramienta informática de código abierto que emplea el método numérico de Monte Carlo para evaluar interferencias potenciales entre sistemas de radiocomunicaciones. Con SEAMCAT, es posible modelar diversos escenarios de interferencia, incluyendo sistemas de radiodifusión, punto a punto, punto a multipunto, radar, redes móviles, redes aeronáuticas y satélites. Su objetivo es facilitar el estudio de la compatibilidad electromagnética y promover un uso más eficiente del espectro radioeléctrico.

En resumen, tanto los métodos analíticos como el numérico desempeñan un papel importante en el estudio de la interferencia dada su utilidad obteniendo resultados que relacionan la distancia con la frecuencia. Los enfoques analíticos proporcionan una comprensión profunda y teórica del fenómeno, mientras que los métodos numéricos permiten realizar simulaciones detalladas y evaluar escenarios complejos. Al integrar ambos enfoques, la comprensión y mitigación eficaz de la interferencia co-canal aumenta, allanando el camino para una transmisión de señales más eficiente y confiable en el territorio caucano.

Tras completar la exposición de la metodología empleada para el análisis de la interferencia co-canal, se concluye con una descripción del impacto de los dos tipos de interferencia considerados, la interferencia co-canal y de canal adyacente, marcando así el cierre del estudio sobre interferencias y propagación.



## 2.7 Interferencia co-canal

La interferencia co-canal es causada por la presencia de señales deseadas e interferentes dentro del ancho de banda deseado en el amplificador de frecuencia intermedia (FI). El nivel de interferencia depende de las características de rechazo co-canal del receptor y de las características de emisión del transmisor interferente.

De acuerdo con las normas y regulaciones para los sistemas de telecomunicaciones en Estados Unidos, más específicamente, en el Título 47, Capítulo I, subcapítulo D, Parte 90 (§90.355 [16]) del Código Federal de Regulaciones de la Comisión Federal de Comunicaciones, se establece que para servicios CLMR<sup>6</sup>) que operan en frecuencias por debajo de los 512 MHz y hacen uso de anchos de banda menores a 25 kHz, la mínima separación entre estaciones CLMR co-canal debe ser 120 km para un modo de operación de una sola frecuencia (*simplex*) o 56 km (35 millas) para un modo de operación a dos frecuencias (dúplex) [16].

Este hecho es respaldado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, UIT o ITU, que establece que para el servicio LRM las estaciones co-canal deben estar separadas entre sí una distancia no menor a 120 km en el peor de los casos. Esta distancia puede variar considerando las características del escenario de implementación y las frecuencias de operación [41]. Dicho margen variable en función del entorno y las frecuencias empleadas, podría implicar una reducción en la distancia entre estaciones repetidoras.

Este aspecto es de especial interés para el proyecto, ya que se enfoca en la optimización espectral: el objetivo primordial para la ANE.

Pero...

¿Cómo obtener una relación distancia-frecuencia que evite la interferencia co-canal?

Dado que realizar pruebas de interferencia variando el emplazamiento de las antenas transmisora y receptora conlleva a un coste económico y social inasumible e inviable, la respuesta a dicha incógnita reside en las matemáticas y la probabilidad: la aplicación de métodos analíticos y numéricos para simular distintos escenarios, teniendo en cuenta la gran relevancia de los parámetros técnicos esenciales y los modelos de propagación expuestos a lo largo de este capítulo.

<sup>6</sup> Medio de comunicación *push-to-talk* bidireccional que está disponible en 30-50 MHz (banda VHF baja), 150-172 MHz (banda VHF alta) y 450-470 (UHF) [30].

## 2.8 Interferencia de canal adyacente

La interferencia de canal adyacente se produce cuando una señal interferente opera en un canal adyacente o cuando señales no deseadas de un transmisor interfieren con la recepción. Estas señales pueden ser generadas fuera de la banda de interés o transmitidas por el propio transmisor interferente, lo que resulta en ruido que se superpone a la banda de recepción del receptor afectado. Las señales no deseadas están conformadas por emisiones fuera de banda, es decir, componentes en frecuencia fuera del ancho de banda, así como espurias.

Los efectos de la interferencia de canal adyacente son el resultado de la interacción entre las señales deseadas, la interferencia y las características del receptor para varias frecuencias y separaciones, por lo que dichos efectos pueden expresarse en términos de frecuencia-distancia. Si tomamos un valor fijo de potencia de interferencia máxima aceptable en un receptor,  $I_M$ , la siguiente desigualdad delimita el área de funcionamiento aceptable del receptor.

$$L(d) + FDR \geq P_t + G_t + G_r - I_M \quad (2.44)$$

donde  $FDR$  es el factor de rechazo dependiente de la frecuencia<sup>7</sup> y  $L(d)$  se refiere a las pérdidas de propagación del enlace medidas en dB en función de la distancia entre transmisor interferente y receptor víctima de interferencia. Dicha ecuación relaciona la operabilidad del sistema con la relación frecuencia-distancia.

La distorsión de intermodulación surge de la interacción entre dos o más señales dentro de un dispositivo no lineal, generando señales no deseadas en su salida. Estos productos de intermodulación se originan cuando las señales interactúan en canales adyacentes, a diferencia de la interferencia co-canal de intermodulación, donde el fenómeno se debe a las no linealidades de componentes activos o pasivos operando en el mismo canal.

Considerando que a la entrada del dispositivo no lineal se tienen dos señales RF  $f_1$  y  $f_2$ , a la salida se producirán productos de intermodulación a frecuencias suma y diferencia de múltiplos de las frecuencias originales, es decir [48]:

$$f_{IM} = \pm m f_1 \pm n f_2 \quad (2.45)$$

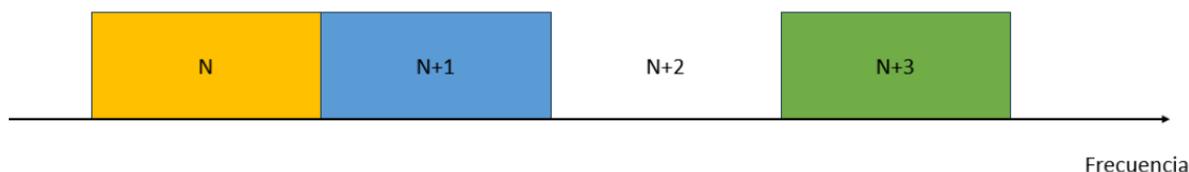
<sup>7</sup> Es una medida de rechazo medida en dB producida por la curva de selectividad de un receptor sobre una transmisión no deseada.

donde  $m$  y  $n$  son números naturales. El orden de la distorsión no lineal queda determinado por la suma de  $m$  y  $n$ , haciendo que los productos de intermodulación de tercer orden del tipo  $2f_1 - f_2$  y  $2f_2 - f_1$  sean los más perjudiciales, ya que operan muy cerca de las señales de interés, con potencia elevada y de filtrado difícil. En general, conforme aumenta el orden de la distorsión, el nivel de los productos de intermodulación a la salida del dispositivo disminuye. Es por ello por lo que los productos de intermodulación de tercer orden deben ser tenidos en cuenta en el análisis de interferencia de canal adyacente.

### 2.8.1 Metodología de evaluación de la interferencia de canal adyacente

Para las pruebas de interferencia de canal adyacente, se deben utilizar varias repetidoras dispuestos en la misma ubicación geográfica o emplazamiento, cada uno de ellos separado en frecuencia en un número determinado de canales.

Específicamente, utilizando tres repetidoras, la configuración adecuada de los canales para estudiar el impacto de la interferencia de canal adyacente se muestra en la Figura 2.23.



**Figura 2.23:** Separación en frecuencia de los distintos canales en el estudio de la interferencia de canal adyacente

Con base en esta configuración, es posible realizar pruebas entre dos sistemas que operan en dos canales contiguos ( $N$ ,  $N+1$ ), dos sistemas que operan con un canal de separación entre ellos ( $N+1$ ,  $N+3$ ) y dos sistemas que operan con dos canales de separación ( $N$ ,  $N+3$ ), con el objetivo de determinar de manera experimental qué tan separados en frecuencia deben estar dos sistemas CLMR para que puedan operar libremente sin interferencias mutuas.

# CAPÍTULO 3

## PREPARACIÓN - EQUIPAMIENTO Y RELACIÓN DE PROTECCIÓN

---

3.1	Equipos utilizados . . . . .	66
3.1.1	Equipos VHF . . . . .	67
3.1.2	Equipos UHF . . . . .	67
3.2	Programación de equipos . . . . .	68
3.3	Validación de equipos y obtención de parámetros . . . . .	70
3.3.1	Sensibilidad . . . . .	70
3.3.1.1	Sensibilidad VHF . . . . .	70
3.3.1.2	Sensibilidad UHF . . . . .	71
3.3.2	Potencia de transmisión . . . . .	72
3.3.2.1	Potencia de transmisión VHF . . . . .	72
3.3.3	Relación de rechazo de canal adyacente . . . . .	73
3.3.3.1	Relación de rechazo de canal adyacente VHF . . . . .	73
3.4	Relación de protección de radiofrecuencia . . . . .	74
3.4.1	RFPR radiada VHF . . . . .	74
3.4.2	RFPR conducida en VHF . . . . .	75
3.4.3	RFPR conducida en UHF . . . . .	76
3.5	Conclusiones . . . . .	77

---

Este capítulo se centra en la fase inicial de preparación de las pruebas de campo, un paso importante en el proceso de estudio que involucra la verificación y extracción de parámetros esenciales -los cuales servirán como referencia y guía, asegurando coherencia y consistencia en la recopilación de datos a lo largo del proyecto- utilizando los equipos VHF y UHF adquiridos. Durante esta etapa, se establecen las bases necesarias para garantizar la precisión y fiabilidad de los equipos, llevando a cabo una serie de comprobaciones, ajustes y programaciones para asegurar una configuración correcta durante las pruebas.

### 3.1 Equipos utilizados

En el marco del proyecto se trabaja con un sistema capaz de transmitir tanto en analógico como en digital empleando el estándar DMR <sup>1</sup>. A continuación, se presentan las definiciones asociadas a los equipos empleados.

- Radio móvil → Radiotransmisor DMR. Produce, envía y recibe ondas portadoras de señales y es capaz de trabajar tanto en analógico como en digital.
- Estación repetidora → Aparato electrónico que permite retransmitir señales en las mismas o diferentes frecuencias en tiempo real.
- Radio portátil → Radio Digital DMR. Transmisor y receptor portátil de radio que sirve para comunicaciones de corta distancia operando tanto en canales digitales como analógicos.

Se utilizaron dos radiocanales <sup>2</sup> de comunicación digital formando un sistema FD-MA/TDMA, 4FSK, *half-duplex* con un BW igual a 12.5 kHz de cada canal en cada sentido de la comunicación (un ancho de banda de 12.5 kHz se divide en dos intervalos de tiempo o *slots* logrando una eficiencia espectral equivalente a 6.25 kHz por canal), siendo cada radiocanal asignado a un repetidor específico [21].

Todas las antenas de los radios móviles y estaciones repetidoras son omnidireccionales.

<sup>1</sup> DMR son las siglas de Radio Móvil Digital, y es un estándar internacional especialmente definido para radios de dos vías que operan en la banda VHF y UHF.

<sup>2</sup> Un radiocanal corresponde a la pareja de canales en frecuencia que se utilizan para la comunicación móvil-repetidor y viceversa [21].

### 3.1.1 Equipos VHF

Entre los equipos de comunicación proporcionados por el PRST se encuentran equipos radio móviles, repetidores y radio portátiles operando en la banda de VHF, algunos de ellos de la marca Motorola, cuyas características principales se describen en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1:** Equipos VHF [21]

Tipo de equipo	Características			Cables		Antenas	
	Referencia	$P_t$	Sensibilidad*	Referencia	Pérdidas**	Referencia	Ganancia
Radio móvil	DGM 4100+ DGM 8000	25 W	-119.3 dBm -120.1 dBm	Belden RG58	0.25 dB 0.17 dB	MAXRAD 5800 5/8	3 dBi
Estación repetidora	SLR5100	25 W	-120.1 dBm	Belden RG58	1.05 dB	Hustler G7-150-2	7 dBi
				Belden RG58	0.95 dB	Andrew 4 Dipolos	8.1 dBi
				Heliac Flex 1/2	0.76 dB	Andrew 4 Dipolos	8.1 dBi
Duplexor				-	+ 0.8 dB		
Radio portátil	DGP 8550e	5 W	-120 dBm	-		PMAD4118	1 dBi

\* Sensibilidad medida a 12.5 kHz.

\*\* Las pérdidas varían en función de los metros de cable del equipo y emplazamiento.

### 3.1.2 Equipos UHF

Para la banda UHF los equipos adquiridos son de la marca Hytera, con características de funcionamiento similares a los en la banda VHF, como muestra la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2:** Equipos UHF [21]

Tipo de equipo	Características			Cables		Antenas	
	Referencia	$P_t$	Sensibilidad*	Referencia	Pérdidas**	Referencia	Ganancia
Radio móvil	HM786 G MD786 G	25 W	-121.88 dBm -120.14 dBm	Belden RG58	0.2 dB	TXAM43050	5 dBi
Estación repetidora	RD 986	25 W	-120.14 dBm	Amphenol TWB-4001	2.66 dB	Hustler G7-150-2	7 dBi
				Belden RG58	0.95 dB	Comet GP-3	8.1 dBi
				Heliac Flex 1/2	0.76 dB	Andrew 4 Dipolos	6.5 dBi
Duplexor				Sinclair Q3220-E	+ 0.8 dB		
Radio portátil	PD 686 G	5 W	-120.14 dBm	-		AN0485H05	2.15 dBi
	PD 786 G	5 W	-117.45 dBm	-		AN0460H12	2.15 dBi

\* Sensibilidad medida a 12.5 kHz.

\*\* Las pérdidas varían en función de los metros de cable del equipo y emplazamiento.



## 3.2 Programación de equipos

La programación de los equipos DMR involucra aspectos muy interesantes que permiten mejorar el rendimiento, la cobertura y la calidad de las transmisiones, ampliando el alcance y facilitando la prevención de colisiones gracias a la tecnología digital.

Lamentablemente, en la banda VHF no tuvimos acceso a la programación de los equipos, ya que el encargado de este proceso fue el PRST local. Por el contrario, en la banda UHF se contrató únicamente el equipamiento electrónico e interfaces de programación, por lo que la configuración de los equipos quedó a entera disposición del grupo de trabajo. En las Figuras 3.1 y 3.2 se presenta un ejemplo de la programación de varios de estos equipos, empleando para su configuración el software Hytera CPS (*Customer Programming Software*) y las interfaces de programación apropiadas para cada aparato.

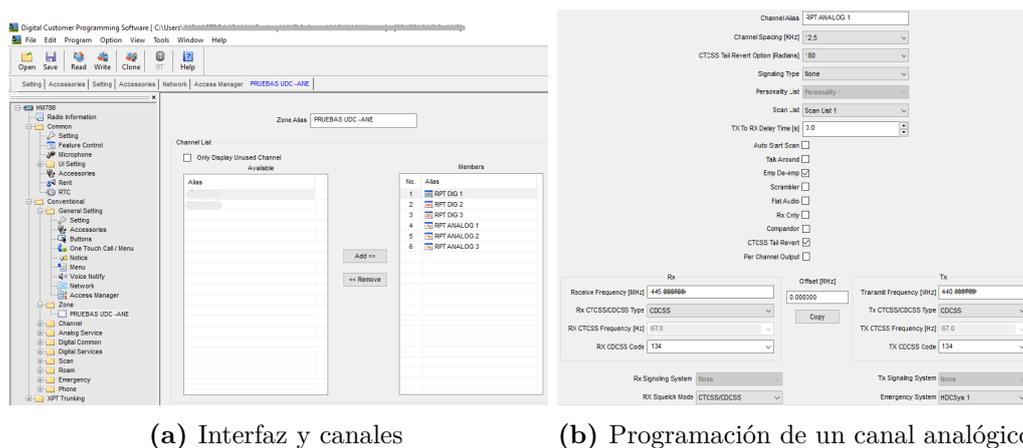


Figura 3.1: Programación de un radio móvil HM786 en el software Hytera CPS

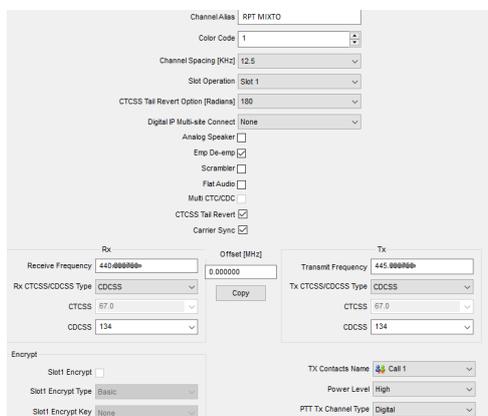


Figura 3.2: Configuración del canal mixto en una estación repetidora RD986

Las estaciones repetidoras se configuran para poder operar en canal analógico, digital o mixto.

La programación de los equipos se llevó a cabo siguiendo los manuales y recomendaciones proporcionados por el proveedor del software. Se realizaron ajustes específicos manteniendo en su mayoría las configuraciones por defecto y realizando modificaciones sólo cuando fueron necesarias, como por ejemplo cambios en la frecuencia, la inclusión de nuevos canales, la configuración de la potencia de transmisión y otros parámetros relevantes, así como también la definición de criterios para el *trigger* del sistema global de navegación por satélite (*Global Navigation Satellite System*, GNSS), y la configuración de puertos y direcciones IP para la conexión con el software de gestión.

### CTCSS y CDCSS en las comunicaciones analógicas

- *Continuous Tone-Coded Squelch System* o CTCSS es una función en una radio de dos vías que silencia o reduce el ruido de la radio hasta que se recibe un subtono válido. Son señales que se emiten junto a la portadora y permiten seleccionar qué transmisiones del mismo canal se escuchan en el receptor y cuáles no.
- CDCSS (*Continuous Digital-Coded Squelch System*) es la versión actualizada de CTCSS. Ambas parten de la misma premisa de funcionamiento sólo que, en este caso, el subtono es codificado digitalmente.

Un sistema que utilice estos mecanismos de silenciamiento (importante destacar que silenciamiento no equivale a encriptación) puede configurar distintos códigos de subtono para transmisión y recepción, siempre que satisfaga los requerimientos del sistema del que forma parte. Un ejemplo de este concepto se muestra en las Figuras 3.1 (b) y 3.2, donde se ha establecido el mismo subtono CDCSS = 134 tanto para transmisor como para receptor y para ambos equipos.

### Código de color para las comunicaciones digitales

Un código de color (CC) para un repetidor DMR es similar a los subtonos para un repetidor analógico: una radio debe estar programada con el código de color correcto para acceder al repetidor. Hay 15 códigos de color (0-15) y lo habitual es el color 1 como muestra la Figura 3.2 en su configuración mixta.



## 3.3 Validación de equipos y obtención de parámetros

En el contexto de las pruebas de laboratorio, se busca evaluar la funcionalidad y desempeño de los equipos radio móvil en un entorno controlado. Estos procedimientos sirven para verificar si los equipos cumplen con las especificaciones proporcionadas por el fabricante y garantizar su adecuado funcionamiento en condiciones reales, lo que permite también establecer un punto de referencia para comparar el desempeño de diferentes modelos y tomar decisiones informadas sobre su implementación en aplicaciones específicas. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio.

### 3.3.1 Sensibilidad

#### 3.3.1.1 Sensibilidad VHF

Para determinar la sensibilidad analógica, se busca el nivel mínimo de señal necesario para alcanzar una SINAD de 12 dB. Esta medición se realizó utilizando un monitor de servicio Marconi 2955B <sup>3</sup>[11] disponible en la Universidad del Cauca y el cual proporciona mediciones de SINAD. Se conectó la salida del generador de RF integrado en el equipo Marconi al puerto de antena del dispositivo móvil, mientras que la salida de audio del dispositivo móvil se conectó a la entrada de audiofrecuencia del monitor de servicio.

Según las especificaciones para cada radio, el designador de emisiones <sup>4</sup> para la modulación FM es 11K0F3E [29] [31], el cual establece una máxima desviación en frecuencia igual a 2.5 kHz para un ancho de banda de 12.5 kHz, por tal razón, se configuró la señal de prueba estándar con un tono de 1 kHz y una desviación de 1.5 kHz correspondiente al 60 % de la máxima desviación permitida. El parámetro MOD FREQ configura el tono de 1 kHz, mientras que el parámetro LEVEL configura la desviación de 1.5 kHz.

---

<sup>3</sup> Marconi Instruments – Radio Communications Test set 2955B. Equipo de prueba de comunicaciones por radio que combina los instrumentos necesarios para pruebas de transceptores de radio móviles en una sola unidad. El equipo combina los siguientes instrumentos: Frecuencímetro RF, generador de señales RF, medidor de potencia de RF y audiofrecuencia, voltímetro DC, medidor de distorsión, medidor de SNR y SINAD, entre otros.

<sup>4</sup> Un designador de emisión es un código que está vinculado a un servicio de comunicaciones en particular y proporciona detalles acerca de su ancho de banda, así como las características de la señal en dicha frecuencia.



Para BW igual a 12.5 kHz se obtuvo -119 dBm (0.24  $\mu$ V) y para 25 kHz se obtuvo -120 dBm (0.22  $\mu$ V). Los niveles de sensibilidad obtenidos cumplen con los estándares y las expectativas establecidas por el fabricante tal como se presenta en la Tabla 3.3:

**Tabla 3.3:** Resultados de medida de sensibilidad analógica obtenidos para la banda VHF

Ancho de banda	Radio	Sensibilidad del fabricante	Sensibilidad obtenida
12.5 kHz	DGM 4100+	0.22 $\mu$ V   -120.14 dBm	0.24 $\mu$ V   -119.3 dBm
	DGM 8000		0.22 $\mu$ V   -120.1 dBm

### 3.3.1.2 Sensibilidad UHF

La medición de la sensibilidad analógica en la banda UHF sigue el mismo procedimiento descrito para la banda VHF, utilizando un radio móvil operativo en la nueva banda de estudio: el HM 786G de Hytera. Esta prueba de laboratorio se lleva a cabo tanto para BW de 12.5 kHz como para 25 kHz. Dado que la programación del radio móvil en la banda UHF es responsabilidad del equipo de trabajo, se tiene acceso a la modificación de los parámetros necesarios que permiten configurar el ancho de banda.

Para BW igual a 12.5 kHz se obtuvo -122 dBm (0.17  $\mu$ V) y para 25 kHz se obtuvo -118 dBm (0.28  $\mu$ V). Los niveles de sensibilidad obtenidos cumplen con los estándares y las expectativas establecidas por el fabricante tal como se presenta en la Tabla 3.4:

**Tabla 3.4:** Resultados de medida de sensibilidad analógica obtenidos para la banda UHF

Ancho de banda	Radio	Sensibilidad del fabricante	Sensibilidad obtenida
12.5 kHz	HM 786G	0.18 $\mu$ V   -121.88 dBm	0.17 $\mu$ V   -122 dBm
25 kHz			0.28 $\mu$ V   -118 dBm

La sensibilidad medida en las pruebas de laboratorio, como se muestra en las Tablas 3.3 y 3.4, se aproxima a la sensibilidad media establecida por el fabricante para todos los equipos. Al comparar los resultados para las bandas de estudio, se observa que la sensibilidad para un BW de 12.5 kHz es menor en la banda UHF en comparación con la banda VHF.

### 3.3.2 Potencia de transmisión

#### 3.3.2.1 Potencia de transmisión VHF

Para la medida de la potencia de transmisión del equipo móvil se hizo uso de dos equipos de medición diferentes: el vatímetro Bird 43 y el monitor de servicio Marconi.

En primer lugar, se obtuvo la medida de potencia de transmisión para los radios móviles en su operación analógica utilizando el vatímetro Bird 43. La entrada del vatímetro se conectó al conector de antena del radio móvil, mientras que la salida del vatímetro se conectó a una carga -en este caso, se utilizó una antena para repetidores de referencia Andrew DB224E-, obteniéndose una potencia de transmisión máxima de 20 W o 43 dBm.

Adicionalmente, se midió la potencia reflejada para verificar que no existía una desadaptación de impedancias entre la antena y el radio móvil [21].

Por otro lado, para realizar la prueba con el monitor de servicio Marconi, se interconectó el puerto destinado para la función Pulsar Para Hablar (PTT, *Push To Talk*) externo con la salida AF GEN del monitor de servicio. Al presionar el botón PTT del radio móvil, el radio entregó una potencia máxima de 25 W, tal como se configuró [21].

En la Tabla 3.5 se presenta el resumen de los resultados obtenidos con cada uno de los equipos empleados para cada radio. Como se observa, las diferencias en los resultados obtenidos podrían atribuirse a las condiciones específicas en las que se llevaron a cabo cada prueba, así como a las diferencias en las fuentes de alimentación utilizadas [21].

**Tabla 3.5:** Resultados de potencia de transmisión obtenidos

Equipo de medición	$P_t$ configurada	$P_t$ DGM 8000	$P_t$ DGM 4100+
Vatímetro Bird 43	25 W	18 W	20 W
Monitor de Servicio MARCONI	25 W	25 W	25 W

**Potencia de transmisión UHF:** Se omite la realización de esta verificación en la banda UHF debido a los resultados favorables obtenidos en la banda VHF, a la limitación de tiempo disponible y la falta de recursos para estos equipos (equipos de medición no disponibles en la Universidad del Cauca o en el laboratorio de pruebas del PRST local, así como falta de respectivos conectores y/o accesorios necesarios).

### 3.3.3 Relación de rechazo de canal adyacente

#### 3.3.3.1 Relación de rechazo de canal adyacente VHF

Esta medida se realizó de manera radiada.

La señal RF deseada se configuró con el tono estándar y, al reducir su nivel hasta lograr una SINAD de 12 dB con el generador de señal empleado -Rigol DSG 800-, se obtuvo un valor de  $P_{REF}$  igual a -63.87 dBm. Después, se incrementó el nivel de la señal RF deseada 3 dB hasta alcanzar los -60.87 dBm. La señal RF no deseada se moduló con un tono de 1 kHz con una desviación del 100 %, es decir, 2.5 kHz para el ancho de banda evaluado de 12.5 kHz. Se configuró su frecuencia en el canal inmediatamente adyacente superior y se varió su nivel desde  $P_{REF}$  e incrementando hasta que la sensibilidad del receptor se degradó 12 dB.

Similar a lo descrito, se repitió el procedimiento pero esta vez realizando la configuración de la frecuencia del generador de señal no deseada en el canal inmediatamente adyacente inferior. Los resultados de potencia obtenidos para el canal inmediatamente superior e inferior,  $P_{HIGH}$  y  $P_{LOW}$ , respectivamente, así como la relación de rechazo de canal adyacente para ambos casos,  $ACRR$ , se incluyen a continuación en la Tabla 3.6:

**Tabla 3.6:** Resultados de la  $ACRR_{HIGH}$  y la  $ACRR_{LOW}$

Potencias consideradas	Ecuación	ACRR
$P_{HIGH} = -4$ dBm $P_{REF} = -63.87$ dBm	$ACRR_{HIGH} = P_{HIGH} - P_{REF}$	$ACRR_{HIGH} = 59.87$ dB
$P_{LOW} = -2.95$ dBm $P_{REF} = -63.87$ dBm	$ACRR_{LOW} = P_{LOW} - P_{REF}$	$ACRR_{LOW} = 60.92$ dB

Por lo tanto, el ACRR final es el menor de los valores hallados, siendo igual a 59.87 dB. Este valor confirma que el receptor es capaz de discriminar de manera efectiva las señales en canales cercanos, ya que excede el límite mostrado en la Tabla 3.7 especificado por la Asociación de Industrias de las Telecomunicaciones de los Estados Unidos para dicho ancho de banda y distinguiendo entre Clase A o Clase B, según si se trata de equipos CLMR o de radio móvil terrestre (*Land Mobile Radio*, LMR).

**Tabla 3.7:** Umbrales de rechazo de canal adyacente

Ancho de banda	Clase	Estación fija, móvil o portable
12.5 kHz	A	45 dB
	B	40 dB

**Relación de rechazo de canal adyacente UHF:** Se omite la realización de esta verificación en la banda UHF debido a los resultados favorables obtenidos en la banda VHF, a la limitación de tiempo disponible y la falta de recursos (equipos de medición no disponibles en la Universidad del Cauca o en el laboratorio de pruebas del PRST local, así como falta de respectivos conectores y/o accesorios necesarios).

### 3.4 Relación de protección de radiofrecuencia

La RFPR se obtiene, primeramente, de forma radiada para la banda VHF debido a la demora en la recepción del combinador requerido en la prueba conducida.

#### 3.4.1 RFPR radiada VHF

La primera aproximación se realizó de forma radiada, donde la señal RF deseada fue generada por un equipo Rigol DSG 800, mientras que la señal RF no deseada fue generada por un equipo Hewlett Packard 8656B. Para las frecuencias en la banda VHF se utilizó el radio DGM 4100+ de Motorola operando con BW de 12.5 kHz.

Los generadores se configuraron al mismo nivel de potencia (-50.7 dBm) y a la frecuencia de operación del receptor de radio móvil bajo prueba, cada uno modulado por un tono configurado con la misma desviación pero con frecuencias de audio diferentes (para la señal deseada se utilizó un tono de 1 kHz, mientras que para la señal interferente se utilizó un tono de 2 kHz), lo cual aseguró que en recepción cada generador produjera un sonido diferente. Se garantizó que tanto la señal RF deseada como la no deseada tuvieran inicialmente la misma potencia. La potencia de la señal RF no deseada o interferente se incrementó de manera gradual hasta que predominó sobre la señal RF deseada, afectando su claridad en el receptor. Se utilizó la percepción auditiva o capacidad de escucha para identificar el punto en el que la señal deseada ya no podía ser claramente distinguida de la señal no deseada.



Una vez la señal de audiofrecuencia deseada dejó de ser distinguible, se registró la diferencia de potencia entre las dos señales de RF, dando lugar a la RFPR. En este contexto experimental, se estableció que la RFPR mínima debe ser de 10 dB para asegurar un funcionamiento óptimo del receptor radio móvil.

**RFPR radiada en UHF:** Se omite esta verificación, optando únicamente por hallar la RFPR en UHF de forma conducida por su mayor fiabilidad. Se extrapola la comparativa radiada-conducida realizada en la banda VHF a la banda UHF.

### 3.4.2 RFPR conducida en VHF

La prueba se realizó de manera conducida utilizando el radio DGM 4100+ de Motorola operando en modo analógico. En este caso, a diferencia de en la prueba de sensibilidad, el proveedor de los equipos VHF programó el radio móvil en los dos anchos de banda de estudio -12.5 kHz y 25 kHz- debido a la importancia de este parámetro a la hora de aplicar los métodos analíticos y numérico para el análisis de interferencia.

La señal RF deseada fue generada mediante un equipo Rigol DSG 800, mientras que la señal RF no deseada fue generada por un equipo de referencia Hewlett Packard 8656B, al igual que en el caso radiado. Para la red de combinación, se utilizó un combinador de señales de RF modelo 2532 de Channel Plus.

Inicialmente, los generadores se configuraron al mismo nivel de potencia (-51.4 dBm para VHF) y a la frecuencia de operación del receptor de radio móvil bajo prueba, cada uno modulado por un tono configurado al 60 % de la máxima desviación en frecuencia permitida, es decir, 1.5 kHz y 3 kHz para un BW de 12.5 kHz y 25 kHz, respectivamente. Para determinar el valor de RFPR se aplicaron dos criterios de medición:

1. **Percepción auditiva o capacidad de escucha:** En cuanto a la percepción auditiva, se utilizó un tono de audiofrecuencia de 1 kHz para la señal deseada y un tono de 400 Hz para la señal interferente, lo cual garantizó que durante la recepción cada generador produjera un sonido diferente, facilitando así la discriminación entre las dos señales. La potencia de la señal RF no deseada o interferente fue aumentando gradualmente hasta que predominó sobre la señal RF deseada, afectando negativamente su calidad en el receptor. Una vez la señal deseada dejó de ser perceptible, se registró la diferencia de potencia entre las dos señales de RF, permitiendo así el cálculo de la RFPR [21].

2. **Mediante la función *sqelch*:** Por su parte, el *sqelch* cumple la función de mitigar el ruido de fondo en un receptor cuando no está recibiendo una señal deseada. En el contexto de esta medida, cuando las dos señales se combinan y están configuradas con características similares -como niveles de señal aproximados-, el radio se silencia. Por esta razón, ambas señales se configuran con el mismo tono de 1 kHz y se procedió a aumentar gradualmente el nivel de la señal interferente, hasta alcanzar un nivel en el cual el circuito *sqelch* permite que la señal de audiofrecuencia puede ser escuchada.

### 3.4.3 RFPR conducida en UHF

La medición de la RFPR conducida en la banda UHF sigue el mismo procedimiento descrito para la banda VHF, utilizando el radio móvil UHF HM 786G de Hytera y configurando los generadores a un mismo nivel de potencia igual a -47.7 dBm.

En la Tabla 3.8 se presenta el resumen de las RFPR obtenida a nivel de laboratorio, sumando 1 dB a los resultados obtenidos como margen de seguridad para garantizar un mayor aislamiento de los sistemas CLMR ante interferencia [21].

**Tabla 3.8:** Valores de RFPR obtenidos experimentalmente para las bandas VHF y UHF

Radio	Banda	Ancho de banda	
		12.5 kHz	25 kHz
DGM 4100+	VHF	9 dB	7 dB
HM 786G	UHF	10 dB	6 dB

Podemos observar que el valor de la RFPR en la banda VHF para un ancho de banda de 12.5 kHz es inferior a los 10 dB obtenidos mediante la prueba radiada. Esta diferencia se atribuye, principalmente, a la mayor fiabilidad de la prueba conducida en comparación con la radiada, lo que proporciona un resultado más preciso y menos conservador. Sin embargo, es importante destacar que el valor conducido considera un margen de seguridad de 1 dB, lo que resulta en una diferencia de medición de 2 dB. Este hecho subraya la importancia de llevar a cabo las pruebas de manera meticulosa, ya que cuanto menor sea este valor de relación de protección, más cercanas podrán estar las estaciones entre sí debido a la reducción de la dependencia entre la frecuencia y la distancia.



## 3.5 Conclusiones

Las pruebas de laboratorio se centraron en validar las especificaciones del fabricante de los equipos de radio móviles, con un enfoque particular en la sensibilidad. Estas pruebas aseguraron que los equipos tienen las capacidades de generar y recibir señales de manera efectiva, cumpliendo con los estándares establecidos por los organismos internacionales. Al centrarse en la sensibilidad, se garantiza la capacidad de los equipos de radio móviles para mantener una recepción confiable y de calidad, lo cual es fundamental para lograr una comunicación efectiva en diversos escenarios y condiciones [21].

La RFPR es un parámetro crítico en sistemas CLMR, ya que garantiza la integridad y claridad de la señal deseada en presencia de una señal interferente. En las pruebas realizadas, se incluyó primeramente la aproximación de RFPR radiada para la banda VHF con BW igual a 12.5 kHz, obteniendo un valor de 10 dB que, posteriormente, se complementó realizando las mediciones de forma conducida. La medida conducida realizada para la banda VHF ofreció valores de RFPR de 8 dB y 6 dB para sistemas CLMR analógicos con un ancho de banda de 12.5 kHz y 25 kHz, respectivamente. Asimismo, se llevaron a cabo mediciones conducidas en la banda de UHF considerando los mismos anchos de banda, obteniendo valores de 9 dB y 5 dB. Estos resultados indican que, si bien los sistemas demuestran una buena capacidad de protección, se ha decidido sumar posteriormente un margen adicional de 1 dB a esos valores para asegurar una protección adecuada (los valores finales tras añadir este margen de seguridad son los mostrados en la Tabla 3.8). De esta manera, al ofrecer un margen significativo pero preciso entre la señal deseada y la señal no deseada o interferente, se logra una comunicación confiable y efectiva, garantizando la calidad de la señal deseada y reduciendo la probabilidad de interferencia, garantizando la transmisión o recepción efectiva de la información [21].



# CAPÍTULO 4

## PRUEBAS DE CAMPO: ADQUISICIÓN DE DATOS Y MODELOS DE PROPAGACIÓN

---

4.1	Python: simplicidad y versatilidad . . . . .	81
4.2	Adquisición de datos . . . . .	81
4.2.1	Emplazamiento de las estaciones repetidoras, planificación de rutas y tipos de escenario . . . . .	82
4.2.2	Procedimiento de recolección de datos . . . . .	84
4.2.3	Correlación analógico-digital . . . . .	84
4.2.4	Comparación radio móvil-radio portátil . . . . .	87
4.2.5	Adquisición de datos en VHF . . . . .	88
4.2.5.1	Topología de la red . . . . .	88
4.2.5.2	Software de gestión radio VHF . . . . .	90
4.2.5.3	Preprocesado y cruce de datos . . . . .	91
4.2.5.4	Promediado espacial . . . . .	93
4.2.6	Adquisición de datos en UHF . . . . .	94
4.2.6.1	Topología de la red UHF . . . . .	94
4.2.6.2	Software de gestión radio UHF . . . . .	96
4.2.7	Glosario de rutas . . . . .	97
4.2.7.1	Rutas finales realizadas en la banda VHF . . . . .	97
4.2.7.2	Rutas finales realizadas en la banda UHF . . . . .	104

4.3	Obtención de modelos de propagación experimentales . . . . .	107
4.3.1	Pérdidas de propagación reales . . . . .	107
4.3.1.1	QGIS: Sistema de Información Geográfica . . . . .	107
4.3.1.2	Separación de los datos según el tipo de escenario . . . . .	108
4.3.1.3	Perfil del terreno: Distancia, obstaculización y pérdidas por difracción . . . . .	110
4.3.1.4	Clasificación en LOS y NLOS . . . . .	112
4.3.1.5	Pérdidas de propagación . . . . .	113
4.3.2	Modelos de propagación según el tipo de escenario . . . . .	114
4.3.2.1	Modelos de propagación en la banda VHF . . . . .	116
4.3.2.2	Modelos de propagación en la banda UHF . . . . .	117
4.3.2.3	Comparativa VHF-UHF de los modelos de propagación . . . . .	118
4.4	Conclusiones . . . . .	120

---

Este capítulo aborda la ejecución de las pruebas de campo realizadas con los equipos descritos en las secciones 3.1.1 y 3.1.2 del capítulo anterior, que darán lugar a los modelos de propagación utilizados en la implementación de métodos analíticos y numéricos para el análisis de cobertura y la mejora del espectro en el Departamento del Cauca, así como en su extensión al Departamento del Valle del Cauca, ambos ubicados en Colombia. Este bloque es de vital importancia para el análisis de la interferencia, ya que comprende la creación de una nueva base de datos específica para el territorio caucano que dará lugar a modelos de propagación diferenciados según el escenario.

## 4.1 Python: simplicidad y versatilidad

Se ha seleccionado Python como el lenguaje de programación principal para las tareas de análisis y tratamiento de datos presentes en el desarrollo de la fase de campo del proyecto tras una exhaustiva evaluación y comparación de distintos entornos y lenguajes disponibles. Esta elección se fundamenta en varias razones clave primando, en primer lugar, la capacidad de todos los miembros del equipo para utilizar Python. Además, el éxito y la popularidad de este lenguaje han dado lugar a una gran cantidad de recursos y ayudas en línea disponibles en la actualidad, lo que constituye una ventaja significativa.

Asimismo, la flexibilidad es un requisito fundamental para enfrentar los desafíos y contratiempos inherentes al desarrollo del proyecto, especialmente cuando se trabaja con plazos ajustados y planificación modular. Por ello, Python destaca por su capacidad para amoldarse a cambios inesperados y para afrontar diversos escenarios con eficacia.

## 4.2 Adquisición de datos

Como se anticipó en el Capítulo 2, para obtener resultados efectivos y aplicables al entorno real, es necesario realizar un análisis detallado, exhaustivo y personalizado de la cobertura y propagación en la zona específica de estudio. Por lo tanto, como parte integral de este proceso de optimización del espectro, se lleva a cabo una fase de pruebas de campo que se inicia con la recopilación de datos sobre la región de interés.



### 4.2.1 Emplazamiento de las estaciones repetidoras, planificación de rutas y tipos de escenario

Dependiendo de la zona de estudio, se busca analizar aspectos distintos. Por ejemplo, las zonas caracterizadas por su planicie son aptas para evaluar de forma muy acertada el mayor alcance de la señal debido a la ausencia de desniveles y/u obstáculos. Por el contrario, si la zona es montañosa, será más interesante analizar el comportamiento propagativo de la señal según la altitud y el perfil del terreno a cierta distancia para encontrar patrones que asocien la distancia con esos accidentes geográficos.

Por esa razón, se distinguen tres escenarios de propagación distintos, los cuales se modelan de forma independiente y son [21]:

1. **Escenario de propagación *andino***: involucra mediciones realizadas en zonas rurales del Departamento del Cauca, caracterizadas por su geografía montañosa.
2. **Escenario de propagación *valle***: involucra mediciones en áreas rurales del norte del Departamento del Cauca y sur del Departamento del Valle del Cauca, donde prevalecen extensiones de tierra relativamente planas.
3. **Escenario de propagación *urbano***<sup>1</sup>: involucra mediciones efectuadas en Popayán, ciudad considerada de densidad intermedia, superando los 500 hab./km<sup>2</sup> y con zona urbana comprendida en un radio de no más de 8 km desde el centro de la ciudad.

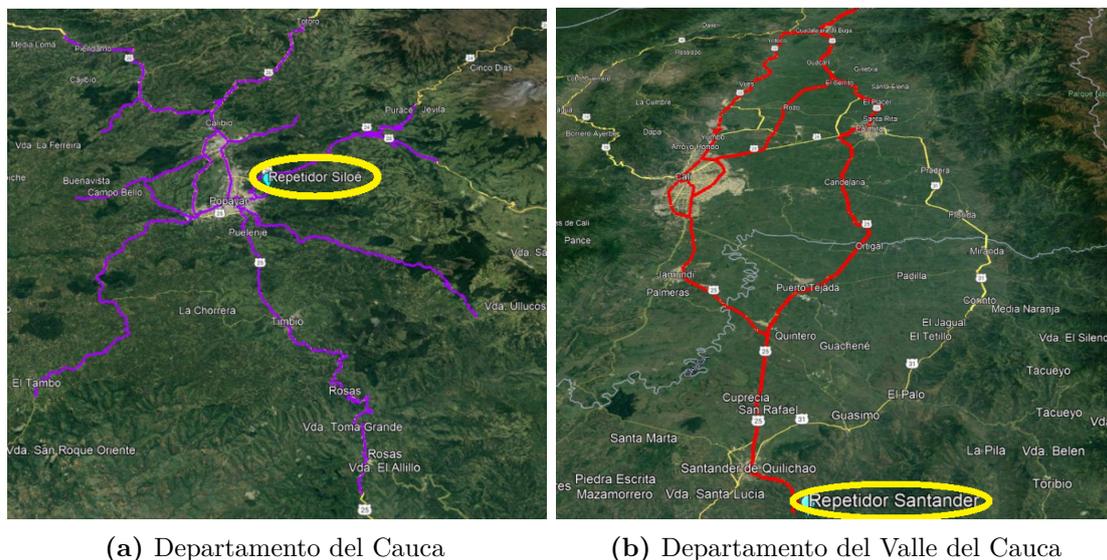
A partir de esta distinción, se considera que los mejores emplazamientos para las estaciones repetidoras son las ciudades de Popayán y Santander de Quilichao, ambas pertenecientes al Departamento del Cauca. De esta forma, desde el centro urbano de la capital del departamento, Popayán, se puede evaluar tanto el escenario de propagación *urbano* como rutas concéntricas a lo largo del territorio caucano.

A continuación, se definen 10 rutas de medición para los escenarios *andinos* y *urbano*, todas ellas con punto de partida la Universidad del Cauca, punto cercano a la estación repetidora situada en Popayán; lo que permite realizar dichas rutas de forma concéntrica para comparar la asemejanza de los datos registrados al diagrama de radiación omnidireccional de la antena utilizada. Estas 10 rutas y el emplazamiento de la estación repetidora de Popayán se ilustran en la Figura 4.1 (a).

---

<sup>1</sup> Aunque en el análisis sólo se incluya la ciudad de Popayán como parte del escenario *urbano*, a la hora de separar los datos según el entorno, se excluyen los centros urbanos considerados como 'ciudad'. De esta forma, los escenarios *valle* y *andino* están compuestos únicamente por zonas rurales.

A mayores, en la Figura 4.1 (b) se muestran las 5 rutas de medición realizadas en campo para el repetidor de la ciudad de Santander de Quilichao para encontrar coberturas máximas y analizar las pérdidas en terrenos de propagación favorables.



**Figura 4.1:** Rutas de medición y emplazamientos de las estaciones repetidoras

Nótese que las rutas se presentan en color morado para las mediciones captadas por la estación repetidora de Popayán (ubicado en el cerro de Siloé, por lo que en la Figura 4.1 (a) aparece descrito con la etiqueta *Repetidor Siloé*) y en color rojo las rutas asociadas al repetidor de Santander de Quilichao (etiqueta *Repetidor Santander* en la Figura 4.1 (b)). Los emplazamientos de las dos estaciones repetidoras se rodean en color amarillo en ambas figuras, incluyendo su respectiva etiqueta.

En el caso de la Figura 4.1 (b), al analizar los límites del Departamento del Cauca y adentrarse en terreno de *valle* en el Departamento del Valle del Cauca, el escenario de propagación cambia, primando realizar rutas lineales que permitan encontrar distancias máximas y relacionar la distancia y la frecuencia de forma más estable al tratarse de escenarios planos que cuentan con mejores condiciones de propagación y considerando un mayor número de puntos en condiciones de LOS.

La combinación de escenario de *valle* y condición de LOS será el punto más importante de estudio dado que pueden aparecer interferencias entre transmisores situados a grandes distancias a causa de las condiciones favorables de propagación.

## 4.2.2 Procedimiento de recolección de datos

Las rutas propuestas en la Figura 4.1 se recorrieron dos veces en diferentes días para garantizar redundancia de datos y obtener tendencias estadísticas de las medidas. Las rutas realizadas desglosadas por días, diferenciando las bandas VHF y UHF e incluyendo mapas de cobertura de dichas rutas, se mostrarán en posteriores secciones (4.2.7.1 y 4.2.7.2).

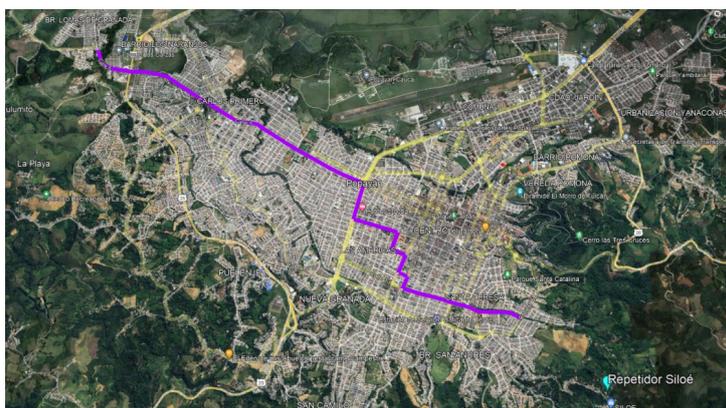
Las rutas se realizaron en un vehículo especialmente equipado para transportar tanto equipos radio móviles como portátiles. Se estableció un convenio por el cual, para minimizar los cambios de canal que fomentan la pérdida de información, cada radio móvil permanecía fijo en un canal asociado a una repetidora específica. Estos equipos estaban programados para enviar su ubicación geográfica a los repetidores cada segundo, siempre que las condiciones del canal lo permitieran, registrando tanto la ubicación de los equipos como la potencia de la señal recibida en los repetidores. La velocidad del vehículo durante el proceso de medición osciló entre los 50 km/h y los 70 km/h, con el fin de obtener la mayor cantidad de medidas posibles a lo largo de las rutas establecidas. Además, mientras el vehículo avanzaba, se establecieron comunicaciones con los repetidores activando los equipos radio móviles y portátiles, proporcionando información adicional sobre la ubicación de los equipos y la potencia recibida [21].

## 4.2.3 Correlación analógico-digital

Uno de los compromisos establecidos en el contrato con la ANE era llevar a cabo el estudio tanto para la tecnología digital como para la analógica. Sin embargo, debido a las limitaciones de los diferentes software de gestión utilizados tanto para VHF como para UHF, no fue posible obtener informes de datos analógicos. Esto se debe a que sólo se mostraban los niveles de RSS en el canal analógico mediante la activación manual de un botón en tiempo real sin ser registrados en una base de datos; a diferencia de los datos digitales, que eran almacenados y podían ser consultados a través de informes automáticos generados por el software de gestión.

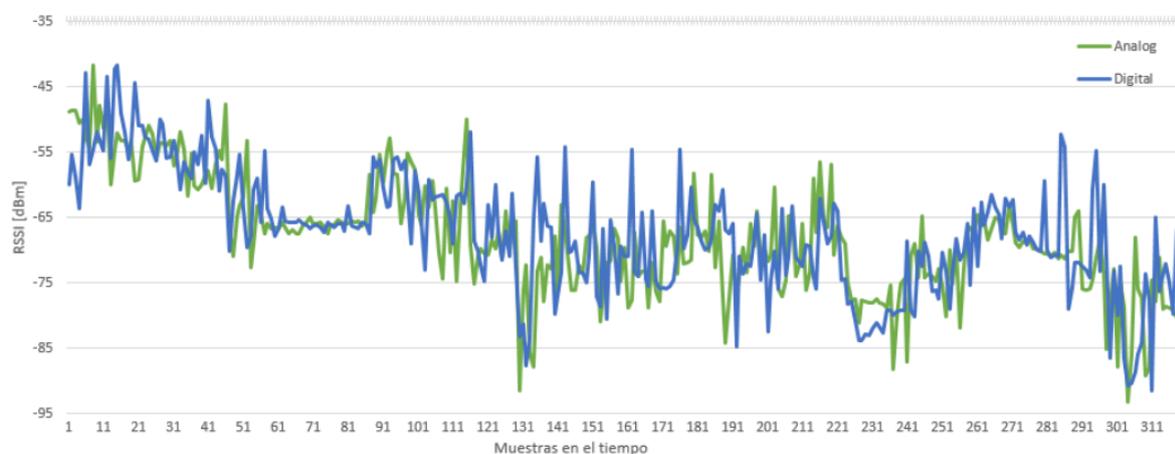
Por esta razón, se realizó una recogida de datos manual anotando cada variación del estado del canal durante una hora de medición. El periodo de actualización, aunque no configurable, es variable, con un tiempo medio de 10 segundos entre valores de RSS. Esto resulta en un total de 320 muestras consideradas datos útiles, excluyendo los instantes de comunicación nula.

El propósito de este análisis es verificar si existe una correlación entre las potencias recibidas considerando la tecnología analógica y la tecnología digital. Las mediciones se llevaron a cabo a lo largo de la ruta mostrada en la Figura 4.2 siguiendo un recorrido lineal sin retrocesos, y únicamente volviendo al punto de inicio una vez finalizado el tiempo de medición. Se registraron los valores de RSS de forma manual a lo largo de la ruta para su posterior análisis.



**Figura 4.2:** Ruta seguida para la comparación de potencia recibida entre comunicaciones de tipo analógico y digital

Este procedimiento se realizó con tecnología digital y posteriormente con tecnología analógica en las mismas condiciones. En total, se recopilaron 320 muestras para cada tipo de comunicación. La comparación visual de estos datos se presentan en la Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Comparación entre niveles de potencia de señales recibidas para tecnologías CLMR digitales y analógicas

A mayores y basándonos en los datos graficados en la Figura 4.3, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson<sup>2</sup> para cuantificar la dependencia de los datos analógicos frente a los datos digitales. El coeficiente de correlación de Pearson se calcula mediante la siguiente ecuación [20]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.1)$$

donde:

- $r_{xy}$ : Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables  $x$  e  $y$ .
- $x_i, y_i$ : Observaciones individuales de las variables  $x$  e  $y$ , respectivamente.
- $\bar{x}, \bar{y}$ : Medias de las variables  $x$  e  $y$ , respectivamente.
- $n$ : Número total de observaciones.

El resultado del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson es igual a  $0.6862 \approx 0.69$ . Dado que este valor se encuentra entre 0.5 y 0.69, la mayor parte de la literatura denota esta categoría de correlación como positiva moderada y lo suficientemente fuerte para extrapolar las tendencias halladas con tecnología digital a la analógica. Se confirma de esta forma que la tendencia estadística es similar para las tecnologías de estudio, a pesar de la variabilidad del canal y su sensibilidad a las inestabilidades al realizarse las mediciones de forma manual.

Por lo tanto, se opta por limitar el estudio y la recopilación de datos únicamente a la tecnología digital, extrapolarlo y considerando válidos los resultados y las futuras recomendaciones a la tecnología analógica.

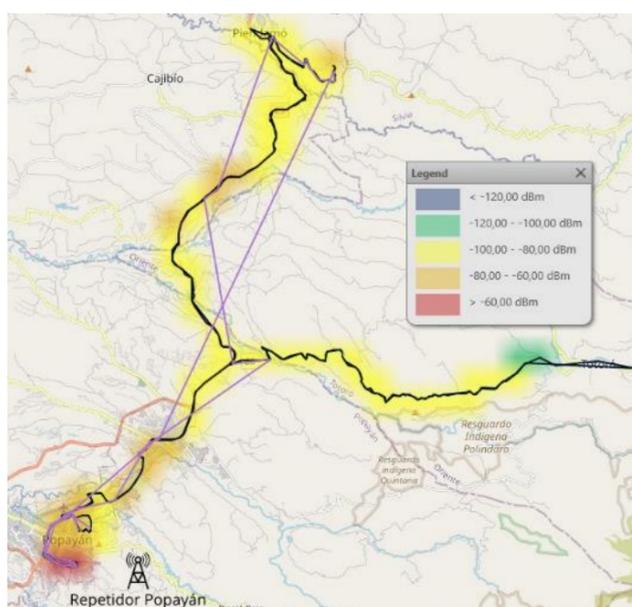
---

<sup>2</sup> El coeficiente de correlación de Pearson es una medida estadística que evalúa la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables [20].

### 4.2.4 Comparación radio móvil-radio portátil

Dado que se dispone de equipos que pueden ofrecer diferentes mediciones debido a variaciones en sus características técnicas y condiciones de funcionamiento, es fundamental realizar una evaluación minuciosa para identificar la información más fiable y representativa a la hora de extraer los datos que conformarán los modelos de propagación.

En la Figura 4.4 se presentan los resultados del proceso de medición registrados por la estación repetidora de Popayán a lo largo de dos de las rutas definidas. Las líneas de color violeta representan el reporte de localización de los equipos de radio portátiles, mientras que las líneas negras representan el reporte de localización de los equipos radio móviles. Estos resultados se tomaron de la plataforma SmartPTT Dispatch utilizada para la banda VHF y muestran tanto el recorrido del vehículo como la variación del nivel de RSS proveniente de los equipos móviles recibida en el repetidor [21].



**Figura 4.4:** Mapa de cobertura de un equipo de radio móvil (color negro) y uno portátil (color violeta) estableciendo comunicación con la estación repetidora de Siloé o Popayán

De la Figura 4.4 se observa que los equipos radio portátiles ofrecen información limitada, debido a sus menores niveles de potencia, baja ganancia de antena y a las condiciones geográficas específicas de los escenarios y rutas definidas, lo que resultó en un número reducido de registros en la plataforma. Por el contrario, los equipos radio móviles, gracias a su mayor nivel de potencia y ganancia de antena, lograron un mayor alcance y proporcionaron un número más alto de datos útiles, lo cual facilitó la definición o ajuste de un modelo de pérdidas de propagación [21].

Un análisis similar se realizó para la banda UHF obteniendo conclusiones de cobertura y propagación análogos. Por esta razón y para ambas bandas de estudio, se decide considerar como datos útiles para la futura obtención de modelos de propagación prácticos únicamente la información proveniente de los equipos radios móviles.

El proceso de análisis de datos se centró exclusivamente en las mediciones obtenidas de equipos radio móviles.

Una vez descritos los procedimientos, metodología y consideraciones previas, se procede a describir las pruebas de campo realizadas para las bandas VHF y UHF, destacando las diferencias entre ambas.

### 4.2.5 Adquisición de datos en VHF

Las pruebas de campo dieron inicio con la banda VHF, para lo cual se contrató un PRST local que facilitó al grupo de trabajo los equipos VHF necesarios, así como los emplazamientos adecuados para albergar las estaciones repetidoras, incluyendo sus antenas, duplexores y procedimientos de montaje correspondientes.

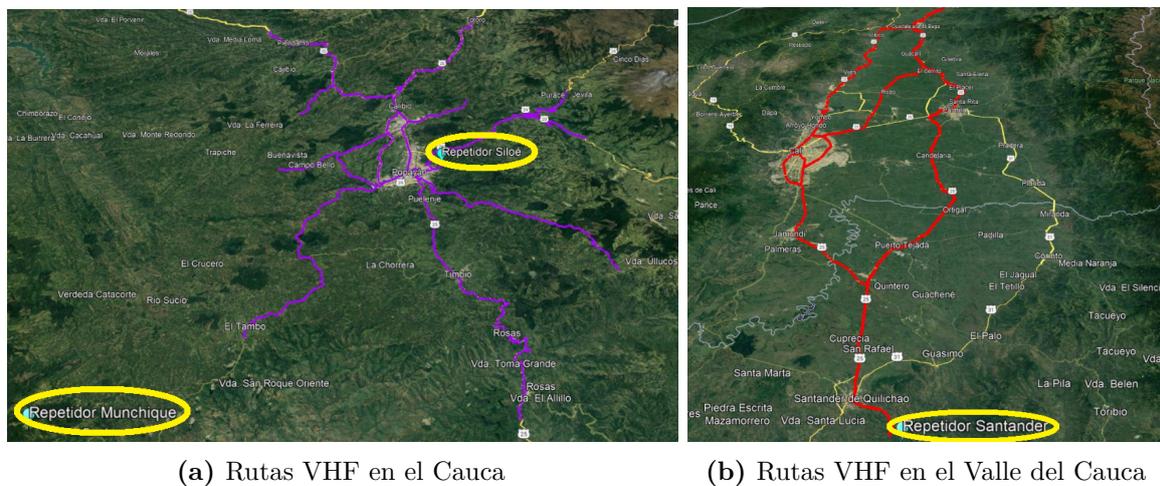
#### 4.2.5.1 Topología de la red

Para la banda VHF, el PRST puso a disposición del equipo de trabajo:

- Tres radios móviles. Dos unidades de referencias DGM 4100+ y DGM 8000 para las pruebas de campo y la unidad restante para realizar las comunicaciones desde el punto de control situado en la Universidad del Cauca.
- Tres estaciones repetidoras con referencia SLR5100, situadas en Siloé (Popayán), el cerro de Munchique<sup>3</sup> y Santander de Quilichao..
- Cuatro radios portátiles de referencia DGP 8550e, manteniendo uno de ellos en la Universidad del Cauca.

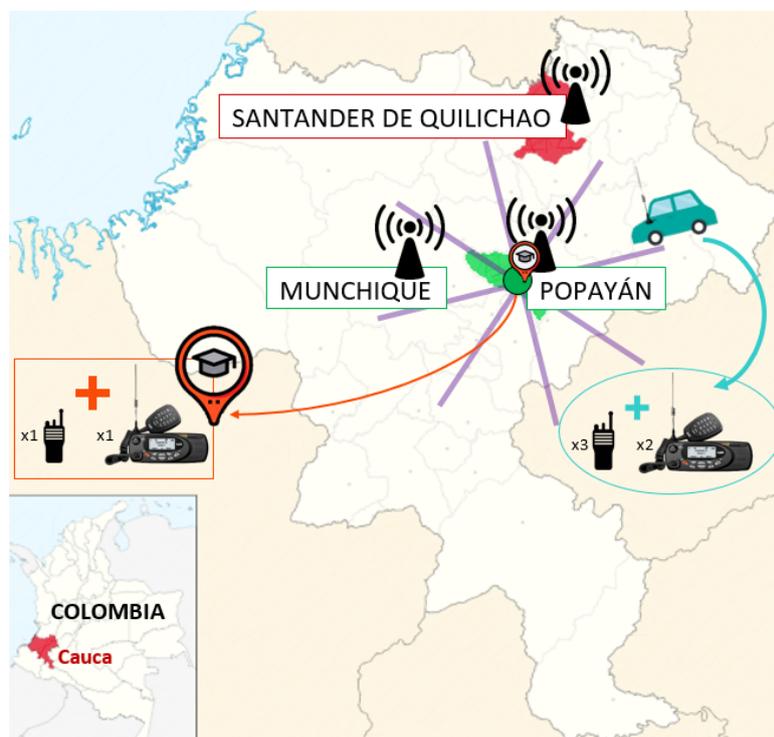
---

<sup>3</sup> Al contar con una estación repetidora adicional, se sitúa este equipo suplementario en el cerro Munchique para comparar los datos obtenidos con el repetidor principal de Popayán. Esta actualización se muestra en la Figura 4.5, manteniendo la planificación inicial establecida para el Valle del Cauca en la sección (b) de esta misma figura.



**Figura 4.5:** Rutas de medición para la banda VHF

Por tanto, un esquema de la topología de la red para la banda VHF se ilustra en la Figura 4.6, donde se muestra un mapa del departamento caucano resaltando los municipios de Popayán en color verde y en color rojo Santander de Quilichao. También el Cauca aparece sombreado en color rojo situado en un mapa de Colombia en la esquina inferior izquierda.



**Figura 4.6:** Topología de la red VHF

Se divisan las tres estaciones repetidoras, situada la principal de ellas en las proximidades de Popayán acorde al emplazamiento disponible del PRST, la segunda en el cerro de Munchique (fuera de los límites de Popayán, pero ofreciendo servicio a dicho municipio), habiendo aproximadamente 40 km de distancia hasta la estación principal y, por último, la estación repetidora de Santander de Quilichao situada al norte del Cauca dando servicio únicamente al Valle del Cauca debido a la gran densidad montañosa que forma un apantallamiento entre Popayán y Santander de Quilichao. Además, se ilustra con iconos tanto el vehículo en el cual se transportan tres radios portátiles y dos móviles que reportan información de intensidad de potencia, como la Universidad del Cauca (icono de localización con birrete) donde se cuenta con el software de administración y gestión radio junto con un radio portátil y un radio móvil que permite comunicarse con el vehículo y comparar coberturas con distintas tecnologías y equipos.

Este esquema es análogo y extendible a las rutas planificadas en la Figura 4.5 (b) para el Departamento del Valle del Cauca, con los dos mismos radios móviles y tres portátiles alojados en el vehículo pero operando con la única estación repetidora que brinda cobertura a dicha zona: la estación de Santander de Quilichao.

Como última puntualización, el convenio establecido para la banda VHF en cuanto a la utilización de un radio móvil para cada estación repetidora estableció que el radio móvil VHF con identificador 2002 se destina a establecer comunicación con el repetidor Munchique, mientras que el otro, identificado como 2010, se asigna a las comunicaciones con los repetidores de Siloé y Santander de Quilichao. Dado que hay tres estaciones repetidoras y sólo dos radios móviles operando en esta banda, uno de ellos debe cambiar de canal. Durante el proceso de recopilación de datos, se confirmó que este enfoque resultó adecuado, ya que la brecha montañosa entre ambos repetidores permite realizar el cambio de canal sin perder datos, debido a un área de varios kilómetros donde la cobertura es nula para todos los repetidores. Se optó por cambiar de canal el repetidor de Siloé, considerando que la cobertura hacia Santander de Quilichao es de menor alcance en comparación con la que ofrece el repetidor de Munchique.

#### **4.2.5.2 Software de gestión radio VHF**

Se empleó la plataforma software integrada para sistemas CLMR denominada SmartPTT Dispatch, la cual permitió obtener la RSS medida por las estaciones repetidoras de las señales provenientes de los equipos radio móviles y radio portátiles en su desplazamiento por diversas rutas en los Departamentos del Cauca y Valle del Cauca. También permitió



determinar la ubicación geográfica de los equipos mediante sistemas de posicionamiento GNSS integrados en los equipos[21].

La plataforma SmartPTT Dispatch registra datos como la RSS, el identificador del radio, el repetidor al que está conectado el equipo, el tipo de evento y la fecha, únicamente para las comunicaciones digitales y no para las comunicaciones analógicas. La única forma de medir los niveles de RSS en el canal para los radios analógicos es manualmente, actualizando los valores mediante un botón de estado del canal.

### 4.2.5.3 Preprocesado y cruce de datos

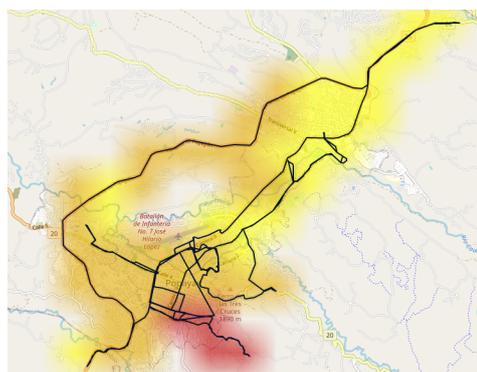
Uno de los principales problemas que surgieron en la adquisición de los datos para la banda VHF fueron las limitaciones del software de gestión proporcionado por el PRST. Para el desarrollo del proyecto, era imprescindible contar con los valores de RSS obtenidos en función de la distancia, por lo que la localización juega un papel crucial.

SmartPTT Dispatch, lamentablemente, aunque registra en su base de datos tanto los valores de potencia recibidos como la localización de estos, el usuario no puede acceder a ambos recursos de forma simultánea y/o enlazados: los valores de localización se enlazan internamente para visualizar mapas de cobertura.

#### Monitoring Report

Period: 25/09/2023 8:00:00 a. m. -  
25/09/2023 11:59:59 p. m. (UTC-05:00)

Date	Repeater	Voice/Data	Event type	From	To	Duration (ms)	RSSI (dBm)
25/09/2023 11:23:04 a. m.	RPT SANTANDER	Data	GPS	2010	10100	250	-65.45
25/09/2023 11:23:04 a. m.	RPT MUNCHIQUE	Data	GPS	2010	10100	250	-65.45
25/09/2023 11:23:04 a. m.	RPT POPAYAN MAST	Data	GPS	2010	10100	250	-65.45
25/09/2023 11:23:03 a. m.	RPT SANTANDER	Data	GPS	2002	10100	250	-94.51
25/09/2023 11:23:03 a. m.	RPT POPAYAN MAST	Data	GPS	2002	10100	250	-94.51
25/09/2023 11:23:03 a. m.	RPT MUNCHIQUE	Data	GPS	2002	10100	234	-94.51
25/09/2023 11:23:00 a. m.	RPT POPAYAN MAST	Data	GPS	4003	10100	250	-74.35
25/09/2023 11:23:00 a. m.	RPT MUNCHIQUE	Data	GPS	4003	10100	250	-74.35
25/09/2023 11:23:00 a. m.	RPT SANTANDER	Data	GPS	4003	10100	235	-74.35



(a) Información relevante del *Monitoring Report*

(b) Ejemplo de mapa de cobertura

**Figura 4.7:** Recursos de SmartPTT Dispatch relacionados con las mediciones realizadas

Es importante destacar que cada valor de RSS en el *Monitoring Report* aparece triplicado debido a que la acción de replicamiento está activada en las repetidoras para la escucha de la comunicación en el radio móvil de la universidad, independientemente de la localización del radio móvil ejecutando las pruebas de campo, siempre y cuando alguna de las estaciones repetidoras del sistema CLMR ofrezca servicio al radio empleado. Las estaciones se comunican entre sí mediante la red interna del PRST.

SmartPTT Dispatch pone a disposición del usuario dos reportes independientes: *Monitoring Report*, incluido en la Figura 4.7 (a), que contiene información sobre las características de cada paquete de información recibido en los repetidores -fecha y hora de la comunicación, identificadores de la estación repetidora y el equipo móvil que establecen dicha comunicación, RSS medido en el repetidor, etc.- y *Location Report*, con formato similar al *Monitoring Report*, que registra la ubicación geográfica de los equipos a medida que se desplazan por las rutas y a partir de la cual se generan los mapas de cobertura, como por ejemplo el de la Figura 4.7 (b). Por lo tanto, es necesario realizar un proceso previo de purga de datos que permita seleccionar únicamente la información necesaria (eliminación de columnas irrelevantes y filas duplicadas por el eco de las repetidoras) así como una asociación o cruce de datos para relacionar adecuadamente en un único reporte todos los eventos provenientes de los equipos radio móviles con su ubicación geográfica, principalmente, la información del nivel de RSS y coordenadas de localización [21].

Para lograr lo anterior, se comparó la hora de registro de cada fila del *Monitoring Report* con la hora de registro de cada fila del *Location Report*, asociando los registros de RSS y localización más cercanos en tiempo [21]. Además, para contar con más datos de localización, se incluyó en el *Location Report* pares temporal-espacial medidos con aplicaciones de geolocalización externas utilizadas de forma activa en el proceso de medición: el informe de monitoreo y rastreo del vehículo proporcionado por el PRST junto con la aplicación móvil MyTracks, la cual brindó información de localización a partir del GPS de un teléfono celular.

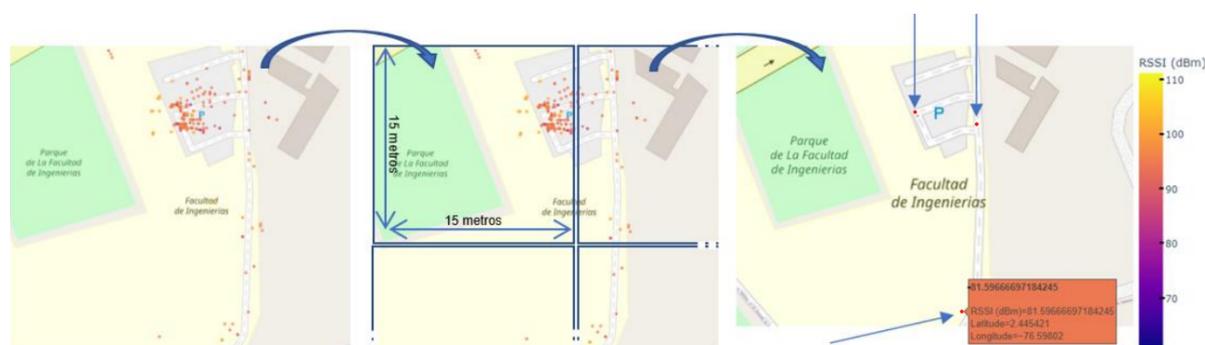
Los datos proporcionados por estas aplicaciones se compararon con el reporte *Monitoring Report* para obtener una mayor precisión en el cruce de datos, asociando a cada medida de RSS la localización más precisa de entre las tres fuentes de datos de localización (para cada fila del *Monitoring Report* se consideró la mejor fuente de localización aquella con un dato de localización con fecha más próxima a la fecha de registro de potencia teniendo en cuenta el tiempo de procesamiento del software y la coherencia temporal, así como la congruencia entre identificadores de radios y repetidoras activos en la comunicación y los valores anteriores y posteriores asociados, intentando minimizar el error de asociación o diferencia entre fechas asociadas global) de forma rigurosa y respetando la coherencia de medición.

#### 4.2.5.4 Promediado espacial

Una vez que los datos han sido asociados y preprocesados para eliminar la información irrelevante, se observa que la sobrerrecurrencia de algunas rutas, especialmente aquellas más cercanas a la universidad debido a su presencia en múltiples caminos, junto con la inestabilidad en el envío de la ubicación GPS, genera una notable disparidad en la densidad de información útil. Los equipos radio móviles estaban configurados para transmitir su ubicación geográfica cada segundo, siempre que las condiciones del canal lo permitiesen, y dado que las rutas fueron recorridas al menos dos veces, se identificaron zonas con un exceso de registros de medidas de potencias recibidas.

Por lo tanto, se optó por promediar los valores de potencia recibida en puntos cercanos, agrupando así la información en unidades lineales. Este proceso consistió en dividir el área total de la zona analizada en cuadrados de longitud configurable, de manera que todos los puntos dentro de un mismo cuadrado compartieran un único valor de RSS igual a su promedio tanto en potencia como en localización. Tras analizar exhaustivamente el conjunto de datos y realizar simulaciones con distintos tamaños de cuadrados, se determinó que una longitud de 15 m por lado proporcionaba un equilibrio entre el número de datos totales y una gran fiabilidad entre las potencias recibidas y los valores promediados.

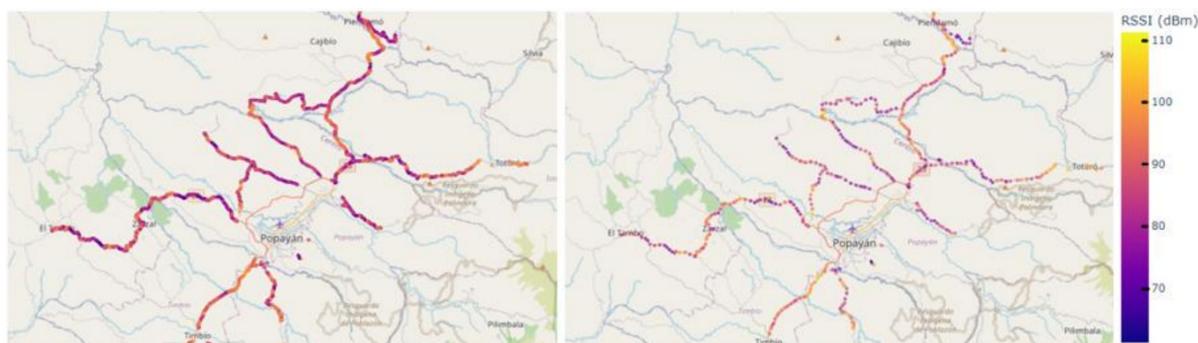
La Figura 4.8 muestra el resultado de esta agrupación en cuadrados de 15 m de lado. En este ejemplo se aprecia cómo en el parqueadero de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca hay demasiadas mediciones dado que es el origen y destino final de la mayor parte de las rutas establecidas en el Cauca.



**Figura 4.8:** Promediado espacial de valores de RSS mediante cuadrados de 15 m de lado

El proceso se aplicó a la totalidad de los datos recopilados en campo.

La Figura 4.9 corresponde a las rutas de medición en el Departamento del Cauca tras aplicar un promediado con cuadrados de 500 m de lado. Esta figura se incluye sólo con fines visuales, ya que el proceso real se efectuó con cuadrados de 15 m. Se ejemplifica cómo la agrupación y el promedio de los valores de potencia resulta en un conjunto de medidas más simplificado que logra describir de forma precisa las rutas realizadas ofreciendo información más manejable e uniforme siendo igual de representativa.



**Figura 4.9:** Promediado espacial de RSS en conjuntos cuadrados de 500 m de lado

Esta figura, aunque adjunta con fines ilustrativos del promediado espacial, es un ejemplo representativo de la separación de rutas según el escenario: las rutas mostradas son las referidas al escenario *andino* tras extraer el escenario *urbano* (ciudad de Popayán). Se describe esta separación de escenarios en el posterior bloque 4.3.1.2.

## 4.2.6 Adquisición de datos en UHF

Una vez finalizadas las mediciones en la banda VHF, se realiza la adquisición de los datos en la banda UHF, siguiendo las mismas rutas y pautas trazadas y descritas para la banda VHF, con algunas particularidades comentadas a continuación.

### 4.2.6.1 Topología de la red UHF

La primera diferencia reside en la propia topología de la red que, como aventurábamos en secciones anteriores, estaba dotada de una estación repetidora menos con respecto a VHF y fue gestionada y programada en su totalidad por el equipo de trabajo, haciendo uso, no obstante, de los mismos emplazamientos y red de intercomunicación entre repetidoras contratados con el PRST local para la banda VHF aun trabajando con un nuevo proveedor para la adquisición de los equipos.

Para la banda UHF, el nuevo proveedor puso a disposición del equipo de trabajo:

- Dos radios móviles de referencias HM786 G y MD786 G, uno para las pruebas de campo y el restante para el punto de control situado en la Universidad del Cauca.
- Dos estaciones repetidoras con referencia RD 986 situadas en Siloé, Popayán, y Santander de Quilichao.
- Dos radios portátiles de referencias PD 686 G y PD 786 G, manteniendo uno de ellos en la Universidad del Cauca.

De forma análoga a la Figura 4.6, se incluye la Figura 4.10 que ilustra la topología de la red UHF prescindiendo de la estación repetidora situada en el cerro de Munchique.



**Figura 4.10:** Topología de la red UHF

También el número de equipos radio cambia ya que, con base en la topología UHF, una sólo unidad de radio móvil es suficiente para cubrir las necesidades del proyecto en esta banda al existir una zona montañosa que incomunica Popayán y Santander de Quilichao pudiendo hacer uso del mismo aparato cambiando únicamente el canal de comunicación.

#### 4.2.6.2 Software de gestión radio UHF

Se adopta Hytera XNMS como plataforma de gestión de redes profesionales para las estaciones repetidoras que, al combinarse con el software Hytera Smart Dispatch Plus, permite tanto realizar ajustes y configuraciones sobre los repetidores, como visualizar y monitorear las comunicaciones en las rutas realizadas. La red privada del PRST local y la Universidad del Cauca se interconectan a través de una Red Privada Virtual (VPN) habilitada por el propio PRST.

Es esencial garantizar la correcta configuración de las estaciones repetidoras, incluyendo la alineación de direcciones IP, máscaras de red y puertos con la infraestructura de la red local y los parámetros de los software utilizados. La falta de concordancia podría resultar en el aislamiento o inutilización de las estaciones, lo que comprometería la operatividad de toda la red. La programación inicial de las estaciones repetidoras en la Universidad del Cauca y su posterior instalación en los emplazamientos constituyen un proceso crítico, ya que cualquier error en esta etapa conlleva un costo significativo en tiempo y recursos económicos al requerir el desmontaje y reconfiguración de las estaciones.

Una vez la red está operativa, se utiliza Hytera Smart Dispatch Plus para la visualización, configuración y monitoreo en tiempo real. Los niveles de potencia recibida en los repetidores provenientes del equipo radio móvil, así como la ubicación geográfica de los mismos, se almacenaron automáticamente en la base de datos de la plataforma Smart Dispatch Plus de Hytera, la cual tiene la ventaja de proporcionar los datos de potencia recibida y localización en un único reporte, facilitando el procesamiento de los mismos [21]. Este software proporciona datos de potencia asociados con una única ubicación, eliminando duplicados al configurar cada estación repetidora como *slave*.

No obstante, a pesar de todas las ventajas que ofrece Hytera Smart Dispatch Plus frente a la herramienta SmartPTT Dispatch utilizada en VHF, este software empleado para la adquisición de valores RSS en la banda UHF tiene una gran limitación: establece un límite superior de -59 dB que escapa a nuestras opciones de cambio.

Para la banda UHF no es necesario realizar cruces de datos ni preprocesamiento, lo que convierte a las herramientas elegidas en un recurso idóneo que simplifica y se adapta perfectamente a las necesidades del proyecto, reduciendo considerablemente el tiempo necesario para la adquisición de datos en comparación con las tareas realizadas en VHF. No obstante, los datos quedan limitados a un límite de -59 dB establecido por Hytera Smart Dispatch Plus.



### 4.2.7 Glosario de rutas

Tras detallar el procedimiento, los métodos y las herramientas empleadas para la adquisición de datos, concluyo esta sección proporcionando un registro detallado de las rutas recorridas en el vehículo siguiendo la planificación inicial. Además, se incluye la representación gráfica de estas rutas junto con su mapa de cobertura, diferenciando claramente entre las bandas VHF y UHF mediante secciones:

#### 4.2.7.1 Rutas finales realizadas en la banda VHF

La organización por días de estas rutas se muestra en la siguiente Tabla 4.1, donde se distinguen, para las bandas VHF y UHF, las horas totales realizadas cada día, la figura en la cual se muestra la cobertura de cada ruta y los problemas técnicos que surgieron en este proceso.

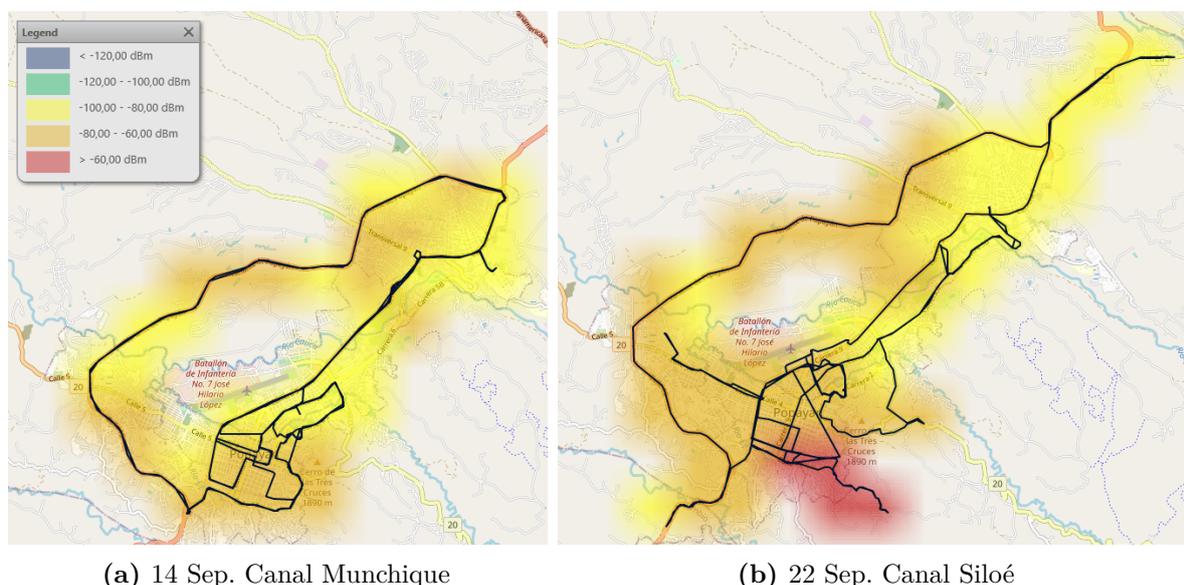
El promedio de horas diarias es de 7 horas y 40 minutos. La disparidad de horas/día se debe bien a los problemas técnicos enfrentados durante el proceso, o bien a la longitud de las rutas o tráfico variable en cada zona. Las rutas que presentaron fallos se repitieron para asegurar la recursividad, haciendo horas extra en muchos casos para cumplir el objetivo. Aquellas rutas que no se repitieron (la ruta de Puracé & Coconuco y las de El Tambo & El Bolsón), fue debido a la seguridad y logística o por los altos costes y limitación de tiempo, ya que cada día en el que el vehículo salía a campo ascendía la cuota a pagar al PRST local. Más concretamente:

- La ruta de Puracé & Coconuco cuenta con procesos de gestión de tráfico llamados comunmente *pare y siga* -la vía es de sentido único entre puntos de control donde se bloquea el acceso y dicho sentido de la vía se alterna en periodos de tiempo fijos- y es una zona donde, además, las comunidades indígenas se manifiestan impidiendo los accesos y la circulación de vehículos. No se realizó esta ruta por cuestiones de seguridad.
- Las rutas de El Tambo y El Bolsón no se volvieron a realizar por ser El Bolsón zona de paso hacia Santander de Quilichao. Ante la falta de recursos económicos y temporales, se prescindió de realizar esta ruta una segunda vez.

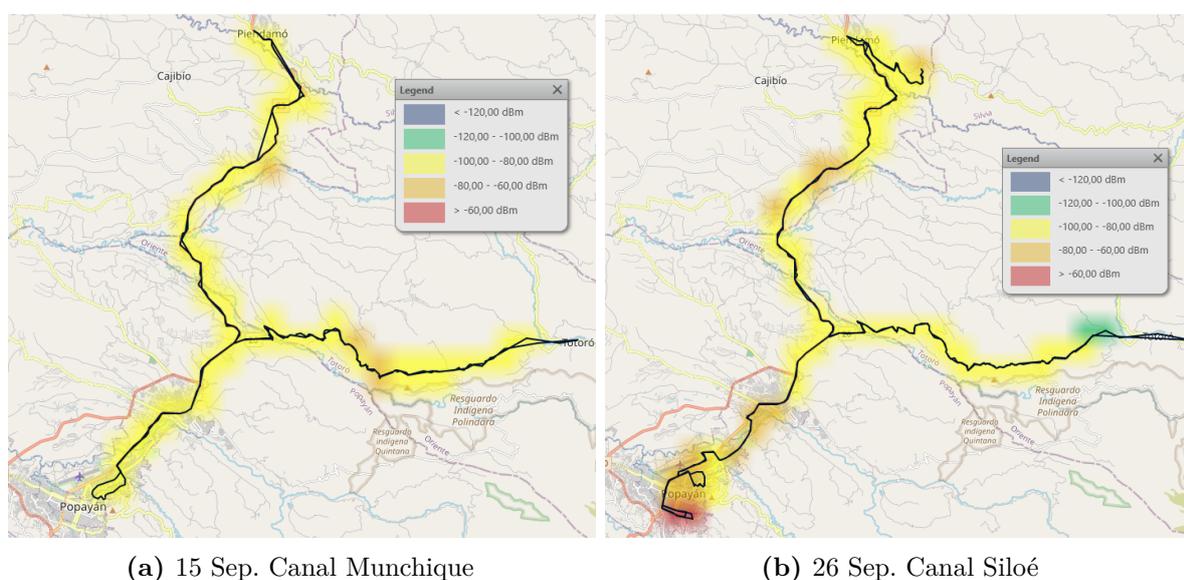
**Tabla 4.1:** Rutas realizadas en la banda VHF

Día	Ruta	Horas	Figura	Comentarios
14 Sep.	Zona urbana Popayán	8 horas	4.11	Aprendizaje sobre software de gestión, funcionamiento canales de los radios, pruebas de conexión universidad-vehículo.
15 Sep.	Totoró & Piendamó	8 horas	4.12	El vehículo sólo contó con 1 radio móvil operativo: 4 horas canal Siloé, 4 horas canal Munchique.
19 Sep.	Puracé & Coconuco	8 horas	4.13	4 horas canal Siloé, 4 horas canal Munchique.
20 Sep.	Paispamba	5 horas	4.14	El vehículo se queda varado; no se logra finalizar el retorno de la última ruta. 3 horas-Siloé, resto Munchique.
21 Sep.	Timbío & Rosas	5 horas	4.15	El vehículo se avería fallando el embrague; las rutas se realizan a mayor velocidad.
22 Sep.	Provitec & Las Huacas	3h. 30min.	4.16	Se incorpora un nuevo radio móvil: conexión con Siloé y Munchique de forma simultánea -cada radio móvil fijo en un canal-. El vehículo sigue en el taller más de lo previsto y se retrasa el inicio de las rutas unas horas.
23 Sep.	El Tambo & El Bolsón	6 horas	4.13	-
25 Sep.	Zona urbana Popayán	9 horas	4.11	Para compensar el primer día de adaptación, horas extra para cumplir recursividad.
26 Sep.	Totoró & Piendamó	5h. 30min.	4.12	-
27 Sep.	Paispamba	7 horas	4.14	-
28 Sep.	Santander de Quilichao & Cali	10 horas	4.17	Cuando se pierde conexión con Siloé, se cambia ese radio al canal de la estación de Santander de Quilichao. A partir de Morales la nueva repetidora empieza a reportar.
29 Sep.	Palmira & Buga	8 horas	4.17	Se llegan a los límites del Departamento del Valle del Cauca. La conexión se pierde en Presidente. Se regresa a Popayán por Santander de Quilichao.
02 Oct.	Provitec & Las Huacas	7 horas	4.16	-
04 Oct.	Timbío & Rosas	11 horas	4.15	Extensión hasta límites del Departamento del Cauca hacia el sur. Máxima cobertura en Patía (muy inestable, puntos aislados)
05 Oct.	Santander de Quilichao & Cali & Buga	10.h 30min.	4.17	-
06 Oct.	Palmira	10 horas	4.17	Se regresa a Popayán pasando por Santander de Quilichao.

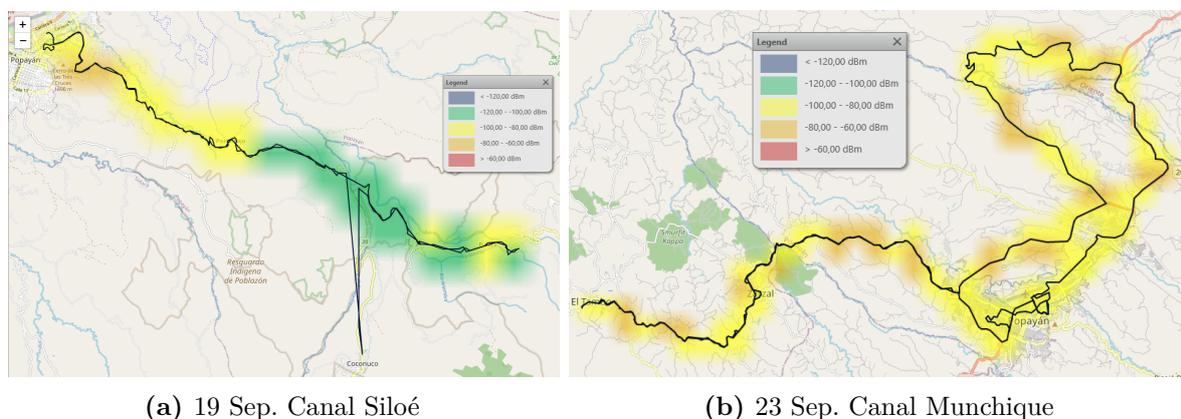
A continuación, se presentan las imágenes de las rutas realizadas en la banda VHF extraídas del software de monitoreo y gestión SmartPTT Dispatch. Las Figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 muestran los grupos de rutas realizados en diferentes días, con el objetivo de ofrecer una visión conjunta de la cobertura obtenida para ambos canales. En otras palabras, se exhibe la cobertura para una misma ruta en dos días distintos, con canales diferentes entre sí, para resaltar las diferencias de cobertura entre las distintas estaciones repetidoras para una misma ruta.



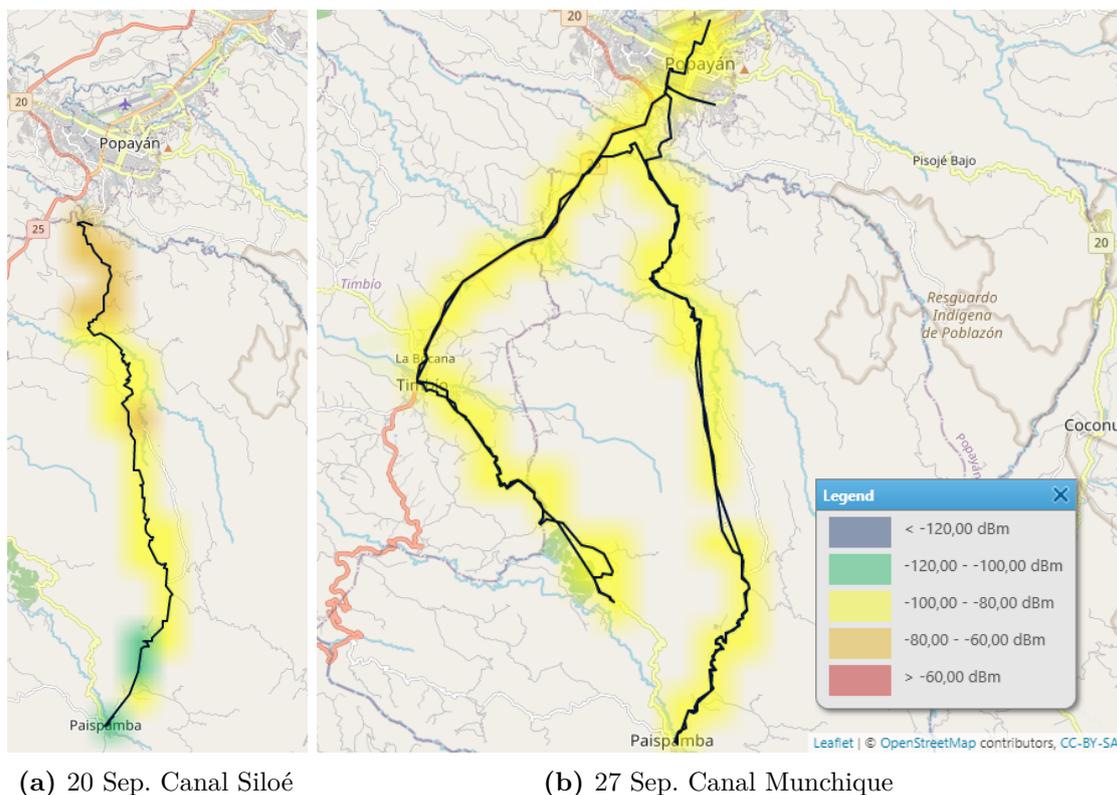
**Figura 4.11:** Rutas VHF de la zona urbana de Popayán



**Figura 4.12:** Rutas VHF de las rutas por Totoró & Piendamó

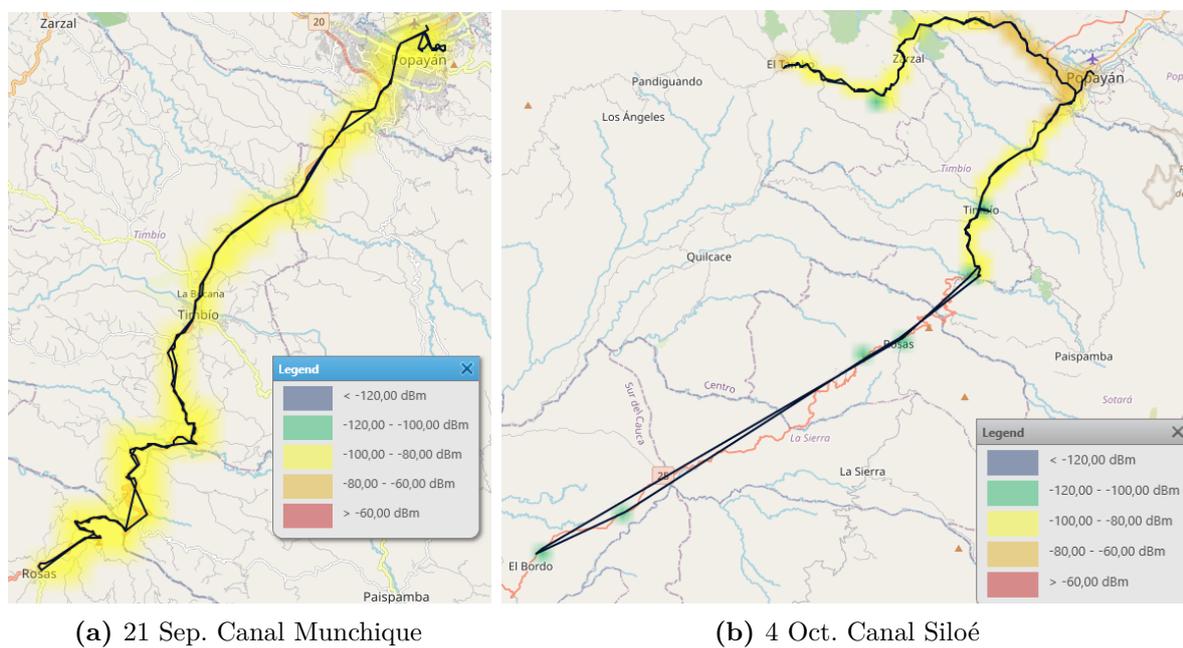


**Figura 4.13:** Rutas VHF de las rutas de Puracé & Coconucos (izquierda) y El Tambo & El Bolsón (derecha)

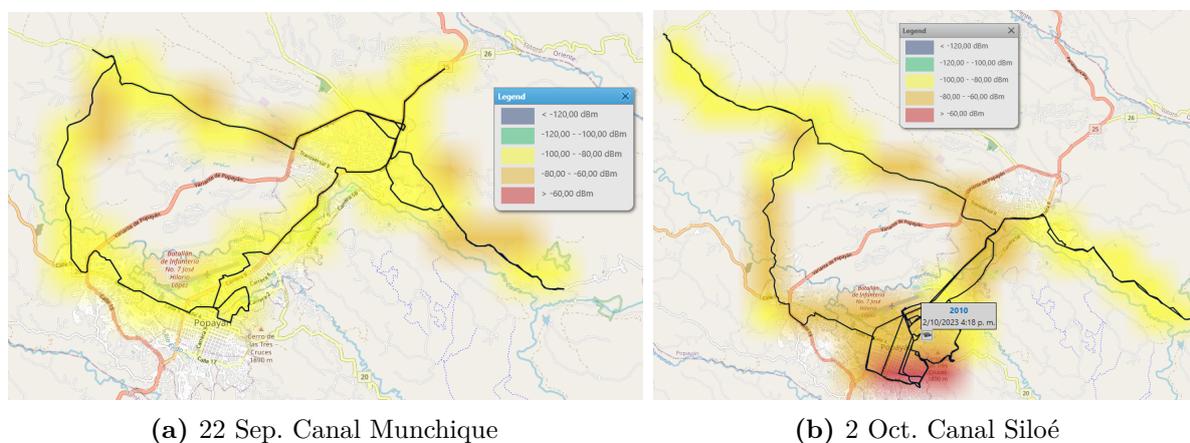


**Figura 4.14:** Rutas VHF de las rutas por Paispamba y alrededores

La Figura 4.14 (a) incluye únicamente la ruta a Paispamba debido a la avería del vehículo. Por otro lado, en la Figura 4.14 (b) se optó por visitar Timbío dado que el día 21 de septiembre esa ruta se realizó a gran velocidad por nuevos fallos en el vehículo. Además, se aprecia cómo se tomó un desvío desde Timbío en vez de retornar directamente a Popayán. Dicha variación se debió a un problema de seguridad; se retornó posteriormente a Popayán deshaciendo la ruta realizada.

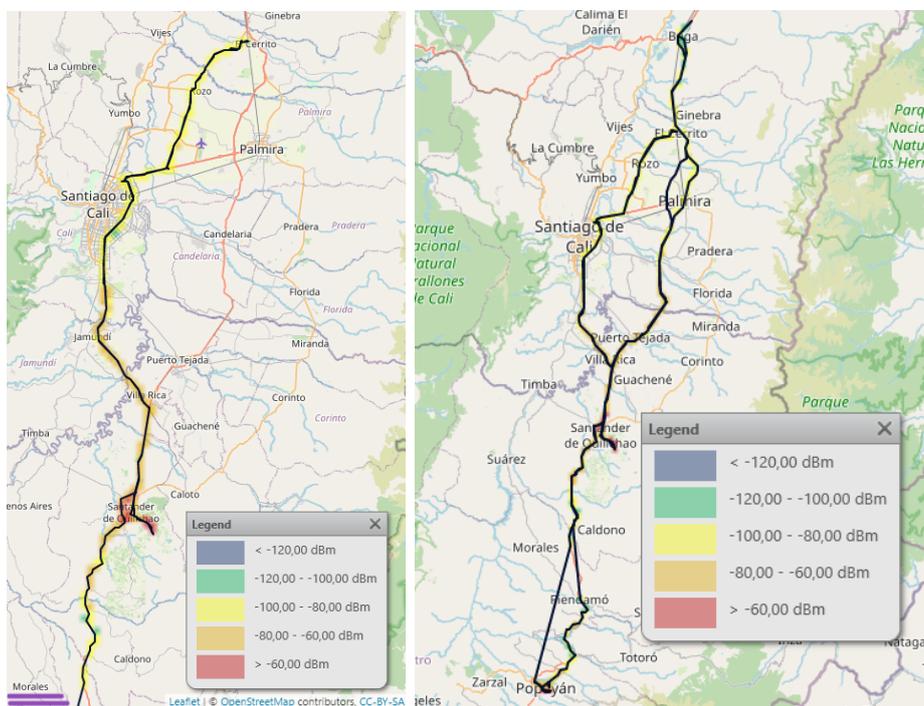


**Figura 4.15:** Rutas VHF de las rutas por Timbío & Rosas



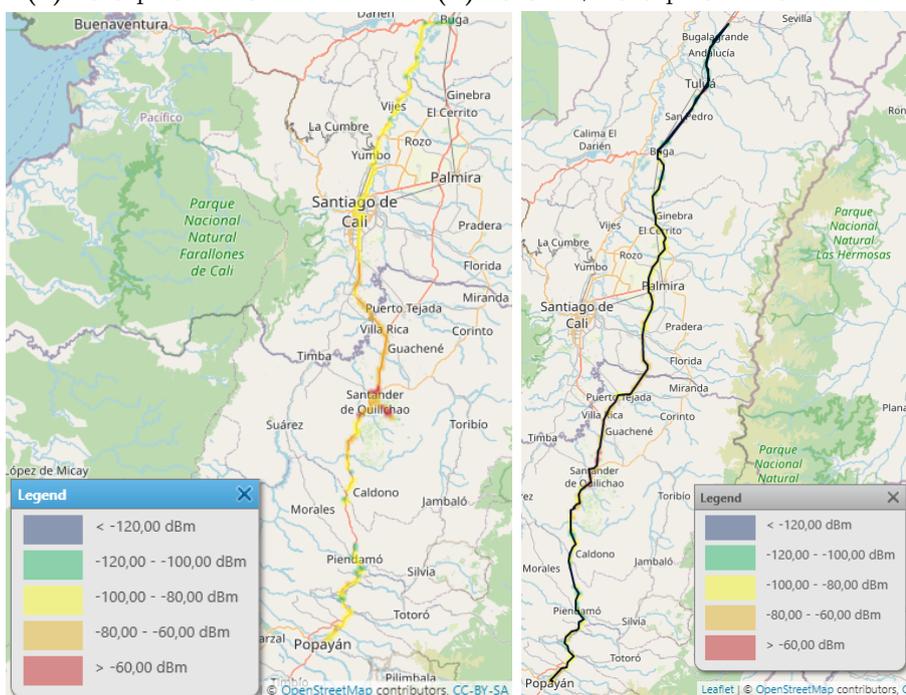
**Figura 4.16:** Rutas VHF de las rutas por Provitec & Las Huacas

Todas las rutas hasta ahora mostradas tienen como inicio y final la Universidad del Cauca, ubicada en el centro urbano de Popayán.



(a) 28 Sep. Canal Santander

(b) 28 Oct + 29 Sep. Canal Santander



(c) 5 Oct. Canal Santander

(d) 6 Oct. Canal Santander

Figura 4.17: Rutas VHF de las rutas por el Departamento del Valle del Cauca

Como se comentaba previamente, las rutas de las Figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 representando las rutas del Departamento del Cauca, son radiales y tienen como inicio y fin la Universidad del Cauca ubicada en el centro urbano de Popayán. Se aprecia que la intensidad de la cobertura varía según la zona (los colores rojos y anaranjados muestran dónde la intensidad de la señal es mayor, logrando mejores coberturas), según la estación repetidora con la que se haya realizado la ruta. Es importante recordar que el Departamento del Cauca se trata de una zona montañosa situada entre las Cordilleras Central y Occidental (ver mapa orográfico en la Figura 1.3), donde la presencia de obstáculos de gran tamaño puede generar áreas aisladas de manera natural. Esto significa que la comunicación puede ser efectiva con una estación y no con otra, dependiendo de la ubicación y la topografía del terreno. En general, el cerro de Munchique, aunque más lejano, ofrece alcances mayores con respecto a la estación repetidora de Siloé, debido a la altura del propio emplazamiento (cercano a los 3.000 m de altura).

Por otro lado, la Figura 4.17 exhibe todas las rutas trazadas en la zona norte del Departamento del Cauca y en el Departamento del Valle del Cauca, estableciendo conexión con la estación repetidora de Santander de Quilichao y con el mismo criterio de colores que en el Departamento del Cauca para mostrar la intensidad de la señal. En la subfigura 4.17a, se resalta en color morado la localidad de Morales, a partir de la cual se recibe información de la estación de Santander de Quilichao, perdiendo la conexión con Siloé unos kilómetros antes, en Piendamó. Esta subfigura ilustra la primera ruta realizada por el Departamento del Valle del Cauca, atravesando las ciudades de Santander de Quilichao y Cali (cabe recordar que este departamento se caracteriza por su estable llanura a lo largo del territorio, tal como se mostraba en la Figura 1.2 representando el relieve del Departamento del Valle del Cauca). La subfigura 4.17b muestra tanto el trayecto de ida como el de vuelta realizados en dos días consecutivos viajando por el Departamento del Valle del Cauca. Al superponer ambas trayectorias, se aprecia visualmente el recorrido total efectuado por este departamento. Es importante notar que, a diferencia de las rutas de naturaleza radial realizadas en el Departamento del Cauca, en la llanura del Departamento del Valle del Cauca se prioriza la evaluación del mayor alcance de la señal, siguiendo rutas que convergen en El Cerrito para continuar hacia el norte evaluando la intensidad y alcance de la señal.

Por último, las subfiguras 4.17c y 4.17d exhiben el trayecto de ida y vuelta, respectivamente, de la segunda ejecución de las rutas por el Departamento del Valle del Cauca, presentando en la ida únicamente la intensidad de la señal (eliminando la traza de la ruta seguida) para una visualización más clara de la cobertura a lo largo de ese territorio.



#### 4.2.7.2 Rutas finales realizadas en la banda UHF

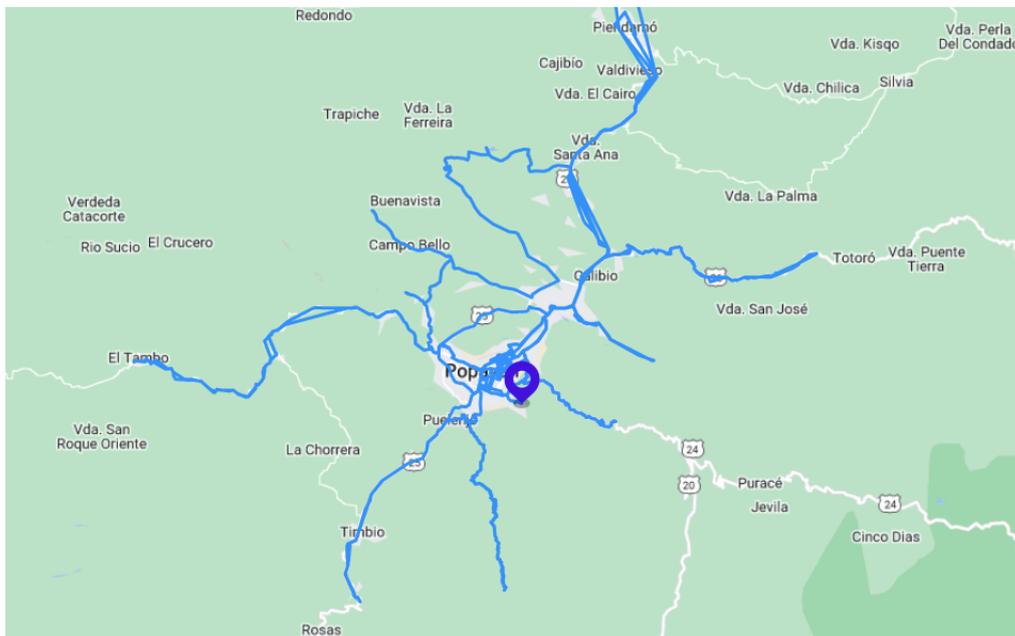
De igual forma, se realizaron las mismas rutas para la banda UHF, empleando el equipamiento adecuado y cumpliendo la planificación mostrada en la Figura 4.2.

**Tabla 4.2:** Rutas realizadas en la banda UHF

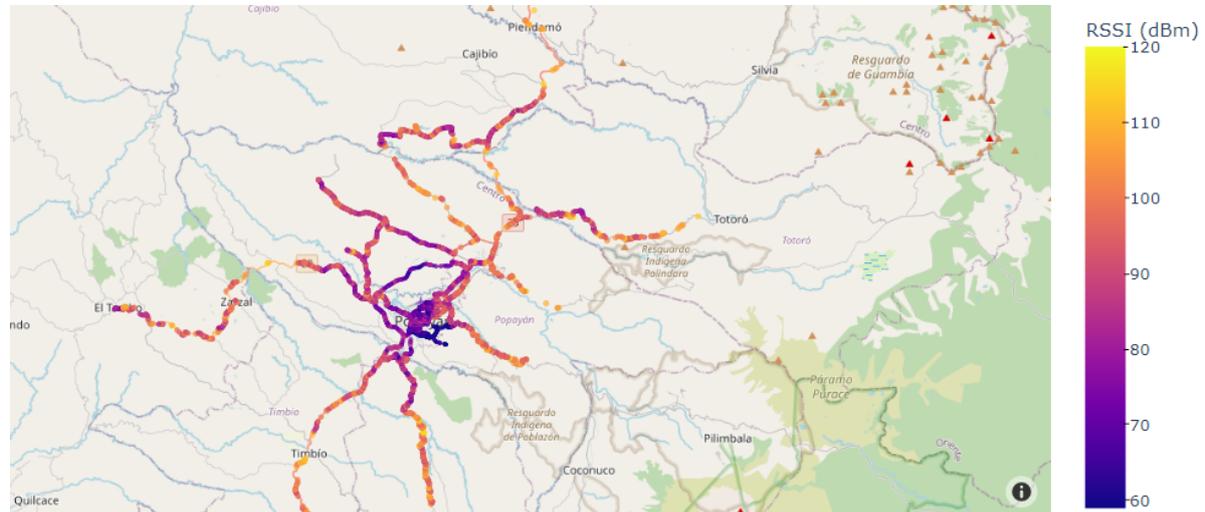
Día	Ruta	Horas	Figura
27 Nov.	Zona urbana Popayán	2h. 30min.	4.18; 4.19
28 Nov.	El Tambo & Piendamó & Totoró	12 horas	4.18; 4.19
29 Nov.	Timbío & Rosas & Paispamba & Puracé	9h. 30min.	4.18; 4.19
30 Nov.	El Bolsón & Las Huacas & zona urbana Popayán	10 horas	4.18; 4.19
01 Dic.	Departamento del Valle del Cauca	12 horas	4.20
02 Dic.	Departamento del Valle del Cauca	10 horas	4.20

La media de horas diaria fue de 9 horas y media. Las rutas únicamente se llevaron a cabo una vez, a diferencia de las de VHF, debido a la mayor precisión de los reportes de datos gracias al nuevo software y el gran coste económico que supone la recursividad. Al trabajar con la banda UHF, se observa un alcance y una cobertura inferiores en comparación con la banda VHF. Dado que el objetivo principal del estudio radica en analizar la propagación en condiciones óptimas, las cuales son más propensas a sufrir interferencias debido a las mejores condiciones propagativas, el análisis en la banda UHF se realiza con fines de comparación y extrapolación, priorizando los recursos temporales y económicos a la banda VHF.

En las Figuras 4.18 y 4.19 se muestran todas las rutas realizadas para el Departamento del Cauca en la banda UHF. En primer lugar, la Figura 4.18 muestra las rutas captadas desde el propio software UHF empleado: Hytera Smart Dispatch Plus, señalando el emplazamiento de la estación repetidora de Siloé. Esta herramienta en la versión instalada en el ordenador de la Universidad del Cauca no dispone de útiles que muestren la cobertura de las mediciones. Por esta razón, se utiliza Python para representar los valores de RSS mediante un mapa de calor. Del mismo modo que se describió para la banda VHF, las rutas de la banda UHF estableciendo conexión con la estación repetidora de Siloé tienen como punto de inicio y finalización la Universidad del Cauca (recordemos que en la banda UHF sólo se dispone de dos estaciones repetidoras: Siloé y Santander de Quilichao).

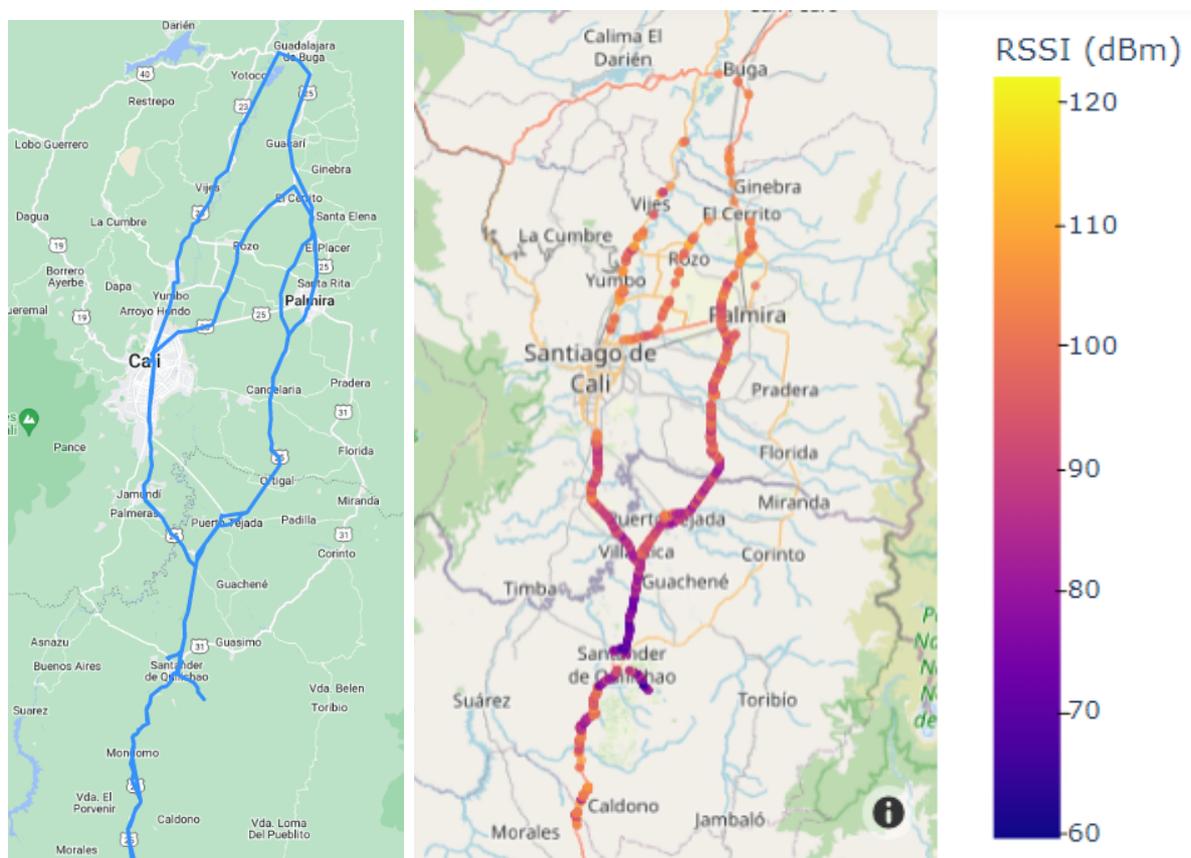


**Figura 4.18:** Rutas realizadas en el Departamento del Cauca en la banda UHF mostradas con el software UHF Hytera Smart Dispatch Plus



**Figura 4.19:** Rutas realizadas en el Departamento del Cauca en la banda UHF mostradas con un mapa de calor

En la Figura 4.20 se ilustran las rutas realizadas en la banda UHF para el Departamento del Valle del Cauca. De igual forma, se muestra tanto el resultado ofrecido por el software UHF Hytera Smart Dispatch Plus, como el mapa de calor generado con Python basado en los valores de RSS obtenidos.



(a) Hytera Smart Dispatch Plus

(b) Mapa de calor de valores de RSS

**Figura 4.20:** Rutas realizadas en el Departamento del Valle del Cauca en la banda UHF

Para todas las figuras referidas a las rutas realizadas para la banda UHF, Figuras 4.18, 4.19 y 4.20, se aprecia cómo tanto el alcance como la cobertura disminuyen con respecto a los resultados obtenidos en la banda VHF.

## 4.3 Obtención de modelos de propagación experimentales

Una vez establecida la nueva base de datos con las muestras de niveles de potencia recibida para el territorio caucano, el objetivo es identificar una curva que represente la tendencia de las pérdidas de propagación asociadas a los datos registrados. El primer paso implica la extracción de las pérdidas de propagación asociadas a partir de las medidas de RSS para cada punto, considerando las características orográficas en las cuales se ha realizado cada medición. La metodología que aborda este procedimiento se detalla en la sección 2.4 del capítulo previo 2.

### 4.3.1 Pérdidas de propagación reales

Comenzando esta búsqueda de modelos de propagación, se debe trabajar con un software adecuado que permita obtener la información asociada al perfil del terreno de las mediciones para evaluar el comportamiento propagativo de la señal en cada caso.

#### 4.3.1.1 QGIS: Sistema de Información Geográfica

Como se aventuraba en 2.4.2.1, se toma como base un GIS libre y de código abierto llamado QGIS que permite adaptar distintas herramientas disponibles para evaluar el perfil del terreno en base a nuestras necesidades. QGIS es un Sistema de Información Geográfica de Código Abierto licenciado bajo GNU - *General Public License* . Corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos [1].

El presente TFM se apoya en una herramienta de estimación de cobertura radio-eléctrica de código abierto, desarrollada previamente en la Universidad del Cauca [33], que utiliza un sistema de información geográfica adaptado para evaluar el alcance de cobertura de las estaciones base de sistemas de radio móvil mediante principios generales de propagación y la incorporación de información sobre componentes y parámetros de los sistemas de radio móvil. Al emplear un Modelo Digital de Elevación (DEM) que representa la topografía del país, la estimación de cobertura se realiza calculando perfiles de terreno desde la estación base hasta cada punto circundante del DEM, considerando diversas pérdidas de propagación y efectos atmosféricos.

Dicha herramienta calcula la propagación para cada punto de manera independiente teniendo en cuenta elementos como la reflexión en el suelo, la refracción en la atmósfera y la difracción debido a obstáculos. No obstante, es necesario realizar un **proceso de adaptación** de este recurso para satisfacer las necesidades actuales del proyecto: se requieren ajustes que incluyan el cálculo y exportación de las pérdidas de propagación reales basadas en mediciones de campo.

La herramienta de análisis de perfiles de terreno radioeléctricos permite calcular distancias y pérdidas por difracción según el perfil del terreno y los emplazamientos del radio móvil y la estación repetidora. El perfil de terreno se calcula entre cada punto de medida y la estación repetidora con la que se establece la comunicación.

#### 4.3.1.2 Separación de los datos según el tipo de escenario

Finalizada la fase de adquisición de datos realizada durante las pruebas de campo, se obtiene un reporte de valores RSS para cada una de las bandas de análisis de forma independiente. Esta ristra de datos compone la base de datos en VHF y en UHF que se utilizará para la extracción de los modelos de propagación. Por esta razón, es de vital importancia definir un procedimiento de separación de los datos en función del tipo de escenario para obtener de la forma más sencilla, ordenada y práctica posible un modelo de propagación según el tipo de escenario y condición de propagación diferenciando LOS o NLOS. El procedimiento para realizar esta separación consta de los siguientes pasos:

1. Con ayuda de Python, se cargan y visualizan los valores de RSS sobre mapas. La representación se realiza únicamente con fines visuales para la comprobación de correctas localizaciones de rutas y/o verificación de la separación posteriormente.
2. Primeramente, se extrae la información asociada al escenario *urbano* del resto de mediciones. Se consideran zonas urbanas aquellas poblaciones catalogadas como ciudad. Se trazan círculos<sup>4</sup> de radio variable, centrado y acomodado a la extensión de la zona a extraer mediante la determinación de la localización (latitud y longitud) del centro del círculo que abarca la zona urbana, así como del radio de este.

---

<sup>4</sup> Se emplean círculos por facilidad de ejecución y ausencia de rutas en las vecindades que hacen que esta forma geométrica sea adecuada en la mayor parte de los casos. Pueden requerirse varios círculos para abarcan una zona urbana.

3. Los círculos asociados a la ciudad de Popayán se guardan en una variable auxiliar, ya que dichos puntos componen el escenario *urbano* del análisis del proyecto. El resto de datos presentes en el interior de los círculos se eliminan del total de la información, para evitar que zonas urbanas interfieran con el resto de escenarios teniendo en cuenta, además, que únicamente se estudia la ciudad de Popayán como escenario *urbano* debido a la magnitud de datos adquiridos en dicho área.
4. Se procede de igual forma para distinguir el escenario *andino* y el escenario de *valle*, trazando una línea divisoria que separa ambos tipos de terreno sobre la información una vez eliminadas las zonas urbanas (incluida Popayán, almacenada en una variable temporal). Cada tipo de escenario se guarda en una variable diferente.
5. Finalmente, se guardan los datos de cada escenario en un archivo independiente a partir de las tres variables que contienen la información de *valle*, *andino* y la ciudad de Popayán como escenario *urbano*).

Por tanto, la base de datos para cada una de las bandas fue desglosada según el tipo de escenario en el que dicha medición fue tomada a partir del procedimiento descrito, haciendo un total de tres reportes preparados para su introducción en la herramienta de información geográfica elegida. Estos archivos son:

*Valle\_Santander.shp*  
*Andino\_Siloe\_Munchique\_Santander.shp*  
*Urbano\_Siloe\_Munchique.shp*

Nótese que la extensión de los archivos que comprenden los valores RSS según el tipo de escenarios formato *shapefile*, que se trata de un formato de representación vectorial que consta de un número variable de archivos con diferentes extensiones. Cada uno tiene una función específica y almacena un tipo de información, pero no almacenan ni topología ni características de la representación [25]. Para trabajar con un GIS, convertir los datos a este formato es requisito indispensable.

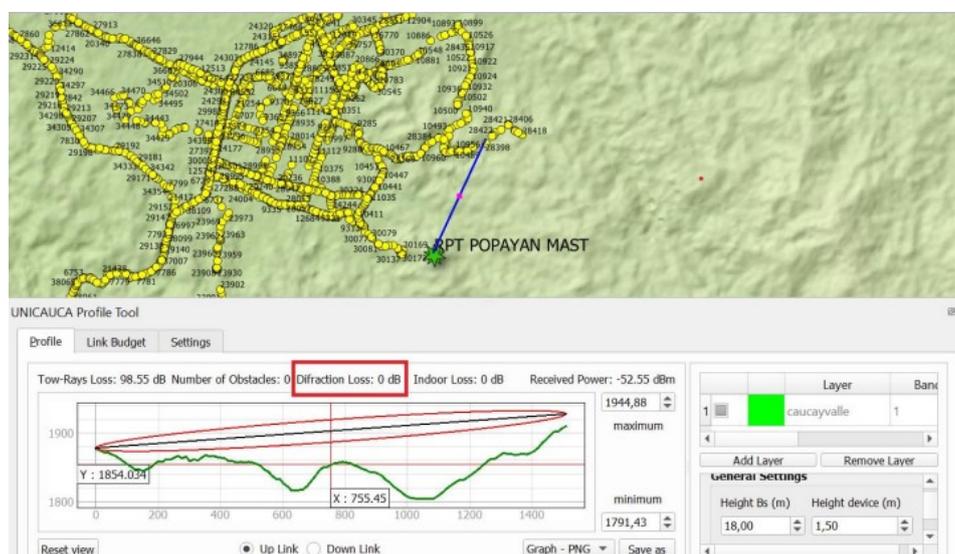
La herramienta QGIS será, tomando estos archivos en formato *shapefile* como entrada, la encargada de calcular el perfil del terreno teniendo en cuenta la estación repetidora con la cual se estableció la comunicación.



Es importante remarcar que este paso de separación según el tipo de escenario se puede realizar indistintamente antes o después de obtener el perfil del terreno y calcular las pérdidas de propagación para cada uno de los datos, ya que depende de la localización y no de la propagación. Se ha optado por realizarlo previamente para poder paralelizar en varios equipos los procesos de ejecución de cálculo de pérdidas en QGIS.

### 4.3.1.3 Perfil del terreno: Distancia, obstaculización y pérdidas por difracción

La herramienta de información geográfica adaptada por el equipo de trabajo es capaz de trazar la línea de comunicación que une un determinado punto con la estación repetidora teniendo en cuenta los obstáculos que interfieren en la comunicación, la distancia que une dichos puntos y las pérdidas por difracción que aminorizan la intensidad de potencia recibida en el receptor. Un ejemplo de estas funcionalidades se muestra en la Figura 4.21 que ejemplifica un caso real particular para uno de los puntos desde el cual se ha registrado un valor RSS hasta la estación con la cual se estableció la comunicación.



**Figura 4.21:** Perfil de terreno radioeléctrico, distancia y pérdidas por difracción entre los diferentes puntos de medición y la estación repetidora

En esta Figura 4.21 se observa el trazado del perfil donde ninguno de los accidentes geográficos interfiere en la primera zona de Fresnel, por lo que no son considerados como obstáculos. Puesto que la distancia no es muy grande y se encuentra en condiciones de LOS, las pérdidas por difracción son nulas.

Con ayuda de QGIS y mediante *scripts* diseñados específicamente para este propósito, se pueden obtener parámetros como las distancias, pérdidas por difracción e influencia de los obstáculos a partir de cálculos matemáticos. Estos datos se integran al archivo de excel original, en el cual cada punto de medición se complementa con sus respectivas características propagativas. Un ejemplo de este procedimiento se observa en la Figura 4.22 donde las columnas en color azul son:

ID	RSSI [dBm]	x_geog	y_geog	Repeater	Distance [m]	L_Difr [dB]	N°Obst	h_obs1	%_obs1	h_obs2	%_obs2	h_obs3	%_obs3
0	-112,00	312680,82	255669,91	RPT POPAY	16300,40	33,80	6	123,37	+	11,26	+	28,36	+
1	-100,00	312681,66	255718,45	RPT POPAY	16262,23	33,28	6	116,35	+	4,93	+	27,32	+
2	-93,00	312403,59	255917,27	RPT POPAY	16287,52	32,61	4	108,22	+	-12,83	58,44	25,63	+
3	-98,00	312429,06	255916,80	RPT POPAY	16271,37	32,74	3	109,65	+	-8,02	73,99	26,76	+
4	-93,22	312460,45	255937,78	RPT POPAY	16235,07	32,66	3	108,67	+	-9,30	69,80	25,94	+
5	-109,00	312496,17	255950,67	RPT POPAY	16202,14	32,59	3	107,66	+	-10,35	66,35	25,93	+
6	-105,00	312520,78	255967,01	RPT POPAY	16173,77	32,79	3	110,02	+	-8,48	72,28	27,85	+
7	-96,00	312288,28	256042,70	RPT POPAY	16267,64	22,06	2	106,10	+	16,59	+	-	-
8	-94,60	312255,34	256126,01	RPT POPAY	16226,57	33,25	5	115,99	+	-2,42	14,60	12,28	+
17	-87,49	321896,17	256577,13	RPT POPAY	11803,58	2,98	2	-14,35	46,82	-12,67	22,41	-	-
256	-86,82	306243,44	269535,99	RPT POPAY	16763,12	12,13	4	-2,41	92,09	-29,35	2,41	-12,86	59,00
804	-86,47	319862,63	263661,75	RPT POPAY	5594,41	0,00	0	-	-	-	-	-	-
963	-106,00	299023,74	271057,46	RPT POPAY	24094,18	10,12	3	-5,35	70,00	-3,95	12,89	-3,06	1,27
964	-99,60	306971,71	271051,70	RPT POPAY	16223,06	9,73	3	-5,39	70,11	-5,93	38,75	-35,58	7,15

**Figura 4.22:** Pérdidas por difracción y características de los obstáculos principales para las mediciones obtenidas en el Departamento del Cauca

- $Distance[m]$ : Distancia entre el punto y la repetidora medida en metros;
- $L\_Difr[dB]$ : Pérdidas por difracción expresadas en dB;
- $N^{\circ}Obst$ : Número de obstáculos que interfieren en la primera zona de Fresnel;
- $h\_obst_n$ : Altura de despeje del obstáculo. Se incluye este parámetro para tres obstáculos principales junto con el porcentaje de obstrucción asociado. En caso de no existir el obstáculo  $n$ , este parámetro se establece como  $-$ ;
- $\%\_obst_n$ : Porcentaje de obstrucción de la primera zona de Fresnel. Si el despejamiento de ese obstáculo es positivo, el porcentaje de obstrucción se establece como  $+$  debido a la gran magnitud de la obstrucción. Si no existe el obstáculo  $n$ , este porcentaje se establece como  $-$ .

#### 4.3.1.4 Clasificación en LOS y NLOS

Existen casos donde las condiciones de propagación no son tan favorables como en la Figura 4.21 por la influencia de la distancia, la existencia de obstáculos predominantes o factores externos puntuales que provoquen un crecimiento en las pérdidas por difracción. En estos supuestos, el punto deja de ser considerado LOS y se categoriza como NLOS.

El criterio definido por el equipo de trabajo y contextualizado en 2.4.2.6 como parte de la sección 2.4.2 del Capítulo 2, define que:

- El radio móvil se encuentra en condiciones de NLOS con la estación repetidora cuando la altura de despeje,  $h$ , sobre al menos uno de los obstáculos presentes en el perfil del terreno, es igual o mayor a cero.
- El punto de medición está en condiciones de LOS cuándo:
  1. El valor  $h(x)$  de los tres obstáculos más significativos debe ser negativo;
  2. Las obstrucciones no bloquean más del 70 % de la primera zona de Fresnel;
  3. Las pérdidas por difracción no superan los 10 dB.

Siguiendo este criterio, la Figura 4.23 muestra un ejemplo de los puntos que serían considerados en condiciones de LOS señalándolos con una flecha verde.

ID	RSSI [dBm]	x_geog	y_geog	Repeater	Distance [m]	L_Difr [dB]	N°Obst	h_obs1	%_obs1	h_obs2	%_obs2	h_obs3	%_obs3
0	-112,00	312680,82	255669,91	RPT POPAY	16300,40	33,80	6	123,37	+	11,26	+	28,36	+
1	-100,00	312681,66	255718,45	RPT POPAY	16262,23	33,28	6	116,35	+	4,93	+	27,32	+
2	-93,00	312403,59	255917,27	RPT POPAY	16287,52	32,61	4	108,22	+	-12,83	58,44	25,63	+
3	-98,00	312429,06	255916,80	RPT POPAY	16271,37	32,74	3	109,65	+	-8,02	73,99	26,76	+
4	-93,22	312460,45	255937,78	RPT POPAY	16235,07	32,66	3	108,67	+	-9,30	69,80	25,94	+
5	-109,00	312496,17	255950,67	RPT POPAY	16202,14	32,59	3	107,66	+	-10,35	66,35	25,93	+
6	-105,00	312520,78	255967,01	RPT POPAY	16173,77	32,79	3	110,02	+	-8,48	72,28	27,85	+
7	-96,00	312288,28	256042,70	RPT POPAY	16267,64	22,06	2	106,10	+	16,59	+	-	-
8	-94,60	312255,34	256126,01	RPT POPAY	16226,57	33,25	5	115,99	+	-2,42	14,60	12,28	+
LOS													
17	-87,49	321896,17	256577,13	RPT POPA	11803,58	2,98	2	-14,35	46,82	-12,67	22,41	-	-
256	-86,82	306243,44	269535,99	RPT POPAY	16763,12	12,13	4	-2,41	92,09	-29,35	2,41	-12,86	59,00
804	-86,47	319862,63	263661,75	RPT POPA	5594,41	0,00	0	-	-	-	-	-	-
963	-106,00	299023,74	271057,46	RPT POPAY	24094,18	10,12	3	-5,35	70,00	-3,95	12,89	-3,06	1,27
964	-99,60	306971,71	271051,70	RPT POPAY	16223,06	9,73	3	-5,39	70,11	-5,93	38,75	-35,58	7,15

**Figura 4.23:** Aplicación del criterio LOS-NLOS sobre los datos experimentales

Si observamos detenidamente, se distingue cada una de las condiciones del criterio con distintos colores y patrones. En primer lugar, el valor  $h_n(x)$  positivo se muestra con color de fuente rojo, por lo que dichos puntos quedan excluidos. Por otro lado, aunque este despejamiento sea negativo, si el porcentaje de obstrucción  $\%_{obst_n}$  es mayor a 70 % el punto también será considerado NLOS, por lo que esos obstáculos se colorean con fondo rojo, quedando en color verde únicamente aquellos obstáculos que cumplan los requisitos  $h_n(x)$  negativo con  $\%_{obst_n}$  menor o igual a 70 %. La información de los tres obstáculos principales debe estar coloreada en verde para ser considerado candidato a LOS. Por último, se verifica que las pérdidas por difracción sean inferiores a 10 dB. Los candidatos que cumplan también esta última premisa recuadrada en verde conforman la versión definitiva de puntos en LOS.

### 4.3.1.5 Pérdidas de propagación

La Figura 4.24 muestra el resultado final del excel de extrada que contenía las mediciones experimentales. Por un lado, en color azul, se incluye la información asociada al perfil del terreno -distancia, obstáculos y pérdidas por difracción- que permite clasificar las mediciones en dos conjuntos diferentes: LOS o NLOS; por otro lado, en color amarillo, se encuentran los resultados de evaluar los modelos teóricos descritos en 2.3 así como el cálculo de las pérdidas de propagación reales calculadas con [2.18] para cada punto. Estas pérdidas son las que darán lugar a los modelos de propagación buscados, diferenciando condiciones de LOS y NLOS.

ID	RSST [dBm]	x_geog	y_geog	Repeater	Distance [m]	L_Difr [dB]	N*Obst	h_obs1	%_obs1	h_obs2	%_obs2	h_obs3	%_obs3	L_Prop [dB]	L_fs	L_2ray	L_egli	L_ss70n3	L_ss100n4	L_okum-hata
0	-112,00	312680,82	255669,91	RPT POPAY	16300,40	33,80	6	123,37	+	11,26	+	28,36	+	160,80	109,53	138,95	149,89	106,37	148,49	138,96
1	-100,00	312681,66	255718,45	RPT POPAY	16262,23	33,28	6	116,35	+	4,93	+	27,32	+	148,80	109,51	138,90	149,85	106,34	148,45	138,92
2	-93,00	312403,59	255917,27	RPT POPAY	16287,52	32,61	4	108,22	+	-12,83	58,44	25,63	+	141,80	109,52	138,93	149,88	106,36	148,47	138,95
3	-98,00	312429,06	255916,80	RPT POPAY	16271,37	32,74	3	109,65	+	-8,02	73,99	26,76	+	146,80	109,51	138,91	149,86	106,34	148,46	138,93
4	-93,22	312460,45	255937,78	RPT POPAY	16235,07	32,66	3	108,67	+	-9,30	69,80	25,94	+	142,02	109,49	138,88	149,82	106,31	148,42	138,89
5	-109,00	312496,17	255950,67	RPT POPAY	16202,14	32,59	3	107,66	+	-10,35	66,35	25,93	+	157,80	109,47	138,84	149,78	106,29	148,38	138,86
6	-105,00	312520,78	255967,01	RPT POPAY	16173,77	32,79	3	110,02	+	-8,48	72,28	27,85	+	153,80	109,46	138,81	149,75	106,26	148,35	138,83
7	-96,00	312288,28	256042,70	RPT POPAY	16267,64	22,06	2	106,10	+	16,59	+	-	-	144,80	109,51	138,91	149,85	106,34	148,45	138,93
8	-94,60	312255,34	256126,01	RPT POPAY	16226,57	33,25	5	115,99	+	-2,42	14,60	12,28	+	143,40	109,49	138,87	149,81	106,31	148,41	138,89
LOS																				
17	-87,49	321896,17	256577,13	RPT POPA	11803,58	2,98	2	-14,35	46,82	-12,67	22,41	-	-	136,29	106,72	133,34	144,28	102,16	142,88	133,86
256	-86,82	306243,44	269535,99	RPT POPAY	16763,12	12,13	4	-2,41	92,09	-29,35	2,41	-12,86	59,00	135,62	109,77	139,43	150,38	106,73	148,97	139,40
804	-86,47	319862,63	263661,75	RPT POPA	5594,41	0,00	0	-	-	-	-	-	-	135,27	100,24	120,37	131,31	92,43	129,91	122,06
963	-106,00	299023,74	271057,46	RPT POPAY	24094,18	10,12	3	-5,35	70,00	-3,95	12,89	-3,06	1,27	154,80	112,92	145,73	156,68	111,46	155,28	145,13
964	-99,60	306971,71	271051,70	RPT POPAY	16223,06	9,73	3	-5,39	70,11	-5,93	38,75	-35,58	7,15	148,40	109,49	138,86	149,81	106,30	148,41	138,88

Figura 4.24: Características de propagación para cada punto experimental

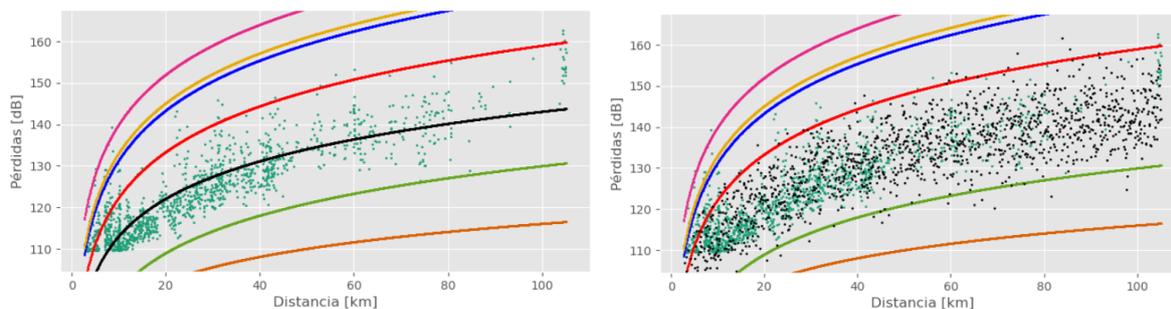
Para simplificar el proceso y facilitar su ejecución, se realiza este procedimiento de forma individual para cada estación repetidora. Este proceso resulta en la creación de múltiples archivos excel que detallan la información completa de las pérdidas de propagación, dividiendo los resultados por estación y clasificación según las condiciones de LOS o NLOS. Estos informes abarcan tanto las pérdidas estimadas por los diversos modelos teóricos utilizados como las pérdidas reales calculadas, convirtiéndose así en el punto de partida fundamental para la obtención de modelos de propagación adaptados a los diferentes escenarios y condiciones de propagación en la región colombiana de estudio.

### 4.3.2 Modelos de propagación según el tipo de escenario

Avanzando en la ejecución del proyecto, el paso final antes de aplicar los métodos numérico-analíticos es la adquisición de los modelos de propagación. Se optó por calcular aquellas curvas que mejor describan las pérdidas de propagación con base en la Ecuación 2.39 presentada en el Capítulo 2 haciendo uso nuevamente de Python para el cálculo y ajuste de las regresiones logarítmicas. Recordemos esta ecuación a continuación:

$$L_{prop} = \alpha + \beta \cdot 10 \log_{10}(d) + N(0, \sigma^2)$$

donde  $\alpha$  representa un término independiente constante que influye significativamente en los valores iniciales;  $\beta$  está relacionada con la distancia y representa el crecimiento de las pérdidas actuando como el exponente de propagación; y  $N(0, \sigma^2)$  es una variable aleatoria con distribución normal que modela la dispersión, con media igual a cero y desviación estándar  $\sigma^2$ , pudiendo obviar este término aleatorio en los resultados. Un ejemplo comparativo donde se aprecia la influencia de este factor dispersivo se muestra en la Figura 4.25:



(a) Modelo de propagación sin el factor dispersivo (b) Modelo de propagación con el factor dispersivo

**Figura 4.25:** Ejemplo de la influencia del factor dispersivo ( $N(0, \sigma^2)$ )

Se recopilan y presentan en las Tablas 4.3 y 4.4 las ecuaciones de los modelos de propagación para las bandas VHF y UHF, respectivamente. Estas ecuaciones, derivadas de la regresión logarítmica de los datos, están organizadas según los diferentes entornos, incluyendo valores RMSE y coeficientes del modelo, lo que permite una comparación clara del comportamiento de las curvas en función de la distancia para distintos escenarios.

**Tabla 4.3:** Modelos de propagación, RMSE y  $\sigma^2$  en la banda VHF

- VHF -		Modelo de propagación	RMSE	$\sigma^2$
Andino	LOS	$L_{prop} = 103,35 + 2.25 \cdot 10 \log_{10}(d)$	8.34	8.34
	NLOS	$L_{prop} = 108,74 + 2.36 \cdot 10 \log_{10}(d)$	11.26	10.66
Valle	LOS	$L_{prop} = 83,12 + 3 \cdot 10 \log_{10}(d)$	6.04	5.99
	NLOS	$L_{prop} = 71,36 + 3.9 \cdot 10 \log_{10}(d)$	8.55	8.47
Urbano*	Popayán**	$L_{prop} = 101,73 + 4.11 \cdot 10 \log_{10}(d)$	10.69	10.69

\* El escenario urbano se considera de forma independiente, sin distinguir condiciones de LOS o NLOS.

\*\* Urbe de tamaño medio que abarca un radio de 8 km con edificios de baja altura.

**Tabla 4.4:** Modelos de propagación, RMSE y  $\sigma^2$  en la banda UHF

- UHF -		Modelo de propagación	RMSE	$\sigma^2$
Andino	LOS	$L_{prop} = 105 + 2.63 \cdot 10 \log_{10}(d)$	9.3	9.22
	NLOS	$L_{prop} = 118 + 2.66 \cdot 10 \log_{10}(d)$	10.90	10.82
Valle	LOS	$L_{prop} = 89,36 + 3.33 \cdot 10 \log_{10}(d)$	7.77	7.63
	NLOS	$L_{prop} = 83,8 + 4 \cdot 10 \log_{10}(d)$	11.70	11.14
Urbano	Popayán	$L_{prop} = 107,51 + 4.28 \cdot 10 \log_{10}(d)$	11.27	11.03

La desviación estándar de los modelos se encuentra en línea con la literatura -entre 4 y 12 dB- [21], aumentando en torno a 2 dB en UHF respecto a VHF.

Cabe destacar que los valores de  $\sigma^2$  y RMSE tienen un orden de magnitud similar debido a que el RMSE refleja, principalmente, la dispersión inherente de los datos representada por  $\sigma^2$  incluyendo a mayores las posibles desviaciones no completamente caracterizadas por las ecuaciones del modelo. Para cumplir con este cometido, se dio mayor peso a las últimas 50 muestras, lo que asegura una mejor caracterización de la tendencia de las pérdidas.

4.3.2.1 Modelos de propagación en la banda VHF

A continuación, se presentan en la Figura 4.26 de manera gráfica los modelos de propagación en la banda VHF, acompañados de sus respectivas ecuaciones.

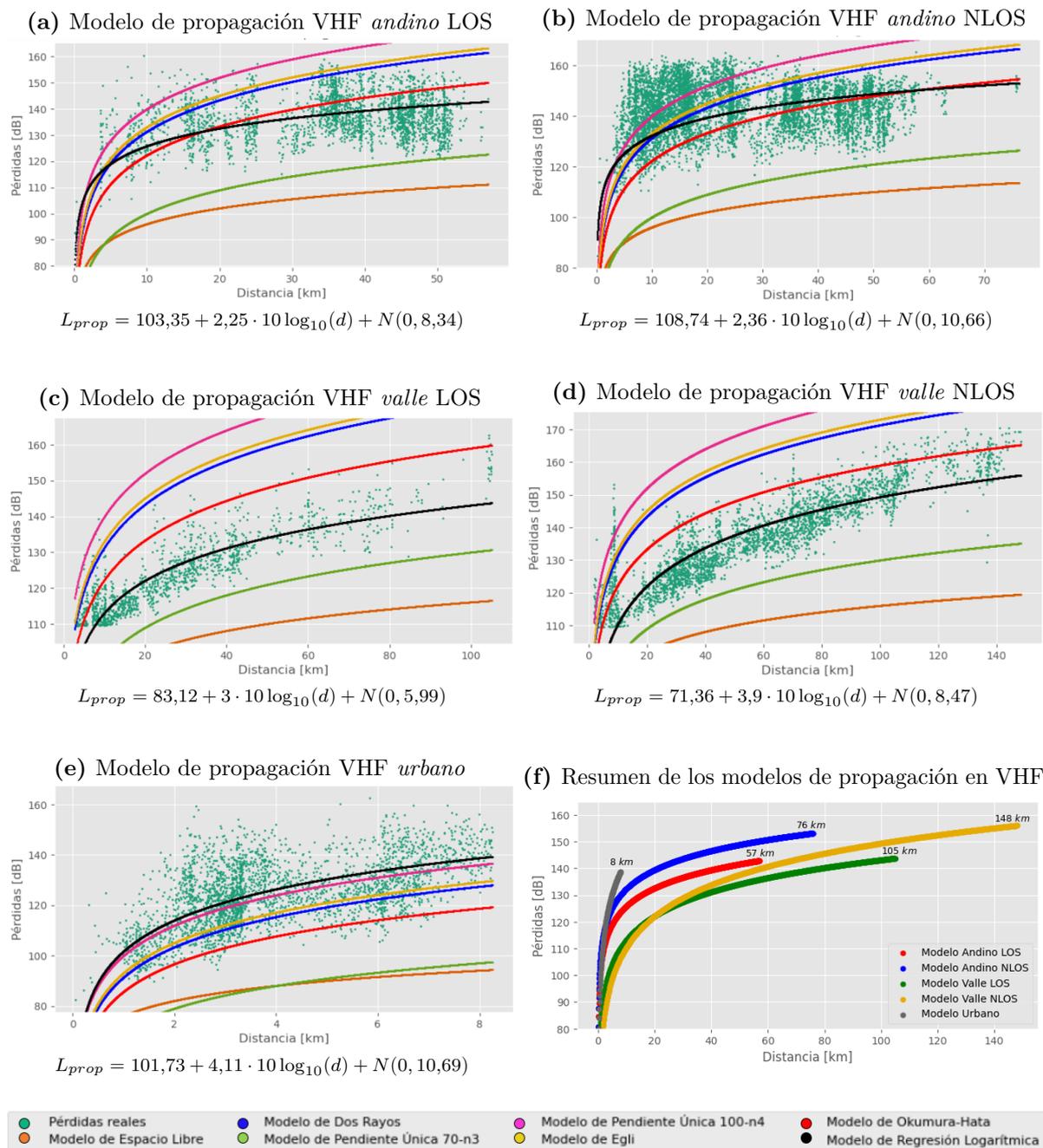


Figura 4.26: Modelos de propagación en la banda VHF

## 4.3.2.2 Modelos de propagación en la banda UHF

A continuación, se presentan en la Figura 4.27<sup>5</sup> de manera gráfica los modelos de propagación en la banda UHF, acompañados de sus respectivas ecuaciones.

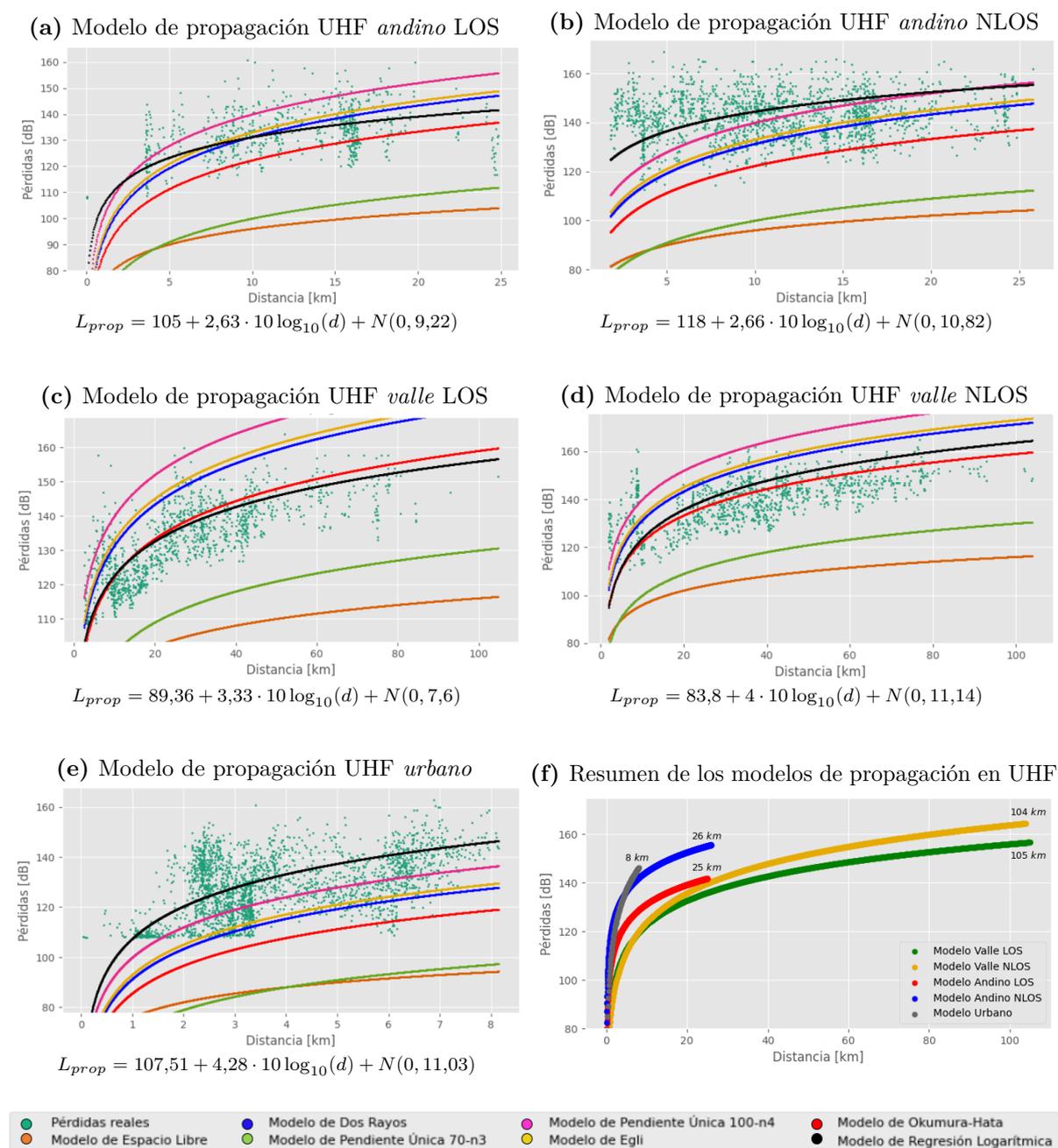


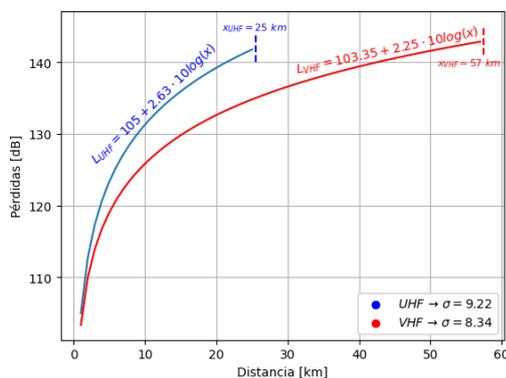
Figura 4.27: Modelos de propagación en la banda VHF

<sup>5</sup> La subfigura 4.27e ilustra las pérdidas mínimas de propagación iguales a 107.8 dB provenientes del límite superior de RSS igual a -59 dB impuesto por el software Hytera Smart Dispatch Plus.

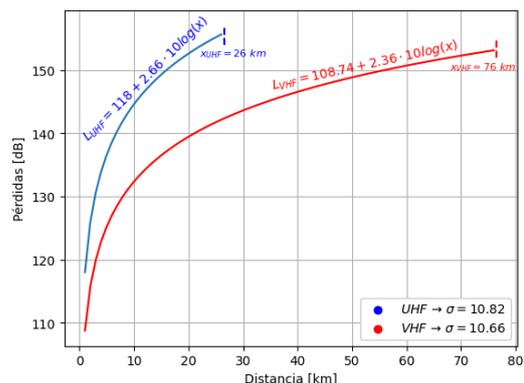
### 4.3.2.3 Comparativa VHF-UHF de los modelos de propagación

Por último, la Figura 4.28 ilustra las curvas obtenidas para las distintas bandas según el escenario. Las diferencias se manifiestan, principalmente, en el valor obtenido de pérdidas expresado en dB, así como en la distancia o alcance máximo de las señales.

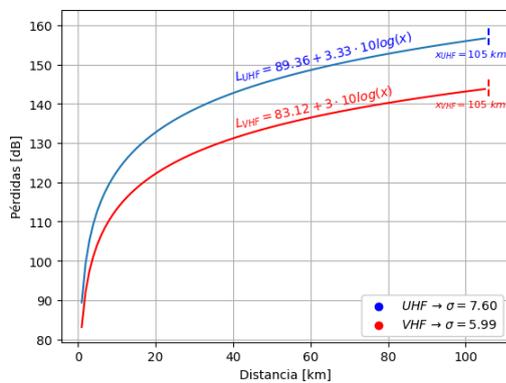
(a) Escenario *andino* en condiciones de LOS



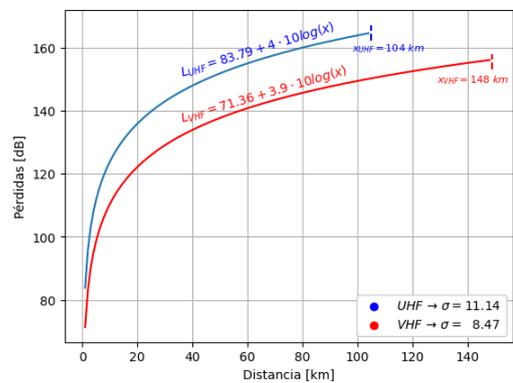
(b) Escenario *andino* en condiciones de NLOS



(c) Escenario *valle* en condiciones de LOS



(d) Escenario *valle* en condiciones de NLOS



(e) Escenario *urbano*

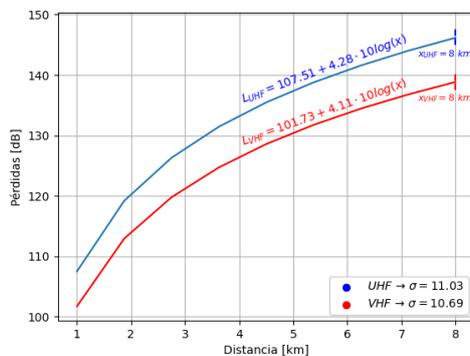


Figura 4.28: Comparativa de los modelos de propagación en las bandas VHF y UHF

Como ocurría a la hora de comparar los coeficientes de propagación que modelan el crecimiento de las pérdidas en las Tablas 4.3 y 4.4 para las bandas VHF y UHF, respectivamente, los valores de  $\beta$  son de mayor orden para la banda UHF, lo que implica que las pérdidas crezcan más rápidamente como confirman las gráficas de la Figura 4.28. La frecuencia superior de la UHF hace que las ondas de radio sean más susceptibles a los obstáculos, lo cual se verá reflejado en mayor medida en los escenarios *andinos*, donde las distancias en UHF se reducen considerablemente con respecto a las distancias máximas obtenidas en VHF, incluso en condiciones de LOS (recordemos que el criterio estipulado para distinguir LOS y NLOS considera obstáculos, aunque estos sean prácticamente despreciables). Además, las ondas UHF tienen menos capacidad para penetrar estructuras sólidas en comparación con las de VHF, lo que resulta en una mayor atenuación al atravesar obstáculos y, por ende, en pérdidas de propagación más altas.

Las figuras anteriores presentes en la Figura 4.28 ilustran claramente cómo las pérdidas de propagación son mayores en la banda UHF. Esto se evidencia por la curva en color azul, que se mantiene por encima de la curva que representa las pérdidas de propagación en la banda VHF representada en color rojo. Este aumento de pérdidas se traduce directamente en una disminución de la distancia máxima registrada, debido a la dependencia del alcance de la señal con la frecuencia. La reducción en las distancias máximas implica una cobertura considerablemente menor en la banda UHF, especialmente en escenarios *andinos*, donde las distancias máximas en comparación con las obtenidas en VHF se ven reducidas entre 30 y 50 km, dependiendo de si hay LOS o NLOS con la estación repetidora [21].

Adicionalmente, una consideración importante a tener en cuenta es que las distancias obtenidas en UHF son aproximadamente las mismas en condiciones de LOS y NLOS para un mismo escenario. En cambio, en la banda VHF las distancias que se alcanzan para los escenarios en condiciones de LOS son significativamente menores a las encontradas en NLOS debido a que, aunque las condiciones de LOS sean más favorables en términos de propagación, es más complejo cumplir dicho requerimiento a medida que el transmisor se aleja de la estación repetidora al haber una mayor probabilidad de obstrucción [21], principalmente en los escenarios *andinos*, donde la influencia de los obstáculos resulta en una reducción significativa de las distancias máximas, incluso en condiciones de LOS.

## 4.4 Conclusiones

Los valores de RSS son un indicativo de la cobertura máxima identificada para cada banda y escenario durante las pruebas de campo. Los resultados indican que para el escenario de *valle* se obtienen coberturas máximas de 148 km y 104 km para VHF y UHF, respectivamente, mientras que para el escenario *andino* se registran coberturas máximas de 76 km y 26 km para VHF y UHF, respectivamente, valores inferiores a los obtenidos en escenarios de *valle* debido a las condiciones geográficas donde se realizaron las mediciones. Por último, para el escenario *urbano* se alcanzan distancias de hasta 8 km debido a las limitaciones que impone la ciudad de Popayán. El escenario de *valle* se caracteriza por las condiciones de propagación más favorables, convirtiéndose en el escenario donde la señal alcanza mayores distancias, representando la mayor cobertura real que este tipo de sistemas puede alcanzar y cuyos resultados son considerados como los más confiables [21].

CAPÍTULO **5**

RESULTADOS - APLICACIÓN DE  
MÉTODOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICO Y  
ESTUDIO DE INTERFERENCIA DE CANAL  
ADYACENTE

---

5.1	Análisis de interferencia co-canal . . . . .	122
5.1.1	Aplicación de métodos analíticos . . . . .	122
5.1.1.1	Aplicación del método E-MCL . . . . .	125
5.1.1.2	Aplicación del método alternativo de la Rec. ITU SM.337	126
5.1.2	Aplicación del método numérico de Monte Carlo . . . . .	128
5.2	Análisis de interferencia de canal adyacente . . . . .	133
5.2.1	Estudio analógico . . . . .	134
5.2.1.1	Sistemas analógicos operando con un BW de 12.5 kHz .	135
5.2.1.2	Sistemas analógicos operando con un BW de 25 kHz . .	138
5.2.2	Estudio digital . . . . .	140
5.2.2.1	Sistemas digitales operando con un BW de 12.5 kHz . .	140
5.3	Conclusiones . . . . .	142

---

El presente capítulo muestra los resultados prácticos obtenidos de los estudios de interferencia co-canal y de canal adyacente. Por un lado, se utilizan los métodos analíticos detallados en la sección 2.5, así como el método numérico de Monte Carlo de la sección 2.6 (ambas secciones pertenecientes al Capítulo 2) para obtener relaciones distancia-frecuencia que permitan evaluar el aislamiento mínimo requerido entre fuentes y receptores víctimas de interferencia co-canal. Por otro lado, se exponen los resultados del análisis de interferencia de canal adyacente realizados en la Universidad del Cauca siguiendo la metodología expuesta en la sección 2.8.1 del Capítulo 2.

## 5.1 Análisis de interferencia co-canal

Los métodos analíticos y el método numérico considerados en el presente TFM permiten evaluar el aislamiento mínimo requerido entre fuentes y receptores víctimas de interferencia en función de la separación en distancia y frecuencia. Para la aplicación de dichos métodos, se tienen en cuenta, principalmente, las RFPR obtenidas de manera experimental mediante el proceso de medidas de laboratorio presentadas en la Tabla 3.8, así como los modelos de propagación obtenidos de forma experimental para las bandas VHF y UHF en las Tablas 4.3 y 4.4, respectivamente.

### 5.1.1 Aplicación de métodos analíticos

En este primer apartado, se presenta la aplicación de los métodos analíticos para el cálculo del aislamiento en términos de la mínima separación en frecuencia-distancia requerida entre una fuente interferente y un receptor víctima de interferencia, estableciendo las mínimas condiciones para que los sistemas CLMR operen sin verse afectados considerablemente por interferencia.

Se utilizan principalmente el método analítico de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento Mejorado (E-MCL) y el método de la recomendación ITU-R SM.337-6, para los cuales se tienen en cuenta parámetros relacionados con frecuencia de operación, BW de canal y máscaras espectrales, entre otros, y valores límites de sensibilidad, potencias de transmisión, ganancias, y la RFPR, con el fin de garantizar por seguridad el aislamiento entre sistemas CLMR [21].

Para el análisis de aislamiento, se consideraron los modelos de pérdidas de propagación obtenidos de manera experimental en el Capítulo 4 mediante el proceso de medidas en campo, tanto para VHF como UHF, correspondientes a los modelos de pérdidas de propagación *andinos* en condiciones de LOS y NLOS; el modelo de pérdidas de propagación de *valle* en condiciones de LOS y NLOS; y el modelo de pérdidas de propagación *urbano*. Así como también se consideraron las RFPR obtenidas a nivel de laboratorio presentadas en la Tabla 3.8 donde se presenta el resumen de las RFPR obtenidas a nivel de laboratorio considerando 1 dB de seguridad sobre los resultados obtenidos como margen de operación.

En la Tabla 5.1 se presentan los parámetros generales utilizados en el análisis de aislamiento mediante la aplicación de los métodos analíticos E-MCL e ITU SM.337.

**Tabla 5.1:** Parámetros de radio móvil utilizados para el análisis de aislamiento mediante la aplicación de métodos analíticos

Potencia de transmisión	$(P_{INT})$	→	25 W   43.98 dBm
Sensibilidad del receptor móvil	$(S_{VICT})$	→	-120 dBm
Ganancia de la antena repetidora	$(G_{INT})$	→	10 dBi
Ganancia de la antena móvil	$(G_{VICT})$	→	3 dBi
Frecuencia de trabajo	$(f)$	→	VHF: 138 MHz UHF: 470 MHz
Margen de operación para sistemas con múltiples portadoras	$(MC_{INT})$	→	0 dB
Factor de ajuste de ancho de banda	$(dB_{BW})$	→	0 dB
Factor de disponibilidad del sistema interferido	$(N)$	→	10 dB
Máscara espectral	-	→	Tipo B (BW=25 kHz) Tipo D (BW=12.5 kHz)
Relación de protección	$(RFPR)$	→	VHF: 7 dB <sub> BW=25kHz</sub> 9 dB <sub> BW=12,5kHz</sub> UHF: 6 dB <sub> BW=25kHz</sub> 10 dB <sub> BW=12,5kHz</sub>

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los dos métodos evaluados -método E-MCL y método alternativo de la Recomendación ITU SM.337- para los distintos parámetros de la Tabla 5.1.

Para la ejecución de estos métodos, se utiliza un valor de  $N=10$  dB y se varía la frecuencia de operación para evaluar las dos bandas de estudio, tomando  $f = 138$  MHz para VHF y  $f = 470$  MHz para UHF. Además, se consideran las máscaras espectrales tipo B y tipo D para evaluar el desempeño distancia-frecuencia para distintos anchos de banda: 25 kHz y 12.5 kHz, respectivamente. Al considerar un factor de disponibilidad del sistema de  $N$  igual a 10 dB se garantiza una menor cobertura o alcance de los sistemas con un mayor porcentaje de cobertura zonal, lo que permite reducir la distancia mínima de separación o de aislamiento entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia cuando los sistemas operan en frecuencias iguales o cercanas [21]. Los resultados fruto de la ejecución de los dos métodos analíticos de estudio para los parámetros expuestos se muestran primeramente en las Figuras 5.1 y 5.2 distinguiendo las bandas VHF y UHF, respectivamente, para el método E-MCL, seguido por las Figuras 5.3 y 5.4 correspondientes al método Rec. ITU SM.337 alternativo y las bandas VHF y UHF, respectivamente. Además de las gráficas representativas de ambos métodos determinísticos, se resumen los resultados de aislamiento mínimo expresados en km para distintas separaciones de canal y tipo de máscara espectral en las Tablas 5.2 y 5.3 asociadas a los métodos E-MCL y Rec.ITU SM.337 alternativo, respectivamente.

## 5.1.1.1 Aplicación del método E-MCL

A continuación, se presentan los resultados del método analítico E-MCL:

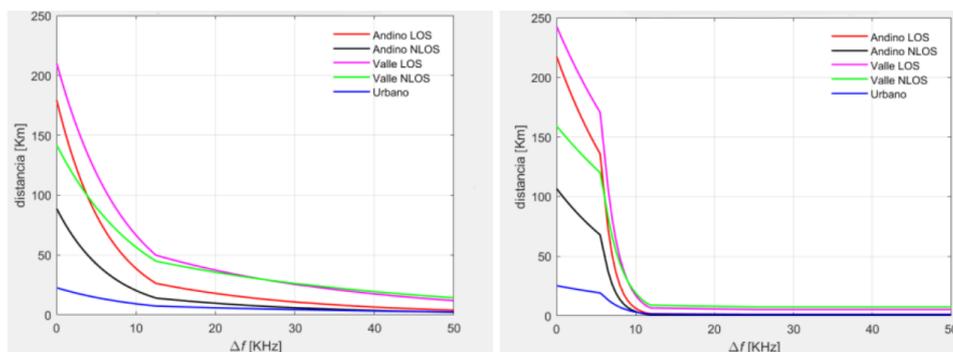


Figura 5.1: Método E-MCL para la banda VHF con máscaras espectrales tipo B y tipo D [21]

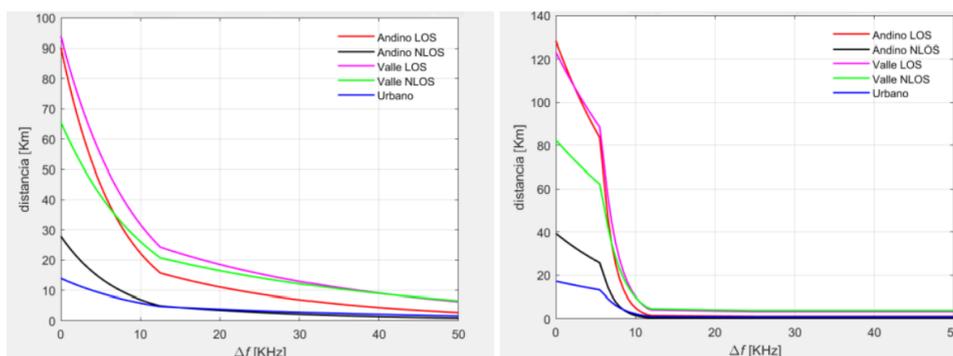


Figura 5.2: Método E-MCL para la banda UHF con máscaras espectrales tipo B y tipo D [21]

Tabla 5.2: Aislamiento mínimo en VHF y UHF diferenciando espaciados entre canales según la máscara espectral empleando el método E-MCL

E-MCL	Máscara espectral tipo B (BW = 25 kHz)			Máscara espectral tipo D (BW = 12.5 kHz)			
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	
V	Valle LOS	210.09 km	30.83 km	11.81 km	242.61 km	10.21 km	5.35 km
F	Andino LOS	179.32 km	13.88 km	3.86 km	217.25 km	3.18 km	1.34 km
H	Valle NLOS	141.88 km	30.83 km	14.19 km	159.19 km	12.62 km	7.53 km
V	Andino NLOS	88.69 km	7.61 km	2.41 km	106.63 km	1.85 km	0.81 km
	Urbano	22.67 km	5.09 km	2.40 km	25.35 km	2.15 km	1.33 km
	Valle LOS	93.94 km	15.43 km	6.25 km	123.17 km	6.24 km	3.4 km
F	Andino LOS	90.32 km	8.75 km	2.72 km	128.13 km	2.71 km	1.24 km
H	Valle NLOS	65.49 km	14.10 km	6.55 km	82.45 km	6.53 km	3.9 km
U	Andino NLOS	27.86 km	2.77 km	0.87 km	39.39 km	0.87 km	0.4 km
	Urbano	13.90 km	3.31 km	1.62 km	17.24 km	1.61 km	0.99 km

### 5.1.1.2 Aplicación del método alternativo de la Rec. ITU SM.337

A continuación, se presentan los resultados del método alternativo de la Rec. ITU SM.337:

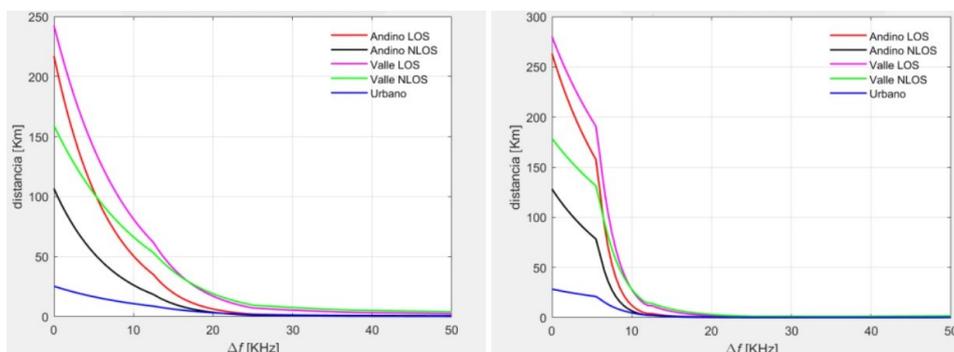


Figura 5.3: Método Rec. ITU SM.337 alternativo para la banda VHF [21]

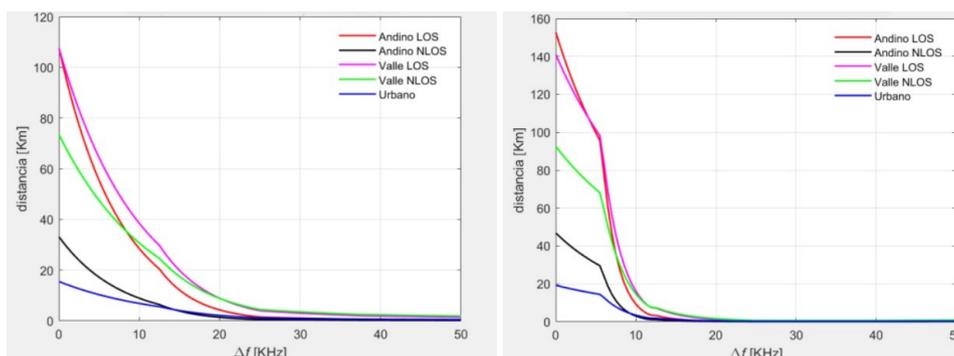


Figura 5.4: Método Rec. ITU SM.337 alternativo para la banda UHF [21]

Tabla 5.3: Aislamiento mínimo en VHF y UHF diferenciando espaciados entre canales según la máscara espectral empleando el método Rec.ITU SM.337 alternativo

Rec. ITU SM.337 alternativo	Máscara espectral tipo B (BW = 25 kHz)			Máscara espectral tipo D (BW = 12.5 kHz)		
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz
F Valle LOS	242.61 km	7.24 km	2.46 km	280.16 km	17.70 km	0.58 km
H Andino LOS	217.25 km	2.02 km	0.48 km	263.20 km	6.62 km	0.15 km
V Valle NLOS	159.19 km	9.59 km	4.05 km	178.62 km	19.60 km	1.27 km
U Andino NLOS	106.63 km	1.19 km	0.30 km	128.20 km	3.74 km	0.15 km
Urbano	25.35 km	1.65 km	0.71 km	28.36 km	3.30 km	0.23 km
F Valle LOS	107.56 km	3.95 km	1.43 km	141.03 km	10.48 km	0.42 km
H Andino LOS	107.56 km	1.50 km	0.40 km	152.72 km	5.30 km	0.08 km
U Valle NLOS	73.48 km	4.43 km	1.87 km	92.51 km	10.15 km	0.66 km
U Andino NLOS	33.13 km	0.48 km	0.13 km	46.83 km	1.69 km	0.03 km
Urbano	15.48 km	1.12 km	0.50 km	19.20 km	2.43 km	0.19 km

De las Figuras 5.1 y 5.2, el método E-MCL obtiene que se requieren menores distancias de separación cuando los sistemas operan en un BW igual a 25 kHz (máscara tipo B) con respecto a sistemas que operan en un BW igual a 12.5 kHz (máscara tipo D) debido, principalmente, a la RFPR obtenida de manera experimental. Este hecho se constata con los valores obtenidos en la Tabla 5.2 comparando las distancias para un mismo desplazamiento frecuencial sobre la máscara espectral ( $\Delta f$ ) y se verifica igualmente en las Figuras 5.3, 5.4 y Tabla 5.3 para el método Rec. ITU SM.337 alternativo.

Las mayores distancias de separación en sistemas operando a la misma frecuencia co-canal, tanto para VHF como UHF en ambos métodos analíticos, se obtienen al considerar los modelos de propagación de *valle* y *andino* en condiciones de LOS. Sin embargo, el comportamiento cambia cuando los sistemas se separan en frecuencia al menos un canal para ambos BW: la separación en distancia se vuelve más exigente cuando se consideran los modelos de propagación de *valle* LOS y *valle* NLOS, tal como presenta la Tabla 5.2.

Se observa que empleando el método E-MCL para sistemas operando con un BW igual a 25 kHz se requieren al menos dos canales de separación en frecuencia para que los sistemas puedan operar en distancias cercanas sin generar interferencias perjudiciales entre ellos; mientras que, utilizando ese mismo método, los sistemas operando con un BW igual a 12.5 kHz requieren al menos un canal de separación en frecuencia (las columnas Tipo B| $\Delta f = 50$  kHz -dos canales de BW = 25 kHz- y Tipo D| $\Delta f = 12,5$  kHz -un canal de BW = 12.5 kHz- de la Tabla 5.2 son comparables). En cambio, este comportamiento no se mantiene al aplicar el método ITU SM.337 alternativo.

El método ITU SM.337 alternativo es más demandante con respecto al aislamiento cuando los sistemas operan con una separación en frecuencia menor a  $\Delta f = 15$  kHz para cada una de las frecuencias de trabajo y las dos máscaras espectrales consideradas. Por otra parte, para valores de  $\Delta f$  superiores a 15 kHz, las curvas de separación en distancia decaen más rápidamente en comparación con el método E-MCL, obteniendo distancias menores a medida que aumenta la separación en frecuencia entre los sistemas considerados. Lo anterior ratifica el hecho de que para sistemas operando en VHF y UHF con BW igual a 12.5 kHz y 25 kHz se requieren al menos dos canales de separación en frecuencia para que los sistemas puedan operar sin interferencias en un mismo emplazamiento.

Para el análisis, se considera el método E-MCL y el modelo de propagación de *valle* LOS, ya que proporcionan el máximo aislamiento en términos generales, debido a que se trabaja con el método analítico y el modelo de propagación más conservadores.



### 5.1.2 Aplicación del método numérico de Monte Carlo

En esta sección, se presenta la aplicación del método numérico para la estimación del aislamiento entre sistemas CLMR conocido como método de Monte Carlo. Dicho método estadístico, descrito en la sección 2.6 del Capítulo 2, permite evaluar la probabilidad de interferencia y el uso simultáneo de frecuencias en distintos escenarios en función de la distancia mínima de separación entre sistemas [21].

Para la aplicación del método de Monte Carlo se consideran las más exigentes características y valores extremo de los sistemas CLMR, para garantizar el mayor aislamiento frente a la interferencia. Los parámetros fijos están relacionados con la frecuencia de operación, la máxima potencia de transmisión y las ganancias, entre otros, y los parámetros variables dependen de la distancia de los transmisores interferentes con respecto al receptor víctima de interferencia y la consideración de un factor aleatorio de desvanecimiento lento, el cual permite modelar efectos de degradación por obstrucciones y depende del modelo de propagación considerado [21].

La Tabla 5.4 presenta los parámetros generales de sistemas CLMR utilizados en el análisis de aislamiento mediante la aplicación del método numérico de Monte Carlo [21].

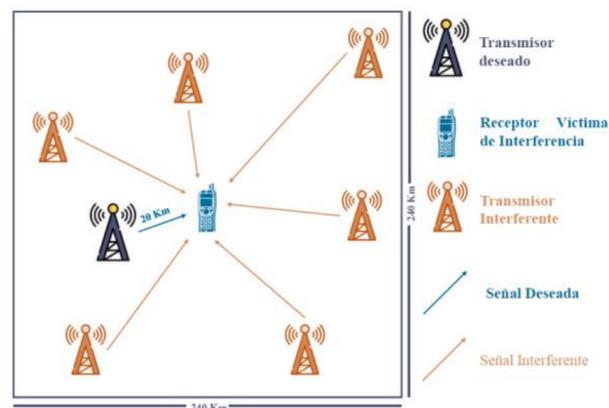
**Tabla 5.4:** Parámetros de radio móvil utilizados para el análisis de aislamiento mediante la aplicación del método numérico de Monte Carlo

Escenario <i>valle</i> LOS			
Potencia de transmisión	$(P_{INT})$	→	25 W   43.98 dBm
Ganancia de la antena repetidora	$(G_{INT})$	→	10 dBi
Ganancia de la antena móvil	$(G_{VICT})$	→	3 dBi
Frecuencia de trabajo	$(f)$	→	VHF: 138 MHz UHF: 470 MHz
Relación de protección	$(RFPR)$	→	VHF: 7 dB <sub> BW=25kHz</sub> 9 dB <sub> BW=12,5kHz</sub> UHF: 6 dB <sub> BW=25kHz</sub> 10 dB <sub> BW=12,5kHz</sub>
Nº de transmisores interferentes	-	→	1

Para el análisis de aislamiento, se empleó únicamente el modelo de propagación experimental del escenario de *valle* en condición de LOS, debido a que es el modelo de propagación que alcanza el máximo rango de distancias (de hasta 140 km).

Además, es el modelo que brinda las mejores condiciones de propagación, por lo que los resultados obtenidos garantizan un aislamiento adecuado entre sistemas CLMR en las bandas de frecuencia de VHF y UHF al considerar el peor caso en cuanto a propagación más favorable.

El método de Monte Carlo considera un único receptor víctima de interferencia ubicado en el centro del escenario de implementación, un transmisor deseado ubicado a una distancia de 20 km del receptor, y un único transmisor interferente distribuido aleatoriamente alrededor del receptor víctima de interferencia, tal y como se muestra en la Figura 5.5. El tamaño inicial del escenario de implementación tiene una dimensión de 240 km de largo x 240 km de ancho, el cual se va modificando con el fin de obtener el valor medio de distancia entre transmisor interferente y receptor víctima de interferencia que garantice una probabilidad de interferencia co-canal admisible [21].

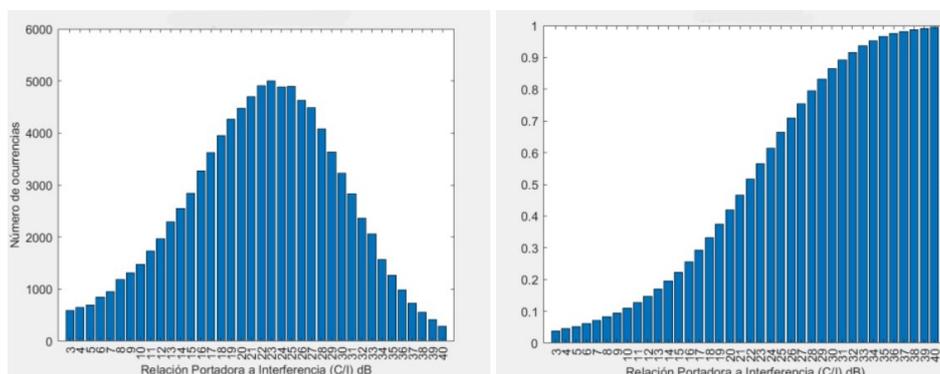


**Figura 5.5:** Escenario de implementación considerado en la aplicación del método numérico de Monte Carlo

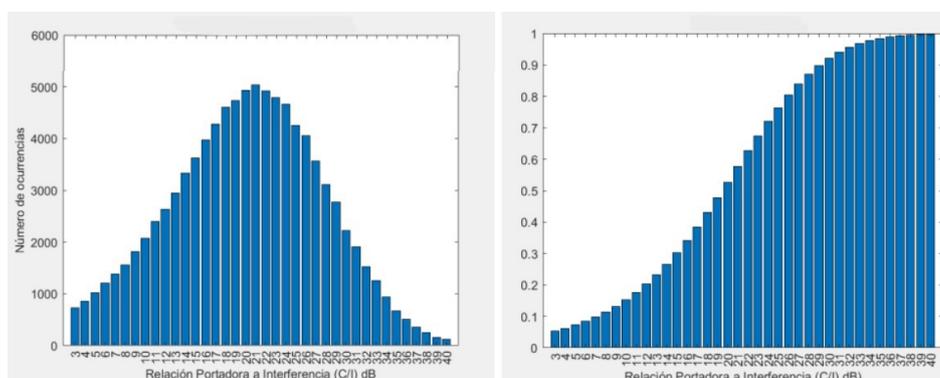
El análisis de aislamiento se inicia calculando el balance del enlace radioeléctrico de la señal deseada en el receptor víctima de interferencia, utilizando para ello el modelo de pérdidas de propagación de *valle* en LOS y los parámetros de los componentes del sistema. Luego, se ubica el transmisor interferente en el escenario de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme alrededor del receptor víctima de interferencia. Después, se calcula la distancia y el balance del enlace radioeléctrico de la señal interferente en el receptor víctima de interferencia, teniendo en cuenta el efecto del desvanecimiento lento y los valores límites de los parámetros que garanticen el mayor aislamiento posible de los sistemas frente a interferencia. Tras determinar los niveles de potencia de la señal recibida deseada y la señal recibida interferente en el receptor, se calcula la Relación Portadora a Interferencia (CIR, *Carrier to Interference Ratio*) de la realización.

El proceso se repitió 100.000 veces con el fin de obtener un número considerable de realizaciones del sistema y con ello obtener una tendencia estadística de los resultados, lo que permitió evaluar la probabilidad de que el receptor víctima de interferencia logre la RFPR requerida. Los resultados se presentan como histogramas de la CIR y la Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distributive Function*), obteniendo estas últimas a partir de los histogramas de la CIR y extrayendo la probabilidad de interferencia perjudicial en el receptor. En sistemas de comunicación, un criterio de interferencia aceptable, compatibilidad o de calidad de servicio, consiste en asegurar que la probabilidad de interferencia del sistema sea inferior o igual al 10 %, es decir, que se obtengan valores de la CIR en el receptor víctima de interferencia mayores a la RFPR establecida en al menos el 90 % de los casos.

Las Figuras 5.6 y 5.7 referidas a la banda VHF para BW igual a 12.5 kHz y 25 kHz, respectivamente, junto con las Figuras 5.8 y 5.9 referidas a la banda UHF para BW igual a 12.5 kHz y 25 kHz, respectivamente, presentan los resultados de aplicación del método de Monte Carlo considerando un único transmisor interferente y el modelo de propagación de *valle* en condiciones de LOS. Las figuras están compuestas por dos imágenes, donde en la parte izquierda se presentan los histogramas de la CIR, mientras que en la parte derecha se presenta la CDF. El eje horizontal del histograma representa el rango de posibles valores de la CIR que pueden ser obtenidos en cada iteración de la simulación aplicando un truncamiento para obtener únicamente el número natural en dB. Por otra parte, el eje horizontal de la CDF, al igual que en el histograma de la CIR, representa el rango de posibles valores de la CIR que pueden ser obtenidos, mientras que el eje vertical representa la probabilidad de que la CIR sea menor o igual al rango considerado en el eje horizontal [21].



**Figura 5.6:** Histograma de la CIR (izquierda) y la CDF (derecha) con  $BW = 12.5$  kHz en VHF



**Figura 5.7:** Histograma de la CIR (izquierda) y la CDF (derecha) con  $BW = 25$  kHz en VHF

En la Tabla 5.5 se presentan los resultados de la aplicación del método de Monte Carlo para la banda VHF. En ella, se contemplan los valores de la media y desviación estándar de la variable aleatoria CIR, junto con el valor de distancia promedio que garantiza una probabilidad de interferencia co-canal para la banda VHF menor o igual al 10%, es decir,  $P_r(CIR \leq 9 \text{ dB}) \leq 0,1$  para  $BW = 12.5$  kHz y  $P_r(CIR \leq 7 \text{ dB}) \leq 0,1$  para  $BW = 25$  kHz, empleando las RFPR obtenidas en las pruebas de laboratorio para los distintos BW.

**Tabla 5.5:** Resultados de la aplicación del método numérico de Monte Carlo en la banda VHF

VHF Valle LOS	Media CIR	Desviación estándar	Probabilidad interferencia	Tamaño escenario	Distancia promedio
BW = 12.5 kHz	20.81 dB	8.98	0.096	285 x 285	108.65 km
BW = 25 kHz	18.62 dB	8.97	0.098	240 x 240	92.08 km

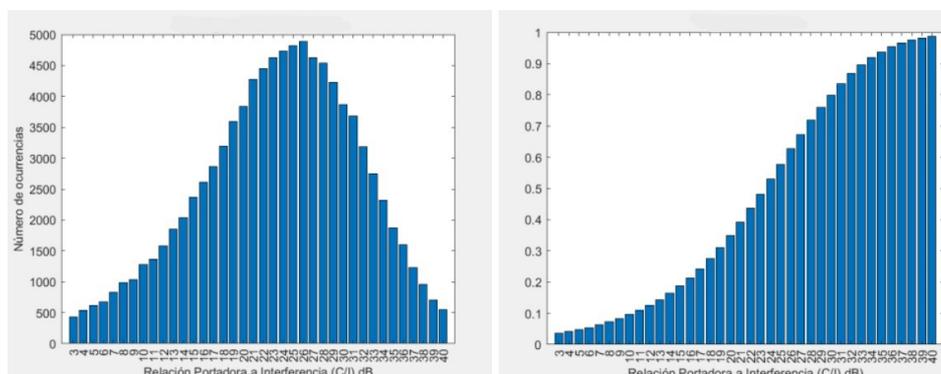


Figura 5.8: Histograma de la CIR (izquierda) y la CDF (derecha) con BW = 12.5 kHz en UHF

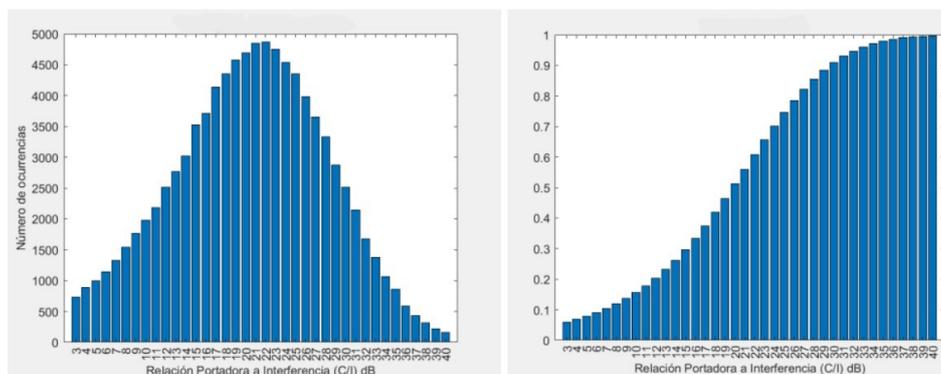


Figura 5.9: Histograma de la CIR (izquierda) y la CDF (derecha) con BW = 25 kHz en UHF

En la Tabla 5.6 se presentan los resultados de la aplicación del método de Monte Carlo para la banda UHF, donde se contemplan los valores de la media y desviación estándar de la variable aleatoria CIR, junto con el valor de distancia promedio que garantiza una probabilidad de interferencia co-canal para la banda UHF menor o igual al 10%, es decir,  $P_r(CIR \leq 10 \text{ dB}) \leq 0,1$  para BW = 12.5 kHz y  $P_r(CIR \leq 6 \text{ dB}) \leq 0,1$  para BW = 25 kHz, empleando las RFPR obtenidas en las pruebas de laboratorio para los distintos BW.

Tabla 5.6: Resultados de la aplicación del método numérico de Monte Carlo en la banda UHF

UHF Valle LOS	Media [dB]	Desviación estándar	Probabilidad interferencia	Tamaño escenario	Distancia promedio
BW = 12.5 kHz	21.51 dB	9.47	0.096	255 x 255	94.86 km
BW = 25 kHz	18.73 dB	9.44	0.096	210 x 210	80.60 km

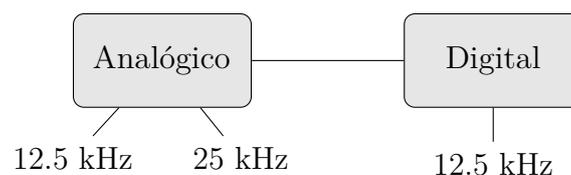
Por tanto, las distancias promedio entre un transmisor interferente y un receptor víctima de interferencia sugeridos por el método de Monte Carlo haciendo uso de los modelos de propagación experimentales y las RFPR halladas a nivel de laboratorio son recopiladas en la siguiente Tabla 5.7:

**Tabla 5.7:** Distancias promedio entre un transmisor interferente y un receptor víctima de interferencia según el método de Monte Carlo para las bandas VHF y UHF

	BW = 12.5 kHz	BW = 25 kHz
VHF	108.65 km	92.08 km
UHF	94.86 km	80.60 km

## 5.2 Análisis de interferencia de canal adyacente

Las pruebas basadas en la metodología expuesta en la sección 2.8.1 del Capítulo 2 se realizaron para las bandas de frecuencia VHF y UHF con anchos de banda de 12.5 kHz y 25 kHz en modo analógico y únicamente con ancho de banda 12.5 kHz en modo digital dado que se trata de tecnología DMR con un estándar propio. Este esquema de pruebas se ilustra en la Figura 5.10.



**Figura 5.10:** Esquema de pruebas para diferentes canales y anchos de banda

Es importante resaltar que, durante las pruebas realizadas, no fue posible considerar el ancho de banda de 6.25 kHz ni en modo analógico ni en digital, así como tampoco fue posible considerar el ancho de banda de 25 kHz en modo digital, debido a que tanto los radios empleados como las estaciones repetidoras no implementan tecnologías CLMR que permitan la configuración de estos anchos de banda específicos [21].

Para las pruebas de interferencia de canal adyacente, se utilizaron tres repetidores dispuestos en la misma ubicación geográfica o emplazamiento, cada uno de ellos separado en frecuencia en un número determinado de canales. Específicamente, cada repetidor se configuró siguiendo la metodología expuesta en la sección 2.8.1 con una disposición de canales siguiendo el esquema de la Figura 2.23. Con base en esta configuración, es posible realizar pruebas entre dos sistemas que operan en dos canales contiguos ( $N, N+1$ ), dos sistemas que operan con un canal de separación entre ellos ( $N+1, N+3$ ) y dos sistemas que operan con dos canales de separación ( $N, N+3$ ), con el cometido de determinar de manera experimental qué tan separados en frecuencia deben estar dos sistemas CLMR para que puedan operar libremente sin interferencias mutuas [21].

Se realizaron las pruebas con tres radios portátiles estableciendo conexión con las tres estaciones repetidoras con el objetivo de que, al activar y enviar mensajes de voz sobre dos de los últimos al mismo tiempo, se escuchase en el tercero si la voz de un canal se escucha o intercepta en un canal diferente. Este procedimiento se realizó con el fin de analizar de manera subjetiva cual debe ser la separación mínima en frecuencia entre los sistemas CLMR que se instalan en un mismo emplazamiento.

Por otro lado, también se realizó un procedimiento objetivo con ayuda del analizador de espectro para observar los posibles productos de intermodulación que pueden presentarse en el momento en que dos sistemas operando en frecuencias cercanas se activaban al mismo tiempo.

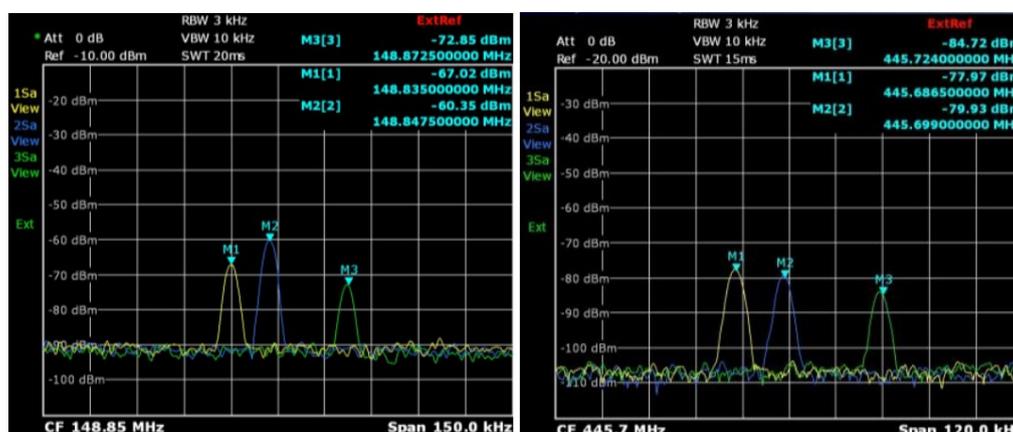
### 5.2.1 Estudio analógico

El estudio de interferencia de canal adyacente dio comienzo con el sistema configurado en su modo analógico, por lo que tanto radios como estaciones repetidoras se configuraron para dicho cometido. Las pruebas se realizaron en la Universidad del Cauca, donde se alojaban las radios portátiles así como el analizador de espectros empleado, a una distancia de aproximadamente 3 km entre la universidad y las estaciones repetidoras. El estudio se realizó para las bandas VHF y UHF, empleando el equipamiento descrito en el Capítulo 3 para estas bandas.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos distinguiendo el ancho de banda configurado y presentando ambas bandas de estudio.

### 5.2.1.1 Sistemas analógicos operando con un BW de 12.5 kHz

En primer lugar, se presentan en la Figura 5.11 los canales empleados para llevar a cabo las pruebas de interferencia de canal adyacente para los sistemas CLMR analógicos operando con un BW igual a 12.5 kHz en la banda de frecuencia de VHF y UHF. El marcador  $M_1$  representa el canal N, el marcador  $M_2$  representa el canal N+1 y el marcador  $M_3$  representa el canal N+3.



**Figura 5.11:** Canales analógicos utilizados en las bandas VHF (izquierda) y UHF (derecha) operando con un BW de 12.5 kHz

### Efectos de intermodulación

La problemática de este tipo de interferencia radica en la presencia de intermodulación en los canales deseados producida por la transmisión en canales adyacentes y las no linealidades de los dispositivos no lineales presentes en el sistema. Los productos de intermodulación de tercer orden del tipo son los más perjudiciales, ya que operan muy cerca de las señales de interés, son de mayor potencia y son difíciles de filtrar.

Para observar estos efectos de intermodulación, se emplea el analizador de espectro con marcadores señalando las frecuencias conflictivas donde aparecen productos de intermodulación de tercer orden.

- **Activación de repetidores N y N+1 con BW = 12.5 kHz en analógico**

En la Figura 5.12 se presentan los efectos de intermodulación producidos cuando los repetidores N y N+1 se activaron simultáneamente. Se observa que se obtuvieron productos de intermodulación en cercanías del canal N+3 y en frecuencias muy cercanas a las frecuencias de interés representados mediante el marcador  $M_4$ , siendo más significativos para la banda VHF que para la banda UHF.

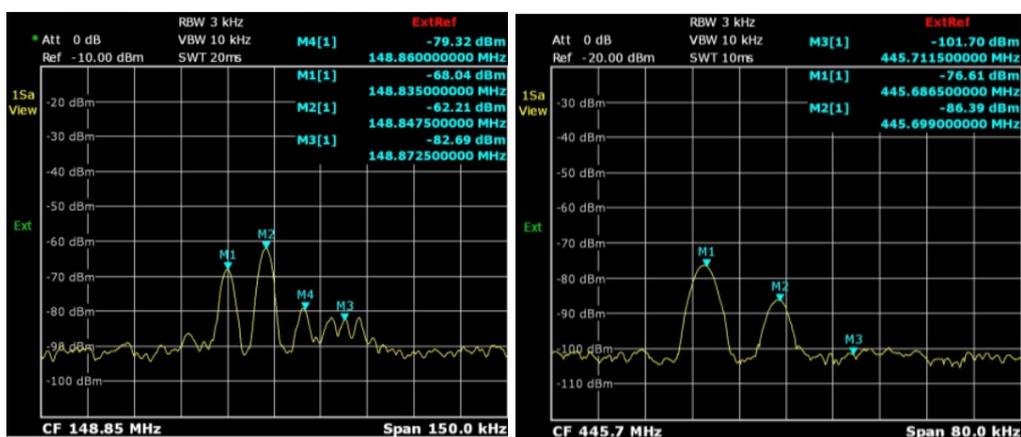


Figura 5.12: Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando simultáneamente con BW de 12.5 kHz en canales inmediatamente adyacentes en VHF (izquierda) y UHF (derecha)

Lo anterior se validó con ayuda de los radios, ya que al activar dos de ellos simultáneamente y al hablar sobre el canal N se escuchó la voz en el canal N+1 y viceversa, así como también se escuchó la interferencia en el canal N+3 en ambas bandas de frecuencia [21].

- **Activación de repetidores N+1 y N+3 con BW = 12.5 kHz en analógico**

En la Figura 5.13 se presentan los efectos de intermodulación producidos cuando los repetidores N+1 y N+3 se activaron simultáneamente. Se observa que al tener una separación de un canal entre ellos los productos de intermodulación de tercer orden representados mediante el marcador  $M_4$  son menos significativos y están más alejados de las frecuencias de interés tanto para la banda VHF como para UHF.

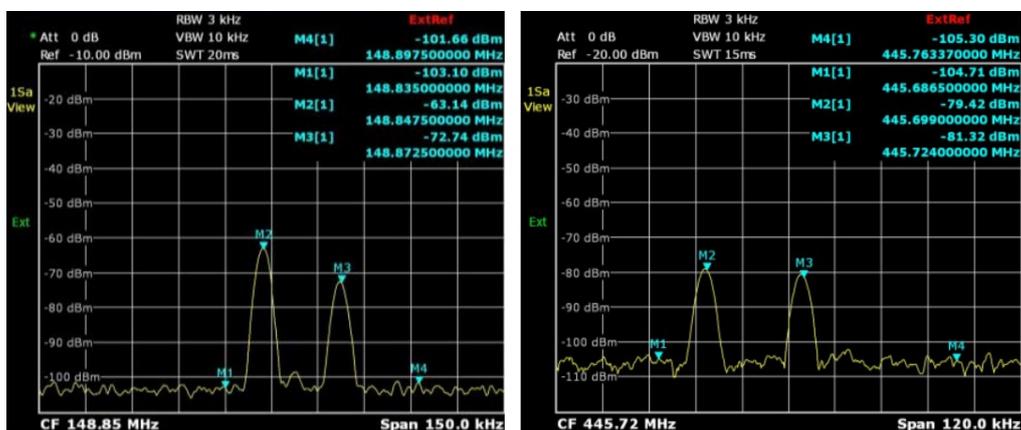
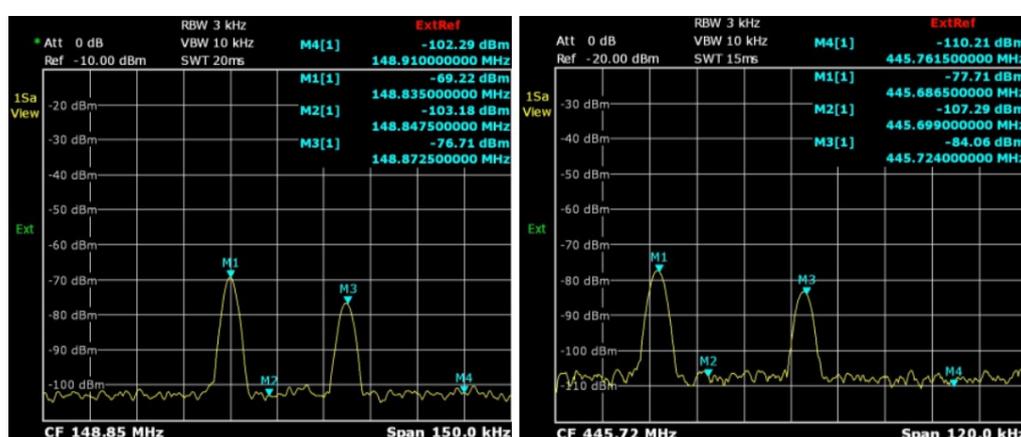


Figura 5.13: Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando simultáneamente con BW de 12.5 kHz y una separación de 1 canal para las bandas VHF (izquierda) y UHF (derecha)

Al activar dos de los radios sintonizados en dichos canales y al hablar sobre el canal N+1 se escuchó la voz en el canal N+3 y viceversa, con una intensidad notablemente reducida en ambas bandas de frecuencia [21].

- **Activación de repetidores N y N+3 con BW = 12.5 kHz en analógico**

En la Figura 5.14 se presentan los efectos de intermodulación producidos cuando los repetidores N y N+3 se activaron simultáneamente. Se observa que al tener una separación de dos canales entre ellos no se obtienen productos de intermodulación, tanto para la banda VHF como para la banda UHF.



**Figura 5.14:** Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando simultáneamente con BW de 12.5 kHz con una separación de 2 canales para las bandas VHF (izquierda) y UHF (derecha)

Al validar este hecho con ayuda de los radios, se comprueba que al activar dos de ellos simultáneamente y al hablar sobre el canal N no se escucha la voz en el canal N+3 y viceversa [21].

Con base en estos resultados, se estima que separando dos sistemas analógicos operando con un BW igual a 12.5 kHz **al menos dos canales** en un mismo emplazamiento, es suficiente para que ambos operen adecuadamente sin interferencias de canal adyacente significativas.

### 5.2.1.2 Sistemas analógicos operando con un BW de 25 kHz

Para la siguiente prueba de interferencia de canal adyacente, se configuran los radios con ancho de banda igual a 25 kHz, lo que supone un cambio en las frecuencias de operación de los canales, como ilustra la Figura 5.15 para las bandas de frecuencias de VHF y UHF. Para VHF, el marcador  $M_1$  representa el canal N, el marcador  $M_2$  representa el canal N+1 y el marcador  $M_3$  representa el canal N+2, mientras que para UHF, el marcador  $M_1$  representa el canal N, el marcador  $M_2$  representa el canal N+1 y el marcador  $M_3$  representa la frecuencia donde pueden ocurrir efectos de intermodulación producidos por los canales N y N+1. En este caso no se cuenta con un canal N+3 en VHF ni con un canal N+2 en UHF debido a los límites espectrales concedidos a la Universidad del Cauca para las pruebas experimentales del proyecto [21].

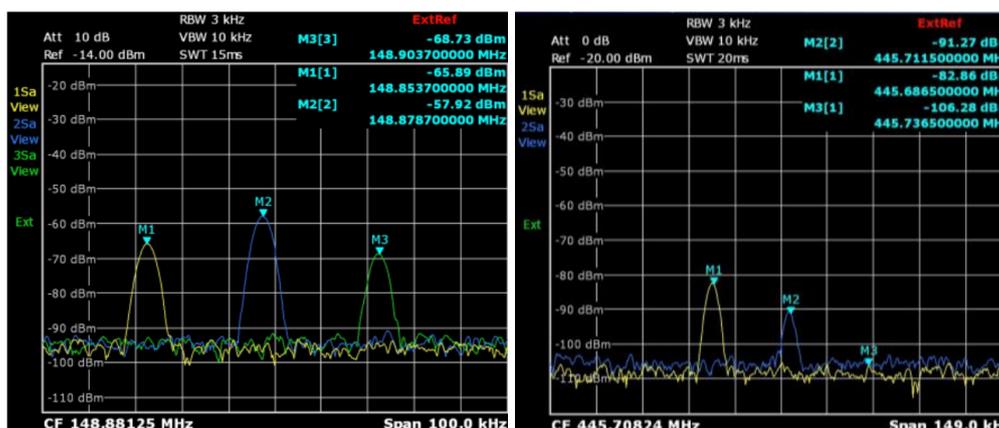


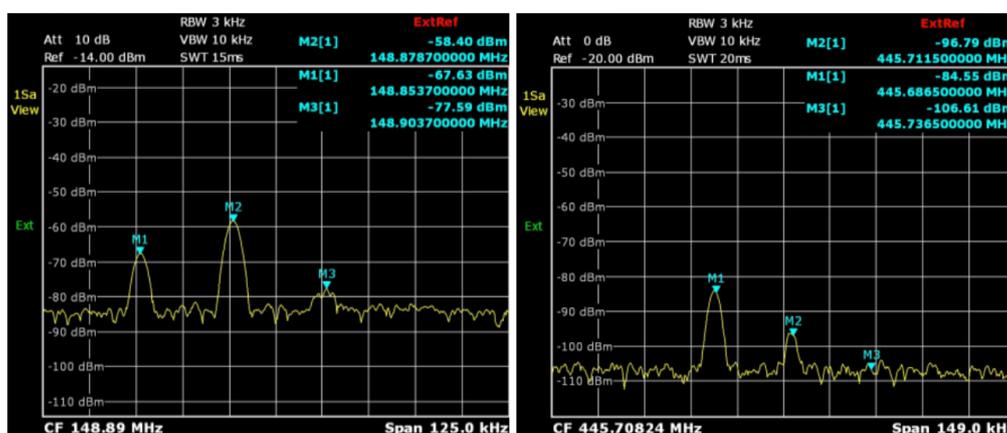
Figura 5.15: Canales analógicos utilizados en las bandas VHF (izquierda) y UHF (derecha) operando con un BW de 25 kHz

#### Efectos de intermodulación

- **Activación de repetidores N y N+1 con BW = 25 kHz en modo analógico**

En la Figura 5.16 se presentan los efectos de intermodulación producidos cuando los repetidores N y N+1 se activaron simultáneamente. Se observa que se obtuvieron productos de intermodulación en cercanías del canal N+2, representado mediante el marcador  $M_3$ , siendo más significativos para VHF que para UHF.

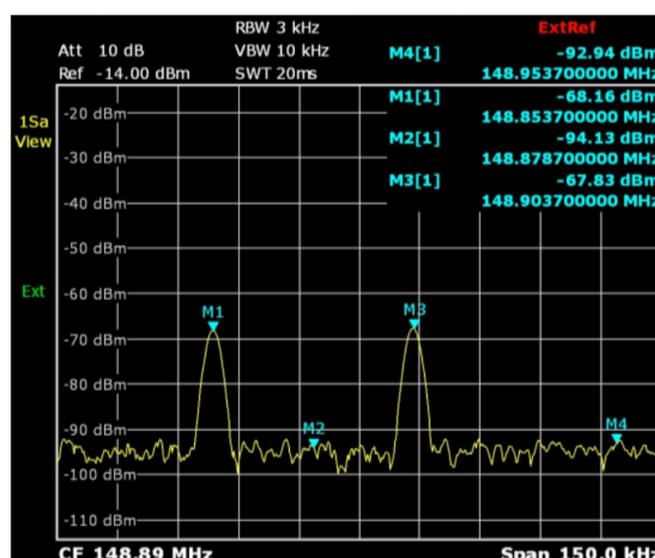
Al activar dos de los radios simultáneamente y al hablar sobre el canal N se escuchó la voz en el canal N+1 y viceversa, así como también se escuchó la interferencia en el canal N+2 [21].



**Figura 5.16:** Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando simultáneamente con BW de 25 kHz en canales inmediatamente adyacentes en VHF (izquierda) y UHF (derecha)

- **Activación de repetidores N y N+2 con BW = 25 kHz en modo analógico**

En la Figura 5.17 se presentan los efectos de intermodulación producidos cuando los repetidores N y N+2 se activaron simultáneamente en la banda VHF<sup>1</sup>. Se observa que, al tener una separación de un canal, los productos de intermodulación de tercer orden representados mediante el marcador  $M_4$  son menos significativos y están más alejados de las frecuencias de interés.



**Figura 5.17:** Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores analógicos operando con BW de 25 kHz y una separación de 1 canal para la banda VHF

<sup>1</sup> Se debe destacar que este mismo procedimiento no es posible realizarlo para la banda de UHF debido a que no se cuenta con un canal N+2 por las limitaciones del espectro adjudicado para la realización del proyecto.

Al activar dos de los radios sintonizados en dichos canales y al hablar sobre el canal N no se escuchó la voz en el canal N+2 y viceversa para la banda de VHF. Sin embargo, al presentarse efectos de intermodulación, será necesario mantener un canal adicional de separación para garantizar el funcionamiento de este tipo de sistemas libre de interferencias [21].

Por lo tanto, basándose en los resultados obtenidos de las pruebas de canal adyacente, se observa que para sistemas analógicos que operan en la banda de VHF y UHF con un BW de 12.5 kHz así como operando en la banda VHF con BW de 25 kHz es necesario mantener mínimo dos canales de separación en un mismo emplazamiento para evitar productos de intermodulación e interferencias mutuas entre los sistemas. Sin embargo, no es posible concluir lo mismo para sistemas analógicos que operan en la banda de UHF con un BW de 25 kHz debido a que no se cuenta con un canal N+2 por las limitaciones de uso del espectro para realizar las pruebas.

## 5.2.2 Estudio digital

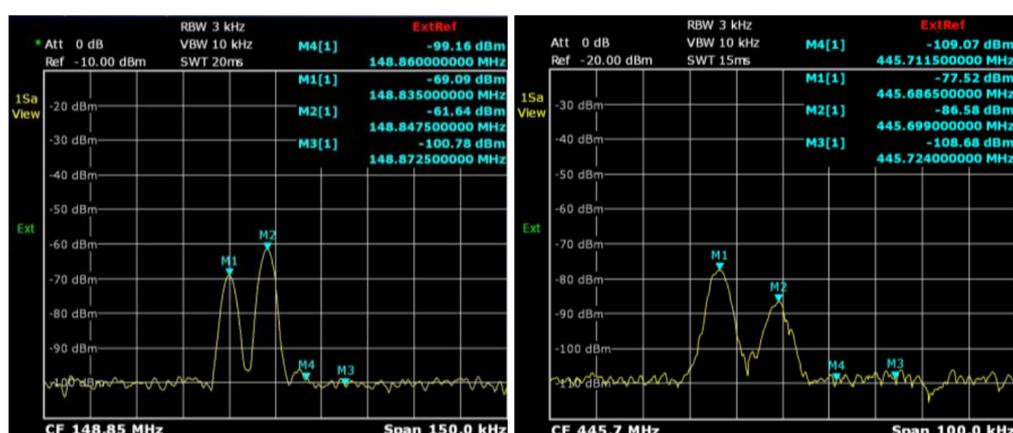
El análisis de interferencia de canal adyacente prosiguió con la configuración de los equipos en modo digital. Las pruebas se realizaron en las mismas condiciones que las establecidas para el modo analógico (radios portátiles y analizador de espectro en la Universidad del Cauca y a una distancia de aproximadamente 3 km de las estaciones repetidoras) para las dos bandas de estudio, VHF y UHF, empleando de nuevo el equipamiento descrito en el Capítulo 3.

El sistema digital únicamente puede operar a  $BW = 12.5$  kHz debido al estándar DMR y la limitación de configuración de los equipos. Por ello, a continuación se detallan los resultados obtenidos para el único ancho de banda configurado distinguiendo ambas bandas de estudio.

### 5.2.2.1 Sistemas digitales operando con un BW de 12.5 kHz

En la Figura 5.18 se presentan los **efectos de intermodulación** producidos cuando los repetidores N y N+1 en modo digital se activaron simultáneamente. Se observa que no se obtienen productos de intermodulación significativos en cercanías del canal N+3, ni en frecuencias cercanas a las frecuencias de interés representados mediante el marcador  $M_4$ , tanto para la banda de VHF como para la banda de UHF.





**Figura 5.18:** Efectos de intermodulación producidos por dos repetidores digitales operando simultáneamente con BW de 12.5 kHz en canales inmediatamente adyacentes en VHF (izquierda) y UHF (derecha)

Lo anterior se validó con ayuda de los radios ya que, al activar dos de ellos simultáneamente y al hablar sobre el canal N, no se escuchó la voz en el canal N+1 y viceversa, así como tampoco se escuchó interferencia en el canal N+3.

Es posible tener dos sistemas **digitales** operando cada uno con BW igual a 12.5 kHz en **canales inmediatamente adyacentes** en la misma ubicación geográfica sin producirse interferencia significativa entre ellos.

Se prescinde de evaluar el comportamiento de este tipo de interferencia con más canales de separación debido a los resultados favorables obtenidos evaluando el efecto de la interferencia de canal adyacente para canales inmediatamente contiguos.

La mejora en el rendimiento de un mismo radio al trabajar con tecnología digital en comparación con la tecnología analógica, a pesar de tener ambos el mismo nivel de sensibilidad, se atribuye a las ventajas inherentes de los sistemas digitales sobre los analógicos. En los sistemas digitales, el proceso de codificación y transmisión de símbolos simplifica la señal, lo que facilita el filtrado de interferencias en el receptor mediante la decodificación y reconstrucción de la misma. Además, algunos sistemas digitales cuentan con funciones de corrección de errores y componentes diseñados para eliminar la interferencia, como filtros digitales que pueden ajustarse dinámicamente según las condiciones de la señal.

En resumen, para sistemas digitales que operan en la banda de VHF y UHF con un BW de 12.5 kHz, los sistemas pueden operar en canales inmediatamente adyacentes en un mismo emplazamiento sin generar efectos de intermodulación ni interferencia mutua significativa, mientras que trabajando con sistemas analógicos que operan en la banda de VHF y UHF con un BW de 12.5 kHz así como operando en la banda VHF con BW de 25 kHz es necesario mantener mínimo dos canales de separación en un mismo emplazamiento para un funcionamiento libre de interferencia de canal adyacente.

### **5.3 Conclusiones**

Este capítulo aborda la presentación de resultados de los métodos analíticos E-MCL y Rec. ITU SM.337 alternativo que, junto con el método numérico de Monte Carlo, permiten obtener distancias a las cuales la operabilidad del sistema en términos de interferencia co-canal es admisible, reduciendo así el espacio físico presente entre las estaciones repetidoras y los terminales móviles operando a frecuencias entre 138 y 470 MHz. Además, se realiza un estudio de interferencia de canal adyacente que complementa las conclusiones propuestas por los métodos ejecutados para la interferencia co-canal, completando el análisis de interferencia para el Departamento del Cauca. Explorando la influencia de los efectos de la intermodulación producidos al coexistir transmisiones simultáneas en canales próximos, se llega a estimar que la separación mínima entre canales para sistemas digitales con BW igual a 12.5 kHz operando en las bandas VHF y UHF es nula, es decir, dos transmisiones en canales inmediatamente adyacentes cumplen con la admisibilidad de interferencia dando fruto a una comunicación favorable, mientras que en un sistema analógico a ese mismo BW y para las mismas bandas de estudio requiere de al menos dos canales para evitar una influencia considerable de la intermodulación.

A partir de estos resultados, se procede a enumerar las recomendaciones finales que componen el Capítulo 6 entregadas a la ANE cumpliendo con el cometido de mejorar el uso del espectro a partir de relaciones distancia-frecuencia que permiten disminuir la separación física entre estaciones repetidoras y equipos móviles operando en el rango de frecuencias de 138 a 470 MHz para los territorios colombianos con escenarios analizados.



# CAPÍTULO 6

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

---

6.1	Discusión de resultados . . . . .	144
6.1.1	Discusión sobre los resultados del método numérico . . . . .	144
6.1.2	Discusión sobre los resultados de los métodos analíticos . . . . .	146
6.2	Recomendaciones sobre sistemas CLMR realizadas a la ANE . . . . .	147
6.2.1	Recomendaciones sobre sistemas operando en la misma frecuencia	147
6.2.2	Recomendaciones sobre sistemas operando en frecuencias adyacentes	148
6.2.3	Recomendaciones adicionales sobre sistemas CLMR . . . . .	149
6.3	Conclusiones . . . . .	151

---

El presente capítulo incluye las recomendaciones finales redactadas por el equipo de trabajo en el que formo parte, con el objetivo de ofrecer a la ANE un conjunto de soluciones que permitan a los sistemas CLMR un uso eficiente del espectro y una operación coordinada, sin efectos adversos considerables por interferencia.

Las recomendaciones toman como base los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a nivel de laboratorio y a nivel de campo sobre sistemas CLMR implementados en el escenario real de los Departamentos del Cauca y Valle del Cauca teniendo en cuenta las normas y reportes de organismos internacionales que garantizan la compatibilidad electromagnética entre los diferentes sistemas de comunicación que hacen uso del espectro radioeléctrico. Estas recomendaciones brindan un marco de referencia para futuros estudios relacionados con el aislamiento requerido entre sistemas de comunicaciones inalámbricos [21].

## 6.1 Discusión de resultados

Comenzando con la discusión de los resultados, se distinguen diversos bloques de estudio dentro del marco del proyecto, siendo de mayor importancia aquellos asociados a los métodos numérico-analíticos, ya que incorporan una visión extendida de los resultados planteados en el Capítulo 5.

Se recuerda que los métodos numérico-analíticos se evalúan únicamente considerando el caso límite, es decir, el mejor escenario propagativo: *valle* en condiciones de LOS.

### 6.1.1 Discusión sobre los resultados del método numérico

Los resultados de la aplicación del método numérico se detalla en la sección 5.1.2 del Capítulo 5, donde la Tabla 5.7 muestra las distancias promedio entre un transmisor interferente y un receptor víctima de interferencia, para las bandas VHF y UHF y los BW considerados -12.5 kHz y 25 kHz-. No obstante, para determinar la distancia entre dos estaciones que operen a la misma frecuencia, se debe considerar a mayores la distancia de dicho receptor hasta el transmisor deseado.



En fases teóricas previas de este proyecto, mis compañeros establecieron 20 km como un valor adecuado para este cálculo lo que, sumando esta nueva variable a las distancias obtenidas en la Tabla 5.7, conlleva a las distancias promedio entre estaciones repetidoras mostradas en la Tabla 6.1:

**Tabla 6.1:** Distancia promedio mínima que debe existir entre sistemas CLMR que operan en la misma frecuencia para asegurar un aislamiento adecuado

	BW = 12.5 kHz	BW = 25 kHz
VHF	128.65 km	112.08 km
UHF	114.86 km	100.60 km

Además, se debe tener en cuenta tal y como se demostró en una fase previa del proyecto [22], que para los sistemas CLMR operando en las frecuencias de estudio, cualquier obstrucción entre la estación base y los dispositivos receptores móviles atenúan de manera significativa la señal transmitida debido a la obstrucción y al fenómeno de difracción. Este hecho desfavorable en términos propagativos tiene una consecuencia muy interesante para el aprovechamiento espectral: estaciones repetidoras pueden coexistir operando en la misma frecuencia a distancias cercanas siempre y cuando la presencia de una barrera natural se encuentre en la trayectoria de la señal, provocando la ausencia de interferencia perjudicial entre los sistemas.

Este hecho se respalda por los alcances máximos obtenidos en la campaña de medición, donde los escenarios *andinos* presentaban una mayor restricción propagativa en comparación con los escenarios de *valle*. Muchas de las transmisiones no eran satisfactorias debido a los accidentes naturales que actúan como barrera entre distintas zonas, lo que implica incomunicación total y a su vez la posibilidad de coexistencia de estaciones repetidoras a distancias menores a las estimadas por los métodos numérico-analíticos. No obstante, evaluar el emplazamiento óptimo de las estaciones repetidoras que conforman los sistemas de comunicación basando dichas localizaciones en esta premisa, requiere de mucho tiempo y recursos al tener que evaluar el perfil del terreno tanto con herramientas software de estimación de cobertura como de forma práctica. Aunque esta metodología implicaría un uso del espectro eficiente, en muchas ocasiones estas verificaciones orográficas no serán viables para la implantación de nuevos sistemas de comunicación -ya sea por falta de tiempo, financiación o recursos-, por lo que las recomendaciones cobran una mayor importancia al servir como guía y referencia.

### 6.1.2 Discusión sobre los resultados de los métodos analíticos

Por otra parte, los resultados obtenidos mediante la aplicación de los métodos analíticos permiten establecer una relación entre el desplazamiento en frecuencia y la distancia máxima estimada por el método numérico de Monte Carlo.

Mediante el estudio de la relación existente entre la distancia y el porcentaje<sup>1</sup> de dicha distancia máxima asociado a los desplazamientos en frecuencia analizados -12.5 kHz y 25 kHz- dependiendo de la máscara espectral, mis compañeros componen la siguiente Tabla 6.2 donde se encuentran los valores finales estimados según la frecuencia empleada y el número de canales de separación del que disponga el sistema frente a los sistemas coexistentes.

**Tabla 6.2:** Distancia promedio mínima que debe existir entre sistemas CLMR a medida que se incrementa la separación en frecuencia

	Separación frecuencial = 1 canal		Separación frecuencial = 2 canales	
	BW = 12.5 kHz	BW = 25 kHz	BW = 12.5 kHz	BW = 25 kHz
VHF	10 km	18 km	4 km	8 km
UHF	8 km	15 km	3 km	6 km

Estos resultados concuerdan con el análisis experimental de interferencia de canal adyacente realizado en la Universidad del Cauca, que demostró que para una distancia de en torno a 3 km en modo analógico se requerían al menos dos canales de separación para una transmisión libre de interferencia producida por los efectos de la intermodulación. Además, esta verificación permite extrapolar con cierta concordancia y fiabilidad los valores presentes en la Tabla 6.2 a un caso real.

Cabe destacar que dicha relación no es veraz si el sistema trabaja en modo digital, ya que las pruebas experimentales demostraron que, incluso a distancias reducidas, la operabilidad en canales estrictamente adyacentes es posible y satisfactoria, lo que aporta una gran ventaja a la hora de hacer un uso responsable y eficiente del espectro.

<sup>1</sup> Dicho porcentaje representa la disminución de la distancia a medida que se incrementa la separación en frecuencia entre sistemas CLMR con respecto al máximo valor de distancia considerado para el modelo de propagación, el cual es obtenido para un desplazamiento en frecuencia desde 0 Hz (interferencia co-canal) hasta los límites de las bandas de estudio analizadas (interferencia de canal adyacente).

## 6.2 Recomendaciones sobre sistemas CLMR realizadas a la ANE

Una vez extraídos todos los comentarios relevantes, se incluye el conjunto de recomendaciones elaboradas para la ANE, con el fin de brindar información que guíe a esta entidad en la tarea de mejorar la eficiencia del espectro en el territorio colombiano.

Las recomendaciones detalladas a continuación se dividen en tres bloques dando especial importancia a la relación distancia-frecuencia, por lo que los primeros dos bloques distinguen aquellos sistemas que operan a misma frecuencia, en el cual el punto de mira se establece en la distancia mínima que debe existir entre estaciones CLMR para un correcto funcionamiento libre de interferencia co-canal ( $d|_{\Delta f=0}$ ), mientras que el segundo bloque describe los sistemas donde las frecuencias de las estaciones establecidas en un mismo emplazamiento son adyacentes pero no iguales. En este segundo caso, se focaliza en la separación en frecuencia, ya que la distancia entre estaciones es nula ( $\Delta f|_{d=0}$ ). Por último, se incluye un bloque adicional que relata otros aspectos de interés para la optimización espectral, dando fin de esta forma a las recomendaciones halladas en este análisis de interferencia desarrollado por la Universidad del Cauca.

### 6.2.1 Recomendaciones sobre sistemas operando en la misma frecuencia

Las primeras recomendaciones se basan en los resultados finales presentados en la Tabla 6.1, que estipula las siguientes distancias mínimas de separación según el BW de operación para estaciones CLMR que operan en la misma frecuencia:

- ★ Se recomiendan las distancias mínimas de 115 km para VHF y 129 km para UHF para separar estaciones CLMR co-canal operando con  $BW = 12.5$  kHz.
- ★ Se recomiendan las distancias mínimas de 101 km para VHF y 112 km para UHF para separar estaciones CLMR co-canal operando con  $BW = 25$  kHz.

Estas recomendaciones se consideran dentro de la banda de frecuencias de 138-174 MHz en VHF y 440-470 MHz en UHF, con el fin de garantizar una probabilidad de interferencia co-canal mínima y admisible según lo establecido en los criterios cuantitativos de interferencia y de compartición que figuran en Rec. ITU-R, acuerdos especiales o el RR de la ITU [43]. Estas distancias concuerdan con las recomendaciones planteadas por



organismos de regulación internacional, tales como la Comisión Federal de Comunicaciones o la ITU, que coinciden en la premisa de que la separación entre sistemas CLMR operando en la misma frecuencia debe ser de al menos 120 km.

Por último, se incluye un apunte final sobre sistemas operando en la misma frecuencia:

- ★ Se recomienda considerar las barreras naturales en el estudio general de asignación de frecuencias, debido a que la presencia de grandes obstáculos, tales como montañas y cordilleras en cercanías de las estaciones de los sistemas CLMR, limitan considerablemente el alcance del sistema de comunicación o su área de servicio, debido a la atenuación por obstrucción y por difracción a las frecuencias consideradas.

### 6.2.2 Recomendaciones sobre sistemas operando en frecuencias adyacentes

El listado de recomendaciones continúa tomando como base la Tabla 6.2 considerando desplazamientos en frecuencia de un canal y de dos canales para estaciones CLMR.

En cuanto a sistemas CLMR analógicos:

- ★ Se recomienda contar con al menos dos canales de separación entre sistemas CLMR analógicos que operen en un mismo emplazamiento -ya sea en la banda VHF o UHF, o con BW de 12.5 kHz o 25 kHz- para garantizar un funcionamiento adecuado sin interferencias mutuas significativas (probabilidad de interferencia menor o igual al 10 %). Esta recomendación está respaldada tanto por los métodos analíticos como por las pruebas de campo asociadas al análisis de la interferencia de canal adyacente.
- ★ Se recomienda mantener una distancia mínima de separación entre sistemas CLMR analógicos con BW = 25 kHz de 18 km y 15 km para VHF y UHF, respectivamente, cuando existe una separación en frecuencia de un canal; y una distancia mínima de separación de 8 km y 6 km para VHF y UHF, respectivamente, cuando existe una separación en frecuencia de dos canales.
- ★ Se recomienda mantener una distancia mínima de separación entre sistemas CLMR analógicos con BW = 12.5 kHz de 10 km y 8 km para VHF y UHF, respectivamente, cuando existe una separación en frecuencia de un canal; y una distancia mínima de separación de 4 km y 3 km para VHF y UHF, respectivamente, cuando existe una separación en frecuencia de dos canales.



En cuanto a sistemas CLMR digitales:

- ★ Los sistemas digitales que operan en las bandas de VHF y UHF con  $BW = 12.5$  kHz (tecnología DMR) pueden operar en canales inmediatamente adyacentes y en un mismo emplazamiento, sin generar efectos significativos de intermodulación, ni interferencias mutuas.

### 6.2.3 Recomendaciones adicionales sobre sistemas CLMR

En último lugar, se incluyen aspectos adicionales que pueden ser de interés para emplear tecnologías adecuadas e innovadoras que incluyan unas características prometedoras:

- ★ Se recomienda motivar y promover la adopción de tecnologías digitales en sistemas de CLMR, debido a que los resultados obtenidos del proyecto de investigación demuestran que sistemas digitales con tecnología DMR pueden operar en canales inmediatamente adyacentes en un mismo emplazamiento, sin producir interferencia significativa entre ellos, siempre y cuando cumplan con los parámetros técnicos de operación y requisitos de seguridad.

Entre las ventajas de utilizar los sistemas CLMR digitales se encuentran:

- Empleando el modo simplex, se puede implementar un sistema de repetición (*talk around*) para incrementar el área de comunicación.
- Ampliación de la cobertura empleando repetidores actuando en *simulcast*<sup>2</sup>.
- Uso de algoritmos avanzados para la codificación de señales analógicas (codificación de fuente). Además permiten ofrecer servicios basados en el Protocolo de Internet (*Internet Protocol*, IP).
- Menor consumo de energía en sistemas basados en Acceso Múltiple Por División en el Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) -debido a su transmisión no continua empleando la totalidad del BW disponible- en comparación con los sistemas basados en Acceso Múltiple por División en Frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) donde un canal de frecuencia es utilizado para transmitir un sólo canal de voz.

---

<sup>2</sup> En una red radio en modo *simulcast* todos los repetidores están activos sobre la misma frecuencia, por lo que un terminal móvil percibe la red como un único y gran repetidor capaz de cubrir una gran área de servicio. Los usuarios móviles pueden moverse de una celda a otra sin la necesidad de buscar o registrarse debido a que el canal es el mismo y no hay degradación en las zonas de traslape [28].

- ★ Se recomienda considerar el uso de canales con BW igual a 6.25 kHz, el cual puede ser utilizado por sistemas CLMR digitales con tecnologías *Digital Private Mobile Radio* (dPMR). De esta forma, pueden proveer hasta 4 veces la capacidad en canales de voz en comparación con un sistema CLMR analógico con BW de 25 kHz por canal de voz y, al tratarse de un sistema digital, el impacto de la interferencia es de partida menos influyente que en los sistemas analógicos.
- ★ Se recomienda que los equipos de radio móvil utilizados en Colombia cumplan con las normas de certificación internacionales estipuladas por organismos de regulación oficiales que aseguren su operación y sus características de emisión y de recepción garantizando no sólo la calidad del hardware y software, sino también la interoperabilidad y compatibilidad con otros componentes de los sistemas CLMR, la fiabilidad y estabilidad de las comunicaciones y la reducción de los riesgos de interferencias mejorando la coexistencia de sistemas en un entorno compartido.
- ★ Se recomienda la compartición de infraestructura entre PRST, y para ello se sugiere hacer uso de buenas prácticas de instalación, lo que incluye el uso de aisladores, combinadores y multiacopladores, con el fin de evitar que la energía de la señal de un sistema CLMR se induzca sobre otros sistemas CLMR en el mismo emplazamiento y genere señales interferentes no deseadas.
- ★ Se recomienda a los PRST la transformación de sus redes *multicast* a simulcast lo que permite una reducción en el uso de frecuencias (mayor eficiencia espectral), una cobertura mejorada y consistente en amplias áreas geográficas, sin mayor complejidad para el usuario final.
- ★ Se recomienda motivar la investigación en el uso de tecnologías de CLMR digitales como MC-IoT, *Mission Critical – Internet of Things*, considerando para este propósito el uso de tecnologías de Radio Definido por Software (SDR).

## 6.3 Conclusiones

En este capítulo, se resaltan los principales resultados y aspectos destacables en formato de recomendaciones y discusiones de especial valor para la ANE. Las tecnologías digitales están dotadas de características prometedoras que permiten al usuario minimizar el impacto de la interferencia, así como un mayor espectro de posibilidades y funcionalidades a las presentadas por los sistemas analógicos. Por ello, se recalca la importancia de promover este tipo de tecnologías para hacer un mejor uso espectral. Por otro lado, se definen las distancias mínimas de separación entre estaciones CLMR co-canal sugeridas, así como valores de separación en frecuencia que mejoran la operabilidad en emplazamientos cercanos. La relación distancia-frecuencia permite evaluar distintos escenarios y/o distribuciones de equipos en distintas localizaciones con el fin de maximizar el aprovechamiento del espectro disponible minimizando la posibilidad de interferencia con otras transmisiones cercanas. Por último, se destaca también la importancia de las características orográficas del territorio colombiano, que pueden dejar de ser un obstáculo en términos de propagación para favorecer la eficiencia espectral.





CAPÍTULO **7**

## CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

7.1	Conclusiones . . . . .	154
7.2	Líneas futuras . . . . .	156

---

En este capítulo del presente TFM, se concluye con una compilación de las principales conclusiones y contribuciones presentadas a lo largo de este escrito. Además, se delimitan las posibles direcciones para futuras investigaciones basadas en los resultados obtenidos.

## 7.1 Conclusiones

A continuación, se lista una síntesis concisa y completa de los aspectos más relevantes abordados a lo largo de los capítulos que conforman este documento:

- Este TFM presenta una recopilación de explicaciones teóricas y metodologías relevantes para el análisis de la interferencia co-canal y de canal adyacente. Esto proporciona una base sólida para la implementación de estrategias efectivas de mitigación de interferencias en sistemas de comunicaciones inalámbricas, a la vez que contextualiza las fases experimentales y pruebas de campo llevadas a cabo en el transcurso del proyecto, enriqueciendo la comprensión práctica y la aplicabilidad de los conceptos teóricos abordados.
- Los equipos VHF y UHF adquiridos para el desarrollo del proyecto se validan correctamente, cumpliendo con las especificaciones del fabricante, generando y recibiendo señales acorde a lo estipulado por los organismos internacionales, asegurando la fiabilidad de los datos de partida de las ramas de investigación exploradas.
- Los valores de RFPR obtenidos en las pruebas de laboratorio son, para sistemas CLMR analógicos trabajando en VHF y UHF, respectivamente: 8 dB y 6 dB con BW de 12.5 kHz y 25 kHz, respectivamente; y 9 dB y 5 dB para los mismos BW contemplados. A estos resultados, se les añade 1 dB como margen de protección para asegurar, ante todo, la calidad auditiva de la señal libre de interferencias, despreciando también posibles incertidumbres en las pruebas realizadas. Por tanto, los valores finales expuestos en el texto y considerados en la ejecución de métodos numérico-analíticos son, para VHF: 9 dB y 7 dB; y para UHF: 10 dB y 6 dB considerando los BW de 12.5 kHz y 25 kHz, respectivamente.
- Los valores experimentales de RFPR son menores a los contemplados anteriormente en la literatura. Este hecho provoca que, al considerar protecciones inferiores entre el nivel de potencia de la señal RF deseada frente a cualquier interferencia potencial, las distancias entre estaciones CLMR puedan reducirse de forma precisa, eficiente y efectiva, sin causar interferencias en las transmisiones presentes en el entorno.



- El proceso de adquisición de datos tiene como resultado una amplia ristra de información que conforma una base de datos particular de la zona de estudio y adecuada para analizar la propagación de las señales en los Departamentos del Cauca y Valle del Cauca. Estos valores RSS se toman de forma ordenada y estructurada, lo que permite su reutilización en futuras investigaciones.
- El preprocesado de los valores RSS para las bandas VHF y UHF permite asociar localizaciones a niveles de intensidad de potencia recibida, además de unificar y preparar los datos para obtener modelos de propagación basados en información con menor dispersión y mejor clasificación tanto en tipo de escenario, como en condiciones de propagación LOS y NLOS.
- Empleando el lenguaje de programación Python para los procesos de tratamiento de los datos, se consigue automatizar las tareas dotando de eficiencia y flexibilidad al proceso de análisis.
- La herramienta QGIS es especialmente adecuada por su versatilidad y facilidad de uso. En nuestro caso, su utilidad es fundamental, ya que nos permite adaptar el código de diversas herramientas de código abierto para satisfacer los objetivos específicos de la Universidad del Cauca para con la ANE.
- Se establece un nuevo y útil criterio de clasificación según las condiciones de propagación -LOS o NLOS- basado en la observación y calidad de los datos. De esta forma, aquellos puntos cuyos perfiles de terreno no sean obstruidos o de forma prácticamente insignificante, serán considerados como LOS haciendo que la dispersión de los datos disminuya en el análisis particular de cada caso.
- Además, al distinguir los modelos de propagación según el tipo de escenario -considerando *valle*, territorio *andino* y zonas *urbanas* de tamaño medio- las ecuaciones de pérdidas de propagación pueden servir como estimación para otros territorios que compartan características orográficas.
- Antes de definir las ecuaciones finales de pérdidas de propagación según el tipo de escenario, se investigaron diversas curvas para definir esas pérdidas con precisión. Finalmente, se optó por la regresión logarítmica debido a su simplicidad y su similitud con los modelos teóricos tradicionales. Además, ofrece valores de error comparables a la dispersión de los datos de entrada, lo que garantiza que la tendencia de las pérdidas se refleja adecuadamente en los modelos finales.

- Los resultados de la ejecución de los métodos numérico-analíticos validan el proceso de adquisición de datos y extracción de modelos de propagación al ofrecer resultados coherentes con la realidad, proporcionando valores de distancia-frecuencia que optimizan el uso del espectro. Estos resultados, resumidos, constituyen las recomendaciones finales que la Universidad del Cauca proporciona a la ANE, cumpliendo así el objetivo de encontrar resultados específicos que permitan reducir el aislamiento mínimo requerido para sistemas CLMR.

## 7.2 Líneas futuras

Con base en los resultados y conclusiones obtenidos en el presente TFM sobre el análisis de la interferencia para sistemas CLMR, se destaca la exploración de técnicas de mitigación de interferencias mediante el empleo de sistemas digitales, tecnología que lidera el futuro de las comunicaciones inalámbricas avanzadas.

Durante el desarrollo de este proyecto, se ha evidenciado que las tecnologías digitales ofrecen consistentemente características superiores para mitigar la interferencia frente a las tecnologías analógicas tradicionales. Un ejemplo destacado es la capacidad comprobada de trabajar en canales adyacentes utilizando sistemas digitales, mientras que los analógicos requieren al menos dos canales de separación para evitar la interferencia co-canal entre transmisiones cercanas. Esto subraya la versatilidad y eficacia de las tecnologías digitales en la gestión de la interferencia, lo que amplía potencialmente las posibilidades de asignación de frecuencias y mejora la eficiencia espectral en sistemas CLMR.

Durante las pruebas, se observaron otros aspectos destacables, como las amplias capacidades de programación de estaciones y radios digitales. Esto permite un aislamiento efectivo de las transmisiones deseadas mediante códigos de comprobación más sofisticados que los utilizados en la tecnología analógica. Sin embargo, las señales continúan siendo transmitidas en el medio, por lo que no supone una optimización espectral. No obstante, esta capacidad restringe la reproducción auditiva en los receptores no deseados, lo que minimiza la interferencia auditiva en el receptor.

La capacidad de los sistemas digitales para procesar señales de manera flexible y adaptativa permite implementar técnicas avanzadas de cancelación de interferencias, tales como el filtrado adaptativo y la cancelación activa. Además, ofrecen la posibilidad de utilizar algoritmos y técnicas de procesamiento -como el procesamiento de señales



digitales y el aprendizaje automático- para adaptarse dinámicamente a las condiciones del entorno y optimizar el rendimiento del sistema en tiempo real. Esto permite una gestión más eficiente del espectro radioeléctrico y una mayor capacidad para minimizar interferencias, incluso en entornos complejos y cambiantes. También, la encriptación de las señales digitales contribuye a garantizar la confianza y la privacidad de la comunicación inalámbrica, pudiendo dotar de más seguridad a un sistema inalámbrico CLRM a expensas de una mayor complejidad en su implementación.

El empleo de tecnologías digitales, como el uso de sistemas SDR, está ganando prominencia en diversas áreas de estudio debido a su gran flexibilidad y adaptabilidad a un coste asequible, permitiendo la reconfiguración dinámica de hardware y software para ajustarse a diversas condiciones de operación. Además, su implementación tiende a reducir los costos asociados con la infraestructura, al permitir la reutilización y reconfiguración eficiente del hardware, lo que promueve una gestión más efectiva de la interferencia y una optimización de recursos tanto económicos como operativos.

Partiendo de estas premisas, se concluye sugiriendo nuevas líneas de investigación centradas en el mundo digital, explorando todas las posibilidades que los propios radios actuales ofrecen en cuanto a su programación y el uso de BW de 6.25 kHz. Esto incluye promover tecnologías en auge de investigación, como los dispositivos SDR, así como la consideración de estándares abiertos como Project 25 (P25 o APCO 25), TETRA (Terrestrial Trunked Radio) o DMR, tratándose de sistemas que utilizan FDMA/TDMA con un BW de 12.5 kHz o 25 kHz que puede dividirse en intervalos de tiempo precisos para lograr una eficiencia espectral de 6.25 kHz; al igual que el estándar dPMR. Además, algunos de estos sistemas son compatibles con la tecnología analógica, lo que facilita una transición rápida y fluida de lo analógico a lo digital.



# BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Acerca de qgis*. <https://qgis.org/es/site/about/index.html>. Accedido el 1 de febrero de 2024.
- [2] *La entidad - agencia nacional del espectro*. <https://www.ane.gov.co/SitePages/la-entidad/index.aspx?p=231>.
- [3] *Relaciones de protección e intensidades mínimas de campo necesarias en los servicios móviles*. Informe técnico Rec. ITU-R M.358-5, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 1986.
- [4] *Metodología de simulación monte carlo para su aplicación en estudios de compartición y compatibilidad entre distintos servicios o sistemas de radiocomunicaciones*. Recommendation ITU-R SM.2028-2, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2017.
- [5] *Code of federal regulations*. Available online, 2020. Accessed October 21, 2021.
- [6] Government of Canada: *Information of the evaluation of vhf and uhf terrestrial cross border frequency coordination request*. <https://www.ic.gc.ca/eic/site/smtgst.nsf/eng/sf10625.html>, visitado el 21 Oct, 2021.
- [7] Government of Canada: *Land mobile and fixed equipment operating in the frequency range 27.41 - 960 mhz*. Available online, No date. <https://www.ic.gc.ca/eic/site/smtgst.nsf/eng/sf01063.html#s5.5>, Accessed October 21, 2021.
- [8] Gobernación del Cauca: *Perfil departamento del cauca*. Archivo PDF. Disponible en: <https://www.cauca.gov.co/Dependencias/OficinaAsesoradePlaneacion/InformacioneIndicadores/Perfil%20Departamento%20del%20Cauca.pdf>.
- [9] CEPETEL: *Curso de introducción a la radiocomunicación en fijo*, 2021. [https://www.cepotel.org.ar/wp-content/uploads/2021/11/Curso\\_](https://www.cepotel.org.ar/wp-content/uploads/2021/11/Curso_)

- [IntroRE-Fijo-U2de6\\_pdf.pdf](#).
- [10] Electronic Communications Committee: *SEAMCAT Handbook*, April 2016.
- [11] Test Equipment connection: *Communication analyzers : Marconi 2955b*. [https://spanish.testequipmentconnection.com/3633/Marconi\\_2955B.php](https://spanish.testequipmentconnection.com/3633/Marconi_2955B.php), Accessed 20 Sep, 2023.
- [12] Laird Connectivity: *Find an antenna*.
- [13] Agencia Nacional del Espectro: *Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias*. Bogotá, Colombia, 2021.
- [14] Agencia Nacional del Espectro (ANE): *Visor de espectro*. [https://espectroco.ane.gov.co/TesMonitorPlanning/TesMonitorPlanningWeb/#TMP\\_Main](https://espectroco.ane.gov.co/TesMonitorPlanning/TesMonitorPlanningWeb/#TMP_Main), visitado el 21 Oct, 2021.
- [15] Armando Espinoza-Hernández, Maribel Alvarez-Castro y Manuel Hernández-Rodríguez: *Aplicación de la teoría de propagación de ondas para la estimación de la atenuación en enlaces de microondas en la región del istmo de tehuantepec*. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-07052014000200001](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052014000200001), 2014.
- [16] Gobierno de Estados Unidos: *Code of federal regulations*. <https://www.ecfr.gov/current/title-47/part-90>, 1978. <https://www.ecfr.gov/current/title-47/part-90>, Título 47, Capítulo I, Subcapítulo D, Parte 90 (§90.355) del Code of Federal Regulations.
- [17] European Radiocommunications Committee: *A comparison of the minimum coupling loss method, enhanced minimum coupling loss method and monte-carlo simulation*. En *Proceedings of the European Radiocommunications Committee Meeting*, Menton, May 1999.
- [18] Andrea Goldsmith: *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [19] M. Hata: *Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services*. IEEE Trans. Veh. Technol., VT-29(3):317–325, 1980.
- [20] Juan Diego Hernández Lalinde, Franklin Espinosa Castro, Johel E Rodríguez, José Gerardo Chacón Rangel, Cristian Andrés Toloza Sierra, Marilly Karina Arenas Torrado, Sandra Milena Carrillo Sierra y Valmore José Bermúdez Pirela: *Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de pearson: definición, propiedades y*

- suposiciones*. Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica, 37(5), 2018, ISSN 0798-0264. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55963207025>.
- [21] C. M. Hernández, D. Galvis, M. Benavides y V. Quintero: *Recomendaciones sobre parámetros técnicos esenciales de operación y análisis de interferencia para sistemas de comunicaciones de radio móvil convencional operando en la banda de 138 mhz a 470 mhz desde un enfoque experimental*. Informe técnico, Universidad del Cauca, 2023.
- [22] C. M. Hernández, D. Galvis, M. Benavides, M. L. Vargas, R. Zambrano y V. Quintero: *Recomendaciones sobre parámetros técnicos esenciales de operación y análisis de interferencia para sistemas de comunicaciones VHF en colombia*. Informe técnico, Universidad del Cauca, 2021.
- [23] Hytera: *Datos técnicos TC-508*. ed. Shenzhen, Shenzhen, China, n.d.
- [24] Icom America Inc: *6.25 khz cdma information center*, 2007.
- [25] Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León. Junta de Castilla y León: *Formato de descarga shp y conversiÓN a dxf*. <https://cartografia.jcyl.es/web/es/datos-servicios/formato.html>.
- [26] International Telecommunication Union: *Frequency and distance separations*. Recommendation SM.337-6, International Telecommunication Union, 2020.
- [27] J. Lorenzo: *Apuntes de Receptores*. Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, 2016.
- [28] R. Marengon: *Digital radio revitalizes simulcast*. Radio Resource International, 2017. Artículo de revista.
- [29] Motorola: *Mototrbo™ radios móviles dgm™ 4100 / dgm™ 4100+*, 2008. [https://www.radiomotorola.com.mx/pdfs/radio\\_mototrbo\\_dgm4100.pdf](https://www.radiomotorola.com.mx/pdfs/radio_mototrbo_dgm4100.pdf).
- [30] Motorola Solutions: *What is LMR?* <https://www.motorolasolutions.com/en-us/solutions/what-is-lmr.html>, Accessed 2024.
- [31] Motorolasolutions: *Radios móviles serie dgm™8000 / dgm™5000 mototrbo*, 2014. [https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/business/product\\_lines/motrbo/mobiles/MOT\\_MOTOTRBO\\_DGM8000\\_DGM5000\\_Series\\_SpecSheet\\_ES\\_012115.pdf](https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/business/product_lines/motrbo/mobiles/MOT_MOTOTRBO_DGM8000_DGM5000_Series_SpecSheet_ES_012115.pdf).



- [32] Universidad Tecnológica Nacional: *Electrónica Aplicada III*. Mendoza, Argentina, 2004.
- [33] Edward Oswaldo Navarro Astudillo: *Herramienta prototipo software de estimación de cobertura radioeléctrica para la planificación de una red iot*, 2020.
- [34] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano y K. Fakuda: *Field strength and its variability in vhf and uhf mobile service*. Rev. Elect. Comm. Lab., 16(9-10):825–875, 1968.
- [35] Darko Ratkaj: *Spectrum engineering advanced monte carlos analysis tool (seamcat)*, February 2002.
- [36] J. M. H. Rábanos: *Transmisión por radio*. Editorial Universitaria Ramón Araces, Madrid, 2008.
- [37] Unión Internacional de Telecomunicaciones: *Selectividad de los Receptores*. Ginebra, Suiza, 1978.
- [38] Unión Internacional de Telecomunicaciones: *Normas para la Planificación de la Radiodifusión Sonora con Modulación de Frecuencia en Ondas Métricas*. Ginebra, Suiza, 1998.
- [39] Unión Internacional de Telecomunicaciones: *Propagación de las ondas radioeléctricas en sistemas terrenales móviles terrestres en las bandas de ondas métricas/decimétricas*. Oficina de Radiocomunicaciones, 2002. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-44-2002-OAS-MSW-S.doc](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-44-2002-OAS-MSW-S.doc), Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.
- [40] Unión Internacional de Telecomunicaciones: *Manual comprobación técnica del espectro*. Informe técnico R-HDB-23-2011, Ginebra, Suiza, 2011.
- [41] Unión Internacional de Telecomunicaciones: *Handbook on National Spectrum Management*. Ginebra, Suiza, 2015.
- [42] Unión Internacional de Telecomunicaciones: *Vocabulario de Radiocomunicaciones*. Número ITU-R V.573-6. Ginebra, Suiza, 2015.
- [43] Unión Internacional de Telecomunicaciones: *Radio regulations*. Informe técnico, Ginebra, Suiza, 2020.

- [44] TodaColombia: *Relieve del Departamento del Cauca*. <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/cauca/relieve.html>, 2019.
- [45] TodaColombia: *Relieve del Departamento del Valle del Cauca*. <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/valle-del-cauca/relieve.html>, 2019.
- [46] International Telecommunication Union: *Unwanted emissions in the out of band domain*. Informe técnico Rec. ITU-R SM.1541-6, Geneva, Switzerland, 2015.
- [47] International Telecommunication Union: *Itu-r recommendation p.526-15: Propagation by diffraction*. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-15-201910-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-15-201910-I!!PDF-E.pdf), 2019.
- [48] Unión Internacional de Telecomunicaciones: *Generación y reducción de los productos de intermodulación en el transmisor*. Informe UIT-R SM.2021, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2021. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REPSM.2021-2000-PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REPSM.2021-2000-PDF-S.pdf).