

## **Análisis Del Aislamiento Entre Servicios De Radiocomunicaciones Móviles Terrestres.**

### **Analysis of the Isolation Between Land Mobile Radiocommunication Services.**

Rafael Ervey Cabrera P<sup>1</sup>, Claudia Milena Hernández B<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Grupo de Radio e Inalámbricas GRIAL, Universidad del Cauca, Calle 5 No 4-70, 190003, Popayán, Colombia.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Grupo de Radio e Inalámbricas GRIAL, Universidad del Cauca, Calle 5 No 4-70, 190003, Popayán, Colombia.

claudiah@unicauca.edu.co

Cite this article as: R. Cabrera, C.M. Hernández, “*Análisis del aislamiento entre servicios de radiocomunicaciones móviles terrestres.*”, *Prospectiva*, Vol. 23 N° 1 2025.

**Recibido: 24/11/2023 / Aceptado: 02/11/2024**

<http://doi.org/10.15665/rp.v23i1.3401>

#### **RESUMEN.**

Los sistemas de comunicación del servicio móvil terrestre son ampliamente utilizados por diferentes sectores de la industria en el país, tales como servicios de radiocomunicación móvil y fijo (tanto de acceso convencional como troncalizado) y servicios de comunicaciones móviles de banda ancha; utilizados principalmente en servicios de despacho, de taxis y de transporte, servicios de seguridad y emergencia, flotas de vehículos, trabajos de construcción, control de tráfico, mantenimiento de servicios públicos y operaciones de campo en el sector petrolero. Sin embargo, la asignación de frecuencias sobre el territorio requiere una gestión precisa para evitar la interferencia y aprovechar al máximo el escaso recurso del espectro electromagnético. En este artículo se determina de forma numérica la separación en distancia que debe existir entre dispositivos del servicio móvil terrestre, que operan en las bandas de Muy Altas Frecuencias y Ultra Altas Frecuencias para garantizar que se no presenten señales no deseadas. Se empleó el método de Monte Carlo para la simulación del sistema, considerando el efecto de la interferencia cocanal, canal adyacente y bloqueo, diferentes modelos de propagación y tamaños de escenario. Los resultados indican que, dependiendo del modelo de propagación empleado, las distancias mínimas de separación pueden variar desde 108 km a 118 km entre estaciones que operan en la misma frecuencia y se incrementan o disminuyen en la medida que se consideran diversos aspectos en el modelado del servicio móvil terrestre.

**Palabras clave.** Aislamiento, interferencia, frecuencia, método numérico, probabilidad.

## **ABSTRACT**

The land mobile communication systems are widely used by different industry sectors in the country; Such as mobile and fixed radio communication services (both conventional and trunked access) and broadband mobile communication services; mainly used in dispatch, cab and transport services, security and emergency services, vehicle fleets, construction work, traffic control, utility maintenance and field operations in the oil sector. However, the allocation of frequencies over the territory requires precise management to avoid interference and performs a suitable use of the scarce resource of the electromagnetic spectrum. In this article, the distance separation that should exist between land mobile service devices operating in the Very High Frequency and Ultra High Frequency bands is numerically determined to ensure that no unwanted signals are present. The Monte Carlo method was used to simulate the system, based on the interference probability, the effect of co-channel interference, adjacent channel and blocking was considered for different propagation models and different scenario sizes. The results indicate that, depending on the propagation model used, the minimum separation distances can vary from 108 km to 118 km between stations operating on the same frequency and increase or decrease as various aspects are considered in the modeling of the land mobile service.

**Keywords.** Isolation, interference, frequency, numerical method, probability.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Nuevas aplicaciones, sistemas y servicios de comunicaciones móviles e inalámbricas son desarrollados cada día, conllevando la necesidad de asignarles una frecuencia del Espectro Radioeléctrico (ERE) para su funcionamiento. Sin embargo, las normas y estándares que regulan su operación no han avanzado a la par, surgiendo la necesidad de llevar a cabo estudios y análisis de metodologías que permitan viabilizar los procedimientos técnicos pertinentes para compensar la demanda y surgimiento de esas nuevas tecnologías sin perjudicar a aquellas que ya existen y operan actualmente. Por otro lado, es importante considerar que el ERE es un recurso costoso y principalmente limitado [1], por lo tanto, con su correcta gestión, se garantiza que toda clase de servicios inalámbricos funcionen correctamente, satisfaciendo criterios de separación física (distancia) y separación espectral (frecuencia) para evitar que se presenten interferencias entre ellos [2] [3]. Para lograr esto, se deben evaluar y considerar diversas propuestas, las cuales se basan en el uso conjunto de métodos teóricos y experimentales [2] [4]. A nivel internacional, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) ha definido diferentes documentos técnicos relacionados con la aplicación de métodos numéricos o probabilísticos para el estudio y compartición de frecuencias en diferentes sistemas de radiocomunicaciones, tales como el reporte ITU-R SM.2028-2 [5] y las recomendaciones ITU-R M.1634 [6], ITU-R SM.1271-0 [7] y ITU-R SM.337-6 [8]; adicionalmente se tiene el informe 252 del Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC, *Electronic Communications Committee*) que sirve como guía para el uso de la herramienta de Análisis Avanzado de Monte Carlo para Ingeniería del Espectro (SEAMCAT, *Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*) [9], enfocado en el desarrollo de simulaciones estadísticas avanzadas que posibilitan el estudio y análisis de la probabilidad de interferencia que se puede presentar en diferentes entornos radioeléctricos y el informe 101 del Comité Europeo de Radiocomunicaciones (ERC, *European Radiocommunications Committee*) [10], en el cual se realiza un estudio comparativo entre métodos analíticos y probabilísticos para la evaluación de la compatibilidad entre sistemas de radiocomunicaciones. Existen diferentes trabajos de investigación, tales como *Monte Carlo Simulation Model of Intervehicle Communication* [11], donde se emplea una simulación de Monte Carlo para analizar la conectividad multisalto de sistemas de comunicaciones vehiculares, no se especifica el modelo de pérdidas de

propagación ni la frecuencia de operación del sistema; *Frequency re-use distance calculation in cellular systems based on Monte-Carlo simulation* [12], donde se realiza una simulación de Monte Carlo para determinar la probabilidad de interferencia en un sistema móvil celular GSM con diferentes valores de reuso de frecuencia y *Derivation of Probability Density Function of Signal to Interference Plus Noise Ratio for the MS to MS (Mobile Stations) Interference Analysis* [13], en el cual se analiza comparativamente un método analítico y resultados de simulaciones de Monte Carlo para calcular la probabilidad de interferencia cocanal y canal adyacente de un equipo LTE sobre un sistema de radio troncalizado; en dichos trabajos, aunque se realiza simulación de Montecarlo, se emplea un único modelo de pérdidas, distribuciones de probabilidades no uniforme y Bernoulli, frecuencias superiores a los 900 MHz, diferentes herramientas de simulación y están orientados al análisis de sistemas de comunicación diferentes a los estudiados en este artículo. A nivel nacional, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC) y la Agencia Nacional del Espectro (ANE) han desarrollado el Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico [1] [3] [4]. Las recomendaciones, artículos, documentos y manuales mencionados implementan y consideran métodos teóricos, analíticos y matemáticos para efectuar el estudio de los efectos negativos que puede ocasionar una fuente interferente en los servicios y sistemas de comunicaciones que operan en diferentes bandas de frecuencias, en algunos de estos mediante simulaciones en distintas herramientas software.

En contraste con la documentación y trabajos mencionados, en este artículo, mediante una simulación en Matlab (*Matrix Laboratory*), se utiliza el método de Monte Carlo para evaluar el potencial de compartición de frecuencias para sistemas de radiocomunicaciones, realizando el análisis de la probabilidad de interferencia en los Servicios Móviles Terrestres (LMS, *Land Mobile Services*) que operan en las bandas de frecuencias de 138 MHz y 470 MHz, considerando una distribución de probabilidad uniforme y empleando los modelos de pérdidas de propagación de Espacio Libre, Egli, Dos Rayos, Pendiente Única y Okumura-Hata Rural. Partiendo de los resultados de probabilidad, se evalúa la distancia mínima de separación que debe existir entre dos o más LMS que operan en la misma frecuencia o frecuencias cercanas. Esta distancia representa el aislamiento espacial que debe existir entre un receptor víctima de interferencia y un transmisor interferente para evitar la presencia de señales no deseadas, asegurando su operación y logrando un uso más eficiente del ERE. El rechazo en función de la frecuencia, dado por la curva de selectividad de un receptor y la separación en frecuencia – distancia, son dos de los parámetros que permiten determinar la distancia de separación entre servicios de comunicación, siendo el último mencionado el utilizado para el desarrollo del artículo, puesto que con este se puede calcular la mínima separación en distancia requerida [5] [6] [14] [15]. Es importante tener en cuenta que, a nivel general, en el análisis de la distancia de separación física solo se debe considerar el peor de los casos, es decir, el caso de interferencia que exige el mayor aislamiento entre los servicios [8] [10]. Dentro del LMS se tienen los servicios de Radio Móvil Privado (PMR, *Private Mobile Radio*) y de Radio Móvil de Acceso Público (PAMR, *Public Access Mobile Radio*). Estos servicios están diseñados para comunicaciones de corta duración y se caracterizan por tener una cobertura local, con la cual satisfacen las necesidades de comunicación interna de un grupo cerrado de usuarios en un área determinada [9] [16] [17], estos servicios operan bajo licencia, otorgada por el MINTIC.

Este trabajo fue llevado a cabo en el marco del proyecto de investigación “Recomendaciones sobre parámetros técnicos esenciales de operación y análisis de interferencia para sistemas de comunicaciones VHF en Colombia” realizado entre la ANE y la Universidad del Cauca. El desarrollo de este proyecto de investigación generó un aporte a la ANE, dado que las recomendaciones realizadas, basadas en el uso del método numérico de Monte Carlo empleado para la determinación del aislamiento mínimo en espacio y frecuencia de sistemas PMR, permitieron actualizar los procedimientos de estudios de viabilidad técnica, en la asignación de canales para de estos, con la finalidad de lograr una mayor eficiencia espectral en el uso de los recursos radioeléctricos, garantizando e incluyendo los efectos correlacionados entre señales deseadas, ruido, desvanecimiento, la mitigación de la interferencia, características y comportamiento del receptor para varias separaciones en físicas y espectrales en el contexto orográfico colombiano.

El artículo está organizado de la siguiente forma; en la primera sección se presenta la introducción y contexto, en la segunda la metodología empleada, en la sección tres se consolidan los resultados y en la sección cuatro se precisan las conclusiones.

## 2. DESARROLLO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de este artículo se empleó una metodología en cascada dividida en 4 etapas: requerimiento, diseño, implementación y resultados [18]. A continuación, se presenta el desarrollo de cada etapa.

### 2.1. Requerimiento

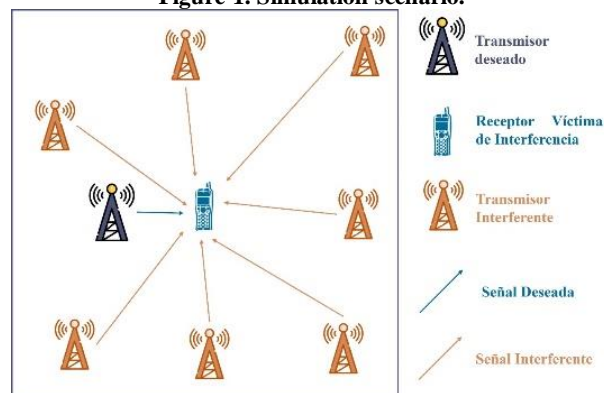
Realizar una simulación utilizando el Método de Monte Carlo para determinar la distancia mínima de separación física o espacial requerida entre dos LMS que operan en las bandas de Muy Altas Frecuencias (VHF, *Very High Frequencies*) y Ultra Altas Frecuencias (UHF, *Ultra High Frequencies*), partiendo de la probabilidad de presentar interferencia en la recepción. Se utilizan estas bandas debido a sus características de calidad y robustez de las señales, madurez de las tecnologías implementadas, relativo bajo costo de los equipos y sus condiciones favorables de propagación, dadas por el uso de bajas frecuencias y longitud de onda grande, por lo cual las pérdidas de espacio libre son menores y el alcance de la onda electromagnética es mayor, permitiendo la cobertura de regiones amplias por cada estación repetidora y la disminución de los costos de despliegue y operación del sistema. Sin embargo, por dicha condición es una banda muy utilizada para la puesta en funcionamiento de nuevos servicios, ocasionando el incremento de interferencias entre esos nuevos sistemas y los existentes, que operan en la misma frecuencia y en frecuencias de canales adyacentes [2] [19] [20].

### 2.2. Diseño

La simulación Monte Carlo se realiza empleando un sistema que establece enlaces entre estaciones bases y estaciones móviles terrestres en un área de cobertura o LMS [10]. Los servicios móviles considerados operan en las frecuencias de 138 MHz y 470 MHz, donde los parámetros están determinados por el número de transmisores deseados e interferentes, el número de receptores víctima de interferencia considerados y su distribución aleatoria en el escenario bajo análisis, tal y como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Escenario de simulación.

Figure 1. Simulation scenario.



Fuente: Esta investigación.

Una vez definido el escenario de simulación y las ubicaciones de transmisores y receptores, se calculan los niveles de señal deseada e interferente, que percibe el receptor en su entrada. Para calcular los niveles de interferencia se llevan a cabo simulaciones empleando modelos de propagación determinados, con los cuales se evalúa la relación señal deseada a señal no deseada, y a partir de dichos valores, se estima el grado de degradación sobre la señal deseada, las estimaciones más adecuadas son las que emplean el cálculo de la probabilidad de interferencia [21]. El nivel de interferencia se puede expresar a través de una Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*), la cual hace referencia a la capacidad

de percepción del receptor analizado, para que se degrade por la presencia de una señal interferente [5] [7] [9] [17] [22]. La interferencia que se puede presentar en el LMS está ligada directamente con el tipo de operación y la asignación de los canales. Este fenómeno hace referencia al efecto de combinar dos o más ondas electromagnéticas que perjudican la operación de diferentes servicios de telecomunicaciones que comparten un mismo lugar, reflejado a través de la degradación de la calidad de la señal recibida y generando una lectura e interpretación errónea de la información transmitida [4]. El análisis de la interferencia inicia con la estimación de la potencia de las señales interferentes en el receptor y la comparación con los requisitos de los niveles máximos tolerables de interferencias y las relaciones de protección [20]. Dicha estimación se calcula utilizando la ecuación 1 [8].

$$I = P_i + G_t + G_r - L_b - FDR \quad (1),$$

donde,  $P_i$  (en dBm) es la potencia del transmisor interferente,  $G_t$  (en dBi) es la ganancia de la antena del transmisor interferente,  $G_r$  (en dBi) es la ganancia de la antena del receptor víctima de interferencia,  $L_b$  (en dB) es la pérdida básica de propagación calculada mediante un modelo de pérdidas de propagación dado y  $FDR$  (en dB) es el factor de Rechazo en Función de la Frecuencia. De modo general, usando un modelo de propagación determinado, se calcula el nivel de potencia deseado como el del interferente. Sin embargo, en algunos análisis, para estimar el nivel de señal en la recepción es necesario considerar parámetros adicionales tales como el desvanecimiento, el ruido, el ancho de banda y el tipo de señales no deseadas [8]. Asimismo, el receptor puede percibir diferentes tipos de interferencia (cocanal, de canal adyacente y por bloqueo), por ende, es necesario aplicar un modelo distinto e independiente y considerar diferentes parámetros que se adapten a las características propias de operación de cada tipo de señal no deseada [4] [17]. Con interferencia cocanal se tienen señales que operan en la misma frecuencia que la portadora del LMS simulado, ocupando el mismo ancho de banda del canal deseado, reflejado a través de una superposición total sobre la señal esperada en el receptor. Las señales no deseadas por canal adyacente dependen del tipo de máscara espectral empleada y el porcentaje de traslape de la señal interferente sobre la señal deseada. La máscara espectral es un conjunto de líneas definidas matemáticamente que limitan los niveles de la potencia de transmisión de señales radioeléctricas o sus componentes en frecuencia, en función de la separación espectral de cada componente con respecto a la frecuencia central de operación del canal o simplemente se puede definir como la potencia de transmisión contenida dentro de un ancho de banda específico [20]. Por su parte, el bloqueo está dado por la respuesta del receptor con la presencia de una señal interferente, que pueda surgir o aparecer cerca del mismo y pueda saturarlo de acuerdo con su sensibilidad y respuesta ante señales no deseadas. En este tipo de interferencia se considera un valor de atenuación (en dB) en la señal interferente, dicho valor se puede establecer como una función dependiente de la frecuencia de operación de los servicios interferentes y los afectados o algunas veces como un único valor constante, de acuerdo con las ecuaciones 2 y 3 [5].

$$I = P_i + G_t + G_r - L_b - FDR - A_t \quad (2),$$

$$A_t = \text{Bloqueo}_{\text{maxseñalint}} + \text{Sens}_{rvi} + \frac{C}{N+1} \quad (3),$$

donde,  $\text{Bloqueo}_{\text{maxseñalint}}$  (en dBm) es el valor de atenuación estipulado para el LMS,  $\text{Sens}_{rvi}$  (en dBm) corresponde a la sensibilidad del receptor y  $\frac{C}{N+1}$  (en dB) es la relación portadora a interferencia más ruido.

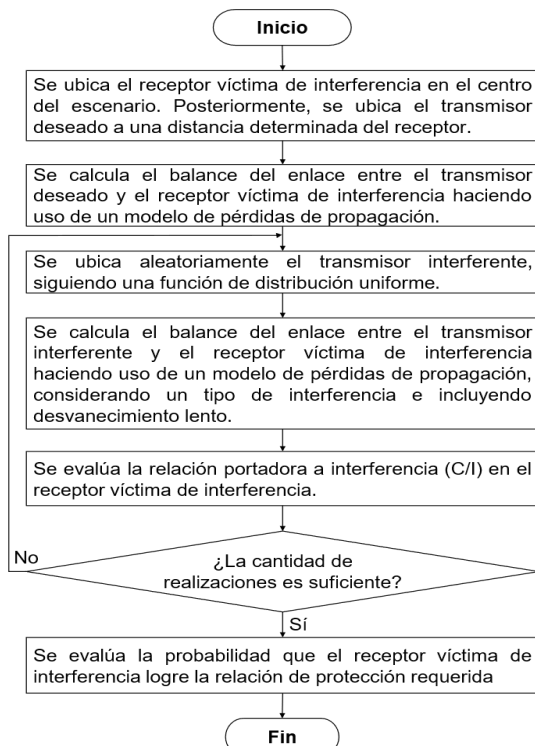
También se analiza el efecto del desvanecimiento lento y valores límites de parámetros que garanticen el mayor aislamiento de los servicios frente a la interferencia que se esté analizando, para calcular la relación entre la potencia de la señal deseada y la potencia de la señal interferente o relación Portadora a Interferencia (CIR o C/I, *Carrier to Interference Ratio*), con la cual se mide la calidad de la señal en el LMS analizado. Este proceso se repite un número determinado de veces, alcanzando un número considerable de realizaciones o iteraciones, de tal modo que se puede determinar la tendencia estadística, entendida como el comportamiento estadístico que tiene cierto conjunto de datos, para pronosticar de manera muy precisa el comportamiento radioeléctrico en la recepción del LMS simulado en un escenario determinado. Esta tendencia implica la evaluación e identificación de los datos obtenidos, en cada una de las iteraciones de la simulación para realizar predicciones basadas en el patrón de los datos, a partir del método numérico considerado. Lo anterior permite estimar la probabilidad de presentar interferencia en el receptor y encontrar

la distancia de separación física mínima requerida, capaz de satisfacer la relación de protección del servicio (C/I). Lo anterior se puede apreciar en el diagrama de flujo de la Figura 2. De igual manera, para la aplicación del método Monte Carlo en el LMS se requiere la consideración de parámetros máximos o mínimos de configuración del LMS, con los cuales se garantice la operación del servicio sin la presencia de señales interferentes, estos parámetros se encuentran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Características del servicio simulado.**  
**Table 1. Characteristics of the simulated service.**

Parámetro	Valor
Potencia Tx	50 W (47 dBm)
Ganancia Tx / Rx	10 dBi / 3 dBi
Altura antena Tx / Rx	200 m / 10 m
Relación de protección (C/I)	12 dB
Frecuencia	138 MHz y 470 MHz
Desviación estándar desvanecimiento lento	8 dB para VHF y 10 dB para UHF
Distribución de probabilidad	Uniforme
Número de iteraciones	100000
Tamaño del escenario	240 Km de largo por 240 Km de ancho
Distancia separación entre el Tx deseado y Rx	20 Km
Número de interferentes	1
Sensibilidad del receptor	-120 dBm
Respuesta al bloqueo	-25 dBm
Máscaras espectrales	Tipo B, D y E
Tipos interferencia	Cocanal, Canal Adyacente, Bloqueo
Modelos de pérdidas de propagación	Espacio libre, Egli, dos rayos, pendiente única y Okumura Hata rural
Probabilidad máxima de interferencia	10%

**Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo Monte Carlo simulado.**  
**Figure 2. Flowchart of the simulated Monte Carlo algorithm.**



Fuente: [5].

En el caso de sistemas de comunicaciones en frecuencias de 138 MHz a 470 MHz proveyendo servicios más allá del horizonte radioeléctrico y donde no existe un requerimiento operacional o una restricción para el uso de frecuencias comunes por diferentes sistemas de comunicaciones, la separación geográfica entre sistemas operando en la misma frecuencia debe ser no menor a la requerida para lograr una relación de protección (C/I) igual a 12 dB [21]. Generalmente, para señales analógicas y digitales de banda estrecha se puede utilizar una relación de protección de alrededor de 7 dB, en el servicio se define una relación de protección más exigente, con el fin de analizar el peor de los casos, por lo tanto, se considera un valor de 12 dB, de acuerdo con la Tabla 1. Por otro lado, al considerar el efecto del desvanecimiento lento, este se caracteriza por una distribución Log-normal, donde la media de la distribución se puede estimar mediante métodos determinísticos, mientras que normalmente la desviación estándar se debe obtener mediante una gran cantidad de mediciones efectuadas en escenarios de implementación específicos. Los valores de desviación típicos oscilan entre 3 y 10 dB [21], siendo un valor apropiado de desviación típica de  $\sigma = 8$  para ondas métricas (VHF) y  $\sigma = 10$  para ondas decimétricas (UHF). En escenarios limitados por interferencia, el nivel máximo permitido de señales no deseadas para servicios móviles debe ser menor o igual al 10%, dicho valor se estableció como objetivo para evitar una degradación significativa de la calidad del servicio [20] [21]. Finalmente, en el LMS el valor de referencia de respuesta al bloqueo puede estar dentro de -25 dBm [10]. Los valores de los demás parámetros se toman como referencia de valores estándar y generalizados a nivel práctico y comercial para este tipo de sistemas.

### 2.3. Implementación

Para realizar el análisis del aislamiento mínimo en distancia requerido entre LMS por aplicación del método de Monte Carlo, es importante establecer las características del escenario a implementar en la simulación. Para este caso se tiene un escenario cuya dimensión es de 240 km de largo por 240 Km de ancho, donde se considera un único receptor víctima de interferencia, posicionado en el centro del escenario, un transmisor deseado, situado a una distancia de 20 km del receptor y un único transmisor interferente, el cual está ubicado aleatoriamente siguiendo una distribución de probabilidad uniforme alrededor del receptor víctima

de interferencia. Dado que la ubicación del transmisor interferente se realiza de manera aleatoria, es posible que la distancia entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia sea menor a 5 km, si se cumple dicha condición, se asume un valor de pérdidas de propagación de 90 dB en el cálculo del balance del enlace de la señal interferente.

Se tienen dos herramientas de simulación para el desarrollo del trabajo, Seamcat y Matlab. Seamcat permite simular gran variedad de escenarios de comunicaciones móviles orientados hacia el modelado estadístico de la interferencia, facilitando el estudio y análisis de la compatibilidad electromagnética entre servicios y sistemas, sin embargo, presenta ciertas limitaciones, solamente cuenta con el modelo de propagación de espacio libre, no es posible considerar un escenario con interferencia de canal adyacente debido a la configuración y asignación de valores a ciertos parámetros específicos, como por ejemplo la potencia de transmisión. Además, entrega resultados de probabilidad de interferencia, pero no calcula la distancia de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia, lo cual es necesario para cumplir con el objetivo del trabajo de investigación.

Por lo tanto, el LMS fue simulado empleando la herramienta Matlab, los resultados estadísticos permiten evaluar el cumplimiento de la relación de protección requerida en el receptor, es decir, estimar la probabilidad de interferencia. Esto se logra a partir de la relación C/I y la CDF; partiendo de la probabilidad calculada, se establece la distancia mínima de separación que debe existir entre el receptor y el transmisor interferente para garantizar que no exista interferencia.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de la aplicación del método numérico de Monte Carlo considerando interferencia cocanal, canal adyacente y por bloqueo, tanto el escenario de simulación y el diagrama de flujo considerados previamente, se implementan en Matlab.

#### 3.1. LMS con Interferencia Cocanal

A partir de la simulación realizada, en la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos al aplicar el Método de Monte Carlo, correspondientes a la media de la variable aleatoria C/I, la probabilidad de interferencia en recepción y la distancia promedio de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia para  $f=138$  MHz y  $f=470$  MHz.

Tabla 2. Relación C/I a la frecuencia de 138 MHz.  
Table 2. C/I ratio to the 138 MHz frequency.

Modelo de pérdidas de propagación	Frecuencia (MHz)	Media C/I (dB)	Probabilidad de Interferencia	Distancia (Km)
Espacio libre	138	12.39	0.469	93
	470	12.41	0.479	
Egli	138	24.79	0.129	
	470	24.81	0.158	
Dos rayos	138	24.79	0.129	
	470	24.81	0.158	
Pendiente única ( $n = 3$ y $Lo = 70$ )	138	18.59	0.239	
	470	18.61	0.274	
Pendiente única ( $n = 4$ y $Lo = 100$ )	138	24.79	0.129	
	470	24.81	0.158	
Okumura Hata rural	138	18.49	0.242	
	470	18.5	0.277	

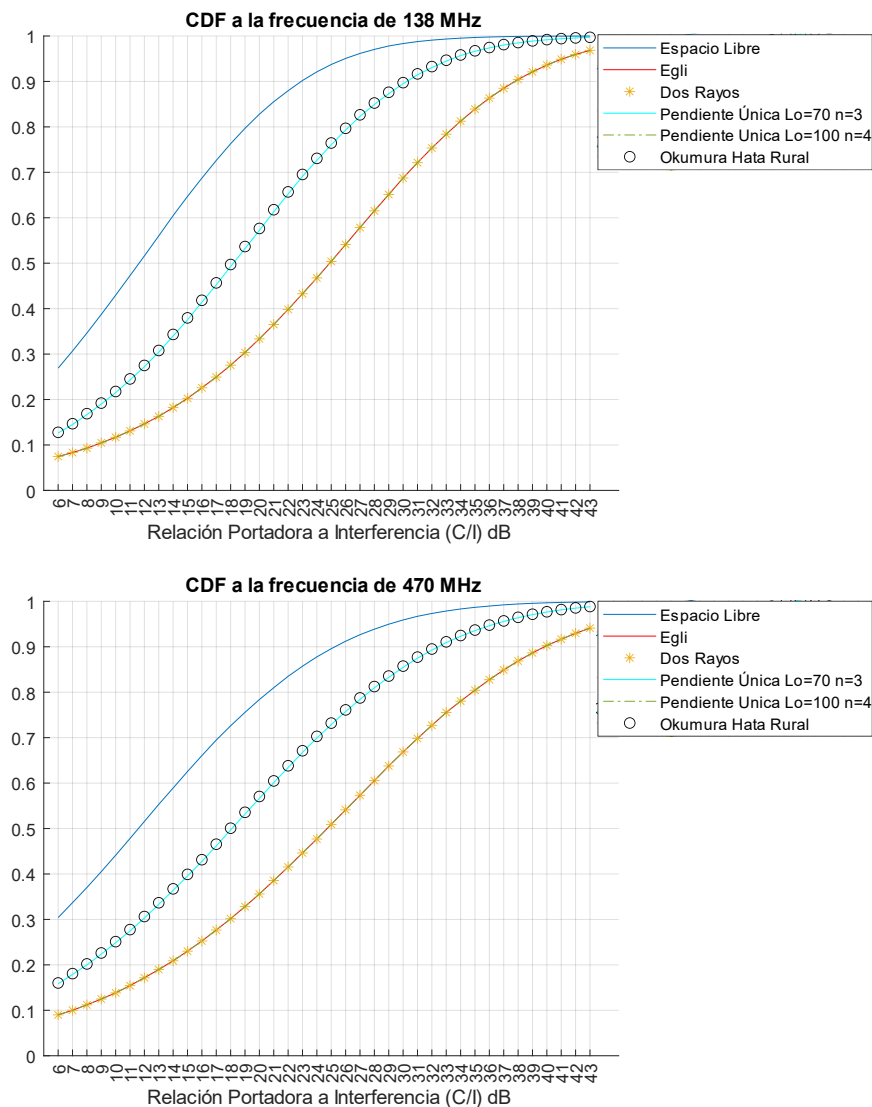
De acuerdo con la Tabla 2, bajo las condiciones iniciales de simulación, es decir, en el escenario cuyas dimensiones son de 240 km de ancho por 240 km de largo, con el receptor ubicado en el centro y la distribución uniforme del interferente, se obtienen diferentes valores de la probabilidad de interferencia para cada modelo de pérdidas de propagación empleado, con lo cual se encuentra una distancia media de



separación espacial entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia de aproximadamente 93 km para VHF y UHF, este valor se encuentra siguiendo el proceso descrito en la Figura 2. Esta distancia está determinada por el posicionamiento aleatorio dentro del escenario del interferente con referencia al receptor en cada una de las realizaciones y el valor promedio calculado al culminar la totalidad de las iteraciones de la simulación.

Por otro lado, en la Figura 3 se visualiza a manera de comparación, el comportamiento de las diferentes CDF de los modelos de propagación y las dos frecuencias empleadas en la simulación. Considerando que el modelo de espacio libre tiene el mayor alcance de señal deseada e interferente, con este se logra la mayor probabilidad de generar interferencia en la recepción con el 47% y 48% para VHF y UHF respectivamente. Seguidamente, con valores aproximados del 24% para VHF y del 28% para UHF de probabilidad que el receptor sufra interferencia perjudicial, se tienen los modelos de pendiente única con  $n = 3$  y  $Lo = 70$  y Okumura Hata rural. Finalmente, los modelos de Egli, dos rayos y pendiente única con  $n = 4$  y  $Lo = 100$  muestran las probabilidades más bajas de interferencia en la recepción, cuyos valores corresponden al 13% para  $f=138$  MHz y al 16% para  $f=470$  MHz. Las diferentes variaciones de las probabilidades obtenidas dependen de las características y parámetros propios de cada modelo considerado, tales como distancia, frecuencia y altura de las antenas.

**Figura 3. Comparación CDF a la frecuencia de 138 MHz y 470 MHz.  
Figure 3. CDF Comparison to the frequency of 138 MHz and 470 MHz.**



Fuente: Esta investigación.

La Tabla 2 muestra que al considerar 93 Km de separación entre el receptor y el interferente, el valor promedio de la probabilidad de alcanzar el valor de C/I requerido es del 13% y 16% para frecuencias de operación de 138 MHz y 470 MHz, respectivamente, lo cual indica que en ninguno de los escenarios del servicio se satisface el criterio mínimo de calidad solicitado del 10% o menos. Por lo tanto, se procede a incrementar el tamaño del escenario de simulación para obtener una distancia de separación mayor, buscando cumplir con el criterio de probabilidad de interferencia definido. Los resultados de la modificación realizada se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Relación C/I a la frecuencia de 138 MHz aumentando el tamaño del escenario de simulación.  
Table 3. C/I ratio to the frequency of 138 MHz and 470 MHz increasing the size of the simulation scenario.

Modelo de pérdidas de propagación	Frecuencia (MHz)	Media C/I (dB)	Probabilidad de Interferencia	Tamaño del escenario	Distancia (Km)
Espacio libre	138	23.84	0.096	900 x 900	344
	470	26.32	0.095	1200 x 1200	460
Egli	138	27.47	0.095	280 x 280	108

	470	28.95	0.1	305 x 305	118
Dos rayos	138	27.47	0.095	280 x 280	108
	470	28.95	0.1	305 x 305	118
Pendiente única (n=3, L <sub>0</sub> =70)	138	25.25	0.098	400 x 400	154
	470	27.57	0.098	480 x 480	185
Pendiente única (n=4, L <sub>0</sub> =100)	138	27.47	0.095	280 x 280	108
	470	28.95	0.1	305 x 305	118
Okumura Hata rural	138	25.1	0.098	400 x 400	154
	470	27.42	0.099	480 x 480	185

De acuerdo a la Tabla 3, es necesario considerar escenarios de dimensiones mayores para alcanzar la probabilidad de interferencia objetivo. Utilizando el modelo de pérdidas de propagación de espacio libre se requiere una distancia de separación media entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia que oscila entre 344 Km para VHF y 460 Km para UHF; una distancia de aislamiento de 154 Km y 185 Km a las frecuencias de 138 MHz y 470 MHz, respectivamente, para los modelos de Okumura Hata rural y pendiente única ( $n = 3$  y  $L_0 = 70$ ) y finalmente para Egli, dos rayos y pendiente única ( $n = 4$  y  $L_0 = 100$ ), una distancia media de 108 Km con  $f=138$  MHz y 118 Km para  $f=470$  MHz. De igual manera, cuando se satisface la probabilidad de interferencia requerida en el receptor, en cada uno de los modelos de pérdidas de propagación, se aprecia un aumento del valor de la C/I, para  $f=138$  MHz estos se encuentran entre 23 dB y 27.5 dB, asimismo, en  $f=470$  MHz dichos valores oscilan entre 26 dB y 29 dB. Desde el punto de vista de cobertura y aislamiento, los valores obtenidos están cerca a parámetros límites de funcionamiento de un LMS, por ello, en una implementación real se esperarían probabilidades de interferencia menores, dado que los niveles de señal interferente se afectarían por las características orográficas del terreno, condiciones atmosféricas y la frecuencia de operación.

### 3.2.LMS con Interferencia de Canal Adyacente

Para el análisis del escenario con señales no deseadas por canal adyacente se aplica el algoritmo definido y un valor de la relación C/I de 12 dB. Sin embargo, se considera el porcentaje de traslape del canal adyacente interferente sobre el receptor víctima de interferencia, el cual afecta el valor de los niveles de potencia total de la señal no deseada en la recepción. Seguidamente se calcula el porcentaje de superposición que el canal adyacente interferente produce sobre el canal deseado, considerando las máscaras de emisión espectral tipo B, D y E, las cuales tienen anchos de banda equivalentes a 25 KHz, 12.5 KHz y 6.25 KHz, respectivamente y cuyos límites de máscara pueden ir desde 0 dBc hasta -67 dBc, dependiendo de su desplazamiento en frecuencia ( $\Delta f$ ) [23]. El traslape o superposición corresponde al nivel de señal interferente captada por el receptor, la cual se reducirá de acuerdo con los valores porcentuales descritos en la Tabla 4. En la Tabla 5 se presentan los resultados considerando la probabilidad de interferencia y la distancia de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia.

Tabla 4. Porcentaje traslape máscaras espectrales.

Table 4. Percentage overlaps spectral masks.

Mascara de Emisión Espectral	% Traslape
Tipo B Primer Canal Adyacente	65
Tipo B Segundo Canal Adyacente	45
Tipo B Tercer Canal Adyacente	30
Tipo B Cuarto Canal Adyacente	15
Tipo D Primer Canal Adyacente	25
Tipo E Primer Canal Adyacente	15

Fuente: Esta investigación.

Tabla 5. Probabilidad de interferencia y distancia de aislamiento considerando interferencia de canal adyacente.

Table 5. Interference probability and isolation distance considering adjacent channel interference.

Modelo de pérdidas de propagación	Frecuencia (MHz)	65% Traslape		30% Traslape		15% Traslape	
		Probabilidad de Interferencia	D (Km)	Probabilidad de Interferencia	D (Km)	Probabilidad de Interferencia	D (Km)
Espacio libre	138	0.098	277	0.098	188	0.097	135
	470	0.098	360	0.096	246	0.099	173
Egli	138	0.098	97	0.094	81	0.095	68
	470	0.096	108	0.095	89	0.099	74
Dos rayos	138	0.098	97	0.094	81	0.095	68
	470	0.096	108	0.095	89	0.099	74
Pendiente única (n=3, L <sub>0</sub> =70)	138	0.097	135	0.097	104	0.097	83
	470	0.097	158	0.096	123	0.095	98
Pendiente única (n=4, L <sub>0</sub> =100)	138	0.098	97	0.094	81	0.095	68
	470	0.096	108	0.095	89	0.099	74
Okumura Hata rural	138	0.098	135	0.098	104	0.098	83
	470	0.099	158	0.098	123	0.096	98

De acuerdo con la Tabla 5, dependiendo del modelo de pérdidas de propagación usado, a medida que el porcentaje de superposición producido por las señales no deseadas sobre el receptor es menor, se puede reducir hasta cierto punto, la dimensión del escenario para satisfacer la relación de protección de 12 dB en la recepción y garantizar una operación del LMS mínima del 90% de las veces. Bajo esta consideración, se determina la distancia de separación espacial necesaria con presencia de señales interferentes por canal adyacente. A manera de comparación con los resultados de interferencia cocanal o 100% de traslape, la principal diferencia es la distancia de separación media entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia. Para el caso de señales no deseadas de carácter cocanal dicha separación física varía entre 108 Km y 460 Km dependiendo de la frecuencia de operación y del modelo de pérdidas de propagación. No obstante, al considerar señales no deseadas por canal adyacente, se obtienen distancias que oscilan entre 68 Km y 97 Km para  $f=138$  MHz y entre 74 Km y 108 Km para  $f=470$  MHz considerando los modelos de Egli, dos rayos y pendiente única (n=4, L<sub>0</sub>=100). Por su parte, para los modelos de Pendiente única (n=3, L<sub>0</sub>=70) y Okumura Hata rural se tienen valores de aislamiento comprendidos entre 83 Km y 135 Km y entre 98 Km y 158 Km para VHF y UHF, respectivamente. Por último, se tiene el modelo de espacio libre, en donde se tienen distancias más grandes, cuyos valores de separación están desde 135 Km hasta 277 Km para  $f=138$  MHz y desde 173 Km y 360 Km para  $f=470$  MHz. Los resultados evidencian la necesidad de considerar distancias más grandes de separación cuando se utilizan frecuencias mayores, ocasionado por el efecto del desvanecimiento lento, el cual es mayor para ondas decimétricas, como se presentó en la Tabla 1. De manera general, el análisis del aislamiento mínimo requerido entre fuentes de radiofrecuencia para LMS depende de los parámetros y variables propios del modelo de pérdidas de propagación y el tipo de señal interferente que se emplee en la simulación, de tal forma que un escenario radioeléctrico con señales no deseadas se puede transformar en uno con niveles bajos de interferencia y viceversa, conllevando a la posibilidad de disminuir o aumentar la distancia de separación entre el receptor y el transmisor interferente. Adicionalmente es importante tener en cuenta que ante el cambio de la frecuencia de operación los resultados varían, dado que el incremento de frecuencia representa un incremento de las pérdidas tanto en la señal deseada como en la interferente.

### 3.3.LMS con Interferencia de por Bloqueo

La implementación de la simulación de Monte Carlo en un sistema con interferencia por bloqueo o desensibilización se lleva a cabo teniendo en cuenta la sensibilidad del receptor víctima de interferencia tanto en  $f=138$  MHz y en  $f=470$  MHz, un valor de atenuación definido de acuerdo con las ecuaciones 2 y 3 y el algoritmo usado previamente con interferencia cocanal y de canal adyacente. La simulación se realiza

con una distancia de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima de interferencia de 93 Km, los resultados se muestran en la Tabla 6.

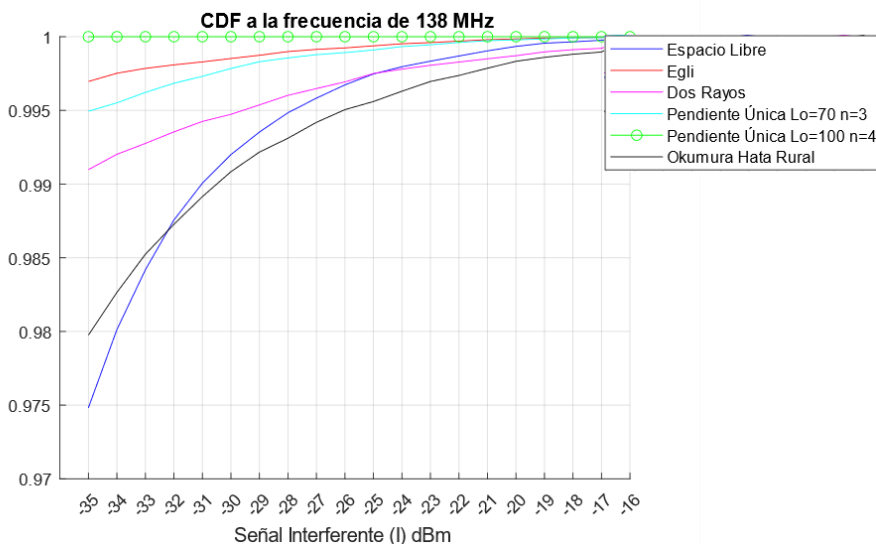
**Tabla 6. Relación C/I por bloqueo a las frecuencias de 138 MHz y 470 MHz.**  
**Table 6. C/I ratio by blocking at 138 MHz and 470 MHz frequencies.**

Modelo de pérdidas de propagación	Frecuencia (MHz)	Media (C/I)	Probabilidad de Interferencia
Espacio libre	138	116.38	0
	470	116.46	
Egli	138	128.77	
	470	128.89	
Dos rayos	138	128.77	
	470	128.89	
Pendiente única (n=3, L <sub>0</sub> =70)	138	122.58	
	470	122.68	
Pendiente única (n=4, L <sub>0</sub> =100)	138	128.77	
	470	128.89	
Okumura Hata rural	138	122.47	
	470	122.57	

La Tabla 6 muestra un LMS donde no se presenta interferencia por bloqueo (considerando la relación C/I) en el receptor para ninguno de los modelos de pérdidas de propagación empleados. Esto se debe a la atenuación de la señal interferente, de acuerdo con la sensibilidad del receptor. Por lo tanto, se realiza una modificación en los parámetros de simulación, analizando únicamente el nivel de señal interferente en la recepción, en donde, si dicho valor es mayor al valor de respuesta al bloqueo definido por parte del receptor, se presenta saturación. En la Figura 4 se muestra una aproximación de las CDF de la señal interferente para los modelos de pérdidas de propagación considerados con interferencia por bloqueo operando a la frecuencia de 138 MHz.

Considerando el valor de respuesta al bloqueo del receptor de -25 dBm, el comportamiento de las curvas, permite determinar que los modelos de pérdidas de propagación empleados cumplen con el mínimo criterio de funcionamiento requerido, presentando señales perjudiciales en la recepción como máximo en un 10% de los casos. En todos los modelos se tiene un porcentaje de interferencia no superior al 1%. El único modelo cuyo porcentaje de señales no deseadas es cero, es el modelo de pendiente única (n=4, L<sub>0</sub>=100). Por lo anterior, se reduce el tamaño del escenario para alcanzar el parámetro límite de operación, es decir, un funcionamiento mayor o igual al 90% de los casos. La reducción de la dimensión del escenario se realiza tomando como referencia el menor tamaño posible del LMS simulado, considerando 20 Km de separación entre el transmisor deseado y el receptor, los resultados de la simulación se encuentran en la Tabla 7.

Figura 4. Comparación CDF de la señal interferente a la frecuencia de 138 MHz.  
 Figure 4. CDF comparison of the interfering signal at the 138 MHz frequency.



Fuente: Esta investigación.

Tabla 7. Señal Interferente por bloqueo a las frecuencias de 138 MHz y 470 MHz reduciendo el tamaño del escenario.  
 Table 7. Interfering signal by blocking at 138 MHz and 470 MHz frequencies by reducing the stage size.

Modelo de pérdidas de propagación	Frecuencia (MHz)	Media I (dBm)	Probabilidad de Interferencia	Distancia (Km)
Espacio libre	138	-38.51	0.065	15.72
	470	-49.15	0.012	
Egli	138	-49.55	0.02	
	470	-60.21	0.004	
Dos rayos	138	-40.45	0.091	
	470	-40.47	0.112	
Pendiente única (n=3, L <sub>0</sub> =70)	138	-44.85	0.027	
	470	-44.87	0.044	
Pendiente única (n=4, L <sub>0</sub> =100)	138	-86.47	0	
	470	-86.49	0	
Okumura Hata rural	138	-35.99	0.13	
	470	-42.48	0.067	

Al considerar el tamaño mínimo del escenario de simulación se tiene una distancia de separación física aproximada de 16 Km entre el receptor y el interferente, tal y como se puede visualizar en la Tabla 7. Para este caso, los únicos modelos de pérdidas de propagación que no satisfacen la probabilidad de interferencia inferiores al 10% en recepción son dos rayos en UHF con un porcentaje del 11.2 %, ocasionado por el efecto del desvanecimiento lento, y Okumura Hata rural en VHF con 13% en donde, a mayor frecuencia de operación, mayores pérdidas y menor potencia de la señal interferente. Lo mismo sucede con los modelos que dependen de la frecuencia de operación a nivel matemático, en donde, se presenta una reducción en la probabilidad de interferencia en  $f=470$  MHz respecto a  $f=138$  MHz.

#### 4. CONCLUSIONES

- En un LMS el valor del aislamiento mínimo requerido entre el transmisor interferente y el receptor, que garantice el criterio de calidad solicitado, varía dependiendo del modelo de pérdidas de propagación

empleado, la frecuencia de operación y el tipo de interferencia percibida en la recepción. En un LMS que opere en la banda de VHF y UHF, analizando interferencia cocanal usando los modelos de Egli, dos rayos y pendiente única ( $n = 4$  y  $Lo = 100$ ), se presentan los menores valores de señal interferente en la recepción, con distancias de separación de 108 Km para VHF y 118 Km para UHF. Por lo contrario, y representando el peor de los casos, al utilizar el modelo de espacio libre se tienen distancias superiores a 344 Km. Al considerar interferencia por canal adyacente se obtienen las menores distancias de separación espacial de 68 Km en VHF y 74 Km en UHF con los modelos de Egli, dos rayos y pendiente única ( $n = 4$  y  $Lo = 100$ ). A su vez, con espacio libre se presenta la mayor distancia requerida, la cual es de 135 Km para  $f=138$  MHz y 172 Km para  $f=470$  MHz. Finalmente, con interferencia por bloqueo, es necesario considerar una distancia de 16 Km con la cual se garantizan probabilidades de interferencia menores al 10% en prácticamente todos los escenarios simulados.

- En el análisis del LMS empleando el Método de Monte Carlo, cuando se utilizaron los modelos de pérdidas de propagación de dos rayos, pendiente única con  $n = 4$  y  $Lo = 100$  y Egli, se obtuvieron valores de probabilidad de interferencia, similares entre sí en las diferentes frecuencias y tamaños del escenario. Lo mismo ocurre con los modelos de propagación de pendiente única con  $n = 3$  y  $Lo = 70$  y Okumura Hata rural, aunque estos presentan una mayor probabilidad de interferencia. Ante el cambio de la frecuencia de 138 MHz a 470 MHz, los resultados varían, dado que el aumento de dicho parámetro representa un incremento de las pérdidas tanto en la señal deseada como en la interferente.
- En la simulación de un LMS, el tamaño del escenario que satisface la probabilidad de interferencia objetivo depende directamente de las características y parámetros propios de cada modelo de pérdida de propagación considerado, por lo tanto se debe elegir adecuadamente un modelo que garantice una correcta operación del LMS en diversos escenarios de funcionamiento, para facilitar posteriormente la implementación en un escenario real, basado en los resultados de probabilidades de interferencia y distancias mínimas de separación.
- En un LMS el análisis del aislamiento mínimo requerido entre fuentes de radiofrecuencia, se realiza considerando únicamente la interferencia cocanal, por constituirse como el peor de los casos en cuanto a señales no deseadas presentes en recepción, sin embargo, al considerar que el receptor también puede escuchar señales perjudiciales por canal adyacente y por bloqueo, es necesario tener en cuenta las características propias de cada tipo de interferencia y su efecto en el funcionamiento del escenario radioeléctrico simulado, para establecer los parámetros mínimos de operación y desempeño del servicio, específicamente la distancia de separación espacial que garantice el criterio de calidad requerido.
- El porcentaje de traslape o superposición que la señal interferente ocasione sobre la señal deseada en un LMS, es un factor a tener en cuenta para establecer el valor de distancia de separación física mínima requerida entre estaciones, ya que a mayor traslape se tiene un menor valor de C/I y una distancia más grande. Caso opuesto, a menor superposición de las señales, se obtiene un valor de relación C/I mayor y, por ende, una distancia más reducida. Esto se evidencia en el escenario con interferencia cocanal, donde se presenta un traslape total, requiriendo una mayor distancia de separación espacial entre receptor y transmisor interferente en cada uno de los modelos de propagación empleados para satisfacer los criterios de calidad definidos en el servicio simulado.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Agencia Nacional del Espectro, Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico Título I: Fundamentos de gestión nacional del Espectro Radioeléctrico. Colombia, República de Colombia – Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y Agencia Nacional del Espectro, 2012, pp 1 – 189.
- [2] R. A. Zambrano Segura, C. M. Hernández Bonilla, V. M. Quintero Flórez, P. E. Jojoa Gómez, M. L. Vargas y D. F. Galvis, *Recomendaciones sobre parámetros técnicos esenciales de operación y análisis de interferencia para sistemas de comunicaciones VHF en Colombia*. Colombia, Universidad del Cauca, 2021, pp 1 – 40.

- [3] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Agencia Nacional del Espectro, *Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico, Título VIII: Mediciones del Factor de Utilización y de la Eficiencia en el Uso del Espectro Radioeléctrico*. Colombia, República de Colombia – Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y Agencia Nacional del Espectro, 2012, pp 1 – 184.
- [4] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Agencia Nacional del Espectro, *Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico, Título II: Ingeniería del Espectro Radioeléctrico*. Colombia, República de Colombia – Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y Agencia Nacional del Espectro, 2012, pp 1 – 259.
- [5] International Telecommunication Union (2017) Report SM.2028-2: Monte Carlo simulation Methodology for the use in Sharing and Compatibility Studies between Different Radio Services or Systems [Internet], Geneva, Disponible desde <<https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2028>> [Acceso Octubre de 2021].
- [6] International Telecommunication Union (2003) Recommendation ITU-R M.1634: Interference Protection of Terrestrial Mobile Service Systems using Monte Carlo simulation with Application to Frequency Sharing [Internet], Disponible desde: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1634-0-200306-I>> [Acceso Marzo 2023].
- [7] International Telecommunication Union (1997) Recommendation ITU-R SM.1271-0: Efficient Spectrum Utilization Using Probabilistic Methods [Internet], Disponible desde: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1271-0-199710-I/>> [Acceso Diciembre de 2021]. 10 - 7
- [8] International Telecommunication Union (2007) Recommendation ITU-R SM.337-6: Frequency and distance separations [Internet], Disponible desde: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.337-6-200810-I>> [Acceso Octubre de 2021].
- [9] Electronic Communications Committee, *ECC Report 252 Seamcat Handbook Edition 2*, Denmark, Electronic Communications Committee, 2016, pp 26 .106.
- [10] European Radiocommunications Committee, European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (1999) ERC Report 101: A Comparison of the Minimum Coupling Loss Method, Enhanced Minimum Coupling Loss Method, and the Monte-Carlo simulation [Internet], Menton, Disponible desde: <<https://docdb.cept.org/document/668>> [Acceso Febrero de 2022].
- [11] W.-L. Jin and W. W. Recker, *Monte Carlo Simulation Model of Intervehicle Communication*, Estados Unidos, Universidad de California, 2007, pp 3 – 6.
- [12] S. T. Girma, D. B. O. Konditi and C. Maina, *Frequency re-use distance calculation in cellular systems based on Monte-Carlo simulation*, Kenia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto de Ciencia Básica, Tecnología e Innovación, Universidad Pan Africana, 2019, pp 13 – 16.
- [13] H.-K. Son and C.-Y. Kim, *Derivation of Probability Density Function of Signal-to- Interference-Plus- Noise Ratio for the MS-to-MS (Mobile Stations) Interference Analysis*, República de Corea, Instituto de Investigación de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Nacional Kyungpook, República de Corea, 2013, pp 2 – 6.
- [14] R. L. Freeman, *Radio System Design for Telecommunications*, USA, John Wiley & Sons Inc, 2007, pp 503 -555.
- [15] European Radiocommunications Committee, European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (2007) ERC Report 104: Compatibility between Mobile Radio Systems operating in the range 450-470MHz and Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T) System operating in UHF TV Channel 21 (470-478MHz) [Internet], Amstelveen – Países Bajos, Disponible desde: <https://docdb.cept.org/document/212> [Acceso Febrero de 2022].
- [16] J. M. Rábanos Hernando, *Transmisión por Radio*. España, Editorial Centro de Estudios Ramón Aceres S.A, 1993, pp 489 – 641.
- [17] J. Pahl, *Interference Analysis. Modelling Radio Systems for Spectrum Management*. United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd, 2016, pp 43 – 514.



- [18] J. Aguirre Barrera, S. Aguirre Barrera (2020) Metodologías para el desarrollo de Proyectos [Internet], Bogotá, Disponible desde: <<https://repository.unicatolica.edu.co/handle/20.500.12237/2037>> [Acceso Noviembre de 2021].
- [19] International Telecommunication Union (1997) Report ITU-R M.687-2: International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) [Internet], Disponible desde: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-M.687-2-199702-I>> [Acceso Febrero de 2022].
- [20] International Telecommunication Union, *Handbook on National Spectrum Management*, Switzerland, International Telecommunication Union, 2015, pp 4 -102.
- [21] International Telecommunication Union (1986) Report ITU-R M.358-5: Protection Ratios and Minimum Field Strengths Required in the Mobile Services [Internet], Disponible desde: <<https://www.itu.int/pub/R-REP-M.358-5-1986>> [Acceso Noviembre de 2021]. 8 – 12.
- [22] International Telecommunication Union (2007) Recommendation ITU-R P.1057-5: Probability Distributions relevant to Radiowave Propagation Modelling [Internet], Geneva, Disponible desde: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1057-7-202208-I>> [Acceso Marzo de 2022]. 17 – 16.
- [23] Certified Wireless Network Professionals, *Spectral Masks and Interference* [Internet], Disponible desde: <<https://www.cwnp.com/spectral-masks-and-interference>>. [Acceso Febrero de 2022].