

**ANÁLISIS DEL AISLAMIENTO MÍNIMO REQUERIDO ENTRE FUENTES DE
RADIOFRECUENCIA EN FUNCIÓN DE LA SEPARACIÓN EN FRECUENCIA Y
DISTANCIA POR APLICACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA SISTEMAS
DE COMUNICACIONES OPERANDO EN VHF Y EN UHF HASTA 466 MHZ**



Universidad
del Cauca

LUIS CARLOS GUTIÉRREZ CHIRÁN
KEVIN ADRIEL DAZA ACOSTA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE RADIO E INALÁMBRICAS – GRIAL
SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES E INALÁMBRICOS
POPAYÁN
2022

ANÁLISIS DEL AISLAMIENTO MÍNIMO REQUERIDO ENTRE FUENTES DE
RADIOFRECUENCIA EN FUNCIÓN DE LA SEPARACIÓN EN FRECUENCIA Y
DISTANCIA POR APLICACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA SISTEMAS
DE COMUNICACIONES OPERANDO EN VHF Y EN UHF HASTA 466 MHZ

LUIS CARLOS GUTIÉRREZ CHIRÁN
KEVIN ADRIEL DAZA ACOSTA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero
en Electrónica y Telecomunicaciones

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE RADIO E INALÁMBRICAS – GRIAL
SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES E INALÁMBRICOS
POPAYÁN
2022

Dedicamos este trabajo de grado a nuestros padres quienes han brindado su apoyo incondicional, amor y compromiso.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a nuestro director, el ingeniero Víctor Manuel Quintero Flórez, quien contribuyó de manera valiosa en conocimientos, tiempo, esfuerzo y dedicación en el proceso de desarrollo del trabajo de grado.

Al Grupo de Radio e Inalámbricas – GRIAL, por todo su apoyo y esfuerzo en la investigación.

A la Universidad del Cauca, por su contribución a la construcción de una sociedad mejor.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE ACRÓNIMOS	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES.....	3
1.1. ANÁLISIS GENERAL DE INTERFERENCIA.....	3
1.2. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS ASOCIADOS A LOS MÉTODOS APLICADOS.....	9
1.2.1. Bandas de Frecuencia de Operación	9
1.2.2. Ancho de Banda del Canal.....	10
1.2.3. Potencia de Transmisión.....	10
1.2.4. Ganancia de Antena.....	10
1.2.5. Sensibilidad.....	10
1.2.6. Factor de Ajuste de Ancho de Banda.....	11
1.2.7. Margen de Operación para Sistemas con Múltiples Portadoras	12
1.2.8. Máscara Espectral.....	12
1.2.9. Selectividad.....	15
1.2.10. Relación de Protección	16
1.2.11. Modelos de Pérdidas de Propagación.....	17
1.2.12. Factor de Disponibilidad del Sistema Interferido	20
1.3. MÉTODOS ANALÍTICOS	24
1.3.1. Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento	24
1.3.2. Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento Mejorado	27
1.3.3. Método de la Recomendación ITU-R SM.337-6.....	37
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	43
2.1. DEFINICIÓN	43
2.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	43
2.2.1. Análisis de Requerimientos.....	44
2.2.2. Diseño e Implementación.....	45
2.2.3. Plan de Pruebas.....	45
2.2.4. Resultados	47

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA ESTIMACIÓN DEL AISLAMIENTO ENTRE SISTEMAS DE RADIO MÓVIL	49
3.1. APLICACIÓN DEL MÉTODO MCL	50
3.1.1. Aplicación del Método MCL a la Frecuencia de 138 MHz	51
3.1.2. Aplicación del Método MCL a la Frecuencia de 470 MHz	53
3.1.3. Aplicación del Método MCL en Bloqueo.....	56
3.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO E-MCL	59
3.2.1. Aplicación del Método E-MCL con N Igual a 10 dB.....	59
3.2.2. Aplicación del Método E-MCL en Bloqueo con N Igual a 10 dB.....	64
3.2.3. Aplicación del Método E-MCL con N Igual a 20 dB.....	68
3.2.4. Aplicación del Método E-MCL en Bloqueo con N Igual a 20 dB.....	71
3.2.5. Análisis de los resultados de Bloqueo para los métodos MCL y E-MCL	76
3.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA RECOMENDACIÓN ITU SM.337 ...	77
3.3.1. Aplicación del Método de la ITU SM.337 a la Frecuencia de 138 MHz.....	77
3.3.2. Aplicación del Método de la ITU SM.337 a la Frecuencia de 470 MHz.....	79
3.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO ALTERNATIVO DE LA RECOMENDACIÓN ITU SM. 337	81
3.4.1. Aplicación del Método Alternativo de la Recomendación ITU SM.337 con N igual a 10 dB	81
3.4.2. Aplicación del Método Alternativo de la Recomendación ITU SM.337 con N igual a 20 dB	84
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	97
5.1. TRABAJOS FUTUROS.....	98
BIBLIOGRAFÍA.....	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 . Bandas de frecuencia para el servicio radio móvil.....	9
Tabla 2. Máscara de emisión Tipo B.	13
Tabla 3. Máscara de emisión Tipo D.	14
Tabla 4. Máscara de emisión Tipo E.	14
Tabla 5. Factor de forma de las máscaras de emisión para radio móvil.....	16
Tabla 6. Porcentaje de cobertura zonal.	23
Tabla 7. Prueba 1: Aplicación de los métodos analíticos a la frecuencia de 138 MHz.	46
Tabla 8. Prueba 2: Aplicación de los métodos analíticos a la frecuencia de 470 MHz.	46
Tabla 9. Parámetros y valores utilizados en la aplicación de los métodos analíticos.	50
Tabla 10. Resultados MCL considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.	52
Tabla 11. Resultados MCL considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.	52
Tabla 12. Resultados MCL considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.	52
Tabla 13. Resultados MCL considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.	53
Tabla 14. Resultados MCL considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.	54
Tabla 15. Resultados MCL considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.	54
Tabla 16. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.	57
Tabla 17. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.	57
Tabla 18. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.	57
Tabla 19. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.	58
Tabla 20. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.	59
Tabla 21. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.	59
Tabla 22. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.	61
Tabla 23. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.	61
Tabla 24. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.	61
Tabla 25. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.	62
Tabla 26. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.	63

Tabla 27. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.	63
Tabla 28. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.	65
Tabla 29. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.	65
Tabla 30. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.	65
Tabla 31. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.	66
Tabla 32. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.	67
Tabla 33. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.	67
Tabla 34. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.	69
Tabla 35. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.	69
Tabla 36. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.	69
Tabla 37. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.	70
Tabla 38. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.	71
Tabla 39. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.	71
Tabla 40. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.	72
Tabla 41. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.	73
Tabla 42. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.	73
Tabla 43. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.	74
Tabla 44. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.	75
Tabla 45. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.	75
Tabla 46. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.	78
Tabla 47. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.	78
Tabla 48. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.	78
Tabla 49. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara	

espectral tipo B.....	79
Tabla 50. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.....	80
Tabla 51. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.....	80
Tabla 52. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.....	82
Tabla 53. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.....	82
Tabla 54. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.....	82
Tabla 55. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.....	83
Tabla 56. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.....	84
Tabla 57. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=10 a la frecuencia de 470 MHz considerando la máscara espectral tipo E.....	84
Tabla 58. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 138 MHz considerando la máscara espectral tipo B.....	86
Tabla 59. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 138 MHz considerando la máscara espectral tipo D.....	86
Tabla 60. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 138 MHz considerando la máscara espectral tipo E.....	86
Tabla 61. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 470 MHz considerando la máscara espectral tipo B.....	87
Tabla 62. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 470 MHz considerando la máscara espectral tipo D.....	88
Tabla 63. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 470 MHz considerando la máscara espectral tipo E.....	88
Tabla 64. Resultados de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo B.....	90
Tabla 65. Resultados de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo D.....	91
Tabla 66. Resultados de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo E.....	92
Tabla 67. Distancia mínima de separación entre un sistema interferente y un receptor víctima de interferencia considerando el corrimiento en frecuencia para una máscara espectral tipo B.....	93
Tabla 68. Distancia mínima de separación entre un sistema interferente y un receptor víctima de interferencia considerando el corrimiento en frecuencia para una máscara espectral tipo D.....	93
Tabla 69. Distancia mínima de separación entre un sistema interferente y un receptor	

víctima de interferencia considerando el corrimiento en frecuencia para una máscara espectral tipo E.94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interferencia co-canal.	4
Figura 2. Interferencia de canal adyacente.	5
Figura 3. Emisiones no deseadas presentes en una transmisión.	6
Figura 4. Región de operación aceptable y no aceptable del receptor en función de las separaciones en frecuencia y distancia.	7
Figura 5. Desensibilización o bloqueo del receptor.	7
Figura 6. Representación de los productos de intermodulación con respecto a dos frecuencias fundamentales.	8
Figura 7. Traslape entre la densidad espectral de potencia deseada e interferente.	11
Figura 8. Máscara de emisión Tipo B.	13
Figura 9. Máscara de emisión Tipo D.	14
Figura 10. Máscara de emisión Tipo E.	15
Figura 11. Curva ideal de selectividad.	16
Figura 12. Calidad de cobertura zonal para una calidad de cobertura perimetral y parámetros σ y n dados.	23
Figura 13. Modelo general del sistema para MCL.	25
Figura 14. Modelo general del sistema para E-MCL.	28
Figura 15. Potencia en los L anillos de una celda.	31
Figura 16. Margen de operación en los anillos de la celda del receptor víctima de interferencia.	32
Figura 17. Definición de la máscara espectral para su aplicación en el método E-MCL.	35
Figura 18. Ejemplo de aplicación de la máscara espectral en el método E-MCL.	36
Figura 19. Metodología de desarrollo.	44
Figura 20. Escenario de aplicación de los métodos analíticos.	45
Figura 21. Resultados del método MCL considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.	51
Figura 22. Resultados del método MCL considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.	53
Figura 23. Resultados del método MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.	56
Figura 24. Resultados del método MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.	58
Figura 25. Resultados del método E-MCL con $N=10$ considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.	60
Figura 26. Resultados del método E-MCL con $N=10$ considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.	62
Figura 27. Resultados del método E-MCL en bloqueo con $N=10$ considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.	64
Figura 28. Resultados del método E-MCL en bloqueo con $N=10$ considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.	66
Figura 29. Resultados del método E-MCL con $N=20$ considerando la frecuencia	

de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	68
Figura 30. Resultados del método E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	70
Figura 31. Resultados del método E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	72
Figura 32. Resultados del método E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	74
Figura 33. Comportamiento general de las máscaras espectrales para los diferentes modelos de pérdidas de propagación.	76
Figura 34. Resultados del método ITU SM.337 considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	77
Figura 35. Resultados del método ITU SM.337 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	79
Figura 36. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	81
Figura 37. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	83
Figura 38. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	85
Figura 39. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.....	87
Figura 40. Comportamiento general de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo B. ...	90
Figura 41. Comportamiento general de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo D. ...	91
Figura 42. Comportamiento general de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo E. ...	92

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACI	<i>Adjacent Channel Interference</i> , Interferencia de Canal Adyacente.
ANE	Agencia Nacional del Espectro.
BPF	<i>Band Pass Filter</i> , Filtro Pasabanda.
CCI	<i>Co-Channel Interference</i> , Interferencia Co-Canal.
CDF	<i>Cumulative Distributive Function</i> , Función de Distribución de Probabilidad Acumulativa.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código.
CEPT	<i>Conférence Européenne des administrations des Postes et des Télécommunications</i> , Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones.
CNABF	Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia.
E-MCL	<i>Enhanced Minimum Coupling Loss</i> , Mínimas Pérdidas de Acoplamiento Mejorado.
ERC	<i>European Radiocommunications Committee</i> , Comité de Radiocomunicaciones Europeo.
FD	<i>Frequency-Distance</i> , Frecuencia Distancia.
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FDR	<i>Frequency Dependent Rejection</i> , Rechazo Dependiente de la Frecuencia.
FI	Frecuencia Intermedia.
FM	<i>Frequency Modulation</i> , Modulación en Frecuencia.
GIS	<i>Geographic Information System</i> , Sistema de Información Geográfica.
IMT-Advanced	<i>International Mobile Telecommunications – Advanced</i> , Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
ITU-R	<i>International Telecommunication Union - Radiocommunications</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones Sector Radiocomunicaciones.
LMR	<i>Land Mobile Radio</i> , Radio Móvil Terrestre.
MCL	<i>Minimum Coupling Loss</i> , Mínimas Pérdidas de Acoplamiento.
OCR	<i>Off-Channel-Rejection</i> , Rechazo Fuera de Canal.

OFR	<i>Off-Frequency Rejection</i> , Rechazo Fuera de Banda.
OOB	<i>Out of Band</i> , Fuera de Banda.
OTR	<i>On-Tune Rejection</i> , Rechazo Dentro de Banda.
PIRE	Potencia Isótropa Radiada Equivalente.
RF	Radiofrecuencia.
RLB	<i>Radio Link Budget</i> , Balance del Enlace Radio.
SINAD	<i>Signal to Noise and Distortion Ratio</i> , Relación Señal a Ruido y Distorsión.
TDD	<i>Time Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Tiempo.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , Ultra Alta Frecuencia.
VHF	<i>Very High Frequency</i> , Muy Alta Frecuencia.

INTRODUCCIÓN

El espectro radioeléctrico es un recurso limitado y administrado por los estados, por lo que su gestión es de gran importancia para ser aprovechado de manera eficiente. Dentro del espectro radioeléctrico se encuentra una banda de gran interés para los sistemas de radio móvil terrestre, la cual va desde los 30 MHz hasta los 466 MHz, y ofrece características favorables para la operación de sistemas de telecomunicaciones, como por ejemplo, las bajas pérdidas de propagación. Los sistemas que operan en esta banda continúan creciendo y, por lo tanto, se hace necesario gestionar el espectro de manera que todos puedan operar correctamente, evitando los efectos de interferencia que puedan producirse entre sí, lo cual se logra con un adecuado aislamiento en frecuencia y distancia entre los sistemas de telecomunicaciones. Es por eso que en el presente trabajo de grado se aborda el problema de investigación relacionado con el análisis de separación mínima en frecuencia y distancia por aplicación de métodos analíticos.

El trabajo de grado proporciona un estudio de los métodos analíticos para determinar la mínima separación en distancia y frecuencia entre sistemas de telecomunicaciones operando en la banda desde los 30 MHz hasta los 466 MHz. Los métodos analíticos analizados son: el Método de Mínimas Pérdidas por Acoplamiento (MCL, *Minimum Coupling Loss*) y su versión mejorada (E-MCL, *Enhanced Minimum Coupling Loss*) [1]; y el Método Analítico de la Recomendación ITU-R SM.337 y su versión alternativa [2]. Estos métodos permiten estimar la máxima potencia recibida de señal no deseada en el sistema víctima de interferencia, lo que posteriormente se traduce a la mínima separación en distancia (aislamiento) por medio de diferentes modelos de pérdidas de propagación: Modelo de Espacio Libre, Modelo de Pendiente Única, Modelo de Okumura-Hata, Modelo de Egli, y Modelo de Dos Rayos. Al aplicar los métodos analíticos para distintos valores de separación en frecuencia se obtienen distintos resultados de separación en distancia, lo que permite construir una gráfica que permita considerar la mínima separación en distancia entre sistemas de comunicaciones operando en la misma frecuencia o frecuencias cercanas y de esta manera limitar los efectos adversos de la interferencia co-canal y la interferencia de canal adyacente.

El presente trabajo de grado hace parte del proyecto de investigación: “Recomendaciones sobre Parámetros Técnicos Esenciales de Operación y Análisis de Interferencia para Sistemas de Comunicaciones VHF en Colombia” [3], realizado por la Universidad del Cauca y financiado por la Agencia Nacional del Espectro en el año 2021 dentro de la convocatoria de Investigaciones 2021: Proyectos de CT+I en Temáticas Relacionadas con la Gestión, Planeación, Atribución, Vigilancia y Control del Espectro Radioeléctrico en Colombia.

El presente documento de trabajo de grado está compuesto por cinco capítulos: el Capítulo 1 es de conceptos generales, en el cual se presenta la base teórica relacionada con las temáticas necesarias para el desarrollo del trabajo de grado, tales como la definición de los métodos analíticos y los conceptos asociados a estos; en el Capítulo 2 se plantea la metodología del desarrollo del trabajo de grado, en el cual se elige una metodología, se adapta y se aplica la misma; en el Capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de los métodos analíticos, los cuales se presentan en figuras y tablas para una mejor comprensión por parte del lector; el Capítulo 4 consta del análisis de resultados obtenidos en el capítulo anterior; y finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo de grado y el planteamiento de trabajos futuros.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES

1.1. ANÁLISIS GENERAL DE INTERFERENCIA

La interferencia depende de distintos parámetros que están ligados a los equipos y al enlace radio, tales como las frecuencias centrales de operación, la separación entre frecuencias portadoras, la precisión y estabilidad en frecuencia, el esquema de modulación (analógica o digital), el nivel de potencia del transmisor o de las portadoras, la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) por canal, el ancho de banda de emisión, los niveles de emisiones fuera de banda, entre otras.

Una forma general de describir la interferencia (en dBm) es mediante la siguiente ecuación [4]:

$$I = P_t + G_t + G_r - L_b(d) - FDR(\Delta f), \quad (1)$$

donde:

P_t (en dBm) es la potencia del transmisor interferente.

G_t es la ganancia de la antena del transmisor interferente (en dBi) en la dirección del receptor víctima de interferencia y comparada con respecto a un radiador isótropo.

G_r es la ganancia de la antena del receptor víctima de interferencia (en dBi) en la dirección del transmisor interferente y comparada con respecto a un radiador isótropo.

$L_b(d)$ (en dB) es la pérdida básica de propagación para una distancia de separación d (en km) entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia y la cual puede ser determinada mediante un modelo de propagación¹ apropiado de acuerdo con el escenario considerado.

Δf (en Hz) es la separación entre la frecuencia del transmisor interferente y la frecuencia del receptor víctima de interferencia.

$FDR(\Delta f)$ (en dB) es el factor de Rechazo Dependiente de la Frecuencia (FDR, *Frequency Dependent Rejection*), la cual es una medida de rechazo producida por la curva de selectividad de un receptor sobre una transmisión no deseada.

¹ Los modelos 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. El nivel de señal recibido depende de las características del terreno entre el transmisor y el receptor, de las características y variabilidad de la atmósfera, de parámetros estadísticos, e.g., porcentaje de tiempo, porcentaje de ubicaciones, entre otros. Sin embargo, para fines de planificación o gestión de frecuencias, puede ser suficiente hacer suposiciones simples y optimistas sobre la cobertura o la intensidad de la señal.

La señal deseada en la entrada del receptor se ve afectada por cuatro tipos de interferencia: Interferencia Co-Canal (CCI, *Co-Channel Interference*), Interferencia de Canal Adyacente (ACI, *Adjacent Channel Interference*), desensibilización o bloqueo del receptor, e intermodulación. Cada una de ellas contribuye a la potencia total de interferencia tal como se muestra en la siguiente ecuación [4]:

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_K, \quad (2)$$

donde:

K es el número total de interferencias consideradas en el análisis y cada una de las contribuciones a la interferencia total debe ser considerada en unidades lineales.

- **Interferencia co-canal:**

Se presenta cuando las señales deseada e interferente coinciden en el mismo canal y ancho de banda a nivel de radiofrecuencia (RF) o de frecuencia intermedia (FI) (Ver Figura 1). El nivel de este tipo de interferencia depende tanto de características de emisión del transmisor interferente como de las características de rechazo co-canal en el receptor víctima de interferencia.

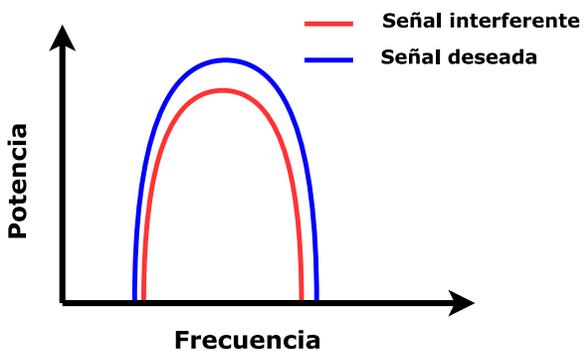


Figura 1. Interferencia co-canal.
Fuente: Elaboración propia.

En la interferencia co-canal existe una superposición entre la señal interferente y la señal deseada, es por esto que el factor $FDR(\Delta f)$ en (1) es igual a cero, dado que Δf es también igual a cero, debido a que la frecuencia de la señal interferente es igual a la frecuencia sintonizada en el receptor víctima de interferencia.

- **Interferencia de canal adyacente:**

Tiene lugar cuando una señal interferente opera en un canal adyacente al de la señal deseada, o cuando existen emisiones no deseadas por parte de un transmisor que se sitúan parcialmente en la banda de recepción del receptor víctima de interferencia, tal como se muestra en la Figura 2.

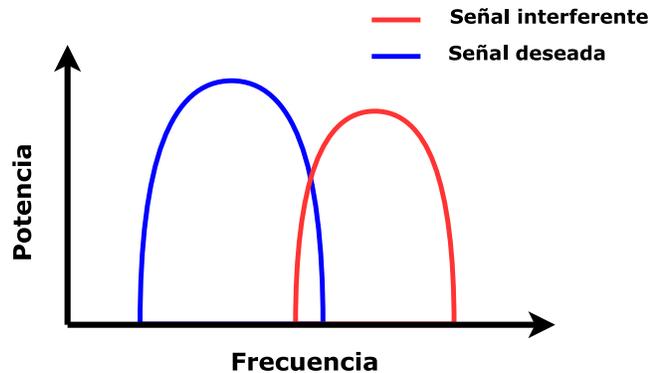


Figura 2. Interferencia de canal adyacente.
Fuente: Elaboración propia.

Las señales no deseadas están conformadas de manera general por emisiones fuera de banda² y emisiones espurias³, en donde, las emisiones fuera de banda corresponden a componentes en frecuencia fuera del ancho de banda necesario excluyendo el dominio espurio, mientras que, las emisiones espurias corresponden a componentes en frecuencia más allá del dominio de las emisiones fuera de banda, tal como se muestra en la Figura 3.

² Las emisiones fuera de banda son generadas por el proceso de modulación, por lo que contienen información útil y debe tenerse cuidado al momento de mitigarlas, debido a que puede causar distorsión de la información en el receptor.

³ Las emisiones espurias son el resultado de productos de intermodulación y productos de conversión en frecuencia, los cuales no transportan información útil, por lo que su mitigación no representa ningún riesgo a la información transmitida.

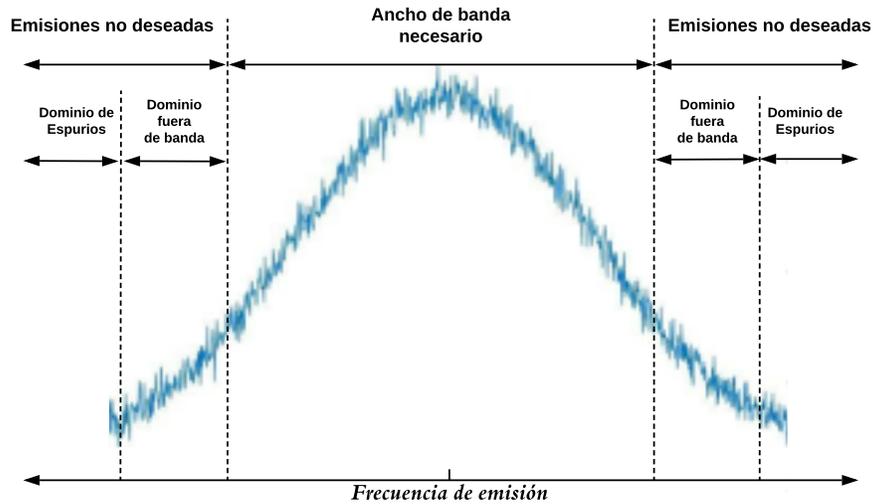


Figura 3. Emisiones no deseadas presentes en una transmisión.
Fuente: Elaboración propia.

El receptor víctima de interferencia tiene un valor máximo de interferencia aceptable I_M y un factor de rechazo dependiente de la frecuencia, i.e., $FDR(\Delta f)$. Estos factores determinan un funcionamiento aceptable del sistema cuando se cumple la siguiente desigualdad [4]:

$$L_b(d) + FDR(\Delta f) \geq P_t + G_t + G_r - I_M. \quad (3)$$

La desigualdad anterior permite representar la desigualdad es la curva A en la Figura 4, la cual expone la mínima separación en distancia en función de la separación en frecuencia entre dos sistemas radio. Esta curva divide el plano en dos regiones: región de operación aceptable y región de operación no aceptable del receptor.

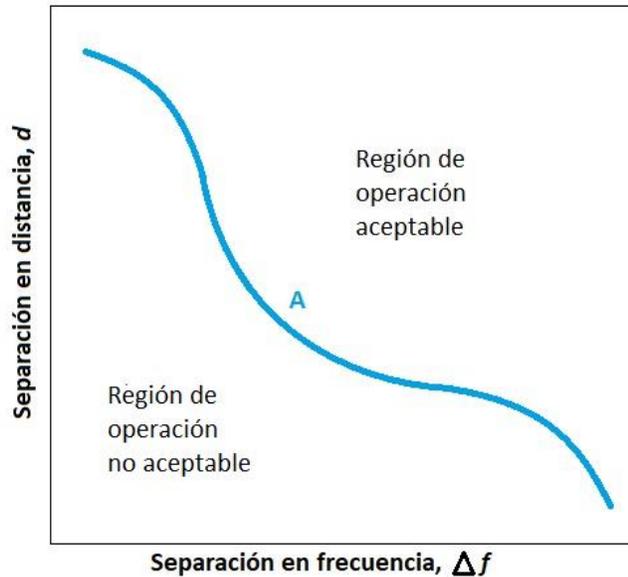


Figura 4. Región de operación aceptable y no aceptable del receptor en función de las separaciones en frecuencia y distancia.
Fuente: Adaptado de [4].

- **Desensibilización:**

El bloqueo o desensibilización del receptor ocurre cuando este último recibe una señal interferente muy fuerte (ver Figura 5) producida por un transmisor interferente operando en una ubicación cercana al receptor y en la misma frecuencia, lo cual tiene el efecto de no permitir que el receptor pueda captar la señal deseada.

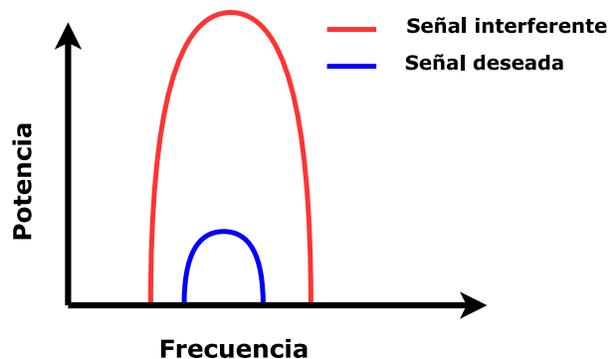


Figura 5. Desensibilización o bloqueo del receptor.
Fuente: Elaboración propia.

- **Intermodulación:**

Los productos de intermodulación pueden ser generados por las no linealidades del amplificador de potencia de radiofrecuencia a la salida del transmisor y de los dispositivos pasivos tales como combinadores, circuladores, conectores, etc. Los productos de intermodulación a la frecuencia f_{IM} son generados por la mezcla de dos o más señales no deseadas a las frecuencias f_1, f_2, \dots . La relación entre f_{IM} y f_1, f_2, \dots , puede expresarse de forma general como:

$$f_{IM} = |u_1 f_1 + u_2 f_2 + \dots|, \quad ; u_v = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

El orden del producto de intermodulación viene dado por $n = |u_1| + |u_2| + \dots$. Esto significa que el producto de intermodulación de segundo orden, IM_2 siendo, $n = 2$ con $u_1 = 1$ y $u_2 = 1$ viene dado por $f_{IM} = |f_1 + f_2|$ y el producto de intermodulación de tercer orden IM_3 ($n = 3, u_1 = 2$ y $u_2 = 1$) es igual a $f_{IM} = |2f_1 + f_2|$. Los productos de intermodulación $2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1$ y $f_1 + f_2 - f_3$ son los que más interesan a los diseñadores puesto que son difíciles de mitigar mediante filtrado, debido a que están cerca del espectro de frecuencias de las señales deseadas. En la Figura 6 se representa la relación entre los distintos productos de intermodulación [5].

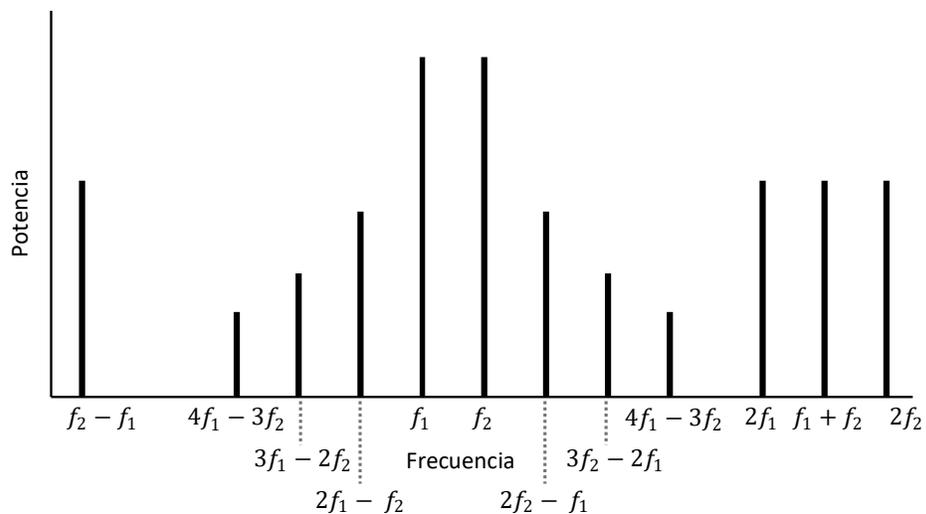


Figura 6. Representación de los productos de intermodulación con respecto a dos frecuencias fundamentales.

Fuente: Elaboración propia.

1.2. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS ASOCIADOS A LOS MÉTODOS APLICADOS

En la aplicación de los métodos analíticos y el método numérico se consideran las más exigentes características de los sistemas de comunicación vía radio en el análisis de aislamiento o interferencia. Para lo anterior es importante identificar, seleccionar y caracterizar los parámetros de análisis. En particular, esto implica considerar el peor de los casos, teniendo en cuenta parámetros con valores extremos (máximos o mínimos) que garanticen el mayor aislamiento de los sistemas frente a la interferencia. Por lo tanto, se presentan de manera general conceptos y parámetros que son esenciales en la aplicación de los métodos analíticos y el método numérico.

1.2.1. Bandas de Frecuencia de Operación

En Colombia, el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF) [6] define las bandas de frecuencia para operación del servicio de radio móvil en la banda de 138 MHz a 470 MHz, las cuales se observan en la

Tabla 1 [7]:

Tabla 1. Bandas de frecuencia para el servicio radio móvil.

CNABF	Banda de Frecuencias	Servicio
Tabla 3A	(138-174) MHz.	Servicios de radiocomunicaciones móviles y fijos.
Tabla 4	(380-398) MHz	Frecuencias asignadas para servicios de comunicaciones móviles de banda ancha para ser brindados por medio de redes locales privadas (no prestación de servicios a terceros) en configuración de Duplexación por División de Tiempo (TDD, <i>Time Division Duplexing</i>).
Tabla 11	(412-420) MHz y (422-430) MHz.	Frecuencias para servicios fijos y móviles de radio troncalizado
Tabla 13	(440-470) MHz.	Servicios de radiocomunicaciones móviles y fijos.

De manera general, las bandas de (410-430) MHz y (440-470) MHz son utilizadas por sistemas privados y públicos de radio móvil, pero existen países, donde estas frecuencias han sido utilizadas por sistemas celulares para brindar servicios en zonas rurales, por lo cual han sido consideradas como una opción de espectro viable para servicios de Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas (IMT-Advanced, *International Mobile Telecommunications – Advanced*) o IMT-2020 [8]. Para el análisis de aislamiento mostrado en el presente trabajo de grado se

consideran las bandas con los valores en frecuencia más bajos y más altos dentro de la banda de interés en el análisis, i.e., (138 – 174) MHz y (440 – 470) MHz.

1.2.2. Ancho de Banda del Canal

En los sistemas de radio móvil terrestre que operan en la banda de frecuencia de los 30 MHz a los 470 MHz, existen 6 valores de ancho de banda, los cuales son: 6.25 kHz, 12.5 kHz, 25 kHz, 3 MHz, 5 MHz y 10 MHz. Sin embargo, en el presente trabajo de grado se consideran únicamente los anchos de bandas de mayor interés para la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de 6.25 kHz, 12.5 kHz, y 25 kHz, que son los relacionados con servicios de radio móvil profesional o denominados sistemas de comunicación de misión crítica, adicionalmente, los anchos de banda de 3 MHz, 5 MHz y 10 MHz son considerados en servicios fijos y móviles en redes locales privadas de banda ancha.

1.2.3. Potencia de Transmisión

La potencia de transmisión es el valor medio de potencia suministrado por un transmisor a la línea de transmisión que conecta con la antena, evaluado durante un intervalo de tiempo suficientemente mayor en comparación con el periodo correspondiente a la componente de frecuencia más baja de la señal moduladora [9]. Particularmente en sistemas de radio móvil, las potencias de transmisión pueden tomar valores entre 1 W y 50 W, siendo los valores típicos para repetidoras o estaciones base de 20 W y 40 W [10]. Por lo tanto, para el análisis de aislamiento se hace uso de un valor de potencia de transmisión máximo de 50 W (47 dBm).

1.2.4. Ganancia de Antena

La ganancia de una antena es la relación entre la densidad de potencia en una dirección determinada del espacio con respecto a la densidad de potencia de una antena de referencia (antena isotrópica o antena dipolo de media longitud de onda) [9]. En el manual de comprobación técnica del espectro se define la ganancia para antenas directivas trabajando en ondas métricas y decimétricas [11], en 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 base o repetidoras y de 3 dBi para antenas móviles, valores que son soportados por sistemas de antenas de diferentes fabricantes [12].

1.2.5. Sensibilidad

La sensibilidad se define como el mínimo nivel de señal (en μV , $\text{dB}\mu\text{V}$ o dBm) a la entrada de un receptor que le permite garantizar la demodulación y la obtención de la información recibida con un nivel adecuado de calidad. La sensibilidad se ve afectada por el ruido captado y el ruido generado dentro del propio receptor [13]. Particularmente en sistemas de radio móvil, el valor de sensibilidad de un receptor se define de tal manera que asegure la calidad de la señal demodulada con una Relación Señal a Ruido y Distorsión (SINAD, *Signal to Noise and Distortion Ratio*)

igual a 12dB [14]. La sensibilidad puede ser estática o dinámica: la primera es la definida por el fabricante y medida en condiciones controladas de laboratorio; y la segunda, es la medida en condiciones de operación real, la cual considera degradación por ruido, multitrayectoria y factores estadísticos. La sensibilidad estática de un receptor de radio móvil profesional comercial en las bandas mencionadas está entre los valores de 0.25 uV (-12.04 dBuV) y 0.275 uV (-11.21 dBuV) para una SINAD de 12 dB, los cuales corresponden a un nivel de potencia medido sobre una impedancia de 50 Ohms de -119.04 dBm y -118.21 dBm, respectivamente [15]. Por lo tanto, para el análisis de aislamiento se hace uso de un valor de sensibilidad de -120 dBm.

1.2.6. Factor de Ajuste de Ancho de Banda

En el análisis de escenarios co-canal es necesario considerar los anchos de banda y el grado de traslape en frecuencia de la señal deseada con la señal interferente. De manera ideal, el ancho de banda a considerar se modela como un bloque rectangular, tal como se muestra en la Figura 7, donde:

B_W es el ancho de banda de la señal deseada.

B_I es el ancho de banda de la señal interferente.

f_W es la frecuencia central de la señal deseada.

f_I es la frecuencia central de la señal interferente.

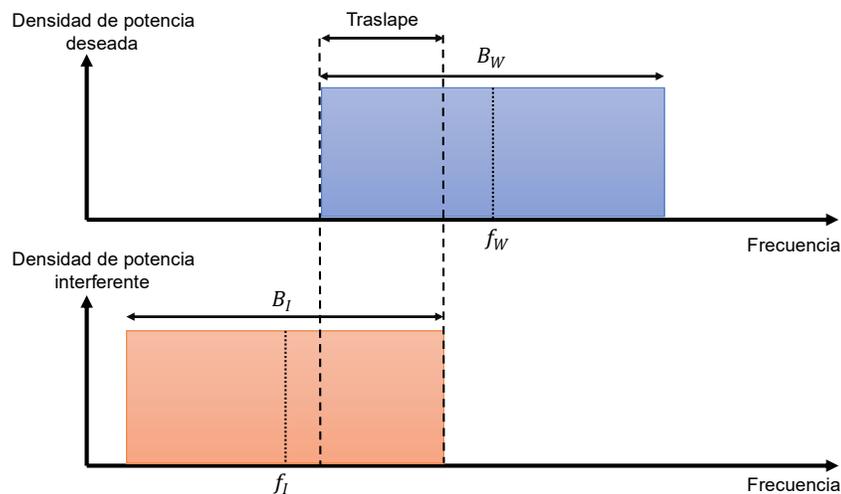


Figura 7. Traslape entre la densidad espectral de potencia deseada e interferente.
Fuente: Adaptada [16].

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 haciendo uso de la siguiente relación [16]:

$$dB_{BW} = 10 \log \left(\frac{\text{Ancho de Banda de Traslape}}{B_I} \right), \quad (5)$$

donde, el valor de ancho de banda de traslape se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Ancho de Banda de Traslape} & \quad (6) \\ & = \min \left\{ B_W, B_I, \frac{(B_W + B_I)}{2} - |f_W - f_I| \right\} \end{aligned}$$

El ancho de banda de traslape será menor o igual a B_I considerando a (6), 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} (MCL y E-MCL [1]), 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).

1.2.7. Margen de Operación para Sistemas con Múltiples Portadoras

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} (MCL y E-MCL [1]), 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.

1.2.8. Máscara Espectral

La máscara espectral, también conocida como máscara de canal o máscara de transmisión, es 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. La máscara espectral busca limitar la interferencia de canal adyacente (ACI, *Adjacent Channel Interference*) por limitación de la radiación excesiva fuera del ancho de banda de canal. La atenuación de emisiones no deseadas: emisiones fuera de banda (OOB, *Out of Band*) y emisiones parásitas, es generalmente realizada por medio de un filtro pasabanda (BPF, *Band Pass Filter*) sintonizado a la frecuencia central del canal.

La máscara espectral se define en términos del ancho de banda de los canales, o de la separación entre canales y en conclusión establece el límite de potencia para las emisiones dentro y fuera de banda que son admisibles [17].

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 ancho de banda igual a 25 kHz cuyos límites se definen en la Tabla 2 y se representan en la Figura 8; la máscara de emisión tipo D para los sistemas con canales de ancho de banda igual a 12.5 kHz cuyos límites se definen en la Tabla 3 y se representan en la Figura 9; y una máscara de emisión tipo E para los sistemas con canales de ancho de banda igual a 6.25 kHz cuyos límites se definen en la Tabla 4 y se representan en la Figura 10 [18] [19] [20].

Tabla 2. Máscara de emisión Tipo B.

Desplazamiento en Frecuencia	Límite de Máscara
$0 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 12.5 \text{ kHz}$	0 dBc
$12.5 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 25 \text{ kHz}$	-25 dBc
$25 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 62.5 \text{ kHz}$	-35 dBc
$\Delta f > 62.5 \text{ kHz}$	-60 dBc

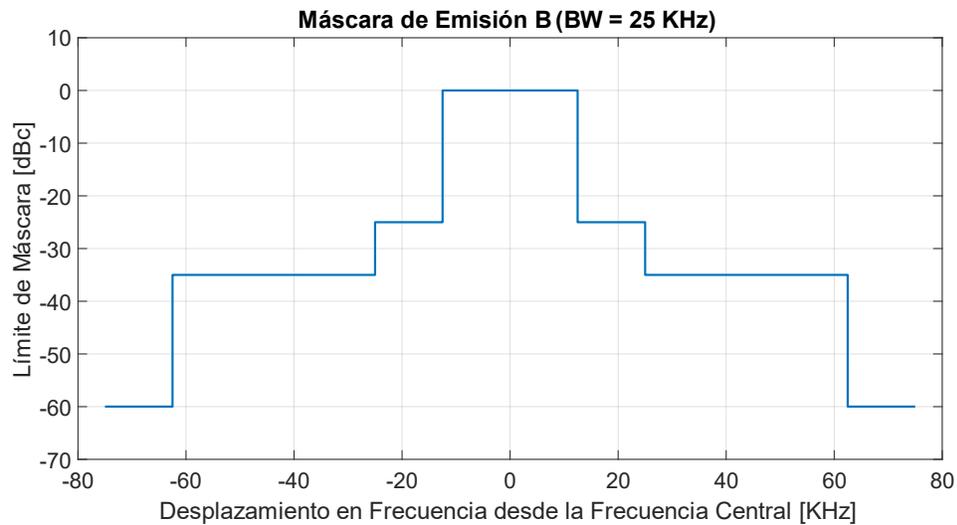


Figura 8. Máscara de emisión Tipo B.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Máscara de emisión Tipo D.

Desplazamiento en Frecuencia	Límite de Máscara
$0 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 5.625 \text{ kHz}$	0 dBc
$5.625 \text{ KHZ} < \Delta f \leq 12.5 \text{ kHz}$	$-7.27(\Delta f[\text{KHz}] - 2.88) \text{ dBc}$
$\Delta f > 12.5 \text{ kHz}$	-67 dBc

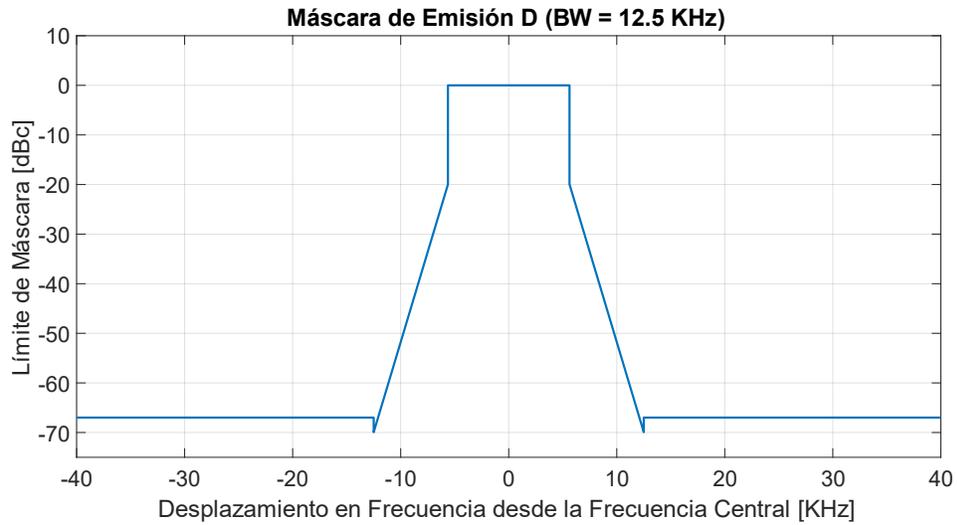


Figura 9. Máscara de emisión Tipo D.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Máscara de emisión Tipo E.

Desplazamiento en Frecuencia	Límite de Máscara
$0 \text{ KHZ} \leq \Delta f \leq 3 \text{ KHZ}$	0 dBc
$3 \text{ KHZ} < \Delta f \leq 4.6 \text{ KHZ}$	$-(30 + 16.67(\Delta f[\text{KHz}] - 3)) \text{ dBc}$
$\Delta f > 4.6 \text{ kHz}$	-65 dBc

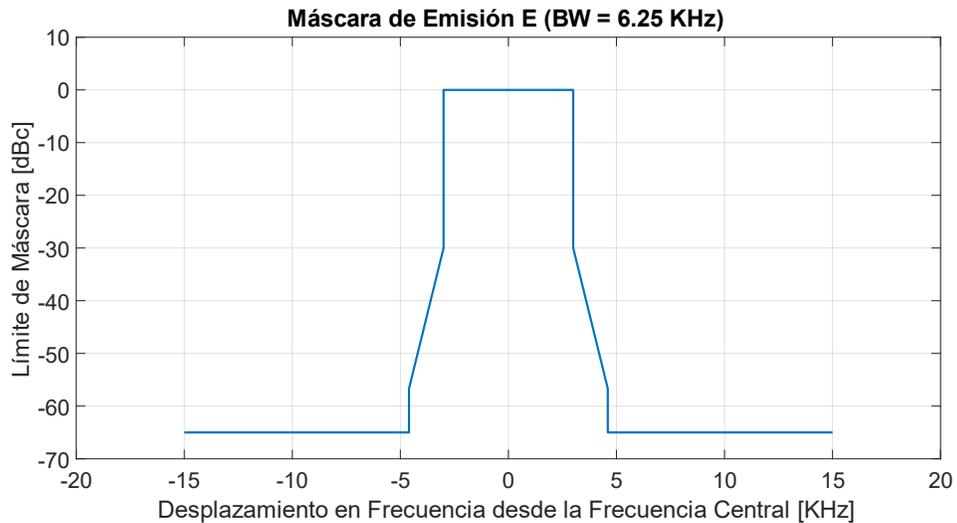


Figura 10. Máscara de emisión Tipo E.

Fuente: Elaboración propia.

1.2.9. Selectividad

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 [21]. La selectividad de un receptor es función de los filtros que se encargan de seleccionar la señal deseada y de suprimir o atenuar considerablemente las señales interferentes. 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 ancho de banda del filtro, lo cual matemáticamente se define como aparece a continuación:

$$Q = \frac{f_c}{BW}, \quad (7)$$

donde:

f_c (en Hz) es la frecuencia portadora de la señal deseada.

BW (en Hz) es el ancho de banda del filtro.

En el estudio de filtros se definen aspectos generales como son el factor de forma y la curva ideal de selectividad, los cuales son puntos de partida para la caracterización y comparación de los diferentes tipos de filtros. El factor de forma es otra manera de describir la selectividad de un receptor de radiofrecuencia 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 [21]:

$$factor\ de\ forma = \frac{BW_{-60dB}}{BW_{-3dB}}, \quad (8)$$

Por lo tanto, es posible calcular el factor de forma correspondiente a las máscaras de emisión para los sistemas de radio móvil definidas anteriormente con (8), como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. 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

Cuando el factor de forma tiene un valor de 1 es porque se tiene una selectividad ideal dado que el ancho de banda es igual en los puntos de -3 dB y -60 dB. En la práctica no es posible alcanzar la curva de selectividad ideal (ver Figura 11) pero es necesario tomarla como referencia para caracterizar la selectividad de los receptores [21]. Entre más cercano a 1 sea el factor de forma mejor será la selectividad del filtro en recepción.

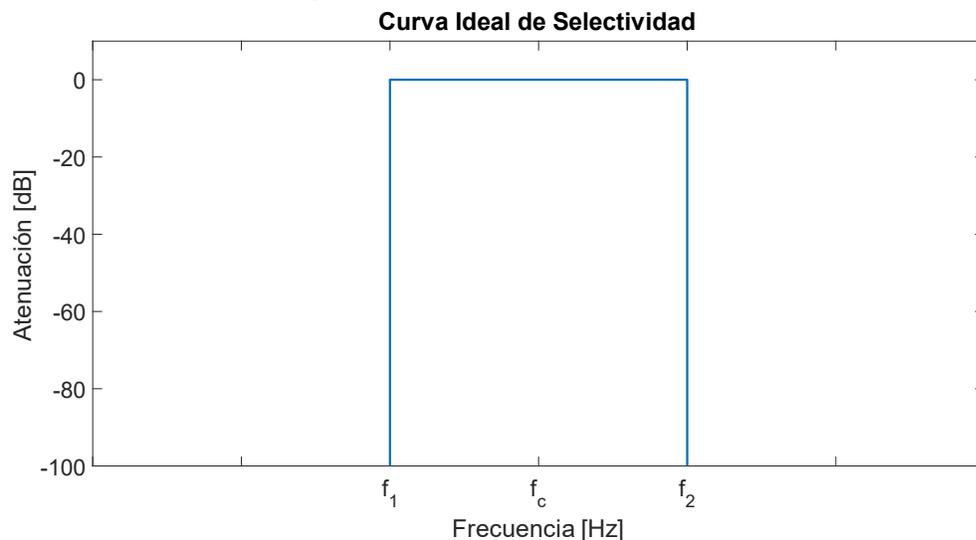


Figura 11. Curva ideal de selectividad.

Fuente: Adaptado de [21].

1.2.10. Relación de Protección

La relación de protección es el mínimo valor (en dB) de la relación entre una señal deseada y una señal interferente a la entrada del receptor, de tal manera que la señal mensaje original pueda ser obtenida en el proceso de demodulación con unas mínimas características de calidad [22]. Es necesario aclarar que la relación de protección 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, y la selectividad depende únicamente del receptor [23]. El incumplimiento de la relación de protección puede tener

consecuencias, tales como, la desensibilización del receptor, la cual ocurre 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 (FM, *Frequency Modulation*). Considerando la separación en frecuencia y distancia que debe haber entre sistemas inalámbricos para garantizar un mínimo aislamiento, se define una curva que a su vez define dos regiones: región de operación aceptable y región de operación no aceptable, como se muestra en la Figura 4.

A menudo, las relaciones de protección necesarias para proteger a un determinado servicio de radiocomunicación se establecen a través de medidas experimentales, sin embargo, se encuentra que para señales analógicas y digitales de banda estrecha se puede utilizar una relación de protección de alrededor de 7 dB [24], por lo que, en la aplicación de los métodos analíticos y el método numérico se considera una relación de protección más exigente de 12 dB.

1.2.11. Modelos de Pérdidas de Propagación

Los modelos de pérdidas de propagación son los algoritmos para 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, los cuales tienen en cuenta parámetros geo climáticos, bases de datos sobre el terreno, la superficie y el uso de la tierra, la frecuencia de operación, las alturas de las antenas, entre otros. Los métodos analíticos y el método numérico 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 corrimiento en frecuencia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia. La selección del modelo puede tener un alto impacto en los niveles de señal deseada e interferencia estimados, hasta el punto de convertir un escenario con interferencia perjudicial en uno sin interferencia significativa y viceversa. Todo estudio de interferencia requiere que se utilicen uno o más modelos de pérdidas de propagación, para tal propósito, se han considerado 6 modelos válidos en el rango de frecuencias de 30 MHz a 470 MHz [25], tales como:

- Modelo de Espacio Libre [26].
- Modelo de Dos Rayos (en su expresión general) [27].
- Modelo de Pendiente Única (con $n = 3$ y $L_0 = 70$ dB) [28].
- Modelo de Pendiente Única (con $n = 4$ y $L_0 = 100$ dB).
- Modelo de Okumura-Hata (para escenarios rurales) [29].
- Modelo de Egli [30].

Cada uno de estos modelos tiene una expresión matemática que representa las pérdidas de propagación en unidades de decibeles y son las siguientes:

- Expresión matemática para el Modelo de Espacio Libre.

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f), \quad (9)$$

donde:

d (en km) es la distancia entre el transmisor y el receptor.

f (en MHz) es la frecuencia de operación.

- Expresión matemática para el Modelo de Dos Rayos.

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

donde:

d (en km) es la distancia entre el transmisor y el receptor.

h_t (en m) y h_r (en m) son las alturas de las antenas de transmisión y recepción con respecto a la altura promedio del escenario, respectivamente.

- Expresión matemática para el Modelo de Pendiente Única.

$$L_b = L_0 + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (11)$$

donde:

n corresponde al exponente de propagación.

d_0 es una distancia de referencia en la cual se conoce la pérdida de propagación, i.e., L_0 .

Los valores de d_0 , L_0 y n se pueden obtener experimentalmente y dependen de las características del escenario.

- Expresión matemática para el Modelo de Okumura-Hata (para escenarios rurales).

Para calcular las pérdidas de propagación para escenarios rurales mediante el modelo de Okumura-Hata, primero se deben determinar las pérdidas de propagación para escenarios urbanos, las cuales se calculan haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$L_{b,urbano} = 69.55 + 26.26 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_t)][\log_{10}(d)]^b \quad (12)$$

donde:

d (en km) es la distancia entre el transmisor y el receptor.

h_t (en m) y h_r (en m) son las alturas de las antenas de transmisión y recepción con respecto a la altura promedio del escenario, respectivamente.

f (en MHz) es la frecuencia de operación.

b es un parámetro adimensional que se calcula mediante (13) y hace que el modelo considere el efecto de curvatura de la tierra en distancias mayores a 20 km.

$a(h_r)$ es un factor de corrección por altura de la antena de recepción, el cual depende del tipo de ciudad, y se calcula para ciudad media o pequeña mediante (14).

$$b = \begin{cases} 1; & d \leq 20 \\ 1 + (0.14 + 0.000187 f + 0.00170 h_t)[\log_{10}(0.05d)]^{0.8}; & d > 20 \end{cases} \quad (13)$$

Para ciudades pequeñas o medianas:

$$a(h_r) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7)h_r - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8). \quad (14)$$

Las pérdidas de propagación de Okumura-Hata en escenarios rurales se presentan en la siguiente ecuación:

$$L_{b,rural} = L_{b,urbano} - 4.78[\log_{10}(f)]^2 + 18.33 \log_{10}(f) - K, \quad (15)$$

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

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

$$\begin{aligned} 150 \text{ MHz} &\leq f \leq 1500 \text{ MHz} \\ 1 \text{ km} &\leq d \leq 100 \text{ km} \\ 30 \text{ m} &\leq h_t \leq 200 \text{ m} \\ 1 \text{ m} &\leq h_r \leq 10 \text{ m} \end{aligned}$$

- Expresión matemática para el Modelo de Egli.

$$L_b = 40 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 20 \log_{10}(L_m), \quad (16)$$

Con:

$$L_m = \begin{cases} 76.3 - 10 \log_{10}(h_r); & h_r \leq 10 \\ 85.9 - 20 \log_{10}(h_r); & h_r > 10 \end{cases}, \quad (17)$$

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

Los modelos de pérdidas de propagación anteriormente mencionados fueron tomados del trabajo de grado titulado “Análisis de las Áreas de Servicio y de Interferencia de Sistemas de Comunicación en Frecuencias de 30 MHz a 466 MHz en Colombia” [25], realizado por Juan José Tobar y Tania Andrea Burbano en el marco del proyecto de la Universidad del Cauca para la Agencia Nacional del Espectro (ANE) titulado “Recomendaciones sobre parámetros técnicos esenciales de operación y análisis de interferencia para sistemas de comunicaciones VHF en Colombia” [3].

1.2.12. Factor de Disponibilidad del Sistema Interferido

Los métodos analíticos E-MCL [1] y el de la recomendación ITU SM.337 [2] hacen uso del factor de disponibilidad del sistema interferido, i.e., N , el cual afecta el valor de sensibilidad del receptor víctima de interferencia. En la aplicación de los métodos analíticos el factor de disponibilidad toma valores iguales a 3 dB⁴, 10 dB y 20 dB, con los cuales se puede determinar adicionalmente, el porcentaje de calidad de cobertura zonal por el método de W. C. Jakes [31].

- **Método de W.C. Jakes**

El método de W.C. Jakes [31] permite calcular el porcentaje de ubicaciones, en las que un receptor puede detectar la señal con una potencia que supera un valor umbral definido. El porcentaje de cobertura perimetral y el porcentaje de cobertura zonal son dos factores estadísticos (calidad de cobertura), asociados al factor de disponibilidad del sistema interferido, i.e., N . La potencia recibida de la señal deseada en el receptor puede ser estimada haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$x = a - 10 n \log_{10} \left(\frac{r}{R} \right), \quad (18)$$

donde:

x (en dBm) es la potencia media de la señal deseada recibida.

⁴ El método MCL considera de manera inherente un factor de disponibilidad del sistema interferido igual a 3 dB.

a (en dBm) es un factor en función de las características de los equipos de transmisión y recepción (ganancias de antenas, potencia de transmisión, frecuencia de operación, etc.) y del escenario de despliegue, correspondiente a la potencia recibida a una distancia igual al radio total de la celda R (en km).

n es el exponente de propagación.

r (en km) es la distancia entre el transmisor deseado y el receptor víctima de interferencia.

Basado en que el desvanecimiento lento o por sombra⁵ se modela con una distribución normal con un valor medio igual a \bar{x} y una desviación estándar igual a σ (en dB), W. C. Jakes obtuvo un conjunto de curvas, las cuales se muestran en la Figura 12 y que relacionan el porcentaje de cobertura zonal para un porcentaje de cobertura perimetral y parámetros σ y n dados, donde el eje de las abscisas representa la relación σ/n , y el eje de las ordenadas representa el porcentaje de cobertura zonal dentro de la celda⁶, además, cada curva se caracteriza por $P_{x_0}(R)$, el cual representa el porcentaje de cobertura en el borde de la celda⁷. El porcentaje de cobertura perimetral o probabilidad de que en el borde de la celda el nivel de potencia recibida sea mayor a un valor umbral i.e., x_0 , se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P_{x_0}(R) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x_0 - \bar{x}(R)}{\sigma\sqrt{2}}\right), \quad (19)$$

donde:

x_0 (en dBm) es el nivel umbral de potencia de la señal deseada en el receptor.

$\bar{x}(R)$ (en dBm) es el valor medio de potencia recibida utilizando el método de pérdidas de propagación, con el cual se puede determinar el radio (R) de la celda.

$\bar{x}(R) - x_0$ (en dB) representa el margen de operación requerido para obtener la mínima calidad de la señal deseada.

⁵ 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.

⁶ El porcentaje del área total de servicio en el cual la señal recibida está por encima de un valor umbral dado x_0 .

⁷ El porcentaje del perímetro del borde de la celda en el cual la potencia de la señal recibida está por encima del valor umbral (x_0), siendo R el radio de la celda.

σ (en dB) es la desviación estándar por desvanecimiento lento.

La función erf es la función de error Gaussiana [32], la cual se define de la siguiente manera:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt . \quad (20)$$

La función erf aplica para una variable aleatoria X que sigue una distribución normal con media 0 y varianza igual a $\frac{1}{2}$, y la función $\operatorname{erf}(x)$ es la probabilidad de que X tome valores en el intervalo $[-x, x]$.

El porcentaje de cobertura perimetral se obtiene al reemplazar el margen de operación⁸, i.e., $\bar{x}(R) - x_0$, por el valor del factor de disponibilidad, i.e. N , en (19), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_{x_0}(R) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{-N}{\sigma\sqrt{2}}\right). \quad (21)$$

Por lo tanto, el porcentaje de cobertura zonal, i.e., Z , se puede calcular en términos del porcentaje de cobertura perimetral haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$Z = L + 50 \exp\left(\frac{2xy + 1}{y^2}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(x + \frac{1}{y}\right), \quad (22)$$

donde: $L = 100 \cdot (P_{x_0}(R))$, $x = \frac{K(P_{x_0}(R))}{\sqrt{2}}$, $y = 3.071 \left(\frac{n}{\sigma}\right)$,

y $K(P_{x_0}(R))$ es la abscisa normalizada de una distribución normal estándar para el porcentaje de cobertura perimetral $P_{x_0}(R)$.

⁸ Se puede notar que el margen de operación es igual a $-(x_0 - \bar{x}(R))$.

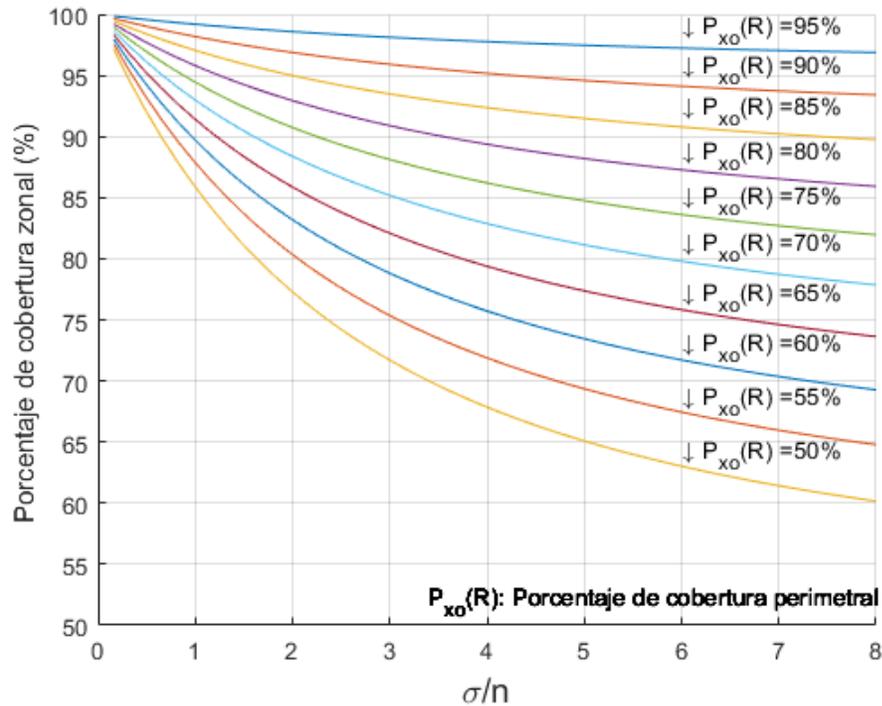


Figura 12. Calidad de cobertura zonal para una calidad de cobertura perimetral y parámetros σ y n dados.
Fuente. Elaboración propia.

El porcentaje de cobertura zonal se muestra en la Tabla 6 para los diferentes modelos de pérdidas de propagación, considerando la desviación estándar del desvanecimiento lento igual a 8 y 10 dB para VHF y UHF [14], respectivamente.

Tabla 6. Porcentaje de cobertura zonal.

Modelo de propagación	Exponente de propagación (η)	VHF			UHF		
		Porcentaje de cobertura zonal N=3	Porcentaje de cobertura zonal N=10	Porcentaje de cobertura zonal N=20	Porcentaje de cobertura zonal N=3	Porcentaje de cobertura zonal N=10	Porcentaje de cobertura zonal N=20
Espacio libre	2	79.1%	94.85%	99.76%	74.86%	90.92%	98.92%
Dos rayos	4	85.66%	96.66%	99.85%	81.89%	93.78%	99.3%
Egli	4	85.66%	96.66%	99.85%	81.89%	93.78%	99.3%
Okumura-Hata	2.98	82.9%	95.93%	99.82%	78.84%	92.58%	99.14%
Pendiente Única	3	82.96%	95.95%	99.83%	78.9%	92.61%	99.15%
Pendiente Única	4	85.66%	96.66%	99.85%	81.89%	93.78%	99.3%

Al aumentar el factor de disponibilidad N se afecta la sensibilidad del receptor, es decir, que se necesita un mayor nivel de señal a la entrada del receptor para la obtención de la información con una calidad adecuada. El aumento del nivel de potencia a la entrada del receptor implica una reducción en el área de cobertura, en la cual se garantiza una mejor calidad de cobertura perimetral y a su vez una mejor calidad de cobertura zonal, dado que se tiene una menor distancia entre el transmisor y el receptor.

1.3. MÉTODOS ANALÍTICOS

1.3.1. Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento

El método MCL [1] asume un único transmisor interferente operando en un canal a la máxima potencia y un único receptor víctima de interferencia operando con niveles de señal cercanos al valor de sensibilidad, tal como se muestra en la Figura 13. El método se aplica con el fin de obtener un valor de aislamiento, el cual puede ser traducido en una separación mínima en frecuencia y una separación mínima en distancia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia, mediante el uso de un modelo de propagación acorde al escenario de implementación [4]. Su uso es sencillo porque no es necesario un computador para su implementación. Sin embargo, el principal inconveniente es su análisis del peor de los casos, el cual produce un resultado espectralmente ineficiente en escenarios de naturaleza estadística. El método MCL [1] no considera un porcentaje de tiempo o un porcentaje del área de servicio (disponibilidad) en el cual se cumple el aislamiento obtenido.

El método asume que el receptor víctima de interferencia opera continuamente a 3 dB por encima del valor de sensibilidad, lo que define el nuevo valor de piso de ruido. La interferencia en el receptor víctima de interferencia se debe limitar de tal manera que garantice la relación de protección definida. Un modelo de pérdida de propagación se selecciona para estimar el aislamiento que debe ser garantizado por medio de la separación en distancia. Sin embargo, el modelo de propagación elegido no tiene en cuenta efectos asociados a desvanecimientos y las fuentes de interferencia no están relacionadas a distribuciones probabilísticas, por lo que no se tienen valores de porcentajes de tiempo o porcentaje del área de servicio que cumplen con el aislamiento requerido [33].

El método MCL [1] plantea dos ecuaciones para estimar el aislamiento necesario de emisiones no deseadas y de emisiones de interferencia que desensibilizan el receptor víctima de interferencia (bloqueo), respectivamente.



Figura 13. Modelo general del sistema para MCL.
Fuente: Elaboración propia.

1.3.1.1. Análisis de emisiones no deseadas

La ecuación de aislamiento (en dB) para el análisis de emisiones no deseadas según el método MCL [1], se expresa como:

$$\text{Aislamiento} = P_{INT} + dB_{BW} + MC_{INT} + G_{VICT} + G_{INT} - \left(S_{VICT} - \frac{C}{I_{VICT}} \right) + f(dBc_{INT}, P_{INT}), \quad (23)$$

donde:

P_{INT} (en dBm) es la máxima potencia del transmisor interferente.

dB_{BW} (en dB) es un factor de conversión de ancho de banda entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia.

MC_{INT} (en dB) es un margen de operación para sistemas con múltiples portadoras, el cual se considera cuando el transmisor interferente es una estación base que transmite múltiples portadoras.

G_{VICT} (en dBi) es la ganancia de la antena del receptor víctima de interferencia con respecto a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).

G_{INT} (en dBi) es la ganancia de antena del transmisor interferente con respecto a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).

S_{VICT} (en dBm) es la sensibilidad del receptor víctima de interferencia.

C/I_{VICT} (en dB) es la relación de protección del receptor víctima de interferencia.

$f(dB_{C_{INT}}, P_{INT})$ (en dBc⁹) es una función que define la potencia de ruido de banda ancha¹⁰ para un desplazamiento de frecuencia dado con respecto a la potencia de la portadora del transmisor interferente.

1.3.1.2. Análisis de bloqueo del receptor

La ecuación de aislamiento (en dB) para el análisis de bloqueo según el método MCL [1], se expresa como:

$$\text{Aislamiento} = P_{INT} + MC_{INT} + G_{VICT} + G_{INT} - f(B_{VICT}, S_{VICT}), \quad (24)$$

donde:

P_{INT} (en dBm) es la máxima potencia del transmisor interferente.

MC_{INT} (en dB) es un margen de operación para sistemas con múltiples portadoras, el cual se considera cuando el transmisor interferente es una estación base que transmite múltiples portadoras.

G_{VICT} (en dBi) es la ganancia de la antena del receptor víctima de interferencia con respecto a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).

G_{INT} (en dBi) es la ganancia de antena del transmisor interferente con respecto a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).

⁹ Las unidades dBc (decibeles relativos al nivel de portadora) representan la relación o diferencia en decibeles de la potencia de una señal a la potencia de señal de una portadora. Si el valor en dBc es positivo, entonces la potencia de la señal es mayor que el nivel de potencia de la portadora. Si el valor en dBc es negativo, entonces la potencia de la señal es menor que el nivel de potencia de la portadora.

¹⁰ Conocido como ruido de transmisor, piso de ruido de transmisión o radiación de ruido de banda ancha del transmisor, y es un concepto que hace referencia a la interferencia causada por señales transmitidas fuera del ancho de banda asignado a su transmisión. En un mundo ideal, un transmisor generaría su señal con el 100% de su potencia dentro del ancho de banda asignado. En el mundo real, este nivel de precisión no es posible. Mientras una gran parte de la potencia de transmisión se encuentra dentro del ancho de banda asignado, existe una fracción de potencia que se “fuga” en frecuencias por encima y por debajo del canal deseado. Transmisores modernos incluyen filtros que atenúan estas señales, sin embargo, a pesar de estas medidas ruido del transmisor se escapa afectando el desempeño de receptores operando en canales adyacentes. El efecto de estas fuentes de interferencia es más pronunciado en frecuencias cercanas a la frecuencia portadora del transmisor, pero también impacta receptores operando a varios MHz de la frecuencia central de transmisión [34]. El ruido de transmisión es usualmente considerado como un nivel discreto en dBm/Hz o un nivel relativo al nivel de portadora en dBc/Hz [35].

$f(B_{VICT}, S_{VICT})$ (en dBm) es una función que define el bloqueo del receptor víctima de interferencia¹¹ considerando el desplazamiento en frecuencia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia

1.3.2. Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento Mejorado

El método E-MCL [1] es una versión más completa o elaborada del método MCL [1], el cual se aplica con el fin de obtener un valor de aislamiento requerido entre el receptor víctima de interferencia y uno o múltiples transmisores interferentes distribuidos uniformemente, teniendo en cuenta el efecto del desvanecimiento de la señal, tal como se muestra en la Figura 14. El aislamiento del sistema resultante puede ser traducido en separaciones en distancia o frecuencia, así como en una probabilidad de interferencia. El método E-MCL [1] es semi-analítico y se puede implementar usando una calculadora, un computador o ambos [1]. E-MCL considera parámetros o mecanismos que no se tienen en cuenta en el método MCL [1], tales como:

- La disponibilidad de cada enlace (calidad de cobertura) de los transmisores interferentes al receptor víctima de interferencia (sistema interferente). De hecho, la máxima potencia de transmisión de cada transmisor interferente es función del radio de cobertura y de la disponibilidad intrínseca del enlace (solo limitado por ruido). Para estimar el valor de máxima potencia se utilizan expresiones del método de W. C. Jakes [31].
- Un mecanismo de control de potencia¹² asociado al sistema interferente. Dado que, el método MCL [1] utiliza implícitamente un control de potencia únicamente entre el transmisor deseado y el receptor víctima de interferencia (sistema interferido o víctima), al asumir que el nivel de la señal útil en la entrada del receptor víctima de interferencia es constante, independientemente de los demás parámetros del sistema (características del transmisor, modelo de pérdidas de propagación, y separación entre transmisor y receptor, entre otros). Sin embargo, en caso de ser necesario, y para facilitar la comparación con el método numérico o probabilístico (método de Monte Carlo), es posible eliminar el control de potencia.
- La disponibilidad del enlace asociado al sistema interferido o víctima. El receptor víctima de interferencia opera a N dB (en lugar de 3 para MCL [1]) por encima

¹¹ La característica de bloqueo del receptor es una medida de su capacidad para recibir una señal deseada a la frecuencia asignada en presencia de una señal de interferencia u otras señales en canales adyacentes. El bloqueo sucede cuando una señal fuera de banda con un nivel considerable de potencia sobrecarga el receptor afectando su sensibilidad [36].

¹² El control de potencia comprende las técnicas y algoritmos que permiten manejar y ajustar la potencia transmitida con el objetivo de mejorar parámetros críticos en el desempeño de las redes de comunicación inalámbricas, permitiendo optimizar la calidad de los servicios ofrecidos a los usuarios.

de su valor de sensibilidad de referencia, lo cual define un nuevo valor de sensibilidad o piso de ruido. El nivel de interferencia debe limitarse de manera que se logre la relación de protección requerida. Cuanto mayor sea N, mayor será la disponibilidad del enlace del sistema interferido.

Al igual que el método MCL, el método E-MCL [1] utiliza dos ecuaciones para calcular el aislamiento requerido, una para el análisis de emisiones no deseadas y la otra para el análisis de bloqueo.

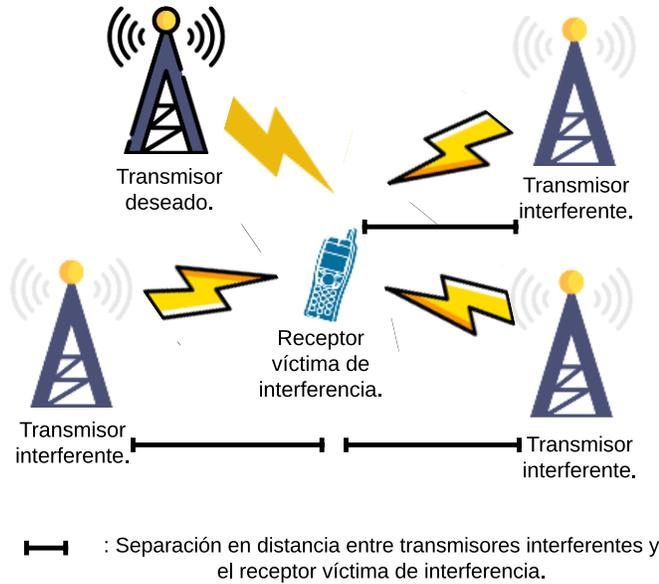


Figura 14. Modelo general del sistema para E-MCL.
Fuente: Elaboración propia.

1.3.2.1. Análisis de emisiones no deseadas

El aislamiento (en dB) para el análisis de emisiones no deseadas según el método E-MCL [1], se expresa como:

$$\begin{aligned} \text{Aislamiento} = & P_{INT} + dB_{BW} + MC_{INT} + G_{VICT} + G_{INT} - \left(S_{VICT} - \frac{C}{I_{VICT}} \right) \quad (25) \\ & + f(dB_{C_{INT}}, P_{INT}) - 10 \log_{10} \left(10^{\frac{N}{10}} - 1 \right), \end{aligned}$$

donde:

P_{INT} (en dBm) es la máxima potencia del transmisor interferente.

dB_{BW} (en dB) es un factor de conversión de ancho de banda entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia.

MC_{INT} (en dB) es un margen de operación para sistemas con múltiples portadoras, el cual se considera cuando el transmisor interferente es una

estación base que transmite múltiples portadoras.

G_{VICT} (en dBi) es la ganancia de la antena del receptor víctima de interferencia en comparación a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).

G_{INT} (en dBi) es la ganancia de antena del transmisor interferente en comparación a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).

S_{VICT} (en dBm) es la sensibilidad del receptor víctima de interferencia.

C/I_{VICT} (en dB) es la relación de protección del receptor víctima de interferencia.

$f(dBc_{INT}, P_{INT})$ (en dBc) es una función que define la potencia del ruido de banda ancha para un desplazamiento de frecuencia dado con respecto a la potencia de la portadora del transmisor interferente.

N (en dB) es el factor de disponibilidad del sistema interferido.

1.3.2.2. Análisis de bloqueo del receptor

El aislamiento (en dB) para el análisis de bloqueo del receptor según el método E-MCL [1], se expresa como:

$$\begin{aligned} \text{Aislamiento} = & P_{INT} + MC_{INT} + G_{VICT} + G_{INT} - f(B_{VICT}, S_{VICT}) \quad (26) \\ & - 10 \log_{10} \left(10^{\frac{N}{10}} - 1 \right), \end{aligned}$$

donde:

P_{INT} (en dBm) es la máxima potencia del transmisor interferente.

MC_{INT} (en dB) es un margen de operación para sistemas de múltiples portadoras, el cual se considera cuando el transmisor interferente es una estación base con esa característica.

G_{VICT} (en dBi) es la ganancia de la antena del receptor víctima de interferencia en comparación a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).

G_{INT} (en dBi) es la ganancia de antena del transmisor interferente en comparación a un radiador isótropo (incluidas las pérdidas del cable).

$f(B_{VICT}, S_{VICT})$ es una 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 (en dB) es el factor de disponibilidad del sistema interferido.

1.3.2.3. Sistema interferente con control de potencia

La potencia de transmisión de un transmisor interferente se puede controlar automáticamente mediante un algoritmo de control de potencia. El control de potencia en el método E-MCL [1] se aplica de manera simplificada de la siguiente manera:

1. Se considera el radio de cada celda R_0 para cada transmisor interferente.
2. Se considera las pérdidas de propagación considerando el modelo de pendiente única, con la siguiente expresión:

$$A = 10 n \log_{10} d + k \quad (27)$$

donde, A (en dB) es el valor de pérdidas de propagación; d es la distancia entre transmisor y receptor; n es el exponente de propagación; y k (en dB) es la constante que corresponde a las pérdidas de propagación a una distancia unitaria y que depende de las características del escenario de implementación.

3. Se determina la máxima potencia del transmisor interferente (PM) en función del radio de la celda y de la disponibilidad del sistema (calidad de cobertura) (método de W. C. Jakes).
4. Se aproxima el tamaño de la celda por un círculo de radio R_0 y se divide en L anillos y un pequeño círculo restante. En el primer anillo (borde de la celda), delimitado por R_0 y R_1 , la potencia es $P_1 = PM$; en el i -ésimo anillo, delimitado por R_{i-1} y R_i , la potencia es $P_i = PM - (i - 1) q$ con i un número entero positivo que toma valores desde 1 hasta L y q (en dB) el paso de control de potencia; en el último anillo (L^{th}), delimitado por R_{L-1} y R_L , la potencia es $P_L = PM - (L - 1) q$, con $L = D/q$, donde D (en dB) es el rango dinámico; y en el centro de la celda queda un pequeño círculo de radio R_L en el cual la potencia es $P_{L+1} = PM - Lq$, tal como se muestra en la Figura 15.

El paso de cuantificación puede ser verificado mediante la siguiente expresión:

$$q = 10 n \log_{10} \left(\frac{R_{i-1}}{R_i} \right), \quad (28)$$

con i desde 1 hasta L .

El área S_i del i -ésimo anillo en relación con el área total de la celda es:

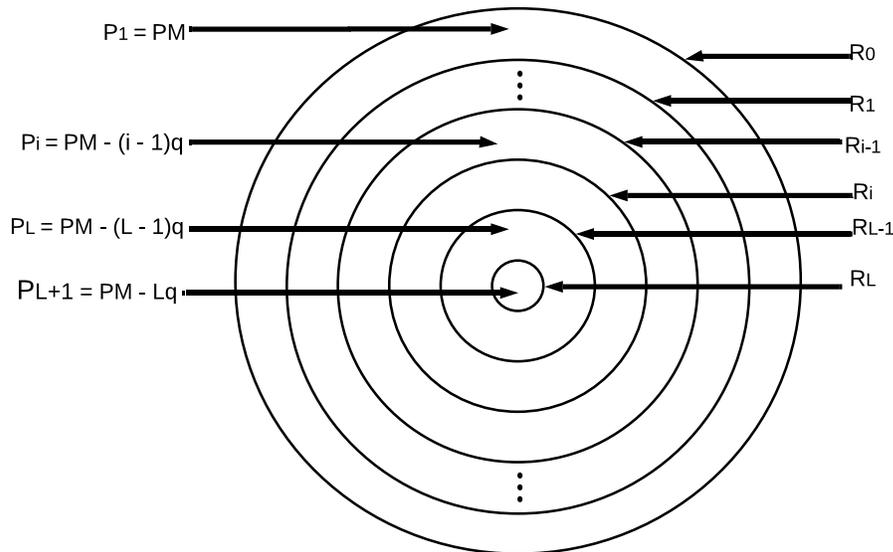
$$S_i = (R_{i-1}^2 - R_i^2)/R_0^2, \quad (29)$$

con i desde 1 hasta L . Se debe tener en cuenta que para el círculo restante $R_{i-1} = R_L$ y $R_i = 0$.

5. Para cada potencia $P_i = PM - (i - 1)q$, se determina la distancia de separación, ds_i , con i desde 1 hasta $L + 1$. Para ello se utiliza: el modelo de pérdidas de propagación apropiado, las características del receptor víctima de interferencia, las características del transmisor interferente y el margen de operación del receptor víctima de interferencia.
6. Finalmente, asumiendo una distribución uniforme de fuentes de interferencias se determina la distancia de separación media, la cual está determinada por:

$$\langle ds \rangle = \sum_{i=1}^{L+1} S_i \cdot ds_i, \quad (30)$$

Se debe tener en cuenta que cuando el control de potencia no está activo, $\langle ds \rangle = ds_1$, siendo ds_1 solo función de PM.



P_i : Potencia en el i -ésimo anillo.
 R_i : Radio i -ésimo que separa los anillos i e $i+1$.

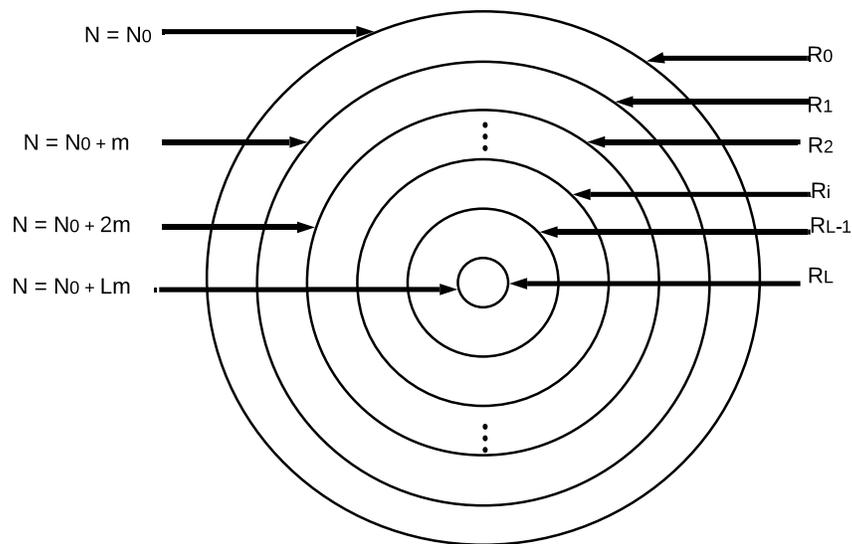
Figura 15. Potencia en los L anillos de una celda.
 Fuente. Elaboración propia.

1.3.2.4. Sistema interferido sin control de potencia

Considerando el área de servicio o de cobertura de un transmisor deseado dentro del sistema interferido con potencia de transmisión (P_T) constante (sin control de potencia), el radio R_0 de esta área se determina principalmente por P_T y por la calidad de cobertura esperada dentro del área (método de W. C. Jakes). A esta distancia R_0 del transmisor deseado, el margen de operación del receptor víctima

de interferencia es igual a N_0 ¹³ (en dB).

Se aproxima el tamaño de la celda del transmisor deseado por un círculo de radio R_0 y se divide en un conjunto de anillos de radio $R_0 > R_1 > R_2 \dots R_L$ y un pequeño círculo restante de radio R_L . Los valores R_1, R_2, \dots son tales que si para R_0 el margen de operación del enlace del receptor víctima de interferencia es N_0 , para R_1 : $(N_0 + m)$ (en dB), para R_2 : $(N_0 + 2m)$ (en dB) y así sucesivamente hasta llegar al círculo de radio R_L donde el margen de operación del enlace es $(N_0 + Lm)$ (en dB), tal como se muestra en la Figura 16, donde los parámetros m y L son números enteros positivos, los cuales se escogen de manera arbitraria de tal modo que cuanto mayor sea L y menor m , más preciso será el cálculo del margen de operación del enlace.



N: Margen de operación del sistema en cada radio.
 R_i : Radio i -ésimo que separa los anillos i e $i+1$.

Figura 16. Margen de operación en los anillos de la celda del receptor víctima de interferencia.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores $R_0, R_1, \dots, R_i, \dots, R_L$ son tales que:

$$m = 10 n \log_{10} \left(\frac{R_{i-1}}{R_i} \right), \quad (31)$$

con i desde 1 hasta L y n el exponente de propagación.

El área S_i del i -ésimo anillo en relación con el área total del círculo de radio R_0 es:

¹³ Diferencia entre el nivel de potencia medio recibido a una distancia R_0 y el nivel de sensibilidad intrínseco del receptor.

$$S_i = \frac{R_{i-1}^2 - R_i^2}{R_0^2} \quad (32)$$

Aproximando el margen de operación del enlace del sistema interferido dentro del anillo i a un valor de $(N_0 + (2i - 1)m/2)$ y suponiendo infinito el margen de operación dentro del círculo de radio R_L (hipótesis optimista), es posible calcular el aislamiento requerido utilizando (25) y reemplazando el valor de N por $(N_0 + (2i - 1)m/2)$ con i desde 1 hasta L .

Con el valor de aislamiento se determina la distancia de separación media $\langle ds_i \rangle$ para cada valor de i o un valor ds_i de acuerdo con si se implementa o no el mecanismo de control de potencia del sistema interferente. En el círculo restante se establece que $\langle ds \rangle = ds = 0$.

Ahora suponiendo que el receptor víctima de interferencia se distribuye de manera uniforme sobre el área de cobertura del sistema interferido (círculo de radio R_0), es posible realizar una suma ponderada del conjunto de valores $\langle ds_i \rangle$ o ds_i , haciendo uso de las siguientes expresiones:

$$ds_{NPC} = \sum_{i=1}^L ds_i \cdot S_i, \quad (33)$$

$$\langle (ds)_{NPC} \rangle = \sum_{i=1}^L \langle ds_i \rangle \cdot S_i. \quad (34)$$

Se debe tener en cuenta que el método utilizado para considerar el enfoque del sistema interferido sin control de potencia es de hecho muy similar al enfoque utilizado en el sistema interferente con control de potencia. Las diferencias son que en el primer caso, N es variable y la cobertura del sistema víctima de interferencia se divide de forma arbitraria, en donde esta división solo depende de la precisión de cálculo deseada, por el contrario, en el segundo caso, la potencia del transmisor interferente, P_T , es variable y la cobertura del transmisor interferente se divide en función del algoritmo de control de potencia del mismo (tamaño de paso y rango dinámico) y de las características de los límites de señales espurias (en dBc o en dBm).

1.3.2.5. Consideraciones de la máscara espectral

En el método E-MCL [1], cada escenario básico se define mediante un conjunto de parámetros de entrada:

1. Modelo de pérdidas de propagación.

2. Separación en frecuencia entre la frecuencia del receptor víctima de interferencia y el transmisor interferente.
3. Características del sistema interferente:
 - La máxima potencia en función del tamaño de la celda y las características técnicas de los equipos involucrados en el análisis (ganancia de antena, sensibilidad del receptor víctima de interferencia, entre otras) teniendo en cuenta la calidad de la cobertura del sistema interferente.
 - El mecanismo de control de potencia (tamaño paso control de potencia y rango dinámico).
 - Los niveles de transmisión de emisiones no deseadas (en dBc) o el comportamiento de bloqueo del receptor víctima de interferencia (en dBm), en función de la separación en frecuencia y de cada potencia de transmisión de las componentes espurias.
4. Características del sistema víctima de interferencia:
 - Sensibilidad.
 - Valor mínimo de C/I .
 - Nivel de la señal deseada en la entrada del receptor víctima de interferencia en función de la calidad de la cobertura del sistema víctima de interferencia.

Para cada potencia de transmisión del sistema interferente se calcula el aislamiento necesario al igual que la distancia de separación correspondiente. Por otro lado, utilizando el algoritmo de control de potencia se estima las asignaciones de potencias de transmisión y, por lo tanto, también las distancias mínimas de separación. Finalmente, se calcula la distancia de separación media para ese escenario básico.

En la práctica, dentro de un área geográfica dada, los transmisores interferentes utilizan diferentes canales o frecuencias dependiendo del plan de frecuencia local y por lo tanto existe una separación en frecuencia con respecto al canal del receptor víctima de interferencia por lo que la consideración adicional de la máscara espectral amplía el alcance del escenario básico del método E-MCL [1].

La máscara espectral se caracteriza por una función escalonada de niveles de potencia (que indica valores límite), con cada valor asociado a una banda de frecuencia a ambos lados de la frecuencia de transmisión.

Si f_T es la frecuencia central de un transmisor interferente, la máscara espectral se define como:

- Un límite L_A para las componentes en frecuencia de f_T a $f_T \pm df_A$.
- Un límite L_B para las componentes en frecuencia de $f_T - df_B$ a $f_T - df_A$ y de $f_T + df_A$ a $f_T + df_B$.
- Y así sucesivamente, tal como se muestra en la Figura 17.

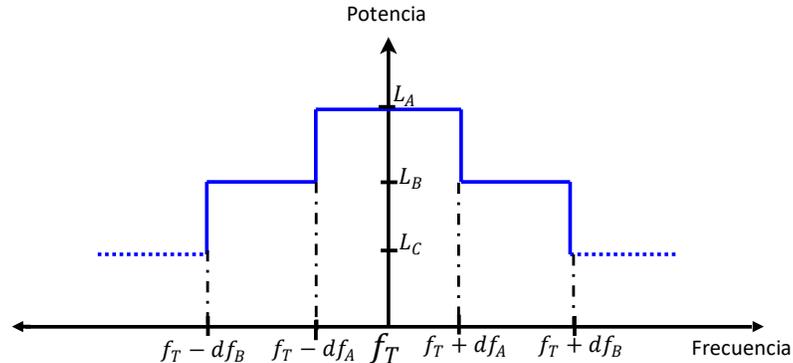


Figura 17. Definición de la máscara espectral para su aplicación en el método E-MCL.

Fuente: Elaboración propia.

Considerando ahora la frecuencia central del receptor víctima de interferencia f_R , entonces:

- Todos los transmisores interferentes cuya frecuencia central de operación se encuentre entre f_R y $(f_R \pm df_A)$ afectarán al receptor víctima de interferencia con un nivel de potencia de transmisión de emisiones no deseadas igual a L_A . Estos transmisores se pueden denominar bloqueadores clase A.
- Todos los transmisores interferentes cuya frecuencia central de operación se encuentre entre $f_R - df_B$ y $f_R - df_A$ o entre $f_R + df_A$ y $f_R + df_B$, afectarán al receptor víctima de interferencia con un nivel de potencia de transmisión de emisiones no deseadas igual a L_B . Estos transmisores se pueden denominar como bloqueadores de clase B. Y así sucesivamente.

Cada transmisor interferente es miembro de una sola clase de bloqueadores. Entonces, conociendo el plan de frecuencias del sistema interferente, los niveles de emisión dentro y fuera de banda y la frecuencia central del receptor víctima de interferencia, se puede obtener la relación del número de fuentes interferentes en cada clase con respecto al número total de fuentes interferentes, los cuales se denominan fracciones P_A, P_B, \dots y para las cuales se cumplen la relación:

$$P_A + P_B + \dots = 1. \quad (35)$$

A cada clase de bloqueador corresponde una separación media dS_A, dS_B, \dots asociada a un escenario básico y en función del nivel de emisiones no deseadas de

transmisión L_A, L_B, \dots . Finalmente, se puede establecer una distancia media de separación global haciendo uso de la siguiente expresión:

$$dS = P_A \cdot dS_A + P_B \cdot dS_B + \dots \quad (36)$$

Por ejemplo, considerando una máscara espectral simétrica para el receptor víctima de interferencia definida por 3 valores límite: L_A, L_B, L_C y 2 límites de frecuencia: df_A, df_B , y la asignación de 10 frecuencias al sistema interferente en la banda ($f_{T_1} - f_{T_{10}}$), tal como se muestra en la Figura 18.

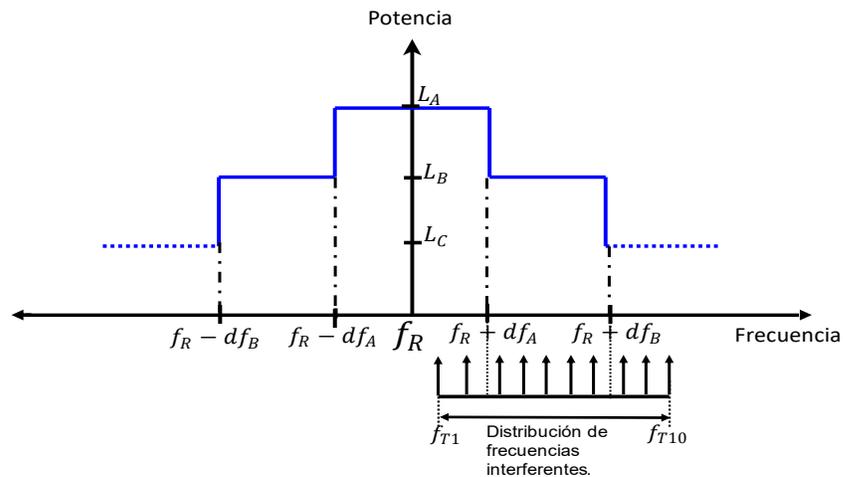


Figura 18. Ejemplo de aplicación de la máscara espectral en el método E-MCL.
Fuente: Elaboración propia.

Entonces, debido a la posición relativa entre f_R (canal víctima de interferencia) y la asignación de frecuencias del sistema interferente, se puede subdividir el conjunto general de interferencias en 3 clases:

- Clase A, en donde = 2/10 con un nivel de transmisión no deseado = L_A .
- Clase B, en donde = 5/10 con un nivel de transmisión no deseado = L_B .
- Clase C, en donde = 3/10 con un nivel de transmisión no deseado = L_C .

Por lo tanto, definiendo la máscara espectral en M pasos diferentes (en términos de separación en nivel y frecuencia) y conociendo la frecuencia central del receptor víctima de interferencia y el plan de frecuencias del sistema interferente, se pueden definir M clases de bloqueadores, y para cada clase una distancia media de separación y una porción de transmisores interferentes. Con lo anterior se puede calcular una distancia media de separación global. De esta manera, el método E-MCL [1] puede ser adaptado para tener en cuenta el efecto global de señales no deseadas.

1.3.2.6. Interpretación de resultados

El resultado del método E-MCL [1] es un valor de aislamiento que puede transformarse en una distancia de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia, en el caso de que se considere un único transmisor interferente.

Por otro lado, en el caso de que se esté considerando un sistema interferente (múltiples transmisores interferentes), se supone una distribución uniforme de los múltiples transmisores aplicando o no el control de potencia, y se calcula un aislamiento y su distancia de separación correspondiente para cada uno de los transmisores interferentes, por lo que se puede obtener una distancia de separación media al considerar una suma ponderada de las distancias calculadas para cada transmisor interferente. Considerando la densidad de fuentes de interferencia, esta separación física media se puede convertir en una probabilidad de interferencia.

Sin embargo, se debe tener cuidado al interpretar esta separación física media o esta probabilidad de interferencia, e.g., en un sistema de comunicaciones móviles se puede especificar que el sistema tiene una probabilidad de ser afectado por interferencia del 5%. Sin embargo, no se indica si esto significa que el 5% de los receptores están afectados por interferencia el 100% del tiempo o que el 100% de los receptores están afectados por interferencia el 5% del tiempo. Por lo que, generalmente se entiende que la realidad se encuentra en algún lugar entre los dos límites extremos.

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

La recomendación ITU-R SM.337 [2] 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 [2]:

- 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 del medio de transmisión (las cuales son variables) y las pérdidas de propagación de las señales radio en función de la frecuencia y la distancia.

1.3.3.1. Cálculo de interferencia

El cálculo de interferencia según la Recomendación ITU-R SM.337 [2] se realiza por medio de dos factores, los cuales son: factor espectral y factor espacial. De igual manera, se debe realizar la definición de un criterio de interferencia aceptable entre un sistema interferente y un sistema víctima de interferencia. El procedimiento general para determinar dichos factores y criterios se presenta a continuación.

- **Factor espectral**

El factor espectral depende de las características espectrales del transmisor interferente y de la respuesta en frecuencia del receptor interferido o víctima de interferencia. En el transmisor se tiene en cuenta la densidad espectral de potencia, la cual depende de la modulación y el ancho de banda de la señal de información. En el receptor es necesario identificar las características de respuesta en frecuencia intermedia (FI) del receptor, para lo cual pueden considerarse especificaciones del fabricante, por ejemplo, el ancho de banda en FI a 6 dB y 40 dB. El factor espectral se representa mediante el factor de Rechazo Fuera de Canal¹⁴ (OCR, *Off-Channel-Rejection*), también conocido como FDR en (37), el cual es definido por la siguiente expresión:

$$FDR(\Delta f) = OCR(\Delta f) = -10 \log_{10} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) df}, \quad (37)$$

donde:

$P(f)$ (en W/Hz) es la densidad espectral de potencia de la señal interferente.

$H(f)$ es la respuesta de frecuencia equivalente en FI del receptor víctima de interferencia.

Δf (en Hz) es la separación en frecuencia entre las frecuencias de operación del receptor interferido y el transmisor interferente.

$OCR(\Delta f)$ depende de la magnitud de la superposición entre la máscara espectral de la señal interferente y la banda de paso del receptor víctima de interferencia. Cuando Δf aumenta, la magnitud de la superposición

¹⁴ El factor de rechazo fuera de canal (OCR) mide la capacidad de un receptor para rechazar interferencias.

disminuye, lo que implica una potencia de interferencia más baja o, de manera equivalente, valores más elevados de $OCR(\Delta f)$.

OCR puede ser dividido en dos términos: un término de rechazo por la selectividad del receptor a la señal transmitida por un transmisor interferente que opera en la misma frecuencia y dentro de banda, denominado Rechazo Dentro de Banda (OTR, *On-Tune Rejection*); y un término de rechazo por la selectividad del receptor a la señal transmitida por un transmisor interferente que opera en la misma frecuencia y fuera de banda, denominado como Rechazo Fuera de Banda (OFR, *Off-Frequency Rejection*). OFR y OTR se relacionan con OCR por medio de la siguiente expresión:

$$OCR(\Delta f) = OTR(\Delta f) + OFR(\Delta f), \quad (38)$$

donde, OTR (en dB) y OFR (en dB) se obtienen haciendo uso de las siguientes expresiones:

$$OTR(\Delta f) = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f)|^2 df}, \quad (39)$$

$$OFR(\Delta f) = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} P(f) |H(f)|^2 df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df}, \quad (40)$$

- **Factor espacial**

El factor espacial también conocido como factor FD, es una medida de la mínima separación en distancia que es requerida entre un transmisor interferente y un receptor víctima de interferencia como función de la diferencia entre sus frecuencias de operación y del modelo de propagación bajo consideración. Tanto la característica FD como el factor OCR constituyen medidas para la evaluación de numerosos casos de interferencia relacionados con compartición de frecuencias co-canal, frecuencias de canales adyacentes, permitiendo estimar la separación mínima en frecuencia y en distancia que garanticen el funcionamiento de los sistemas de comunicación inalámbricos bajo unos determinados parámetros de calidad.

- **Criterio de interferencia**

El criterio de interferencia es una relación sencilla basada en el concepto de que la interferencia es perjudicial o tolerable, el cual se expresa mediante la relación de protección, por lo tanto, la interferencia se considera tolerable si se satisface la siguiente desigualdad:

$$P_d - P_i \geq \alpha \quad (41)$$

donde:

P_d (en dBW) es el nivel de la señal deseada.

P_i (en dBW) es el nivel de la señal interferente.

α (en dB) es la relación de protección.

- **Procedimiento**

La Recomendación ITU-R SM.337 [2] describe un procedimiento para determinar la mínima separación en frecuencia y en distancia, el cual puede resumirse en tres etapas.

- Etapa 1: Determinar el nivel de la señal deseada, P_d (dBW), en la etapa de entrada del receptor interferido.
- Etapa 2: Se calcula el nivel de potencia de interferencia resultante en la entrada del receptor víctima de interferencia, aplicando el siguiente balance de enlace:

$$P_i = P_t + G_r - L_p - OCR(\Delta f), \quad (42)$$

donde:

P_t (en dBW) es la PIRE del transmisor interferente.

G_r (en dBi) es la ganancia de la antena receptora en comparación a un radiador isótropo.

L_p (en dB) es la pérdida de propagación en el trayecto.

$OCR(\Delta f)$ (en dB) es el factor de rechazo fuera del canal para una separación de frecuencia Δf (en Hz) expresado en (37) y (42).

- Etapa 3: Sustituir P_d y P_i en (41) para derivar o calcular numéricamente una relación entre la separación en frecuencia, Δf , y la separación en distancia, d , de forma tal que la interferencia se considere tolerable.

1.3.3.2. 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 alternativa es implementar el aislamiento requerido entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia haciendo uso del procedimiento que se muestra a continuación:

- Etapa 1: Determinar 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:

$$\text{Aislamiento} = P_t + G_r - (P_{min} - \alpha) - OCR(\Delta f) - 10 \log_{10} \left(10^{\frac{N}{10}} - 1 \right), \quad (43)$$

donde:

P_{min} (en dBW) es el nivel mínimo deseado de la señal (sensibilidad del receptor víctima de interferencia).

N (en dB) es el factor de disponibilidad del sistema interferido.

- Etapa 2: se aplica un modelo de propagación al aislamiento obtenido en (43) para obtener la separación en frecuencia y en distancia en las que el nivel de interferencia en el receptor víctima de interferencia es tolerable.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. DEFINICIÓN

La metodología es una parte fundamental en el desarrollo de un proyecto, dado que en ella se elige el camino a seguir para la obtención de los resultados esperados.

En este trabajo se aplicó la metodología en cascada que consta del desarrollo secuencial de una serie de etapas que puede variar según la conveniencia del proyecto. Además, para pasar a la siguiente etapa es necesario que se hayan cumplido los objetivos de la etapa previa, por lo que una fase empieza justo cuando la anterior termina [37].

La metodología en cascada ha tenido transformaciones desde que fue presentada en 1970 por Royce. En la actualidad, para aplicaciones prácticas generalmente se tienen cinco etapas, las cuales son [38]:

- **Análisis de requerimientos:** En esta etapa se define lo que se espera del proyecto, así como una descripción detallada de los requisitos con el fin de obtener un problema complejo dividido en pequeñas tareas secundarias.
- **Diseño:** Esta etapa plantea una solución teniendo en cuenta los requerimientos de la etapa previa.
- **Implementación:** Se traduce la solución planteada en la fase anterior en un producto funcional, se depuran errores y se realizan pruebas unitarias de cada uno de los componentes del proyecto.
- **Prueba:** Se realizan pruebas del producto integrado y se evalúa el cumplimiento de los requerimientos planteados en las etapas previas.
- **Servicio:** Una vez cumplidas las cuatro primeras etapas, se realiza la entrega y el mantenimiento del producto.

2.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología en cascada es flexible, por lo que se pueden modificar sus etapas dependiendo del propósito del proyecto, por tal razón, se definen cuatro etapas para el desarrollo del trabajo de grado, como se muestra en la Figura 19.

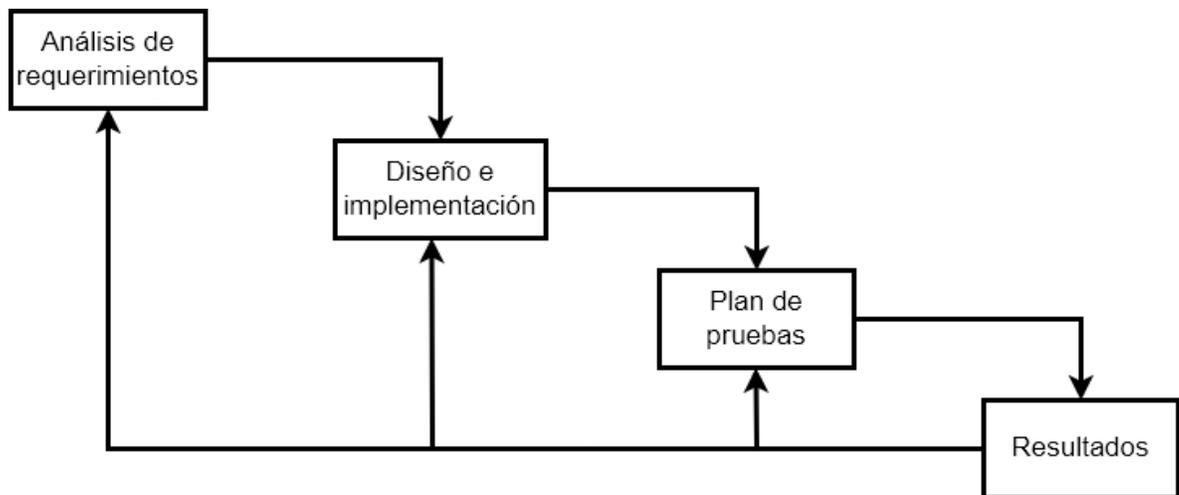


Figura 19. Metodología de desarrollo.

2.2.1. Análisis de Requerimientos

Los métodos analíticos generan un valor de aislamiento (en dB) entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia, por lo que se debe tomar este valor y hacer uso de un modelo de pérdidas de propagación, con el fin de obtener un valor de separación en distancia. Teniendo en cuenta lo anterior se plantean los siguientes requerimientos.

2.2.1.1. Métodos analíticos

Considerar en el establecimiento del aislamiento los siguientes métodos de análisis:

- Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento (MCL [1]).
- Método de Mínimas Pérdidas de Acoplamiento Mejorado (E-MCL).
- Método de la Recomendación ITU SM.337 [2].
- Método Alternativo de la Recomendación ITU SM.337.

2.2.1.2. Modelos de pérdidas de propagación

Los siguientes modelos de pérdidas de propagación deben ser considerados:

- Modelo de Espacio Libre.
- Modelo de Dos Rayos (en su expresión general).
- Modelo de Pendiente única (con $n = 3$ y $Lo = 70$).
- Modelo de Pendiente única (con $n = 4$ y $Lo = 100$).
- Modelo de Okumura-Hata (para escenarios rurales).
- Modelo de Egli.

2.2.1.3. Escenario de aplicación

El escenario de aplicación de los métodos analíticos consta de un transmisor interferente, un transmisor deseado y un receptor, como se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Escenario de aplicación de los métodos analíticos.

El escenario de implementación de los métodos analíticos debe considerar el peor de los casos de interferencia con el fin de garantizar el aislamiento mínimo requerido entre fuentes de radiofrecuencia en función de la separación en frecuencia y distancia para sistemas de comunicaciones operando en VHF y en UHF hasta 466 MHz, por tal motivo, se deben considerar los valores extremos de los parámetros.

2.2.2. Diseño e Implementación

La implementación de los métodos analíticos se realiza en Matlab. Se elige este software debido a su capacidad para el procesamiento matemático, facilidad de uso, funciones para la visualización de resultados y porque es un software licenciado por la Universidad del Cauca.

2.2.3. Plan de Pruebas

Una vez implementados los métodos analíticos en Matlab, se realiza un plan de pruebas que consta de aplicarlos en el escenario de implementación y posteriormente obtener los valores de separación en distancia mediante el uso de los modelos de pérdidas de propagación.

2.2.3.1. Prueba 1: Aplicación de los métodos analíticos a la frecuencia de 138 MHz

La primera prueba de este trabajo consta de la aplicación de los métodos analíticos para la frecuencia de trabajo de 138 MHz. Todos los métodos analíticos considerados se aplican para las distintas máscaras espectrales y los

correspondientes modelos de pérdidas de propagación, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Prueba 1: Aplicación de los métodos analíticos a la frecuencia de 138 MHz.

Método analítico	Máscara espectral	Modelo propagación
MCL	Tipo B	Espacio libre Dos rayos P. Única ($n = 3$, $Lo = 70$) P. Única ($n = 4$, $Lo = 100$) Okumura-Hata Egli
	Tipo D	
	Tipo E	
E-MCL	Tipo B	
	Tipo D	
	Tipo E	
ITU SM.337	Tipo B	
	Tipo D	
	Tipo E	
ITU SM.337 Alternativo	Tipo B	
	Tipo D	
	Tipo E	

2.2.3.2. Prueba 2: Aplicación de los métodos analíticos a la frecuencia de 470 MHz

La segunda prueba se realiza de manera análoga a la Prueba 1, con la salvedad de que en este caso se toma la frecuencia de trabajo de 470 MHz, como lo muestra la Tabla 8.

Tabla 8. Prueba 2: Aplicación de los métodos analíticos a la frecuencia de 470 MHz.

Método analítico	Máscara espectral	Modelo propagación
MCL	Tipo B	Espacio libre Dos rayos P. Única ($n = 3$, $Lo = 70$) P. Única ($n = 4$, $Lo = 100$) Okumura-Hata Egli
	Tipo D	
	Tipo E	
E-MCL	Tipo B	
	Tipo D	
	Tipo E	
ITU SM.337	Tipo B	
	Tipo D	
	Tipo E	
ITU SM.337 Alternativo	Tipo B	
	Tipo D	
	Tipo E	

2.2.4. Resultados

Al aplicar los métodos analíticos se obtienen resultados del aislamiento mínimo necesario entre sistemas de radiocomunicaciones móviles. De igual manera, se obtiene por aplicación de los modelos de propagación sobre los resultados de aislamiento la distancia de separación mínima en distancia en función de la separación en frecuencia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia para los diferentes anchos de banda considerados en función de las máscaras de emisión espectral (Tipo B, Tipo D y Tipo E). Los resultados y su análisis se presentan en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA ESTIMACIÓN DEL AISLAMIENTO ENTRE SISTEMAS DE RADIO MÓVIL

Para analizar la interferencia entre sistemas de radio móvil por aplicación de métodos analíticos, es necesario centrarse en aquellos aspectos y parámetros claves que influyen en la intensidad de la señal recibida, tales como, potencia de transmisión, ganancias de antenas, pérdidas de propagación, ruido, y métricas de enlace asociadas, junto con factores de degradación y características del escenario de implementación.

Adicionalmente, para analizar sistemas de radio móvil que operan en la misma frecuencia o en frecuencias adyacentes es importante determinar cuanta potencia transmitida por un sistema en una frecuencia se detecta por un receptor en otro sistema. En particular, esto implica la consideración de factores tales como: la máscara espectral de transmisión y la selectividad del receptor. Habiendo calculado las señales deseadas e interferentes teniendo en cuenta estos factores, es posible determinar si los sistemas son compatibles en términos de interferencia o si requieren de un mayor aislamiento, haciendo uso para ello de la relación de protección y la máxima potencia de interferencia admisible en recepción, características que dependen del sistema bajo análisis, y en particular, del método utilizado para el análisis de interferencia.

Los resultados a obtener por medio de la aplicación de los métodos analíticos se encuentran relacionados con datos numéricos y gráficos que indican la mínima distancia que debe haber entre un transmisor interferente y un receptor víctima de interferencia en función de la separación entre las frecuencias de operación. Para obtener estos resultados se consideran los métodos de análisis de aislamiento y los modelos de pérdidas propagación ya indicados. De igual manera, se hace uso de los parámetros relacionados con frecuencia de operación, ancho de banda de canal, máscaras espectrales, entre otros, y valores límites de sensibilidad, potencias de transmisión, ganancias, relación de protección, y de los parámetros de los modelos de pérdidas de propagación (alturas máximas de antenas de transmisión y recepción) con el fin de garantizar por seguridad un mayor aislamiento entre sistemas de radio móvil. Los resultados numéricos y gráficos son obtenidos por medio de la ejecución de las expresiones matemáticas relacionadas a cada uno de los métodos analíticos en Matlab. La Tabla 9 presenta los parámetros considerados en la aplicación de los métodos analíticos.

Tabla 9. Parámetros y valores utilizados en la aplicación de los métodos analíticos.

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	50 W (47dBm)
Relación de protección $(C/I)_{min}$	12 dB
Sensibilidad de receptor móvil	-120 dBm
Ganancia de antena repetidora o estación base	10 dBi
Ganancia de antena móvil	3 dBi
Frecuencias de trabajo	138 MHz y 470 MHz
Altura de antena repetidora o estación base	200 m ¹⁵
Altura de antena móvil	10 m ¹⁶
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)	3 dB, 10 dB y 20 dB
Máscara espectral	Tipo B, Tipo D y Tipo E

3.1. APLICACIÓN DEL MÉTODO MCL

Los resultados de aplicación del método MCL [1] se presentan para cada una de las frecuencias de trabajo: 138 MHz y 470 MHz, y las 3 mascarar espectrales de los sistemas de radio móvil consideradas: Tipo B, Tipo D y Tipo E. En primer lugar, se calcula el aislamiento (en dB) y posteriormente, se aplican los modelos de pérdidas de propagación para encontrar las distancias de separación. En la Figura 21 y desde la

Tabla 10 hasta la Tabla 12 se presentan los resultados de aplicación del método MCL [1] para la frecuencia de 138 MHz, mientras que, en la Figura 22 y desde la Tabla 13 hasta la Tabla 15 se presentan los resultados de aplicación del método MCL [1] para la frecuencia de 470 MHz.

Cada figura está compuesta por 3 imágenes, las cuales presentan los resultados de la aplicación del método MCL [1] para todos los modelos de propagación considerados en el análisis de interferencia, exceptuando el modelo de propagación de espacio libre, debido a que los resultados de distancia obtenidos mediante dicho modelo son mucho mayores que los resultados obtenidos haciendo uso de los

¹⁵ Para la aplicación de los métodos analíticos se consideran los valores límites de las alturas de antena de transmisión, la cual se ha establecido en 200 m basándose en el modelo de propagación de Okumura Hata.

¹⁶ Para la aplicación de los métodos analíticos se consideran los valores límites de las alturas de antenas de los receptores móviles, la cual se ha establecido en 10 m basándose en el modelo de propagación de Okumura Hata.

demás modelos de pérdidas de propagación. En la parte superior izquierda de cada figura se presentan los resultados considerando la máscara espectral Tipo B; en la parte superior derecha de cada figura se presentan los resultados considerando la máscara espectral Tipo D; y en la parte inferior de cada figura se presentan los resultados considerando la máscara espectral Tipo E. Se debe tener en cuenta en este punto que dicho procedimiento se realiza con todos los modelos analíticos considerados en el presente informe.

3.1.1. Aplicación del Método MCL a la Frecuencia de 138 MHz

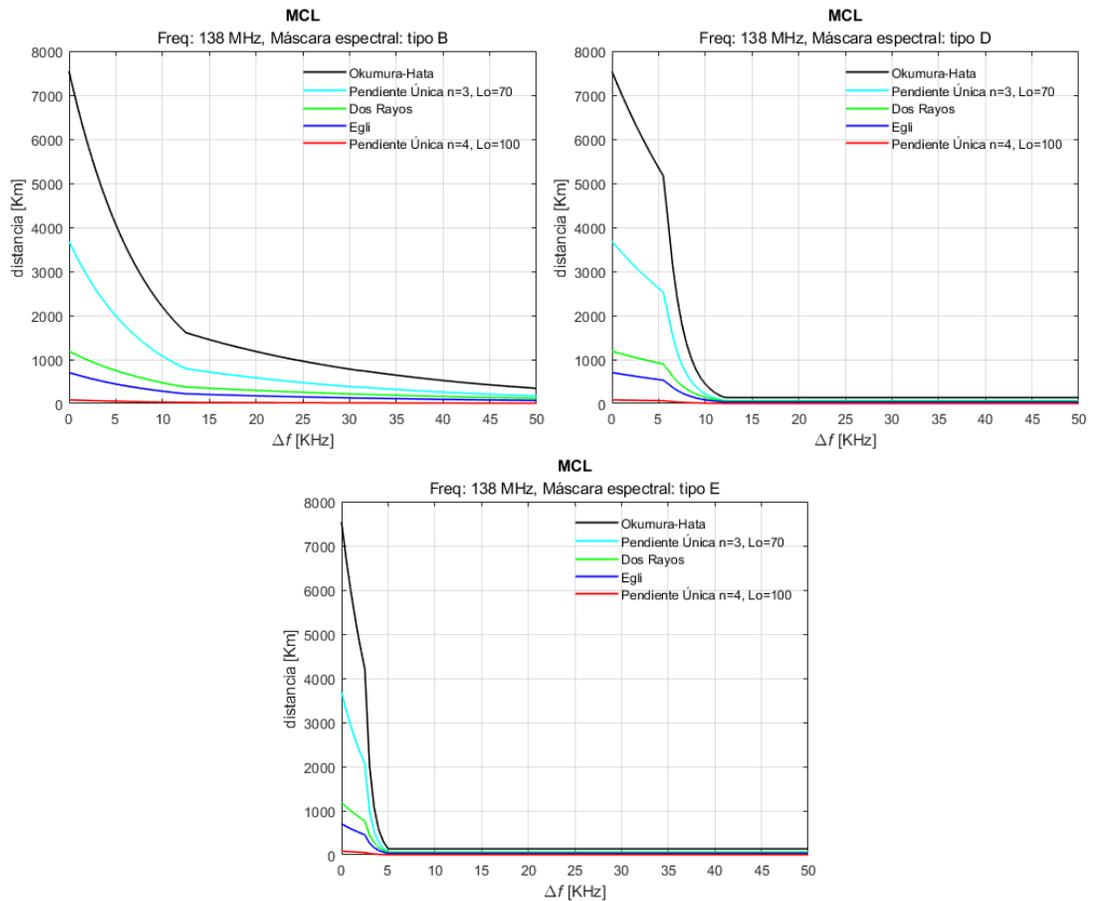


Figura 21. Resultados del método MCL considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Resultados MCL considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 138 MHz MCL	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	122209.77	5672.47	1222.10	916.44	687.24
OKUMURA-HATA	7537.66	962.12	343.74	283.41	233.67
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3684.03	475.81	171.00	141.14	116.50
DOS RAYOS	1189.21	256.21	118.92	102.98	89.18
EGLI	704.40	151.76	70.44	61.00	52.82
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	84.09	18.12	8.41	7.28	6.31

Tabla 11. Resultados MCL considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 138 MHz MCL	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	122209.77	40936.52	386.46	274.35	273.59
OKUMURA-HATA	7537.66	3620.35	158.85	126.24	126.01
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3684.03	1776.89	79.37	63.16	63.05
DOS RAYOS	1189.21	688.27	66.87	56.35	56.27
EGLI	704.40	407.68	39.61	33.37	33.33
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	84.09	48.67	4.73	3.98	3.98

Tabla 12. Resultados MCL considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 138 MHz MCL	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	122209.77	17261.79	309.13	306.98	306.98
OKUMURA-HATA	7537.66	2029.06	136.76	136.12	136.12
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3684.03	999.18	68.39	68.08	68.08
DOS RAYOS	1189.21	446.94	59.81	59.60	59.60
EGLI	704.40	264.73	35.43	35.30	35.30
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	84.09	31.60	4.23	4.21	4.21

3.1.2. Aplicación del Método MCL a la Frecuencia de 470 MHz

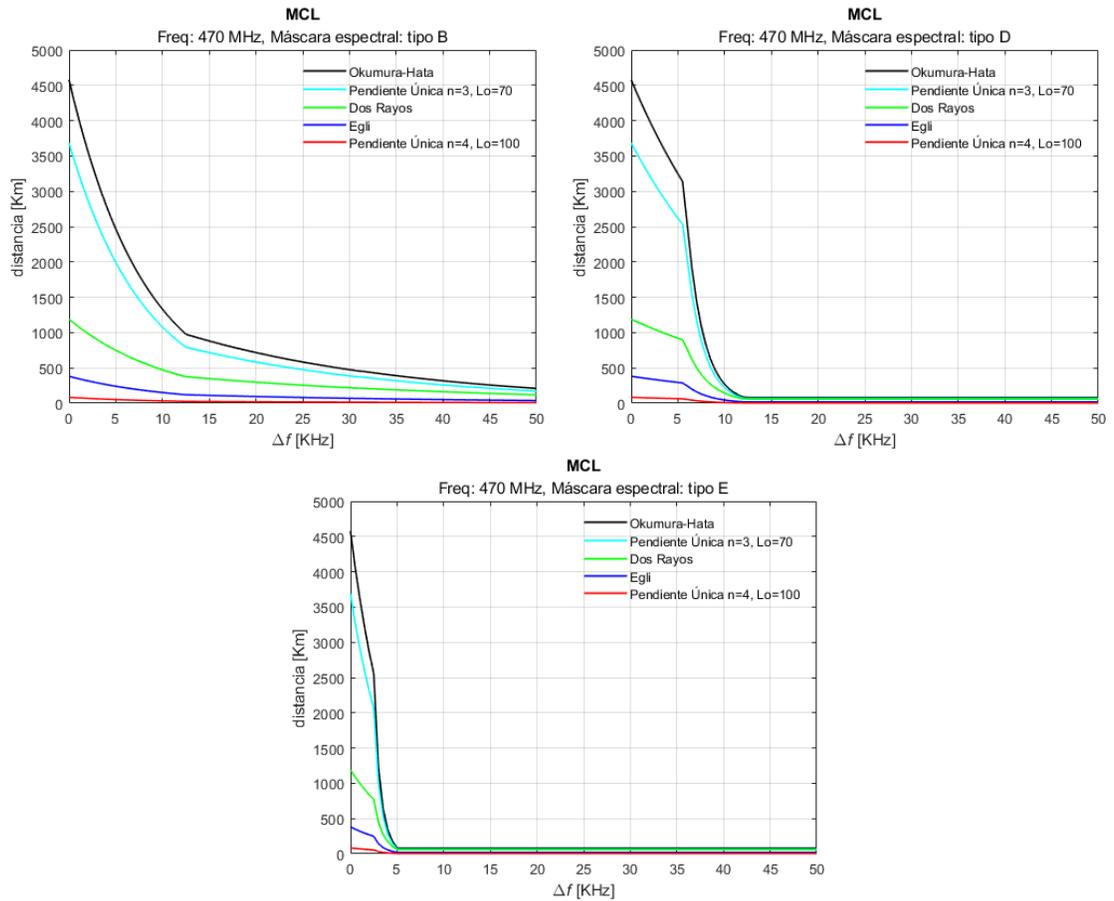


Figura 22. Resultados del método MCL considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Resultados MCL considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 470 MHz MCL	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	35882.87	1665.54	358.83	269.08	201.78
OKUMURA-HATA	4575.82	584.07	208.67	172.05	141.85
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3684.03	475.81	171.00	141.14	116.50
DOS RAYOS	1189.21	256.21	118.92	102.98	89.18
EGLI	381.69	82.23	38.17	33.05	28.62
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	84.09	18.12	8.41	7.28	6.31

Tabla 14. Resultados MCL considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 470 MHz MCL	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	35882.87	12019.66	113.47	80.55	80.33
OKUMURA-HATA	4575.82	2197.77	96.43	76.64	76.49
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3684.03	1776.89	79.37	63.16	63.05
DOS RAYOS	1189.21	688.27	66.87	56.35	56.27
EGLI	381.69	220.91	21.46	18.08	18.06
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	84.09	48.67	4.73	3.98	3.98

Tabla 15. Resultados MCL considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 470 MHz MCL	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	35882.87	5068.36	90.76	90.13	90.13
OKUMURA-HATA	4575.82	1231.76	83.02	82.63	82.63
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3684.03	999.18	68.39	68.08	68.08
DOS RAYOS	1189.21	446.94	59.81	59.60	59.60
EGLI	381.69	143.45	19.20	19.13	19.13
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	84.09	31.60	4.23	4.21	4.21

El resultado de la aplicación del método MCL [1] corresponde a un valor de aislamiento, el cual se traduce a distancia de separación entre un transmisor interferente y un receptor víctima de interferencia, por medio del uso de los modelos de pérdidas de propagación considerados. De manera general se observa, que las distancias disminuyen de forma significativa a medida que la separación entre las frecuencias de operación (Δ_f) aumentan entre el sistema interferente y el sistema interferido. La Figura 21 y la Figura 22 presentan puntos de corte importantes en $\Delta_f = 12.5$ KHz, $\Delta_f = 25$ KHz y $\Delta_f = 50$ KHz al considerar la máscara espectral Tipo B; puntos de corte importantes en $\Delta_f = 6.25$ KHz, $\Delta_f = 12.5$ KHz y $\Delta_f = 25$ KHz al considerar la máscara espectral Tipo D; y puntos de corte importantes en $\Delta_f = 3.125$ KHz, $\Delta_f = 6.25$ KHz y $\Delta_f = 12.5$ KHz al considerar la máscara espectral Tipo E, valores de frecuencia en los cuales se presentan las mayores disminuciones en distancia para las frecuencias de operación y los modelos de pérdidas de propagación considerados, lo anterior debido a que dichas máscaras espectrales limitan la potencia de las emisiones dentro y fuera de banda, siendo las máscaras espectrales mucho más selectivas en frecuencia cuanto menor es el ancho de

banda del canal y lo cual se confirma con el factor de forma en la Tabla 5 y los resultados en la Figura 21 y la Figura 22. Dicha tendencia de resultados se mantiene para todos los métodos analíticos considerados en el presente trabajo.

Por otro lado, al considerar las características más exigentes para sistemas de radio móvil y considerando las máscaras espectrales de emisión se obtienen distancias de separación considerables cuando ambos sistemas están operando en la misma frecuencia $\Delta_f = 0 \text{ KHz}$ (interferencia co-canal). Particularmente, en las tablas se observa que al considerar el modelo de espacio libre los resultados de aplicación son demasiado exigentes para ser implementados en un escenario real, lo anterior es debido a que el modelo de propagación de espacio libre representa las mínimas pérdidas de propagación de una señal electromagnética y por lo tanto tiende a ser un modelo ideal, por lo cual los resultados solo deben ser considerados como un punto de referencia con los resultados obtenidos al aplicar los demás modelos de pérdidas de propagación. Al considerar los otros modelos de pérdidas de propagación, los resultados de distancia disminuyen considerablemente en comparación con el modelo de propagación de espacio libre, sin embargo, para sistemas operando en la misma frecuencia, el método MCL [1] indica que la separación en distancia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia deben ser de cientos de kilómetros para la mayoría de los modelos de pérdidas de propagación considerados. Lo anterior, aplicado a un escenario real, no permite hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico.

Se observa además que para modelos de propagación que no dependen de la frecuencia i.e., el modelo de pérdidas de propagación de dos rayos y el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única, que las distancias son iguales para las 2 frecuencias de operación consideradas: 138 MHz y 470 MHz, mientras que, al considerar modelos de propagación dependientes de la frecuencia i.e., el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata y el modelo de pérdidas de propagación de Egli, las distancias disminuyen a medida que se aumenta la frecuencia de operación en consideración. Cabe aclarar en este punto que esta tendencia de resultados se mantiene para todos los métodos analíticos considerados en el presente informe.

Por lo tanto, el método MCL [1] es el método analítico que considera el peor de los casos posibles en cuanto a interferencia se refiere, por lo que los resultados de distancia obtenidos por dicho método no permiten que se pueda hacer un uso eficiente de los recursos espectrales, razón por la cual los resultados obtenidos por el método analítico MCL [1] solo deben ser considerados como referencia en comparación a la aplicación de los demás métodos analíticos.

3.1.3. Aplicación del Método MCL en Bloqueo

El bloqueo o desensibilización del receptor es un fenómeno que inhabilita al receptor para detectar una señal deseada en presencia de una señal interferente. Por tal razón es importante el análisis de bloqueo del receptor aplicando los métodos analíticos, dado que estos resultados pueden fijar límites en la separación mínima entre sistemas de radio móvil operando en la misma frecuencia o frecuencias adyacentes.

Los resultados de la aplicación del método MCL [1] en bloqueo se presentan en las Figura 23 y Figura 24; y desde la Tabla 16 hasta la Tabla 21. En la aplicación se consideran las máscaras espectrales Tipo B, Tipo D y Tipo E considerando todos los modelos de pérdidas de propagación.

3.1.3.1. Aplicación del método MCL en Bloqueo a la Frecuencia de 138 MHz

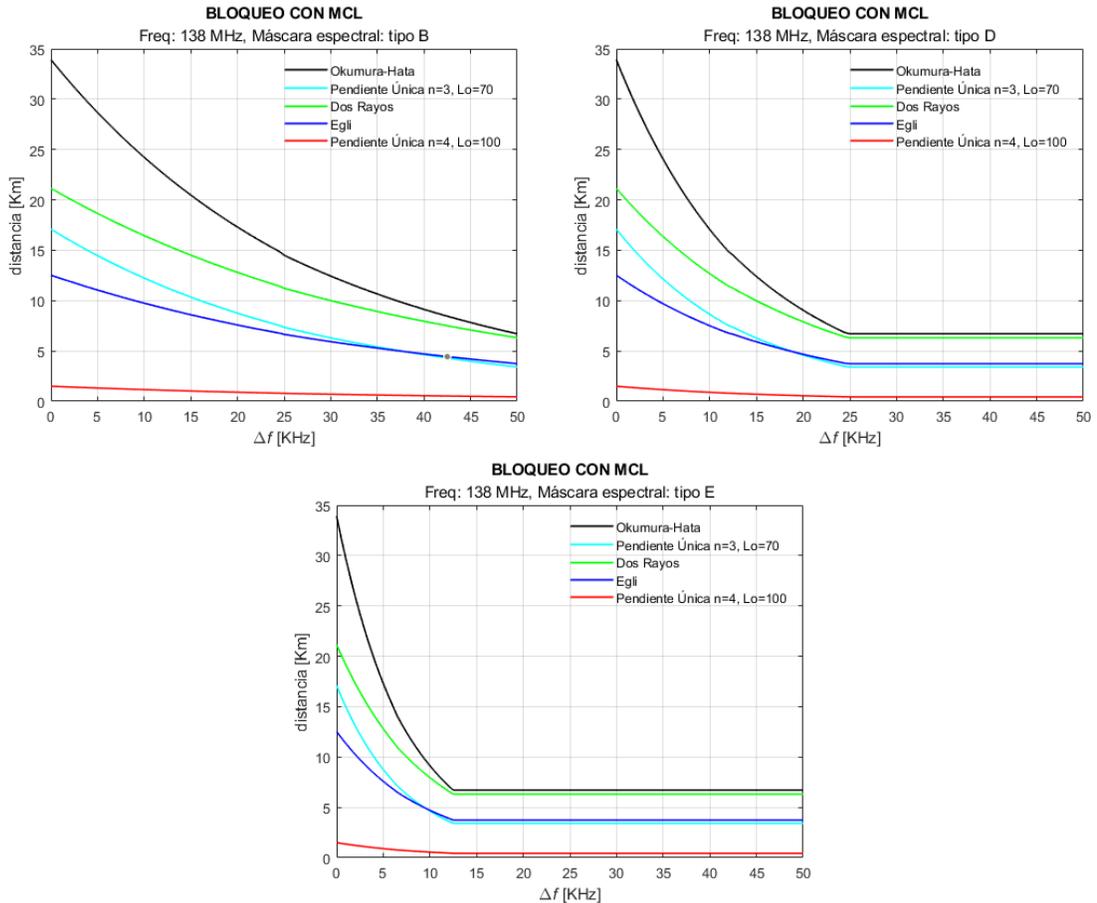


Figura 23. Resultados del método MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 138 MHz MCL en Bloqueo	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	38.65	10.89	3.44	3.44	3.44
OKUMURA-HATA	33.92	14.51	6.71	6.71	6.71
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	17.1	7.35	3.41	3.41	3.41
DOS RAYOS	21.15	11.23	6.31	6.31	6.31
EGLI	12.53	6.65	3.74	3.74	3.74
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	1.5	0.79	0.45	0.45	0.45

Tabla 17. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 138 MHz MCL en Bloqueo	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	38.65	20.37	10.89	3.44	3.44
OKUMURA-HATA	33.92	22.08	14.51	6.71	6.71
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	17.1	11.16	7.35	3.41	3.41
DOS RAYOS	21.15	15.35	11.23	6.31	6.31
EGLI	12.53	9.09	6.65	3.74	3.74
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	1.5	1.09	0.79	0.45	0.45

Tabla 18. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 138 MHz MCL en Bloqueo	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	38.65	20.64	10.89	3.44	3.44
OKUMURA-HATA	33.92	22.27	14.51	6.71	6.71
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	17.1	11.25	7.35	3.41	3.41
DOS RAYOS	21.15	15.45	11.23	6.31	6.31
EGLI	12.53	9.15	6.65	3.74	3.74
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	1.5	1.09	0.79	0.45	0.45

3.1.3.2. Aplicación del método MCL en Bloqueo a la Frecuencia de 470 MHz

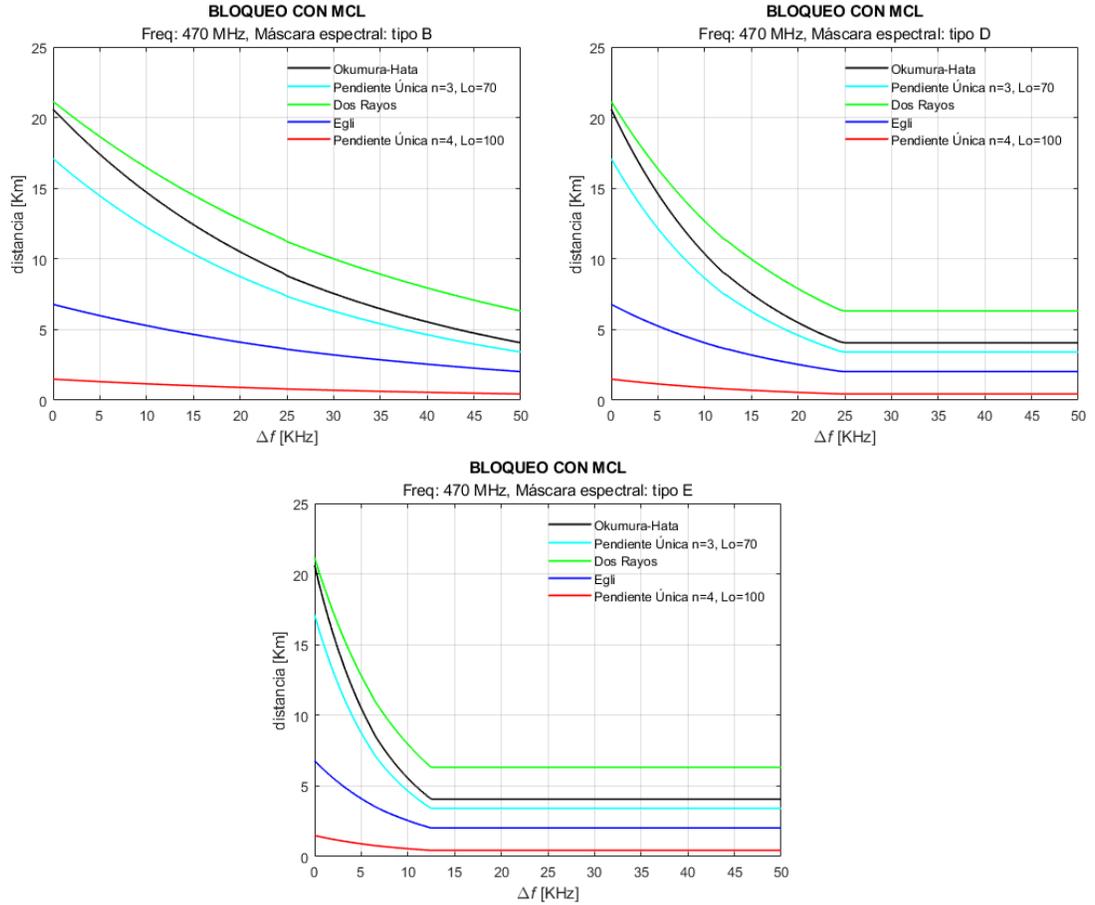


Figura 24. Resultados del método MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 470 MHz MCL en Bloqueo	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	11.35	3.2	1.01	1.01	1.01
OKUMURA-HATA	20.59	8.81	4.07	4.07	4.07
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	17.1	7.35	3.41	3.41	3.41
DOS RAYOS	21.15	11.23	6.31	6.31	6.31
EGLI	6.79	3.6	2.03	2.03	2.03
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	1.5	0.79	0.45	0.45	0.45

Tabla 20. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 470 MHz MCL en Bloqueo	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	11.35	5.98	3.2	1.01	1.01
OKUMURA-HATA	20.59	13.4	8.81	4.07	4.07
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	17.1	11.16	7.35	3.41	3.41
DOS RAYOS	21.15	15.35	11.23	6.31	6.31
EGLI	6.79	4.93	3.6	2.03	2.03
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	1.5	1.09	0.79	0.45	0.45

Tabla 21. Resultados MCL en bloqueo considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 470 MHz MCL en Bloqueo	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	11.35	6.06	3.2	1.01	1.01
OKUMURA-HATA	20.59	13.52	8.81	4.07	4.07
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	17.1	11.25	7.35	3.41	3.41
DOS RAYOS	21.15	15.45	11.23	6.31	6.31
EGLI	6.79	4.96	3.6	2.03	2.03
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	1.5	1.09	0.79	0.45	0.45

Los resultados obtenidos de la aplicación del método MCL [1] en bloqueo muestran un comportamiento similar a los obtenidos en el análisis de interferencia, esto es, una curva que disminuye en la separación en distancia cuando se aumenta la separación en frecuencia. Para distancias menores a las distancias estimadas el receptor se bloqueará por el nivel de interferencia a la entrada del receptor víctima de interferencia.

En las dos bandas de frecuencia consideradas, se tiene un comportamiento similar. Cuando se considera la máscara espectral tipo B, se tiene una gráfica con una caída lenta que se estabiliza en los 50 kHz. Al considerar la máscara tipo D se puede observar que las curvas se estabilizan en los 25 kHz y con la máscara tipo E las curvas se estabilizan en los 12.5 kHz.

3.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO E-MCL

3.2.1. Aplicación del Método E-MCL con N Igual a 10 dB

Los resultados de aplicación del método E-MCL [1] con $N = 10$ dB se presentan en figuras y tablas para cada una de las frecuencias de trabajo consideradas: 138 MHz y 470 MHz, y las 3 máscaras espectrales de los sistemas de radio móvil

consideradas: Tipo B, Tipo D y Tipo E, aplicando los diferentes modelos de pérdidas de propagación para encontrar las distancias de separación. En la Figura 25 y desde la Tabla 22 hasta la Tabla 24 se presentan los resultados de aplicación del método E-MCL [1] con $N = 10$ dB para la frecuencia de 138 MHz, mientras que, en la Figura 26 y desde la Tabla 25 hasta la Tabla 27 se presentan los resultados de aplicación del método E-MCL [1] con $N = 10$ dB para la frecuencia de 470 MHz.

3.2.1.1. Aplicación del método E-MCL con N igual a 10 dB a la frecuencia de 138 MHz

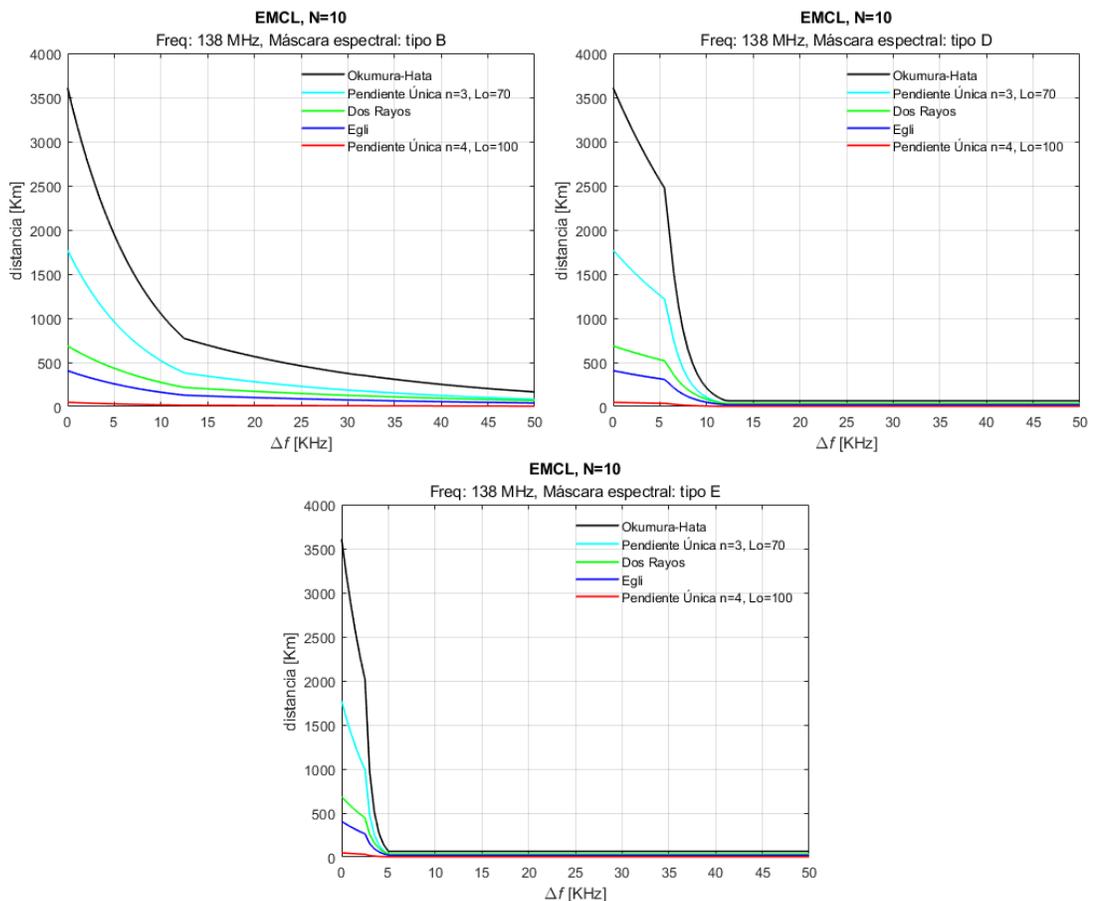


Figura 25. Resultados del método E-MCL con $N=10$ considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	40736.59	1890.82	407.37	305.48	229.08
OKUMURA-HATA	3608.48	460.59	164.56	135.68	111.86
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	1771.10	228.75	82.20	67.85	56.10
DOS RAYOS	686.59	147.92	68.66	59.46	51.49
EGLI	406.68	87.62	40.67	35.22	30.50
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	48.55	10.46	4.85	4.20	3.64

Tabla 23. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	40736.59	13645.51	128.82	91.45	91.20
OKUMURA-HATA	3608.48	1733.16	76.04	60.44	60.32
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	1771.10	854.23	38.16	30.36	30.31
DOS RAYOS	686.59	397.37	38.61	32.53	32.49
EGLI	406.68	235.37	22.87	19.27	19.24
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	48.55	28.10	2.73	2.30	2.30

Tabla 24. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	40736.59	5753.93	103.04	102.33	102.33
OKUMURA-HATA	3608.48	971.36	65.47	65.16	65.16
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	1771.10	999.18	32.87	32.72	32.72
DOS RAYOS	686.59	258.04	34.53	34.41	34.41
EGLI	406.68	152.84	20.45	20.38	20.38
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	48.55	18.25	2.44	2.43	2.43

3.2.1.2. Aplicación del método E-MCL con N igual a 10 dB a la frecuencia de 470 MHz

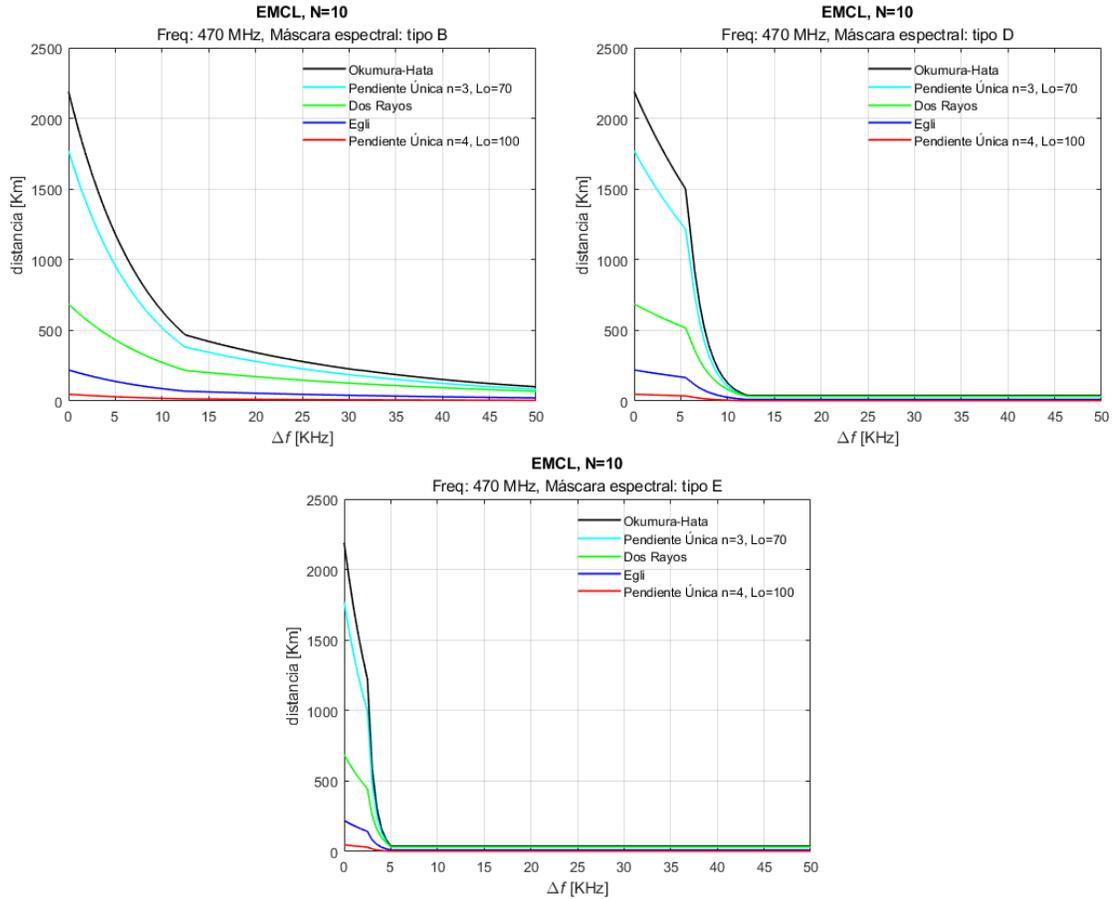


Figura 26. Resultados del método E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	11960.96	555.18	119.61	89.69	68.26
OKUMURA-HATA	2190.57	279.61	99.90	82.36	67.91
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	1771.12	228.75	82.20	67.85	56.10
DOS RAYOS	686.59	147.92	68.66	59.46	51.49
EGLI	220.37	47.48	22.04	19.08	16.53
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	48.55	10.46	4.85	4.20	3.64

Tabla 26. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	11960.96	4006.55	37.82	26.85	26.78
OKUMURA-HATA	2190.57	1052.13	46.16	36.69	36.62
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	1771.12	854.23	38.15	30.31	30.31
DOS RAYOS	686.59	397.37	38.61	32.53	32.49
EGLI	220.37	127.54	12.39	10.44	10.43
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	48.55	28.10	2.73	2.30	2.30

Tabla 27. Resultados E-MCL con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	11960.96	1689.45	30.25	30.04	30.04
OKUMURA-HATA	2190.57	589.68	39.74	39.56	39.56
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	1771.12	480.35	32.88	32.72	32.72
DOS RAYOS	686.59	258.04	34.53	34.41	34.41
EGLI	220.37	82.82	11.08	11.04	11.04
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	48.55	18.25	2.44	2.43	2.43

El método analítico E-MCL [1], al considerar un factor de disponibilidad del sistema interferido $N = 10$ dB, limita la cobertura o el alcance de los sistemas considerados y a la vez garantiza estadísticamente un mayor porcentaje de cobertura zonal, debido a la afectación sobre la sensibilidad del receptor víctima de interferencia (ver Tabla 6). Lo anterior, disminuye el aislamiento requerido entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia con respecto a los resultados obtenidos con el método MCL [1] ($N = 3$ dB). Específicamente, se observa una disminución aproximada del 45% en las distancias obtenidas en $\Delta f = 0$ para todas las máscaras espectrales consideradas. Esta disminución se debe a que, al tener en cuenta el factor de disponibilidad del sistema, se está considerando un margen de operación en el balance de enlace relacionado con fenómenos que pueden sufrir las señales radio en el canal de comunicaciones, como lo son el ruido y la multitrayectoria, principalmente, lo que le permite al método analítico modelar de mejor manera las degradaciones que sufren en su operación los sistemas de radio móvil.

3.2.2. Aplicación del Método E-MCL en Bloqueo con N Igual a 10 dB

Los resultados de la aplicación del método E-MCL [1] en bloqueo con $N = 10$ dB se presentan para las frecuencias de 138 MHz y 470 MHz, considerando las máscaras espectrales Tipo B, Tipo D y Tipo E, y para los diferentes modelos de propagación. La Figura 27 y desde la Tabla 28 hasta la Tabla 30 presentan los resultados para la frecuencia de 138 MHz; y la Figura 28 y desde la Tabla 31 hasta la Tabla 33 presentan los resultados para la frecuencia de 470 MHz.

3.2.2.1. Aplicación del Método E-MCL en Bloqueo con N Igual a 10 dB a la frecuencia de 138 MHz

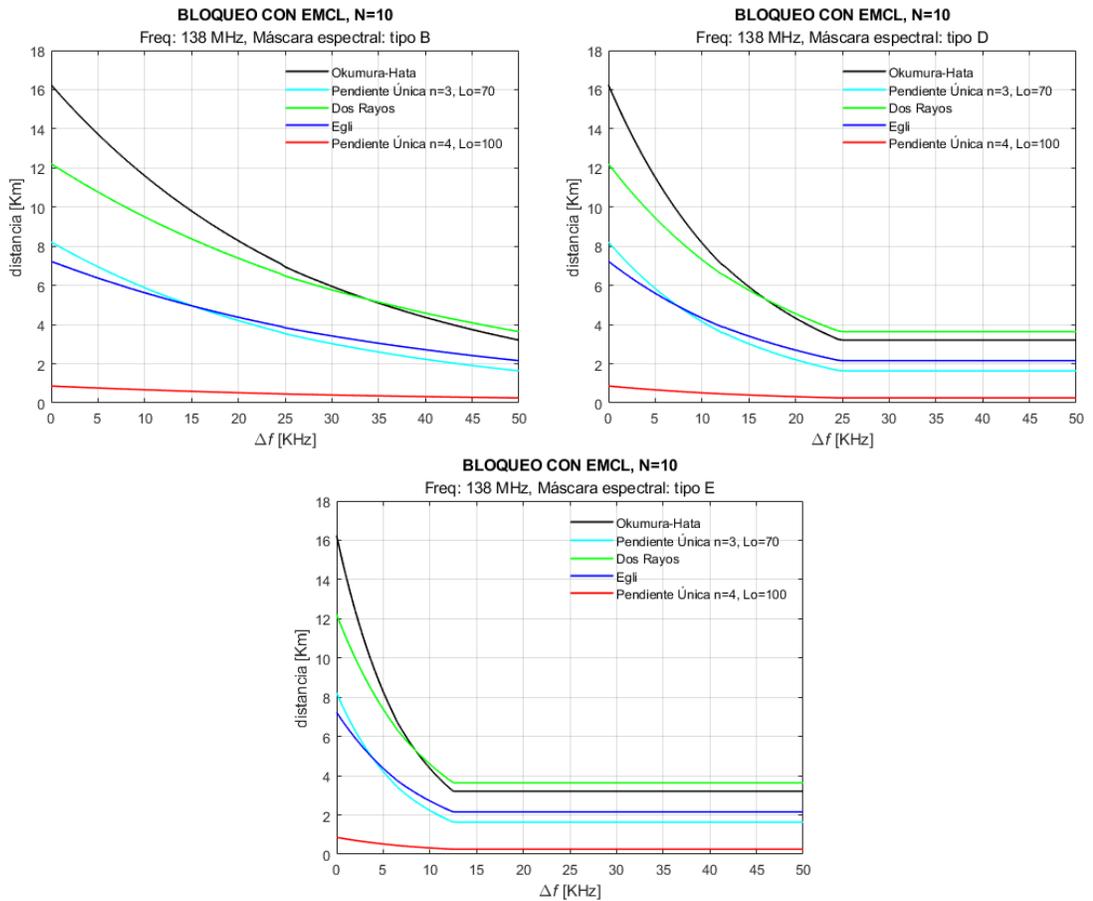


Figura 27. Resultados del método E-MCL en bloqueo con $N=10$ considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL en Bloqueo, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	12.88	3.63	1.15	1.15	1.15
OKUMURA-HATA	16.24	6.95	3.21	3.21	3.21
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	8.22	3.53	1.64	1.64	1.64
DOS RAYOS	12.21	6.48	3.64	3.64	3.64
EGLI	7.23	3.84	2.16	2.16	2.16
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.86	0.46	0.26	0.26	0.26

Tabla 29. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL en Bloqueo, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	12.88	6.79	3.63	1.15	1.15
OKUMURA-HATA	16.24	10.57	6.95	3.21	3.21
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	8.22	5.36	3.53	1.64	1.64
DOS RAYOS	12.21	8.86	6.48	3.64	3.64
EGLI	7.23	5.25	3.84	2.16	2.16
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.86	0.63	0.46	0.26	0.26

Tabla 30. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL en Bloqueo, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	12.88	6.88	3.63	1.15	1.15
OKUMURA-HATA	16.24	10.66	6.95	3.21	3.21
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	8.22	5.41	3.53	1.64	1.64
DOS RAYOS	12.21	8.92	6.48	3.64	3.64
EGLI	7.23	5.28	3.84	2.16	2.16
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.86	0.63	0.46	0.26	0.26

3.2.2.2. Aplicación del Método E-MCL en Bloqueo con N Igual a 10 dB a la frecuencia de 470 MHz

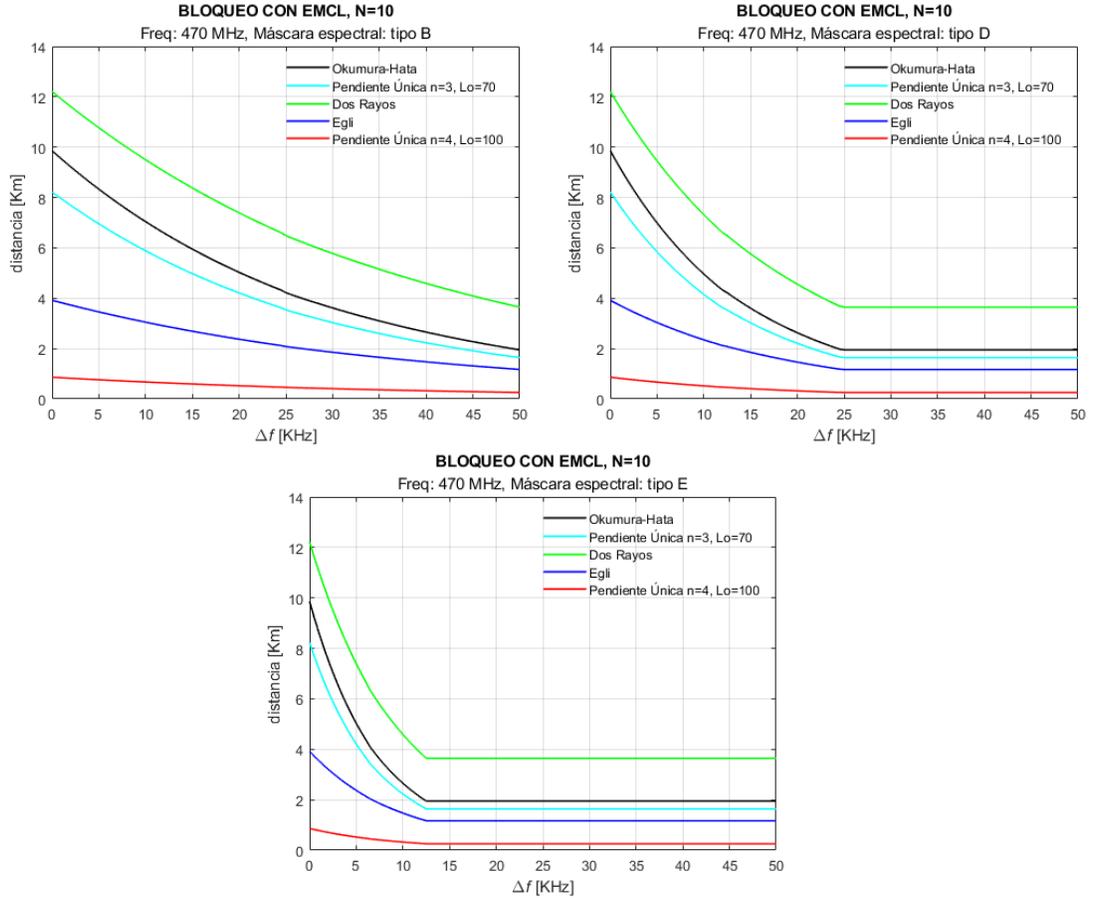


Figura 28. Resultados del método E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL en Bloqueo, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	3.78	1.07	0.34	0.34	0.34
OKUMURA-HATA	9.86	4.22	1.95	1.95	1.95
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	8.22	3.53	1.64	1.64	1.64
DOS RAYOS	12.21	6.48	3.64	3.64	3.64
EGLI	3.92	2.08	1.17	1.17	1.17
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.86	0.46	0.26	0.26	0.26

Tabla 32. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL en Bloqueo, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	3.78	1.99	1.07	0.34	0.34
OKUMURA-HATA	9.86	6.42	4.22	1.95	1.95
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	8.22	5.36	3.53	1.64	1.64
DOS RAYOS	12.21	8.86	6.48	3.64	3.64
EGLI	3.92	2.85	2.08	1.17	1.17
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.86	0.63	0.46	0.26	0.26

Tabla 33. Resultados E-MCL en bloqueo con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL en Bloqueo, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	3.78	2.02	1.07	0.34	0.34
OKUMURA-HATA	9.86	6.47	4.22	1.95	1.95
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	8.22	5.41	3.53	1.64	1.64
DOS RAYOS	12.21	8.92	6.48	3.64	3.64
EGLI	3.92	2.86	2.08	1.17	1.17
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.86	0.63	0.46	0.26	0.26

Los resultados obtenidos de la aplicación del método E-MCL [1] con $N = 10$ dB en bloqueo muestran un comportamiento similar al obtenido en los resultados del método MCL [1] en bloqueo. Cuando se considera la máscara espectral Tipo B, se tiene una curva que cae de manera lenta en las dos frecuencias, teniendo una separación máxima de 16 km (con el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata) para la frecuencia de 138 MHz y de 12 km (con el modelo de pérdidas de propagación de Dos Rayos) para la frecuencia de 470 MHz con una separación en frecuencia $\Delta f = 0$ kHz.

Cuando se considera la máscara espectral Tipo D, se tiene una curva que se estabiliza a un $\Delta f = 25$ kHz para las dos frecuencias. En la frecuencia de 138 MHz se observa que a un $\Delta f = 25$ kHz se tiene una separación máxima alrededor de los 4 km para los modelos de pérdidas de propagación de Okumura-Hata y Dos Rayos; mientras que, en la frecuencia de 470 MHz, las curvas se estabilizan a una separación en frecuencia $\Delta f = 25$ kHz, con una separación máxima de 4 km para el modelo de propagación de Dos Rayos seguido por una separación de 2 km para el modelo de propagación de Okumura-Hata.

La máscara espectral Tipo E, muestra un comportamiento similar a la máscara Tipo D, con la salvedad de que se las curvas se estabilizan a una frecuencia de separación $\Delta f = 12.5$ kHz.

3.2.3. Aplicación del Método E-MCL con N Igual a 20 dB

Los resultados de aplicación del método E-MCL [1] con $N = 20$ dB se presentan en figuras y tablas para cada una de las frecuencias de trabajo consideradas: 138 MHz y 470 MHz, y las 3 mascararas espectrales de los sistemas de radio móvil consideradas: Tipo B, Tipo D y Tipo E, aplicando los diferentes modelos de pérdidas de propagación para encontrar las distancias de separación. En la Figura 29 y desde la Tabla 34 hasta la Tabla 36 se presentan los resultados de aplicación del método E-MCL [1] con $N = 20$ dB para la frecuencia de 138 MHz, mientras que, en la Figura 30 y desde la Tabla 37 hasta la Tabla 39 se presentan los resultados de aplicación del método E-MCL [1] con $N = 20$ dB para la frecuencia de 470 MHz.

3.2.3.1. Aplicación del método E-MCL con N igual a 20 dB a la frecuencia de 138 MHz

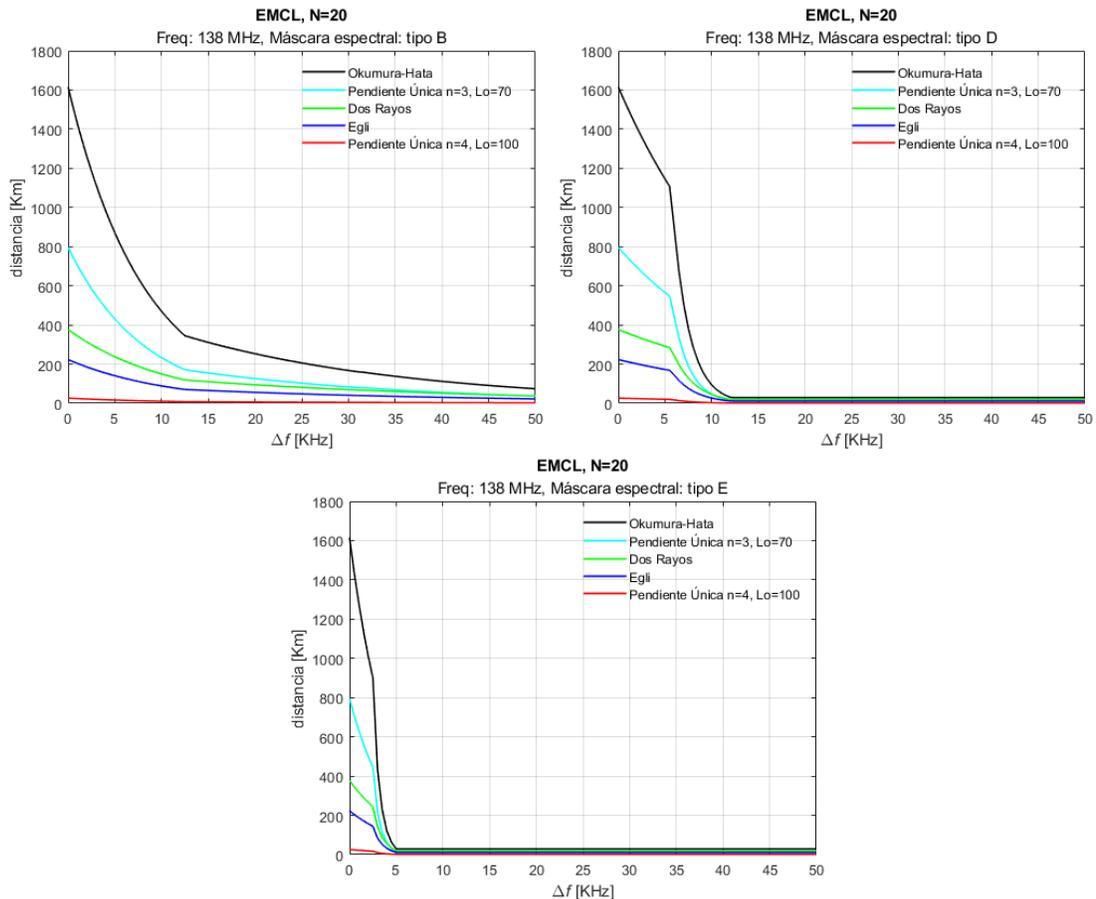


Figura 29. Resultados del método E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes mascararas espectrales.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	12282.54	570.11	122.83	92.11	69.07
OKUMURA-HATA	1615.08	206.15	73.65	60.73	50.07
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	796.36	102.85	36.96	30.51	25.18
DOS RAYOS	377.01	81.22	37.70	32.65	28.27
EGLI	223.31	48.11	22.33	19.34	16.75
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	26.66	5.74	2.67	2.31	2.00

Tabla 35. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	12282.54	4114.28	38.84	27.57	27.50
OKUMURA-HATA	1615.08	775.73	34.04	27.05	27.00
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	796.36	384.10	17.16	13.65	13.63
DOS RAYOS	377.01	218.20	21.20	17.86	17.84
EGLI	223.31	129.24	12.56	10.58	10.57
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	26.66	15.43	1.50	1.26	1.26

Tabla 36. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	12282.54	1734.88	31.07	30.85	30.85
OKUMURA-HATA	1615.08	434.76	29.3	29.17	29.17
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	796.36	215.99	14.78	14.72	14.72
DOS RAYOS	377.01	141.69	18.96	18.9	18.9
EGLI	223.31	83.93	11.23	11.19	11.19
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	26.66	10.02	1.34	1.34	1.34

3.2.3.2. Aplicación del método E-MCL con N igual a 20 dB a la frecuencia de 470 MHz

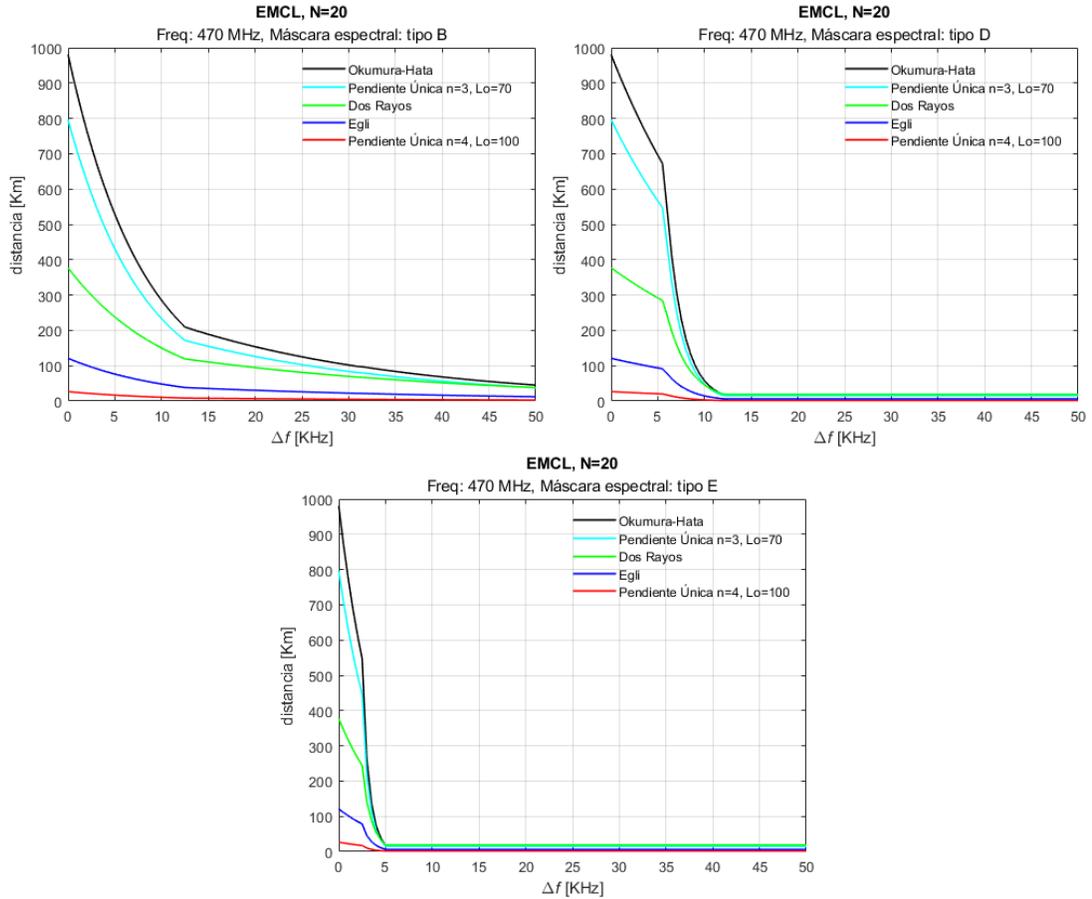


Figura 30. Resultados del método E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	3606.36	167.39	36.06	27.04	20.28
OKUMURA-HATA	980.45	125.15	44.71	36.86	30.39
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	796.36	102.85	36.96	30.51	25.18
DOS RAYOS	377.01	81.22	37.70	32.65	28.27
EGLI	121.00	26.07	12.10	10.48	9.07
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	26.66	5.74	2.67	2.31	2.00

Tabla 38. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	3606.36	1208.02	11.40	8.10	8.07
OKUMURA-HATA	980.45	470.91	20.66	16.42	16.39
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	796.36	384.10	17.16	13.65	13.63
DOS RAYOS	377.01	218.20	21.20	17.86	17.84
EGLI	121.00	70.03	6.80	5.73	5.73
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	26.66	15.43	1.50	1.26	1.26

Tabla 39. Resultados E-MCL con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	3606.36	509.39	9.12	9.06	9.06
OKUMURA-HATA	980.45	263.93	17.79	17.71	17.71
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	796.36	215.99	14.78	14.72	14.72
DOS RAYOS	377.01	141.69	18.96	18.90	18.90
EGLI	121.00	45.48	6.09	6.06	6.06
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	26.66	10.02	1.34	1.34	1.34

Al considerar el factor de disponibilidad $N = 20$ dB para el método analítico E-MCL [1] se garantiza un porcentaje de cobertura zonal aún mayor, que en los métodos MCL [1] y el mismo método E-MCL [1] con un factor de disponibilidad $N = 10$ dB (ver

Tabla 6), con lo cual se tiene una disminución aproximada del 70% en las distancias con respecto al método MCL [1] en $\Delta f = 0$ para todas las máscaras espectrales consideradas. Este resultado es esperado debido a que se afecta aún más la sensibilidad del receptor víctima de interferencia.

3.2.4. Aplicación del Método E-MCL en Bloqueo con N Igual a 20 dB

Los resultados de la aplicación del método E-MCL [1] en bloqueo con $N = 20$ dB se presentan para las frecuencias de 138 MHz y 470 MHz, considerando las máscaras espectrales Tipo B, Tipo D y Tipo E, y los diferentes modelos de propagación. La Figura 31 y desde la Tabla 40 hasta la Tabla 42 presentan los resultados para la

frecuencia de 138 MHz; y la Figura 32 y desde la Tabla 43 hasta la Tabla 45 presentan los resultados para la frecuencia de 470 MHz.

3.2.4.1. Aplicación del Método E-MCL en Bloqueo con N Igual a 20 dB a la frecuencia de 138 MHz

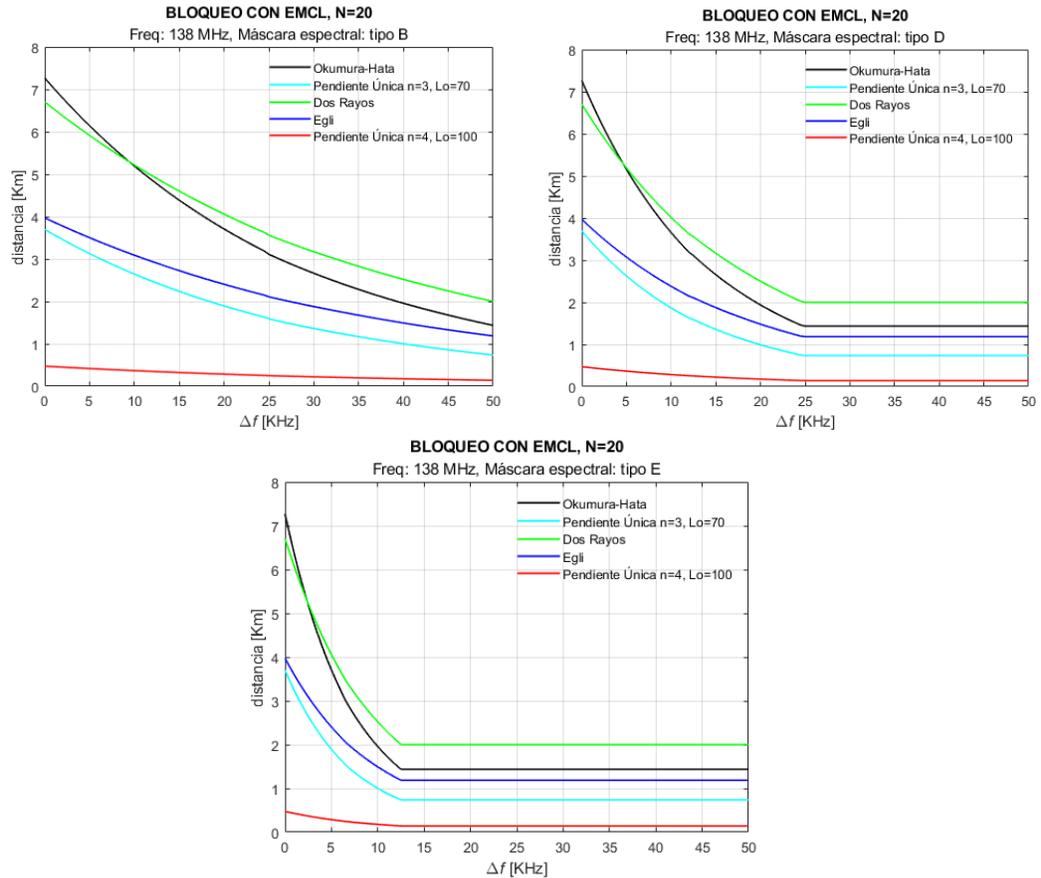


Figura 31. Resultados del método E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL en Bloqueo, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	3.88	1.09	0.35	0.35	0.35
OKUMURA-HATA	7.27	3.11	1.44	1.44	1.44
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3.7	1.59	0.74	0.74	0.74
DOS RAYOS	6.7	3.56	2	2	2
EGLI	3.97	2.11	1.19	1.19	1.19
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.47	0.25	0.14	0.14	0.14

Tabla 41. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL en Bloqueo, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	3.88	2.05	1.09	0.35	0.35
OKUMURA-HATA	7.27	4.73	3.11	1.44	1.44
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3.7	2.41	1.59	0.74	0.74
DOS RAYOS	6.7	4.87	3.56	2	2
EGLI	3.97	2.88	2.11	1.19	1.19
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.47	0.34	0.25	0.14	0.14

Tabla 42. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 138 MHz E-MCL en Bloqueo, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	3.88	2.07	1.09	0.35	0.35
OKUMURA-HATA	7.27	4.77	3.11	1.44	1.44
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3.7	2.43	1.59	0.74	0.74
DOS RAYOS	6.7	4.9	3.56	2	2
EGLI	3.97	2.9	2.11	1.19	1.19
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.47	0.35	0.25	0.14	0.14

3.2.4.2. Aplicación del Método E-MCL en Bloqueo con N Igual a 20 dB a la frecuencia de 470 MHz

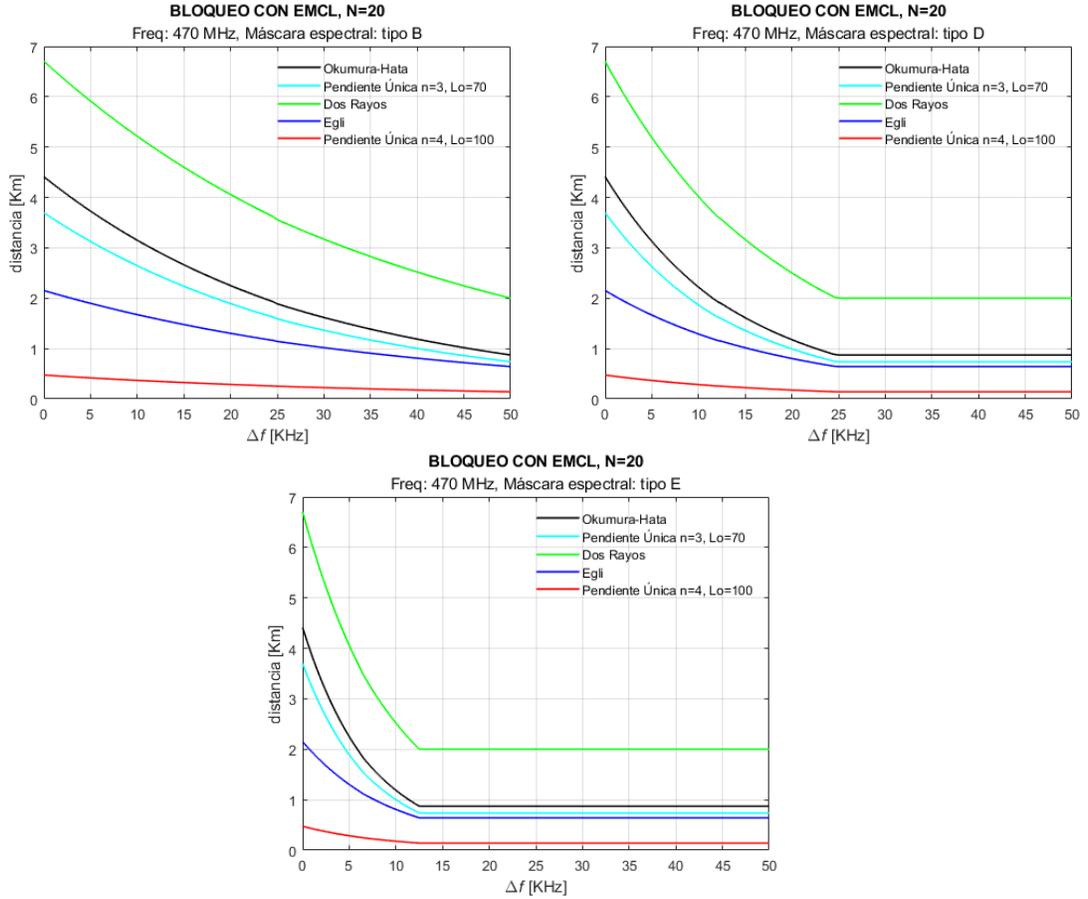


Figura 32. Resultados del método E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 43. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL en Bloqueo, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	1.14	0.32	0.10	0.10	0.10
OKUMURA-HATA	4.41	1.89	0.87	0.87	0.87
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3.7	1.59	0.74	0.74	0.74
DOS RAYOS	6.7	3.56	2	2	2
EGLI	2.15	1.14	0.64	0.64	0.64
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.47	0.25	0.14	0.14	0.14

Tabla 44. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL en Bloqueo, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	1.14	0.60	0.32	0.10	0.10
OKUMURA-HATA	4.41	2.87	1.89	0.87	0.87
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3.7	2.41	1.59	0.74	0.74
DOS RAYOS	6.7	4.87	3.56	2	2
EGLI	2.15	1.56	1.14	0.64	0.64
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.47	0.34	0.25	0.14	0.14

Tabla 45. Resultados E-MCL en bloqueo con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 470 MHz E-MCL en Bloqueo, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	1.14	0.61	0.32	0.10	0.10
OKUMURA-HATA	4.41	2.9	1.89	0.87	0.87
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	3.7	2.43	1.59	0.74	0.74
DOS RAYOS	6.7	4.9	3.56	2	2
EGLI	2.15	1.57	1.14	0.64	0.64
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	0.47	0.35	0.25	0.14	0.14

Los resultados obtenidos de la aplicación del método E-MCL [1] en bloqueo para $N = 20$ dB, muestran una separación menor o igual a 2 km para un $\Delta f = 50$ kHz cuando se considera la máscara espectral Tipo B para las dos frecuencias.

La máscara espectral Tipo B arroja unas curvas que se estabilizan en $\Delta f = 25$ kHz, teniendo una separación máxima en este punto de 2 km para el modelo de pérdidas de propagación de Dos Rayos y para las dos frecuencias.

Finalmente, las curvas obtenidas mediante el uso de la máscara espectral Tipo E tienden a estabilizarse en $\Delta f = 12.5$ kHz, con una separación máxima de 2 km para el modelo de pérdidas de propagación de Dos Rayos y para las dos frecuencias.

3.2.5. Análisis de los resultados de Bloqueo para los métodos MCL y E-MCL

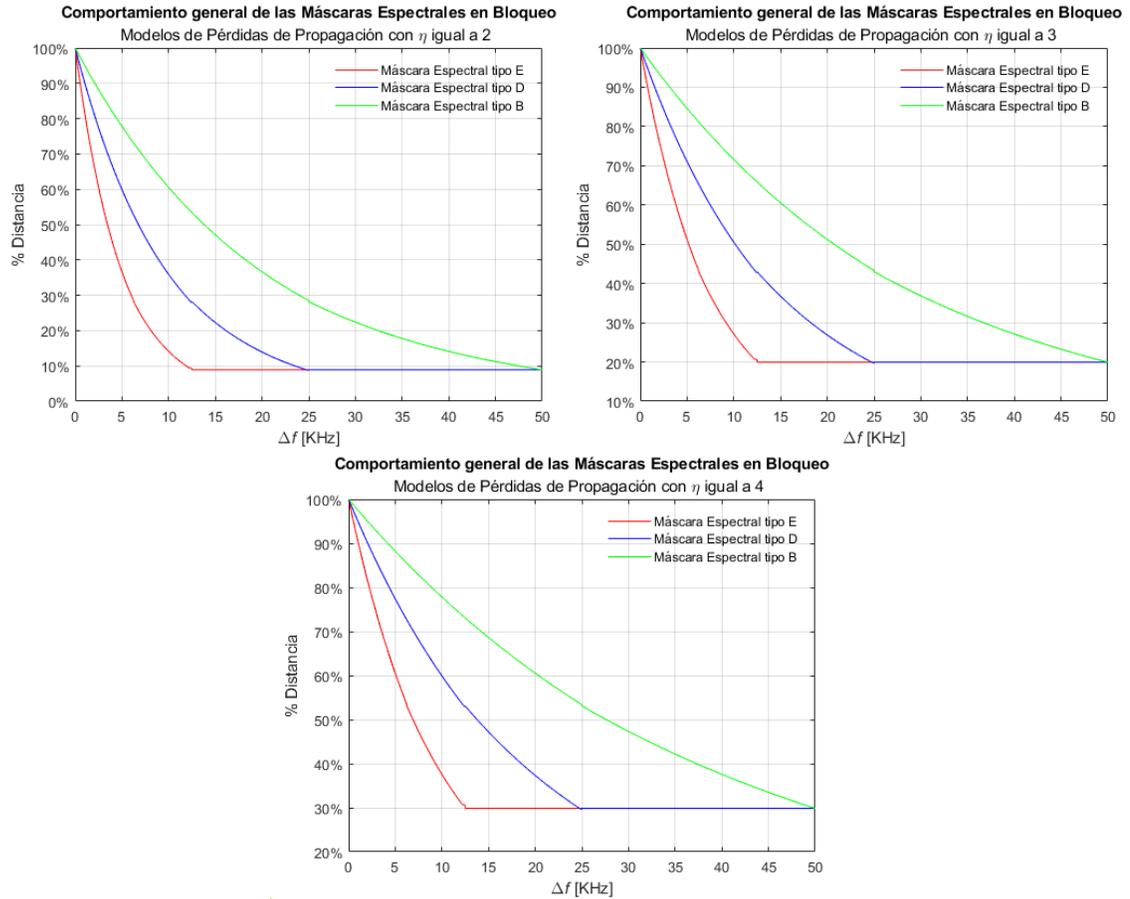


Figura 33. Comportamiento general de las máscaras espectrales para los diferentes modelos de pérdidas de propagación.

De manera general al considerar los métodos MCL [1] (N igual a 3 dB) y E-MCL [1] (N igual a 10 y 20 dB), la diferencia radica en el valor de distancia para un $\Delta f = 0$ Hz, siendo mayor la distancia para MCL [1] y menor para E-MCL [1] con N igual a 20 dB, sin embargo, el comportamiento general de cada método analítico es el mismo, lo que permite agrupar los resultados en porcentaje por modelos de pérdidas de propagación en función de su exponente de propagación (n igual a 2,3,4) como se muestra en la Figura 33. En cada figura para las tres máscaras espectrales: tipo B, tipo D, tipo E, la curva se estabiliza en un 10% de la distancia para una separación en frecuencia de 0 KHz para un n igual a 2, en un 20% para n igual a 3, y en 30% para n igual a 4, debido a que la máscara espectral no está definida más allá de dos canales, por lo que no se percibe cambios, sin embargo, conforme aumenta la separación en frecuencia, la separación en distancia seguirá disminuyendo hasta ser igual a cero, siendo suficiente para que un transmisor interferente este en el mismo lugar que la víctima de interferencia sin que ocurra bloqueo.

3.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA RECOMENDACIÓN ITU SM.337

Los resultados de aplicación del método de la recomendación ITU SM.337 [2] se presentan en figuras y tablas para cada una de las frecuencias de trabajo consideradas: 138 MHz y 470 MHz, y las 3 mascararas espectrales de los sistemas de radio móvil consideradas: Tipo B, Tipo D y Tipo E, aplicando los diferentes modelos de pérdidas de propagación para encontrar las distancias de separación. En la Figura 34 y desde la Tabla 46 hasta la Tabla 48 se presentan los resultados de aplicación del método ITU SM.337 [2] para la frecuencia de 138 MHz, mientras que, en la Figura 35 y desde la Tabla 49 hasta la Tabla 51 se presentan los resultados para la frecuencia de 470 MHz.

3.3.1. Aplicación del Método de la ITU SM.337 a la Frecuencia de 138 MHz

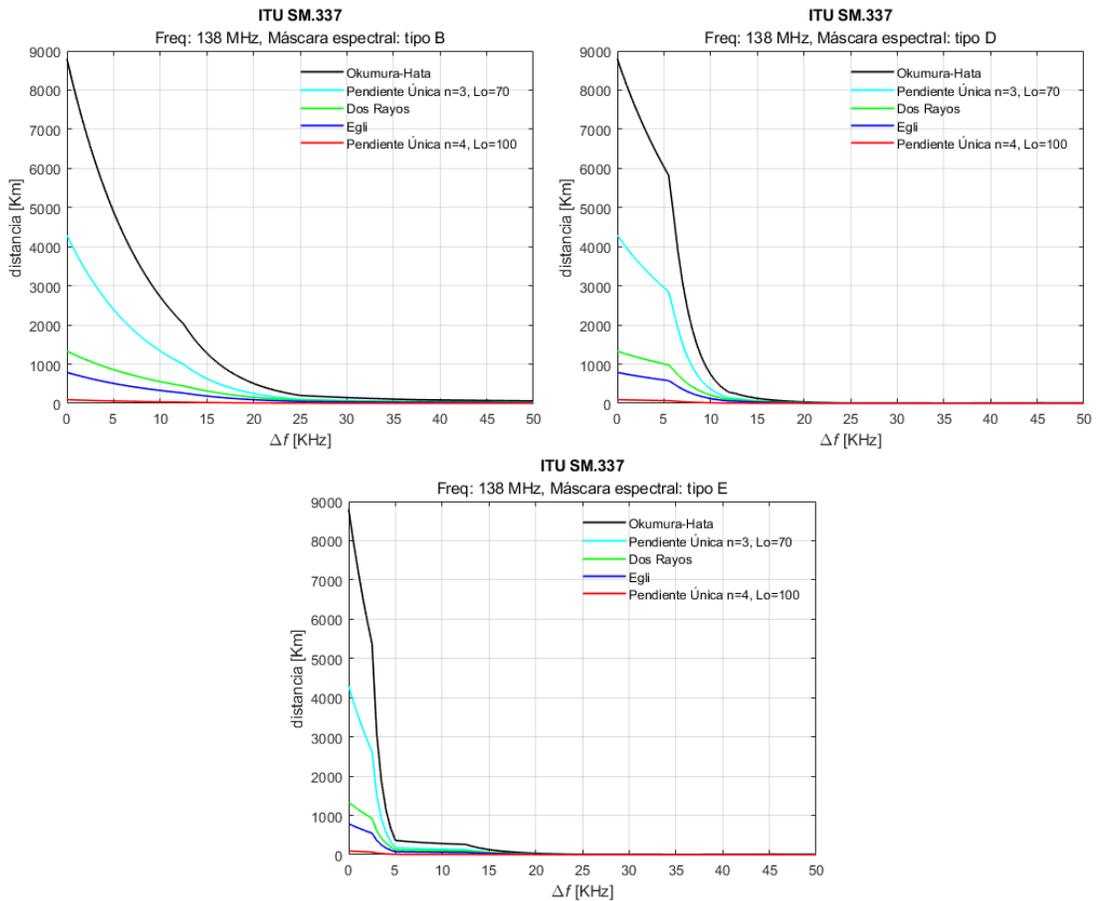


Figura 34. Resultados del método ITU SM.337 considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes mascararas espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 138 MHz ITU SM.337	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	153852.98	558.61	99.34	86.52	86.52
OKUMURA-HATA	8796.04	203.35	63.88	58.23	58.23
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	4295.27	101.47	32.09	29.26	29.26
DOS RAYOS	1334.31	80.40	33.90	31.64	31.64
EGLI	790.35	47.62	20.08	18.74	18.74
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	94.35	5.69	2.40	2.24	2.24

Tabla 47. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 138 MHz ITU SM.337	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	153852.98	26544.53	1046.92	27.51	10.34
OKUMURA-HATA	8796.04	2707.72	309.86	27.01	14.01
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	4295.27	1331.18	154.24	13.63	7.10
DOS RAYOS	1334.31	554.23	110.07	17.84	10.94
EGLI	790.35	328.29	65.20	10.57	6.48
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	94.35	39.19	7.78	1.26	0.77

Tabla 48. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 138 MHz ITU SM.337	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	153852.98	20809.26	1186.18	290.08	9.03
OKUMURA-HATA	8796.04	2299.95	336.93	131.05	12.8
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	4295.27	1131.77	167.63	65.55	6.49
DOS RAYOS	1334.31	490.72	117.16	57.94	10.22
EGLI	790.35	290.67	69.4	34.32	6.06
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	94.35	34.7	8.28	4.1	0.72

3.3.2. Aplicación del Método de la ITU SM.337 a la Frecuencia de 470 MHz

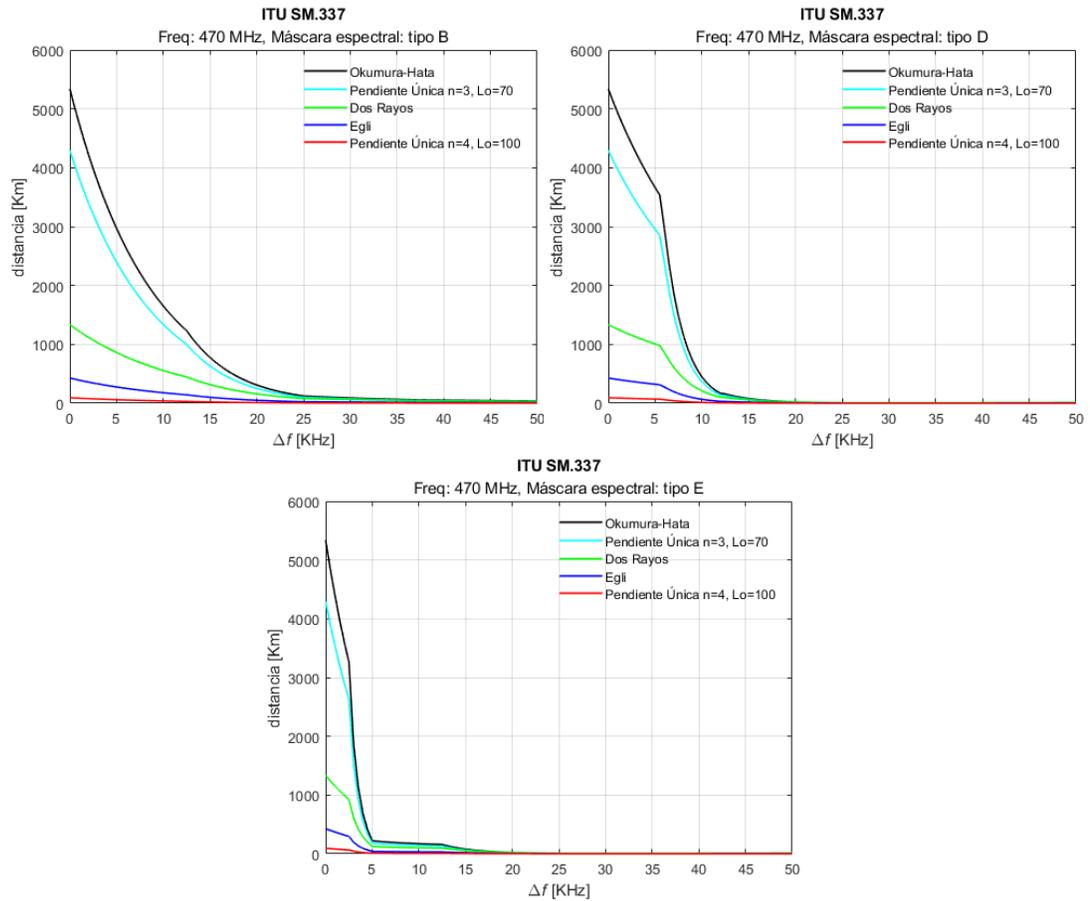


Figura 35. Resultados del método ITU SM.337 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 49. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 470 MHz ITU SM.337	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	45173.85	164.02	29.17	25.40	25.40
OKUMURA-HATA	5339.74	123.45	38.78	35.35	35.35
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	4295.27	101.47	32.09	29.26	29.26
DOS RAYOS	1334.31	80.40	33.90	31.64	31.64
EGLI	428.26	25.81	10.88	10.16	10.16
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	94.35	5.69	2.40	2.24	2.24

Tabla 50. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 470 MHz ITU SM.337	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	45173.85	7793.93	307.39	8.08	3.04
OKUMURA-HATA	5339.74	1643.75	188.11	16.39	8.51
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	4295.27	1331.18	154.24	13.63	7.10
DOS RAYOS	1334.31	554.23	110.07	17.84	10.94
EGLI	428.26	177.89	35.33	5.73	3.51
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	94.35	39.19	7.78	1.26	0.77

Tabla 51. Resultados ITU SM.337 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 470 MHz ITU SM.337	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	45173.85	6109.95	348.28	85.17	2.65
OKUMURA-HATA	5339.74	1396.21	204.54	79.56	7.77
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	4295.27	1131.77	167.63	65.55	6.49
DOS RAYOS	1334.31	490.72	117.16	57.94	10.22
EGLI	428.26	157.50	37.60	18.60	3.28
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	94.35	34.70	8.28	4.10	0.72

El método analítico de la recomendación ITU SM.337 [2] al igual que el método MCL [1] considera de manera inherente un factor de disponibilidad del sistema interferido de $N = 3$ dB, y sus resultados son comparables. Sin embargo, se observa que el método ITU SM.337 [2] es más exigente en los resultados de las distancias de separación obtenidas cuando el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia operan con una separación en frecuencia menor a 15 kHz, para cada una de las frecuencias de trabajo y las 3 máscaras espectrales consideradas. Por otra parte, para valores de Δf superiores a 15 kHz, las curvas de separación en distancia caen más rápidamente en comparación con el método MCL [1], obteniendo valores de distancias menores a medida que aumenta la separación en frecuencia entre los sistemas considerados.

3.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO ALTERNATIVO DE LA RECOMENDACIÓN ITU SM. 337

3.4.1. Aplicación del Método Alternativo de la Recomendación ITU SM.337 con N igual a 10 dB

Los resultados de aplicación del método alternativo de la recomendación ITU SM.337 [2] con $N = 10$ dB se presentan en figuras y tablas para cada una de las frecuencias de trabajo consideradas: 138 MHz y 470 MHz, y las 3 mascararas espectrales de los sistemas de radio móvil consideradas: Tipo B, Tipo D y Tipo E, aplicando los diferentes modelos de pérdidas de propagación para encontrar las distancias de separación. En la Figura 36 y desde la Tabla 52 hasta la Tabla 54 se presentan los resultados de aplicación del método alternativo de la recomendación ITU SM.337 [2] con $N = 10$ dB para la frecuencia de 138 MHz, mientras que, en la Figura 37 y desde la Tabla 55 hasta la Tabla 57 se presentan los resultados para la frecuencia de 470 MHz.

3.4.1.1. Aplicación del método alternativo de la ITU SM.337 con N igual a 10 dB a la frecuencia de 138 MHz

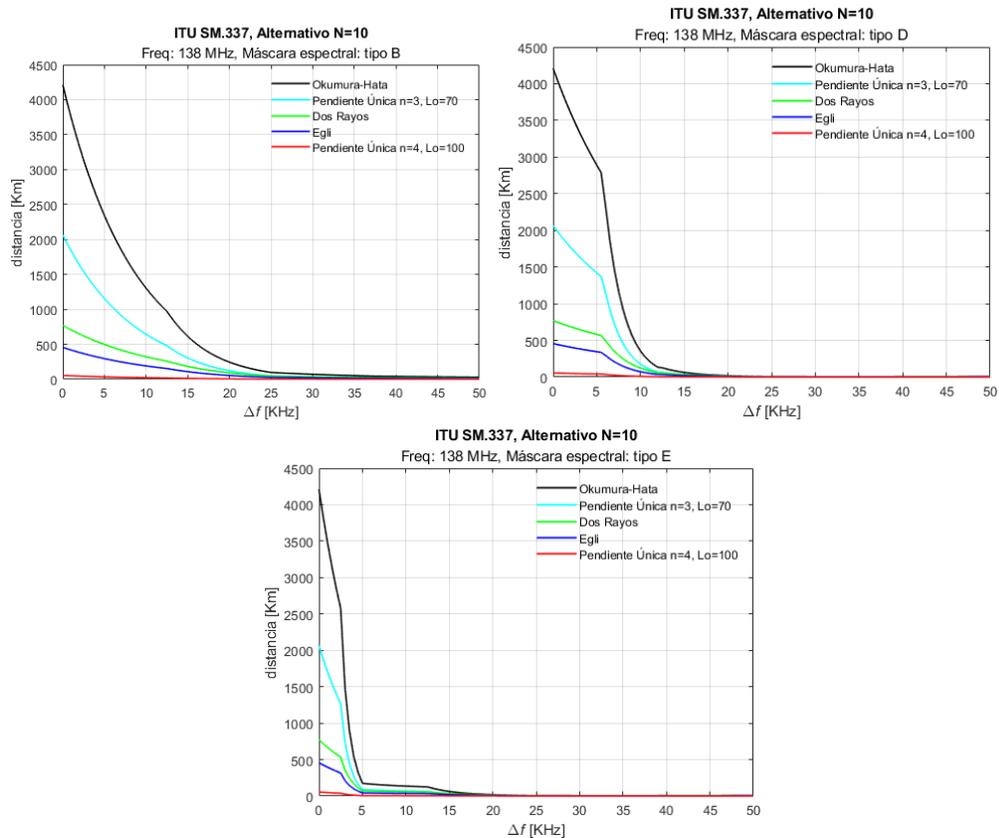


Figura 36. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 52. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 138 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	51284.33	186.20	33.11	28.84	28.84
OKUMURA-HATA	4210.90	97.35	30.58	27.88	27.88
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	2064.95	48.78	15.43	14.07	14.07
DOS RAYOS	770.37	46.42	19.57	18.27	18.27
EGLI	456.31	27.50	11.59	10.82	10.82
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	54.47	3.28	1.38	1.29	1.29

Tabla 53. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 138 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	51284.33	8848.18	348.97	9.17	3.45
OKUMURA-HATA	4210.90	1296.26	148.34	12.93	6.71
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	2064.95	639.96	74.15	6.55	3.41
DOS RAYOS	770.37	319.99	63.55	10.30	6.32
EGLI	456.31	189.54	37.64	6.10	3.74
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	54.47	22.63	4.49	0.73	0.45

Tabla 54. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 138 MHz y la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 138 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	51284.33	6936.42	395.39	96.69	3.01
OKUMURA-HATA	4210.9	1101.05	161.3	62.74	6.13
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	2064.95	544.1	80.59	31.52	3.12
DOS RAYOS	770.37	283.32	67.64	33.45	5.9
EGLI	456.31	167.82	40.07	19.81	3.5
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	54.47	20.03	4.78	2.37	0.42

3.4.1.2. Aplicación del método alternativo de la ITU SM.337 con N igual a 10 dB a la frecuencia de 470 MHz

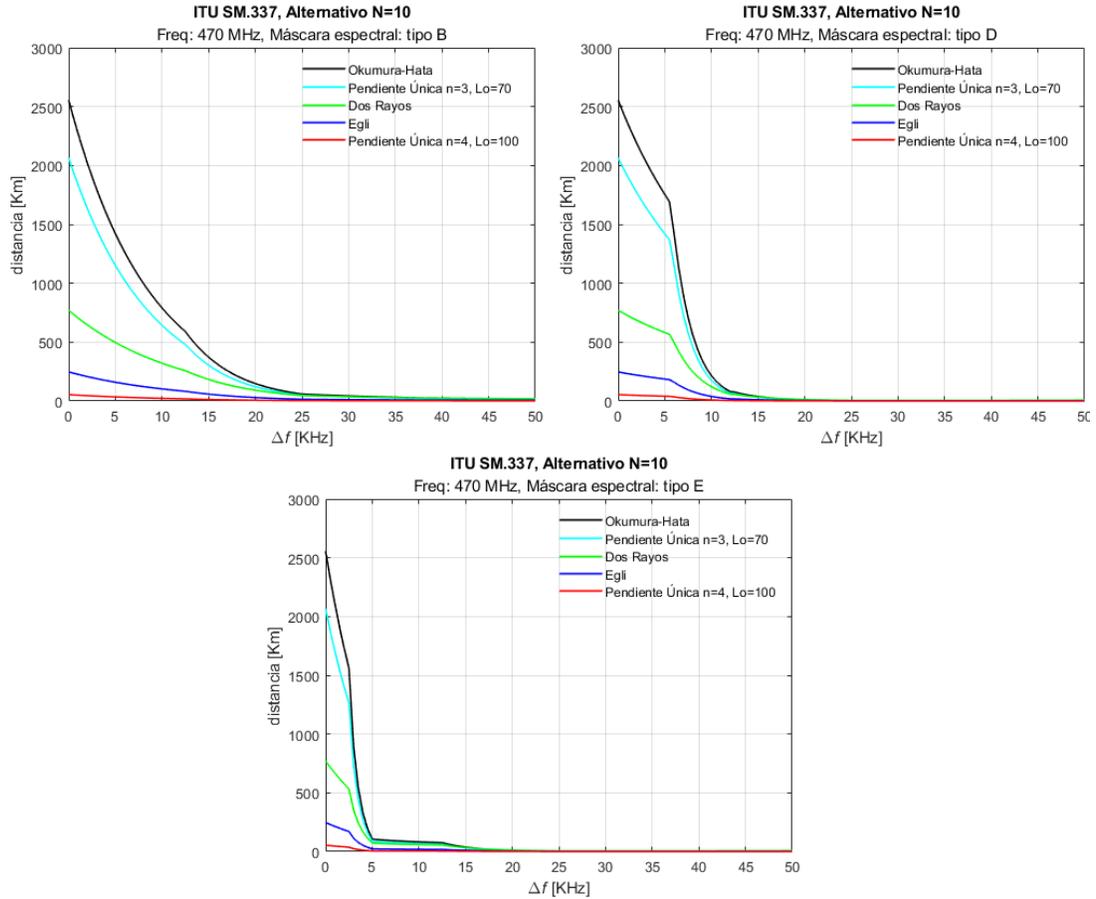


Figura 37. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 470 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	15057.95	54.67	9.72	8.47	8.47
OKUMURA-HATA	2556.27	59.10	18.57	16.92	16.92
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	2064.95	48.78	15.43	14.07	14.07
DOS RAYOS	770.37	46.42	19.57	18.27	18.27
EGLI	247.26	14.90	6.28	5.86	5.86
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	54.47	3.28	1.38	1.29	1.29

Tabla 56. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=10 considerando la frecuencia de 470 MHz y la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 470 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	15057.95	2597.98	102.46	2.69	1.01
OKUMURA-HATA	2556.27	786.91	90.05	7.85	4.07
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	2064.95	639.96	74.15	6.55	3.41
DOS RAYOS	770.37	319.99	63.55	10.30	6.32
EGLI	247.26	102.70	20.40	3.31	2.03
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	54.47	22.63	4.49	0.73	0.45

Tabla 57. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=10 a la frecuencia de 470 MHz considerando la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 470 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=10	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	15057.95	2036.65	116.09	28.39	0.88
OKUMURA-HATA	2556.27	668.40	97.92	38.09	3.72
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	2064.95	544.10	80.59	31.52	3.12
DOS RAYOS	770.37	283.32	67.64	33.45	5.90
EGLI	247.26	90.93	21.71	10.74	1.89
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	54.47	20.03	4.78	2.37	0.42

La aplicación del método alternativo de la recomendación ITU SM.337 [2] con $N = 10$ dB permite obtener valores menores de aislamiento, y por lo tanto menores distancias de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia, cuando la separación en frecuencia entre ellos es mayor a 15 kHz para cada una de las frecuencias de trabajo y las 3 máscaras espectrales consideradas con respecto al método E-MCL [1] con $N = 10$ dB, debido principalmente a que el método de la recomendación ITU SM.337 [2] es más exigente al considerar la interferencia co-canal.

3.4.2. Aplicación del Método Alternativo de la Recomendación ITU SM.337 con N igual a 20 dB

Los resultados de aplicación del método alternativo de la recomendación ITU SM.337 [2] con $N = 20$ dB se presentan en figuras y tablas para cada una de las

frecuencias de trabajo consideradas: 138 MHz y 470 MHz, y las 3 máscaras espectrales de los sistemas de radio móvil consideradas: Tipo B, Tipo D y Tipo E, aplicando los diferentes modelos de pérdidas de propagación para encontrar las distancias de separación. En la Figura 38 y desde la Tabla 58 hasta la Tabla 60 se presentan los resultados de aplicación del método alternativo de la recomendación ITU SM.337 [2] con $N = 20$ dB para la frecuencia de 138 MHz, mientras que, en la Figura 39 y desde la Tabla 61 hasta la Tabla 63 se presentan los resultados para la frecuencia de 470 MHz.

3.4.2.1. Aplicación del método alternativo de la ITU SM.337 con N igual a 20 dB a la frecuencia de 138 MHz

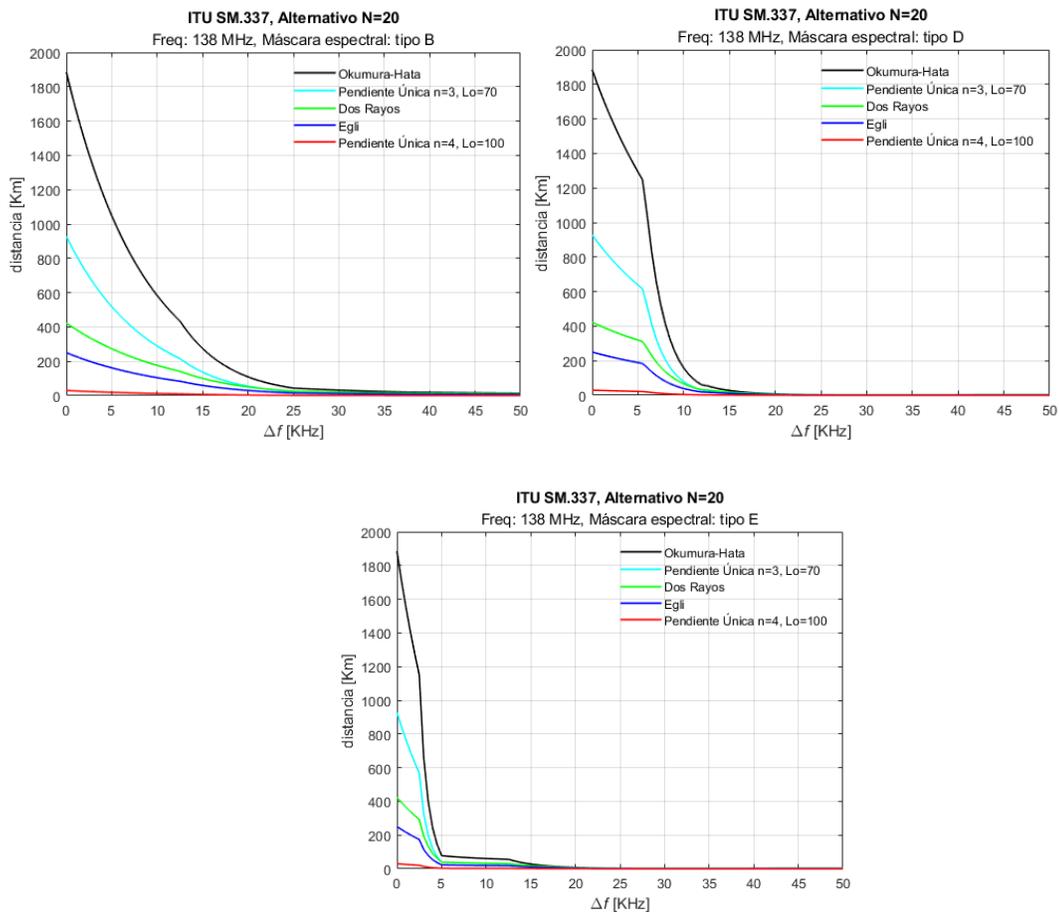


Figura 38. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con $N=20$ considerando la frecuencia de 138 MHz y las diferentes máscaras espectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 138 MHz considerando la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 138 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	15462.81	56.14	9.98	8.70	8.70
OKUMURA-HATA	1884.71	43.57	13.69	12.48	12.48
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	928.49	21.93	6.94	6.33	6.33
DOS RAYOS	423.01	25.49	10.75	10.03	10.03
EGLI	250.56	15.10	6.37	5.94	5.94
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	29.91	1.80	0.76	0.71	0.71

Tabla 59. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 138 MHz considerando la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 138 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	15462.81	2667.83	105.22	2.76	1.04
OKUMURA-HATA	1884.71	580.18	66.39	5.79	3.00
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	928.49	287.76	33.34	2.95	1.53
DOS RAYOS	423.01	175.70	34.89	5.66	3.47
EGLI	250.56	104.07	20.67	3.35	2.05
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	29.91	12.42	2.47	0.40	0.25

Tabla 60. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 138 MHz considerando la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 138 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	15462.81	2091.41	119.22	29.15	0.91
OKUMURA-HATA	1884.71	492.81	72.19	28.08	2.74
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	928.49	244.65	36.24	14.17	1.4
DOS RAYOS	423.01	155.57	37.14	18.37	3.24
EGLI	250.56	92.15	22	10.88	1.92
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	29.91	11	2.63	1.3	0.23

3.4.2.2. Aplicación del método alternativo de la ITU SM.337 con N igual a 20 dB a la frecuencia de 470 MHz

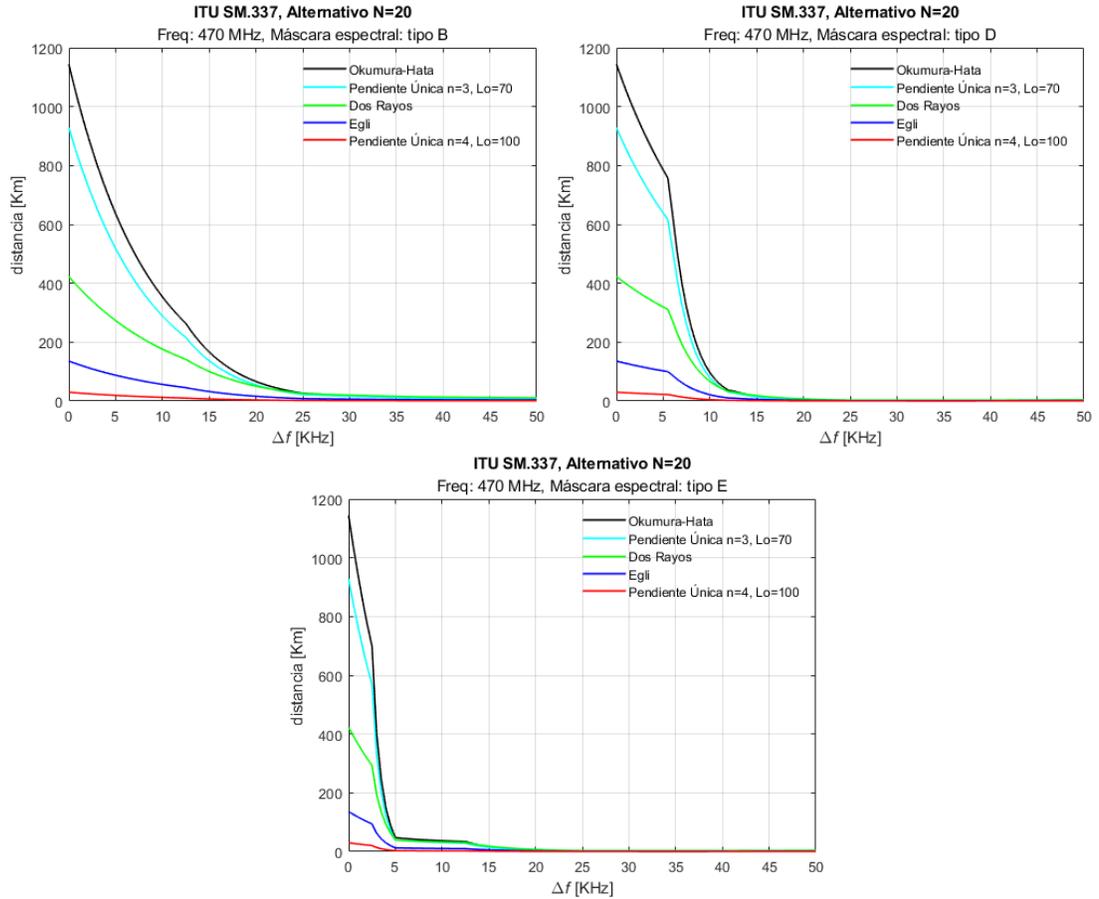


Figura 39. Resultados del método Alternativo ITU SM.337 con N=20 considerando la frecuencia de 470 MHz y las diferentes máscaras espectrales.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 470 MHz considerando la máscara espectral tipo B.

FRECUENCIA: 470 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz	$\Delta f = 75$ kHz	$\Delta f = 100$ kHz
ESPACIO LIBRE	4540.14	16.48	2.93	2.55	2.55
OKUMURA-HATA	1144.14	26.45	8.31	7.57	7.57
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	928.49	21.93	6.94	6.33	6.33
DOS RAYOS	423.01	25.49	10.75	10.03	10.03
EGLI	135.77	8.18	3.45	3.22	3.22
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	29.91	1.80	0.76	0.71	0.71

Tabla 62. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 470 MHz considerando la máscara espectral tipo D.

FRECUENCIA: 470 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 37.5$ kHz
ESPACIO LIBRE	4540.14	783.32	30.89	0.81	0.31
OKUMURA-HATA	1144.14	352.20	40.31	3.51	1.82
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	928.49	287.76	33.34	2.95	1.53
DOS RAYOS	423.01	175.70	34.89	5.66	3.47
EGLI	135.77	56.39	11.20	1.82	1.11
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	29.91	12.42	2.47	0.40	0.25

Tabla 63. Resultados del método ITU SM.337 Alternativo con N=20 a la frecuencia de 470 MHz considerando la máscara espectral tipo E.

FRECUENCIA: 470 MHz ITU SM.337 ALTERNATIVO, N=20	SEPARACIÓN EN DISTANCIA (km)				
	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = 3.125$ kHz	$\Delta f = 6.25$ kHz	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 18.75$ kHz
ESPACIO LIBRE	4540.14	614.07	35.00	8.56	0.27
OKUMURA-HATA	1144.14	299.16	43.83	17.05	1.66
PENDIENTE ÚNICA n=3, Lo=70.	928.49	244.65	36.24	14.17	1.40
DOS RAYOS	423.01	155.57	37.14	18.37	3.24
EGLI	135.77	49.93	11.92	5.90	1.04
PENDIENTE ÚNICA n=4, Lo=100.	29.91	11.00	2.63	1.30	0.23

En el método alternativo de la recomendación ITU SM.337 [2] con $N = 20$ dB, los resultados de distancias se reducen considerablemente en un 45% en comparación al método alternativo de la recomendación ITU SM.337 [2] con factor de disponibilidad de $N = 10$ dB, y un 70% para el método de la recomendación ITU SM.337 [2] cuando se tiene un $\Delta f = 0$ para todas las máscaras espectrales consideradas. Al igual que en el método E-MCL [1], al aumentar el factor de disponibilidad a $N = 20$ dB se garantiza una menor cobertura o alcance de los sistemas con un mayor porcentaje de cobertura zonal, lo que permite la disminución de las distancias de aislamiento entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia, cuando los sistemas operan en frecuencias iguales o cercanas.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos se observa que los métodos analíticos MCL [1] e ITU SM.337 ($N = 3$) [2], son métodos que consideran los casos más exigentes en cuanto a aislamiento se refiere, los cuales se traducen en distancias de separación considerables entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia especialmente cuando los sistemas operan en la misma frecuencia. Los resultados de distancia obtenidos por dichos métodos solo se consideran como referencia para la comparación con los demás métodos analíticos mostrados en el presente informe. Por otro lado, el método analítico E-MCL [1] y el método analítico ITU SM.337 [2] en su versión alternativa, consideran que la sensibilidad del receptor víctima es afectada por un factor de disponibilidad, el cual limita el alcance de los sistemas considerados y disminuye el aislamiento requerido, lo que se traduce en menores distancias de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia a medida que se aumenta la separación en frecuencia de los sistemas.

Desde la Figura 40 hasta la Figura 42 y desde la Tabla 64 hasta la Tabla 66 se muestra una comparativa entre los resultados obtenidos al aplicar los diferentes métodos analíticos, en donde se observa los métodos que garantizan un mayor aislamiento a interferencia en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia para las diferentes máscaras espectrales consideradas en el análisis: Tipo B, Tipo D y Tipo E. Las figuras permiten visualizar de una forma alternativa las dos regiones indicadas en la Figura 4: región de operación aceptable y región de operación no aceptable, para un modelo de pérdidas de propagación específico: modelo de dos rayos (modelo independiente de la frecuencia), y considerando el efecto de la máscara espectral sobre el aislamiento requerido entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia. Se observa que el método ITU SM.337 [2] y su versión alternativa presentan el mismo comportamiento gráfico con $N = 3$, $N = 10$ y $N = 20$; así como también, los métodos E-MCL [1] presentan un comportamiento gráfico similar cuando se considera $N = 3$ (MCL [1]), $N = 10$ y $N = 20$.

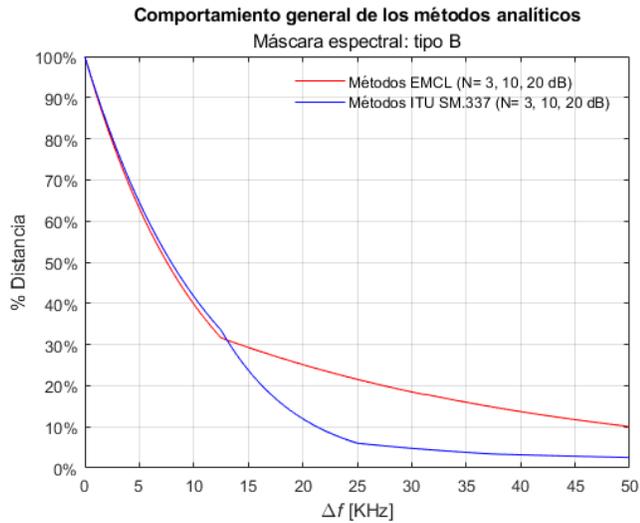


Figura 40. Comportamiento general de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo B.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 64. Resultados de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo B.

	$\Delta f = 12.5$ kHz	$\Delta f = 25$ kHz	$\Delta f = 50$ kHz
ITU SM.337	65%	94%	98%
E-MCL	68%	78%	90%

En la Figura 40 y en la Tabla 64 se observa que al considerar los métodos de la ITU SM.337 [2] (N=3, N=10 y N=20) y los métodos E-MCL [1] (N=3, N=10 y N=20) para la máscara espectral Tipo B se obtiene una disminución en distancia de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia entre el 65% y 68% para una separación en frecuencia de 12.5 kHz; una disminución en distancia entre el 78% y 94% para una separación en frecuencia de 25 kHz (un canal de separación); y una disminución superior al 90% cuando se considera una separación en frecuencia de 50 kHz (dos canales de separación). Sin embargo, los valores específicos de separación en distancia dependerán del método analítico, el modelo de pérdidas de propagación considerado, la frecuencia de operación y del factor de disponibilidad del sistema elegido, e.g., al considerar el método analítico E-MCL [1] con N=10, el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo B se obtiene un valor de distancia de alrededor 687 km para un corrimiento en frecuencia de 0 Hz, la cual se disminuye aproximadamente hasta 69 km cuando se considera una separación en frecuencia de 50 kHz.

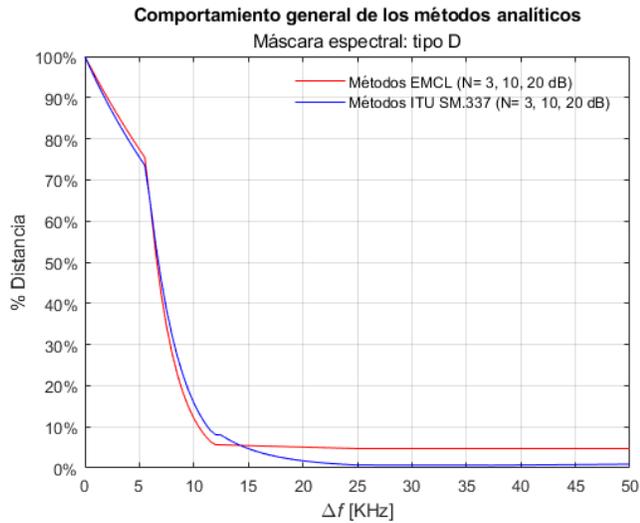


Figura 41. Comportamiento general de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo D.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 65. Resultados de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo D.

	$\Delta f = 6.25 \text{ kHz}$	$\Delta f = 12.5 \text{ kHz}$	$\Delta f = 25 \text{ kHz}$
ITU SM.337	28%	92%	99%
E-MCL	24%	95%	95%

En la Figura 41 y en la Tabla 65 se observa que al considerar los métodos de la ITU SM.337 [2] y los métodos E-MCL [1] se obtiene una disminución en distancia de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia entre el 24% y 28% para una separación en frecuencia de 6.25 kHz; una disminución en distancia entre el 92% y 95% para una separación en frecuencia de 12.5 kHz (un canal de separación); y una disminución en distancia superior al 95% cuando se considera una separación en frecuencia de 25 kHz (dos canal de separación). Lo anterior confirma que la máscara espectral para sistemas de radio móvil tipo D tiene unas mayores restricciones que la máscara espectral Tipo B, por lo cual limita las señales no deseadas a una menor separación en frecuencia.

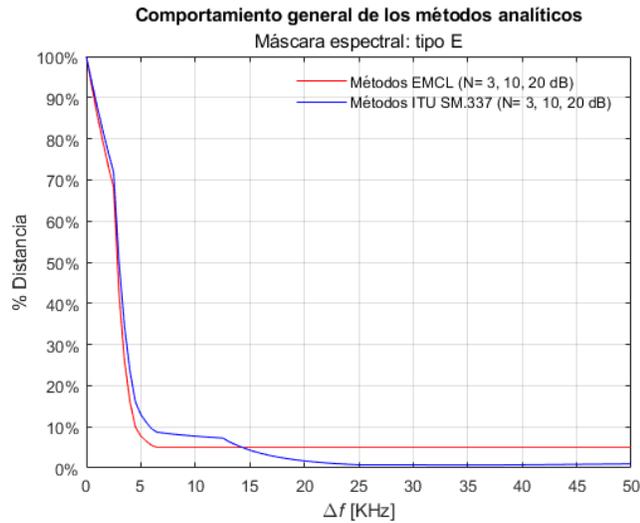


Figura 42. Comportamiento general de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo E.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 66. Resultados de los métodos analíticos en función del porcentaje en distancia y la separación en frecuencia considerando el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo E.

	$\Delta f = 3.125 \text{ kHz}$	$\Delta f = 6.25 \text{ kHz}$	$\Delta f = 12.5 \text{ kHz}$
ITU SM.337	30%	91%	93%
E-MCL	34%	95%	95%

En la Figura 42 y en la Tabla 66 se observa que al considerar los métodos de la ITU SM.337 [2] y los métodos E-MCL [1] se obtiene una disminución en distancia de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia entre el 30% y 34 % para una separación en frecuencia de 3.125 kHz; una disminución de distancia entre el 91% y 95 % para una separación en frecuencia de 6.25 kHz (un canal de separación); y una disminución superior al 95% cuando se considera una separación en frecuencia de 50 kHz (dos canales de separación).

Por lo tanto, cuando se considera el modelo de propagación de dos rayos y la máscara espectral tipo B es necesario de una separación en frecuencia de al menos 2 canales de 25 kHz para permitir que el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia puedan operar a un 90% de la distancia que sería necesaria si estuvieran operando a la misma frecuencia; cuando se considera el modelo de dos rayos y la máscara espectral tipo D es necesario de una separación en frecuencia de al menos 2 canales de 12.5 kHz para permitir que los sistemas puedan operar a un 95% de la distancia necesaria si los sistemas estuvieran operando a la misma frecuencia; y cuando se considera el modelo de dos rayos y la máscara espectral tipo E es necesario de una separación teórica en frecuencia de al menos 2 canales

de 6.25 kHz para permitir que los sistemas puedan operar a un 95% de la distancia necesaria si los sistemas estuvieran operando a la misma frecuencia. En donde, los valores específicos de separación en distancia dependerán del método analítico, el modelo de pérdidas de propagación considerado, la frecuencia de operación y del factor de disponibilidad del sistema elegido.

Por lo tanto, tomando como referencia el máximo valor de distancia de la mínima separación para un corrimiento de frecuencia igual a 0 Hz, i.e., 140 km para VHF y 120 km para UHF, distancias soportadas tanto por recomendaciones internacionales (e.g., el reporte ITU-R M.2474-0 [39]) y las estimaciones de cobertura, se presentan en la Tabla 67, Tabla 68 y Tabla 69, los mínimos¹⁷ valores de porcentaje de disminución de la mínima separación en distancia requerida para las máscaras espectrales tipo B, D y E, respectivamente, y las distancias a las cuales corresponden.

Tabla 67. Distancia mínima de separación entre un sistema interferente y un receptor víctima de interferencia considerando el corrimiento en frecuencia para una máscara espectral tipo B.

Banda	Corrimiento en frecuencia		
	$\Delta f = 25 \text{ kHz}$	$\Delta f = 50 \text{ kHz}$	$\Delta f = 75 \text{ kHz}$
Mínimo valor de porcentaje de disminución de distancia	78.46 %	90 %	91.34 %
VHF (distancia)	30.15 km	14 km	12.12 km
UHF (distancia)	25.848 km	12 km	10.39 km

Tabla 68. Distancia mínima de separación entre un sistema interferente y un receptor víctima de interferencia considerando el corrimiento en frecuencia para una máscara espectral tipo D.

Banda	Corrimiento en frecuencia		
	$\Delta f = 12.5 \text{ kHz}$	$\Delta f = 25 \text{ kHz}$	$\Delta f = 37.5 \text{ kHz}$
Mínimo valor de porcentaje de disminución de distancia	91.99 %	95.27 %	95.5 %
VHF (distancia)	11.21 km	6.62 km	6.3 km
UHF (distancia)	9.6 km	5.68 km	5.4 km

¹⁷ Se eligen los valores mínimos de porcentaje de disminución de la separación en distancia para garantizar por seguridad el mayor aislamiento frente a interferencia de canal adyacente.

Tabla 69. Distancia mínima de separación entre un sistema interferente y un receptor víctima de interferencia considerando el corrimiento en frecuencia para una máscara espectral tipo E.

Banda	Corrimiento en frecuencia			
	$\Delta f = 6.25 \text{ kHz}$	$\Delta f = 12.5 \text{ kHz}$	$\Delta f = 18.75 \text{ kHz}$	$\Delta f = 25 \text{ kHz}$
Mínimo valor de porcentaje de disminución de distancia	91.22 %	92.72 %	94.99 %	94.99 %
VHF (distancia)	12.292 km	10.192 km	7.014 km	7.014 km
UHF (distancia)	10.536 km	8.736 km	6 km	6 km

Basándose en los resultados obtenidos de la Tabla 67, la Tabla 68 y la Tabla 69 mostrados en la presente sección se realizan las siguientes recomendaciones:

- **Recomendación 1: sistemas operando con un ancho de banda de canal de 25 kHz**

Se recomienda una distancia mínima de separación de 30 km para VHF y de 26 km para UHF cuando existe una separación en frecuencia de un canal; una distancia mínima de separación de 14 km para VHF y de 12 km para UHF cuando existe una separación en frecuencia de dos canales; y una distancia mínima de separación de 12 km para VHF y de 11 km para UHF cuando existe una separación en frecuencia de tres canales.

- **Recomendación 2: sistemas operando con un ancho de banda de canal de 12.5 kHz**

Se recomienda una distancia mínima de separación de 11 km para VHF y de 10 km para UHF cuando existe una separación en frecuencia de un canal; una distancia mínima de separación de 7 km para VHF y de 6 km para UHF cuando existe una separación en frecuencia de dos canales; y una distancia mínima de separación de 6 km para VHF y de 5 km para UHF cuando existe una separación en frecuencia de tres canales.

- **Recomendación 3: sistemas operando con un ancho de banda de canal de 6.25 kHz**

Se recomienda una distancia mínima de separación de 12 km para VHF y de 11 km para UHF cuando existe una separación en frecuencia de un canal; una distancia mínima de separación de 10 km para VHF y de 9 km para UHF cuando existe una separación en frecuencia de dos canales; y una distancia mínima de separación de 7 km para VHF y de 6 km para UHF cuando existe una separación en frecuencia de tres canales.

Nuevamente es importante resaltar que dichos resultados se obtienen considerando parámetros límites de operación para sistemas de radio móvil, desde el punto de vista de la cobertura y el aislamiento, por lo cual se esperaría obtener menores distancias en una implementación real. Por lo que es importante considerar realizar mediciones sobre sistemas reales para validar y ajustar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los métodos analíticos obtienen valores de aislamiento y distancias que permiten establecer las mínimas condiciones para que los sistemas de radio móvil operen sin verse afectados considerablemente por interferencia, a partir del análisis del peor de los casos utilizando parámetros con valores extremos (máximos o mínimos) con el fin de garantizar con seguridad el mayor aislamiento teórico entre sistemas de radio móvil operando en la misma frecuencia o en frecuencias adyacentes. La máscara espectral del transmisor y la curva de selectividad del receptor son los parámetros más influyentes del sistema de comunicación en los resultados obtenidos, puesto que dichos parámetros fijan los límites de emisión y de recepción que permiten disminuir los efectos de la interferencia co-canal, de canal adyacente y de emisiones fuera de banda. Sin embargo, los resultados obtenidos de separación en distancia tienen valores altos debido a que la máscara espectral para sistemas de radio móvil terrestre no requiere una alta exigencia, como sí sucede en otros sistemas de comunicaciones inalámbricas operando en frecuencias mucho más altas.

La determinación de la mínima separación en distancia y en frecuencia para sistemas operando en VHF y UHF hasta los 470 MHz por aplicación de métodos analíticos, es una tarea que requiere una descripción detallada del sistema de radio móvil, esto es, teniendo en cuenta las características del sistema interferente y víctima de interferencia, así como el hacer uso de un modelo de pérdidas de propagación que modele de manera aproximada las condiciones de los escenarios de operación. Por tal razón en los resultados obtenidos mediante el análisis de interferencia con los diferentes métodos analíticos, se observa que los métodos MCL [1] ($N = 3$) e ITU SM.337 [2] ($N = 3$) son métodos que exigen considerables distancias de aislamiento y que difícilmente pueden ser implementadas en la práctica, por lo que solo deben ser considerados como un punto de referencia.

Por otro lado, los métodos analíticos E-MCL [1] e ITU SM.337 [2] en su versión alternativa, consideran el factor de disponibilidad del sistema en el análisis de interferencia, por lo que se tiene en cuenta la degradación de la sensibilidad del receptor víctima de interferencia. El factor de disponibilidad convierte la sensibilidad estática definida por los fabricantes y medida en condiciones controladas de laboratorio, en una sensibilidad efectiva, la cual contempla condiciones reales de operación, en las que se consideran fenómenos que afectan las señales radio en el canal de comunicaciones, como lo son el ruido y la multitrayectoria, lo que permite modelar limitaciones de los sistemas radio que afectan a las señales interferentes, y que permiten considerar una menor distancia de aislamiento.

Los resultados de los diferentes modelos propagación corroboran que es importante considerar un modelo de pérdidas de propagación que estime de manera muy aproximada las condiciones de operación de los sistemas de radio móvil en

diferentes escenarios de implementación, de tal manera que se obtengan distancias de separación que puedan ser implementadas en un escenario real, sin afectar considerablemente la eficiencia en el uso de los recursos radioeléctricos y permitir la operación de la mayor cantidad de sistemas radio móvil. Siendo el modelo de propagación de pendiente única con $n = 3$ y $L_o = 70$ y el modelo de Okumura Hata en escenarios rurales los modelos más optimistas en términos de alcance y cobertura, los cuales sugieren distancias de separación entre transmisor interferente y receptor víctima de interferencia considerables. Sin embargo, es necesario realizar un estudio con medidas reales en el escenario colombiano para ajustar los modelos de pérdidas por propagación considerados y de esta manera obtener valores de distancia de separación que se puedan aplicar en el país.

Tomando como referencia las separaciones en distancia consideradas por los organismos de control de 140 km para VHF y 120 km para UHF para evitar la interferencia co-canal, y las curvas obtenidas mediante la aplicación de los métodos analíticos que representan los valores de separación en distancia en función de la separación en frecuencia para mitigar los efectos de la interferencia de canal adyacente, se puede estimar cuál es el aislamiento mínimo requerido en frecuencia y distancia entre una fuente interferente y víctima de interferencia.

Con la aplicación de los métodos analíticos MCL y E-MCL [1] en bloqueo, teniendo en cuenta un escenario con valores de parámetros para el peor de los casos, se puede obtener una distancia mínima para evitar el bloqueo del receptor cuando la fuente interferente está a una separación de 0 Hz (interferencia co-canal), esta distancia varía en función del método analítico y del modelo de pérdidas de propagación. Para el método analítico MCL [1] se tiene el valor más alto con el modelo de pérdidas de propagación de espacio libre con una distancia de 38.65 km y el valor más bajo con el modelo de pendiente única (con $n = 4$ y $L_o = 100$ dB) con una distancia de 1.5 km; para el método analítico E-MCL [1] con N igual a 10 dB, se tiene el valor más alto con el modelo pérdidas de propagación de Okumura-Hata con una distancia de 16.24 km y el valor más bajo con el modelo de pendiente única (con $n = 4$ y $L_o = 100$ dB) con una distancia de 0.86 km; para el método analítico E-MCL [1] con N igual a 20 dB, se tiene el valor más alto con el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata con una distancia de 7.27 km y el valor más bajo con el modelo de pendiente única (con $n = 4$ y $L_o = 100$ dB) con una distancia de 0.47 km.

5.1. TRABAJOS FUTUROS

Los siguientes son trabajos de grado propuestos:

- Adaptación de un modelo de pérdidas de propagación mediante medidas experimentales en Colombia.
- Análisis de la mínima separación en frecuencia y distancia entre fuentes de radiofrecuencia operando en VHF y en UHF por aplicación de medidas experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Radiocommunications Committee, "A Comparison Of The Minimum Coupling Loss Method, Enhanced Minimum Coupling Loss Method and Monte-Carlo Simulation," Menton, May 1999.
- [2] *Frequency and distance separations*, Rec. ITU-R SM.337-6, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2020.
- [3] C. Hernández, V. Quintero, M. Vargas, D. Galvis, M. Benavídez, and R. Zambrano, "Recomendaciones Sobre Parámetros Técnicos Esenciales de Operación y Análisis de Interferencia para Sistemas de Comunicaciones VHF en Colombia," ed: Universidad del Cauca, 2021.
- [4] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Handbook on National Spectrum Management*, Ginebra, Suiza, 2015.
- [5] *Definición y Medición de los Productos de Intermodulación en Transmisores que Utilizan Técnicas de Modulación de Frecuencia, de Fase o Compleja.*, ITU-R SM.1446, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza., 2020.
- [6] *Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias*, Agencia Nacional del Espectro, Bogotá, Colombia, 2021.
- [7] *Resolución 105 de 2020*, Agencia Nacional del Espectro, Bogotá, Colombia., 2020.
- [8] *Technical and Operational Information for Identifying Spectrum for the Terrestrial Component of Future Development of IMT-2000 and IMT-Advanced*, ITU-R M.2079, Unión Internacional de telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2006.
- [9] *Vocabulario de Radiocomunicaciones*, ITU-R V.573-6, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2015.
- [10] Agencia Nacional del Espectro (ANE). "Visor de Espectro."
- [11] *Manual Comprobación Técnica Del Espectro*, R-HDB-23-2011, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza., 2011.
- [12] Laird Connectivity, "Find an Antenna," ed: Laird Connectivity.
- [13] Universidad Tecnológica Nacional, "Electrónica Aplicada III," in *Receptores de Radio Frecuencia*, ed. Mendoza, Argentina, 2004.
- [14] *Relaciones de protección e intensidades mínimas de campo necesarias en los servicios móviles*, Rec. ITU-R M.358-5, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 1986.
- [15] Hytera, "Datos técnicos TC-508," ed. Shenzhen, China: Hytera.
- [16] J. Pahl, *Interference analysis : modelling radio systems for spectrum*. Chichester, UK, 2016.
- [17] *Unwanted Emissions In The Out Of Band Domain*, Rec. ITU-R SM.1541-6, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2015.
- [18] *Code of Federal Regulations*, Gobierno de Estados Unidos, Estados Unidos, 2020.
- [19] Government of Canada. "Land Mobile and Fixed Equipment Operating in the Frequency Range 27.41 - 960 MHz."

- [20] Icom America Inc, "6.25 CDMA Information center," 2007.
- [21] J. Lorenzo, "Apuntes de Receptores," Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, 2016.
- [22] *Normas para la Planificación de la Radiodifusión Sonora con Modulación de Frecuencia en Ondas Métricas*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 1998.
- [23] *Selectividad de los Receptores*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza., 1978.
- [24] Government of Canada. "Information of the Evaluation of VHF and UHF Terrestrial Cross Border Frequency Coordination Request." <https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/eng/sf10625.html> (accessed 21 Oct, 2021).
- [25] J. J. Tobar and T. Burbano, "Análisis de las Áreas de Servicio y de Interferencia de Sistemas de Comunicación en Frecuencias de 30 MHz a 466 MHz en Colombia.," Universidad del Cauca, 2021.
- [26] *Calculo de la Atenuación en el Espacio Libre*, Rec. UIT-R P.525-4, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2019.
- [27] J. M. Hernando Rábanos, *Transmisión por radio*, Madrid: Editorial Universitaria Ramón Araces, 2008.
- [28] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*. 2002.
- [29] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-29, no. 3, pp. 317-325, 1980.
- [30] S. Ajose and A. Imoize, "Propagation measurements and modelling at 1800 MHz in Lagos Nigeria," *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, vol. 6, pp. 165-174, 05 2013, doi: 10.1504/IJWMC.2013.054042.
- [31] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. 1974.
- [32] S. K. Foong, "Work Done by a Gaussian Impulse," *European Journal of Physics*, vol. 31, 3, pp. 543-550, 2010.
- [33] Unión Internacional de Telecomunicaciones and Ministerio de Tecnologías de Información y las Comunicaciones de Colombia, *Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico: Ingeniería del Espectro Radioeléctrico (Título II)*, Bogotá, Colombia, 2012.
- [34] J. Donovan. "Interference Isolation in Wireless Systems." (accessed 28 July, 2021).
- [35] TAIT Communications. "Radio Frequency Performance Parameters - Transmitter Noise." (accessed 28 July, 2021).
- [36] *The Impact of Receiver Standards on Spectrum Management*, Comité de Comunicaciones Electrónicas and Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones, 2008.
- [37] F. L. Z. Cataldi, R. Pessacq y R. García.,, "Ingeniería de Software Educativo,"
- [38] IONOS. "El Modelo en Cascada: Desarrollo Secuencial de Software." (accessed.
- [39] *Conventional Digital Land Mobile Radio Systems*, ITU-R M.2474-0, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2019.