

MECANISMO DE CÁLCULO DE EFICIENCIA TÉCNICA EN EL USO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN SISTEMAS LICENCIADOS DE COMUNICACIONES PUNTO A MULTIPUNTO EN LA ANE

(Trabajo de Grado para optar por el título de Magister en Telecomunicaciones y
Regulación TIC)

ANTONIO JOSÉ ÁLVAREZ PERALTA

Director:

Ing. Diego Fernando Urbano Chaves, MSc

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES Y REGULACIÓN TIC
BOGOTÁ, 2018

A mi familia

Por el amor, cariño y apoyo incondicional
que me han brindado durante toda mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al programa para la excelencia en Gobierno electrónico del Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones por haberme brindado la oportunidad de cursar esta Maestría, así como a la directora de la Agencia Nacional del Espectro, la Doctora Martha Suarez y al director de la Maestría en Telecomunicaciones y Regulación TIC, el Ingeniero Carlos Enrique Montenegro, por brindarme su apoyo en los trámites requeridos por el programa en mención.

De igual forma quiero extender mis agradecimientos al Ingeniero Diego Fernando Urbano Chaves, por su apoyo técnico en la consecución de cada uno de los objetivos planteados en el presente trabajo de grado, así como a los directivos y docentes de la Universidad Santo Tomás por su orientación metodológica.

Por último, agradezco a los Ingenieros Mauricio Hernandez y Jose Francisco Lozano quienes, con su amistad y conocimiento en los procesos de gestión del espectro, hicieron posible el desarrollo del presente trabajo.

TABLA CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	V
LISTA DE FIGURAS	VI
ACRÓNIMOS.....	VIII
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN	2
1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO	4
1.1 OBJETIVOS.....	4
1.1.1 Objetivo General	4
1.1.2 Objetivos Específicos.....	4
1.2 ALCANCE	5
2 ADMINISTRACIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO (ER)	6
2.1 ER.....	6
2.2 GESTIÓN DEL ER	7
2.2.1 Fines y Objetivos de la Gestión del ER	8
2.3 ASIGNACIÓN DEL ER	9
2.3.1 Análisis de Interferencia.....	12
2.3.2 Procesos de Selección Objetiva (PSO)	13
2.3.3 Base de datos de Espectro	14
2.4 EFICIENCIA EN EL USO DEL ER (EUE).....	15
2.4.1 Aplicaciones del Uso del ER	17
2.4.2 Cálculo del Uso del ER	18
2.4.3 Cálculo de EUE.....	22
2.4.4 Experiencias Internacionales	23

2.4.4.1	Brasil	23
2.4.4.2	Estados Unidos de América.....	25
2.4.4.3	India	30
2.4.4.4	México	31
2.4.4.5	Reino Unido.....	33
2.4.4.6	Unión Europea.....	33
2.4.4.7	Resumen	34
3	MECANISMO DE CÁLCULO DE EUE EN SISTEMAS PMP	38
3.1	INFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS PMP EN EL SGE	38
3.1.1	Banda 138 - 174 MHz	42
3.1.2	Banda 440 - 470 MHz	44
3.1.3	Banda de 800 MHz	46
3.1.4	Información técnica disponible en el SGE	47
3.2	PROPUESTA DE MECANISMO DE CÁLCULO DE EUE EN SISTEMAS PMP.....	49
3.2.1	Características de estación base receptora.....	54
3.2.2	Relación de protección.....	56
3.2.3	Pérdidas de propagación	56
3.2.4	FDR	58
3.2.5	Datos necesarios para la aplicación de la propuesta.....	64
4	DETERMINACIÓN DE LA EUE EN SISTEMAS PMP ASIGNADOS EN COLOMBIA.....	66
4.1	ÁREA GEOGRÁFICA DE MUESTREO	66
4.2	PORCIÓN DE ESPECTRO DE MUESTREO	67
4.3	APLICACIÓN DEL MECANISMO DE CÁLCULO PROPUESTO	68
4.3.1	EUE en la banda de 138 - 174 MHz	68

4.3.2	EUE en la banda de 440 - 470 MHz	70
4.3.3	EUE en la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz	71
4.3.4	Descripción de los resultados	73
5	PUBLICACIÓN DE EUE EN SISTEMAS PMP ASIGNADOS EN COLOMBIA	79
5.1	ESTRATEGIA DE GOBIERNO EN LÍNEA (GEL)	79
5.1.1	TIC para Gobierno Abierto	81
5.2	DATOS ABIERTOS	82
5.2.1	Esquema de Gobierno de los Datos	82
5.2.2	Catálogo de Datos Abiertos	85
5.2.3	Aplicación de Datos Abiertos	87
6	CONCLUSIONES	90
6.1	TRABAJOS FUTUROS	93
ANEXO A. FORMATO DE PSO PARA SOLICITUDES EN LAS BANDAS HF, VHF Y UHF		94
ANEXO B. EJEMPLO DE UN CCTR EXTRAÍDO DEL SGE		96
ANEXO C. PROCEDIMIENTO PARA ACTUALIZAR EL CONJUNTO DE DATOS DE EUE DE LOS SISTEMAS PMP EN EL PORTAL DE DATOS ABIERTOS DEL ESTADO		97
REFERENCIAS		103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Consideraciones mundiales para el cálculo de EUE.	36
Tabla 2. Canalizaciones dúplex del plan de banda 138 - 174 MHz.	43
Tabla 3. Canalizaciones simplex del plan de banda 138 - 174 MHz.....	43
Tabla 4. Plan de banda 440 - 470 MHz.....	45
Tabla 5. Canalizaciones banda de 800 MHz.	46
Tabla 6. Lista de datos del SGE y su relevancia para la propuesta de mecanismo de cálculo de EUE.	48
Tabla 7. Información técnica de los receptores en las bandas de 138 - 174 MHz y 440 - 470 MHz funcionando con anchos de banda de 12.5 kHz.	54
Tabla 8. Características técnicas de la estación receptora de referencia de los sistemas PMP.....	55
Tabla 9. Mascara de emisión establecida en el CFR para los transmisores de sistemas PMP que funcionan en las bandas de 150 - 174 MHz y 421 - 512 MHz.	60
Tabla 10. Máscara de selectividad del receptor típica de los sistemas PMP en Colombia.	61
Tabla 11. Valor de FDR típico de los sistemas PMP en bandas VHF y UHF.	62
Tabla 12. Valores de FDR para cálculos de interferencia cocanal, de 1er canal adyacente y 2do canal adyacente entre sistemas PMP en bandas VHF y UHF.....	64
Tabla 13. Parámetros necesarios para el cálculo de EUE de sistemas licenciados PMP en Colombia.	64
Tabla 14. Coordenadas que limitan el territorio colombiano.....	67
Tabla 15. Divisiones del espectro útil de las bandas de los sistemas PMP.....	68
Tabla 16. Marco regulatorio de GEL.	79
Tabla 17. Información del Conjunto de Datos de EUE para sistemas PMP.....	86
Tabla 18 Distribución de los datos de EUE cargados en el portal https://www.datos.gov.co/	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Formulario de información general de las estaciones PMP en el SGE.....	39
Figura 2. Formulario de información de frecuencias de las estaciones PMP en el SGE...	40
Figura 3. Formulario de información de posición de las estaciones PMP en el SGE.....	41
Figura 4. Formulario de información de antena de las estaciones PMP en el SGE.....	42
Figura 5. Plan de banda 138 - 174 MHz.....	44
Figura 6. Plan de banda 440 - 470 MHz.....	45
Figura 7. Errores de asignación en la banda de 440 - 470 MHz.....	47
Figura 8. Formulario de cálculo del FDR en el software MSAM FDR.	59
Figura 9. Máscara de emisión típica del transmisor de un sistema PMP en bandas VHF y UHF.	60
Figura 10. Curva de selectividad típica del receptor de un sistema PMP en bandas VHF y UHF.	61
Figura 11. Curva típica de FDR con respecto a la separación entre frecuencias de transmisión y recepción de los sistemas PMP en bandas VHF y UHF.....	63
Figura 12. EUE en la banda de 138 - 174 MHz.....	69
Figura 13. EUE en la banda de 440 - 470 MHz.....	70
Figura 14. EUE en la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz.	72
Figura 15. Distribución de permisos de uso del espectro de las estaciones base de los sistemas PMP en Colombia.	73
Figura 16. EUE de los sistemas PMP en la banda de 138 - 174 MHz en ciudades principales de Colombia.	74
Figura 17. EUE de los sistemas PMP en la banda de 440 - 470 MHz en ciudades principales de Colombia.	75
Figura 18. EUE de los sistemas PMP en la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz en ciudades principales de Colombia.	76
Figura 19. Histograma de valores de EUE en la banda de 138 - 174 MHz.....	77
Figura 20. Histograma de valores de EUE en la banda de 440 - 470 MHz.....	78
Figura 21. Histograma de valores de EUE en la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz.	78

Figura 22. Panel principal de la herramienta de cálculo de EUE en sistemas PMP.	84
Figura 23. Panel de DatosVHF en la herramienta de cálculo de EUE en sistemas PMP.	85
Figura 24. Formato de la información de EUE para sistemas PMP dentro del archivo digital kml cargado en el portal https://www.datos.gov.co/	87
Figura 25. Aplicación de datos abiertos sobre EUE en sistemas PMP.	89
Figura 26. Formato de PSO para solicitudes en las Bandas HF, VHF y UHF (1).	94
Figura 27. Formato de PSO para solicitudes en las Bandas HF, VHF y UHF (2).	94
Figura 28. Formato de PSO para solicitudes en las Bandas HF, VHF y UHF (3).	95
Figura 29. Formato de PSO para solicitudes en las Bandas HF, VHF y UHF (4).	95
Figura 30. Ejemplo de CCTR de red con un sistema PMP extraído del SGE.	96
Figura 31. Ingreso al portal de datos abiertos del Estado.	97
Figura 32. Ingreso al Conjunto de Datos dentro del portal de datos abiertos del Estado..	98
Figura 33. Botón de editar Conjunto de Datos dentro del portal de datos abiertos del Estado.	98
Figura 34. Botón de añadir datos dentro del portal de datos abiertos del Estado.....	99
Figura 35. Botón de reemplazar Conjunto de Datos dentro del portal de datos abiertos del Estado.	99
Figura 36. Botón de abrir ventana de selección de archivo digital de datos dentro del portal de datos abiertos del Estado.....	100
Figura 37. Selección del archivo digital de datos en el portal de datos abiertos del Estado.	100
Figura 38. Botón de guardar datos cargados en el portal de datos abiertos del Estado.	101
Figura 39. Botón actualizar Conjunto de Datos en el portal de datos abiertos del Estado.	101
Figura 40. Botón de regresar al Conjunto de Datos actualizado en el portal de datos abiertos del Estado.....	102

ACRÓNIMOS

ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicaciones de Brasil (por sus siglas en portugués)
ANE	Agencia Nacional del Espectro
CCTR	Cuadro de Características Técnicas de Red
CE	Comisión Europea
CFR	Código de Regulación Federal de USA (por sus siglas en inglés)
CNABF	Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias
CSMAC	Comité Asesor de Gestión del Espectro del Comercio de la NTIA (por sus siglas en inglés)
ER	Espectro Radioeléctrico
EUE	Eficiencia en el Uso del Espectro radioeléctrico
FCC	Comisión Federal de Comunicaciones de USA (por sus siglas en inglés)
FDR	Rechazo Dependiente de la Frecuencia (por sus siglas en inglés)
GEL	Gobierno en Línea
HF	Frecuencia Alta (por sus siglas en inglés)
IFT	Instituto Federal de Telecomunicaciones de México
KML	Lenguaje de Marcas Keyhole (por sus siglas en inglés)
LFTyR	Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión de México
LSA	Acceso Compartido bajo Licencia (por sus siglas en inglés)
IMT	Telecomunicaciones Móviles Internacionales (por sus siglas en inglés)

MINTIC	Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia
MSAM	Modelos de Análisis de Espectro por Microcomputadora de la NTIA (por sus siglas en inglés)
NTIA	Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información de USA (por sus siglas en inglés)
OFCOM	Oficina de Comunicaciones del Reino Unido (por sus siglas en inglés)
OFR	Rechazo Fuera de Frecuencia (por sus siglas en inglés)
OTR	Rechazo En Sintonía (por sus siglas en inglés)
PCS	Servicio de Comunicación Personal (por sus siglas en inglés)
PMP	Punto a Multipunto
PP	Punto a Punto
PSO	Proceso de Selección Objetiva
RR	Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT
SGE	Sistema de Gestión de Espectro
TRIA	Autoridad Regulatoria de Telecomunicaciones de India (por sus siglas en inglés)
TVWS	Espacios en Blanco de Televisión (por sus siglas en inglés)
UHF	Frecuencia Ultra Alta (por sus siglas en inglés)
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
USA	Estados Unidos de América (por sus siglas en inglés)
UWB	Banda Ultra Ancha (por sus siglas en inglés)

VBA Visual Basic para Aplicaciones (por sus siglas en inglés)

VHF Frecuencia Muy Alta (por sus siglas en inglés)

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como finalidad elaborar la propuesta de un mecanismo de cálculo de la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico de los sistemas de comunicaciones punto a multipunto (PMP) licenciados que pueda ser aplicado por la Agencia Nacional del Espectro (ANE). Esta propuesta está fundamentada en las recomendaciones expedidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en materia de eficiencia en el uso del espectro, no obstante, dado que el escenario colombiano tiene sus particularidades, se llevó a cabo un análisis de las políticas nacionales de gestión del espectro con el fin de que el mecanismo de cálculo fuera adecuado para la ANE. El mecanismo propuesto fue aplicado y los resultados publicados en una aplicación de datos abiertos en el marco de la estrategia de Gobierno en Línea (GEL) del estado colombiano.

Palabras clave: Estrategia de GEL, eficiencia en el uso del espectro, sistemas de comunicaciones Punto a Multipunto (PMP), ANE, UIT.

ABSTRACT

The purpose of this work is to prepare a proposal calculation mechanism of efficiency in the use of the radio spectrum licensed point-to-multipoint (PMP) communications systems that can be applied by the National Spectrum Agency (ANE). This proposal is based on the recommendations issued by the International Telecommunications Union (ITU) in terms of efficiency in the use of radio spectrum, however, because the Colombian scenario has its own peculiarities, an analysis of national spectrum management policies was made in order to make the calculation mechanism appropriate for the ANE. The proposed mechanism was applied and the results has been published in an open data web application according to guidelines of the “Gobierno En Línea (GEL)” strategy of Colombian government.

Keywords: GEL strategy, efficiency in the use of the radio spectrum, point-to-multipoint (PMP) communications systems, ANE, ITU.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado se refiere al tema de la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico (EUE), que se puede definir como la relación de beneficio obtenido entre la información que se logra transmitir en un sistema de radiocomunicaciones y el grado de uso del recurso de espectro. Sin embargo, el beneficio puede llegar a ser un concepto muy abstracto que va a depender del propósito y los intereses que llevan a la implementación de un sistema de radiocomunicaciones.

Aun así, la determinación de dicha eficiencia resulta necesaria para los procesos de gestión del espectro. El impacto de los procesos de asignación de permisos de uso del espectro, que implementa un país como administrador de este recurso, necesita ser medido para evaluar si el uso que se le está dando al espectro es el más adecuado y el que mejores beneficios económicos y sociales está dando al país, aún más cuando la demanda de espectro es cada vez mayor y la tecnología avanza a pasos agigantados.

La investigación se desarrolló debido a que actualmente la Agencia Nacional del Espectro (ANE), quien ejerce funciones de asesor técnico del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC) en lo referente a los análisis de las solicitudes de espectro, no cuenta con una métrica que estime el impacto de los procedimientos de asignación de frecuencias que ejecuta para llevar a cabo los análisis de viabilidad de asignación de frecuencias para los sistemas de comunicaciones móviles punto a multipunto (PMP). Es así como se planteó elaborar una propuesta de mecanismo de cálculo de EUE de los sistemas PMP que pueda ser aplicado por la ANE.

En primera medida, la investigación se abordó realizando un estudio internacional sobre las metodologías de cálculo de EUE aplicadas por administraciones de espectro y organismos de regulación internacionales. Como se verá en el desarrollo del documento, a pesar de que es palpable la necesidad de contar con métricas del mencionado parámetro, internacionalmente no existe gran desarrollo de métricas cuantitativas y a cambio la práctica consiste en realizar estudios cualitativos de ocupación como base para la generación de políticas de gestión y así fomentar un uso eficiente del espectro. Sin embargo, si existe un

consenso entre estos organismos internacionales en seguir lo que recomienda la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en esta materia.

Una vez identificadas las formas de estimar el mencionado parámetro de eficiencia, se consideró conveniente analizar las políticas nacionales de gestión del espectro aplicables a los sistemas PMP para poder determinar la información técnica disponible acerca de estos sistemas, esto con el fin de evaluar la viabilidad de aplicación de un mecanismo de cálculo adecuado en el país.

El paso más importante en el trabajo se dio al realizar la propuesta del mecanismo de cálculo de EUE de los sistemas PMP licenciados en Colombia. Sin embargo, posteriormente también se realizó la aplicación de este mecanismo sobre los sistemas que tiene permisos de uso del espectro vigentes para conocer el estado actual de todas las bandas cuyo uso está destinado al funcionamiento de los sistemas PMP. Finalmente, los resultados obtenidos fueron publicados a través de la web mediante mapas de calor.

De esta manera, el trabajo realizado se presentará en este documento a través de 6 capítulos. En el Capítulo 1 se describen los aspectos más importantes del proyecto de grado planteado. En el Capítulo 2 se analiza el marco de referencia y la situación actual de la gestión eficiente del espectro radioeléctrico tanto internacionalmente como nacionalmente. En el Capítulo 3 se desarrolla la propuesta del mecanismo de cálculo de EUE de los sistemas licenciados PMP. En el Capítulo 4 se realiza el cálculo de EUE, a través del mecanismo propuesto para ello, en las tres bandas de frecuencias en las que funciona actualmente los sistemas punto a multipunto en Colombia. En el Capítulo 5 se describe la aplicación de datos abiertos desarrollada para la publicación de los resultados obtenidos, al aplicar la metodología de cálculo propuesta, en el marco de la estrategia de Gobierno en Línea del Estado colombiano. En el Capítulo 6 se presentarán las conclusiones del trabajo realizado.

1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO

En el presente capítulo se describen los aspectos más importantes del proyecto de grado planteado cuyo título es “Mecanismo de cálculo de eficiencia técnica en el uso del espectro radioeléctrico en sistemas licenciados de comunicaciones punto a multipunto en la ANE”. Se menciona el objetivo general, los objetivos específicos y el alcance del proyecto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Proponer un mecanismo para determinar la eficiencia técnica en el uso del espectro radioeléctrico en la Agencia Nacional del Espectro (ANE) a través del análisis de variables de los sistemas licenciados de comunicaciones punto a multipunto (PMP), con el fin de contar con métricas adecuadas para la gestión del espectro y así permitir un mayor desarrollo de las telecomunicaciones del país.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Realizar un estudio del estado del arte sobre métodos de cálculo de eficiencia de espectro aplicados por administraciones de espectro y organismos de regulación internacionales.
- ii. Proponer un mecanismo para el cálculo de la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico basado en parámetros técnicos de los sistemas de comunicaciones PMP contenidos en la base de datos de espectro del Sistema de Gestión de Espectro (SGE).
- iii. Aplicar el mecanismo propuesto para calcular la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico en los sistemas de comunicación PMP actualmente asignados por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las comunicaciones (MINTIC).
- iv. Diseñar e implementar una aplicación de datos abiertos para la publicación del uso eficiente del espectro de los sistemas licenciados de comunicaciones PMP en Colombia.

1.2 ALCANCE

El propósito del proyecto es proponer un mecanismo de cálculo de la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico que pueda ser aplicado en la ANE sobre los sistemas de radiocomunicaciones PMP con permisos de uso otorgados en Colombia. Se evaluarán las diferentes metodologías de cálculo de este parámetro a nivel mundial y se definirá la metodología más viable para el escenario colombiano de acuerdo con la información disponible en la base de datos del SGE. Finalmente, se aplicará el mecanismo propuesto sobre los sistemas de comunicación PMP asignados actualmente en Colombia y se presentaran los resultados a través de una aplicación de datos abiertos para que el público interesado pueda contar con la información disponible en línea.

2 ADMINISTRACIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO (ER)

En el presente capítulo se analiza el marco de referencia y la situación actual de la gestión eficiente del Espectro Radioeléctrico (ER) como recurso indispensable para impulsar el desarrollo del país. En primer lugar, se analizan los procesos llevados a cabo en Colombia para realizar una correcta y eficiente gestión del ER. Seguido a esto, se analiza la definición de eficiencia en el uso del ER (EUE) expuesta por los organismos internacionales de estandarización en el sector de telecomunicaciones.

Finalmente, se analizan las experiencias internacionales de administraciones de espectro y organismos de estandarización acerca de la estimación de la EUE.

2.1 ER

El Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC) define el ER como *“el medio por el cual se transmiten las frecuencias de ondas de radio electromagnéticas que permiten las telecomunicaciones (radio, televisión, Internet, telefonía móvil, televisión digital terrestre, etc.), y son administradas y reguladas por los gobiernos de cada país”* [1].

El artículo 75 de la Constitución Política de Colombia establece que *“El espectro electromagnético es un bien público inenajenable e imprescriptible sujeto a la gestión y control del Estado. Se garantiza la igualdad de oportunidades en el acceso a su uso en los términos que fije la ley. Para garantizar el pluralismo informativo y la competencia, el Estado intervendrá por mandato de la ley para evitar las prácticas monopolísticas en el uso del espectro electromagnético”* [2].

El ER es el recurso sobre el cual se cimientan las telecomunicaciones inalámbricas del país. Este recurso no es infinito y se vuelve muy escaso a medida que más usuarios acceden a él. Por esta razón, en Colombia se creó la Agencia Nacional del Espectro (ANE) que es la encargada de gestionar, planear, vigilar y controlar el espectro radioeléctrico para garantizar el uso adecuado de este recurso [3]. La ANE cumple el papel de asesor del MINTIC, específicamente realiza análisis técnicos de las solitudes de espectro y propone los

parámetros de valoración por el derecho al uso del espectro radioeléctrico y la estructura de contraprestaciones; es en estas funciones en las que se pueden generar mecanismos que promuevan el uso eficiente del espectro.

Las funciones que le son asignadas a la ANE por la ley colombiana la obligan a establecer mecanismos que garanticen el uso adecuado del espectro radioeléctrico [3]. Entre mayor cantidad de operadores de telecomunicaciones tengan acceso al espectro radioeléctrico mayor será el valor recibido por concepto de contraprestaciones económicas que luego serán invertidos en el sector de telecomunicaciones para promover el desarrollo del país.

2.2 GESTIÓN DEL ER

El uso cada vez más frecuente de las tecnologías que se basan en radiocomunicaciones facilita el desarrollo social de los países a través del aprovechamiento de nuevas oportunidades de comunicación y facilidades en el manejo de la información. La materia prima para la implementación de estas tecnologías es el ER, por tal razón, para favorecer el desarrollo de un país es esencial implementar procesos de gestión de este recurso. En ese sentido, la demanda de ER es creciente, por lo que se requiere que se haga un uso eficiente de este recurso con procesos de gestión cada vez más eficaces para lograr su mejor aprovechamiento.

El manual sobre gestión nacional del nacional del espectro de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) menciona que *“Para aprovechar el espectro de manera eficaz, su utilización se debe coordinar y regular mediante los reglamentos nacionales y el Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). La capacidad de cada país para aprovechar plenamente las ventajas que ofrece este recurso depende en gran medida de actividades de gestión del espectro que faciliten la implementación de sistemas de radiocomunicaciones y garanticen que la interferencia sea mínima.”* [4].

La UIT recomienda a los países que ejercen como administradores del espectro, que en sus procesos nacionales de gestión de este recurso consideren el concepto de utilización del espectro, más específicamente la EUE, y la demanda de espectro, adicionalmente,

recomienda que para este fin se utilicen como guías las recomendaciones, informes, reportes y manuales que dicho organismo internacional expide [5].

La gestión eficaz del espectro está relacionada entonces con la implementación de procedimientos y normas a través de los cuales un país controla la forma en la que se utiliza el espectro dentro de su territorio. Estos procedimientos y normas deben favorecer el interés general al momento de distribuir el espectro radioeléctrico entre los usuarios de las radiocomunicaciones para lograr satisfacer las necesidades del país.

En [4] también se menciona que *“Por acuerdo internacional, cada gobierno cuenta con la flexibilidad y autonomía necesarias para la reglamentación de su propio uso del espectro radioeléctrico. Cada administración debe desarrollar sus leyes y la organización necesaria para llevar a cabo las tareas propias de la gestión del espectro”*. De esta manera, Colombia como administrador del ER, ha sentado las bases para la gestión del espectro a través de la creación de la Ley 1341 de 2009, ley del sector de telecomunicaciones en donde se definen los principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones. En esta ley, entre otras cosas, se creó la ANE como una entidad encargada de la gestión y planeación del ER.

En la elaboración de políticas y normas para la gestión del ER se deben tener en cuenta aspectos tecnológicos, políticos, económicos y sociales. Por tal razón, es importante considerar aspectos de los sistemas de telecomunicaciones como el número probable de personas que los usan, la cantidad necesaria de espectro para su funcionamiento, características de propagación de las señales radiadas, compatibilidad con otros sistemas de telecomunicaciones, características de funcionamiento de los equipos (i.e. potencia de transmisión, patrones de antena, sensibilidad del receptor, entre otros) [4].

2.2.1 Fines y Objetivos de la Gestión del ER

Cada país dentro de su sistema de gestión del ER debe definir unos fines y objetivos y plasmarlos a través de su regulación. Dentro de estos fines destaca la necesidad de incluir el uso eficiente del espectro. Por otro lado, dentro de los objetivos se deben incluir aspectos como ofrecer servicios de telecomunicaciones eficaces, impulsar las innovaciones en el desarrollo de infraestructuras, servir a los intereses nacionales, procurar reducir la brecha digital, entre otros [4].

Colombia, como miembro de la UIT, ha seguido las sugerencias realizadas por este organismo a través de sus recomendaciones, informes, reportes y manuales. Es así como dentro de la ley del sector de telecomunicaciones se han establecido principios orientadores [3] entre otros como:

- i. Prioridad al acceso y uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones: se establece que el Estado colombiano debe priorizar el acceso y uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones, promoviendo su uso eficiente y en condiciones de igualdad a todos los habitantes.
- ii. Uso eficiente de la infraestructura y de los recursos escasos: se establece que el Estado colombiano debe fomentar el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones y el uso eficiente de los recursos escasos, como el ER, para la implementación de redes de telecomunicaciones de gran calidad y eficiencia siempre buscando el beneficio de los usuarios.
- iii. Neutralidad Tecnológica: se establece que el Estado colombiano debe garantizar la libre adopción de tecnologías de telecomunicaciones, basándose en recomendaciones de organismos internacionales expertos en la materia, siempre buscando prestar servicios cada vez más eficientes que cumplan con las demandas de los usuarios, buscando un mercado de telecomunicaciones en donde se presente una libre competencia y buscando que la adopción de las tecnologías vaya de la mano con el desarrollo económico y social de país.
- iv. Masificación del Gobierno en Línea: se establece que el Estado colombiano debe adoptar medidas para garantizar el buen aprovechamiento de las tecnologías de la información y las comunicaciones con el objeto de prestar servicios eficientes a la ciudadanía. Aquí resultan de gran importancia aspectos como tramites en línea, transparencia y participación ciudadana en todo lo que respecta a dichas tecnologías.

2.3 ASIGNACIÓN DEL ER

Un país encargado de gestionar el ER tiene como principal función la asignación de frecuencias, que expresado de una forma más general es la asignación del ER. La UIT define la asignación como la *“autorización que da una administración para que una estación radioeléctrica utilice una frecuencia o un canal radioeléctrico determinado en condiciones*

especificadas” [6], entendiéndose administración como el país encargado de gestionar el espectro.

La función de asignación incluye el análisis de ingeniería de espectro para seleccionar las frecuencias viables para los sistemas de telecomunicaciones a través de la coordinación entre las asignaciones objeto de estudio de viabilidad y las asignaciones existentes que ya cuentan con permiso de uso del espectro. A grandes rasgos, la asignación de frecuencias consiste en seleccionar una frecuencia que le permita al usuario un nivel requerido de su servicio de telecomunicaciones mientras se protege de posibles interferencias al usuario solicitante y a los usuarios que ya tienen asignaciones vigentes. Con el fin de hacer un uso eficiente del espectro, todas las asignaciones deben otorgarse de tal manera que se ofrezca la mayor probabilidad de otorgar otras asignaciones en un futuro cuando otros usuarios realicen solicitudes de espectro.

Para poder realizar esto, es necesario que la administración cuente con un recurso primario de la gestión del espectro que es el registro nacional de frecuencias [4]. El registro nacional de frecuencias debe contener información tanto técnica como administrativa de las redes de telecomunicaciones del país para que la administración pueda tomar decisiones que impacten los servicios de radiocomunicaciones. Teniendo un registro de las asignaciones otorgadas en todo el territorio, se puede evaluar la disponibilidad de las frecuencias a través de la geografía del país y la demanda de espectro. La distribución de la población de un país puede por ejemplo generar escasez de espectro en ciertas áreas mientras en otras áreas el mismo espectro puede encontrarse altamente disponible; esto se debe a que es muy poco probable que la población se encuentre distribuida equitativamente a lo largo del territorio, por el contrario, la población tiende a agruparse en centros urbanos de distintos tamaños y cuando la densidad de población de estos centros urbanos es muy alta, al igual que la demanda de servicios de radiocomunicaciones, se presenta congestión de espectro debido a la poca disponibilidad de este recurso.

Al momento de asignar frecuencias se debe asegurar que los sistemas con permisos otorgados previamente para el uso del espectro continúen funcionando correctamente. Debido a que la demanda de espectro va en aumento, los procedimientos establecidos para la asignación de frecuencias deben aceptar cierto nivel de interferencia sobre los sistemas de radiocomunicaciones con el fin de hacer un uso eficiente del ER. Es decir que, al no

poder eliminar por completo las interferencias entre los sistemas de comunicaciones, una utilización eficiente del espectro se da cuando se pueden reutilizar las frecuencias asegurando el normal funcionamiento de los sistemas de radiocomunicaciones que coexisten a pesar de presentarse interferencias.

Un usuario que desea solicitar una asignación debe diligenciar un formulario en donde se describe el tipo de servicio de radiocomunicación y se da información tanto técnica como administrativa y operacional de las estaciones transmisoras y receptoras para poder realizar el respectivo análisis de ingeniería de espectro. Una vez se decide asignar la frecuencia, los datos técnicos administrativos y operacionales deben ser ingresados al registro nacional de frecuencias [4]. La UIT recomienda llevar este registro nacional de frecuencias a través de programas informáticos, más precisamente, en una base de datos informatizada para tratar y registrar todas las asignaciones de frecuencias [7].

Un sistema de gestión del ER requiere de la implementación de normas y procedimientos para la asignación de frecuencias a los titulares de los permisos de uso, así como de registros de bases de datos en donde repose toda la información tanto técnica como administrativa de los sistemas de telecomunicaciones. Para el caso de Colombia, el MINTIC cuenta actualmente con el Sistema de Gestión de Espectro (SGE), el cual es una solución informática diseñada para atender las solicitudes de espectro correspondientes a creación, renovación, modificación o cancelación de los permisos otorgados para el uso del espectro radioeléctrico [8]. Más adelante en este documento, se profundizará en un componente esencial del SGE que es la Base de Datos de Espectro, la cual contiene la información técnica de los sistemas de comunicaciones y será un insumo importante para el desarrollo del presente trabajo de grado.

La función de asignación de frecuencias está muy ligada al concepto de concesión de licencias del cual se habla en [4]. La concesión de licencias es el permiso expresado través de un documento oficial de un país para la utilización de frecuencias radioeléctricas dentro de su territorio. El Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) de la UIT menciona *“Ningún particular o entidad podrá instalar o explotar una estación transmisora sin la correspondiente licencia expedida en forma apropiada y conforme a las disposiciones del presente Reglamento por el gobierno del país del que hubiere de depender la estación o en nombre de dicho gobierno”* [6]; el mismo documento menciona que a través de una decisión

nacional se puede permitir la explotación de radiofrecuencias del público en general siempre y cuando el funcionamiento de los sistemas de radiocomunicaciones allí instalados no causen interferencias perjudiciales (e.g. frecuencias de uso libre en Colombia reglamentadas por la resolución 711 de 2016 de la ANE).

La concesión de licencias, que para el caso de Colombia es más correcto emplear la terminología permiso de uso, tiene el objetivo principal de limitar las características técnicas y operacionales de las estaciones de los sistemas de radiocomunicaciones que van a hacer uso de la frecuencia radioeléctrica asignada, esto con el fin de mantener el recurso escaso de espectro siempre en pro del interés general nacional. Adicionalmente, la concesión de permisos de uso tiene el objetivo de mantener un registro de las frecuencias radioeléctricas asignadas en todo el territorio nacional, lo cual permitirá gestionar eficientemente el ER evitando interferencias y mejorando la EUE.

La UIT recomienda que los permisos de uso del ER incluyan información como nombre del titular, dirección del titular, ubicación geográfica de la estación, la zona de servicio de la estación, parámetros técnicos y condiciones de funcionamiento de la estación (e.g. potencia de transmisión, horas de uso, altura de la antena), tiempo de duración del permiso, frecuencia asignada, parámetros de emisión y características de la antena (e.g. ganancia, azimut, tilt, apertura del haz) [4]. La información aplica para estaciones tanto transmisoras como receptoras.

En Colombia, la expedición de un permiso de uso se hace por parte del MINTIC a través de resoluciones que van acompañadas de un cuadro que describe las características técnicas de las redes de telecomunicaciones, estos cuadros se conocen con el nombre de Cuadros de Características Técnicas de Red (CCTR).

2.3.1 Análisis de Interferencia

Cuando una administración de espectro recibe solicitudes para obtener permisos de uso, se hace necesario efectuar análisis de interferencias que permitan emitir conceptos de viabilidad asegurando el normal funcionamiento de todos los sistemas, tanto de los sistemas con permisos de uso existentes como de los nuevos sistemas a los que se pretende autorizar dicho permiso.

El análisis de interferencia consiste en determinar las intensidades de las señales radioeléctricas deseada e interferente en un punto determinado y continúa con una comparación de los valores mínimos de potencia recibida a los que los equipos pueden funcionar correctamente y las relaciones de protección del servicio de radiocomunicaciones que se esté analizando [4]. La UIT define la relación de protección como *“valor mínimo, generalmente expresado en decibelios, de la relación entre la señal deseada y la señal no deseada a la entrada del receptor, determinado en condiciones especificadas, que permite obtener una calidad de recepción especificada de la señal deseada a la salida del receptor”* [6]. En resumen, el análisis de interferencia estima la intensidad de las señales radioeléctricas deseada e interferente y determina si la interferencia es tolerable para que ambos sistemas de radiocomunicaciones puedan coexistir.

Para realizar la estimación de las señales radioeléctricas las administraciones de espectro utilizan modelos de propagación y software de cálculo con cartografía digital, en Colombia, aunque la entidad encargada de atender las solicitudes de espectro es el MINTIC, la ANE es quien realiza los análisis de interferencia para emitir los conceptos de viabilidad sobre dichas solicitudes [9]. Para realizar los análisis de interferencia, la ANE se apoya en el SGE y en la herramienta de software ICS Telecom que trabaja en conjunto con dicho sistema.

2.3.2 Procesos de Selección Objetiva (PSO)

En Colombia el uso del espectro requiere un permiso previo, expreso y otorgado por el MINTIC [3]. Para otorgar dichos permisos, el MINTIC está obligado por ley a adelantar Procesos de Selección Objetiva (PSO) cuyo fin es asegurar la transparencia en los procesos de asignación del ER y maximizar los recursos para el Estado [3].

Los PSO inician a través de la determinación de la existencia de pluralidad de oferentes sobre el ER, para esto se realiza una convocatoria pública con la descripción de las bandas de frecuencias, ubicación geográfica y usos del espectro permitidos. Una vez se reciben las manifestaciones de interés por parte de los usuarios del ER, se da apertura al PSO y se reciben las solicitudes de espectro [10], las cuales deben contener los siguientes datos:

- i. Frecuencias de uso.
- ii. Ancho de banda.
- iii. Área de servicio.

- iv. Ubicación de las estaciones radioeléctricas.
- v. Ganancia, altura y patrón de radiación de las antenas.
- vi. Potencia de transmisión.
- vii. Horario de utilización.

Para los sistemas punto a multipunto (PMP), actualmente los PSO se abren para los rangos de frecuencias de 3 a 462.5 MHz exceptuado el rango de 452.5 a 459.4 MHz [11]. El Anexo A del presente documento contiene el formato de solicitudes de espectro en bandas de Frecuencia Alta (HF, por sus siglas en inglés), Frecuencia Muy Alta (VHF, por sus siglas en inglés) y Frecuencia Ultra Alta (UHF, por sus siglas en inglés) requerido en los PSO, los cuales aplican para las bandas de sistemas PMP en Colombia.

El PSO culmina con la evaluación de las solicitudes y la expedición de un acto administrativo por parte del MINCTIC en donde se otorga o niega el permiso de uso del espectro según sea el resultado del análisis de viabilidad técnica elaborado por la ANE. En caso de que se otorgue el permiso de uso del espectro, la ANE genera un CCTR describiendo las condiciones técnicas de dicho permiso tal como lo demanda la ley [9]. El Anexo B del presente documento contiene un ejemplo de CCTR extraído directamente del SGE con información de un sistema PMP.

2.3.3 Base de datos de Espectro

El SGE es una solución informática diseñada para atender las solicitudes de espectro correspondientes a creación, renovación, modificación o cancelación de los permisos otorgados para el uso del espectro radioeléctrico en Colombia [8]. Este sistema fue diseñado bajo los lineamientos de la UIT, los cuales recomiendan que para automatizar los procesos de gestión del ER se debe contar con un dispositivo de base de datos para manejar los datos del espectro [7].

La base de datos del SGE se utiliza principalmente para gestionar la información del ER respecto a los sistemas de radiocomunicaciones fijos punto a punto (PP) y a los sistemas de radiocomunicaciones móviles PMP. Esto con el fin de apoyar los PSO descritos en la sección 2.3.2. La ANE es la entidad encargada de realizar cualquier modificación de la información técnica de los sistemas PP y PMP sobre la base de datos de espectro del SGE.

Para realizar modificaciones y consultas a la base de datos de espectro del SGE la ANE cuenta con un gestor llamado ICS Manager, el cual será usado para extraer la información de los sistemas PMP necesarios para el desarrollo de la propuesta del mecanismo de cálculo de EUE del cual trata el presente trabajo de grado.

2.4 EFICIENCIA EN EL USO DEL ER (EUE)

El ER adquiere cada vez más importancia en nuestra sociedad ya que se ha venido incrementado su uso como base de las tecnologías de radiocomunicaciones, las cuales ofrecen grandes beneficios de desarrollo social. Los avances tecnológicos han mostrado nuevas aplicaciones que han aumentado la demanda y el interés de este recurso escaso que es el ER. Así entonces, la demanda de este recurso exige que se utilice más eficientemente para dar cabida a los posibles usuarios que quieran acceder a él [4].

El manual de gestión nacional del espectro de la UIT menciona *“La eficacia de utilización del espectro (EUE) es importante al ser el espectro un recurso limitado que tiene valor económico y social y porque la demanda de espectro está creciendo rápidamente en la mayoría de las bandas de frecuencias”* [4]. De igual manera en el mencionado manual se enuncia lo siguiente: *“Aunque no es fácil definir qué se entiende por eficacia de un sistema de gestión del espectro, se sabe que, en general, está relacionada con la capacidad del sistema para satisfacer las necesidades del país, y salvaguardar el interés general cuando se distribuye el espectro entre los usuarios de las radiocomunicaciones”* [4]. De aquí se puede concluir que la eficiencia en el uso de espectro está relacionada con la satisfacción de las necesidades del país y el acceso equitativo al espectro que se les da a los usuarios de las radiocomunicaciones.

La satisfacción de las necesidades del país en materia de comunicaciones se puede ver desde dos puntos de vista para entender el concepto de EUE. Por un lado, entre mejores sean técnicamente los sistemas de radiocomunicaciones frente a las interferencias, más eficientemente será usado el espectro al lograr que más usuarios tengan acceso al ER, luego también será mayor el desarrollo del país en el sector de telecomunicaciones, lo cual implica un desarrollo social del país debido al impacto que tienen las telecomunicaciones. Por otro lado, entre mayor rendimiento económico se obtenga por concepto de contraprestaciones por el uso del ER, mayor será la inversión económica en el sector de

telecomunicaciones, lo cual también impactara positivamente en el desarrollo social del país. Se debe hablar entonces de dos tipos de EUE, una técnica y una económica.

El presente trabajo de grado está centrado en la eficiencia técnica en el uso del ER, es decir, la EUE determinada por las características técnicas de las estaciones radioeléctricas que hacen uso del ER. A partir de este momento, cuando se hable de EUE se entenderá únicamente como eficiencia técnica en el uso del ER.

Así entonces, los valores de EUE dependerán de las buenas prácticas de asignación de frecuencias que implanten las administraciones de espectro. Es decir, de las buenas prácticas de asignación de frecuencias que en Colombia implemente la ANE en el marco de sus funciones como asesor técnico del MINTIC durante la atención de solicitudes de espectro que llegan a dicha entidad. Entre las prácticas de asignación de frecuencias que se pueden implementar se pueden encontrar las siguientes:

- i. Re-uso de frecuencias: se trata de una práctica de asignación en la que se definen distancias de separación entre las estaciones radioeléctricas en las que es posible que ellas hagan uso de las mismas frecuencias. Las distancias pueden ser, por ejemplo, angulares o geográficas dependiendo de si se separa el ángulo de azimut de las antenas o la ubicación geográfica de las estaciones.
- ii. Esquemas de compartición de espectro: se trata de un mecanismo de asignación del ER en el cual se usa el mismo recurso de espectro por parte de dos o más usuarios, servicios o aplicaciones de telecomunicaciones.
- iii. Requisitos mínimos de equipos: se trata de establecer, a través de normatividades, unas características técnicas mínimas de los equipos de radiocomunicaciones para disminuir el riesgo de interferencias potenciales entre los sistemas de telecomunicaciones. Así, entre mejor convivan los sistemas de comunicaciones, mayor será el aprovechamiento del ER al permitir que más usuarios pueden acceder a él.
- iv. Uso de las bandas de frecuencias: se trata de definir usos específicos para los sistemas de radiocomunicaciones en ciertas bandas de frecuencias. De esta manera se logra organizar mejor el espectro ya que si se agrupan los sistemas de comunicaciones similares en porciones de espectro, resulta más sencillo establecer condiciones de convivencia para evitar posibles interferencias.

- v. Armonización del ER: se trata de una práctica internacional que consiste en atribuir el espectro a servicios específicos de telecomunicaciones. Entre mayor sea la armonización mayores economías de escala se generan en los sistemas de radiocomunicaciones, lo que deriva en un beneficio económico para los usuarios finales de dichos sistemas.

Las prácticas de asignación de frecuencias mencionadas anteriormente tienen un objetivo en común, maximizar el número de usuarios que pueden acceder al espectro, o como se ha venido hablando en este documento, maximizar la EUE. De esta manera, resulta muy útil poder medir el impacto generado por estas prácticas al momento de ser implementadas por una administración de espectro, lo cual se logra estableciendo una métrica para medir la EUE.

Acerca de la medición de la EUE el manual de gestión de espectro de la UIT también menciona *“La medición de la eficacia de utilización del espectro es diferente para cada tipo de sistema o de servicio. Por ejemplo, el cálculo de la eficacia del espectro para sistemas punto a punto es diferente del cálculo para sistemas por satélite o móviles terrestres. Por lo tanto, sólo se puede hacer una comparación entre tipos de sistemas similares y en bandas de frecuencias o canales específicos”* [4]. Esto implica que para poder realizar una medición de EUE se deben seleccionar sistemas de radiocomunicaciones similares. Adicionalmente, para poder realizar una medición de EUE que pueda ser útil para la ANE, es recomendable hacerla sobre bandas que se abren al público en general a través de PSO en los que la ANE asesora al MINTIC; también es recomendable hacerla en bandas donde exista una alta demanda de espectro, todo esto para poder observar de una mejor manera el impacto de los procesos de asignación.

2.4.1 Aplicaciones del Uso del ER

Las administraciones de espectro pueden utilizar la medición del uso del ER para las siguientes aplicaciones [4]:

- i. Mapas de uso del espectro con zonas de congestión de espectro que deben ser reguladas y coordinadas de manera especial para asegurar un uso eficiente del espectro.

- ii. Comparaciones de uso del espectro en diferentes bandas de frecuencias en áreas geográficas específicas con el fin de destinarlas a servicios de radiocomunicaciones específicos.
- iii. Cálculos reiterados de uso eficiente del ER para identificar tendencias que pueden ser plasmadas en planeación estratégica de espectro.

2.4.2 Cálculo del Uso del ER

Para hablar del cálculo de EUE es primordial iniciar hablando del cálculo del uso del ER. La UIT define la medida del uso del ER, o factor de utilización del espectro (como este organismo lo llama en sus documentos), como el producto del ancho de banda del espectro por el espacio geométrico y por el tiempo denegado a otros usuarios potenciales, i.e. la utilización eficiente del espectro se logra a través del aislamiento de la señal radioeléctrica gracias a la directividad de la antena, la separación geográfica de la señal, la compartición de las frecuencias radioeléctricas asignadas y la compartición en el tiempo de los diferentes sistemas de radiocomunicación [12]. Así entonces, el uso del espectro se puede calcular como:

$$U = B.S.T$$

En donde:

U: uso del ER

B: ancho de banda de la señal radioeléctrica

S: espacio geométrico (normalmente una superficie)

T: tiempo

Esta ecuación recomendada por la UIT tiene un enfoque de carácter teórico, pero aun así sirve para que las administraciones de espectro tengan en cuenta estas variables en sus cálculos de EUE.

El espacio geográfico va a depender del tipo de sistema de radiocomunicaciones y puede ser cualquier figura geométrica que represente a la señal radioeléctrica en el espacio, e.g. una circunferencia para los sistemas de comunicaciones punto a multipunto. La inclusión

del tiempo en los cálculos va a depender de si los sistemas de comunicaciones se utilizan o no de manera continua. Acerca de la medida de espectro, esta puede calcularse teniendo en cuenta la cantidad de espectro usado en una zona geográfica que va a estar no disponible por los demás sistemas de radiocomunicaciones que vayan a hacer uso del espectro, por ejemplo, podría calcularse la densidad espectral de potencia de la señal a través de las características de radiación de la antena.

De manera general, un transmisor radioeléctrico utiliza el espectro y el espacio geográfico llenándolos de potencia radioeléctrica durante determinados espacios de tiempo, y en los lugares donde llega dicha señal es posible que otros sistemas de radiocomunicaciones no puedan funcionar correctamente durante esos mismos instantes de tiempo. En razón a esto, el uso del ER también se puede calcular al considerar la parte del espectro que se le está denegando a los posibles nuevos sistemas de radiocomunicaciones cuando se otorgan permisos de uso de espectro [4].

Cuando se habla de espectro denegado hay que tener en cuenta tanto el espectro denegado por el transmisor como el espectro denegado por los receptores que son los que componen el sistema de radiocomunicaciones completo. Los transmisores utilizan espectro y deniegan dicho espectro a los receptores de otros sistemas de radiocomunicaciones ya que pueden producir interferencias en estos; y los receptores deniegan espectro a los transmisores de otros sistemas de radiocomunicaciones ya que si se les otorgan permisos de uso se les debe proteger ante las interferencias de los mencionados transmisores. La suma de estas cantidades de espectro es entonces la totalidad del espectro denegado por un sistema de comunicaciones [4].

En el manual de gestión de espectro de la UIT también se menciona que *“Si sólo un tipo de sistema utiliza esa banda de frecuencias, sería razonable considerar las características de los transmisores asociados con dicho sistema. (Cuando en este contexto se consideran «las características del transmisor» se deberían incluir todas las características del sistema transmisor en general, incluida la frecuencia, la anchura de banda, la potencia, el diagrama de radiación de la antena, el ángulo de apuntamiento de la antena (si procede), la modulación, los ciclos de trabajo de funcionamiento y la codificación. Algunas de estas características estarán en la especificación del término anchura de banda «B», algunas en el término espacio «S» y algunas en el término temporal «T».)”* [4]. Esto quiere decir que si

se selecciona una banda de frecuencias en la que solo funciona un tipo de sistema de radiocomunicación del servicio móvil, se pueden seleccionar las características técnicas de las estaciones transmisoras para encontrar el espectro denegado por todo el sistema de comunicaciones ya que los receptores serían estaciones móviles que se mueven dentro de ese espacio donde se encuentra la señal radioeléctrica del transmisor, o en otras palabras, no sería necesario calcular el espectro denegado por los receptores si se asume que cada transmisor tiene un área de cobertura asociada en la que los receptores se moverán libremente y la cual debe ser protegida ante posibles interferencias de otras zonas de cobertura cercanas. Si las zonas de cobertura deben ser protegidas, significa que se está hablando de sistemas con permisos de uso de espectro, o sistemas licenciados.

La ecuación propuesta en [12] menciona los factores básicos a incluir en el cálculo del uso del ER pero la misma UIT menciona en [4] que pueden incluirse otros factores que no necesariamente deben tener una división marcada entre ellos y que también hacen referencia a la posibilidad de simplificar el proceso de cálculo, estos factores son una guía propuesta por la UIT y su aplicación se deja a discreción de las administraciones de espectro, ya sea para omitirlos, aplicarlos y combinarlos. Estos factores se describen a continuación:

- i. Frecuencia: este componente agrupa todos los factores que impactan en la frecuencia del sistema de radiocomunicaciones, aquí se incluye el efecto de aspectos como los filtros de frecuencia, el ancho de banda, las características de rechazo fuera de banda, la relación señal a ruido permitida, los armónicos, las espurias y la codificación de los equipos de radiocomunicaciones.
- ii. Espacio geométrico: este componente agrupa todos los factores que impactan la forma en que la señal radioeléctrica se va a propagar a través del espacio, es decir, está directamente relacionado con lo que se conoce como zona de servicio en las estaciones del servicio móvil, aquí se incluye el efecto de aspectos como la ubicación geográfica de las estaciones, la potencia de transmisión, los ángulos de apuntamiento de las antenas, la polarización de las antenas, los diagramas de radiación de las antenas y la altura de las antenas de los sistemas de radiocomunicaciones.

- iii. Tiempo: este componente agrupa todos los factores que impactan el ciclo de trabajo de los sistemas de radiocomunicaciones. Es un factor que muchas veces no se tiene en cuenta ya que la concesión de permisos de uso se hace para una disponibilidad de los sistemas de radiocomunicaciones del 100% del tiempo. Sin embargo, la implementación del tiempo dentro de las limitaciones de asignación de espectro es uno de los mecanismos que más ayudan a mejorar la EUE [4].
- iv. Ocupación Espectral: este componente está ligado al tiempo y agrupa todos los factores que impactan la ocupación real de un canal de radiofrecuencia. La ocupación espectral depende entonces de la duración en tiempo de un mensaje que se transmita a través de un sistema de radiocomunicaciones, ya que mientras no se estén enviando mensajes el canal de radiofrecuencia permanece libre.
- v. Base de Datos: el cálculo de uso del ER y EUE requiere de mucha información acerca de los sistemas de radiocomunicaciones y es importante que las administraciones de espectro cuenten con bases de datos con información de las asignaciones de frecuencia que se otorguen y aún más importante que dicha base de datos permanezca actualizada para que el proceso de gestión de espectro sea eficaz.
- vi. Modelos de Propagación: adicional a la base de datos con la información detallada de las estaciones de los sistemas de radiocomunicaciones, es indispensable para el cálculo de uso del ER y de EUE tener modelos de propagación para simular el comportamiento de las señales radioeléctricas a través del espacio.
- vii. Cálculo Global: el cálculo de uso del ER puede ser realizado para un sistema de un solo transmisor y un solo receptor, para un sistema completo de muchos transmisores y muchos receptores o para todos los transmisores y receptores de una banda de frecuencias completa en una zona geográfica amplia. Se recomienda que la zona elegida no sea muy pequeña ya que podría no ser representativos de una zona más amplia que la contenga. Si se escoge una zona muy amplia el tiempo de cálculo y el tamaño de la base de datos podrían ser muy grandes, dificultando el análisis que se quiere realizar.

La determinación del uso del ER consiste en representar numéricamente la cantidad de espectro utilizado en una zona geográfica determinada. Para realizar el cálculo total de este número, resulta útil que la zona seleccionada se subdivida en forma de malla para luego si

realizar una suma general de todos los puntos, al incrementar el número de muestras se obtiene un mejor resultado del cálculo y al mismo tiempo se incrementan tanto el tiempo de cálculo como el tamaño de la base de datos.

Hasta este punto se ha descrito un método analítico y bastante teórico recomendado por la UIT para realizar el cálculo de uso del ER, el método es bastante detallado y se fundamenta en el cálculo de las características de potencia del entorno electromagnético que crean las estaciones radioeléctricas a través de sus emisiones. Este tipo de métodos requiere de mucha información inicial sobre las estaciones radioeléctricas y de cálculos matemáticos que demandan gran tiempo de ejecución. Por tal razón, en ocasiones este tipo de métodos no resultan viables de ser aplicados por las administraciones de espectro, pues estas muchas veces no cuentan con la facilidad de obtener información detallada de las características técnicas de las estaciones radioeléctricas y de contar con ella los tiempos de cálculo matemático harían poco practica su aplicación [13].

Otra forma de calcular el uso del ER, el cual también es recomendado por la UIT, consiste en un método más simplificado. Este método propone calcular un factor de utilización del espectro a través del establecimiento de distancias permitidas de frecuencia y ubicación geográfica, es decir, reemplazar el cálculo de las características de potencia del entorno electromagnético de las estaciones radioeléctricas por un factor que indica la disponibilidad del espectro en función de la distancia de separación en frecuencia y ubicación geográfica de los sistemas de radiocomunicaciones [13].

La simplificación del cálculo de uso del ER radica en poder establecer unas separaciones de frecuencia y ubicación geográfica con el fin de lograr niveles de interferencia aceptable en los sistemas de radiocomunicaciones.

2.4.3 Cálculo de EUE

La UIT define la EUE, o eficacia de utilización del espectro, como la relación entre la información transferida y el grado de uso del ER [12]. De esta manera el concepto se puede expresar como la siguiente ecuación:

$$EUE = \frac{M}{U}$$

En donde:

M: cantidad de información transferida

U: factor de uso del ER

Nuevamente, la expresión recomendada por la UIT tiene un carácter teórico. Cuando las administraciones tratan de calcular la EUE, algunas veces resulta difícil tener disponible la cantidad de información transferida por el sistema de radiocomunicaciones, en esos casos el valor puede sustituirse por un factor de uso del ER basado en una medición real [12]. Para el desarrollo del presente trabajo de grado, también resulta complejo lograr realizar las mediciones reales del factor de uso del ER, debido al elevado costo económico y administrativo que ello conllevaría, luego para efectos prácticos también se podría sustituir la cantidad de información transferida por el sistema de radiocomunicaciones por un valor ideal del factor de uso del ER. De esta manera, el valor de EUE también se podría expresar como:

$$EUE = \frac{U'}{U}$$

Donde U' es el factor ideal de uso del ER.

2.4.4 Experiencias Internacionales

En esta sección se presentan las experiencias internacionales de administraciones de espectro y organismos de regulación sobre estudios para determinar la eficiencia de espectro aplicados.

2.4.4.1 Brasil

En Brasil el organismo encargado de hacer la administración del espectro radioeléctrico es la Agencia Nacional de Telecomunicaciones (ANATEL, por su sigla en portugués). ANATEL en el año 2010 reglamentó la evaluación de la EUE a través de la resolución 548, reconociendo que el espectro es un recurso limitado y por lo tanto este debe ser utilizado de manera racional y adecuada. Dicha normatividad aplica para sistemas fijos punto a punto, sistemas punto multipunto y sistemas satelitales, y define de una forma general la EUE como la relación entre la cantidad de información transmitida -que también puede ser

el número de canales radioeléctricos o el tráfico telefónico- y la utilización del espectro. A su vez, define la utilización del espectro como el producto entre el ancho de banda y el espacio geométrico negado, omitiendo valores de tiempo negado ya que los sistemas radioeléctricos se encuentran operando todo el tiempo [14]. Esto es:

$$EUE = k \frac{M}{U} = k \frac{M}{B \times S}$$

En donde:

k: factor de proporcionalidad del servicio radioeléctrico

M: cantidad de información transmitida, canal radioeléctrico o tráfico de telefonía

U: utilización del espectro

B: ancho de banda del sistema

S: espacio geométrico negado

Se observa que Brasil va en línea como lo recomendado por la UIT sobre EUE a través de [12]. La variable de tiempo también está tenida en cuenta solo que se omite debido a que los sistemas radioeléctricos en Brasil funcionan las 24 horas del día y no tiene sentido hacer una distinción del tiempo denegado por cada sistema radioeléctrico.

Destaca la forma en la que ANATEL menciona que la cantidad de información transmitida por el sistema radioeléctrico puede ser reemplazada dentro de la fórmula por la cantidad de canales radioeléctricos. Adicionalmente también mencionan que el espacio geométrico denegado puede ser determinado por unidad federativa (i.e. división territorial como los departamentos en Colombia), municipio o zona de cobertura autorizada.

La administración de Brasil presenta el tema de evaluación de la EUE a través de los indicadores de eficiencia que se describen a continuación:

- i. Índice Mínimo de Eficiencia (IME): Índice mínimo de EUE definido por la ANATEL que debe ser cumplido por un sistema o aplicación. Se pueden fijar diferentes IME por tipo de sistema, por banda de frecuencias o por espacios geométricos negados.

- ii. Índice Temporal de EUE (ITE): índice que representa por medio de una regresión lineal, la evolución de la EUE a lo largo del tiempo.

Así entonces, ANATEL presenta el concepto de ineficiencia como el incumplimiento, en un periodo de tiempo determinado, de los indicadores de eficiencia. Para cumplir con lo anterior se indica la periodicidad de la evaluación del uso eficiente del espectro y posteriormente se establecen las respectivas sanciones por uso ineficiente del espectro. Sin embargo, la ineficiencia en el uso del espectro se puede considerar justificada cuando esté relacionada con el cumplimiento de obligaciones de cobertura, si la suspensión del uso del espectro perjudica a la competencia y cuando esté relacionada con el cumplimiento de requerimientos de calidad del servicio.

Finalmente, cabe mencionar que ANATEL promueve el uso eficiente del espectro a través de políticas de administración de espectro como: atribuciones y asignaciones de las bandas del espectro acordes con las recomendaciones de la UIT, promoción de subastas de espectro, permitir el uso del espectro en bandas de frecuencias donde puede existir una interferencia significativa pero poca pluralidad de interesados y asignación directa del espectro en escenarios donde no se espera interferencia significativa. Adicionalmente se encuentra trabajando en otras iniciativas como uso secundario y oportunista del espectro, compartición de espectro y promoción de nuevas tecnologías como Banda Ultra Ancha (UWB, por su sigla en inglés) y Radio Cognitiva.

2.4.4.2 Estados Unidos de América

En los Estados Unidos de América (USA, por sus siglas en inglés) los organismos encargados de hacer la administración del espectro radioeléctrico son la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, por sus siglas en inglés) y la Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información (NTIA, por sus siglas en inglés). Mientras la NTIA está encargada de administrar el espectro reservado para las entidades federales e identifica el espectro que puede ser utilizado con fines comerciales, la FCC se encarga de administrar el resto del espectro, incluido el espectro utilizado por privados con fines comerciales. Ambos organismos han tratado el tema de EUE.

Antes de iniciar a hablar de la EUE, cabe resaltar que en USA se trabaja con un esquema de asignación de espectro flexible que depende del mercado, en donde se determina cual

es el mejor uso que se puede dar al espectro y en el que se puede conceder el espectro en mercados secundarios, es decir, ceder el espectro a un privado para que lo administre.

En el año 2002 la FCC estableció el Spectrum Policy Task Force con el objetivo identificar los cambios en las políticas de administración del espectro radioeléctrico que debían hacerse en USA para incrementar los beneficios públicos derivados del uso de este recurso [15]. Esta iniciativa creó a su vez 4 grupos de trabajo dentro de los cuales se encontraba el Spectrum Efficiency Working Group, grupo encargado de temas relacionados con la EUE y cuyos esfuerzos se centraron en como promover y medir dicha eficiencia.

El razonamiento de la FCC fue, si la eficiencia comúnmente es asociada a cuanto producto se puede producir con cierta cantidad de entrada, entonces la eficiencia a grandes rasgos se puede definir como: $Eficiencia = Salida/Entrada$. Para usos del espectro, la salida puede ser expresada en términos de la información transmitida, mientras que la entrada puede ser expresada en términos de la cantidad de espectro en Hertz. Aun así, la FCC reconoce que existen otros factores que deben ser tenidos en cuenta para mejorar la EUE como el costo de mejorar la eficiencia, el número de personas impactadas con el servicio prestado y el valor mismo del servicio. De esta manera la FCC identificó tres definiciones y formas de medir la eficiencia: eficiencia espectral, eficiencia técnica y eficiencia económica [16].

La eficiencia espectral se presenta cuando se maximiza la cantidad de información transmitida mediante una cantidad dada de espectro, dicho de otra forma, cuando se usa la menor cantidad de espectro para transmitir una cantidad de información dada. Esto es: $Eficiencia\ espectral = Salida/Espectro\ impactado$.

La eficiencia técnica se presenta cuando todos los insumos se implementan para generar la mayor cantidad de productos con el menor costo total, obviamente incluyendo el espectro, pero también los equipos, el capital económico y la mano de obra. Esto es: $Eficiencia\ espectral = Salida/Costo\ de\ todos\ los\ insumos$. Tanto la eficiencia espectral como la eficiencia técnica se enfocan en el insumo de espectro, aunque la eficiencia técnica se enfoca también en otros factores.

La eficiencia económica se presenta cuando todos los insumos se implementan para generar el mayor valor agregado para los consumidores, cuando se habla de valor la FCC se refiere al valor de la información transmitida. Esto es *Eficiencia espectral = Valor de la Salida/Costo de todos los insumos*.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que un buen resultado en un tipo de eficiencia puede ir en detrimento de otro tipo de eficiencia. Por ejemplo, una tecnología que permita mayor eficiencia espectral puede ser menos eficiente en términos económicos. Sin embargo, la FCC considera que debe existir un balance entre la eficiencia de espectro, los costos para alcanzarla y el valor que se da a los servicios suministrados. El grupo también concluye que no es posible plantear la misma medición de eficiencia para todos los servicios, pues algunas medidas pueden resultar en desventajas para algunos servicios.

Al respecto de la medición de la eficiencia espectral la FCC menciona que:

$$\text{Eficiencia espectral} = \text{Información Transmitida}(I) / \text{Espectro impactado}(U)$$

También se menciona que el espectro impactado se calcula a través de la siguiente formula:

$$\text{Espectro impactado} = B \times S \times T$$

En donde

B: ancho de banda impactado.

S: espacio geográfico impactado.

T: tiempo denegado a otros usuarios.

La ecuación mencionada por la FCC es similar a la presentada en [12] y de la misma manera presenta ausencia de una variable muy importante como lo es la cantidad de usuarios servidos. Por otra parte, la FCC reconoce la dificultad de precisar con exactitud, coherencia e imparcialidad la cantidad de información transmitida. La ecuación tampoco determina cuál de los valores de ancho de banda, espacio geográfico o tiempo denegado es más valioso que los otros.

La FCC reconoce también que existen otras formas para cuantificar la eficiencia espectral como, por ejemplo, la que propone IEEE 802, sobre la cual cree que puede haber dificultad para calcular valores propuestos como la capacidad del sistema de radiocomunicaciones de entregar información o el número de usuarios conectados a dicho sistema, lo que puede hacer que las mediciones de eficiencia no sean confiables.

Aparte de estas existen otras propuestas acerca de mediciones de la eficiencia espectral, que fueron aportadas a la FCC por diferentes actores del sector de telecomunicaciones de USA. Las métricas involucran cálculos de propagación de la señal que pueden variar dependiendo de la frecuencia, área geográfica y equipos utilizados. Sobre esto la FCC menciona que las suposiciones de los valores de interferencia aceptable y niveles de calidad deseados producirán diferentes resultados en términos de cuanto ancho de banda, espacio y tiempo pueden ser impactados, por lo que la eficiencia espectral podría calcularse a través de condiciones iniciales que no ofrezcan resultados imparciales.

Finalmente, la FCC concluye que no es posible ni apropiado establecer una única métrica para medir la eficiencia de espectro de los diferentes servicios de radio, pues cualquier métrica seleccionada que ofrezca ventajas para un servicio puede afectar la medición de otro servicio. La FCC no recomienda un mecanismo de cálculo de la EUE, pero si cree que se debe promover el acceso y uso eficiente del espectro radioeléctrico.

La NTIA también ha abordado el tema de EUE. Es así como su grupo de trabajo denominado “Commerce Spectrum Management Advisory Committee (CSMAC)” elaboró en el año 2008 un documento sobre definiciones de EUE en donde se menciona que ésta es un concepto que depende de los objetivos de implementación del sistema de radiocomunicaciones, es decir, la eficiencia del uso del espectro se debe medir en función del propósito de la medición misma. Más allá de comprender el propósito de medir la eficiencia del sistema, también se debe observar que existen diferentes modos de operación de los sistemas de comunicaciones inalámbricas que pueden exigir diferentes consideraciones de eficiencia [17].

De esta manera, la NTIA introduce modos de operación para indicar que el concepto de eficiencia es dependiente de la finalidad de las comunicaciones efectuadas por cada sistema, por lo que cálculos indiscriminados sin tener en cuenta el modo de operación de

los sistemas de radio proporcionarían respuestas que no serían útiles para generar políticas de administración de espectro. Para evitar ello, propone dividir el uso del espectro en clases para identificar modos de operación comunes que permitan hacer los sistemas de radiocomunicaciones comparables, las clases son las siguientes [17]:

- i. Sistemas de radiodifusión: Para los sistemas de transmisión radiodifundida existe un equilibrio entre las áreas objeto de cobertura y uso independiente, es decir, se transmiten múltiples conjuntos de datos que son seleccionables individualmente por muchos usuarios. La definición de eficiencia debe contemplar la cantidad de grupos de datos (e.g. canales de televisión) disponibles por MHz.
- ii. Sistemas de comunicación personal: La eficiencia debe estar dada por la velocidad de transmisión en Mbps o cantidad de canales de voz sobre el ancho de banda utilizado en MHz.
- iii. Sistemas directivos punto a punto: La eficiencia debe contemplar tanto la velocidad de transmisión sobre un ancho de banda dado como la capacidad para operar varios enlaces cercanos independientes en la misma frecuencia (i.e. re-uso de frecuencias).
- iv. Transmisores/receptores que no son de comunicaciones: Entre dichos sistemas se encuentran los sistemas de radar. Estos sistemas solo pueden ser comparados con sistemas del mismo tipo.
- v. Sistemas satelitales: Dado la gran cobertura de estos sistemas, la definición de la eficiencia se hace desafiante, pues la métrica de eficiencia de espectro es muy diferente si se considera la eficiencia técnica versus la eficiencia operacional ya que es una tecnología con un potencial grande de cobertura a usuarios muy dispersos.
- vi. Receptores Pasivos: a este grupo pertenecen los sistemas de radioastronomía, vigilancia del espacio, monitoreo remoto y sistemas meteorológicos. Para esta clase se debe relacionar la eficiencia con su mejor ubicación espacial posible.
- vii. Aplicaciones de corto alcance: Incluye sistemas Bluetooth, WiFi y sistemas anticolidión de corto alcance, entre otros. Se destaca la evolución y alta eficiencia que los sistemas han logrado en menos de 10 años. Su eficiencia puede ser evaluada por su capacidad de bits/segundo/Hertz en un área determinada.

La NTIA no recomienda métricas específicas para realizar el cálculo de EUE y se centra más en que las políticas de espectro deben tener como objetivo maximizar la utilidad y el beneficio del espectro ya que esto representa un propósito mayor en comparación con el logro de medir la eficiencia técnica –i.e. el fin es más importante que el medio. Estas políticas pueden incluir por ejemplo compartición de espectro entre sistemas de radiocomunicaciones ya que el avance tecnológico de la última era permite minimizar la probabilidad de interferencias.

Como conclusión del caso de USA se tiene que la definición de EUE no es única y para su aplicación se debe considerar el tipo de servicio y uso, así como el objetivo de la evaluación de la eficiencia.

2.4.4.3 India

En la India el organismo encargado de hacer la administración del espectro radioeléctrico es la Autoridad Regulatoria en Telecomunicaciones de India (TRAI, por su sigla en inglés). En el año 2004 la TRAI publicó un documento de consulta pública sobre la utilización eficiente del espectro, atribución de espectro y tarificación del espectro [18]. En él, cuando se menciona el tema de eficiencia se hace referencia a la eficiencia técnica de la utilización del espectro tal como se ha definido en el presente proyecto y se emplean definiciones recomendadas por la UIT, en versiones anteriores de [12].

Adicionalmente, TRAI menciona que existen otras vías para expresar la eficiencia espectral como las siguientes:

- i. Re-uso efectivo: Describe que tan frecuentemente la misma frecuencia es empleada en la red.
- ii. Carga fraccionada: Mide la eficiencia de las redes de salto en frecuencia en relación con el reuso efectivo de frecuencias.
- iii. Re-uso de asignación de frecuencia: Indica qué tantas frecuencias son empleadas con respecto a las frecuencias disponibles en el sistema.
- iv. Carga en frecuencia: Indica la cantidad de tráfico cursada por el espectro disponible.
- v. Carga efectiva de frecuencia: Cuantifica la carga de cada frecuencia en el sistema.

No se conocen métricas bien definidas y aplicadas por la administración de espectro de la India para determinar la EUE. Para promover esta eficiencia, la India se limita a establecer políticas estrictas de asignación de espectro que conduzcan teóricamente a un mejor aprovechamiento del espectro y por ende a una mejor eficiencia de este.

La documentación encontrada sobre eficiencia de espectro en la administración de la India está muy enfocada a sistemas de radiocomunicaciones móviles, específicamente a sistemas de Comunicaciones Móviles Internacionales (IMT, por su sigla en inglés). Por lo tanto, las políticas de asignación de espectro para mejorar la eficiencia del espectro están acotadas a los sistemas IMT.

2.4.4.4 México

En México la EUE ha sido incorporada a las leyes nacionales a través de la fracción XLVIII del artículo 15 de la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión (LFTyR), la cual estipula la función al Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), quien es el regulador de espectro del dicho país, de *“Establecer las métricas de eficiencia espectral que serán de observancia obligatoria, así como las metodologías de medición que permitan cuantificarlas”* [19]. En esta misma línea, el estado mexicano estableció en su programa de gobierno sobre administración de espectro, denominado Programa Nacional de Espectro Radioeléctrico 2017-2018, el objetivo de *“Fomentar el incremento de la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico en el país”* [20], el cual se estableció debido a que es necesario que las políticas públicas y la regulación expedida busque hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico dada la naturaleza escasa de dicho recurso, adicionalmente, el objetivo plantea la producción de estrategias con el fin de determinar el grado de EUE.

En razón a esto, el IFT en su plan anual de trabajo en el año 2015 incluyó la realización de un estudio de mecanismos de cálculo de eficiencia espectral. Los objetivos del estudio fueron identificar mecanismos de cálculo de eficiencia espectral para asegurar que el recurso de espectro radioeléctrico se utilice de forma racional y formular recomendaciones de como el cálculo de eficiencia del espectro puede favorecer la asignación óptima del espectro [21].

El mencionado estudio inicia diciendo que el uso del espectro está sujeto a restricciones de uso como armonización internacional y uso actual del espectro, es decir que el uso del

espectro se facilita debido a las economías de escala que se generan cuando los fabricantes y las administraciones de espectro a nivel mundial seleccionan bandas de frecuencias para implementar sistemas de radiocomunicaciones, por otro lado, el uso del espectro puede ser difícil de cambiar debido al alto costo que implican las migraciones de equipos al cambiar de tecnologías. Esto implica que el cálculo de EUE debe ser una guía para la elaboración de políticas de administración de espectro, pero no puede ser la base de dichas políticas ni se deben tomar decisiones basándose exclusivamente en este parámetro ya que existen otros factores relevantes para tener en cuenta. El enfoque recomendado por [21] es utilizar el cálculo de eficiencia del espectro para determinar cuál sería el mejor uso que se podría dar a este recurso, para después evaluar si otros factores pueden generar problemas en el uso. Otros factores adicionales que pueden influir en el uso del espectro radioeléctrico son: contribución económica del espectro, demanda de espectro, gestión de interferencias y factores tecnológicos (e.g. características de las antenas, potencias de transmisión, cobertura de la señal, entre otros).

Respecto a la definición de EUE, [21] se enfoca más en la eficiencia técnica en el uso del espectro, por esta razón se menciona que la eficiencia puede ser medida en términos de cantidad de información útil transmitida por unidad de espectro, eso es bits/Hz. Adicionalmente, recomiendan añadir en la definición una dimensión del área de cobertura para incluir el impacto del sistema de radiocomunicaciones en el espacio geográfico, añadir una dimensión de tiempo de utilización ya que el sistema de radiocomunicaciones puede funcionar en periodos de tiempo determinados y finalmente añadir una dimensión del ancho de banda utilizado. Se observa que la definición utilizada en México va en línea con la UIT, más específicamente con [12].

El método de cálculo de EUE en cada servicio radioeléctrico será diferente y su aplicación debe ser realizada teniendo en cuenta que el nivel de eficiencia puede cambiar a lo largo del tiempo, variará de acuerdo con la zona geográfica y el costo de obtener niveles elevados de eficiencia puede ser muy elevado.

Como conclusión del caso de la administración de México se tiene que la definición de EUE no es única y para su aplicación se debe considerar el tipo de servicio radioeléctrico y el uso del recurso.

2.4.4.5 Reino Unido

En el Reino Unido el organismo encargado de hacer la administración del espectro radioeléctrico es la Oficina de Comunicaciones (OFCOM, por su sigla en inglés). El Reino Unido aún no ha definido un método de cálculo de la eficiencia de espectro, en lugar de realizar esto, los esfuerzos por hacer un uso más eficiente del recurso se han centrado en generar políticas que promuevan un mejor acceso al espectro.

En el año 2013, OFCOM realizó un análisis de las diferentes formas en que se accede al espectro en el Reino Unido, por ejemplo, mediante licencias, sin licencias o uso compartido. El análisis se basa en atributos como bandas de frecuencia, servicios radioeléctricos, carácter del usuario (público o privado), entre otros, con el fin de debatir la forma en la que el acceso al espectro radioeléctrico impacta el aprovechamiento de este recurso y el valor derivado de su explotación. De esta manera, OFCOM logra establecer cuantitativamente el acceso al espectro radioeléctrico para identificar falencias y dificultades en el uso de este recurso, lo cual sirve como base para proponer políticas de administración de espectro [22].

Esta forma de actuar en el Reino Unido ha llevado a que se adopten mecanismos de acceso dinámico del espectro como los Espacios en Blanco de Televisión (TVWS, por su sigla en inglés) [23], en el que el espectro de los canales del servicio de radiodifusión de televisión que no son utilizados en ciertas áreas geográficas se puede compartir con otros servicios sin requerir de licencias de uso, logrando así un mejor aprovechamiento del espectro, es decir, haciendo un uso más eficiente de dicho recurso.

2.4.4.6 Unión Europea

La Comisión Europea (CE), que es un organismo legislativo de la Unión Europea, ha establecido una hoja de ruta para promover el uso eficiente del espectro radioeléctrico. Es así como en el año 2012 estableció, a través de una decisión, el Programa de Política del Espectro Radioeléctrico. Este programa establece como uno de los principios reguladores para toda la Unión Europea aplicar el sistema de asignación más apropiado para maximizar la flexibilidad y la EUE. Adicionalmente, establece como uno de sus objetivos estratégicos fomentar la gestión y el uso eficiente del espectro radioeléctrico que responda en mejor medida a la progresiva demanda de este recurso. El programa también establece la creación de un inventario de usos del espectro, que, en conjunto con un análisis de las

tendencias tecnológicas, de las necesidades futuras y de la demanda de espectro radioeléctrico permite que se identifiquen bandas de frecuencia susceptibles de mejorar en cuanto a EUE y de ser compartidas [24].

Ya para el año 2014 la CE realizó el mencionado inventario de usos del espectro con el respectivo análisis de mejoras en la EUE y concluyo que es muy poco el espectro que se encuentra sin utilizar, la demanda de espectro está en aumento pues cada vez aparecen nuevas aplicaciones tecnológicas, la asignación del espectro es cada vez más difícil y costosa [25].

Otros datos encontrados sobre la Unión Europea se encontraron en un informe elaborado por el consultor WIK-Consult para la EC en donde se hizo una revisión del uso del espectro en los países miembros de la unión y se evaluó el potencial de mejora en la EUE. El informe menciona que al momento de definir que es EUE no es posible definir un único método de cálculo, sino que se deben considerar además múltiples factores y analizar la eficiencia de manera holística, adicionalmente, se expone la idea de que un método de cálculo cuantitativo es útil, más cuando se cuentan con datos adecuados disponibles, pero también se necesita un método de cálculo cualitativo.

Como conclusión, la CE no establece métodos cuantitativos de cálculo de EUE que puedan ser utilizados para evaluar la utilización del espectro durante periodos de tiempo, a cambio propone implementar políticas de administración de espectro, especialmente de asignación de espectro, que tiendan a mejorar el uso de este recurso. Entre los mecanismos de asignación y acceso al espectro propuestos se destacan el acceso compartido bajo licencia (LSA, por su sigla en inglés), TVWS y el mejoramiento de técnicas de re-uso del espectro.

2.4.4.7 Resumen

Colombia aún no ha desarrollado trabajos relacionados con el cálculo de la EUE, sin embargo, existe normatividad como la Ley 1341 de 2009 que obliga a la ANE a gestionar el espectro radioeléctrico para garantizar el uso adecuado de éste recurso y en base a esto dicha entidad se planteó el objetivo estratégico de *“diseñar y proponer políticas, lineamientos y estrategias para el uso eficiente del espectro en el mediano y largo plazo en pro del interés general”* [26].

A pesar de que siempre se habla de realizar un uso eficiente del espectro, la ANE no cuenta con indicadores al respecto que le permitan determinar que tan buenos son los resultados de las políticas, lineamientos, estrategias y procesos de viabilidad de solicitudes que implementa para gestionar el espectro. Por esta razón se han analizado los estudios y experiencias internacionales que sobre la materia se han desarrollado, lo cual servirá como insumo para realizar la propuesta de mecanismo de cálculo que trata el presente trabajo de grado.

La Tabla 1 sintetiza los trabajos realizados por las diferentes administraciones de espectro y organismos de estandarización a nivel mundial en temas de eficiencia de espectro y las variables tenidas en cuenta para el cálculo de dicho parámetro.

Como se puede observar en la mencionada tabla, los estudios realizados por las administraciones de espectro analizadas basan la definición de EUE en lo recomendado por la UIT a través del documento UIT-R SM.1046-3: *“Definición de la eficacia en la utilización del espectro por un sistema de radiocomunicaciones”* [12]. De la misma manera, todas las administraciones reconocen la importancia de determinar de alguna manera la eficacia en el uso del espectro, sin embargo, no se encontró información de que dichas administraciones hayan establecido un mecanismo formal de cálculo del mencionado parámetro excepto por Brasil.

El mecanismo de cálculo de EUE implementado por Brasil es cuantitativo y usa valores de espacio geográfico negado, ancho de banda negado e información transmitida; es decir, se requiere información de modulación, ancho de banda y zonas de cubrimiento de los sistemas de radiocomunicaciones. El mecanismo de cálculo propuesto se emplea para sistemas fijos punto a punto, sistemas móviles punto a multipunto y sistemas de servicios satelitales y su aplicación solo difiera en una constante que depende de cada sistema.

Por otra parte, la administración de espectro del Reino Unido y el organismo legislativo de la Unión Europea abandonan la concepción de un mecanismo de cálculo de EUE de tipo cuantitativo y se enfocan en análisis cualitativos sobre la ocupación del espectro para luego pasar directamente a la generación de políticas que promuevan el uso eficiente del ER.

Tabla 1. Consideraciones mundiales para el cálculo de EUE.

País (Organismo regulador)	Definición Eficiencia de Espectro	Normatividad	Mecanismo de cálculo	Servicios radioeléctricos estudiados	Aspectos relevantes para el cálculo	Variables	Políticas de administración de espectro
UIT	UIT-R SM.1046-3	UIT-R SM.1046-3, UIT-R SM.1599-1	Cuantitativo no específico	Aplicable a todos	Espectrales, técnicos	Información transmitida, área de cobertura, tiempo	Eficacia relativa del espectro
Brasil (ANATEL)	Basada en UIT-R SM.1046-3	Resolución 548 de 2010 de ANATEL	Cuantitativo	Fijo (PP), móvil (punto a multipunto) y servicios satelitales	Espectrales, técnicos	Información transmitida, canales radioeléctricos, ancho de banda, área de cobertura	Asignación de recta de espectro, uso libre, uso secundario, UWB y radio cognitiva
USA (FCC, NTIA)	Basada en UIT-R SM.1046-3	No posee	No posee	Radiodifusión, móvil (PCS), fijo (PP), radiodetermina- ción, servicios satelitales, radioastrono- mía,	Espectrales, técnicos, económicos	Información transmitida, ancho de banda, área de cobertura, tiempo, costos de implementación.	Esquemas de asignación flexible, mercado secundario, compartición de espectro,
India (TRAI)	Basada en UIT-R SM.1046-3	No posee	No posee	Móvil (IMT)	Espectrales, técnicos	Información transmitida, tráfico, ancho de banda, área, tiempo	Re-uso de frecuencias,
México (IFT)	Basada en UIT-R SM.1046-3	LFTyR, Programa Nacional de Espectro Radioeléctrico	No posee	Servicios satelitales, móvil (PMP), móvil (IMT), fijo (PP), radiodifusión,	Espectrales y técnicos	Cantidad de información transmitida, área de cobertura, tiempo, ancho de banda, uso futuro,	Uso compartido, mercado secundario, TVWS

País (Organismo regulador)	Definición Eficiencia de Espectro	Normatividad	Mecanismo de cálculo	Servicios radioeléctricos estudiados	Aspectos relevantes para el cálculo	Variables	Políticas de administración de espectro
Reino Unido (OFCOM)	Propia	No posee	Cualitativo	No específico	Espectrales, técnicos y económicos	Ocupación de espectro, ancho de banda, naturaleza del servicio,	Uso libre, uso compartido, TVWS,
Unión Europea (EC)	propia	Programa de Política del Espectro Radioeléctrico	Cualitativo	No específico	Espectrales, técnicos y económicos	Tendencias tecnológicas, necesidades futuras, demanda de espectro, costo de asignación del espectro	Uso flexible del espectro, uso compartido, TVWS, re-uso de frecuencias

Fuente: propia.

3 MECANISMO DE CÁLCULO DE EUE EN SISTEMAS PMP

En el presente capítulo se describe la propuesta de mecanismo de cálculo de eficiencia en el uso del ER (EUE). En primer lugar, se analizan los datos disponibles en la base de datos de espectro sobre los sistemas punto a multipunto (PMP) en Colombia y se evalúa su aplicación dentro de la propuesta de mecanismo de cálculo. Seguido a esto, se presenta la propuesta final del mecanismo de cálculo.

Finalmente, se exponen las consideraciones aplicadas para seleccionar los valores de los parámetros utilizados dentro del mecanismo de cálculo de EUE propuesto.

3.1 INFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS PMP EN EL SGE

La UIT define una comunicación punto a multipunto (PMP) como una comunicación proporcionada por múltiples enlaces en la misma zona geográfica (e.g. por medio de radioenlaces) entre una estación situada en un punto fijo determinado y un número de estaciones situadas en unos puntos fijos dentro de la zona de cobertura de la estación central [27].

En Colombia los sistemas PMP asignados y cuya información reposa en las bases de datos del SGE son los servicios de radio móvil terrestre que funcionan en las bandas VHF de 138 - 174 MHz y en las bandas UHF de 440 - 470 MHz y 800 MHz. Actualmente, solo las bandas de 138 - 174 MHz y 440 – 470 MHz se abren a PSO para recibir solicitudes de permisos de uso del espectro, por esta razón, solo se tiene información relevante y certera sobre las referencias de equipos en estas bandas y no así de la banda de 800 MHz.

Internamente en el SGE, la información de las estaciones del servicio móvil de sistemas PMP se guarda en la tabla “Otras estaciones terrestres”, la cual contiene datos administrativos y técnicos. La información de las estaciones es presentada gráficamente a través de las pestañas: General, Proceso, Frecuencias, Posición, Antena, Móvil, Interferencia, Inspecciones, Personalizado, Cust+, Aparece en y Adjuntos. Las pestañas Proceso, Inspecciones, Personalizado, Cust+, Aparece en y Adjuntos son de carácter informativo interno para al sistema y sirven para guardar información personalizada por los

usuarios y para realizar búsquedas principalmente. Por otra parte, las pestañas Móvil e Interferencia contienen información que la ANE no utiliza en el ejercicio de sus funciones y de los que se desconoce su funcionamiento.

La pestaña General contiene la información administrativa más importante sobre las estaciones de los sistemas PMP. Allí reposan datos como: el nombre del operador a quien se le otorgó el permiso de uso del espectro, la vigencia del permiso otorgado, la fecha de puesta en marcha de la estación, el estado del permiso, clase y categoría de la estación, entre otros. La pestaña General de las estaciones PMP en el SGE se puede observar en la Figura 1 a continuación.

Otras estaciones terrestres n°77232 -- transmit 47547

General | Proceso | Frecuencias | Posición | Antena | Móvil | Interferencia | Inspecciones | Personalizado | Cust+ | Aparece en | Adjuntos

Identificador de estación OT: TRANSMIT 47547 Prefijo: Distintivo: ...

Tipo de servicio: 2-FIJO Edit... El... De... OK

Cód. POS Admón: ... Categoría de notificación: BASE - Estación fija en el servicio mó...

Particularidad: ... Categoría de estación: Bas - Base

Status OT: aAUT - Autorizado Tipo Est. Recepción: R

Ident. Red: ... 6B - Natur. servicio: CV

2C- Fecha puesta en marcha: 21 Jan 1988 Link Ident: ...

2C - Fecha de fin de uso: ... Link Type of Diversity: ...

6A - Clase estación: FB - Estación de base

Administración (UIT-R): CLM - Colombia (República de)

6Z - Categoría de uso: S - Servicios de rescate (ambulancias, méd...

Fecha de renovación: ...

Authorization n°: ...

Red: Editar... Elegir... Desenzalar

Usuario: Editar... Elegir... Desenzalar

Contacto: Editar... Elegir... Desenzalar

Operador: Editar... Elegir... Desenzalar

Observación: numero_red = 2; longitud_circuito = equipo_receptor = A equipo_transmisor = B potencia_permitted = 0.02 numero canales = 1 4170.

Tasa de red: ...

Creado por MINCOMpinzon (19 May 2016 11:22:29.18)

Modificado por MINCOMpinzon (20 May 2016 09:45:49)

Guardar y salir Cancelar y salir Guardar cambios

Figura 1. Formulario de información general de las estaciones PMP en el SGE.

Fuente: SGE del MINTIC

La pestaña Frecuencias contiene la información técnica sobre el espectro utilizado por las estaciones de los sistemas PMP. Allí reposan datos como: frecuencia de transmisión, frecuencia de recepción, ancho de banda, distintivo de llamada, plan de canalización, horas

de operación y denominación de la emisión, entre otros. Se ha observado que la información referente a las horas de operación siempre es el mismo, indicando que las estaciones PMP siempre funcionan las 24 horas del día. La pestaña Frecuencias de las estaciones PMP en el SGE se puede observar en la Figura 2 a continuación.

Figura 2. Formulario de información de frecuencias de las estaciones PMP en el SGE.

Fuente: SGE del MINTIC.

La pestaña Posición contiene la información técnica sobre la ubicación de las estaciones de los sistemas PMP. Allí reposan datos como: latitud, longitud, altitud, sistema de referencia de coordenadas, municipio, departamento y dirección del emplazamiento, entre otros. Adicionalmente, cuenta con una ventana gráfica donde se geolocaliza la estación en un mapa digital. Se ha observado que la información referente al sistema de referencia de coordenadas siempre es el mismo, indicando que las coordenadas están representadas en Grados (°), Minutos (') y Segundos ("), sin embargo, al extraer la información de la base de datos se puede seleccionar el tipo de representación (e.g. coordenadas decimales). La

pestaña Posición de las estaciones PMP en el SGE se puede observar en la Figura 3 a continuación.

Figura 3. Formulario de información de posición de las estaciones PMP en el SGE.

Fuente: SGE del MINTIC.

La pestaña Antena contiene la información técnica sobre los equipos instalados en las estaciones de los sistemas PMP. Allí reposan datos como: potencia de transmisión de la estación, ganancia de la antena, altura de la antena, azimuth de la antena, ángulo de elevación de la antena, marca y modelo del radio, marca y modelo de la antena y patrón de radiación de la antena, entre otros. Se ha observado y confirmado en la ANE que la información referente al patrón de radiación de la antena es un parámetro estándar que se sube a todas las estaciones PMP dentro del SGE debido a que en los análisis de interferencia se realizan las simulaciones con patrones omnidireccionales y modelos digitales de terreno que van dando forma a la cobertura de la estación, es decir, esta información no es la realidad de los equipos que se encuentran actualmente instalados y

que tienen permisos de uso del espectro, por tal razón, la información de azimuth, ángulo de elevación y patrón de radiación no es confiable y resulta más práctico para la propuesta del mecanismo de cálculo de eficiencia asumir un patrón de radiación omnidireccional. La pestaña Antena de las estaciones PMP en el SGE se puede observar en la Figura 4 a continuación.

The screenshot shows the 'Antena' (Antenna) configuration window in the SGE software. The window title is 'Otras estaciones terrestres n°77232 -- transmit 47547'. The 'Antena' tab is selected among others like 'General', 'Proceso', 'Frecuencias', etc.

9EC - Alturas efectivas (m): A table showing effective heights for different azimuths. The maximum height is 509 m.

Acim.	Altura ef...
0°	-28
10°	+127
20°	+92
30°	+74
40°	+168
50°	+257
60°	+306
70°	+410
80°	+426

Below the table is a circular radiation pattern diagram with a red center and concentric circles, labeled with angles like 15°, 45°, 135°, and 225°. Buttons 'MDT...' and 'Entrada...' are at the bottom.

Parámetros:

- %A - Potencia de operación: 43.9794 dBm
- Tipo de potencia: [dropdown]
- %B1 - Potencia radiada: 46.9794 dBm (OK)
- %B2 - Referencia: [dropdown]
- %AB - Máx dens. pot.: [input]
- %ba - Ctrl. rango Pot: [input]
- 9A - Azimut: [input] desde [input] a [input]
- 9B - Elevación: [input] desde [input] a [input]
- 9D - Polarización: H - Horizontal línea
- 9G - Ganancia: 3 dB
- 9L - Pérdidas Tx: 0 dB
- 9L - Pérdidas adic. Tx: 0 dB
- 9L - Pérdidas Rx: 0 dB
- 9Y - Altura de antena: 20 m
- Número de equipos: [input]

Modelo de antena:

- Buttons: Editar..., Elegir..., Desenlazar (OK)
- Code= 51
- Name= SIGNAL / SN-150 / 694
- Type=
- Gain= 3 dB()

Conf. Equipo (Tx/Rx o Tx):

- Buttons: Editar..., Elegir..., Desenlazar (OK)
- Code= 18
- Model= MOTOROLA / DGM4100
- Power= 43.9794 dBm
- Designation= 11K0F3E--

Conf. Equipo (sólo Rx):

- Buttons: Editar..., Elegir..., Desenlazar
- Code= \$XML01370
- Model= /
- Power=
- Designation=

Feeder:

Nombre	Alt.(100m)	Length(m)
[input]	[input]	[input]

Radar:

Longitud Vol	Altitud Vol	Rot. (r/min)
[input]	[input]	[input]

Duplexor:

- Buttons: Editar..., Elegir..., Desenlazar

At the bottom are buttons: 'Guardar y salir', 'Cancelar y salir', and 'Guardar cambios'.

Figura 4. Formulario de información de antena de las estaciones PMP en el SGE.

Fuente: SGE del MINTIC.

3.1.1 Banda 138 - 174 MHz

El Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF) establece el plan de banda con el que actualmente se otorgan los permisos de uso del espectro en la banda de 138 - 174 MHz en Colombia, específicamente se trata de la Tabla 3A de dicho documento [28]. Los canales permitidos tienen un ancho de banda de 12,5 kHz y existen canalizaciones tanto dúplex como simplex. La Tabla 2 y la Tabla 3 contienen información de las

canalizaciones establecidas por el CNABF para la mencionada banda de frecuencias. Así mismo, la Figura 5 presenta estas mismas canalizaciones de una manera gráfica.

Tabla 2. Canalizaciones dúplex del plan de banda 138 - 174 MHz.

Banda	Rango de Frecuencias Bajo (MHz)		Rango de Frecuencias Alto (MHz)		Separación (MHz)
A	138	139	141	142	3
B	143	144	148	149	5
C	150,05	153,05	155,05	158,05	5
D	160	162	163	165	3
E	166	169	171	174	5

Fuente: CNABF.

Tabla 3. Canalizaciones simplex del plan de banda 138 - 174 MHz.

Banda	Rango de frecuencias (MHz)	
S1	139	141
S2	142	143
S3	149,00	149,9
S4	151,4875	151,5625
S5	151,7625	151,8375
S6	153,05	155,05
S7	158,05	160
S8	162	163
S9	165	166
S10	169	171

Fuente: CNABF.

Como puede apreciarse en la Figura 5, la banda C con su contraparte C' no se componen de un rango continuo de frecuencias debido a la existencia de atribuciones a servicios diferentes al servicio móvil, los cuales no aplican a este plan de banda que es netamente para sistemas PMP. A esta misma razón se debe que existan otras porciones de espectro no canalizadas en la banda (espectro de color negro en la Figura 5). De esta manera el espectro útil de la banda no es de 36 MHz sino de 31,7 MHz.

Esta banda de frecuencias se abre 3 veces al año a PSO para sistemas PMP y por esta razón la ANE cuenta con información suficiente de los equipos de radiocomunicaciones que se utilizan actualmente en el país. La ANE tiene certeza de que la información de los

sistemas PMP en esta banda es confiable ya que todos los permisos de uso del espectro otorgados allí han sido objeto de análisis de interferencias en dicha Entidad.

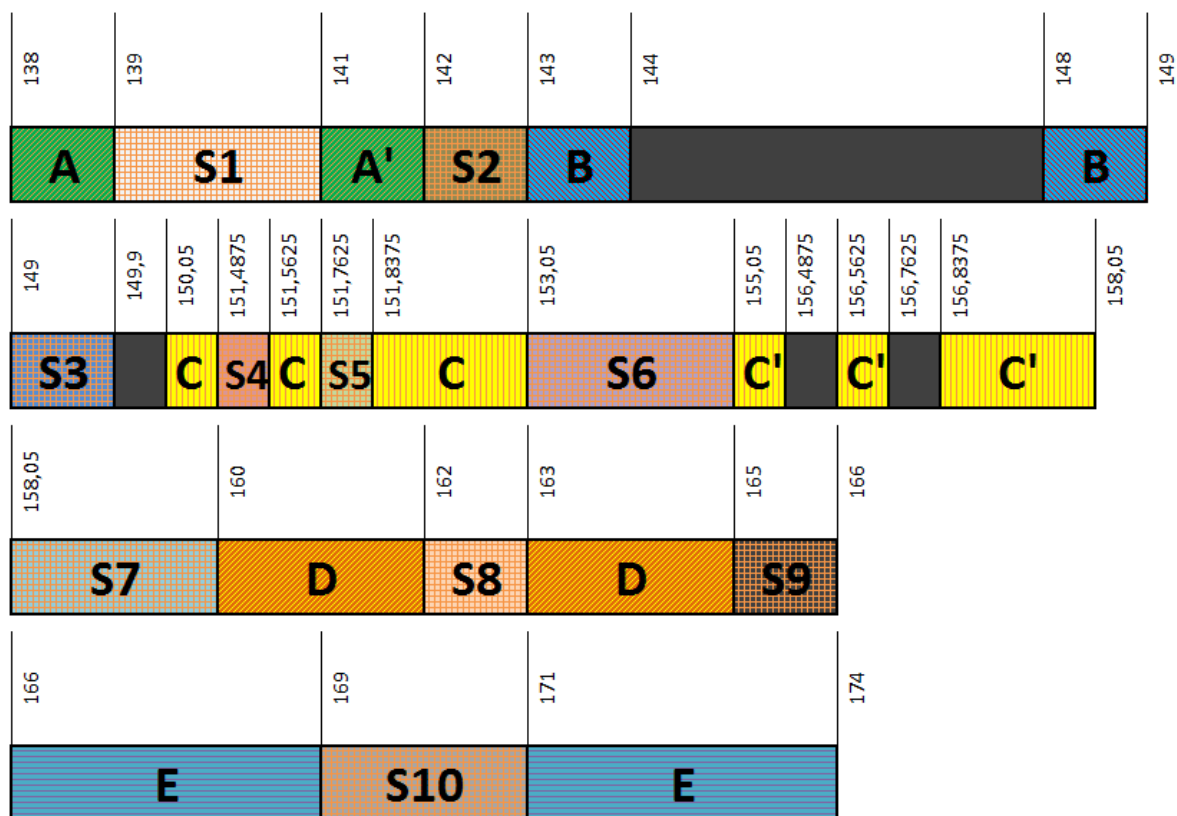


Figura 5. Plan de banda 138 - 174 MHz.

Fuente: ANE.

3.1.2 Banda 440 - 470 MHz

El Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF) establece el plan de banda con el que actualmente se otorgan los permisos de uso del espectro en la banda de 440 - 470 MHz en Colombia, específicamente se trata de la Tabla 13 de dicho documento [28]. Los canales permitidos tienen un ancho de banda de 12,5 kHz y existen canalizaciones tanto dúplex como simplex. La Tabla 4 contiene información de las canalizaciones establecidas por el CNABF para la mencionada banda de frecuencias. Así mismo, la Figura 6 presenta estas mismas canalizaciones de una manera gráfica.

Tabla 4. Plan de banda 440 - 470 MHz.

Banda	Rango de frecuencias	Modo de uso
A	440 a 443 MHz	Dúplex con la banda A' con separación de 5MHz
S1	443 a 445 MHz	Simplex
A'	445 a 448 MHz	Dúplex con la banda A con separación de 5MHz
S2	448 a 450 MHz	Simplex
S3	450 a 450,6 MHz	Simplex
B	450,6 a 451,9 MHz	Dúplex con la banda B' con separación de 10MHz
C	451,9 a 452,5 MHz	Dúplex con la banda C' con separación de 7,5MHz
IMT	452,5 a 457,5 MHz	
D	457,5 a 459,4 MHz	Banda reservada
C'	459,4 a 460 MHz	Dúplex con la banda C con separación de 7,5MHz
S4	460 a 460,6 MHz	Simplex
B'	460,6 a 461,9 MHz	Dúplex con la banda B con separación de 10MHz
S5	461,9 a 462,5 MHz	Simplex
IMT	462,5 a 467,5MHz	
D'	467,5 a 469,4 MHz	Banda reservada

Fuente: CNABF.

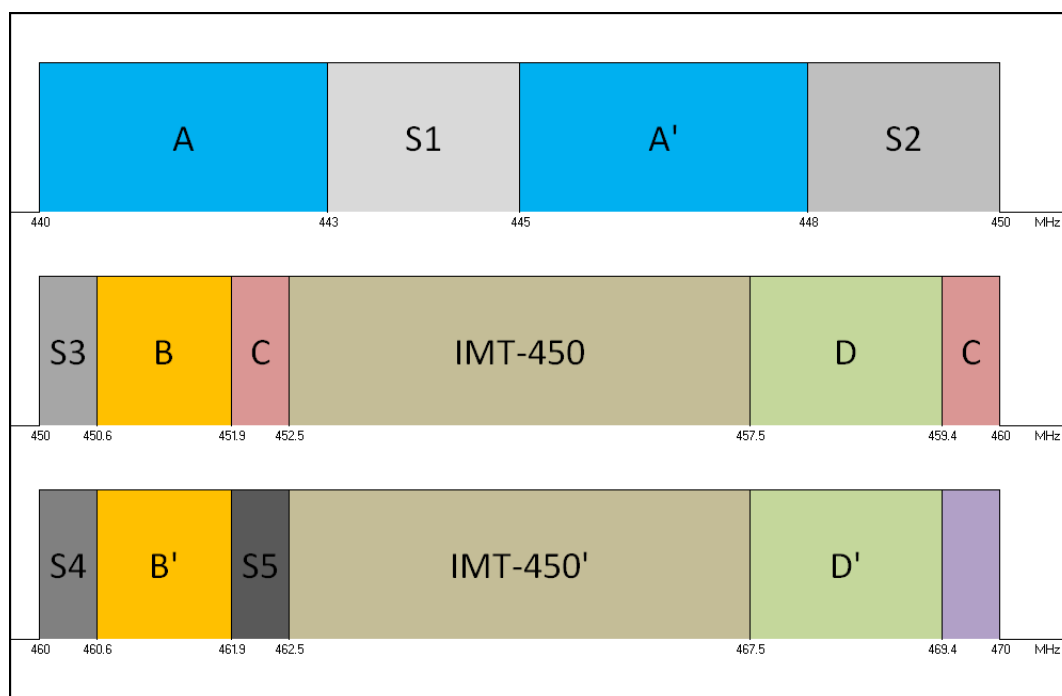


Figura 6. Plan de banda 440 - 470 MHz.

Fuente: propia.

Como puede apreciarse en la Figura 6, tanto la banda IMT-450 con su contraparte IMT-450' como la banda D con su contraparte D' no representan un rango útil apto para los sistemas PMP generales ya que son rangos reservados para el funcionamiento de sistemas de radiocomunicaciones especiales, el primero para sistemas IMT y el segundo para sistemas de radiocomunicaciones de la Policía Nacional. De esta manera el espectro útil de la banda no es de 30 MHz sino de 15,575 MHz.

Esta banda de frecuencias se abre 3 veces al año a PSO para sistemas PMP y por esta razón la ANE cuenta con información suficiente de los equipos de radiocomunicaciones que se utilizan actualmente en el país. La ANE tiene certeza de que la información de los sistemas PMP en esta banda es confiable ya que todos los permisos de uso del espectro otorgados allí han sido objeto de análisis de interferencias en dicha Entidad.

3.1.3 Banda de 800 MHz

En Colombia la banda de 800 MHz para sistemas PMP comprende los rangos de frecuencias de 806 - 824 MHz y de 851 - 869 MHz. El Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF) establece el plan de distribución de frecuencias de la banda de 800 MHz en Colombia, específicamente se trata de las Tablas 14 y 15 de dicho documento [28]. Los canales permitidos tienen un ancho de banda de 12,5 y 25 kHz y existen solamente canalizaciones dúplex. La Tabla 5 contiene información de las canalizaciones establecidas por el CNABF para la mencionada banda de frecuencias.

Tabla 5. Canalizaciones banda de 800 MHz.

Tabla CNABF	Rango de Frecuencias Bajo (MHz)		Rango de Frecuencias Alto (MHz)		Separación (MHz)
14	806	821	851	866	45
15	821	824	866	869	45

Fuente: adaptado del CNABF.

La Tabla 15 del CNABF representa una canalización que es de uso exclusivo para los sistemas de servicios auxiliares de ayuda para la seguridad del estado [29], es decir, sus condiciones de asignación están restringidas a cierto número de operadores entre los cuales el más grande es la Policía Nacional. Las redes de la Policía Nacional en la banda de 800 MHz aún se encuentran en proceso de renovación por lo tanto no se tiene certeza de que estaciones PMP se encuentran funcionando actualmente en esta porción de

espectro ni que permisos de uso se encuentran vigentes. Las razones expuestas anteriormente acotan la aplicación de un mecanismo de cálculo de eficiencia de espectro ya que los resultados obtenidos no serían confiables. Así las cosas, el espectro útil de la banda de 800 MHz para sistemas PMP en Colombia no sería de 36 MHz sino de 30 MHz, los cuales corresponden a la canalización expresada en la Tabla 14 del CNABF.

Esta banda de frecuencias no se abre actualmente a PSO para sistemas PMP y por esta razón la ANE no cuenta con información suficiente de los equipos de radiocomunicaciones que se utilizan actualmente en el país.

3.1.4 Información técnica disponible en el SGE

Las consultas a la base de datos del SGE evidencian un gran número de inconsistencias en la información referente a los sistemas PMP asignados actualmente en Colombia. Un estudio realizado por la ANE en el año 2017 en la banda de 440 - 470 MHz ha dejado en evidencia que existen algunos permisos de uso del espectro consignados en la base de datos del SGE que tienen fechas de vencimiento ya cumplidas, otros que ya se ha solicitado cancelar y/o eliminar y otros cuyas características no se ajustan a las disposiciones de frecuencias establecidas en el CNABF [30].

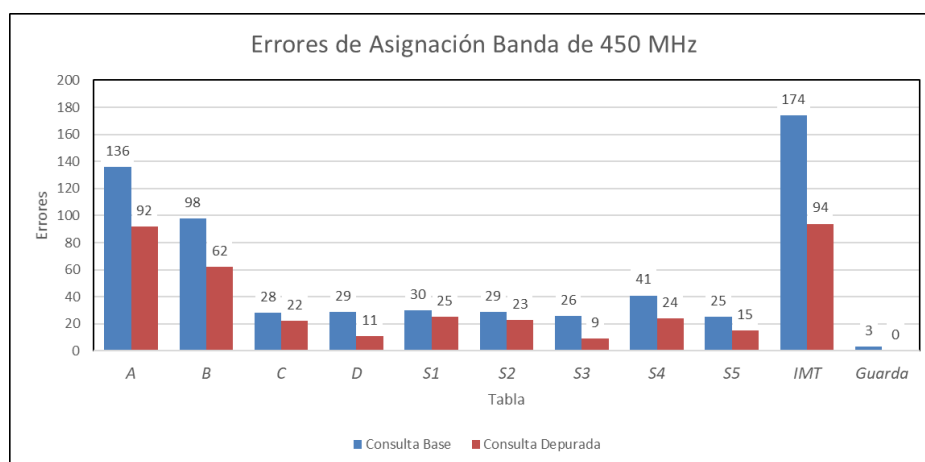


Figura 7. Errores de asignación en la banda de 440 - 470 MHz.

Fuente: ANE.

La Figura 7 muestra las inconsistencias de la información de permisos de uso del espectro en la banda de 440 - 470 MHz otorgados a sistemas PMP, entre la consulta inicial realizada en el SGE y la consulta depurada. La depuración de la información consistió en la exclusión

de información de expedientes cancelados o dados de baja y de información de permisos de uso del espectro que aparecen con fecha de vencimiento ya cumplida, en ambos casos las estaciones PMP aparecían aún en funcionamiento en la mencionada base de datos.

No obstante, la información recolectada de la base de datos del SGE sobre los sistemas PMP resultó vital y muy valiosa para el desarrollo de la propuesta del mecanismo de cálculo de eficiencia del ER. La Tabla 6 muestra la lista de datos extraídos del SGE sobre las estaciones de los sistemas PMP.

Tabla 6. Lista de datos del SGE y su relevancia para la propuesta de mecanismo de cálculo de EUE.

Información del SGE	Uso	Relevancia para la propuesta
Nombre del operador	Informativo	No ofrece información relevante para el cálculo de eficiencia del ER
Código del expediente	Informativo	No ofrece información relevante para el cálculo de eficiencia del ER
Fecha de vencimiento	Clasificadorio	Permite depurar la información extraída del SGE de acuerdo la vigencia de las asignaciones
Número de red	Informativo	No ofrece información relevante para el cálculo de eficiencia del ER
Estado del permiso de la estación	Clasificadorio	Permite depurar la información extraída del SGE de acuerdo la vigencia de las asignaciones
Latitud de la estación	Técnico	Permite ubicar las estaciones y realizar estimaciones de niveles de señal
Longitud de la estación	Técnico	Permite ubicar las estaciones y realizar estimaciones de niveles de señal
Altitud de la estación	Informativo	No ofrece información relevante para el cálculo de eficiencia del ER
Potencia de transmisión	Técnico	Permite realizar estimaciones de niveles de señal
Ganancia de antena	Técnico	Permite realizar estimaciones de niveles de señal
Altura de la antena	Técnico	Permite realizar estimaciones de niveles de señal
Patrón de radiación de la antena	Informativo	No ofrece información relevante para el cálculo de eficiencia
Frecuencia de transmisión	Técnico	Permite realizar estimaciones de niveles de señal y determinar canalizaciones
Frecuencia de recepción	Técnico	Permite realizar estimaciones de niveles de señal y determinar canalizaciones
Ancho de banda	Técnico	Permite determinar las canalizaciones de cada banda de frecuencias
Horas de operación	Informativo	No ofrece información relevante para el cálculo de eficiencia

Información del SGE	Uso	Relevancia para la propuesta
Categoría de estación	Clasificadorio	Permite clasificar la información extraída del SGE de acuerdo al tipo de interferencia

Fuente: propia.

Los datos identificados en la base de datos fueron clasificados en 3 grupos: datos informativos, datos clasificadorios y datos técnicos. Los datos informativos corresponden a datos administrativos de los permisos de uso del espectro y a información técnica de las estaciones que es cargada en masa sin hacer una diferenciación útil. Los datos clasificadorios corresponden a campos descriptores de los permisos de uso del espectro dentro de la base de datos del SGE que permiten identificar los estados y tipos de estaciones de los sistemas PMP para extraer la información útil y vigente. Finalmente, los datos técnicos corresponden a características de las estaciones que permiten estimar los niveles y ubicación geográfica de las señales radioeléctricas y que son de mucha utilidad para la metodología de cálculo de EUE.

3.2 PROPUESTA DE MECANISMO DE CÁLCULO DE EUE EN SISTEMAS PMP

Al igual que se ha hecho en las distintas administraciones que han abordado la definición de EUE a través de aspectos cuantitativos (ver sección 2.4.4.7), el mecanismo de cálculo propuesto en el presente trabajo de grado está basado en las recomendaciones realizadas por la UIT en [12] y acotada según la disponibilidad de datos técnicos de las estaciones de radiocomunicaciones PMP con los que cuenta la ANE, que finalmente es la entidad que aplicará el mecanismo de cálculo que aquí se propone. La EUE se define entonces como:

$$EUE = \frac{M}{U}$$

En donde:

M: cantidad de información transferida por el sistema PMP

U: factor de uso del ER

Como primera medida, en Colombia la ley del sector de telecomunicaciones establece como principio orientador de dicha ley la neutralidad tecnológica. Reza la mencionada ley

“El Estado garantizará la libre adopción de tecnologías, teniendo en cuenta recomendaciones, conceptos y normativas de los organismos internacionales competentes e idóneos en la materia, que permitan fomentar la eficiente prestación de servicios, contenidos y aplicaciones que usen Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y garantizar la libre y leal competencia, y que su adopción sea armónica con el desarrollo ambiental sostenible” [3]. Esto quiere decir que los usuarios del espectro adquieren permisos de uso de dicho recurso, pero es su decisión seleccionar la tecnología que mejor se adapte a sus modelos de negocio y condiciones técnicas propias del mismo recurso (e.g. anchos de banda de canalizaciones, frecuencias de operación, entre otros). Este principio de neutralidad tecnológica es la razón principal por la cual no se cuenta con información en la base de datos del SGE sobre modulación de los sistemas de radiocomunicaciones que actualmente se encuentran funcionando en el país, parámetro que es necesario para calcular la cantidad de información transmitida. Sin embargo, la misma UIT recomienda que para el cálculo de EUE es útil calcular la cantidad de información transmitida mediante el cálculo de la ocupación total de la banda a analizar, de esta manera se propone adoptar esta definición de EUE de la siguiente manera [12]:

$$EUE = \frac{Occ}{B \times S}$$

En donde:

Occ: ocupación total del área geográfica de estudio

B: cantidad total de espectro considerado en la banda de frecuencias de estudio

S: área geográfica de estudio

La Occ está dada en Erlang (E), que es la unidad de intensidad de tráfico, la cual es definida como *“el número de órganos ocupados en un instante dado”* [31], siendo un órgano *“cualquier entidad identificable material o conceptualmente cuya utilización y estado puedan determinarse sin ambigüedad en cualquier instante (por ejemplo, un circuito de telecomunicaciones, un conmutador, una línea de abonado, etc.)”* [31]. En ese sentido, el órgano seleccionado para calcular la Occ es la porción de espectro mínima requerida para canalizar la banda de frecuencias objeto de estudio, el tiempo de ocupación no se tiene en

cuenta ya que las asignaciones de los sistemas PMP todas aparecen en la base de datos de espectro del SGE como ocupadas el 100% del tiempo y la inclusión de este parámetro no tiene ninguna relevancia para los cálculos.

Basados en lo anterior, el cálculo de EUE radica en estimar la ocupación de un área geográfica determinada a lo largo de una banda de frecuencias seleccionada. Para los sistemas PMP, el área geográfica considerada puede ser representada a través de una división matricial [12]. Para calcular la ocupación de la banda se debe determinar entonces la incidencia que tiene cada estación base de los sistemas PMP, extraídas de la base de datos del SGE para cada banda específica, sobre cada una de las celdas que conforman el área geográfica total. Una estación base estará ocupando un área geográfica si el nivel de señal interferente recibido por una estación de referencia, ubicada en el centro de dicha área, no es tolerable. De esta manera, la EUE para sistemas PMP se expresa como:

$$EUE = \frac{1}{(B)x(S_0)x(m)} \times \sum_{j=1}^m F_n(i, j)$$

En donde:

B: cantidad total de espectro útil de la banda frecuencias de estudio (MHz)

S_0 : área geográfica de la celda (km^2)

m: número total de celdas que componen el área geográfica de estudio

n: número de estaciones base PMP asignadas en la banda de frecuencias de estudio

i: longitud de la coordenada del punto central de la celda

j: latitud de la coordenada del punto central de la celda

$F_n(i,j)$: ocupación total de la banda de frecuencias de estudio en la celda de coordenadas (i,j) debida a la estación base número n.

El valor de $(S_0)x(m)$ puede ser reemplazado por el valor de área continental de Colombia en km^2 .

Para calcular la ocupación de la banda de frecuencias también es conveniente realizar una división de su espectro útil en porciones equivalentes al ancho de banda de las canalizaciones establecidas para cada una de ellas. La ocupación total sería entonces la sumatoria de las ocupaciones de estas pequeñas porciones de espectro. De esta manera, la ocupación total de la banda de frecuencias de estudio descrita en la ecuación anterior se expresaría como:

$$F_n(i,j) = \sum_1^k Occ_k$$

En donde:

k: número de porciones del espectro útil de la banda de frecuencias de estudio

Occ_k: Ocupación de la porción de la banda de frecuencias de estudio, su valor es igual a 0 si la estación base de referencia ubicada en las coordenadas (i,j) tolera la interferencia producida por cualquiera de las estaciones base, por el contrario, si no tolera dicha interferencia su valor es igual a 1.

La ocupación total de una zona geográfica involucra tanto al espectro ocupado por un usuario como al espectro que este usuario niega a los demás usuarios del espectro [12], es decir, cuando un usuario adquiere un permiso de uso del espectro en cierta ubicación geográfica, no solo está ocupando la frecuencia usada allí sino también está negando la posibilidad de que otros usuarios hagan uso de las frecuencias adyacentes en una zona geográfica determinada.

La UIT recomienda que para determinar el nivel de una señal interferente se use la siguiente ecuación [32]:

$$P_I = P_T + G_T + G_R - L_P - FDR(\Delta f)$$

En donde:

P_i : potencia de interferencia en el receptor (dBm)

P_T : potencia del transmisor interferente (dBm)

G_T : ganancia de la antena transmisora (dBi)

G_R : ganancia de la antena receptora (dBi)

L_P : pérdidas de propagación (dB)

FDR: rechazo dependiente de la frecuencia (dB)

Δf : separación de frecuencia entre el receptor interferido y el transmisor interferente

Para determinar si un receptor tolera el nivel de señal interferente, la UIT recomienda usar un criterio de relación de protección [32]. Es decir, una interferencia se considera tolerable si cumple con la siguiente ecuación:

$$P_d - P_i \geq \alpha$$

En donde:

P_d : nivel de señal deseada (dBm)

P_i : nivel de señal interferente (dBm)

α : relación de protección

En los sistemas radioeléctricos móviles terrestres se presentan cuatro tipos de interferencia: base a base, base a móvil, móvil a base y móvil a móvil. Si el sistema es simplex efectivamente se presentan los cuatro tipos de interferencia debido a que el sistema usa una única frecuencia. A diferencia de estos, en los sistemas en dúplex solo se presentan las interferencias de base a móvil y móvil a base debido a que los móviles y la base funcionan con diferentes frecuencias. Sin embargo, la interferencia más perjudicial en los sistemas PMP es la de base a base [32], por tal razón, para la propuesta del mecanismo de EUE solamente se tendrán en cuenta datos y cálculos de las estaciones base de los sistemas PMP.

Para que la aplicación del mecanismo de cálculo de EUE propuesto sea válido, se deben asumir condiciones iniciales como que las antenas son omnidireccionales, la cartografía es plana y las coordenadas de la estación base representan el centro del área de cobertura. Lo anterior para poder simplificar el mecanismo y hacerlo viable de ser implementado al reducir el tiempo de ejecución de los cálculos matemáticos a unas pocas horas.

En los puntos siguientes se explicará con más detalle cómo obtener los valores de nivel de señal deseada, relación de protección, pérdidas de propagación y FDR.

3.2.1 Características de estación base receptora

Para elaborar una caracterización de las estaciones de recepción de los sistemas PMP, se obtuvo una lista de los equipos incluidos en las solicitudes de espectro llegadas a la ANE en el marco de los PSO. Con la referencia de los equipos, se procedió a consultar las respectivas hojas de datos de los fabricantes para extraer la información relacionada con sensibilidad, selectividad de canal adyacente y rechazo de espurias, lo cual permitió caracterizar una estación base receptora de referencia para usar en el cálculo de EUE con valores de nivel de señal deseada y curva de selectividad. La lista de equipos consultados, con sus respectivos valores técnicos, se muestra a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7. Información técnica de los receptores en las bandas de 138 - 174 MHz y 440 - 470 MHz funcionando con anchos de banda de 12.5 kHz.

Marca	Modelo	Tipo de receptor	Selectividad de canal adyacente (dB)		Rechazo de espurias (dB)		Sensibilidad (uV)	Sensibilidad (dBm) a 50 Ω
			VHF	UHF	VHF	UHF		
			136-174	403-470	136-174	403-470		
Hytera	RD986	Base	65	65	85	85	0,30	-117,45
Kenwood	TKR-750/850	Base	77	75	90	90	0,45	-113,93
Motorola	DGR6175	Base	65	65	80	80	0,30	-117,45
Motorola	GM300	Base	70	65	80	75	0,35	-116,11
Motorola	SLR5100	Base	68	68	90	90	0,22	-120,14
Kenwood	TK-3402	Móvil	60	60	70	70	0,25	-119,03
Motorola	DGM4100	Móvil	50	50	75	75	0,30	-117,45
Motorola	DGM5000	Móvil	50	50	80	75	0,30	-117,45
Motorola	DGM8000	Móvil	50	50	80	75	0,30	-117,45
Motorola	DGP8000	Móvil	60	60	70	70	0,30	-117,45

Marca	Modelo	Tipo de receptor	Selectividad de canal adyacente (dB)		Rechazo de espurias (dB)		Sensibilidad (uV)	Sensibilidad (dBm) a 50 Ω
			VHF	UHF	VHF	UHF		
			136-174	403-470	136-174	403-470		
Motorola	EM200	Móvil	65	60	75	70	0,35	-116,11
Motorola	MCS2000	Móvil	65	60	80	80	0,30	-117,45
Hytera	PD786	Portátil	60	60	70	70	0,30	-117,45
Kenwood	NX-240/340	Portátil	60	60	70	70	0,30	-117,45
Kenwood	TK-2404	Portátil	60	60	70	70	0,25	-119,03
Motorola	DGP5000	Portátil	60	60	70	70	0,30	-117,45
Motorola	PRO7150	Portátil	60	60	70	70	0,25	-119,03
			Valor mínimo 50 dB		Valor mínimo 70 dB		Valor máximo -113,93 dBm	

Fuente: adaptado de hojas de datos de fabricantes de equipos.

Para establecer las características técnicas de la estación receptora de referencia, a ser utilizada en el mecanismo de cálculo de EUE, se optó por escoger los valores menos restrictivos entre la muestra de equipos proporcionados por la ANE para que los cálculos realizados representen el peor de los casos de interferencia a la hora de determinar la ocupación del espectro. En cuanto a la altura y ganancia de las antenas de la estación receptora se optó por seleccionar la moda de las estaciones base de los sistemas PMP extraídos de la base de datos del SGE, es decir, los valores de altura y ganancia de la antena más comunes entre todas las estaciones base PMP con permisos otorgados de uso del espectro.

Las características técnicas establecidas para la estación receptora de referencia de los sistemas PMP se muestran a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8. Características técnicas de la estación receptora de referencia de los sistemas PMP.

Parámetro	Valor
Altura de la antena	10 m
Ganancia de la antena	9 dBi
Sensibilidad	-113,93 dBm
Selectividad de canal adyacente	50 dB
Rechazo de espurias	70 dB

Fuente: propia.

3.2.2 Relación de protección

Para obtener el valor del criterio de relación de protección se extrajo la información contenida en el Código de Regulación Federal (CFR, por sus siglas en inglés) de USA en su Título 47, el cual trata sobre telecomunicaciones y es emitido por la FCC. Dentro de este título en el Capítulo 1, Subcapítulo D, Subparte H y Parte 90.187, se establecen los contornos de servicio y de interferencia para las bandas de 150 - 174 MHz y 421 - 512 MHz para los sistemas móviles terrestres. En dicha normatividad se establece, para los sistemas móviles PMP, un contorno de servicio en valores de 37 y 39 dBu para la primera y segunda banda respectivamente, de igual forma se establece un contorno de interferencia en valores de 19 y 21 dBu respectivamente [33]. Esto quiere decir que la relación de protección para estos sistemas es de 18 dB y este valor es el que se propone usar para la aplicación del mecanismo de cálculo de EUE para estimar la ocupación total de la respectiva banda de frecuencias de estudio.

3.2.3 Pérdidas de propagación

La UIT recomienda que para determinar las pérdidas de propagación se use el modelo de espacio libre combinado con el modelo de propagación por difracción [32]. De esta manera las pérdidas de propagación para los sistemas PMP pueden calcularse a través de la siguiente ecuación:

$$L_p = FSL - L_{DIF/FSL}$$

En donde:

L_p : pérdidas de propagación (dB)

FSL : pérdidas por espacio libre (dB)

$L_{DIF/FSL}$: relación entre la atenuación por difracción y la atenuación en el espacio libre (dB), el cual es un valor generalmente negativo

Ahora bien, la UIT recomienda que la relación entre la atenuación por difracción y la atenuación en el espacio libre está dada por [34]:

$$L_{DIF/FSL} = F(X) + G(Y1) + G(Y2)$$

En donde:

$F(X)$: término de ganancia dependiente de la distancia normalizada entre estaciones de base

$G(Y1)$, $G(Y2)$: términos de ganancia dependientes de las alturas de antena normalizadas de las estaciones de base

X : distancia normalizada entre las antenas de las estaciones de base

$Y1$, $Y2$: alturas de antena normalizadas

Así mismo, la distancia entre antenas y las alturas de antena dadas en valores normalizados se expresan como [34]:

$$X = 2,188x\beta x f^{1/3} x a_e^{-2/3} d$$

$$Y = 9,575x10^{-3} x \beta x f^{2/3} x a_e^{-1/3} h$$

En donde:

β : constante de la naturaleza del suelo y la polarización. Con polarización horizontal en todas las frecuencias y con polarización vertical por encima de 20 MHz sobre tierra, se puede considerar que β es igual a 1

f : frecuencia en (MHz)

a_e : radio equivalente de la tierra (km), el cual corresponde un valor del radio de la tierra de 6371 km multiplicado por un factor de corrección de 4/3

d : distancia entre estaciones base PMP (km)

h : altura de la antena (m)

Por último, los términos de distancia $F(X)$ y ganancias de altura de la antena $G(Y)$ están dados por las expresiones [34]:

$$F(X) = 11 + \text{Log}(X) - 17,6X \quad \text{para } X \geq 1,6$$

$$F(X) = -20\text{Log}(X) - 5,6488X^{1,425} \quad \text{para } X < 1,6$$

$$G(Y) \cong 17,6(Y - 1,1)^{1/2} - 5\text{Log}(Y - 1,1) - 8 \quad \text{para } Y > 2$$

$$G(Y) \cong 20\text{Log}(Y + 0,1Y^3) \quad \text{para } Y \leq 2$$

3.2.4 FDR

El Rechazo Dependiente de la Frecuencia (FDR, por sus siglas en inglés) es una medida de que tanto rechazo proporciona la curva de selectividad de un receptor cuando este es interferido por una señal de un transmisor no deseado [32]. La UIT expresa el FDR [32] como:

$$FDR(\Delta f) = OTR + OFR(\Delta f)$$

En donde:

Δf : diferencia entre la frecuencia sintonizada de la fuente de interferencia y la frecuencia sintonizada del receptor

OTR: rechazo en sintonía (del inglés On-Tune Rejection)

OFR: rechazo fuera de frecuencia (del inglés Off-Frequency Rejection)

OTR corresponde al rechazo proporcionado por la selectividad del receptor sobre la emisión del transmisor sintonizado en la misma frecuencia como consecuencia de que el espectro emitido excede el ancho de banda del receptor [35], el valor se expresa en decibelios (dB). Por otra parte, OFR corresponde al rechazo adicional causado por la no sintonía del transmisor con respecto al receptor [35], también se expresa en decibelios (dB).

Para lograr estimar los valores de OTR y OFR la NTIA de USA a dispuesto un software que utiliza el método de integración Gauss-Legendre en cuadratura [35], el cual lleva por nombre FDR y hace parte de una colección de programas usados para administrar el espectro llamado Modelos de Análisis de Espectro por Microcomputadora (MSAM, por sus

siglas en inglés). Este software puede descargarse y usarse gratuitamente desde el link <http://ntiacsd.ntia.doc.gov/msam/FDR/FDR.zip>.

The screenshot shows the 'FDR - Frequency Dependent Rejection' software window. It has a menu bar with 'File', 'Compute', 'Units', and 'Help'. The interface is divided into several sections:

- Output Stepping Options:** Includes input fields for 'Initial delta F (frequency):' (set to -50 kHz), 'Delta F step size:' (set to 1 kHz), and 'Number of steps (<= 100):' (set to 100).
- Receiver Specs:** Includes a 'Description:' field (set to Rx), 'Right extrapolation slope (>= 0.0):' (set to 0 dB/decade), 'Left extrapolation slope (>= 0.0):' (set to 0 dB/decade), and 'Effective antenna height:' (set to 20 meters). There is a 'Rx Selectivity Pts' button.
- Transmitter Specs:** Includes a 'Transmitter description:' field (set to Tx), '-3 dB bandwidth (> 0.0):' (set to 12.5 kHz), 'Left extrapolation slope (<= 0.0):' (set to 0 dB/decade), and 'Right extrapolation slope (<= 0.0):' (set to 0 dB/decade). There is a 'Tx Emission Pts' button.
- Buttons:** 'Calculate' and 'View Graphs' buttons are located below the transmitter specs.
- Data Output Window:** A scrollable text area titled 'Frequency Dependent Rejection Transmitter Data' showing the following text:


```
Transmitter: Tx
-3dB Bandwidth: 12,5
Emission Curve Left Extrapolation Slope: 0 dB/Decade
Emission Curve Right Extrapolation Slope: 0 dB/Decade
Number of Points on Emission Curve: 8
Emission Curve:

      KHz      dB      KHz      dB
-20.00    -70.0    -12.50    -70.0
```
- Bottom Buttons:** 'Clear Output', 'Print', and 'Save to File' buttons are at the bottom.

Figura 8. Formulario de cálculo del FDR en el software MSAM FDR.

Fuente: NTIA

El MSAM FDR requiere como datos iniciales la curva de emisión del transmisor, la curva de selectividad del receptor, el ancho de banda a 3 dB del transmisor y la altura efectiva de la antena del receptor entre otros parámetros generales, en la Figura 8 se puede observar el formulario completo con los datos requeridos para realizar el cálculo en el mencionado software.

Para obtener la curva de emisión del transmisor se extrajo la información contenida en el CFR de USA en su Título 47, el cual trata sobre telecomunicaciones y es emitido por la FCC. Dentro de este título en el Capítulo 1, Subcapítulo D, Subparte I y Parte 90.210, se establecen las máscaras de emisión permitidas de los transmisores que componen los sistemas de radiocomunicaciones PMP. Allí se establece que los sistemas que funcionan

en las bandas de frecuencias de 150 - 174 MHz y 421 - 512 MHz con anchos de banda de 12.5 kHz requieren una máscara de emisión D [36].

La máscara de emisión D establece que el transmisor debe atenuar 0 dB las emisiones contenidas en cualquier frecuencia alejada hasta 5.625 kHz del centro del ancho de banda autorizado, al menos 20 dB las emisiones contenidas en cualquier frecuencia alejada entre 5.625 y 12.5 kHz del centro del ancho de banda autorizado y 70 dB las emisiones contenidas en cualquier frecuencia alejada más de 12.5 kHz del centro del ancho de banda autorizado; esto se puede observar mejor en la Tabla 9.

Tabla 9. Mascara de emisión establecida en el CFR para los transmisores de sistemas PMP que funcionan en las bandas de 150 - 174 MHz y 421 - 512 MHz.

ΔF (kHz)	Atenuación (dB)
-30	-70
-12,5	-70
-5,626	-20
-5,625	0
5,625	0
5,626	-20
12,5	-70
30	-70

Fuente: adaptado de [36].

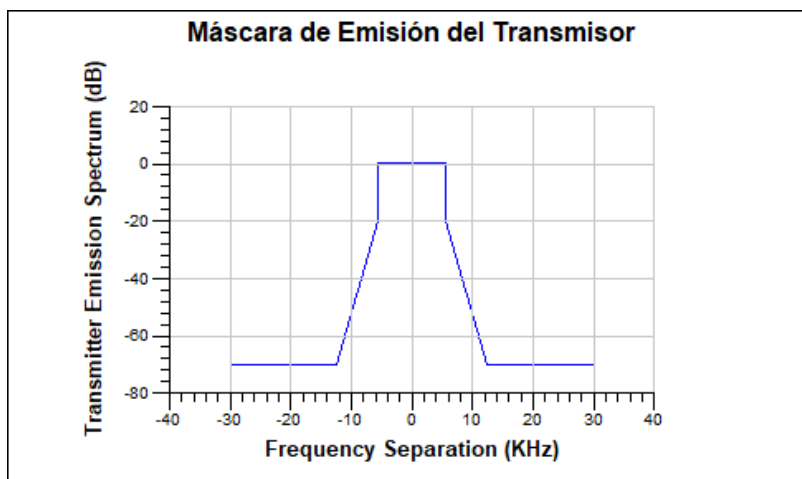


Figura 9. Máscara de emisión típica del transmisor de un sistema PMP en bandas VHF y UHF.

Fuente: propia.

El resultado de cargar la máscara de emisión del transmisor en el software MSAM DFR se puede observar en la Figura 9.

La curva de selectividad del receptor fue elaborada a partir de la información técnica contenida en las hojas de datos de los equipos más utilizados en los sistemas autorizados de comunicaciones PMP en Colombia. La referencia de los equipos fue extraída de las solicitudes de espectro analizadas por la ANE dentro de los PSO. Las características técnicas establecidas para la estación receptora de referencia de los sistemas PMP se muestran en la Tabla 8, con los cuales se elaboró la máscara de selectividad del receptor descrita en la Tabla 10.

Tabla 10. Máscara de selectividad del receptor típica de los sistemas PMP en Colombia.

ΔF (kHz)	Selectividad (dB)
-30	70
-12,5	50
-5,626	3
-5,625	0
5,625	0
5,626	3
12,5	50
30	70

Fuente: propia.

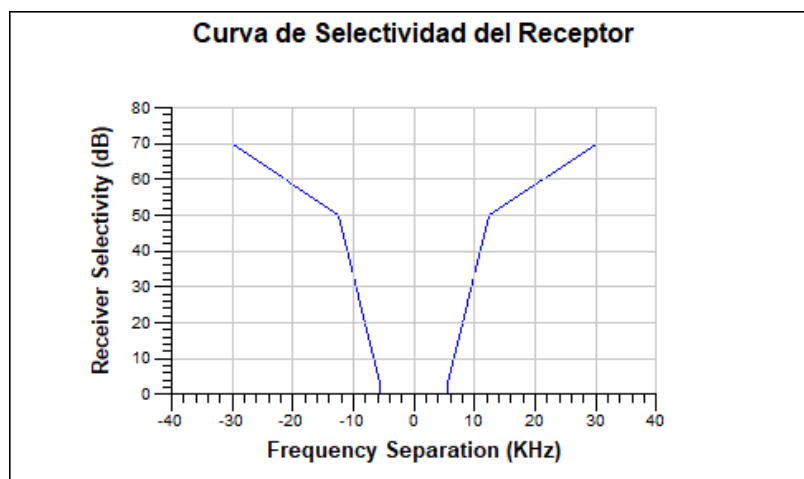


Figura 10. Curva de selectividad típica del receptor de un sistema PMP en bandas VHF y UHF.

Fuente: propia.

El resultado de cargar los datos de selectividad del receptor en el software MSAM DFR se puede observar en la Figura 10.

El resultado final del cálculo de FDR realizado a través del software MSAM FDR se puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11. Valor de FDR típico de los sistemas PMP en bandas VHF y UHF.

ΔF (kHz)	OFR (dB)	FDR (dB)	ΔF (kHz)	OFR (dB)	FDR (dB)	ΔF (kHz)	OFR (dB)	FDR (dB)
-50	66,4	66,4	-16	47,5	47,5	18	52,7	52,7
-49	66,4	66,4	-15	41,2	41,2	19	54,3	54,3
-48	66,4	66,4	-14	33,6	33,6	20	55,8	55,8
-47	66,4	66,4	-13	25,3	25,3	21	57,2	57,3
-46	66,4	66,4	-12	15,9	15,9	22	58,5	58,6
-45	66,4	66,4	-11	7,5	7,5	23	59,7	59,7
-44	66,4	66,4	-10	5,7	5,8	24	60,8	60,8
-43	66,4	66,4	-9	4,5	4,5	25	61,8	61,8
-42	66,4	66,4	-8	3,5	3,5	26	62,9	62,9
-41	66,4	66,4	-7	2,7	2,7	27	63,8	63,8
-40	66,5	66,5	-6	2,2	2,2	28	64,5	64,5
-39	66,5	66,5	-5	1,8	1,8	29	65,1	65,1
-38	66,6	66,6	-4	1,3	1,4	30	65,5	65,5
-37	66,6	66,6	-3	1	1	31	65,9	65,9
-36	66,5	66,5	-2	0,6	0,6	32	66,1	66,1
-35	66,4	66,4	-1	0,3	0,3	33	66,2	66,2
-34	66,3	66,3	0	0	0	34	66,3	66,3
-33	66,2	66,2	1	0,3	0,3	35	66,4	66,4
-32	66,1	66,1	2	0,6	0,6	36	66,5	66,5
-31	65,9	65,9	3	1	1	37	66,6	66,6
-30	65,5	65,5	4	1,3	1,4	38	66,6	66,6
-29	65,1	65,1	5	1,8	1,8	39	66,5	66,5
-28	64,5	64,5	6	2,2	2,2	40	66,5	66,5
-27	63,8	63,8	7	2,7	2,7	41	66,4	66,4
-26	62,9	62,9	8	3,5	3,5	42	66,4	66,4
-25	61,8	61,8	9	4,5	4,5	43	66,4	66,4
-24	60,8	60,8	10	5,7	5,8	44	66,4	66,4
-23	59,7	59,7	11	7,5	7,5	45	66,4	66,4
-22	58,5	58,6	12	15,9	15,9	46	66,4	66,4
-21	57,2	57,3	13	25,3	25,3	47	66,4	66,4

ΔF (kHz)	OFR (dB)	FDR (dB)	ΔF (kHz)	OFR (dB)	FDR (dB)	ΔF (kHz)	OFR (dB)	FDR (dB)
-20	55,8	55,8	14	33,6	33,6	48	66,4	66,4
-19	54,3	54,3	15	41,2	41,2	49	66,4	66,4
-18	52,7	52,7	16	47,5	47,5	-	-	-
-17	51,4	51,4	17	51,4	51,4	-	-	-

Fuente: propia.

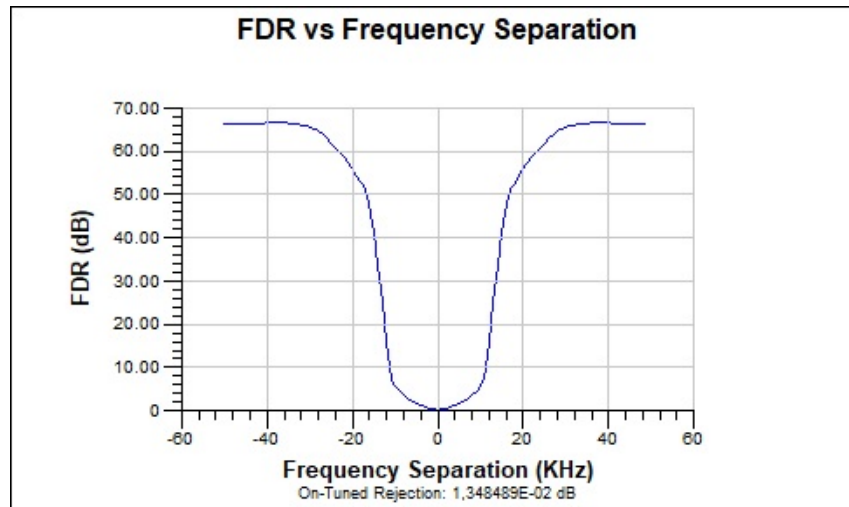


Figura 11. Curva típica de FDR con respecto a la separación entre frecuencias de transmisión y recepción de los sistemas PMP en bandas VHF y UHF.

Fuente: propia.

La curva de FDR con respecto a la separación entre las frecuencias de transmisión y recepción elaborada a través del software MSAM DFR se puede observar en la Figura 11.

Finalmente, para determinar los valores de FDR de los dos primeros canales adyacentes, se realizó un promedio de los valores obtenidos dentro del rango de frecuencias comprendido por cada canal, los resultados fueron 26,6 dB para el primer canal adyacente y 61,23 dB para el segundo canal adyacente. Respecto al valor de FDR cocanal, por ser un valor tan cercano a cero se asumió como 0 dB.

Los valores de FDR seleccionados para ser utilizados en el cálculo de la potencia de interferencia en el receptor de los sistemas PMP pueden observarse a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores de FDR para cálculos de interferencia cocanal, de 1er canal adyacente y 2do canal adyacente entre sistemas PMP en bandas VHF y UHF.

Tipo de FDR	FDR (dB)
Cocanal	0
1er canal adyacente	26,6
2do canal adyacente	61,23

Fuente: propia.

3.2.5 Datos necesarios para la aplicación de la propuesta

A continuación, se listan los parámetros necesarios para calcular el valor de EUE descritos en la propuesta de mecanismo presentada.

Tabla 13. Parámetros necesarios para el cálculo de EUE de sistemas licenciados PMP en Colombia.

Parámetro	Unidades	Valor
Espectro útil de la banda de frecuencias	MHz	31,7 para 138 - 174 MHz 15,575 para 440 - 470 MHz 30 para 800 MHz
Área geográfica de la celda de muestreo	Km ²	Depende del muestreo seleccionado para el área de estudio
Número total de celdas	-	Depende del muestreo seleccionado para el área de estudio
Latitud de coordenadas de las celdas	Grados decimales	Dependen del muestreo seleccionado para el área de estudio
Longitud de coordenadas de las celdas	Grados decimales	Dependen del muestreo seleccionado para el área de estudio
Latitud de coordenadas de estaciones base PMP	Grados decimales	Se extraen de la base de datos del SGE
Longitud de coordenadas de las estaciones base PMP	Grados decimales	Se extraen de la base de datos del SGE
Potencia de transmisión de las estaciones base	dBm	Se extraen de la base de datos del SGE
Ganancia de las antenas transmisoras	dBi	Se extraen de la base de datos del SGE
Ganancia de la antena receptora de referencia	dBi	9
Altura de las antenas transmisoras	m	Se extraen de la base de datos del SGE
Altura de la antena receptora de referencia	m	10
Frecuencia de transmisión de las estaciones base	MHz	Se extraen de la base de datos del SGE
Frecuencia de recepción de las estaciones base	MHz	Se extraen de la base de datos del SGE

Parámetro	Unidades	Valor
Relación de protección	dB	18
FDR	dB	0 para el mismo canal 26,6 para el 1er canal adyacente 61,23 para el 2do canal adyacente

Fuente: propia.

4 DETERMINACIÓN DE LA EUE EN SISTEMAS PMP ASIGNADOS EN COLOMBIA

En el presente capítulo se realizará el cálculo de eficiencia en el uso del ER (EUE) en las tres bandas de frecuencias en las que funciona actualmente los sistemas PMP en Colombia. En primer lugar, se establecerán las condiciones iniciales de muestreo de área geográfica y espectro útil necesarios para realizar los cálculos. Seguido a esto, se presentarán de manera gráfica los resultados del cálculo de EUE en cada una de las bandas de frecuencias donde existen permisos de uso del espectro para sistemas PMP otorgados por el MINTIC en el país.

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos de ER a través de todo el territorio continental colombiano.

4.1 ÁREA GEOGRÁFICA DE MUESTREO

El mecanismo de cálculo de EUE propuesto aplica sobre toda el área continental de Colombia, la cual es de 1'141.748 km² [37].

Para poder aplicar el mecanismo de cálculo es necesario dividir el área continental de Colombia en pequeñas subáreas. El valor de división del territorio nacional se escogió arbitrariamente de tal manera que se tuviera un número de muestras considerables y al mismo tiempo se facilitara la realización de los cálculos matemáticos y la división misma del territorio.

De esta manera, para estandarizar la toma de muestras sobre el territorio nacional, se decidió establecer una distancia de medición equivalente a 0.05 grados decimales ya que la información de las estaciones de los sistemas PMP también se tiene en coordenadas geográficas extraídas de la base de datos en grados decimales. Los extremos noroccidental, nororiental, suroccidental y suroriental que delimitan todo el territorio nacional se muestran a continuación en la Tabla 14.

Tabla 14. Coordenadas que limitan el territorio colombiano.

Extremo	Latitud (° decimales)	Longitud (° decimales)
Noroccidental	13,4	-81,75
Nororiental	13,4	-66,85
Suroccidental	-4,25	-81,75
Suroriental	-4,25	-66,85

Fuente: propia.

Con la delimitación del territorio nacional colombiano y la distancia de muestreo establecida en 0,05 grados decimales, se obtiene una matriz territorial de medición de 299x354 celdas o subáreas. Aunque el número de subáreas inicial es de 105846, algunas de ellas representan territorio marítimo, por lo cual se realizó una depuración para establecer el número definitivo de subáreas a incluir en los cálculos de EUE, subáreas que representan entonces territorio continental colombiano que en definitiva es donde se podrían instalar nuevas estaciones de sistemas PMP, es decir, corresponderían al espacio denegado del cual se habla en el mecanismo de cálculo del capítulo 3. Este número final de subáreas continentales es de 37270.

4.2 PORCIÓN DE ESPECTRO DE MUESTREO

El mecanismo de cálculo de EUE propuesto aplica sobre los sistemas PMP asignados en Colombia, que actualmente solo se encuentran consignados en la base de datos de espectro en 3 bandas de frecuencias principalmente: 138 - 174 MHz, 440 - 470 MHz y 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz. Como se mencionó en las secciones 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 del presente documento, el espectro útil de estas tres bandas de frecuencias es de 31.7, 15.575 y 30 MHz respectivamente. Respecto al órgano seleccionado para calcular la ocupación total de las bandas (necesario para establecer la unidad de Erlang - E), se seleccionó una porción de espectro de 12.5 kHz, la cual corresponde al valor mínimo de las canalizaciones de las bandas de los sistemas PMP asignados en Colombia.

De esta manera, el espectro útil de cada banda se subdividió en pequeñas porciones de 12,5 kHz para evaluar la ocupación en cada una de ellas a través de la estimación de la potencia interferente y el criterio de relación de protección descritos en la secciones 3.2 y 3.2.2 del presente documento. Así entonces, las bandas de los sistemas PMP se subdividieron como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Divisiones del espectro útil de las bandas de los sistemas PMP.

Banda de Frecuencias	Espectro útil (MHz)	Porciones de 12,5 kHz
138 - 174 MHz	31,7	2536
440 - 470 MHz	15,575	1246
806 - 821 MHz y 851 - 866 MHz	30	2400

Fuente: propia.

4.3 APLICACIÓN DEL MECANISMO DE CÁLCULO PROPUESTO

El cálculo de EUE de los sistemas PMP se realizó a través de una herramienta desarrollada en el software Excel de Microsoft Office habilitada para macros en lenguaje Visual Basic para Aplicaciones (VBA, por sus siglas en inglés), esta herramienta se describirá con más detalle en la sección 5.2.1. Los resultados de la aplicación del mecanismo propuesto se muestran a continuación.

4.3.1 EUE en la banda de 138 - 174 MHz

La banda de frecuencias de 138 - 174 MHz tiene en la base de datos del SGE un total de 10557 estaciones base de sistemas PMP actualmente asignados en Colombia. La información extraída del SGE es del 17 de agosto del 2018.

Sobre cada una de las 37270 subáreas geográficas, que representan el territorio continental colombiano, se evaluó la incidencia de las 10557 estaciones base de los sistemas PMP para determinar la ocupación de cada una de las 2536 porciones de espectro útil de la banda de frecuencias. Para cada estación base se evaluó tanto la frecuencia de transmisión como la frecuencia de recepción ya que el sistema PMP lo componen tanto las estaciones base como las estaciones móviles, adicionalmente, se evaluaron las frecuencias superior e inferior del primer canal adyacente y las frecuencias superior e inferior del segundo canal adyacente. Esto quiere decir que cada estación base puede generar ocupación hasta sobre 10 porciones de espectro útil debido a que los sistemas PMP de esta banda usan un ancho de banda de canalización de 12,5 kHz. La ocupación se calculó usando la ecuación de relación de protección $P_d - P_i \geq \alpha$, descrita en la sección 3.2, para cada porción de espectro mínima en la banda útil de frecuencias.

Los valores obtenidos de EUE en la banda de frecuencias de 138 - 174 MHz a través de todo el territorio continental nacional se pueden observar a continuación en la Figura 12.

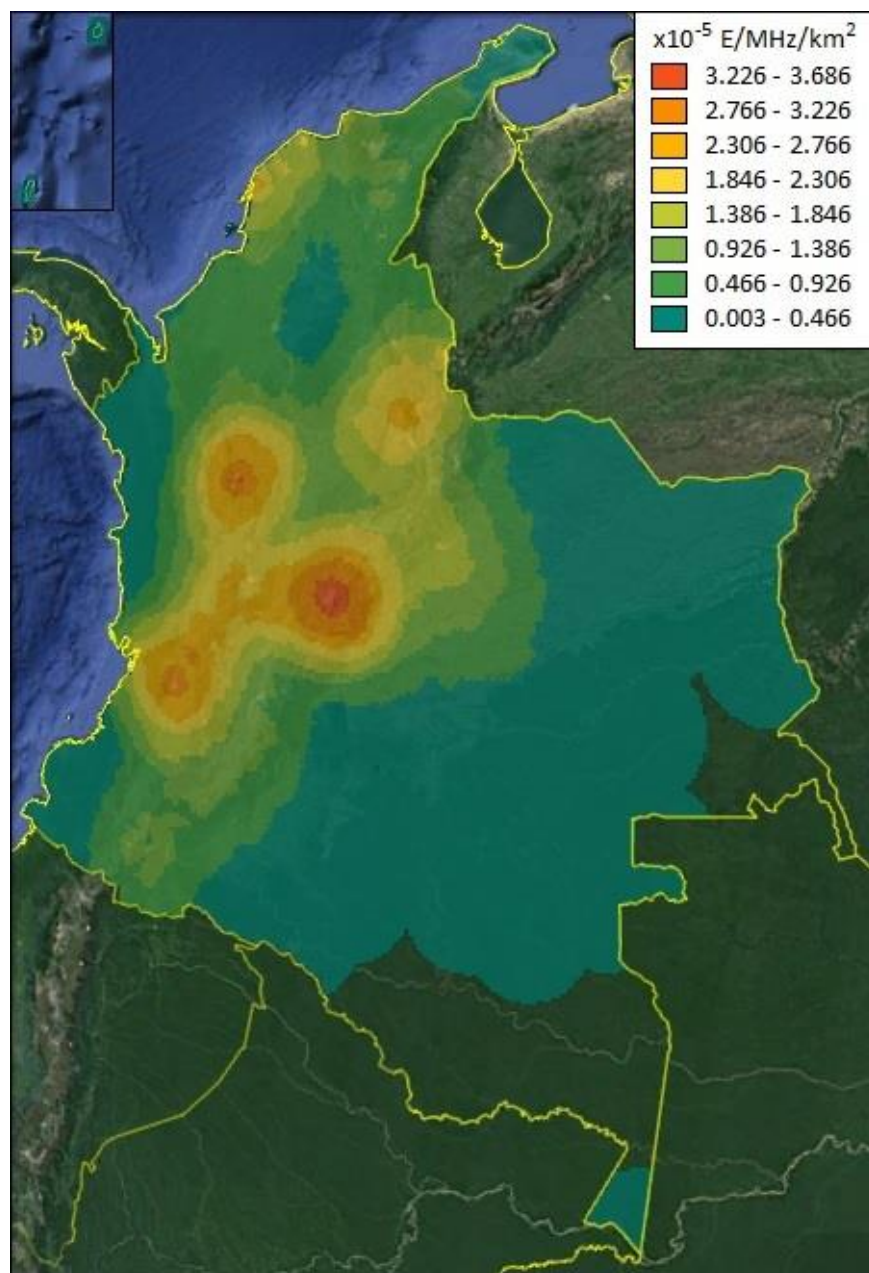


Figura 12. EUE en la banda de 138 - 174 MHz.

Fuente: propia.

4.3.2 EUE en la banda de 440 - 470 MHz

La banda de frecuencias de 440 - 470 MHz tiene en la base de datos del SGE un total de 5448 estaciones base de sistemas PMP actualmente asignados en Colombia. La información extraída del SGE es del 17 de agosto del 2018.

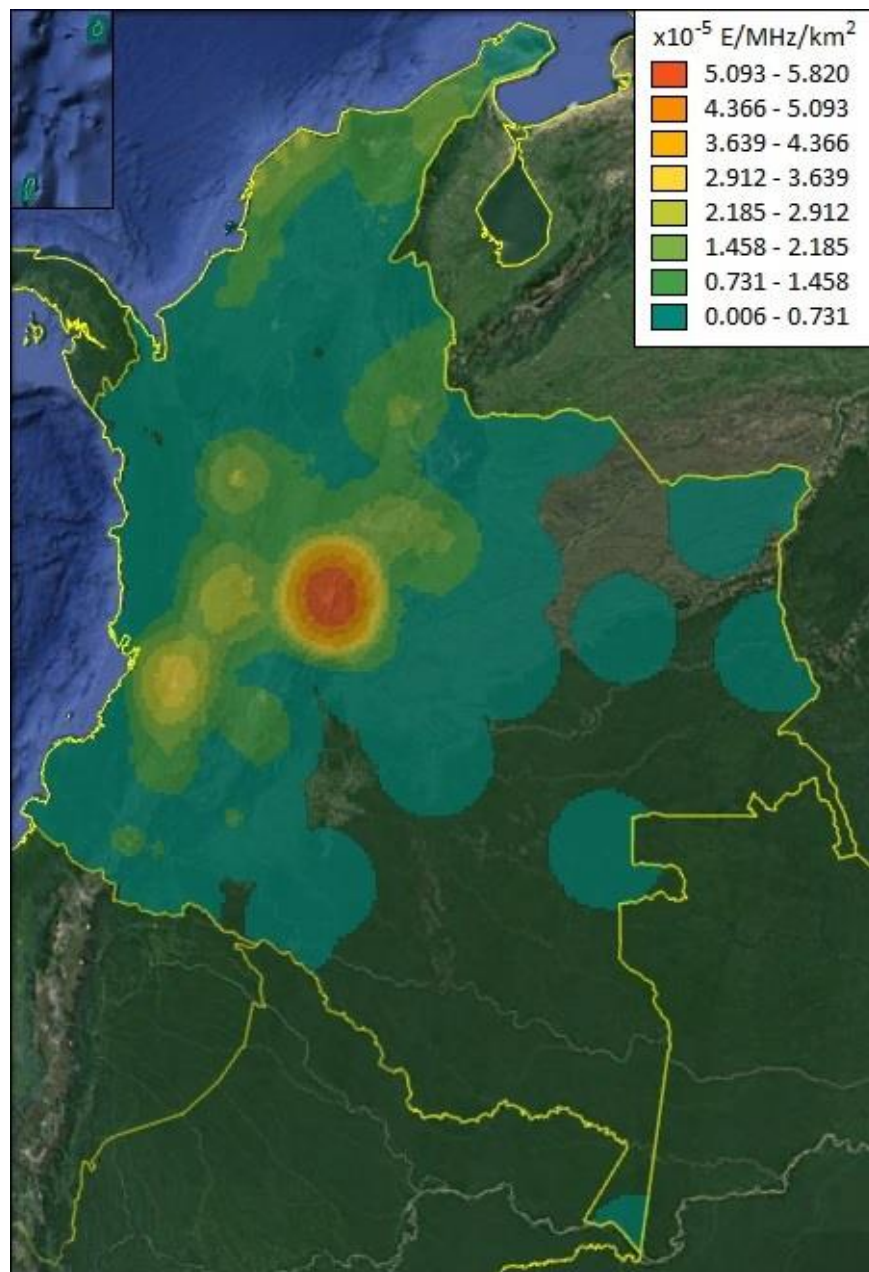


Figura 13. EUE en la banda de 440 - 470 MHz.

Fuente: propia.

Sobre cada una de las 37270 subáreas geográficas, que representan el territorio continental colombiano, se evaluó la incidencia de las 5448 estaciones base de los sistemas PMP para determinar la ocupación de cada una de las 1246 porciones de espectro útil de la banda de frecuencias. Para cada estación base se evaluó tanto la frecuencia de transmisión como la frecuencia de recepción ya que el sistema PMP lo componen tanto las estaciones base como las estaciones móviles, adicionalmente, se evaluaron las frecuencias superior e inferior del primer canal adyacente y las frecuencias superior e inferior del segundo canal adyacente. Esto quiere decir que cada estación base puede generar ocupación hasta sobre 10 porciones de espectro útil debido a que los sistemas PMP de esta banda usan un ancho de banda de canalización de 12,5 kHz. La ocupación se calculó usando la ecuación de relación de protección $P_d - P_i \geq \alpha$, descrita en la sección 3.2, para cada porción de espectro mínima en la banda útil de frecuencias.

Los valores obtenidos de EUE en la banda de frecuencias de 440 - 470 MHz a través de todo el territorio continental nacional se pueden observar en la Figura 13.

4.3.3 EUE en la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz

La banda de frecuencias de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz tiene en la base de datos del SGE un total de 17987 estaciones base de sistemas PMP actualmente asignados en Colombia. La información extraída del SGE es del 17 de agosto del 2018.

Sobre cada una de las 37270 subáreas geográficas, que representan el territorio continental colombiano, se evaluó la incidencia de las 17987 estaciones base de los sistemas PMP para determinar la ocupación de cada una de las 2400 porciones de espectro útil de la banda de frecuencias. Para cada estación base se evaluó tanto la frecuencia de transmisión como la frecuencia de recepción ya que el sistema PMP lo componen tanto las estaciones base como las estaciones móviles, adicionalmente, se evaluaron las frecuencias superior e inferior del primer canal adyacente y las frecuencias superior e inferior del segundo canal adyacente. Esto quiere decir que cada estación base puede generar ocupación hasta sobre 20 porciones de espectro útil debido a que los sistemas PMP de esta banda usan un ancho de banda de canalización de 25 kHz. La ocupación se calculó usando la ecuación de relación de protección $P_d - P_i \geq \alpha$, descrita en la sección 3.2, para cada porción de espectro mínima en la banda útil de frecuencias.

Los valores obtenidos de EUE en la banda de frecuencias de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz a través de todo el territorio continental nacional se pueden observar a continuación en la Figura 14.

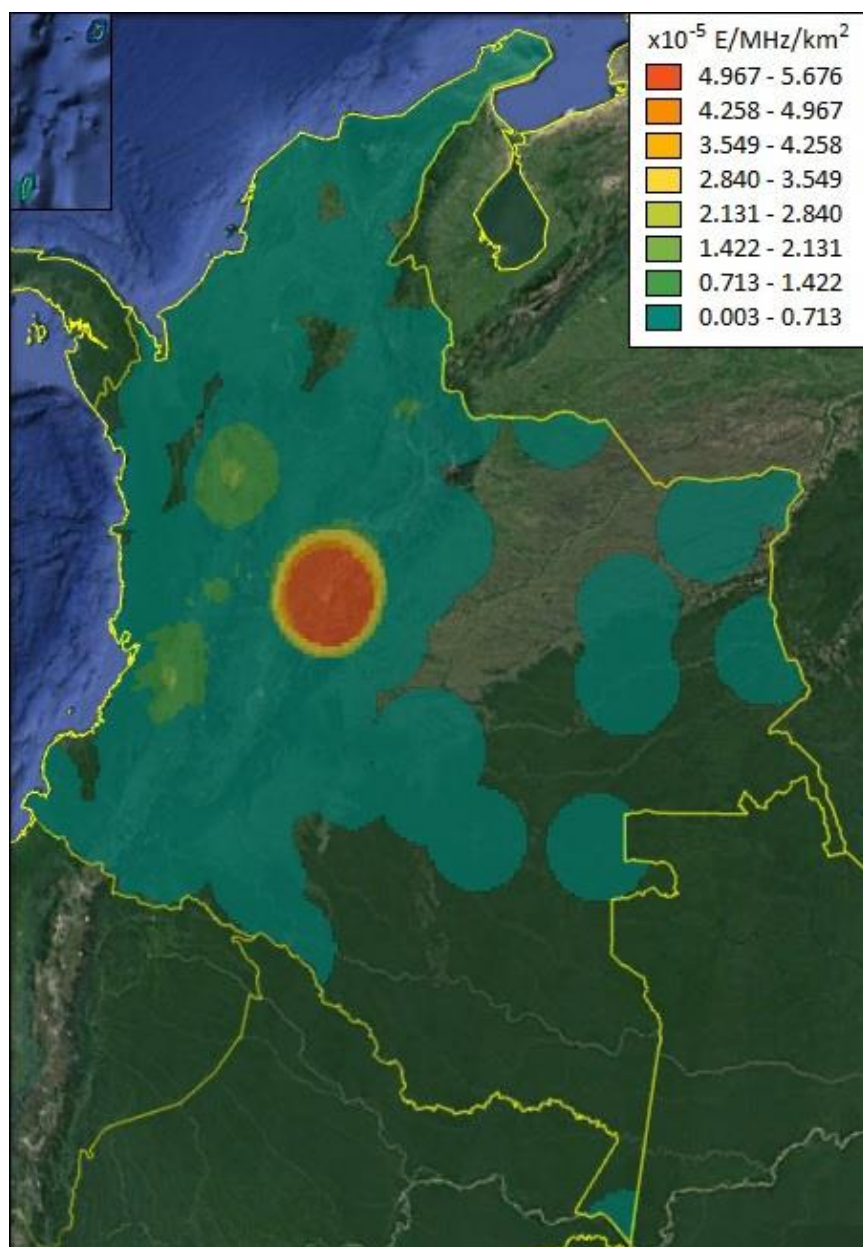


Figura 14. EUE en la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz.

Fuente: propia.

4.3.4 Descripción de los resultados

Cabe iniciar mencionando que, al momento de aplicar del mecanismo de cálculo, de EUE de los sistemas PMP, la base de datos de espectro del SGE contenía 10557 estaciones base con permisos de uso del espectro en la banda de 138 - 174 MHz, mientras que este valor era de 5448 y 17987 para las bandas de frecuencias de 440 - 470 MHz y 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz respectivamente, lo que quiere decir que la banda de frecuencias de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz contiene cerca de la mitad de estos permisos de uso del espectro. La distribución de permisos de uso del espectro de las estaciones base de los sistemas PMP en Colombia se puede observar a continuación en Figura 15.

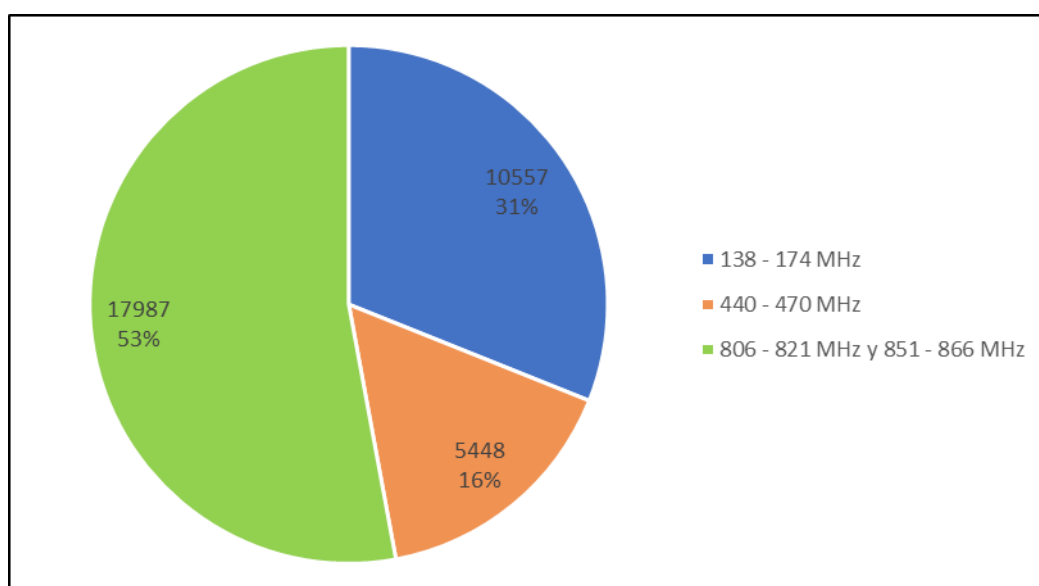


Figura 15. Distribución de permisos de uso del espectro de las estaciones base de los sistemas PMP en Colombia.

Fuente: propia.

Luego de calcular la EUE de los sistemas PMP se observa que en las tres bandas de estudio se presenta una concentración de valores altos de Erlang/MHz/km² en la zona centro del país.

Respecto a la banda de 138 - 174 MHz, se obtuvo un valor máximo de EUE de 3.686×10^{-5} Erlang/MHz/km² ubicado en la ciudad de Bogotá. Por otro lado, se evidenció que los valores de EUE en la mayor parte de los departamentos de Amazonas, Arauca, Caquetá, Chocó,

Guainía, Guaviare, Putumayo, Vaupés, Vichada y el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, es nulo o muy bajo, con valores de máximo 0.466×10^{-5} Erlang/MHz/km², lo que quiere decir que el uso del espectro en esas zonas no es significativo. Como era de esperarse, se evidenció que la EUE es más alta en algunas de las ciudades con mayor población en Colombia (ver Figura 16); destacan Bogotá y en menor medida Medellín, sin embargo, ciudades como Armenia, Barranquilla, Bucaramanga, Buga, Cali, Cartagena, Cúcuta, Ibagué, Pereira, Santa Marta, Tuluá y Villavicencio muestran un buen uso del espectro en la banda.

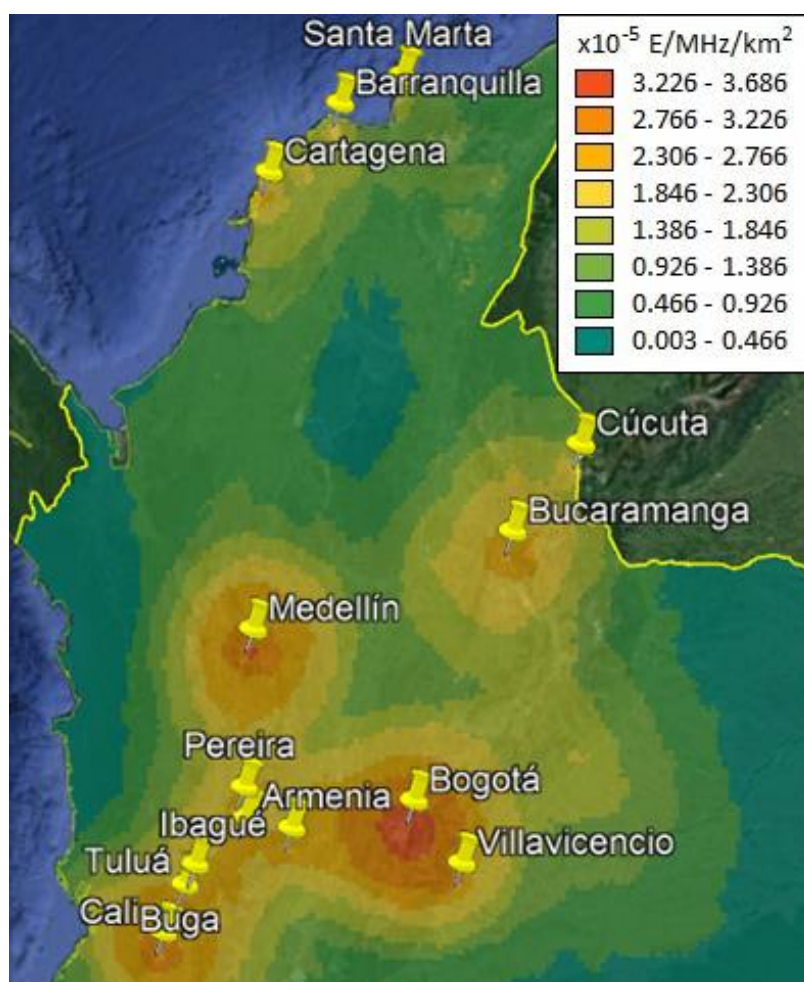


Figura 16. EUE de los sistemas PMP en la banda de 138 - 174 MHz en ciudades principales de Colombia.

Fuente: propia.

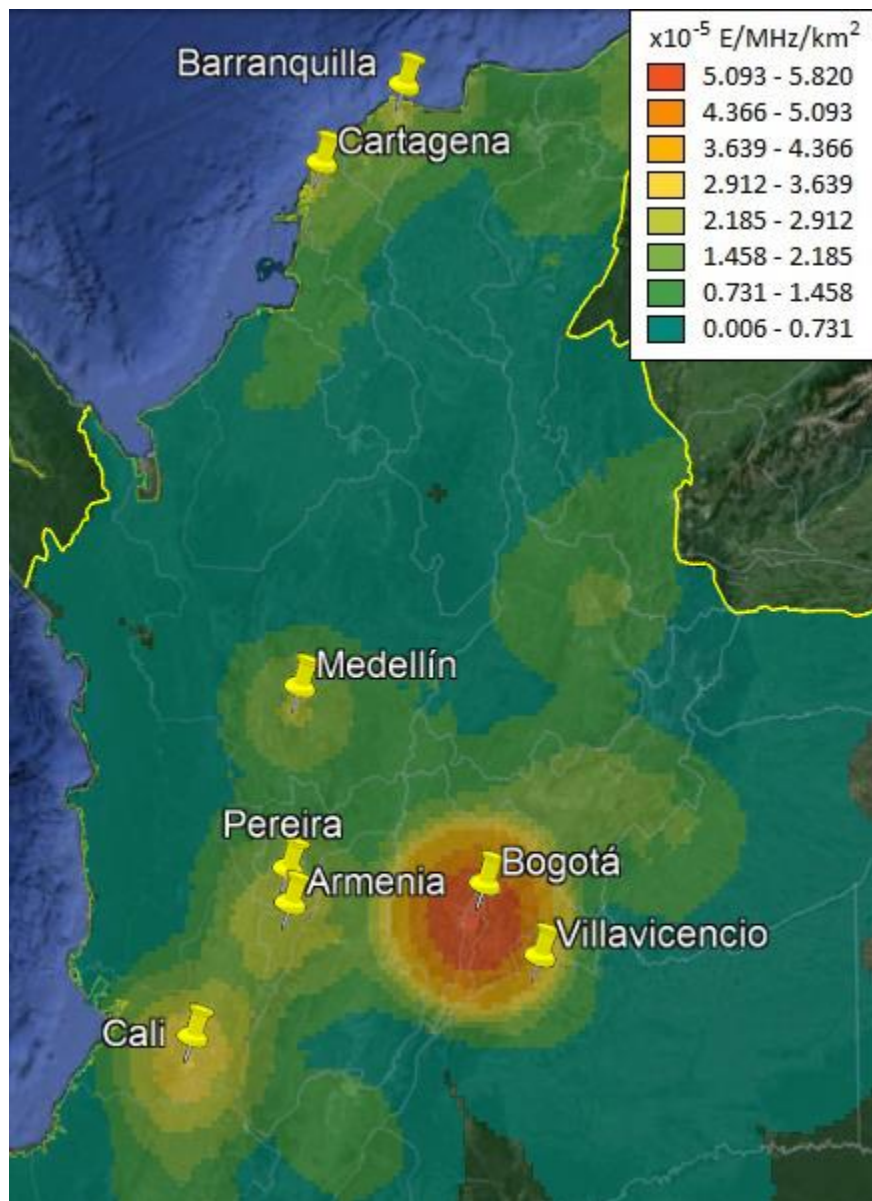


Figura 17. EUE de los sistemas PMP en la banda de 440 - 470 MHz en ciudades principales de Colombia.

Fuente: propia.

Respecto a la banda de 440 - 470 MHz, se obtuvo un valor máximo de EUE de 5.82×10^{-5} Erlang/MHz/km² ubicado en la ciudad de Bogotá. Por otro lado, se evidenció que los valores de EUE en la mayor parte de los departamentos de Amazonas, Arauca, Caquetá, Cesar, Chocó, Córdoba, Guainía, Guaviare, Huila, Putumayo, Vaupés, Vichada y el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, es nulo o muy bajo, con valores de máximo

0.731×10^{-5} Erlang/MHz/km², lo que quiere decir que el uso del espectro en esas zonas no es significativo. Como era de esperarse, se evidenció que la EUE es más alta en algunas de las ciudades con mayor población en Colombia (ver Figura 17); destaca Bogotá, sin embargo, ciudades como Armenia, Barranquilla, Cali, Cartagena, Medellín, Pereira y Villavicencio muestran un buen uso del espectro en la banda.

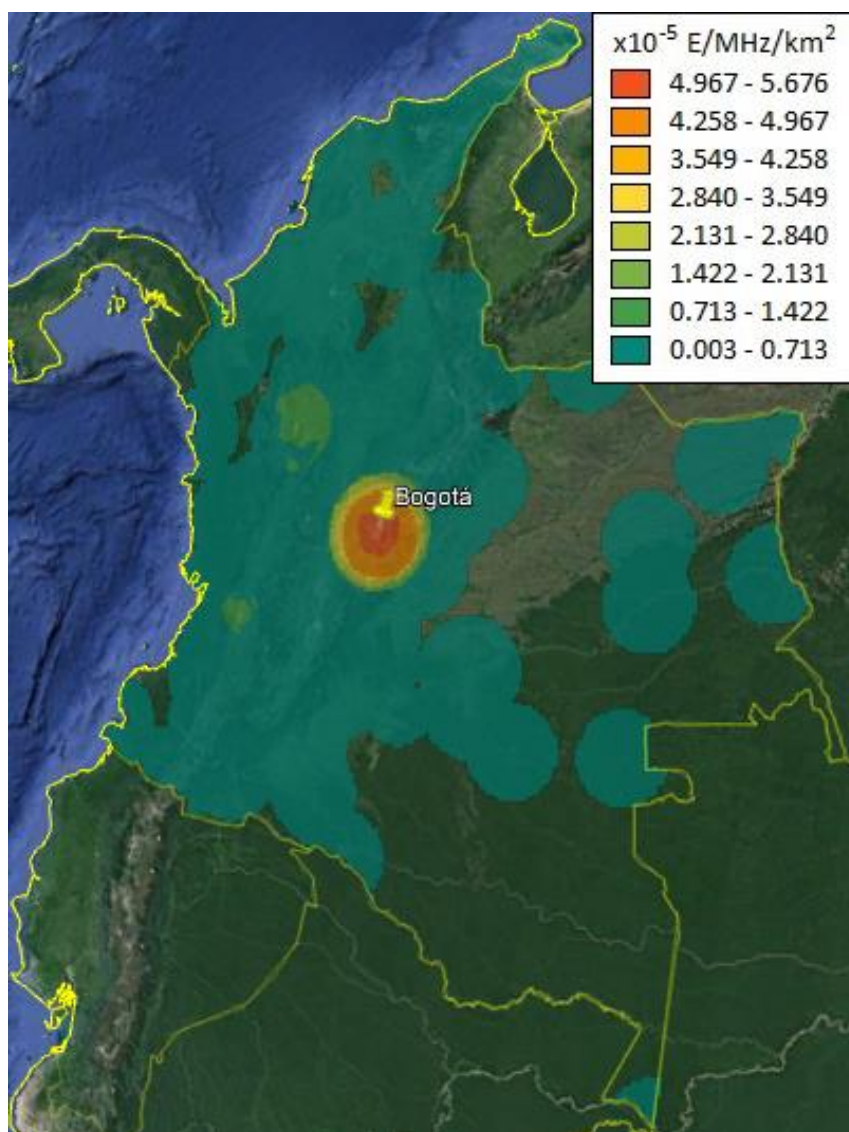


Figura 18. EUE de los sistemas PMP en la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz en ciudades principales de Colombia.

Fuente: propia.

Respecto a la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz, se obtuvo un valor máximo de EUE de 5.676×10^{-5} Erlang/MHz/km² ubicado en la ciudad de Bogotá. Por otro lado, se evidenció que los valores de EUE en la mayor parte del país son muy bajos e incluso nulos, con valores de máximo 0.713×10^{-5} Erlang/MHz/km², lo que quiere decir que el uso del espectro en esta banda de frecuencias no es muy bueno y podría ser mucho más eficiente. Como se muestra en la Figura 18, la EUE solamente es alta en la ciudad de Bogotá.

Finalmente, se destaca que la banda de 138 - 174 MHz es la de mejor valor de EUE de los sistemas PMP distribuido, pues el 90% del territorio continental colombiano tiene un valor de cerca de 1.9×10^{-5} Erlang/MHz/km², mientras que en la banda de frecuencias de 440 - 470 MHz este valor es de 1.3×10^{-5} Erlang/MHz/km² y en la banda de frecuencias de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz este valor es de tan solo 0.3×10^{-5} Erlang/MHz/km². Esto se puede observar en la Figura 19, la Figura 20 y en la Figura 21 a continuación.

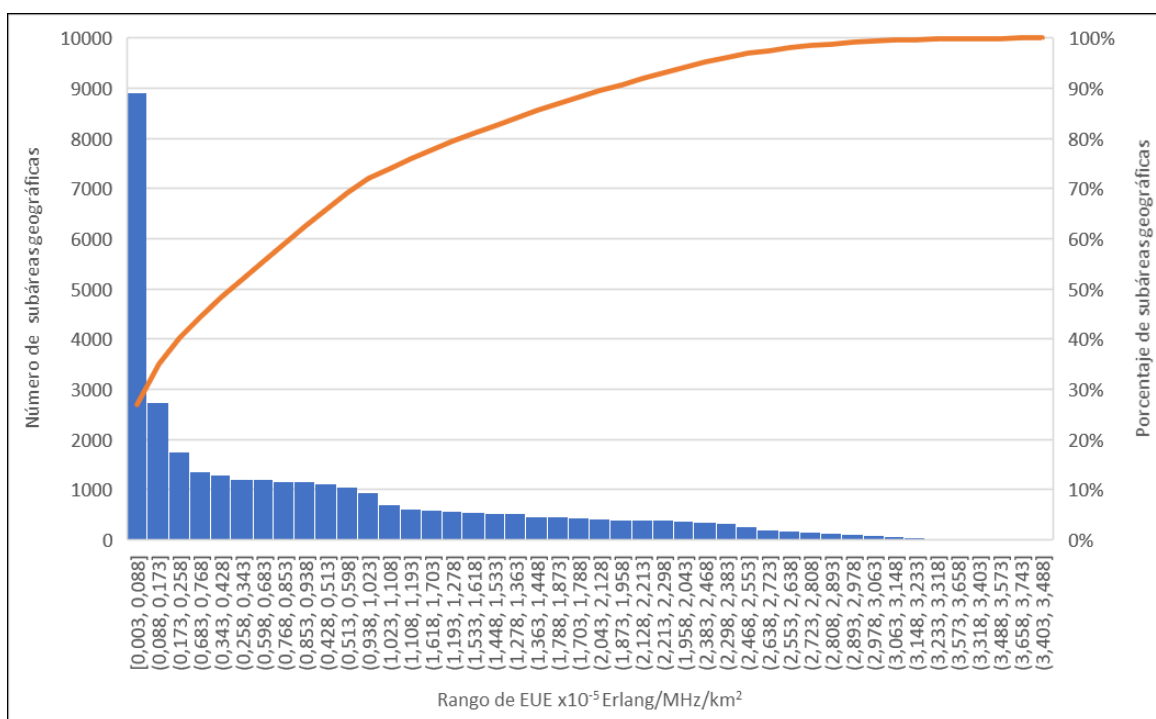


Figura 19. Histograma de valores de EUE en la banda de 138 - 174 MHz.

Fuente: propia.

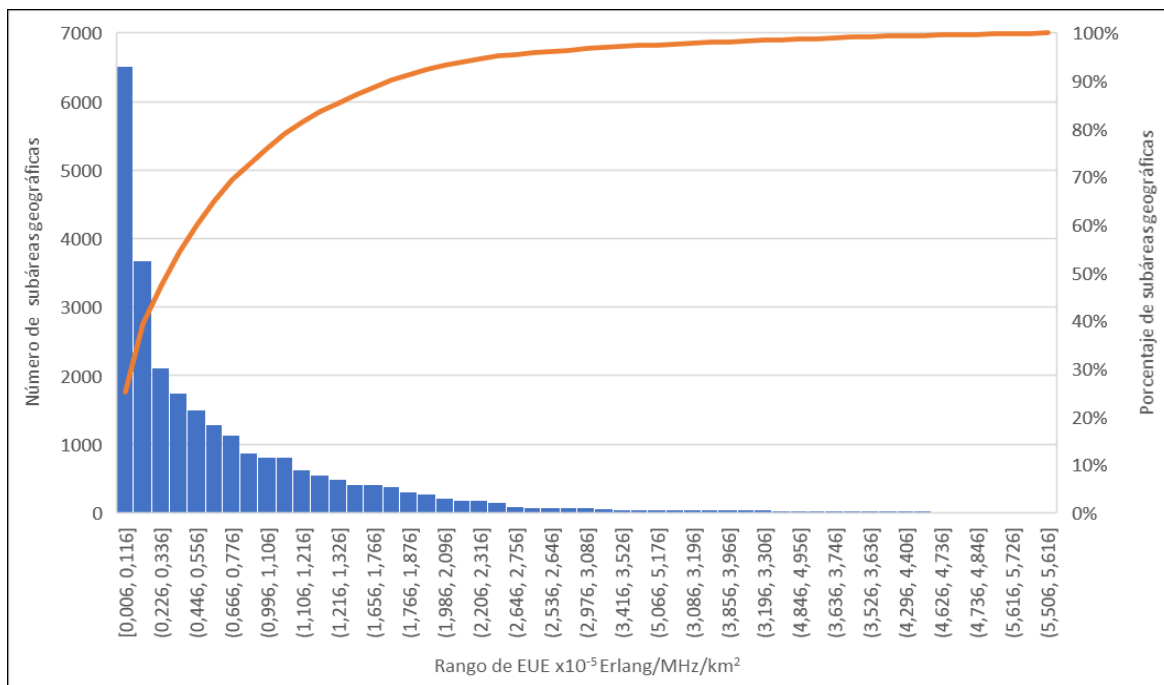


Figura 20. Histograma de valores de EUE en la banda de 440 - 470 MHz.

Fuente: propia.

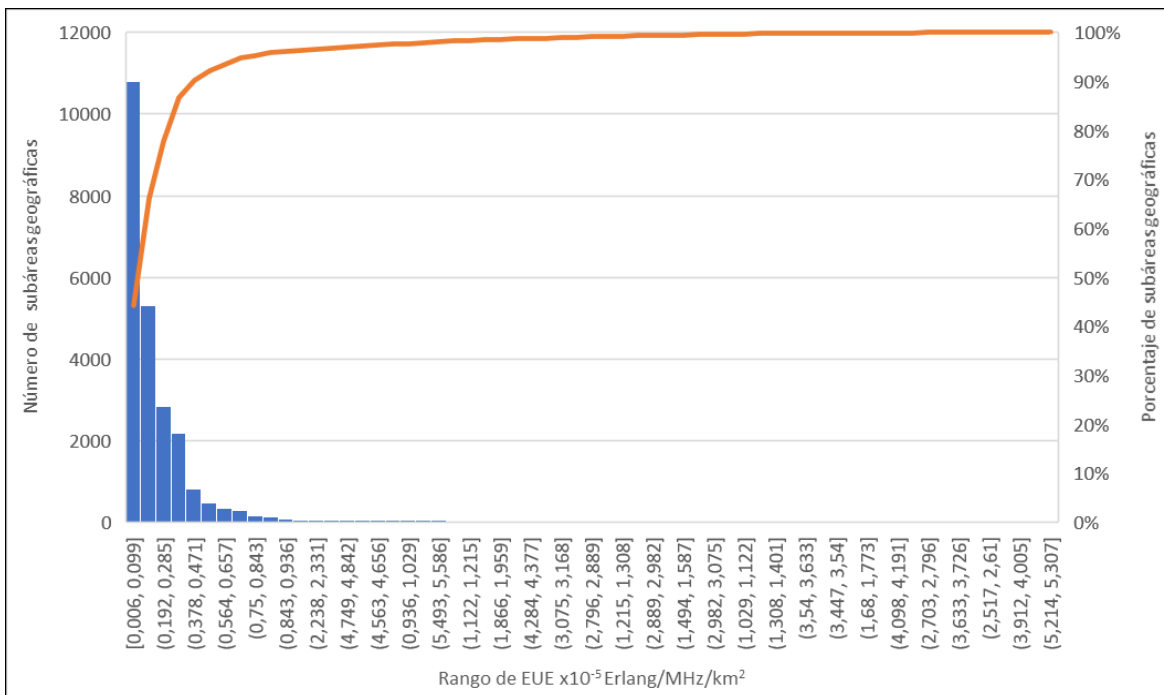


Figura 21. Histograma de valores de EUE en la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz.

Fuente: propia.

5 PUBLICACIÓN DE EUE EN SISTEMAS PMP ASIGNADOS EN COLOMBIA

En el presente capítulo se presentará la aplicación de datos abiertos desarrollada para la publicación de los resultados obtenidos al calcular la eficiencia en el uso del ER (EUE) de los sistemas licenciados de comunicaciones PMP en Colombia.

En primer lugar, se describirá el lineamiento de datos abiertos de la Estrategia de Gobierno en Línea (GEL) y las características del portal de datos abiertos del estado colombiano. Seguido a esto, se presentará el método utilizado para cargar la información dentro del mencionado portal y se describirá el procedimiento para mantener dicha información actualizada. Finalmente, se describirá el diseño de la aplicación de datos abiertos desarrollada.

5.1 ESTRATEGIA DE GOBIERNO EN LÍNEA (GEL)

La estrategia de Gobierno En Línea (GEL) es una iniciativa del gobierno colombiano para lograr aprovechar las tecnologías de la información y las comunicaciones para construir un estado transparente, eficiente y participativo.

El desarrollo de la estrategia de GEL se fundamenta en 4 componentes que buscan masificar la transparencia, la eficiencia y la participación de la ciudadanía en las entidades del estado colombiano. Estos componentes son: TIC para Servicios, TIC para Gobierno Abierto, TIC para la Gestión y Seguridad y Privacidad de la información [38]. La Tabla 16 resume el marco regulatorio sobre el cual se cimienta la estrategia de GEL.

Tabla 16. Marco regulatorio de GEL.

Tema	Norma	Descripción
Desarrollo de la política GEL	Decreto 1151 de 2008	Lineamientos generales de la estrategia de GEL
	Decreto 2693 de 2012	Lineamientos generales de la estrategia de GEL
	Decreto 2573 de 2014	Lineamientos generales de la estrategia de GEL
	Decreto 1078 de 2015	Decreto único sectorial, lineamientos generales de la estrategia de GEL

Tema	Norma	Descripción
TIC para Gobierno Abierto	Decreto 103 de 2015	Gestión de la información pública
	Decreto Reglamentario Único 1081 de 2015	Disposiciones generales en materia de transparencia y del derecho de acceso a la información pública nacional
	Resolución 3564 de 2015	Reglamentaciones asociadas a la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública
TIC para Servicios	Decreto Ley 2150 de 1995	Modificación de regulaciones, procedimientos o trámites innecesarios existentes en la Administración Pública
	Ley 527 de 1999	Ley de Comercio Electrónico. Definición y reglamentación del acceso y uso de los mensajes de datos, el comercio electrónico y de las firmas digitales
	Conpes 3292 de 2004	Proyecto de racionalización y automatización de trámites
	NTC 5854 de 2012	Requisitos de accesibilidad aplicables a las páginas web
	Decreto 2364 de 2012	Reglamentación de la firma electrónica
TIC para la Gestión	Decreto 3816 de 2003	Creación de la Comisión Intersectorial de Políticas y de Gestión de la Información para la Administración Pública
	Decreto 235 de 2010	Regulación del intercambio de información entre entidades para el cumplimiento de funciones públicas
Seguridad y Privacidad de la información	Ley 1266 de 2008	Disposiciones generales del hábeas data y regulación del manejo de la información contenida en bases de datos personales
	Ley Estatutaria 1581 de 2012	Definiciones y disposiciones sobre protección de datos personales

Fuente: Adaptado de [39].

Sin embargo, en el año 2018 la estrategia GEL pasó a llamarse Política de Gobierno Digital y su descripción pasó a ser entendida como “*el uso y aprovechamiento de las tecnologías de la información y las comunicaciones para consolidar un Estado y ciudadanos competitivos, proactivos, e innovadores, que generen valor público en un entorno de confianza digital*” [40]. A pesar de esto, el cambio en la política no quiere decir que las entidades públicas que ya han realizado avances en la implementación de la estrategia GEL deban comenzar desde cero, ya que la Política de Gobierno Digital implica una continuidad de los temas que se planteaban desde la estrategia GEL [41]. Quiere decir entonces que aún es relevante trabajar en el componente de TIC para Gobierno Abierto, el cual es

utilizado en el presente trabajo de grado para realizar la publicación de los resultados del cálculo de la EUE de los sistemas PMP licenciados en Colombia.

5.1.1 TIC para Gobierno Abierto

TIC para Gobierno Abierto es el lineamiento de la estrategia GEL que comprende las actividades encaminadas a fomentar la construcción de un Estado más transparente, participativo y colaborativo involucrando a los diferentes actores en los asuntos públicos mediante el uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones [38].

Todas las entidades públicas; entidades estatales independientes o autónomas y de control; las personas naturales y jurídicas, públicas o privadas, que presten función pública; las empresas públicas creadas por ley, las empresas del Estado y sociedades en que este tenga participación; los partidos o movimientos políticos y los grupos significativos de ciudadanos; las entidades que administren instituciones parafiscales, fondos o recursos de naturaleza u origen público; las personas naturales o jurídicas que reciban o intermedien fondos o beneficios públicos territoriales y nacionales y no cumplan ninguno de los otros requisitos para ser considerados sujetos obligados [42]; todos los anteriores deberán atender los lineamientos en materia de datos abiertos que se encuentran disponibles en el Portal de Datos Abiertos de Estado [43].

La política de Gobierno Digital establece a través del principio de apertura que todo proyecto que desee incorporar el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones y producir información, debe contar con un sistema de información con el que se puedan generar de datos abiertos para su publicación y posterior uso de la ciudadanía en general. Lo anterior, siempre en el marco del cumplimiento de los establecido en la Resolución No. 3564 de 2015 del MINTIC, en donde se reglamentan los estándares para la publicación y divulgación de la información [41].

Para favorecer el cumplimiento de la generación de información de datos hacia la ciudadanía en general de la cual habla la Política de Gobierno Digital, el MINTIC ha puesto a disposición de las entidades estatales un portal de datos abiertos del Estado.

5.2 DATOS ABIERTOS

Con la iniciativa de Datos Abiertos, el MINTIC tiene como objetivo lograr que todas las entidades del estado publiquen información de calidad en formatos preestablecidos disponibles a los usuarios para que estos la utilicen según su conveniencia (e.g. generación de reportes, generación de informes, realización de estadísticas, entre otros).

El proyecto de datos abiertos responde a una armonización internacional sobre directrices de construcción de Gobierno Abierto, debido a que Colombia se adhirió a la Alianza para el Gobierno Abierto en el año 2011. En esta alianza se estableció como reto el compromiso de proporcionar activamente información de alto valor de manera oportuna en formatos de fácil localización, uso y comprensión para el público en general [44].

En general, los datos abiertos benefician a todos los colombianos siendo una fuente de información y transparencia de las actividades que desarrolla el gobierno, sin embargo, también puede ser una herramienta que genera negocios y soluciones, por ejemplo, en el sector de la academia como insumo para las investigaciones y proyectos de grado, en el sector de los medios de comunicación como información oficial para las investigaciones periodísticas, entre otros sectores.

En Colombia se ha puesto en servicio el portal de datos abiertos del Estado, en el cual se realiza la publicación y consulta de los conjuntos de datos que todas las entidades del Estado colombiano ponen a disposición de la ciudadanía. La dirección web del portal es: <https://www.datos.gov.co/> [41]. El mencionado portal permite el desarrollo de aplicaciones web bajo licencia abierta a través de una interfaz de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) de datos abiertos desarrollada por la empresa Socrata [45].

5.2.1 Esquema de Gobierno de los Datos

Con el fin de extraer información confiable y necesaria para realizar el cálculo de EUE de los sistemas PMP, a través del mecanismo propuesto en el Capítulo 3, se debe contar con una cuenta de usuario del SGE, por lo cual, quienes pueden realizar esta extracción deben ser funcionarios del MINTIC o de la ANE; no obstante, cualquier persona que cuente con la información a través de una fuente externa también puede aplicar el mecanismo de cálculo propuesto en el Capítulo 3. Habiendo dicho esto, se estableció que la encargada de realizar

la extracción de la información de la base de datos sea la Subdirección de Gestión y Planeación Técnica del Espectro de la ANE, ya que por sus funciones de asesor técnico del MINTIC en materia de viabilidades técnicas de las solicitudes de asignación de espectro es quien realiza las modificaciones de la base de datos de espectro del SGE. La extracción de información necesaria y el posterior cálculo de los valores de EUE de los sistemas PMP se debe realizar con una periodicidad de un año.

Para realizar los cálculos de EUE de los sistemas PMP de manera automática, se desarrolló una herramienta digital en lenguaje Visual Basic para Aplicaciones (VBA, por sus siglas en inglés), la cual se le entrega a la ANE para facilitar su labor de actualización de la información dentro del portal de datos abiertos del Estado. Dicha herramienta contiene los espacios para introducir la información extraída de la base de datos del SGE y genera el archivo digital en formato kml que debe ser cargado en el portal de datos abiertos del Estado para realizar la actualización del Conjunto de Datos.

El panel principal de la herramienta de cálculo puede observarse en la Figura 22. Allí pueden configurarse condiciones iniciales como el espectro útil de cada banda de frecuencias, el área geográfica de cálculo y la porción mínima de referencia para calcular la ocupación de la banda de frecuencias. Adicionalmente, existe un botón para iniciar el cálculo respectivo de EUE y otro botón para generar el archivo en formato kml cuyo fin es visualizar los valores de EUE en la aplicación cartográfica *Google Earth*, ambos botones funcionan a través de la lista de selección de banda de frecuencias. Finalmente, existe un botón para generar el archivo digital que debe ser cargado en el portal de datos abiertos del Estado para crear o actualizar el Conjunto de Datos mencionado en la sección 5.2.2. Los archivos digitales en formato kml generados por la herramienta de cálculo se guardarán en la misma dirección donde este guardada la herramienta, los nombres por defecto serán EUE_138-174_MHz.kml, EUE_440-470_MHz.kml, EUE_806-821_MHz_y_851-866_MHz.kml para los archivos de visualización de los valores de EUE y EUE_PMP.kml para el archivo digital de datos abiertos.

EFICIENCIA EN EL USO DEL ERE EN SISTEMAS PMP

- Condiciones Iniciales

Banda:	138 - 174 MHz	440 - 470 MHz	800 MHz
Espectro Útil (MHz):	31,7	15,575	30
Área geográfica (km ²):	1141748	1141748	1141748
Porción mínima de espectro (MHz):	0,0125	0,0125	0,0125

- Cálculo

Banda: 138 - 174 MHz

Iniciar cálculo
Generar KML

- Datos Abiertos

Generar archivo digital en formato KML para carar en portal de Datos Abiertos del Estado

Principal
Coordenadas
FactorVHF
FactorUHF1
FactorUHF2
VHF
UHF1
UHF2
DatosVHF
DatosUHF1
DatosUHF2

Figura 22. Panel principal de la herramienta de cálculo de EUE en sistemas PMP.

Fuente: propia.

La herramienta de cálculo también contiene 3 paneles llamados DatosVHF, DatosUHF1 y DatosUHF2, los cuales sirven para ingresar la información extraída de la base de datos de espectro del SGE relacionada con las estaciones base de los sistemas PMP de las bandas de 138 - 174 MHz, 440 - 470 MHz y 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz respectivamente. En la Figura 23 puede observarse el panel de DatosVHF, cuyo propósito es el de cargar los datos relacionados con la banda de frecuencias de 138 - 174 MHz en la herramienta de cálculo; allí se puede observar que los campos de la base de datos de espectro que se deben extraer son el nombre del operador, el número del expediente del operador, el número de la red a la que pertenece la estación base, la fecha de vencimiento del permiso de uso del espectro, la latitud y la longitud en unidades de grados decimales, la altitud sobre el nivel del mar de la estación base, la potencia isotrópica radiada equivalente en unidades de dBm, la altura de la antena de la estación base con respecto al nivel del suelo en metros (HTx), las frecuencias de transmisión (FTx) y recepción (FRx) en unidades de megahercios y el ancho de banda de operación en unidades de kilohercios. Los mismos campos aplican para los paneles DatosUHF1 y DatosUHF2. Los demás paneles de la herramienta de cálculo son de visualización.

administrativa adicional. EL portal de datos abiertos del Estado agrupa estos Conjuntos de Datos en un catálogo de datos que es finalmente donde los usuarios podrán encontrar la información que les resulte de interés.

En el Conjunto de Datos creado, cada fila de información se describió como: valores de EUE para sistemas punto a multipunto en un área geográfica para las bandas de frecuencias de 138 - 174 MHz, 440 - 470 MHz y 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz. Para su creación se subió la información descrita a continuación en la Tabla 17.

Tabla 17. Información del Conjunto de Datos de EUE para sistemas PMP.

Tipo de información	Campo de información	Descripción
Datos	Archivo digital	Archivo en formato kml con información georreferenciada de EUE para sistemas PMP
Información de la Entidad estatal	Nombre	Agencia Nacional del Espectro (ANE)
	Área o dependencia	Subdirección de Gestión y Planeación Técnica del Espectro
	Departamento	Bogotá D.C.
	Municipio	Bogotá D.C.
	Orden	Nacional
	Sector	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Información de los datos	Idioma	Español
	Cobertura geográfica	Nacional
	Periodicidad de actualización	Anual
	Fecha de emisión (aaaa/mm/dd)	2018/08/27
	Categoría del Conjunto de Datos	Ciencia, Tecnología e Innovación
	Etiquetas (para búsqueda)	Espectro, eficiencia, punto a multipunto

Fuente: propia.

El Conjunto de Datos cargado en el portal de datos abiertos del Estado contiene la información de EUE de sistemas PMP distribuido en columnas como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18 Distribución de los datos de EUE cargados en el portal <https://www.datos.gov.co/>.

Nombre de columna	Tipo de campo	Nombre de campo	Descripción
Área	Polígono	area	Área geográfica donde aplica el valor de EUE

Nombre de columna	Tipo de campo	Nombre de campo	Descripción
EUE (138-174 MHz)	Texto	eue1	Valor de EUE en la banda de 138 - 174 MHz, unidades en $\times 10^{-5}$ Erlang/MHz/km ²
EUE (440-470 MHz)	Texto	eue2	Valor de EUE en la banda de 440 - 470 MHz, unidades en $\times 10^{-5}$ Erlang/MHz/km ²
EUE (806-821 MHz y 851-866 MHz)	Texto	eue3	Valor de EUE en la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz, unidades en $\times 10^{-5}$ Erlang/MHz/km ²
Nivel	Texto	rango1	Rango de EUE para la banda de 138 - 174 MHz
Nivel	Texto	rango2	Rango de EUE para la banda de 440 - 470 MHz
Nivel	Texto	rango3	Rango de EUE para la banda de 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz

Fuente: propia.

Dentro del archivo digital en formato kml, la información de la EUE de sistemas PMP fue introducida en etiquetas "Placemark" como se muestra a continuación en la Figura 24.

```

<Placemark>
  <name>133,222</name>
  <ExtendedData>
    <Data name="EUE1"><value>0.975 x10E-5 E/MHz/km2</value></Data><Data name="Nivel1"><value>0.926 - 1.386 x10E-5 E/MHz/km2</value></Data>
    <Data name="EUE2"><value>0.782 x10E-5 E/MHz/km2</value></Data><Data name="Nivel2"><value>0.731 - 1.458 x10E-5 E/MHz/km2</value></Data>
    <Data name="EUE3"><value>0.269 x10E-5 E/MHz/km2</value></Data><Data name="Nivel3"><value>0.003 - 0.713 x10E-5 E/MHz/km2</value></Data>
  </ExtendedData>
  <MultiGeometry><Polygon><outerBoundaryIs><LinearRing><coordinates>
    -75.275,2.475
    -75.275,2.425
    -75.225,2.425
    -75.225,2.475
    -75.275,2.475
  </coordinates></LinearRing></outerBoundaryIs></Polygon></MultiGeometry>
</Placemark>

```

Figura 24. Formato de la información de EUE para sistemas PMP dentro del archivo digital kml cargado en el portal <https://www.datos.gov.co/>.

Fuente: propia.

El Conjunto de Datos sobre EUE en sistemas PMP asignados en Colombia está ubicado en la siguiente dirección web:

<https://www.datos.gov.co/Ciencia-Tecnolog-a-e-Innovaci-n/Eficiencia-en-el-uso-del-espectro-radioel-ctrico-e/v2yh-abhp>

5.2.3 Aplicación de Datos Abiertos

El portal de datos abiertos del Estado permite realizar aplicaciones libres sobre los conjuntos de datos publicados, las cuales son desarrolladas dentro del portal a través de

una interfaz de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) de Datos Abiertos desarrollada por la empresa Socrata [45]. Allí es posible generar una visualización de los datos a través de gráficos de barras, gráficos de columnas, gráficos circulares, gráficos temporales, histogramas, graficas combinadas y mapas.

Debido a que los resultados de EUE en sistemas PMP se calculan para un área geográfica, se decidió crear una visualización de los datos a través de un mapa, más específicamente un mapa de calor. De esta manera, se seleccionó la columna “Área”, la cual es un polígono, para georreferenciar los valores de eficiencia y se seleccionaron las columnas “Nivel” para asignar un color al polígono graficado en el mapa para cada banda de frecuencias. Adicionalmente, se seleccionaron las columnas “EUE” para mostrar los valores de EUE a través de un menú emergente. La visualización de los valores de eficiencia cada banda de frecuencias se introdujo al mapa a través de capas.

En la Figura 25 se puede observar la aplicación de datos abiertos desarrollada para visualizar los valores de EUE en sistemas PMP licenciados en Colombia. En la parte superior izquierda se encuentra el selector de capas, el cual se utiliza para visualizar cada una de las bandas de frecuencias en donde funcionan los sistemas PMP actualmente en Colombia. Ya en el mapa se observan los polígonos que representan las subáreas de cálculo de eficiencia diagramadas con un color que representa el rango de eficiencia. Por último, en la aplicación se observa un menú emergente de color negro que contiene información del valor de eficiencia asignado a la subárea sobre la que reposa el cursor y el rango de eficiencia que representa el color de la mencionada subárea.

La aplicación de datos abiertos sobre EUE en sistemas PMP licenciados en Colombia está ubicada en la siguiente dirección web:

<https://www.datos.gov.co/Ciencia-Tecnolog-a-e-Innovaci-n/Eficiencia-en-el-uso-del-espectro-radioel-ctrico-e/vmnf-akn8>

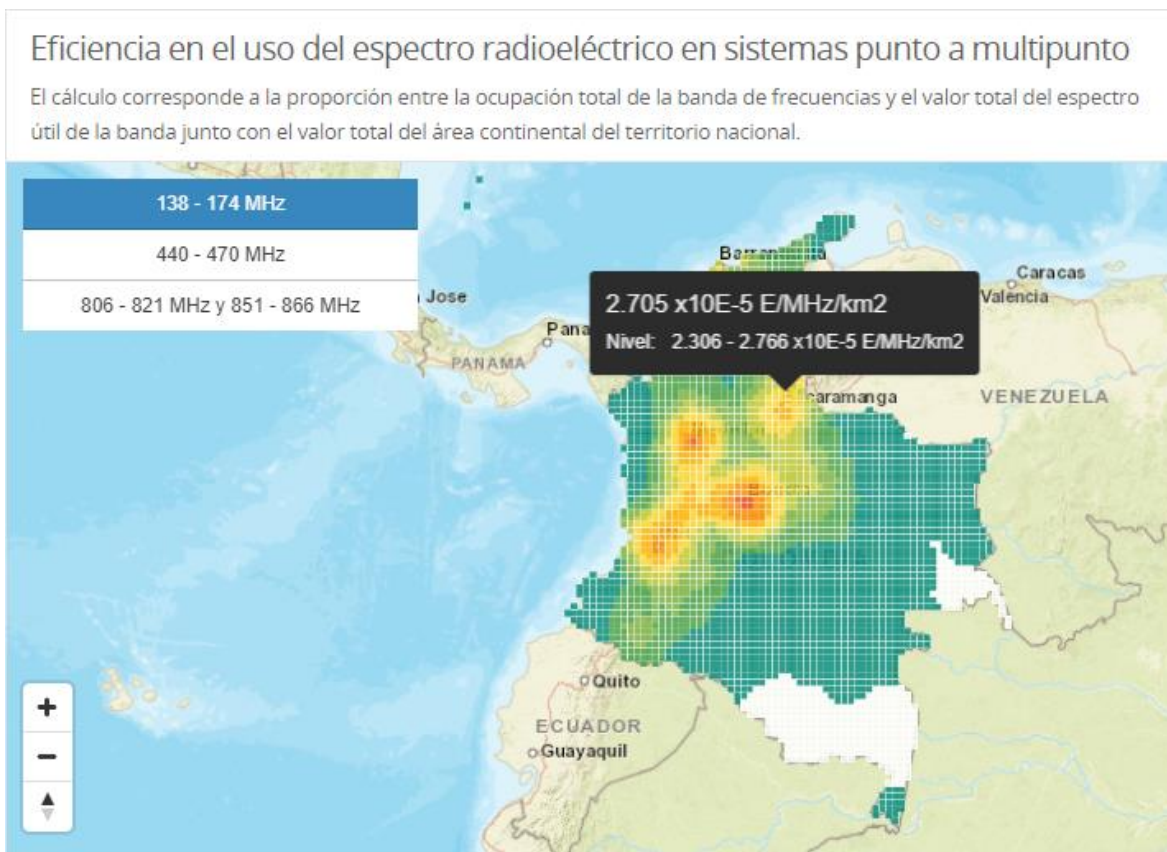


Figura 25. Aplicación de datos abiertos sobre EUE en sistemas PMP.

Fuente: propia.

6 CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- i. Las administraciones de espectro a nivel mundial definen la EUE en base a lo recomendado por la UIT en esta materia. Sin embargo, a pesar de que la UIT también recomienda utilizar mecanismos de cálculo cuantitativo para este parámetro, pocas administraciones han implementado dichos mecanismos, internacionalmente son más utilizados los estudios de ocupación cualitativos del espectro como base para generar políticas que propendan por hacer un uso más eficiente del ER.
- ii. Sea cual sea la forma de analizar la EUE, cuantitativamente o cualitativamente, internacionalmente es reconocida la importancia de determinar la eficacia en el uso del ER como insumo para los procesos de gestión del espectro.
- iii. Los valores de EUE no deben ser el insumo exclusivo para generar políticas de gestión de espectro que promuevan un uso más eficiente del recurso de ER, se deben tomar en consideración también otros aspectos de mercado como por ejemplo ecosistema de equipos, costos de migraciones de permisos de uso, costos de actualización tecnológica y atribución del espectro, entre otros. Sin embargo, contar con un mecanismo de cálculo de EUE resulta muy útil para gestionar el recurso de espectro para realizar actividades como por ejemplo monitoreo de bandas de frecuencias y comparaciones entre bandas de frecuencias de similares características.
- iv. El cálculo de EUE depende de las características propias de los sistemas de radiocomunicaciones, por esta razón no se puede usar un mecanismo de cálculo de aplicación general. Adicionalmente, las comparaciones de EUE entre distintas bandas de frecuencias son válidas siempre y cuando dichas bandas tengan características similares.
- v. El concepto propuesto por la UIT sobre EUE de los sistemas PMP está estrechamente ligado a la definición de espectro ocupado y denegado. Esto quiere decir que entre mejor respuesta en frecuencia tengan los filtros de un equipo de

radiocomunicaciones más eficientemente se usará una banda de frecuencias, pues el rechazo dependiente de la frecuencia de los equipos será más alto y el espectro denegado por los sistemas de radiocomunicaciones será menor.

- vi. La recomendación de la UIT respecto del cálculo de EUE incluye, como primera opción, el cálculo de la cantidad de información transmitida por el sistema de comunicaciones. Sin embargo, calcular este último parámetro resulta complejo en el escenario colombiano debido a que uno de los principios de la ley del sector de telecomunicaciones es el de neutralidad tecnológica y eso permite que los usuarios del espectro seleccionen la tecnología que mejor se adapte a sus modelos de negocio y condiciones técnicas propias del mismo recurso de espectro, haciendo que se dificulte obtener la información de la modulación digital de los equipos de radiocomunicaciones. En razón a esto, la determinación de la EUE resulta más viable de realizar a través del cálculo de la ocupación del espectro como también lo recomienda la UIT.
- vii. La determinación de la EUE puede ser realizada a través de cálculos matemáticos de las características de potencia del entorno electromagnético que crean las estaciones de radiocomunicaciones a través de sus emisiones y utilizando cartografía digital para aplicar mejor los modelos de propagación, sin embargo, estos cálculos matemáticos demandan gran tiempo de ejecución y esto los vuelve poco prácticos y de difícil implementación. Resulta mucho más práctico simplificar los cálculos asumiendo condiciones iniciales como antenas omnidireccionales y cartografía plana para reducir la ejecución de los cálculos matemáticos a unas pocas horas, obviamente el impacto de las condiciones iniciales en los resultados finales debe ser tenido en cuenta.
- viii. Si es posible determinar la eficiencia técnica en el uso del ER de los sistemas PMP asignados actualmente en Colombia a través de un mecanismo de cálculo de tipo cuantitativo. Esto se debe a que tanto el MINTIC como la ANE, quienes son encargados de administrar el espectro para este tipo de sistemas de radiocomunicaciones, poseen y gestionan continuamente una base de datos de espectro que incluye información técnica de los mencionados sistemas, información que es necesaria para determinar las características de potencia del entorno electromagnético que crean las estaciones de radiocomunicaciones a través de sus

emisiones y así determinar también la ocupación total de una banda de frecuencias en donde funcionan sistemas PMP.

- ix. El mecanismo de cálculo de EUE de los sistemas PMP propuesto en el presente trabajo de grado puede ser utilizado para realizar comparaciones entre las bandas de 138 - 174 MHz, 440 - 470 MHz y 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz ya que se elaboró a través de características técnicas similares de los sistemas de radiocomunicaciones que allí funcionan actualmente en Colombia.
- x. El éxito de aplicación del mecanismo de cálculo de EUE de los sistemas PMP propuesto en el presente trabajo de grado depende en gran medida del estado de la base de datos de espectro del SGE. Debido a esto, resulta vital que tanto el MINTIC como la ANE mantengan correctamente actualizados los permisos de uso del espectro de los sistemas PMP respecto a los campos administrativos y técnicas que describen las estaciones de estos sistemas de radiocomunicaciones.
- xi. La inclusión del factor de tiempo en el cálculo de EUE de los sistemas PMP en Colombia no es viable debido a que los permisos de uso del espectro otorgados a estos sistemas consisten en 24 horas de operación, es decir, un uso intermitente durante las 24 horas del día en el que no es posible determinar el tiempo útil. Al no poder determinar en qué momentos funciona su sistema, los usuarios del espectro optan por solicitar permisos que les ofrezcan una disponibilidad total en el tiempo.
- xii. El mecanismo de cálculo de EUE de los sistemas PMP, propuesto en el presente trabajo de grado, servirá para evaluar la efectividad de los procedimientos de análisis de viabilidad de solicitudes de espectro que ejecuta la ANE en el marco de los PSO de las bandas VHF y UHF. Se recomienda que la ANE actualice los valores de EUE de los sistemas PMP licenciados en las bandas de 138 - 174 MHz, 440 - 470 MHz y 806 - 821 MHz pareada con 851 - 866 MHz con una periodicidad anual con el fin de realizar un monitoreo a través del tiempo.
- xiii. La iniciativa de datos abiertos del estado es una herramienta útil para generar información de calidad para la ciudadanía en general, adicionalmente, genera transparencia en la gestión de todas las entidades del Estado. Entre más información de gestión del Estado este a disposición de la ciudadanía mayor será la participación y la colaboración de la ciudadanía en pro del desarrollo del país.
- xiv. El portal de datos abiertos del estado colombiano es una herramienta muy potente y de fácil uso para generar aplicaciones web de interés general. Su licencia de

código abierto impulsa también la viabilidad de implementación de estas aplicaciones.

- xv. El mecanismo de cálculo de EUE, propuesto en el presente trabajo de grado, puede ser utilizado en conjunto con los valores de densidad de población para determinar el impacto social del ER a través de los sistemas PMP.

6.1 TRABAJOS FUTUROS

El trabajo de grado realizado podría dar paso a que la ANE elabore otros trabajos sobre propuestas normativas acerca del cobro de contraprestaciones a los operadores de telecomunicaciones en base a la eficiencia técnica del uso del espectro radioeléctrico, así como también a la realización de políticas de gestión de espectro para dar las viabilidades técnicas de las solicitudes de espectro que lleguen desde el MINTIC e incluso a la implementación de nuevas formas de asignar el espectro.

ANEXO A. FORMATO DE PSO PARA SOLICITUDES EN LAS BANDAS HF, VHF Y UHF

[illegible]

Figura 26. Formato de PSO para solicitudes en las Bandas HF, VHF y UHF (1).

Fuente: MINTIC.

[illegible]

Figura 27. Formato de PSO para solicitudes en las Bandas HF, VHF y UHF (2).

Fuente: MINTIC.

ANEXO B. EJEMPLO DE UN CCTR EXTRAÍDO DEL SGE

		REPÚBLICA DE COLOMBIA MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES DIRECCIÓN DE INDUSTRIA DE COMUNICACIONES CUADRO DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA RED					
Nombre del proveedor de redes y servicios: XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX				Expediente con código: XXXXXXXX Tipo de Servicio (6B): CV		No. Cuadro Técnico: 25703 Fecha de Generación: 23/07/2018	

1A (MHz)	2C	3A1	4A	4C	Tipo de estación	5A	6A	7A	8AA (W)	9D	9E (m)	9C (°)	9G	9A (°)	9B (°)	10B
RED NÚMERO 1																
Tx461.75 Rx451.75	23/07/2018	5KD5651	ALTO DAPA Yumbo Valle del Cauca	3° 34' 22.36" N 76° 33' 41.55" W	R	BP	FB	11K0F7W--	25	V	20	360	11.3		0	HX
Tx451.75 Rx461.75	23/07/2018	5KD5652	AV 6 N # 50 N – 58 Cali Valle del Cauca	3° 29' 19.36" N 76° 31' 30.1" W	B	R	FB	11K0F7W--	25	V	6	360	5		0	HX
Tx451.75 Rx461.75	23/07/2018	5KD5653			P	R	ML	11K0F7W--	4	V						HX
(50) 5KD5653 - 5KD5702																

Número de red	Cantidad de frecuencias	Ancho de Banda (KHz)	Tipo de cobertura	Descripción Cobertura
1	2	12.5	Departamental	Valle del Cauca (VAL)

Observaciones: Otorga red. RAD MINTIC XXXXX. PSO 003 de 2018 Resolución 1237 de 2018.

Elaboró:

Ing. XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

CONVENCIONES DE LAS COLUMNAS DEL CUADRO DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE RED (CCTR)	
IDENTIFICADOR COLUMNA	DESCRIPCIÓN (APÉNDICE 4 REGLAMENTO DE RADIOCOMUNICACIONES - RR (REV.CMR-12))
1A	Frecuencia asignada
2C	Fecha de asignación de la frecuencia (nueva o modificada)
3A1	Distintivo de llamada
4A	Dirección o ubicación de la estación repetidora o estación base
4C	Coordenadas geográficas de la estación repetidora o estación base - Latitud y longitud, en grados, minutos y segundos
Tipo de estación	Referencia por el que se conoce a la estación transmisora (R - Repetidora, B - Base, M - Móvil, P - Portátil)
5A	Referencia por el que se conoce a la estación receptora (R - Repetidora, B - Base, M - Móvil, P - Portátil)
6A	Clase de estación
7A	Denominación de la emisión
8AA	Potencia entregada a la antena, en W
9D	Código de tipo de polarización (V - Vertical, H - Horizontal, C - Circular, etc)
9E	Altura de la antena sobre el nivel del suelo, en metros
9C	Ángulo de apertura total del lóbulo principal de radiación en el plano horizontal (Anchura de haz – HPBW), medido en grados,
9G	Máxima ganancia de la antena (isotrópica (dBi), con relación a un dipolo de media onda (dBd), según proceda) de la antena transmisora
9A	Acimut de radiación máxima de la antena transmisora medido en el plano horizontal a partir del Norte geográfico en el sentido de las agujas del reloj
9B	Ángulo de elevación de la antena respecto al horizonte (Uplift o Downtilt), en grados
10B	Horario normal de funcionamiento de la asignación de frecuencia (HX=24 horas). En la banda de frecuencias HF, se especifica el horario de operación

Figura 30. Ejemplo de CCTR de red con un sistema PMP extraído del SGE.

ANEXO C. PROCEDIMIENTO PARA ACTUALIZAR EL CONJUNTO DE DATOS DE EUE DE LOS SISTEMAS PMP EN EL PORTAL DE DATOS ABIERTOS DEL ESTADO

A continuación, se describe el procedimiento paso por paso para actualizar el Conjunto de Datos de EUE de los sistemas PMP en el portal de datos abiertos del estado colombiano.

- i. Autenticarse con nombre de usuario y contraseña en el portal de datos abiertos del Estado a través de la dirección web <https://www.datos.gov.co/login> (ver Figura 31):

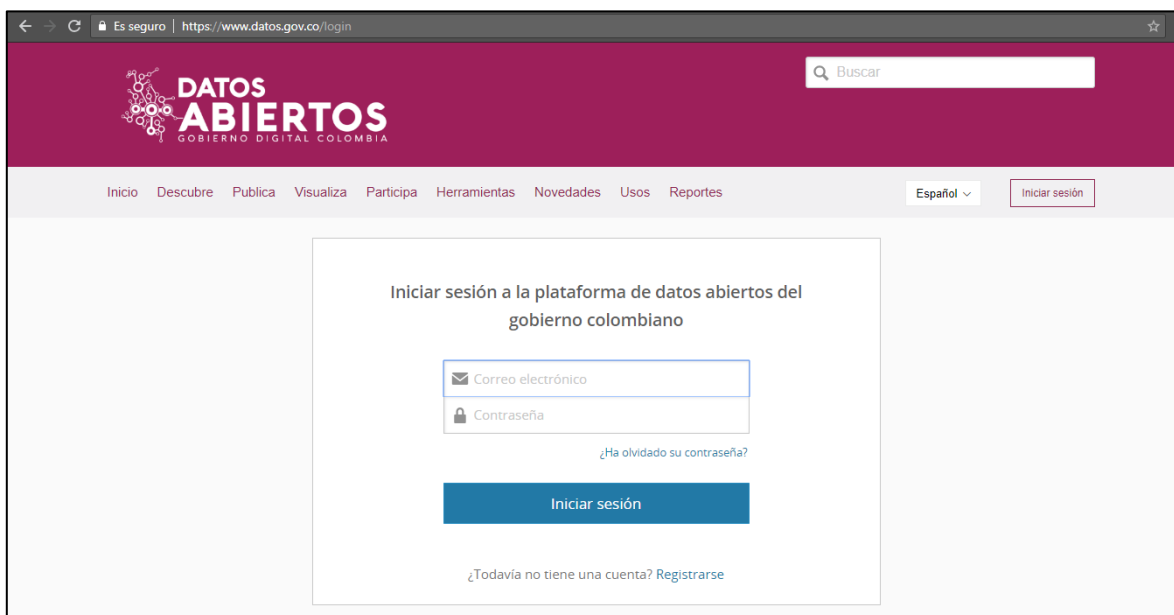


Figura 31. Ingreso al portal de datos abiertos del Estado.

Fuente: propia.

- ii. Ingresar al Conjunto de Datos haciendo clic en el enlace “Eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico en sistemas punto a multipunto” como se muestra en la Figura 32:

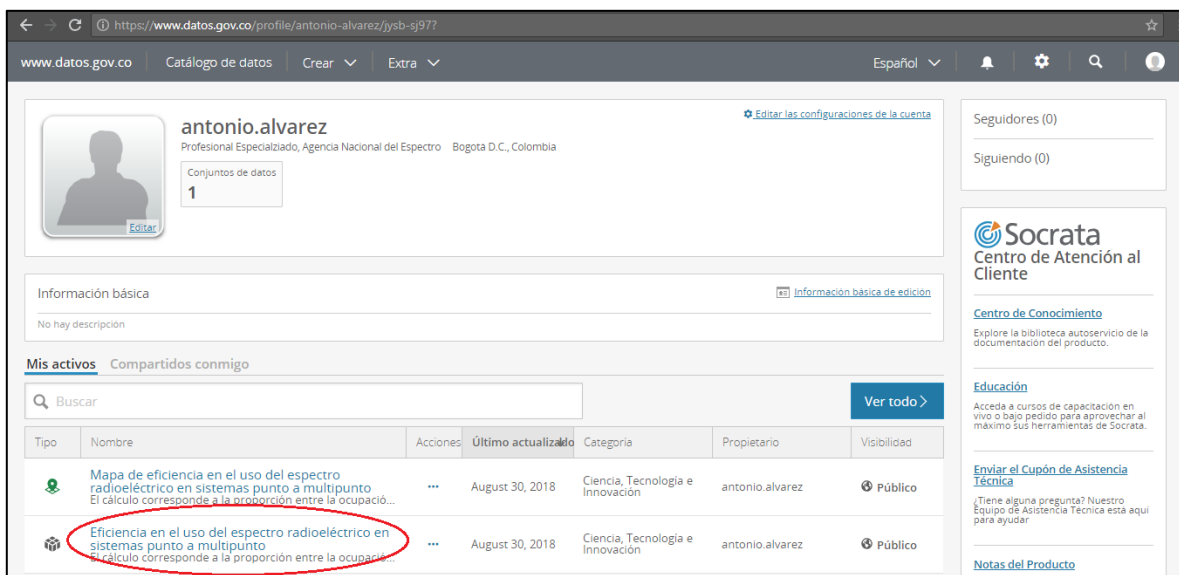


Figura 32. Ingreso al Conjunto de Datos dentro del portal de datos abiertos del Estado.

Fuente: propia.

- iii. Hacer clic en el botón “Editar” como se señala en la Figura 33:



Figura 33. Botón de editar Conjunto de Datos dentro del portal de datos abiertos del Estado.

Fuente: propia.

iv. Hacer clic en el botón “Añadir Datos” como se señala en la Figura 34:

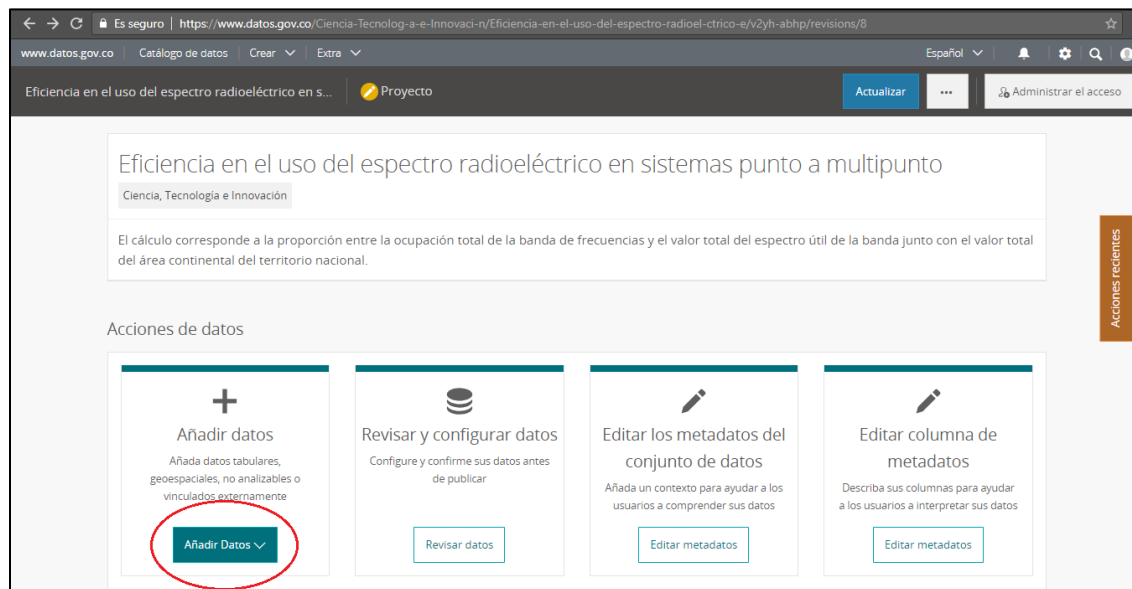


Figura 34. Botón de añadir datos dentro del portal de datos abiertos del Estado.

Fuente: propia.

v. Hacer clic en el botón “Reemplazar” como se señala en la Figura 35:

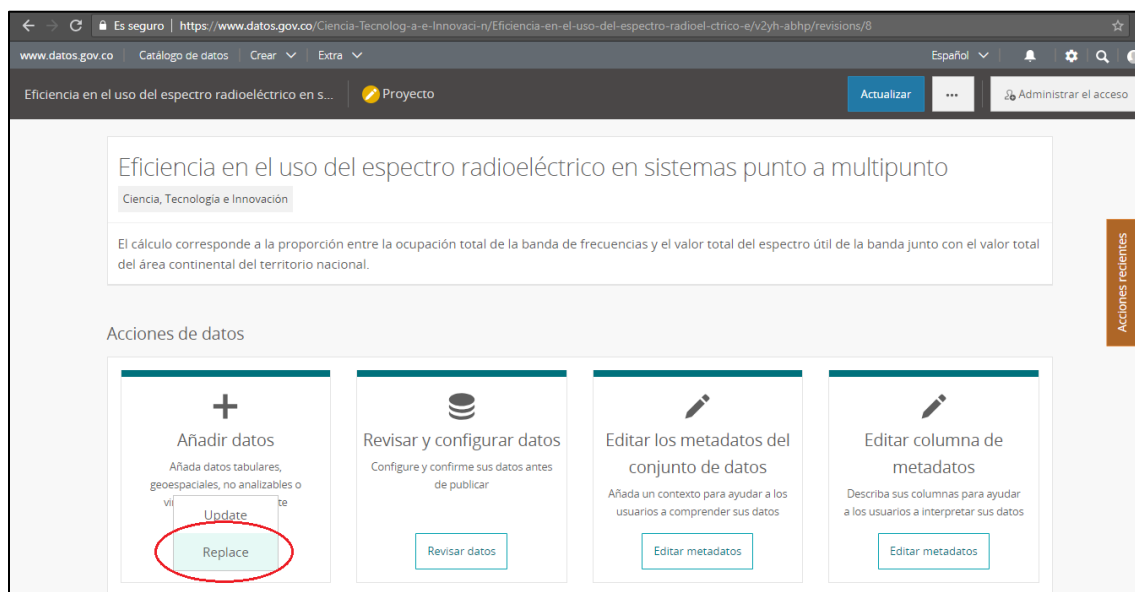


Figura 35. Botón de reemplazar Conjunto de Datos dentro del portal de datos abiertos del Estado.

Fuente: propia.

vi. Hacer clic en el botón “Navegar” como se señala en la Figura 36:



Figura 36. Botón de abrir ventana de selección de archivo digital de datos dentro del portal de datos abiertos del Estado.

Fuente: propia.

vii. Ubicar y seleccionar el archivo de datos “EUE_PMP.kml” y hacer clic en el botón “Abrir” como se señala en la Figura 37:

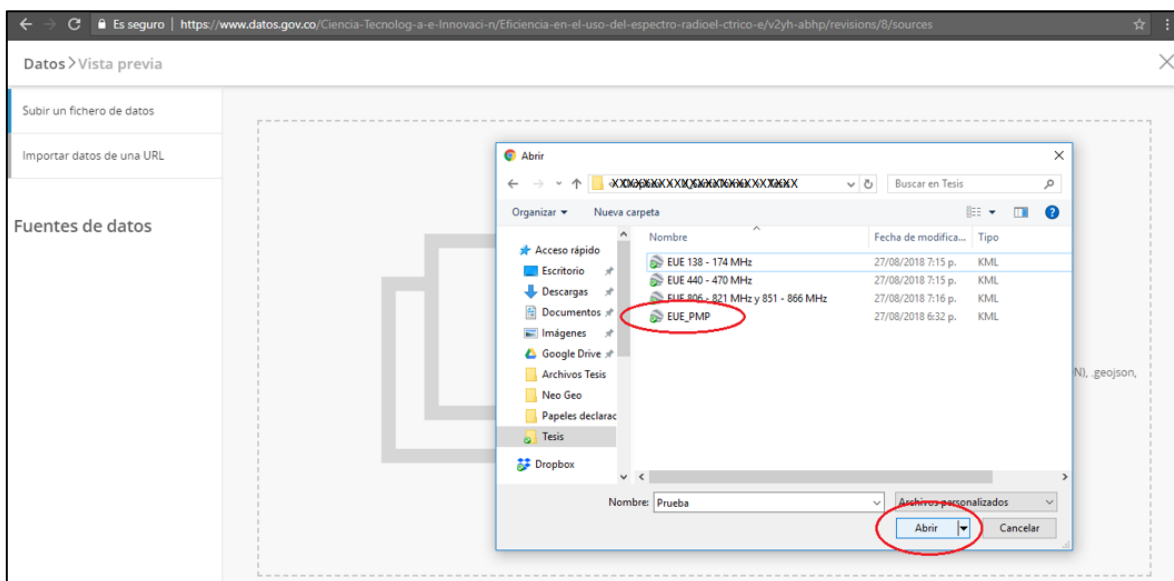
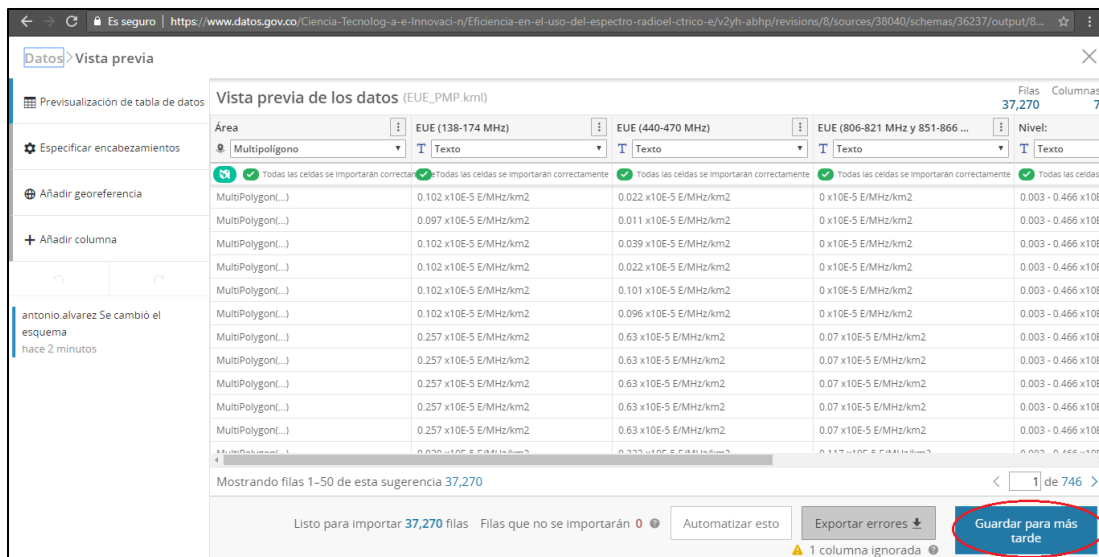


Figura 37. Selección del archivo digital de datos en el portal de datos abiertos del Estado.

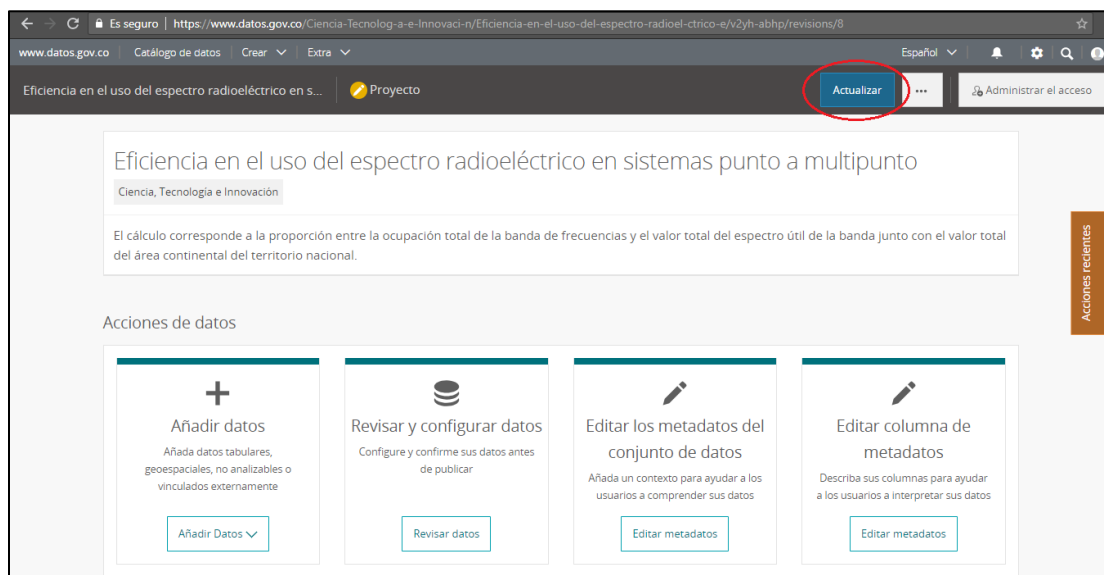
Fuente: propia.

- viii. Una vez se haya cargado el 100% del archivo seleccionado, hacer clic en el botón “Guardar para más tarde” como se señala en la Figura 38:



Fuente: propia.

- ix. Hacer clic en el botón “Actualizar” como se señala en la Figura 39:



Fuente: propia.

- x. Una vez se haya terminado de publicar el Conjunto de Datos, hacer clic en el botón “Vaya al Iniciador” como se señala en la Figura 40:

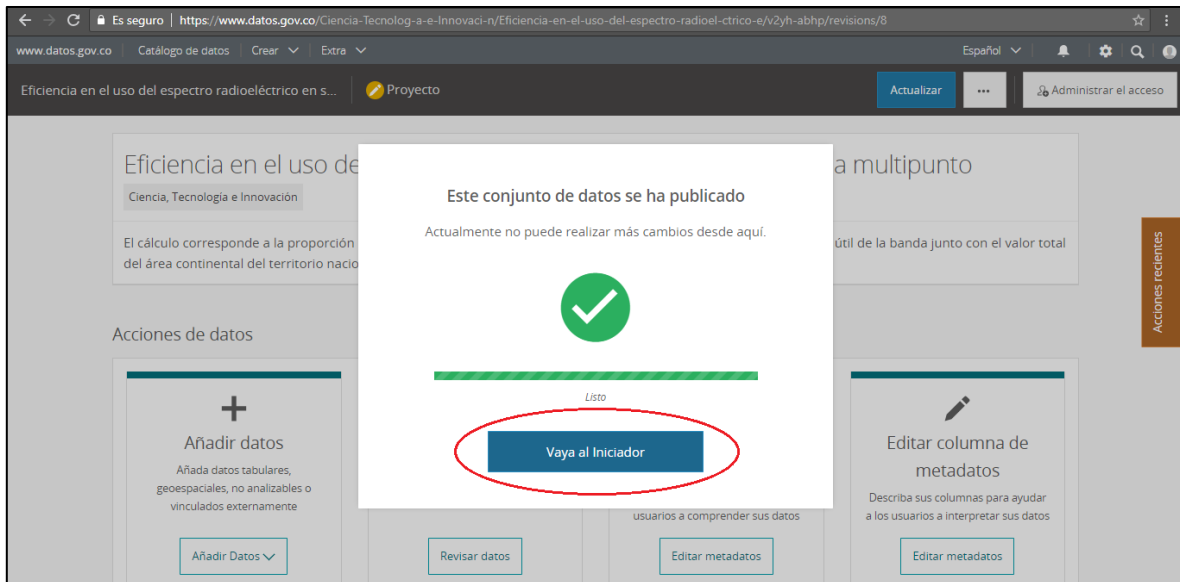


Figura 40. Botón de regresar al Conjunto de Datos actualizado en el portal de datos abiertos del Estado.

Fuente: propia.

REFERENCIAS

- [1] MINTIC, «Sitio Web oficial del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia,» [En línea]. Available: <https://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-article-2350.html>. [Último acceso: 4 Agosto 2017].
- [2] Asamblea Nacional Constituyente, *Constitución Política de Colombia*, Bogotá D.C., 1991.
- [3] Congreso de Colombia, *Ley 1341 de 2009: Por la cual se definen Principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), se crea la Agencia Nacional del Espectro y se dictan otras disposiciones*, Bogotá D.C., 2009.
- [4] UIT, Manual sobre la Gestión nacional del espectro, Edición 2015, Ginebra, Suiza: UIT, 2015.
- [5] UIT, *Recomendación UIT-R SM.1047-2: Gestión nacional del espectro*, Ginebra, Suiza: UIT, 2012.
- [6] UIT, Reglamento de Radiocomunicaciones: Volumen 1 - Artículos, 2016 ed., vol. 1, Ginebra, Suiza: UIT, 2016.
- [7] UIT, Manual sobre técnicas informatizadas para la gestión del espectro (CAT), 2015 ed., Ginebra, Suiza: UIT, 2015.
- [8] MINTIC, «Sitio Web oficial del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia,» [En línea]. Available: <http://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-article-4639.html>. [Último acceso: 19 Abril 2018].

- [9] Presidencia de la República, *Decreto 4169 de 2011: Por el cual se modifica la naturaleza jurídica de la Agencia Nacional del Espectro y se reasignan funciones entre ella y el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones*, Bogotá D.C., 2011.
- [10] MINTIC, *Decreto 4392 de 2010: Por el cual se reglamenta la selección objetiva y la asignación directa por continuidad del servicio de que tratan los artículos 11 y 72 de la Ley 1341 de 2009*, Bogotá D.C., 2010.
- [11] MINTIC, «Sitio Web oficial del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia,» [En línea]. Available: <http://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-article-6202.html>. [Último acceso: 11 Agosto 2018].
- [12] UIT, *Recomendación UIT-R SM.1046-3: Definición de la eficacia en la utilización del espectro por un sistema de radiocomunicaciones*, Ginebra, Suiza: UIT, 2017.
- [13] UIT, *Recomendación UIT-R SM.1599-1: Determinación de la distribución geográfica y de las frecuencias del factor de utilización del espectro a efectos de planificación de frecuencias*, Ginebra, Suiza: UIT, 2007.
- [14] ANATEL, *Resolución 548 de 2010: Regulación para la Evaluación de la Eficiencia del Uso del Espectro de Radiofrecuencias*, Brasilia: ANATEL, 2010.
- [15] FCC, «Spectrum Policy Task Force report: ET Docket No. 02- 135,» FCC, Washington, DC, 2002.
- [16] FCC, «Spectrum Policy Task Force: Report of the Spectrum Efficiency Working Group,» FCC, Washington, D.C., 2002.
- [17] NTIA, *CSMAC - Definitios of Efficiency in Spectrum Use*, Washington, D.C.: NTIA, 2008.

- [18] TRAI, *Consultation Paper on Spectrum related issues: Efficient Utilisation, Spectrum Allocation, and Spectrum Pricing*, Nueva Delhi: TRAI, 2004.
- [19] Congreso de la Unión, *Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión*, Ciudad de México, 2014.
- [20] Dirección General Adjunta del Diario Oficial de la Federación, «Diario Oficial de la Federación,» 2016. [En línea]. Available: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5498528&fecha=26/09/2017#. [Último acceso: 2 Diciembre 2017].
- [21] Analysys Mason Limited, «Estudio de Métricas de Eficiencia Espectral,» Analysys Mason Limited, Londres, Inglaterra, 2015.
- [22] OFCOM, «Spectrum management strategy: Spectrum attribution metrics,» OFCOM, Londres, 2013.
- [23] OFCOM, «Implementing TV White Spaces,» OFCOM, Londres, 2015.
- [24] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, *Decisión 243 de 2012: Por la que se establece un programa plurianual de política del espectro radioeléctrico*, Estrasburgo: Diario Oficial de la Unión Europea, 2012.
- [25] Comisión Europea, «Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo sobre el Inventario del espectro radioeléctrico,» Comisión Europea, Bruselas, 2014.
- [26] ANE, «Sitio Web oficial de la Agencia Nacional del Espectro,» [En línea]. Available: <https://www.ane.gov.co/index.php/about-us/funciones-y-deberes>. [Último acceso: 4 Agosto 2017].
- [27] UIT, *Recomendación UIT-R F.592-4: Vocabulario de términos para el servicio fijo*, Ginebra, Suiza, 2007.

- [28] ANE, *Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias: Versión 2017*, Bogotá D.C., 2017.
- [29] Ministerio de Comunicaciones, *Resolución 5273 de 1997: Por la cual se adopta el plan de canalización y distribución de las bandas del espectro radioeléctrico atribuidas a los sistemas de acceso troncalizado*, Bogotá D.C., 1997.
- [30] ANE, «Propuesta de reorganización de la banda de 450 MHz,» Bogotá D.C., 2017.
- [31] UIT, *Recomendación UIT-R V.665-3: Unidad de intensidad de tráfico*, Ginebra, Suiza: UIT, 2015.
- [32] UIT, *Recomendación UIT-R SM.337-6: Separaciones en frecuencia y en distancia*, Ginebra, Suiza: UIT, 2008.
- [33] National Archives and Records Administration's (NARA) Office of the Federal Register (OFR) and the Government Publishing Office (GPO), «Electronic Code of Federal Regulations,» 1 Enero 2015. [En línea]. Available: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=59a4bfc828c29cc9b2757a14754357a5&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#se47.5.90_1187. [Último acceso: 27 Marzo 2018].
- [34] UIT, *Recomendación UIT-R P.526-14: Propagación por difracción*, Ginebra, Suiza: UIT, 2018.
- [35] NTIA, «Microcomputer Spectrum Analysis Models (MSAM) Home Page,» Octubre 2001. [En línea]. Available: http://ntiacsd.ntia.doc.gov/msam/FDR/FDR_PROGRAM.doc. [Último acceso: 27 Marzo 2018].
- [36] National Archives and Records Administration's (NARA) Office of the Federal Register (OFR) and the Government Publishing Office (GPO), «Electronic Code of Federal Regulations,» 1 Enero 2015. [En línea]. Available: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text->

idx?SID=d85545293dd6a96e7d8af5e63d10fea5&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#se47.5.90_1210. [Último acceso: 27 Marzo 2018].

- [37] IGAC, «Sitio Web oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi,» [En línea]. Available:
http://www2.igac.gov.co/igac_web/contenidos/plantilla_general_titulo_contenido.jsp?idMenu=212. [Último acceso: 4 Agosto 2018].
- [38] MINITC, *Decreto 2573 de 2014: Por la cual se establecen los lineamientos generales de la Estrategia de Gobierno en Línea, se reglamenta parcialmente la Ley 1341 de 2009 y se dictan otras disposiciones*, Bogotá D.C., 2014.
- [39] MINTIC, «Sitio Web oficial de la Estrategia Gobierno en Línea,» [En línea]. Available:
<http://estrategia.gobiernoenlinea.gov.co/623/w3-article-51527.html>. [Último acceso: 27 Agosto 2018].
- [40] MINTIC, *Decreto 1008 de 2018: Por el cual se establecen los lineamientos generales de la política de Gobierno Digital y se subroga el capítulo 1 del título 9 de la parte 2 del libro 2 del Decreto 1078 de 2015, Decreto Único Reglamentario del sector de Tecnologías*, Bogotá D.C., 2018.
- [41] MINTIC, «Sitio Web oficial de la Estrategia Gobierno en Línea,» [En línea]. Available:
http://estrategia.gobiernoenlinea.gov.co/623/articles-7941_recurso_1.pdf. [Último acceso: 27 Agosto 2018].
- [42] Presidencia de la Republica, *Decreto 1494 de 2015: Por el cual se corrigen yerros en la Ley 1712 de 2014*, Bogotá D.C., 2015.
- [43] MINITC, *Resolución 3564 de 2015: Por la cual se reglamentan aspectos relacionados con la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública*, Bogotá D.C., 2015.

- [44] MINTIC, «Sitio Web oficial de la Estrategia Gobierno en Línea,» [En línea]. Available: <http://estrategia.gobiernoenlinea.gov.co/623/w3-article-9407.html>. [Último acceso: 27 Agosto 2018].
- [45] Socrata, «Sitio Web oficial de la API de Datos Abiertos Socrata,» Socrata, [En línea]. Available: <https://dev.socrata.com/>. [Último acceso: 30 Agosto 2018].