

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

“MEDICIÓN, CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO DEL RANGO DE
FRECUENCIAS ASIGNADO A SERVICIOS FIJOS (1427 - 1518 MHz) DE LA
BANDA UHF DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO EN LA FIEC,
CAMPUS PROSPERINA”

TESINA DE SEMINARIO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Presentado por:

Kelvin Calixto Magallanes Conforme

Paolo André Cedeño Donoso

Guayaquil – Ecuador

AÑO 2015

AGRADECIMIENTO

Mi expresa gratitud a Dios por cuidar y bendecir mis caminos; a mis padres por su completo y total apoyo durante toda mi etapa de formación y sus consejos; a mis hermanos y toda mi familia en general por confiar siempre en mí y su completa predisposición cuando algo requiera.

Paolo Cedeño Donoso

A Dios, por bendecir mis actividades y decisiones diarias tomadas en mi vida; a mis padres por haber cultivado en mí el sentido de responsabilidad y cariño hacia mi familia, a mis amados esposa e hijo por su apoyo decidido e incondicional.

Kelvin Magallanes Conforme.

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y toda mi querida familia por su confianza y apoyo incondicional.

Paolo Cedeño Donoso

A mis queridos padres, esposa e hijo por su constante apoyo y compañía. A mis hermanos y familia más cercana.

Kelvin Magallanes Conforme

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Washington Medina

PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN



M.Sc. Sara Ríos O.

PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesina, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Paolo Cedeño", written over a horizontal line.

Paolo Cedeño Donoso

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Kelvin Magallanes", written over a horizontal line.

Kelvin Magallanes Conforme

RESUMEN

El presente proyecto forma parte de un estudio realizado en ESPOL, Campus Prosperina, sobre el uso eficiente del espectro en todas las bandas contempladas en el Plan Nacional de Frecuencias de Ecuador y que para este caso específico se analizará la banda comprendida entre los 1427 a 1518 MHz. Con la recopilación de datos, se logrará determinar la densidad espectral y establecer un modelo matemático que indique que tan eficientemente está siendo utilizado.

En el **primer capítulo** se mencionan los antecedentes que permiten formular el problema, definiendo claramente los objetivos y una metodología que conlleve a resultados verídicos y fiables, teniendo en cuenta las limitaciones propias del medio donde se realiza la investigación de este proyecto.

En el **segundo capítulo** se aborda el marco teórico y legal, con una revisión de las recomendaciones técnicas de la UIT-R respecto de los servicios que se pueden prestar, parámetros técnicos de funcionamientos y servicios a ofrecer la banda de estudio, que van a fundamentar el desarrollo del proyecto con base al planteamiento inicial del problema. Luego se analizará un conjunto de procedimientos administrativos, técnicos y procesos científicos que permitirán garantizar la utilización eficaz de los sistemas radioeléctricos y la explotación de los sistemas radioeléctricos sin producir interferencia

perjudicial, o minimizándola en el peor de los escenarios. A continuación revisaremos qué servicios se pueden ofrecer en nuestra banda de estudio, qué concesionarios cuentan con los permisos de operación y qué portadoras son las más cercanas (ubicación) dentro de nuestro análisis de estudio.

En el **tercer capítulo** se describe el procedimiento para el análisis y evaluación de la ocupación del espectro en las bandas de frecuencias UHF comprendida entre los 1427 a 1518 MHZ, qué equipos se utilizaron para este fin, metodología y qué criterios se consideraron para la métrica de evaluación. A continuación se muestran los resultados correspondientes a la evaluación espectral y la disponibilidad que se predispone para ofrecer otros servicios.

En el **cuarto capítulo** se explica en forma detallada la metodología y el procedimiento para el levantamiento de información (muestras, tiempo de muestreo, configuración, otros). Adicional se explican los principios y fundamentos bajo los cuales se sustenta los criterios para el análisis de resultados y determinación porcentaje de ocupación, utilizando espectrogramas para la ilustración de los resultados. Como complemento, se incorporará un mapa georeferencial de las portadoras utilizando la herramienta Radio Mobile para relacionar o argumentar los resultados obtenidos.

Finalmente **en el quinto capítulo** se revisarán los conceptos, propuestas y posibles escenarios acerca de las tecnologías de espacios en blanco y radio cognitiva. Se analizará algunos casos de estudio y éxito a nivel mundial en la utilización de mejores tecnologías para dar un uso más eficiente al espectro; así como la posibilidad de aplicaciones reales en nuestro país.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	II
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
CAPÍTULO 1	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	5
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 OBJETIVOS	9
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	9
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.5 ALCANCE	10
1.6 METODOLOGÍA.....	11

1.7 RESULTADOS ESPERADOS	13
1.8 LIMITACIONES	14
CAPÍTULO 2	16
2.1 MARCO TEÓRICO	16
2.1.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	16
2.1.2 ESPECTRO RADIOELÉCTRICO	17
2.1.3 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES PARA EL USO EFICAZ ...	18
2.1.4 GESTIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO	20
2.1.5 COMPROBACIÓN TÉCNICA DEL ESPECTRO	21
2.1.6 MEDICIÓN DE PARÁMETROS OPERACIÓN PARA LA COMPROBACIÓN TÉCNICA	23
2.1.7 RECOMENDACIONES UIT-R	29
2.1.8 CUADRO NACIONAL DE ATRIBUCIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIA, RANGO 1427–1518 MHZ	30
2.1.9 BANDA DE 1400 Y 1500 MHZ	34
2.1.10 DESCRIPCIÓN DE LOS SERVICIOS DE RADIOCOMUNICACIÓN QUE SE OFRECEN	35
2.2 MARCO JURÍDICO	39
2.2.1 ORGANISMOS REGULADORES	40
2.2.2 LEYES Y REGLAMENTOS DE LAS TELECOMUNICACIONES EN EL ECUADOR	41
2.2.3 PLAN NACIONAL DE FRECUENCIAS	42

2.2.4 ASIGNACIÓN LOCAL DE CONCESIONES EN EL RANGO DE FRECUENCIAS 1427 -1518 MHZ.	43
CAPÍTULO 3.....	46
3.1 INTRODUCCIÓN.....	46
3.2 SERVICIOS QUE SE OFRECEN.....	47
3.3 UBICACIÓN DEL SITIO PARA LA TOMA DE MEDICIONES ESPECTRALES.....	48
3.4 EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN ESPECTRAL.....	50
3.5 PROCEDIMIENTO PARA EVALUACIÓN ESPECTRAL.....	51
3.6 ESQUEMA DE CONEXIÓN.....	55
3.7 CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS.....	56
3.8 MÉTRICA DE EVALUACIÓN Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE OCUPACIÓN.....	60
3.8.1 POTENCIA DE LA RELACIÓN SEÑAL/RUIDO (SNR).....	60
3.8.2 UMBRAL.....	61
3.8.3 SELECCIÓN DE MECANISMO PARA CÁLCULO DE PORCENTAJE DE OCUPACIÓN DEL CANAL.....	62
3.9 PROCEDIMIENTO.....	65
3.9.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	65
3.10 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN PARA LAS MEDICIONES DE CAMPO.....	67
3.11 PROCESAMIENTO.....	71

3.11.1 CICLO DE TRABAJO	71
3.12 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES	74
3.13 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ESPECTRAL	75
3.13.1 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN.....	76
3.14 DISPONIBILIDAD Y PORCENTAJE DE OCUPACIÓN	78
3.15 POSICIONAMIENTO GEOGRÁFICO DE ALGUNOS PROVEEDORES DE SERVICIO EN EL SECTOR.....	89
CAPÍTULO 4.....	95
4.1 MODELO PROPUESTO	96
4.2 MODELO DE ACCESO OPORTUNO AL ESPECTRO	98
4.3 CAPACIDAD COGNITIVA Y RECONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS	101
CAPÍTULO 5.....	106
5.1 INTRODUCCIÓN.....	106
5.2 ASPECTOS GENERALES DE LA TECNOLOGÍA DE RADIO COGNITIVA	110
5.3 BENEFICIOS DE LA RADIO COGNITIVA	111
5.4 RETOS PARA LA APLICACIÓN DE LA RADIO COGNITIVA.....	111
5.5 APLICACIONES PARA EL USO DE ESPACIOS BLANCOS DEL ESPECTRO	115
5.6 ESCENARIOS DE APLICACIÓN DE RADIO COGNITIVA	117
5.6.1 EXTENSIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES ...	117

5.6.2 COMUNICACIÓN DIRECTA DISPOSITIVO A DISPOSITIVO.....	118
5.6.3 REDES COGNITIVAS AD HOC.....	119
5.6.4 SERVICIOS DE BANDA ANCHA EN ESPACIOS RURALES.....	120
5.6.5 REDES INTELIGENTES DE SENSORES INALÁMBRICOS	121
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFÍA	

ABREVIATURAS

Abreviatura	Inglés	Español
AGC	Automatic Gain Control	Control Automático de Ganancia
BS	Base Station	Estación Base
CPE	Customer Premises Equipment	Equipo Local Cliente
CRS	Cognitive Radio System	Sistema de Radio Cognitiva
DSA	Dinamic Spectrum Access	Sasignación Dinámica de Espectro
DTV	Digital Televisión	Televisión Digital
EHF	Extremely High Frequency	Frecuencia Extremadamente Alta
FBO		Ocupación del Canal de Frecuencias
FCC	Federal Communications Commission	Comisión Federal de Comunicaciones
FCO	Frequency Channel Occupancy	Ocupación del Canal de frecuencias
GPS	Global Positioning System	Sistema de Posicionamiento Global
GSM	Global System for Mobile	sistema global para las comunicaciones móviles
HF	High Frequency	Frecuencia Alta
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

IFM	Instantaneous Frequency Measurement	Medición de Frecuencia Instantánea
LF	Low Frequency	Frecuencia Baja
LTE	Long Term Evolution	Evolución a Largo Plazo
MF	Medium Frequency	Frecuencia Media
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal
PU	Primary User	Usuario Primario
QoS	Quality of Service	Calidad de Servicio
RC		Radio Cognitiva
SDR	Software Defined Radio	Software de Radio Definido
SHF	Super High Frequency	Frecuencia Super Alta
SNR	Signal to Noise Ratio	Relación Señal a Ruido
SRO	Spectrum Resources	Ocupación de Recursos del Espectro
TRF		Transformada Rápida de Fourier
UHF	Ultra High Frequency	Frecuencia Ultra Alta
UIT		Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R		Unión Internacional de Telecomunicaciones Sector Radiocomunicación
VHF	Very High Frequency	Frecuencia Muy Alta
VLF	Very Low Frequency	Frecuencia Muy Baja
WRAN	Wireless Regional Area Network	Red Inalámbrica de Área Regional
WSD	White Space Device	Dispositivo de Espacio en Blanco

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	17
FIGURA 2.2 ANCHO DE BANDA OCUPADO [17]	27
FIGURA 2.3 MAPA DE REGIONES UIT-R [19].....	30
FIGURA 2.4 ENLACE PUNTO - PUNTO	36
FIGURA 2.5 ENLACE ESTACIÓN FIJA - MÓVIL	36
FIGURA 2.6 RADIODIFUSIÓN	37
FIGURA 2.7 RADIODIFUSIÓN POR SATÉLITE	38
FIGURA 2.8 RADIOCOMUNICACIÓN MÓVIL POR SATÉLITE	39
FIGURA 3.1 UBICACIÓN DE LABORATORIOS DE LA FIEC -ESPOL.....	49
FIGURA 3.2 ANALIZADOR DE ESPECTRO AGILENT E4404B.....	50
FIGURA 3.3 ANTENA SIRIO SD2000U.....	51
FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN ESPECTRAL.....	53
FIGURA 3.5 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA IMPLEMENTACIÓN SSF..	56
FIGURA 3.6 ESQUEMA DE CONEXIÓN.....	56
FIGURA 3.7 CONFIGURACIÓN DE CONEXIÓN	57
FIGURA 3.8 IDENTIFICACIÓN DEL PUERTO DE LA INTERFACE	58
FIGURA 3.9 IDENTIFICACIÓN DE LOS CONTROLADORES Y CONEXIÓN DEL DISPOSITIVO	59

FIGURA 3.10 CAPTURA DE SEÑAL ESPECTRAL	59
FIGURA 3.11 MECANISMOS PARA EL CÁLCULO DE PORCENTAJE DE OCUPACIÓN	63
FIGURA 3.12 UMBRAL, PORTADORA REFERIDA AL NIVEL DE RUIDO..	69
FIGURA 3.13 CAPTURA DE SEÑAL ESPECTRAL	75
FIGURA 3.14 ESPECTROGRAMA DÍA 1 (DÍA)	79
FIGURA 3.15 ESPECTROGRAMA DÍA 1 (NOCHE)	80
FIGURA 3.16 ESPECTROGRAMA DÍA 2.....	81
FIGURA 3.17 ESPECTROGRAMA DÍA 3.....	82
FIGURA 3.18 ESPECTROGRAMA DÍA 4 (DÍA)	83
FIGURA 3.19 ESPECTROGRAMA DÍA 5 (NOCHE)	84
FIGURA 3.20 ESPECTROGRAMA DÍA 6 (DÍA)	85
FIGURA 3.21 ESPECTROGRAMA DÍA 7 (NOCHE)	86
FIGURA 3.22 CONFIGURACIÓN DE LAS REDES	91
FIGURA 3.23 INGRESO DE CORDENADAS.....	91
FIGURA 3.24 UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE RADIO BASE	92
FIGURA 3.25 POSICIONAMIENTO GEOGRÁFICO DE ALGUNOS PROVEEDORES DE SERVICIOS PUNTO A PUNTO EN EL SECTOR	93
FIGURA 4.1 DIAGRAMA DEL MODELO DE ACCESO OPORTUNO AL ESPECTRO	99
FIGURA 4.2 COMPONENTES TÍPICOS DE RADIO COGNITIVA	104
FIGURA 5.1 ESPACIOS EN BLANCO [36].....	107

FIGURA 5.2 TRANSMISOR DE ESPACIO EN BLANCO [36]	109
FIGURA 5.3 ILUSTRACIÓN DEL CONCEPTO DE SISTEMA DE RADIO COGNITIVA [6]	111
FIGURA 5.4 AGREGACIÓN DEL ESPECTRO [36].....	112
FIGURA 5.5 SUBSISTEMA DE DETECCIÓN [36].....	113
FIGURA 5.6 EJEMPLO DE ARQUITECTURA DE UNA RED DE RADIO COGNITIVA Y EJEMPLOS DE USO DEL ESPECTRO [36].....	115
FIGURA 5.7 RED DE SENSORES DE RADIO COGNITIVA [36]	116
FIGURA 5.8 SISTEMA CELULAR COGNITIVO [36]	116
FIGURA 5.9 ESQUEMA DE EXTENSIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES	118
FIGURA 5.10 SERVICIOS DE BANDA ANCHA EN ESPACIOS RURALES	121

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 BANDAS DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO [13].....	18
TABLA 2.2. PRECISIÓN DE LAS MEDICIONES DE INTENSIDAD DE CAMPO.....	29
TABLA 2.3 CUADRO NACIONAL DE ATRIBUCIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIA, RANGO 1427–1518 MHZ.....	32
TABLA 2.4 ASIGNACIÓN LOCAL DE CONCESIONES	44
TABLA 3.1. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS MEDICIONES..	77
TABLA 3.2 COORDENAS DE UBICACIÓN DE RADIO BASES DE LOS CONCESIONARIOS	89

INTRODUCCIÓN

El continuo desarrollo y rápido despliegue de las nuevas tecnologías de radio, la democratización del espectro, y las solicitudes por la concesión de mayor ancho de banda producen un nuevo reto para la gestión y supervisión del espectro radioeléctrico.

La creciente utilización de las radiocomunicaciones ha conllevado a que los administradores de espectro necesiten saber la ocupación real de ciertas bandas de frecuencia a fin de garantizar una aceptable calidad de los servicios. Para lograr este objetivo es necesario realizar la comprobación técnica de su utilización, un tema que en la actualidad es ampliamente debatido y discutido a nivel mundial.

El espectro de frecuencias radioeléctricas es considerado como un recurso natural y limitado cuya gestión, administración y control es de propiedad exclusiva del Estado. La digitalización de las radiocomunicaciones supone la búsqueda de nuevos recursos técnicos necesarios para garantizar la utilización eficaz del espectro. Se determinarán la densidad espectral y un modelo matemático que indique que tan eficientemente está siendo utilizado el espectro electromagnético para establecer la factibilidad del uso de nuevas tecnologías de Radio Cognitiva.

CAPÍTULO 1

1. PROBLEMA Y ANTECEDENTES SOBRE USO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

1.1 Antecedentes

Es evidente que el progreso tecnológico, en especial en el campo de las comunicaciones, avanza cada día en países considerados en vía de desarrollo donde el Ecuador no es la excepción. Por tal motivo, los avances, la rápida evolución de nuevos sistemas en el área de las redes inalámbricas, la aparición de tecnologías emergentes tales como 3G/4G y la convergencia de sistemas, han provocado un mayor uso del

espectro radioeléctrico como medio de comunicación lo que ha desencadenado una creciente demanda por acceder a la misma, especialmente bandas no licenciadas; así como la renegociación de la asignación para aumentar su capacidad y el derecho, como tal deber para el Estado, de garantizar el 33% de uso de espectro para comunidades del sector [1].

Con la implementación de estas nuevas tecnologías en el área de las telecomunicaciones, en estudios realizados alrededor de este tema se ha evidenciado una subutilización en ciertas bandas mientras otras están altamente congestionadas; demostrando un ineficiente uso del espectro y la escasez del mismo [2] [3].

El uso ineficiente del espectro puede ocasionar velocidades de descarga limitadas por el poco ancho de banda destinado para el usuario final, problemas de interferencia, subutilización de bandas (las mismas que presentan propiedades físicas únicas que sólo pueden ser utilizadas para servicios concretos), y principalmente un difícil despliegue de nuevas tecnologías, retraso de infraestructura y un escaso interés en inversión.

Existen organismos nacionales e internacionales que mediante conferencias o reuniones promueven el uso adecuado del espectro de

frecuencias radioeléctricas al que se considera como un recurso estratégico y que se está convirtiendo en una prioridad cada vez más acuciante para los actores gubernamentales y de la industria privada [4].

La Unión Internacional de Telecomunicaciones, como organismo especializado de las Naciones Unidas a través del Sector de Radiocomunicación (en adelante UIT-R), propone la comprobación técnica del espectro como elemento fundamental para la gestión del mismo y para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan utilizar de manera eficiente este recurso [5].

La UIT-R considera que las modernas tecnologías que permiten el intercambio de información aumentan la productividad, pero así mismo necesitan de una apropiada planificación y gestión para garantizar estos servicios. También, reconoce que para poner en práctica de manera eficaz y satisfactoria el intercambio electrónico de datos a través de espectro, las administraciones deben utilizar normas acordadas internacionalmente [5].

Entorno a esto, se están desarrollando sistemas de radiocomunicaciones que tienen el potencial para utilizar los recursos

de radio de manera mucho más dinámica y eficiente que los sistemas de radiocomunicaciones actuales.

En este contexto, el Sistema de Radio Cognitiva (CRS) puede ofrecer una mayor eficiencia y flexibilidad adicional a la utilización del espectro. Teniendo en cuenta el estado actual de la tecnología se considera que la implementación de la Tecnología CRS pueda sí implementarse de forma gradual debido a una serie de desafíos [6].

El concepto de radio cognitiva no es nuevo, en la década de 1910 los sistemas de radio marítimos ya utilizaban recursos compartidos de espectro. La idea de la radio cognitiva (RC) como una alternativa paradigma de la comunicación inalámbrica, capaz de realizar la gestión y ejecución en sí en tiempo real sin intervención humana, fue propuesto por primera vez por Joseph Mitola III y Gerald P. Maguire Jr. [7].

Actualmente en el Ecuador se están debatiendo propuestas sobre el proyecto de Ley Orgánica de Telecomunicaciones con las que se busca reformar las normas que datan desde el año de 1992 y de esta manera crear una nueva institucionalidad en las telecomunicaciones que permita, como sector estratégico del Estado, cumplir su gestión que es defender los derechos de los usuarios de servicios y fomentar el uso eficiente del espectro [9].

1.2 Preguntas de Investigación

- ¿Cuál es la disponibilidad de uso en el rango de frecuencias asignado a servicios fijos (1427 - 1518 MHz) de la banda UHF del espectro electromagnético?
- ¿Existe sobre-congestionamiento o sub-utilización del espectro?
- ¿En términos de qué se puede medir la eficiencia y qué parámetros están involucrados?
- ¿Es posible la implementación de tecnologías emergentes en las bandas de estudio?

1.3 Justificación

La existencia de los servicios móviles se da gracias a la propagación de las señales radioeléctricas a través de medios no guiados, por lo que, una escasez del recurso, una limitada asignación o una mala concesión, seguramente influirá negativamente y perjudicará el desarrollo del sector de las telecomunicaciones y del País. Si bien es cierto el espectro radioeléctrico tiene una propiedad intrínseca de limitado o escaso, esta escasez puede ser parcialmente manejable mediante tecnologías más eficientes, que aproveche mejor el mismo espectro, logrando transmitir una mayor cantidad de datos sin incrementar el ancho de banda asignado, entre otras estrategias.

De ahí la importancia de una correcta administración y uso eficiente del espectro, por lo que es preciso que “se regule este recurso desde el punto de vista técnico y económico, y con ello, se establezcan adecuadamente las condiciones para su uso” [9]. Gracias al espectro radioeléctrico, es posible brindar una variedad de servicios de telecomunicaciones que día a día tienen una importancia creciente para el desarrollo y economía de un país.

Desde el punto de vista técnico, al ser limitado, necesario y definido como un sector estratégico en nuestro país, la variedad de servicios de telecomunicaciones que se puedan ofrecer deberá ser evaluado ya no solamente en términos de servicios de conectividad y cobertura; sino también en términos de eficiencia de uso y cómo se optimiza este recurso para transmitir más utilizando menos.

Este tema de optimización del espectro radioeléctrico no es nuevo. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), a través del Sector de Radiocomunicación (UIT-R) propone la comprobación técnica del espectro como elemento fundamental para la gestión del mismo y para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan utilizar de manera más eficiente este recurso.

Adicional, dentro del marco legal de nuestro país, el Art. 48 (decreto no. 1790), entre sus principios indica “El Estado debe fomentar el uso y explotación del espectro radioeléctrico y de los servicios de radiocomunicación, de una manera racional y eficiente a fin de obtener el máximo provecho” [10]. Las telecomunicaciones, las tecnologías de la información y comunicación y la informática, son considerados ejes medulares dentro de nuestra constitución para lograr el avance efectivo del país hacia la Sociedad de la Información y del Conocimiento.

Como estrategia para alcanzar aquello, el Gobierno del Presidente Rafael Correa creó el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información o también conocido como MINTEL, como órgano rector para coordinar acciones de asesoría y apoyo, establecer políticas y planes generales para garantizar el acceso igualitario a los servicios de telecomunicaciones y promover su uso efectivo, eficiente y eficaz.

Luego, desde una perspectiva social, varios estudios han demostrado cómo el desarrollo de las telecomunicaciones impacta en el mejoramiento de la calidad de vida de las personas y lógicamente brindan mayores y mejores prestaciones que los servicios actuales. Por tal motivo consideramos relevante incluir en nuestro estudio qué tecnologías emergentes pueden ser aplicadas en nuestro país a fin de

“garantizar el acceso universal y el servicio universal, en especial, para aquellos ciudadanos ubicados en zonas rurales o urbano-marginales, que fomenten el uso masivo de las tecnologías de la información y comunicación para el desarrollo” [10].

El buen aprovechamiento del espectro permitirá crear nuevos servicios especialmente en las industrias o empresas de telecomunicaciones lo que produciría aumento de empleo y generaría rentabilidad para poder invertir en proyectos con repercusiones positivas y de impacto social.

Partiendo de estas premisas de carácter técnico, social y legal, el presente documento busca establecer un análisis de la utilización real del espectro electromagnético y determinar la eficiencia de uso en las bandas de frecuencias UHF de 1427 MHz hasta los 1518 MHz, en base a mediciones de campo tomadas en el Laboratorio de Telecomunicaciones de la FIEC de la ESPOL (Campus Prosperina).

Sin embargo, el estudio no es determinante para establecer parámetros de gestión para el uso de las bandas concesionadas en ese rango, sino más bien un referente para ver de qué manera se puedan utilizar o implementar futuras tecnologías que permitan que esas frecuencias operen de manera eficiente en lugares en donde no se tenga cobertura por parte del concesionario ya que algunas bandas están mucho más

ocupadas que otras y es esencial saber el porcentaje de ocupación real.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Medir, caracterizar y modelar el rango de frecuencias asignado a servicios fijos (1427 - 1518 MHz) de la banda UHF del espectro electromagnético en la FIEC Campus Prosperina de la ESPOL.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Revisar las leyes que reglamentan o norman el uso del espectro; así como sus entes reguladores.
- Revisar la atribución de frecuencias en el rango de 1427 a 1518 MHz asignadas por la SENATEL y de los diferentes servicios de radiocomunicaciones ofrecidos.
- Realizar mediciones en campo para observar el comportamiento en tiempo real del espectro en el rango asignado para muestreo utilizando el equipo analizador de espectro marca Agilent modelo E4404B con una antena multibanda SIRIO SD2000U.

- Realizar el análisis de la densidad espectral para evaluar el nivel de ocupación del espectro asignado e identificar qué porciones del mismo están siendo subutilizadas en el Campus Prosperina de ESPOL.
- Presentar un modelo descriptivo de sistema de acceso dinámico que recopile los fundamentos de radio cognitiva para mejorar la eficiencia de uso del espectro radioeléctrico.
- Analizar en qué medida puede ayudar la recolección de datos como información útil para establecer las posibilidades reales de implementación de nuevas tecnologías, así como de sistemas de accesos dinámicos de espectro en las frecuencias radioeléctricas concesionadas pero que están siendo subutilizadas.

1.5 Alcance

El presente proyecto tiene como finalidad gestionar los datos espectrales obtenidos de las mediciones en el Laboratorio de Telecomunicaciones de la ESPOL Campus Prosperina para establecer un modelo matemático que permita explicar el estado y comportamiento, real, del uso del espectro radioeléctrico y su eficiencia en el rango de frecuencias de 1427 - 1518 MHz. Luego, a partir de estos resultados se pueda impulsar la implementación de futuras

tecnologías que garanticen la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas, como recomienda la UIT [UIT-R SM.668-1].

Como norma general, las definiciones de los términos técnicos de telecomunicaciones serán las establecidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones - UIT, la Comunidad Andina de Naciones - CAN, organismos de gestión, administración y control como el CONATEL, SENATEL y SUPERTEL; así como la Ley Especial de Telecomunicaciones y sus reformas, como se establece en el Decreto Ejecutivo no. 1790.

1.6 Metodología

El procedimiento para alcanzar los objetivos planteados será realizado en cinco partes principalmente las cuales se detallan a continuación:

La primera parte del trabajo de investigación consistirá en realizar un estudio de los diferentes servicios que se ofrecen, cuáles son las normas que rigen sobre el rango de frecuencias asignado y cuáles son las normas técnicas de transmisión y medición de los niveles de señal de acuerdo a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y las normativas legales ecuatorianas.

Luego en la segunda parte, se procede con la recolección de datos utilizando los equipos del Laboratorio de Telecomunicaciones: un analizador de espectro marca Agilent, modelo E4404B con una antena multibanda marca SIRIO, modelo SD2000U, basándonos en el método de detección de energía, habiendo calculado previamente el piso de ruido y los parámetros para la ecuación general de pérdidas en el receptor. Luego se procederá a eliminar aquellos datos aberrantes seguramente ocasionados por el ruido, la intermodulación o los equipos de medición. Seguido se realizará un análisis de los datos recolectados por canal, determinando si existe interferencia. Se establecerá un umbral de recepción mínimo para la determinación del porcentaje de ocupación y juzgar si está siendo subutilizado o no, utilizando herramientas de software estadísticas para el análisis estadístico de los datos.

A continuación, en la tercera parte se presentará la metodología a seguir y la métrica de evaluación para el cálculo del porcentaje de ocupación del espectro y predecir si el mismo se encuentra congestionado o subutilizado. Se representará de manera gráfica un mapa de los diferentes sistemas de radioenlaces alrededor del sector de estudio utilizando la aplicación Radio Mobile. Se presentarán los resultados obtenidos durante la investigación, verificando si existe

correlación con las mediciones realizadas y el análisis correspondiente dependiendo de los resultados alcanzados.

En un cuarto punto, se bosquejará un modelo sobre el funcionamiento de un sistema de acceso dinámico utilizando la tecnología radio cognitiva, revisando los módulos funcionales para su operación y qué consideraciones se deben tener en cuenta para su implementación.

Finalmente, en el quinto capítulo se revisarán diferentes propuestas sugeridas para el desarrollo de la tecnología radio cognitiva, algunos escenarios para la implementación de esta tecnología y algunos casos de estudio y medidas que se están tomando en otros países para enfrentar la escasez de este recurso natural limitado.

1.7 Resultados Esperados

Considerando la ubicación y el entorno geográfico del lugar de pruebas se espera que los resultados indiquen el uso no homogéneo e ineficiente del espectro, es decir un conjunto de canales sin utilizar o subutilizados, mientras existen otros congestionados.

Se prevé que existan concesionados a los cuales se les han atribuidos frecuencias para proporcionar determinados servicios, los cuales no

estarán siendo utilizados de manera eficiente, y otros tanto con poca cobertura o mala recepción.

Lo que se pretende es reconocer exactamente el porcentaje de disponibilidad del espectro, demostrar que el rango de frecuencias comprendido entre los 1427 a 1518 MHz se encuentra ampliamente congestionado y ocupado.

Luego, una idea subyacente de nuestro proyecto es poder identificar potenciales oportunidades. Es así como estos resultados nos llevarán a reconsiderar un nuevo protocolo de asignación de espectro de frecuencias llamado Asignación de Espectro Dinámico (DSA). Este principio es la piedra angular del concepto de Radio Cognitiva (CR), una tecnología que prevé que usuarios no licenciados puedan acceder de manera oportuna a ciertas bandas del espectro temporalmente desocupadas o subutilizadas, siempre que dichas transmisiones no den lugar a interferencias perjudiciales sobre los usuarios legítimos.

1.8 Limitaciones

Los resultados obtenidos luego del análisis de la densidad espectral no podrán ser generalizados, ni usados como evidencia de estudios más extensivos. Las conclusiones obtenidas tendrán validez para el caso

particular donde se realizó el estudio: ESPOL Campus Prosperina, debido a las condiciones geográficas propias que presenta.

El estudio no es determinante para establecer parámetros para la administración y gestión del uso de las bandas concesionadas en ese rango, sino más bien un referente para ver de qué manera se puedan utilizar o implementar futuras tecnologías que permitan que las frecuencias que están comprendidas en esas bandas operen de manera eficiente en lugares en donde no se tenga cobertura por parte del operador o concesionario titular y saber exactamente el estado de la densidad espectral en ese punto específico.

CAPÍTULO 2

2. ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN LA BANDA DE UHF DE 1427 A 1518 MHZ

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Espectro Electromagnético

Es el conjunto de ondas electromagnéticas que se extiende desde la longitud de onda de menor radiación como los rayos gamma hasta las de mayor longitud como las ondas de radio [11]. Figura 2.1.

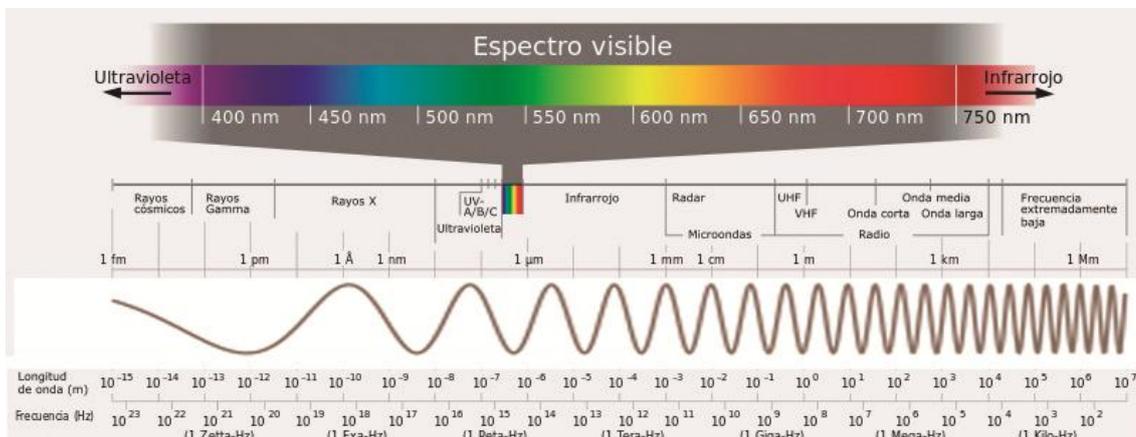


Figura 2.1 Espectro Electromagnético

2.1.2 Espectro Radioeléctrico

Comúnmente llamado Espectro, es un subconjunto de ondas electromagnéticas o porción del espectro electromagnético que van desde los 3Khz hasta los 3000 GHz y que se propagan por el espacio sin necesidad de una guía artificial. Es considerado como un recurso muy valioso y limitado [12].

Por medio del espectro radioeléctrico se puede ofrecer una diversidad de servicios de telecomunicaciones que tienen una importancia relevante para el desarrollo y economía de un país tales como comunicaciones inalámbricas, móviles y satelitales [12].

El espectro radioeléctrico se subdivide en nueve bandas de frecuencias, que se designan por números enteros, en orden creciente, de acuerdo con la siguiente Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Bandas del Espectro Radioeléctrico [13].

No. Banda	Simbología (en inglés)	Denominación (en inglés)	Gama de Frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión Métrica Correspondiente	Abreviaturas Métricas	Usos Típicos
4	VLF	Very Low Frequency	3 a 30 KHz.	Ondas Miramétricas	B.Man	Enlaces de Radio a Gran Distancia
5	LF	Low Frequency	30 a 300 KHz.	Ondas Kilométricas	B.Km	Enlace de Radio y Ayuda a la Navegación
6	MF	Medium Frequency	300 a 3000 KHz.	Ondas Decamétricas	B.Hm	Radiodifusión
7	HF	High Frequency	3 a 30 MHz.	Ondas Hectométricas	B.Dam	Comunicación a Media y Larga Distancia
8	VHF	Very High Frequency	30 a 300 MHz.	Ondas métricas	B.m	Enlace Corta Distancia, Televisión y FM
9	UHF	Ultra High Frequency	300 a 3000 MHz.	Ondas decimétricas	B.dm	Enlace de Radio, Radar y Televisión
10	SHF	Super High Frequency	3 a 30 GHz.	Ondas centimétricas	B.cm	Radar y Enlaces de Radio
11	EHF	Extremely High Frequency	30 a 300 GHz.	Ondas milimétricas	B.mm	Radar y Enlaces de Radio
12			300 a 3000 GHz.	Ondas decimilimétricas		

2.1.3 Características Fundamentales para el Uso Eficaz

Realizar un uso eficaz del espectro permitirá al Estado garantizar la disponibilidad de espectro en cuanto a espacio (ubicación o zona de

servicio), tiempo y número de canales al que los usuarios tendrán acceso.

El diseño de Sistemas de Telecomunicaciones, particularmente de sistemas inalámbricos, haciendo un uso eficaz del espectro, puede convertirse en un gran reto. Para este propósito, se han considerado los siguientes parámetros o variables más importantes a considerar para un eficaz diseño:

- Maximizar la tasa de bits.
- Minimizar la probabilidad de errores.
- Minimizar la potencia de transmisión.
- Minimizar el ancho de banda.
- Maximizar la cobertura.
- Maximizar la cantidad de usuarios.
- Minimizar la complejidad del sistema.
- Minimizar costos del sistema.

El reto del diseñador y de los entes reguladores, de supervisión y monitoreo, consiste precisamente en analizar y establecer un compromiso entre todos estos parámetros; sin embargo, no es tarea fácil o evidente pues algunos de ellos resultan ser mutuamente

excluyentes: por ejemplo, 1 y 4 son contradictorios, igual sucede con 2 y 3 [14]. .

Adicionalmente tenemos que la probabilidad de error es un parámetro que mide la calidad del sistema y que está relacionado al tipo de modulación y codificación con el que se encuentra implementado. De igual manera si analizamos el Eb/No o el SNR (Signal to Noise Ratio), observaremos que está ligada a la potencia de transmisión y al ancho de banda.

Conociendo todas estas limitaciones y contradicciones, el diseñador debe establecer los valores adecuados de cada parámetro de manera que se satisfagan los criterios de diseño dentro de ciertos márgenes ya recomendados por la UIT.

Sin embargo todas estas consideraciones analizadas, representan sólo las normas técnicas y es tan sólo una medida para optimizar su uso.

2.1.4 Gestión del Espectro Radioeléctrico

Es el conjunto de procedimientos administrativos, técnicos y procesos científicos que permiten garantizar la utilización eficaz de los sistemas radioeléctricos, los equipos, el funcionamiento de los servicios de

radiocomunicación definidos por la UIT-R y la explotación de los sistemas radioeléctricos sin producir interferencia perjudicial.

Para la gestión del espectro, la UIT-R se estructura con tres grupos de trabajos [15] que realizan estudios sobre:

- Ingeniería del espectro.
- Metodologías para la gestión del espectro.
- Estrategias económicas.
- Comprobación técnica del espectro.

Los procesos de gestión debidamente planificados en base a proyectos de ingeniería del espectro permiten la resolución del problema de escasez. Las mediciones, los datos y el análisis de los mismos son procedentes de la comprobación técnica y de la caracterización de sus componentes.

2.1.5 Comprobación Técnica del Espectro

La comprobación técnica es una función esencial de la gestión del espectro y es responsabilidad de los organismos nacionales e internacionales la planificación, regulación, administración y control del espectro. Esto permitirá planificar frecuencias para evitar incompatibilidades en su uso e identificar fuentes de interferencia, ya

que la demanda de frecuencias libres de interferencias cada vez es mayor [16].

2.1.5.1 Objetivos UIT-R

Entre los objetivos principales de la comprobación técnica del espectro recomendados por la UIT-R [16] [17] se encuentran:

- Determinar mediante la eficiencia espectral la ocupación de frecuencias y su utilización, reales.
- Garantizar la calidad de los servicios de telecomunicaciones.
- Configurar y mantener entornos radioeléctricos.
- Resolver problemas de interferencias perjudiciales.
- Medir adecuadamente la ocupación espectral para proporcionar datos y estadísticas.

Países en desarrollo como Ecuador han establecido sus propios modelos de gestión para la comprobación técnica del espectro los cuales se enmarcan dentro de los objetivos recomendados por la UIT-R y cuyo fin es satisfacer y garantizar los servicios de radiocomunicaciones de acuerdo a la necesidad nacional.

2.1.5.2 Objetivos Nacionales

Los objetivos nacionales para la comprobación técnica del espectro [17] comprenden:

- Verificar los parámetros técnicos y de explotación.
- Resolver las interferencias e identificar de transmisores no autorizados.
- Obtener datos y estadísticas de utilización del espectro.
- Asignar bandas de frecuencias.
- Desarrollar mejores modelos de gestión del espectro radioeléctrico.
- Atender reclamos y consultas.
- Clasificar e interpretar interferencias y efectos de propagación.
- Compartir el espectro.
- Verificar y mejorar la base de datos.

2.1.6 Medición de Parámetros de Operación para la Comprobación Técnica

La comprobación técnica del espectro se puede realizar de tres maneras: automática, manual o ambas [16]. En cualquier caso para realizar las mediciones adecuadas de la ocupación espectral se deben

considerar las Recomendaciones UIT-R. Estas mediciones espectrales se refieren al registro de emisiones ocurridas durante un período de tiempo y que a partir de estos datos se puedan elaborar cuadros y gráficos tales como la ocupación por banda de frecuencias o por canal que supere un nivel determinado de umbral.

2.1.6.1 Medición de Frecuencia

En el dominio de la frecuencia se pueden observar: la ocupación del canal, la interferencia, los armónicos y las emisiones no esenciales.

La UIT-R, en el Manual de Comprobación Técnica del Espectro emitido en el 2012, considera algunos aspectos técnicos para realizar mediciones de frecuencia. En las últimas décadas, con la introducción de las técnicas basadas en sintetizadores de frecuencia y procesadores digitales de señal, tales como la medición de frecuencia instantánea (IFM, Instantaneous Frequency Measurement) y analizadores de TRF para la realización de mediciones de frecuencia, ha permitido aumentar considerablemente la precisión de dichas mediciones, la facilidad de ajuste y, en consecuencia, la rapidez de ejecución de las mediciones. Para las mediciones se hace referencia a la Recomendación UIT-R SM.377.

En la actualidad, la comprobación técnica se realiza a distancia o de manera remota y casi todas las mediciones de frecuencia se hacen con la ayuda de receptores.

Para obtener datos reales y confiables los receptores empleados en las estaciones de comprobación deben tener las siguientes características:

- Elevada sensibilidad a la entrada del receptor.
- Apropiada atenuación de la frecuencia imagen.
- Niveles bajos de modulación cruzada
- Niveles bajos de intermodulación.
- Filtros de entrada para proteger la banda de frecuencias utilizada para la medición contra las frecuencias interferentes y perjudiciales.
- Tener una entrada normalizada con respecto a la frecuencia externa.
- Nivel bajo de ruido de fase de los osciladores internos.
- Control manual o automático de ganancia (AGC).

2.1.6.2 Medición de Ancho de Banda

Para mediciones de anchura de banda [17] se considera las siguientes definiciones de la UIT-R que conforme el número 1.152 del Artículo 1 del RR, la definición actualmente utilizada es la siguiente:

“Anchura de banda necesaria: Para una clase de emisión dada, anchura de la banda de frecuencias estrictamente suficiente para asegurar la transmisión de la información a la velocidad y con la calidad requeridas en condiciones especificadas.”[18].

“Anchura de banda ocupada: Anchura de la banda de frecuencias tal que, por debajo de su frecuencia límite inferior y por encima de su frecuencia Límite superior, se emitan potencias medias iguales cada una a un porcentaje especificado, $\beta/2$, de la potencia media total de una emisión dada. Salvo que en una Recomendación UIT-R se especifique otra cosa, para la clase de emisión considerada, se tomara un valor $\beta /2$ igual a 0,5%....” [18]. Figura 2.2.

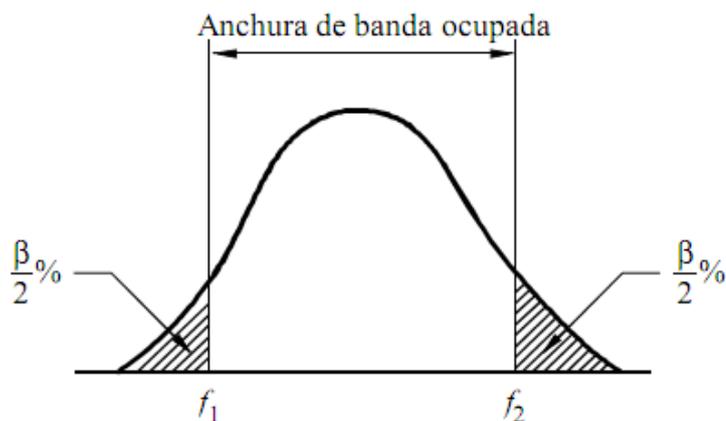


Figura 2.2 Ancho de Banda Ocupado [17]

2.1.6.3 Medición de Radiogoniometría

La Radiogoniometría determina la dirección de una transmisión radioeléctrica a través de técnicas de triangulación. Utiliza las propiedades de la propagación de las ondas para determinar la línea de marcación (LOB) de una fuente cualquiera de radiaciones electromagnéticas [16].

La radiogoniometría puede utilizarse para determinar la posición de un transmisor radioeléctrico o de una fuente de ruido radioeléctrico [17]. En general la radiogoniometría sirve para:

- Localizar un transmisor en situación de emergencia.
- Localizar e identificar un transmisor cualquiera, tanto conocido como desconocido y no autorizado.

- Localizar un transmisor que produce interferencia y que no puede ser identificado por otros medios.
- Determinar el emplazamiento de una fuente de interferencia del tipo eléctrica perjudicial para la recepción de los sistemas de radiocomunicación.

2.1.6.4 Mediciones de Intensidad de Campo

Las mediciones de intensidad de campo y de densidad de flujo de potencia normalmente obedecen a una o más de las siguientes finalidades:

- Determinar la suficiencia de la intensidad de una señal radioeléctrica y la eficacia de una fuente de emisión (por ejemplo, un transmisor) para un determinado servicio.
- Determinar los efectos de la interferencia producida por una emisión radioeléctrica intencionada concreta (compatibilidad electromagnética).
- Determinar la intensidad de la señal y los efectos de la interferencia provocada por emisiones no intencionadas de cualquier forma de onda procedentes de equipos que radian energía electromagnética y evaluar la eficacia de las medidas de supresión.

- Medir los fenómenos de propagación para desarrollar y comprobar los modelos de propagación.
- Recopilar datos sobre ruido radioeléctrico; por ejemplo, ruido radioeléctrico atmosférico de acuerdo con el Ruego UIT-R 85.
- Asegurar el cumplimiento de las disposiciones pertinentes del Reglamento de Radiocomunicaciones.
- Evaluar los peligros de las radiaciones no ionizantes.

La UIT-R en la recomendación UIT-R SM.378-7 especifica que la precisión de las mediciones de la intensidad de campo sea como la mostrada en la Tabla 2.2 [18].

Tabla 2.2. Precisión de las Mediciones de Intensidad de Campo

Banda de Frecuencias	Precisión de la medición (dB)
de 9 kHz a 30 MHz	± 2
de 30 MHz a 3 GHz	± 3

2.1.7 Recomendaciones UIT-R

Tener conocimiento de los principios técnicos para la óptima administración del espectro radioeléctrico resulta de vital importancia. Por tal motivo, es pertinente reconocer cuales son estas normas o recomendaciones para un eficaz uso del espectro, qué servicios se pueden ofrecer y los parámetros técnicos en la banda de estudio:

2.1.8 Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia, rango 1427–1518 Mhz

En nuestro país, la SENATEL es quien elabora el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias, para ello considera las recomendaciones de la UIT-R por lo que en el mapa de zonas establecido ubica al Ecuador en la Región 2 [19].

De acuerdo con la UIT-R la Región 2 está comprendida entre la zona limitada al este por la línea B ubicada a 20° y al oeste por la línea C ubicada a 120°, ambas con respecto al meridiano de Greenwich.

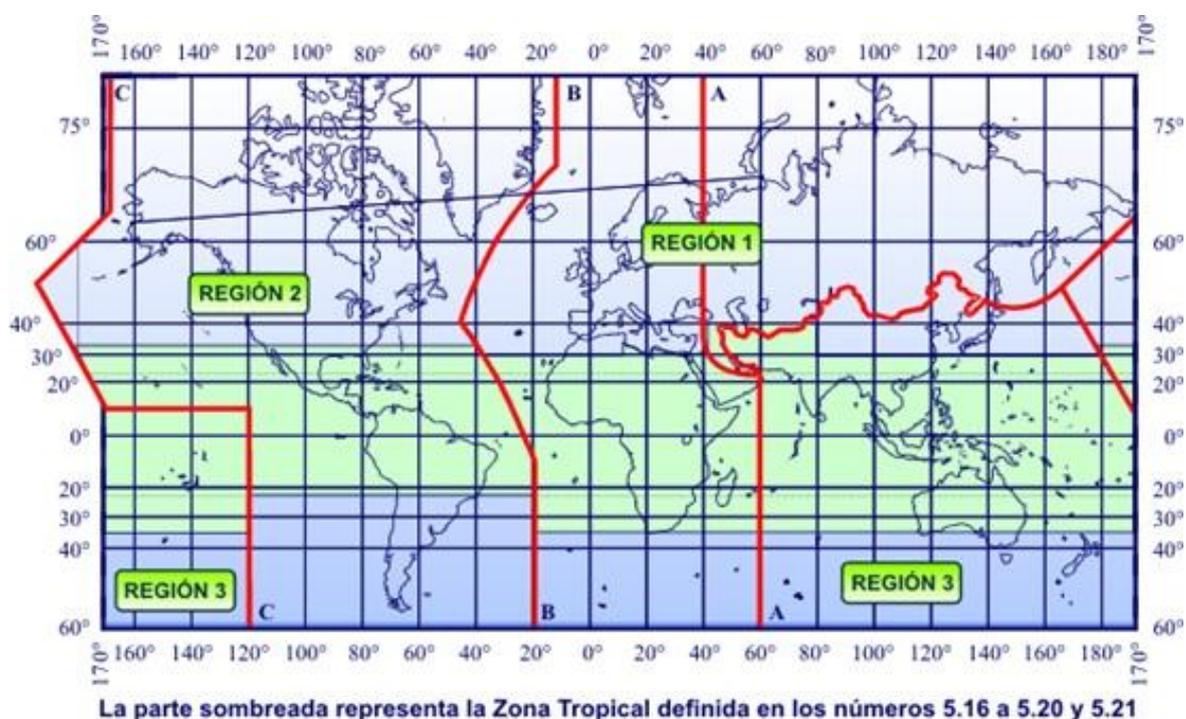


Figura 2.3 Mapa de Regiones UIT-R [19]

En la Tabla 2.3 [20] que se presenta, se muestran: una columna referida a la banda y los servicios de la Región 2 del Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT y otra columna relacionado a la banda y los servicios de Ecuador.

La columna de la Región 2 excluye las notas de pie de Cuadro referentes a la Región 1 y 3; y en la columna de Ecuador se indican únicamente las notas generales de pie de Cuadro de la Región.

La adjudicación de bandas de frecuencias para determinados servicios de radiocomunicaciones serán únicamente los establecidos dentro de la banda con la correspondiente EQA del cuadro.

Las EQA son notas nacionales que pueden ser modificadas por la SENATEL y aprobadas previamente por CONATEL.

Tabla 2.3 Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia,
Rango 1427–1518 MHz

Rango desde 1427 MHz hasta 1518MHz						
Banda		Región 2		Ecuador		
Frecuencia Inicial (MHz)	Frecuencia Final (MHz)	Servicios	Notas Internacionales	Servicios (Sistema/Uso)	Notas Internacionales	Notas Nacionales
1427	1429	Operaciones Espaciales (Tierra-Espacio) Fijo Móvil salvo Móvil Aeronáutico	ADD5.BA03 MOD. 5.338A 5.341	Fijo	ADD5.BA03 MOD. 5.338A	EQA.50
1429	1452	Fijo Móvil	ADD5.BA03 5.343 MOD 5.338A 5.341	Fijo	ADD5.BA03 MOD. 5.338A	EQA.50
1452	1492	Fijo Móvil Radiodifusión Radiodifusión por Satélite	MOD. 5347 ^a 5.343 5.345 5.208B 5.344	Fijo	MOD 5347A 5341	EQA.50
1492	1518	Fijo Móvil	5.343 5.341 5.344	Fijo	5.341	EQA.50

2.1.8.1 Descripción de Notas de La Región 2

- ✚ **MOD 5.338A.** Para esta nota se aplica la Resolución 750 (Rev.C M R-12). (CMR-12) para las bandas comprendidas entre los: 1350 a 1400 MHz, 1427 a 1452 MHz, 22,55 a 23,55 GHz, 30 a 31,3 GHz, 49,7 a 50,2 GHz, 50,4 a 50,9 GHz, 51,4 a 52,6 GHz, 81-86 GHz y 92-94 GHz [21].

- ✚ **5.341.** En determinados países se realizan operaciones de investigación de tipo pasiva para las bandas comprendidas entre los: 1400 a 1727 MHz, 101 a 120 GHz y 197 a 220 GHz, dentro del marco de un programa de búsqueda de emisiones intencionales de origen extraterrestre [21].
- ✚ **5.208B.** Para esta nota se aplica la Resolución 739 (Rev. CMR07). (CMR-07) para las bandas comprendidas entre los: 137 a 138 MHz, 387 a 390 MHz, 400,15 a 401 MHz, 1452 a 1492 MHz, 1525 a 1559 MHz, 1559 a 1610 MHz, 1613,8 a 1626,5 MHz, 2655 a 2670 MHz, 2670 a 2690 MHz, 21,4 a 22 GHz [21].
- ✚ **5.345.** Esta nota está sujeta a las disposiciones de la Resolución 528 (CAMR-92)*. (* Nota de la Secretaría: Esta Resolución ha sido revisada por la CMR-03.) en donde el servicio de radiodifusión por satélite y el servicio de radiodifusión están limitados a la radiodifusión sonora digital con la utilización de las bandas comprendidas entre los: 1452 a 1492 MHz [21].
- ✚ **5.344.** Está atribuida a los servicios fijo y móvil a título primario (véase también el número 5.343) para las bandas comprendidas entre los 1452 a 1525 MHz en Estados Unidos [21].

2.1.8.2 Descripción de Notas Nacionales

✚ **EQA50.** Se utilizan para el servicio fijo las bandas comprendidas entre los: 235 a 245 MHz, 360 a 370 MHz, 430 a 440 MHz, 902 a 929 MHz, 934 a 935 MHz, 951 a 56 MHz, 1427 a 1525, MHz, 3700 a 4 200 MHz, 5925 a 6425, MHz, 7100 a 8500 MHz, 14,4 a 15,35, GHz, 17,7 a 18,9 GHz y 21, a 23,6 GHz [21].

2.1.9 Banda de 1400 y 1500 Mhz

La canalización para Servicio Fijo se indica en la nota UN-88, y la configuran la banda de frecuencias 1427 a 1452 MHz junto con la banda 1492 a 1517 MHz, para enlaces de baja capacidad.

La banda de frecuencias 1452 a 1492 MHz está atribuida a los Servicios de Radiodifusión y de Radiodifusión por Satélite y su utilización se indica en la nota UN-121.

La banda de frecuencias entre 1517 y 1530 MHz está destinada para uso preferente por el Estado para sistemas del Ministerio de Defensa en el Servicio Fijo y Móvil (exclusivamente radioenlaces transportables) hasta el 1 de enero del 2020. Sin perjuicio de lo anterior, en la banda 1525-1530 MHz podrán otorgarse con

anterioridad a esa fecha, concesiones del servicio móvil por satélite (espacio-Tierra) en cualquier parte del territorio nacional.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT, para los Sistemas Punto a Multipunto en el Servicio Fijo recomienda que:

“Para las disposiciones de radiocanales de los sistemas radioeléctricos P-MP analógicos y digitales que funcionan en las bandas de la gama 1 427-2 690 MHz, se tomen como referencia las Recomendaciones UIT-R F.701, UIT-R F.1098, UIT-R F.1242 y UIT-R F.1243”

2.1.10 Descripción de los Servicios de Radiocomunicación que se Ofrecen

Fijo Fijo

Es un servicio de radiocomunicación entre puntos fijos, también es conocido como enlace Punto-Punto, Figura 2.4. Se pueden ofrecer servicios de comunicación entre una estación central fija y puntos fijos determinados.



Figura 2.4 Enlace Punto - Punto

✚ Móvil salvo móvil aeronáutico

Es un servicio de radiocomunicación entre estaciones móviles y estaciones terrestres o entre estaciones móviles (CV), Figura 2.5.



Figura 2.5 Enlace Estación Fija - Móvil

✚ Radiodifusión

Servicio de radiocomunicación cuyas emisiones se destinan a ser recibidas directamente por el público en general. Dicho servicio

abarca emisiones sonoras, de televisión o de otro género (CS),

Figura 2.6.

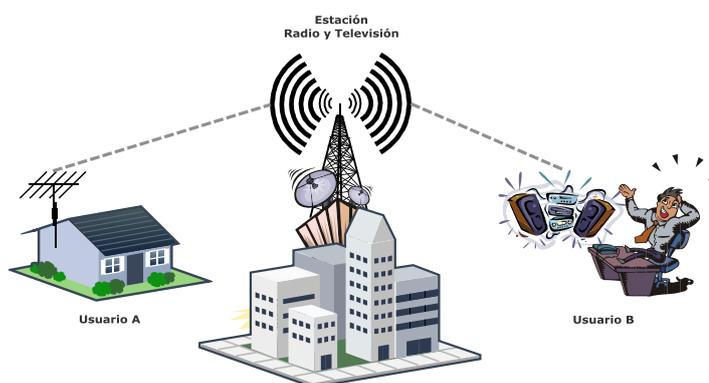


Figura 2.6 Radiodifusión

Radiodifusión por Satélite

Es un servicio de radiocomunicación en el cual las señales emitidas o retransmitidas desde los satélites o por estaciones espaciales están destinadas a la recepción directa por el público en general. El servicio de radiodifusión por satélite normalmente suele estar disponibles por suscripción.

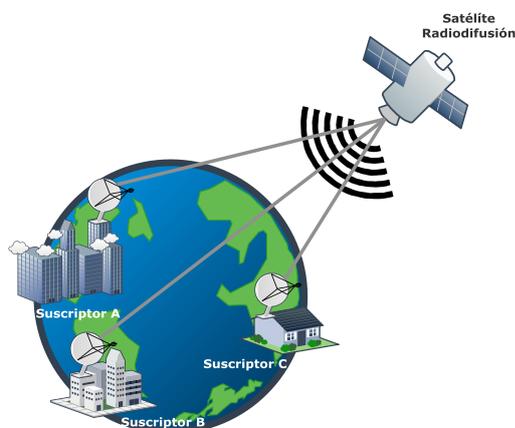


Figura 2.7 Radiodifusión por Satélite

Móvil por Satélite

Es un servicio de radiocomunicación que puede darse entre estaciones terrenas móviles y una o varias estaciones espaciales o entre estaciones espaciales utilizadas por este servicio; o entre estaciones terrenas móviles por intermedio de una o varias estaciones espaciales.

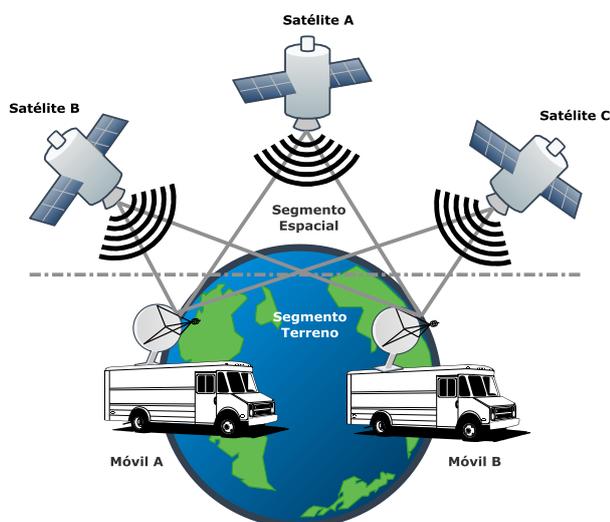


Figura 2.8 Radiocomunicación Móvil por Satélite

2.2 Marco Jurídico

La Constitución de la República del Ecuador considera el espectro radioeléctrico como un sector estratégico y está dentro de un grupo de ministerios que tienen como visión recuperar la rectoría sobre el manejo de las áreas y aprovechar los recursos naturales de forma social y ambientalmente sustentable.

Es por eso que el Estado se reserva el derecho de su administración, regulación, control y gestión a través del El Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información y de los Organismos Reguladores.

2.2.1 Organismos Reguladores

Consejo Nacional De Telecomunicaciones CONATEL

El CONATEL es un ente de administración y regulación, tiene su sede principal en la ciudad de Quito. Entre sus principales funciones están: dictar, aprobar, establecer, designar a y autorizar políticas, normas, pliegos y reglamentos con relación al desarrollo de las telecomunicaciones; es quien aprueba el Plan Nacional de Frecuencias y designa autoridades.

En términos generales el CONATEL realiza lo necesario para el mejor cumplimiento de sus funciones y de los fines de la Ley de Telecomunicaciones y su Reglamentación [22].

Secretaría Nacional de Telecomunicaciones SENATEL

Entre las principales competencias del SENATEL están la de cumplir y hacer cumplir las resoluciones emitidas por el CONATEL, quien gestiona y administra el Espectro Radioeléctrico.

La SENATEL elabora Planes Nacionales de Desarrollo en el tema de Telecomunicaciones y también elabora el Plan Nacional de

Frecuencias, para que todo pase a consideración y aprobación del CONATEL [23].

Superintendencia de Telecomunicaciones SUPERTEL

Entre las principales funciones que cumple la Superintendencia de Telecomunicaciones están las de realizar el monitoreo y control del espectro radioeléctrico y de los operadores que explotan los servicios de telecomunicaciones, también supervisa el cumplimiento de contratos y normas de regulación aprobadas por el CONATEL tanto en los concesionados como en los servicios que ofrecen [24].

2.2.2 Leyes y Reglamentos de las Telecomunicaciones en el Ecuador

La legislación de telecomunicaciones ecuatoriana lo define un recurso natural limitado, perteneciente al dominio público del Estado, inalienable e imprescriptible como lo indica el Art. 47 mediante Decreto Ejecutivo no. 1790 [10].

Considerando el aspecto legal respecto al espectro radioeléctrico, este proyecto se sustenta en las siguientes leyes, reglamentos con sus respectivos artículos:

- Constitución de la República de Ecuador (2008).- Artículos 16, 17, 261, 313 y 408.
- Ley Especial de Telecomunicaciones.- Artículos 2, 3 y 13.
- Reglamento General a la Ley Especial de Telecomunicaciones (23 Agosto 2001).- Artículos 1, 47.

El uso del espectro radioeléctrico debe ajustarse al Plan Nacional de Frecuencias (PNF) que está vigente en el Ecuador y como se sugiere en el Art. 48 mediante Decreto Ejecutivo no. 1790 como uno de los principios indica que *“El Estado debe fomentar el uso y explotación del espectro radioeléctrico y de los servicios de radiocomunicación, de una manera racional y eficiente a fin de obtener el máximo provecho;”* [10].

2.2.3 Plan Nacional de Frecuencias

El Plan Nacional de Frecuencias o PNF dispone la atribución de las bandas de frecuencias a los diferentes servicios de radiocomunicaciones que se ofrecen en Ecuador y que para su gestión

los clasifica de la siguiente manera: Fijo, Móvil, Fijo por Satélite, Móvil por Satélite, Móvil Aeronáutico, Móvil Marítimo y Radiodifusión [19].

Para su elaboración fueron consideradas las resoluciones del CONATEL que desde el año 2000 viene modificando y aprobando para una buena gestión del espectro radioeléctrico.

Es importante destacar que el PNF acoge las recomendaciones de la atribución de bandas de frecuencias adoptadas por la UIT-R aprobadas en conferencias realizadas los años 2003, 2007 y 2012.

De acuerdo a la Dirección General de Gestión del Espectro Radioeléctrico, en su publicación del año 2012, el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias describe los servicios que se ofrecen a nivel de la región Latinoamericana y particularmente en nuestro país.

2.2.4 Asignación Local de Concesiones en el Rango de Frecuencias 1427 -1518 MHz.

La Tabla 2.4 [25] presenta un listado de los concesionarios con las asignaciones de las frecuencias proporcionadas por la SENATEL para la prestación de servicios de radiocomunicaciones fijos. Claramente se observa que las entidades públicas como la Corporación Nacional de

Telecomunicaciones CNT-EP y la Comisión de Tránsito del Ecuador CTE tienen mayor uso de las frecuencias comprendidas en ese rango especialmente para enlaces punto-punto y punto-multipunto.

Tabla 2.4 Asignación Local de Concesiones

Ítem	Concesionario/Propietario	Servicios	Frecuencias (MHz)
1	Comisión de Tránsito del Ecuador (CTE)	ER	1428,5
			1435,5
			1461
			1464
			1494
			1508
2	Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT-EP)	ER	1445
			1447,5
			1452,5
			1455
			1457,5
			1460
			1462,5
			1465
			1467,5
			1470
			1497,5
			1500
			1502,5
			1507,5
1510			
1515			
1517,5			
3	Dirección General de Aviación Civil (DAC)	ER	1457
4	Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA-EP)	ER	1440,5
5	Level 3 Ecuador LVL T S.A.	PRA	1439,5
			1443
			1449,5
			1450
			1454,5
			1458,5
			1473
			1483,5
			1490,5
1505			

6	Otecel S.A. (MOVISTAR)	PRA	1429
---	------------------------	-----	------

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA OCUPACIÓN DEL ESPECTRO EN LAS BANDAS DE FRECUENCIAS UHF (1427 - 1518 MHZ)

3.1 Introducción

Realizar la medición y evaluación de la ocupación del espectro en diferentes entornos de RF, y llevar un control de uso eficiente es una tarea a diario de los entes reguladores a fin de garantizar una alta calidad de los servicios. Con el evolucionar de las tecnologías, el incremento de usuarios a la red, el aumento de la densidad de sistemas

digitales y bandas de frecuencia compartidas, esta tarea resulta más compleja.

El análisis está basado en las Recomendaciones UIT-R SM.1880 y UIT-R SM.1809, así como en la información facilitada en la edición de 2011 del Manual de la UIT-R sobre Comprobación Técnica del Espectro. Cabe aclarar que varios puntos serán tomados como guía; sin embargo las decisiones que se tomen al final sobre el procedimiento a seguir también estarán sujetos a las propias condiciones de medición y resultados obtenidos. En el cuarto capítulo se analizará con mayor detalle los resultados obtenidos, así como los problemas que surgieron y sus observaciones.

3.2 Servicios que se Ofrecen

Considerando las normas de la UIT, se verificó qué servicios pueden ser ofrecidos dentro del rango de estudio, entre ellos tenemos: Fijo Móvil, Radiodifusión por Satélite, Operaciones Espaciales (Tierra-Espacio), Móvil Aeronáutico. Sin embargo durante el estudio y una vista realizada a la SUPERTEL se revisó las concesiones realizadas en esa banda, dónde los servicios prestados en la misma corresponden a servicios entre puntos fijos determinados.

Servicios fijos incluyen principalmente los sistemas de enlace digital terrestre y sistemas de acceso fijo digitales que utilizan microondas para la transmisión. Si bien es cierto, no es una banda exclusiva para este tipo de servicios también se utiliza en las bandas de 4, 5 y 6 GHz, además de bandas de 10 a 20 GHz y aún más altas.

Para los sistemas de enlace terrestre, estos tienen una distancia de enlace estándar de aproximadamente 50 km, con una capacidad de transmisión que va de 150 a 300 Mbit / s por sistema.

Un sistema de comunicaciones de acceso fijo digital es un sistema de comunicación inalámbrico fijo para líneas de abonados que utilizan bandas de microondas.

3.3 Ubicación del Sitio para la Toma de Mediciones Espectrales

Las mediciones espectrales fueron realizadas en el Laboratorio de la FIEC - ESPOL del Campus Prosperina de la ciudad de Guayaquil, Figura 3.1, en la banda atribuida para emisiones UHF en el rango de frecuencias de 1427 a 1518 MHz.

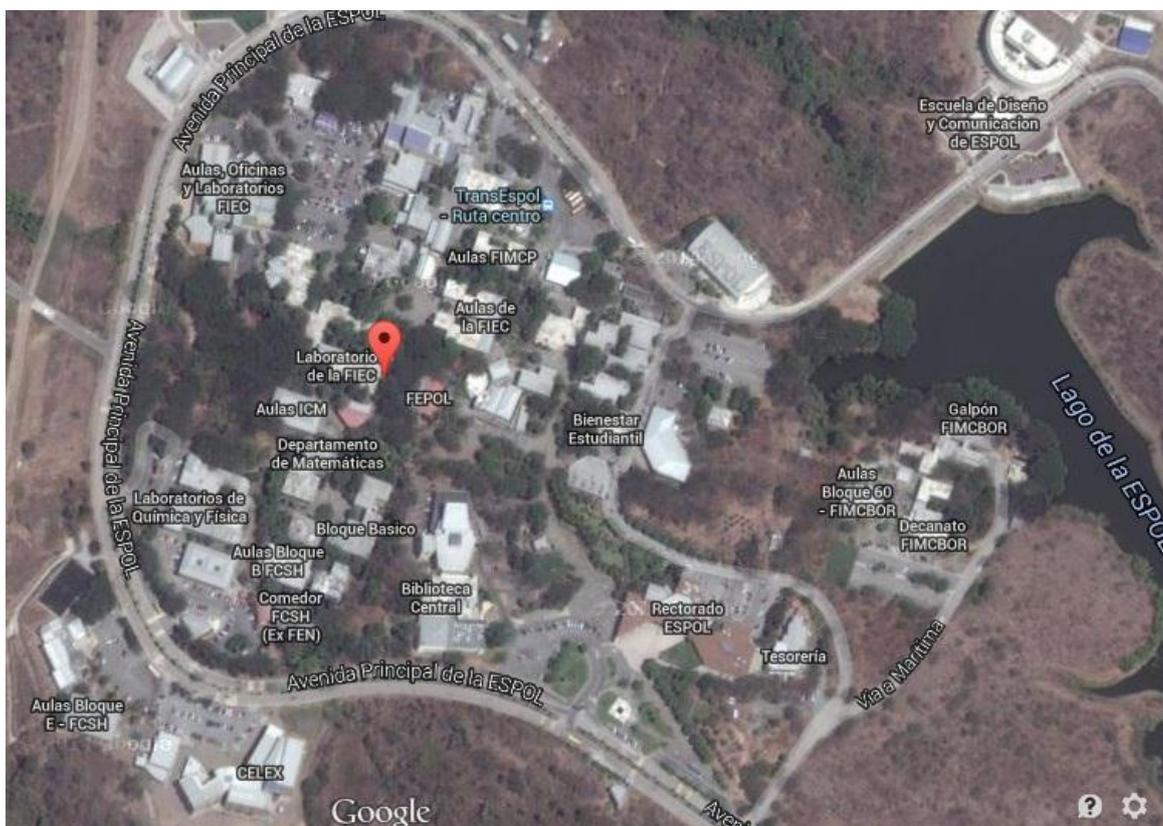


Figura 3.1 Ubicación de Laboratorios de la FIEC -ESPOL

Teniendo en cuenta que la ubicación es una zona muy particular debido al efecto sombra que se produce por estar asentado al pie del Cerro Azul, el objetivo es poder estimar lo más exacto posible el grado de subutilización del espectro en la banda de estudio.

Para una mejor observación y legitimidad de las mediciones se considera una subdivisión del espectro recomendadas por la norma UIT; así como la información de las concesiones proporcionada por la SUPATEL para que los rangos de frecuencias monitoreados no sean

muy amplios, evitando la adquisición de medidas poco confiables o difusas. En el desarrollo de este capítulo se explicará los detalles del proceso de medición y los parámetros de configuración a considerar.

3.4 Equipos para la Medición Espectral

Una parte muy importante para el desarrollo del proyecto consiste en seleccionar adecuadamente los equipos electrónicos con las mejores características técnicas de medición para la recolección de datos. Para este propósito, se va utilizar el Analizador de Espectro marca Agilent modelo E4404B de 9 KHz – 6.7 Ghz Figura 3.2 y la antena SIRIO SD 2000U, Figura 3.3. Los parámetros de configuración del equipo y sus características técnicas se detallan en un siguiente punto dentro de este mismo capítulo.



Figura 3.2 Analizador de Espectro Agilent E4404B



Figura 3.3 Antena Sirio SD2000U

Esta antena, de 50 ohmios de impedancia de entrada, cubre el rango de frecuencias de 100-2000 MHz, de tipo omnidireccional, por lo tanto adecuado para el escaneo y aplicaciones de monitoreo. Esta antena discono de banda ancha, está hecho de acero inoxidable, latón cromado y aluminio anodizado para garantizar la mejor eficiencia y rendimiento.

3.5 Procedimiento para Evaluación Espectral

La propuesta SSF, Figura 3.4 muestra el diagrama de bloques con el procedimiento a seguir durante la evaluación espectral, ofrece un diseño que mantiene un orden secuencial el mismo que se detalla a continuación:

- La ocupación en el espectro objetivo es capturado mediante la recopilación de mediciones del espectro, con los datos de medición archivados en un formato adecuado.
- Los datos del espectro se procesan para distinguir las mediciones de señal y ruido; los datos procesados se analizan entonces para extraer las características del espectro y el porcentaje de ocupación.
- La ocupación en el espectro objetivo se modela para su posterior análisis.

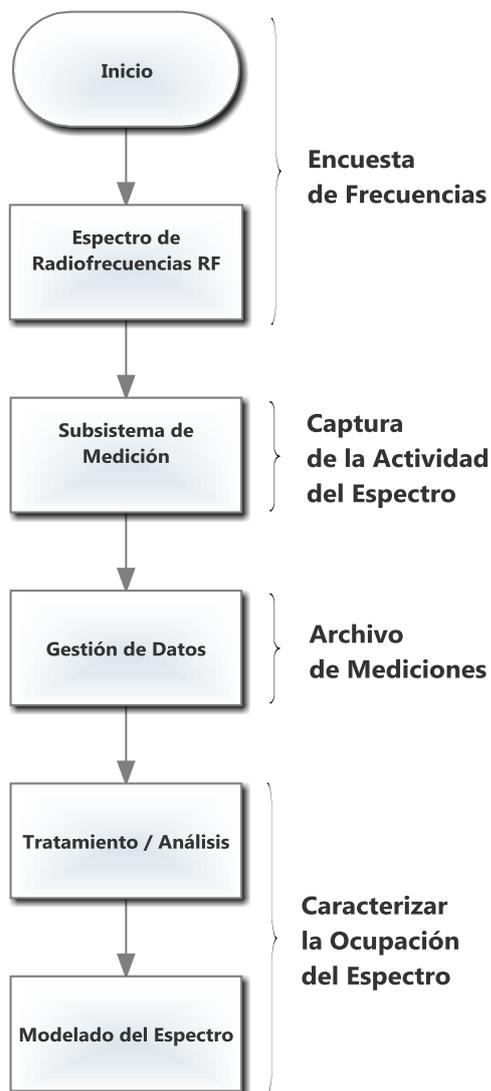


Figura 3.4 Diagrama de Procedimiento de Evaluación Espectral

En el bloque de tratamiento y análisis, se eliminarán defectos introducidos por el ruido e intermodulación y se utilizarán los métodos estadísticos para procesar los datos.

Los datos procesados serán luego analizados para caracterizar la ocupación del espectro, el cual es útil para aplicaciones tales como análisis de interferencia [9]. Esta información, particularmente el espectro no utilizado se cuantificará para evaluar la viabilidad de la tecnología DSA [6] ; así como para la realización del modelamiento de utilización de espectro (dentro de la banda de estudio) que facilite la previsión de la ocupación del espectro [10] - [12] y la obtención de la caracterización del comportamiento del espectro.

Entre las diversas técnicas de detección de las señales presentadas en la literatura [13], la detección de la energía es el método óptimo cuando sólo mediciones de potencia están disponibles [14]. En materia de la métrica de evaluación a utilizar, definiremos un nivel de energía de referencia; donde las mediciones que se producen por encima de un umbral de decisión se catalogarán como presencia de una señal portadora, de lo contrario será catalogada como ruido y evidencia de no utilización de la misma. Este umbral será determinado en función de parámetros como piso de ruido, pérdidas en el receptor, factor lluvia de ser el caso, entre otros [2], [6].

En el proceso de análisis y procesamiento de los datos, está considerada la posibilidad de encontrar casos como superposicionamiento de señales, muestras de ruido en los datos del

espectro, la recepción de transmisores cercanos y lejanos donde la señal resultante puede ser tan alta que las señales débiles no pueden ser detectadas.

En consecuencia, los resultados de esta superposición podría comprometer la tasa de detección y la tasa de falsas alarmas de llegarse a seleccionar un umbral muy bajo.

Previo al proceso de modelamiento de la señal, los resultados de la evaluación espectral como la disponibilidad y el porcentaje de ocupación serán ilustrados utilizando herramientas estadísticas. Adicional se mostrarán mapas de disponibilidad espectral utilizando la herramienta Radio Mobile

Por último, un modelo para las medidas del espectro es propuesto utilizando la herramienta “Spectre/RF MATLAB Toolbox” y “Signal Processing”. El diagrama de bloques, las herramientas y los comando de configuración de explicarán con mayor detalle en el cuarto capítulo.

3.6 Esquema de Conexión

Para la implementación del esquema se tendrá que considerar el diagrama de bloques SSF propuesto en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Diagrama de Bloques de la Implementación SSF

El esquema de conexión se muestra en la Figura 3.6. Las mediciones serán tomadas desde el Laboratorio de Telecomunicaciones de la ESPOL, con la antena ubicada en la terraza de la FIEC, con una distancia de 10 metros entre la antena y el analizador de espectro.

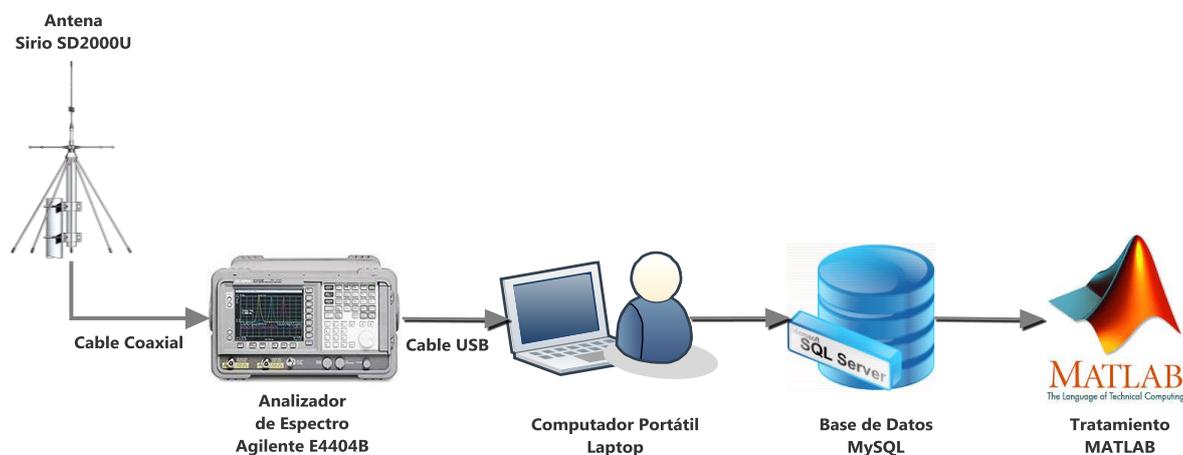


Figura 3.6 Esquema de Conexión

3.7 Configuración de Equipos

El equipo de medición viene provisto de un software con los controladores incluidos, los cuales se tienen que instalar localmente en

el computador (de escritorio o portátil) para luego configurar la conexión y realizar la transferencia de datos del analizador de espectro al computador, como se muestra en la Figura 3.7.

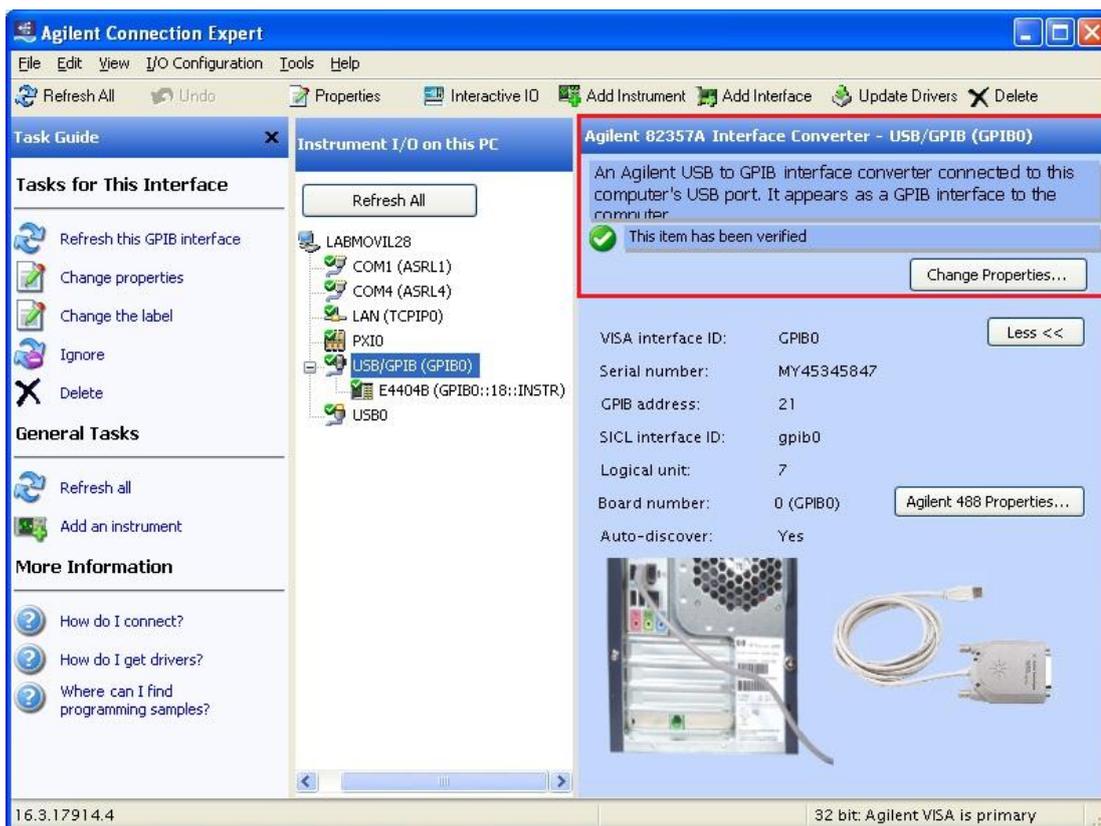


Figura 3.7 Configuración de Conexión

La comunicación entre el analizador de espectro y el computador es posible gracias a un cable convertidor de USB (Universal Serial Bus) a GPIB (General-Purpose Instrumentation Bus).

Una vez instalado y configurado se realiza la comprobación e identificación del puerto de la interface, Figura 3.8.

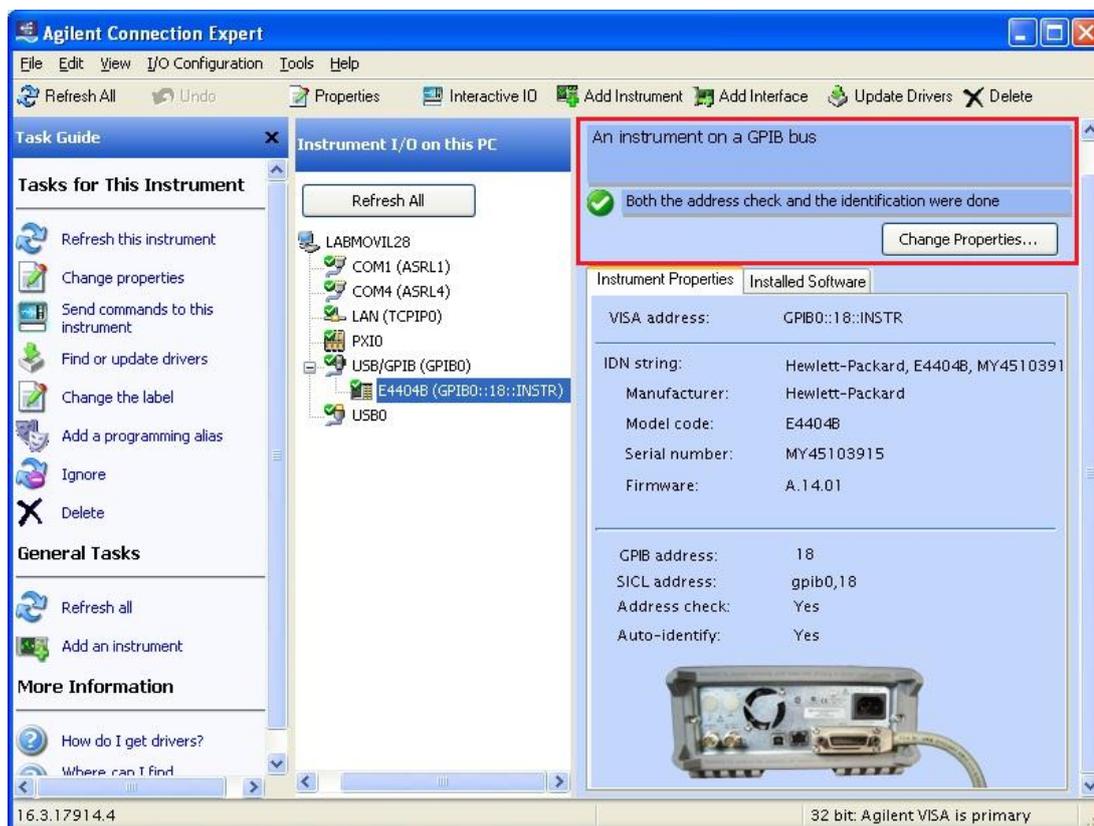


Figura 3.8 Identificación del Puerto de la Interface

Para finalizar, se selecciona la dirección física del puerto para identificar y conectar el analizador en el computador, Figura 3.9.

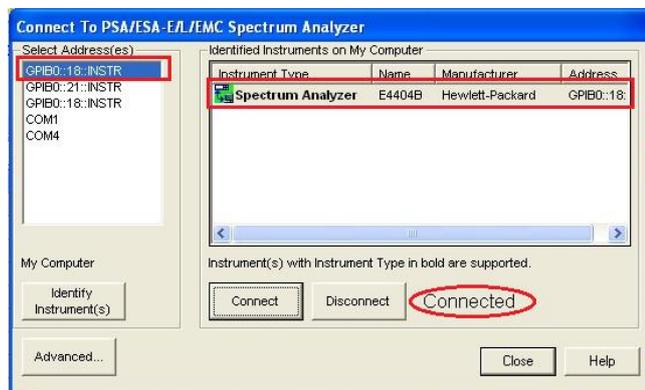


Figura 3.9 Identificación de los Controladores y Conexión del dispositivo

Para verificar la funcionalidad del equipo se realiza una captura en tiempo real de la pantalla del analizador de espectro con la medición realizada en ese instante, deberá aparecer una imagen como la mostrada en la Figura 3.8.

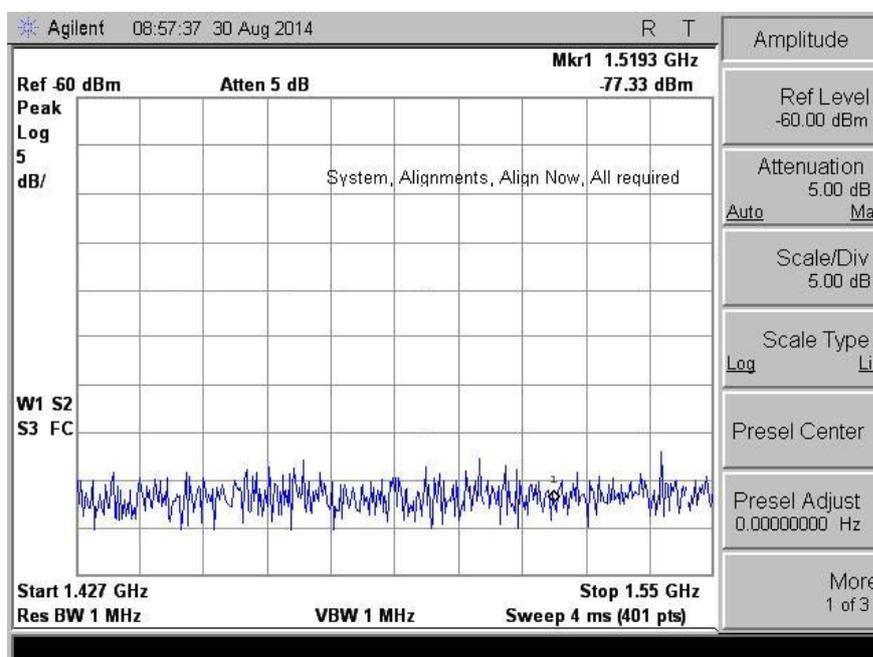


Figura 3.10 Captura de Señal Espectral

3.8 Métrica de Evaluación y Cálculo del porcentaje de ocupación

3.8.1 Potencia de la Relación Señal/Ruido (SNR)

Definiremos la potencia de ruido de la siguiente manera:

$$P_R = K * T * BW$$

donde:

P_R = Potencia de Ruido [Watts]

K = Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J / °Kelvin)

T = Temperatura de Ruido Equivalente del Receptor [°Kelvin]

(Temperatura Ambiente 290 °K)

BW = Ancho de Banda de Ruido [Hz]

Las mediciones tomadas todas están expresadas en decibelios (dB), por lo que se trabajará bajo estas unidades, obteniendo:

$$Potencia\ de\ Ruido = -174 + 10 * \log(BW)$$

Para el caso de la banda en estudio que está comprendida entre los 1427-1518 MHz, la Potencia de la Señal de Ruido será de:

$$Potencia\ de\ Ruido = -174 + 10 * \log(BW)$$

3.8.2 Umbral

Este parámetro resulta de gran relevancia debido a que influye directamente en el resultado de la ocupación espectral. Por un lado, este valor debería ser lo suficientemente pequeño para poder detectar todas las señales, sin embargo podría influir negativamente en la fiabilidad de los resultados mal interpretando la señal de ruido como canal ocupado o en servicio.

Básicamente, hay dos métodos diferentes para fijar el valor del umbral:

- **Preestablecido:** valor establecido de antemano que permanece constante durante toda la comprobación técnica.
- **Dinámico:** valor que se adapta en cada situación.

Para el caso de estudio, se definirá un valor de umbral preestablecido el cual depende de la potencia de ruido de banda ancha que está presente en la entrada del receptor, del ruido que se introduce en el receptor y de la sensibilidad al ruido del detector de banda base:

$$Umbral = -174 + 10 * \log(BW) + NF_{instrumento} + UFM$$

Umbral

$$= -174 + 10 * \log[(1518 - 1427) * 10^6] \text{ dBm} + 10.6 \text{ dB} \\ + 10 \text{ dB}$$

$$\text{Umbral} = -73.81 \text{ dBm};$$

donde UFM corresponde al umbral de mejoramiento recomendado por la UIT que va de 6 a 10 dB y NF sea la figura de ruido expresada como la relación señal a ruido (S/N) en la entrada de un dispositivo dividida para la relación señal a ruido a la salida del dispositivo, dato obtenido desde la hoja de datos del equipo. Anexo 1

3.8.3 Selección de Mecanismo para Cálculo de Porcentaje de Ocupación del Canal

Durante el análisis de los resultados, se definirá un canal ocupado siempre que la potencia de recepción sea superior al umbral previamente definido.

Acogiendo el Informe UIT-R SM.2256, la normativa sugiere 3 mecanismos para el cálculo del porcentaje de ocupación, estos son:

- **FCO** (Ocupación del Canal de Frecuencias)
- **FBO** (Ocupación de la Banda de Frecuencias)

- **SRO** (Ocupación de Recursos del Espectro)

La diferencia de estos tres mecanismos se ilustra en la Figura 3.11.

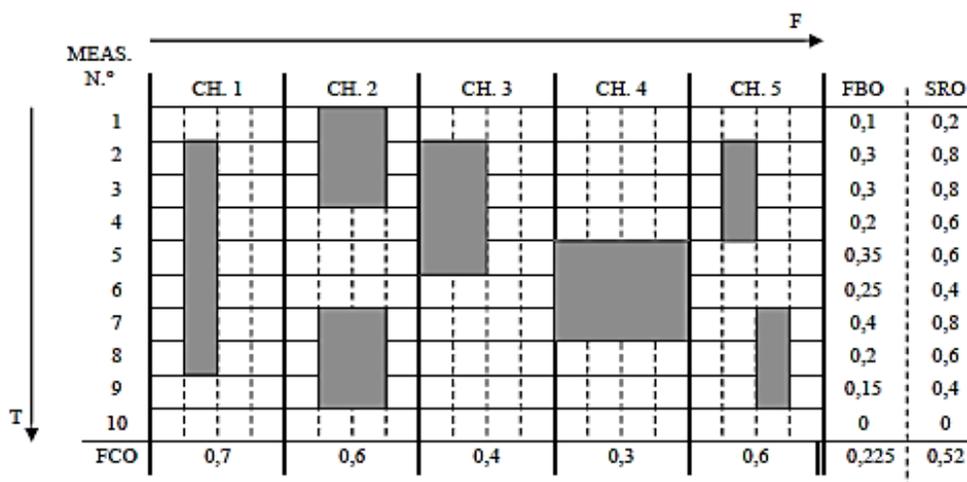


Figura 3.11 Mecanismos para el Cálculo de Porcentaje de Ocupación

La banda de frecuencias que se ilustra contiene 5 canales la cual es medida con una resolución de $\frac{1}{4}$ de la anchura del canal; es decir que el equipo toma cuatro muestras de cada canal en el mismo tiempo de iteración.

3.8.3.1 Criterios de Selección

Si se utiliza el parámetro de medición FCO, el canal se considerará ocupado si alguna de las cuatro muestras de dicho canal supera el umbral. Por otro lado, si se utiliza FBO como parámetro de

medición, se tomará en cuenta todas y cada una de las 20 muestras. Mientras que si se utiliza SRO, se tomará en cuenta el número de canales utilizados y el número total de canales en toda la banda de frecuencias, donde basta que una muestra supere el umbral para que el canal sea definido como ocupado.

Para el caso en estudio, se ha elegido utilizar el parámetro FBO (Ocupación de la Banda de Frecuencias). No se escoge FCO porque los servicios que se ofrecen en esta banda son punto a punto de tipo corporativo, por lo que no se dará el caso de que a veces sí o a veces no estará ocupado, por lo tanto la diferencia que se haga en cada medición es nula.

Tampoco se elige SRO debido a que no existe una normativa que dictamine qué conjunto de frecuencias centrales únicamente serán utilizadas por lo que realizar una división de canales se complica para llevar a cabo este parámetro; además que los anchos de banda asignados a cada cliente varían dependiendo de la capacidad que requiera.

Por esos motivos FBO resulta la mejor alternativa. Adicional a que el número de frecuencias medidas es mayor al número de canales utilizables en la banda y que el tiempo de medición que se

configurará para cada muestra es idéntico. Para el cálculo de la FBO, tendremos que:

$$FBO = \frac{N_o}{N}$$

donde

N_o : número de muestras cuyo nivel es superior al umbral

N : número total de muestras medidas durante el periodo de integración.

3.9 Procedimiento

3.9.1 Recolección de Muestras

Por definición:

$$m = \frac{N}{N-1} * k^2 + 1$$

donde m es el número de muestras parciales.

Debido a que la hoja cálculo del software que se utiliza en el laboratorio (Excel de Microsoft Office) solo puede almacenar hasta 500 datos. Si m excede este valor, lo siguiente será obtener un valor m

proporcional que no exceda los 500 datos. Para lograr lo descrito, dividiremos m para tantas partes sean necesarias (x). Luego, si un día tiene 1440 min, dividiremos 1440 para el mismo valor de x dividido en m . Finalmente el número de muestras será:

$$m' = \frac{m}{x}, \text{ tomadas en un intervalo de tiempo de } t = \frac{1440}{m'}$$

Por lo tanto para el caso de estudio se tendría:

$$m = \frac{N}{N-1} * k^2 + 1$$

$$m = \frac{(1518 - 1427) * 10^3}{(1518 - 1427) * 10^3 - 1} * (0.03)^2 + 1$$

$$m = 1111.1$$

Debido a que el número de muestras a calcular es superior al número de hojas que se pueden crear en el libro de Excel, el número de muestras será entonces:

$$m' = \frac{m}{x}$$

$$m' = \frac{1112}{3} = 370.66$$

Tomadas en un intervalo de tiempo de:

$$t = \frac{\frac{1440}{x}}{m'} = \frac{\frac{1440}{3}}{370.66} = 1.2949 = 1 \text{ min } 18 \text{ seg}$$

Para este caso, como se ha venido justificando a través de cada capítulo, la banda de estudio corresponde a servicios punto a punto; es decir es necesario tener línea de vista para detectar la presencia de la portadora, se puede anticipar la poca o nula recepción de señales durante la sesión de medición. Por este motivo, por efectos prácticos definiremos un tiempo de muestreo de

$$t = 1 \text{ min } 26 \text{ seg}$$

$$\text{con } m' = 500$$

Con esta finalidad se justifica la simplificación del proceso de medición, sin que esto afecte la legitimidad y de las señales medidas (resolución) durante la toma de muestras y la veracidad de los resultados.

3.10 Parámetros de Configuración para las Mediciones de Campo

Las señales captadas para realizar las mediciones se harán posible gracias a una antena omnidireccional. Estas mediciones sólo considerarán la potencia de la señal en función de la frecuencia.

Para el cálculo de número de muestras (m), consideraremos el ancho de banda de estudio (N), donde $N = \text{Frecuencia}_{\text{inicio}} - \text{Frecuencia}_{\text{final}}$. A continuación, es necesario definir un margen de error aceptable (K) que para este tipo de estudios puede ser del 3% al 10%. De esta manera el número de muestras preliminar a utilizar sería:

$$m = \frac{N}{N - 1} * k^2 + 1$$

Luego, para calificar la potencia de una señal como ruido o portadora, se definirá un nivel de referencia también conocido como Umbral de Decisión o simplemente Umbral:

$$\text{Potencia de ruido} = -174 * 10 \log(\text{BW}) \text{ dBm}$$

$$\text{Umbral} = \text{Potencia ruido} - (6, 10)$$

El Umbral puede ser una estimación de la potencia media de ruido en el espectro; las mediciones que excedan este umbral se clasificarán como señales, Figura 3.10.

El Umbral deberá ser el más adecuado a fin de llevar a cabo la clasificación con un número mínimo de errores.

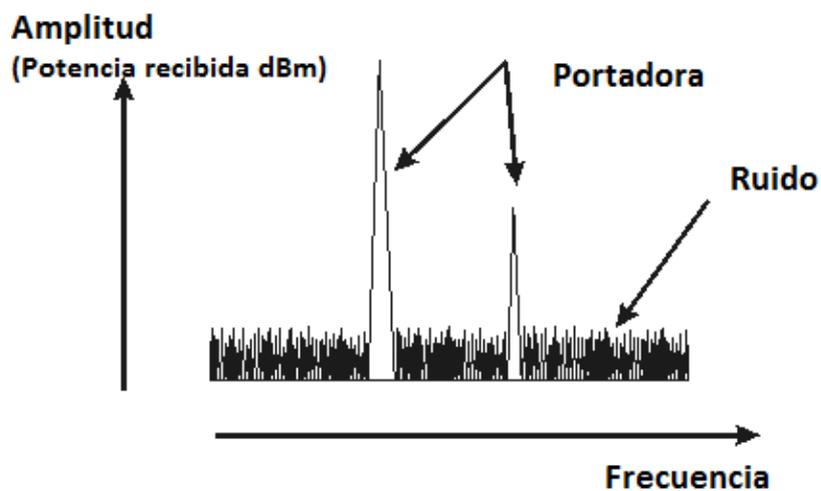


Figura 3.12 Umbral, portadora referida al Nivel de Ruido

Las mediciones a recolectar estarán representadas en una matriz de $N_t \times N_f$ en el que

$$M = [M(fi, tj)]$$

donde

$$Finicio \leq fi < Ffinal$$

$$Tinicio \leq tj < Tfinal$$

$$i = 1, \dots, N_f ; j = 1, \dots, N_t.$$

Esta información será almacenada en una hoja de cálculo de Excel, en el que se generará un libro por cada barrido que se realice cada cierto

tiempo (t_j), cada uno con n muestras o puntos sensando el nivel de potencia (dBm) en un punto de frecuencia del espectro (f_i).

F_{inicio} y F_{final} especifican el inicio y final de frecuencias para el barrido de medición, no necesariamente los 1427 - 1518 MHz respectivamente. T_{inicio} y T_{final} especifican el tiempo de inicio y fin en el que se efectúa el barrido, y N_t N_f el número de instancias de tiempo y canales de frecuencia de los que se recogen las mediciones.

Durante el proceso de recolección de datos, el equipo de medición realizará un barrido en todo el ancho de banda B_s en pasos de acuerdo a la resolución del ancho de banda B_r :

$$f_i = F_{\text{inicio}} + ((i - 1) \times B_r), \quad i = 1, \dots, N_f \quad (2)$$

donde

$$N_f = B_s / B_r$$

$$B_s = F_{\text{final}} - F_{\text{inicio}}$$

Finalmente, a manera de resumen, entre los parámetros a considerar durante la configuración del equipo y sus correspondientes valores son:

- Atenuación (Attenuation dB): 1.00E+01 dB
- Frecuencia Central (Center Frequency Hz): 1.49E+09 Hz
- Fecha y Hora (Date/Time)
- Nivel de Referencia (Reference Level dBm): 0.00E+00 dBm
- Resolución de Ancho de Banda (Resolution BW Hz): 1.00E+06 Hz
- Tipo de escala (Scale Type): LOG
- Spam Frequency (Hz): 1.23E+08 Hz
- Frecuencia de Inicio (Start Frequency Hz): 1.43E+09 Hz
- Frecuencia Final (Stop Frequency Hz): 1.55E+09 Hz
- Número de puntos de barrido (Sweep Number Of Points): 401
- Tiempo de barrido (Sweep Time seconds): 4.00E-03 s
- Resolución (Video BW Hz): 1.00E+06 Hz

3.11 Procesamiento

3.11.1 Ciclo de trabajo

La ocupación del espectro, también conocido como ciclo de trabajo, es un parámetro importante en la asignación de bandas de frecuencia, y en la continua vigilancia de su uso. En términos generales, el ciclo de trabajo representa la frecuencia en que la señal está activa (por encima del umbral) en cada canal durante un período de muestreo;

dicho de otra forma el ciclo de trabajo se define como el porcentaje de tiempo que un canal está ocupado. Dado un tiempo de muestreo y de observación, el ciclo de trabajo puede ser calculado usando:

$$\text{Ciclo de Trabajo} = \frac{\text{Período de Ocupación de la señal}}{\text{Período Total de Observación}} \times 100\%$$

$$\text{Ciclo de Trabajo} = \frac{n_s * t}{T} = \frac{n_s * t}{N * t} = \frac{n_s}{N}$$

donde t representa el intervalo de tiempo durante el cual un canal es monitoreado durante un barrido de frecuencia, T es la duración total de la medición, n_s es el número de tiempos o instancias en las que una señal se consideró como canal ocupado, y N denota el número total de barridos del canal.

Luego, la ocupación del espectro del canal i en cualquier tiempo t da como resultado un espectrograma binario definido como:

$$O_{t,i} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_{t,i} < \text{Umbral} \\ 1 & \text{si } P_{t,i} \geq \text{Umbral} \end{cases}$$

Como se comprenderá, el ruido ambiental es un umbral que tiene un gran impacto en la evaluación de la ocupación del espectro. Seleccionar un umbral demasiado bajo daría como resultado un porcentaje de ocupación poco legítimo y veraz, pudiéndose mal

interpretar la presencia de ruido ambiental como canal activo. Por lo tanto, la calibración de ambiente ruidoso es un tema clave en el monitoreo de radio.

En definitiva, conocer la distribución del ciclo de trabajo sobre todos los canales de la banda atribuida a determinados servicios inalámbricos es una cuestión de gran relevancia para el desarrollo y búsqueda de potenciales oportunidades de radio cognitiva, como por ejemplo el uso secundario de la banda.

Durante el análisis de los resultados se ha incluido un tercer parámetro a fin de afinar los resultados y poder verificar no sólo si el canal está desocupado o no; sino también con qué frecuencia y durante cuánto tiempo en total. Este parámetro lo denominaremos CCDF (Función de Distribución Acumulativa Complementaria en inglés), el cual indica la probabilidad que el ciclo de trabajo de un servicio inalámbrico en particular excede un determinado umbral de ciclo de trabajo y durante cuánto tiempo.

El desarrollo de la curva CCDF matemáticamente es la siguiente. Obtenemos la función de densidad de probabilidad $f_X(x)$ ó PDF del conjunto de datos recogidos a través de la medición. A partir de la misma calculamos la función de distribución acumulativa (CDF) $F_X(x)$,

integrando la PDF. Por último, procedemos a invertir la CDF, es decir $CCDF = 1 - F_x(x)$.

3.12 Análisis de las mediciones

Las mediciones recolectadas durante la etapa de captura corresponden a los niveles de potencia del instrumento de medición y no a los niveles de señal desde la antena del receptor.

Previo al análisis del porcentaje de ocupación, es necesario compensar estas medidas con las pérdidas debido al número de conectores, longitud del cable y atenuación del equipo a fin de tener un estimado más real de la señal a analizar.

$$P_R = P'_R + 4 * P_{conectores} + P_{cable} + Atenuación_{equipo} - G_{antena}$$

$$P_R = P'_R + 4 * 0.5 + 10m * 1 \frac{dB}{m} + Atenuación_{equipo} - 0$$

$$P_R = P'_R + 2dB + 10dB + Atenuación_{equipo}$$

$$P_R = P'_R + 12dB + [5,10]$$

3.13 Resultados de la Evaluación Espectral

Predisponer de información estadística del uso actual del espectro es el primer paso para averiguar las posibles bandas de frecuencia que podrían participar en la compartición dinámica del espectro utilizando la tecnología de radio cognitiva.

En los dos siguientes puntos analizaremos los resultados, justificando la razón de los mismos. Cabe recalcar que estos resultados no pueden ser generalizados y sólo son válidos en el lugar de estudio: Facultad de Electricidad y Computación de la ESPOL Campus Prosperina.

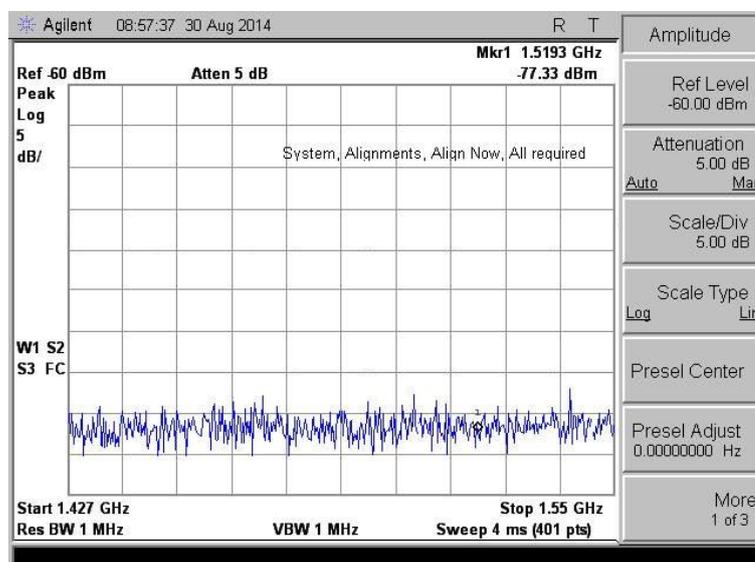


Figura 3.13 Captura de Señal Espectral

3.13.1 Coeficientes de Correlación

El coeficiente de correlación lineal permite calcular el grado de relación entre dos variables. En una distribución bidimensional (en este caso frecuencia versus nivel de potencia) puede ocurrir que las dos variables guarden algún tipo de relación entre sí.

El coeficiente de correlación es igual al cociente entre la covarianza y el producto de las desviaciones típicas de ambas variables:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Si el coeficiente de correlación lineal tomara valores cercanos a -1 , significa que la correlación es fuerte e inversa. Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a 1 la correlación es fuerte y directa. Pero si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a 0 , la correlación es débil.

El objetivo de determinar los coeficientes de correlación es para verificar si es posible promediar todas las mediciones y hacer el análisis a una sola matriz promedio, y no de cada una, en caso de verificarse una estrecha relación entre todas las matrices.

Para el cálculo de los coeficientes se procedió a comparar los resultados de cada medición donde cada variable corresponde a un libro de Excel con los datos recolectados de medio día (12 h), de forma correspondiente, haciendo coincidir hora de inicio y fin como se muestra en la Tabla 3.1 (A-A, B,B, C-C, etc).

Tabla 3.1. Coeficientes de Correlación de las Mediciones

Número de Días	Día de la Medición (del 7 al 14 de Enero)	Intervalo de Tiempo de la Medición	Coeficiente de Correlación	
1	Miércoles 7	9 am a 10 pm	0.006423564	A
		10 pm a 10 am	0.006165022	B
2	Jueves 8	10 am a 10 pm	0.006423564	A
3	Viernes 9	10 pm a 10 am	0.006165022	B
4	Domingo 11	10 pm a 10 am	0.012580443	C
		11 am a 11 pm	0.011623033	D
5	Lunes 12	11 pm a 11 am	0.012580443	C
		12 am a 12 pm	0.011623033	D
6	Martes 13	1 am a 2 pm	0.008106441	E
		2 pm a 2 am	0.008540522	F
7	Miércoles 14	5 am a 5 pm	0.008106441	E
		6 pm a 6 am	0.008540522	F

Como se verifica, los coeficientes de correlación son positivos lo cual significa que existe una relación directa, pero más cercanos a cero; es decir una relación directa sí pero débil. Por lo tanto matemáticamente deberíamos hacer un análisis para cada caso.

3.14 Disponibilidad y Porcentaje de Ocupación

En esta sección se presentarán los detalles gráficos de la ocupación espectral en la banda asignada en este caso de estudio, considerando el orden de las mediciones de acuerdo con la Tabla 3.1.

Los gráficos mostrados a continuación fueron obtenidos utilizando el software MATLAB.

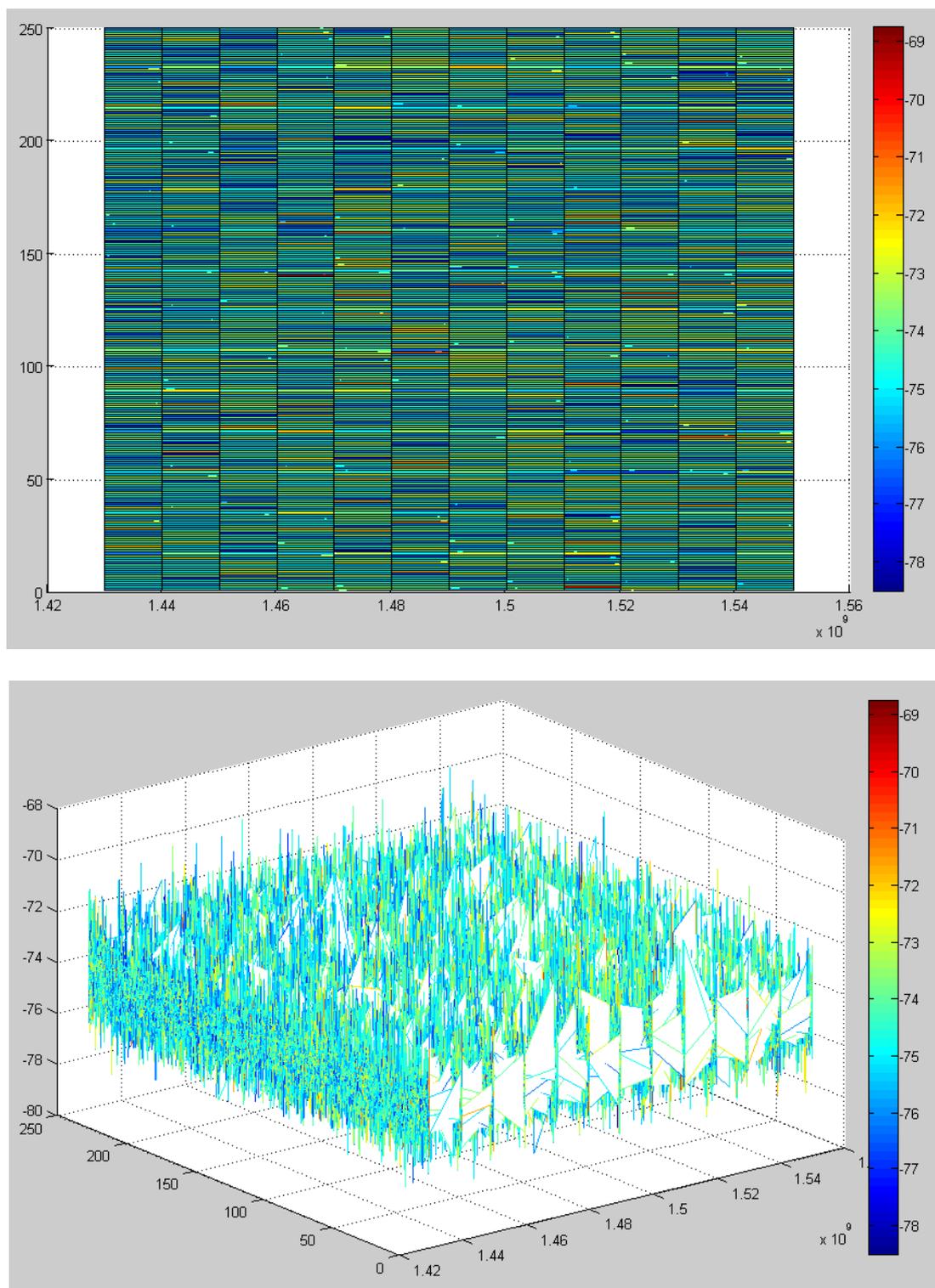


Figura 3.14 Espectrograma Día 1 (día)

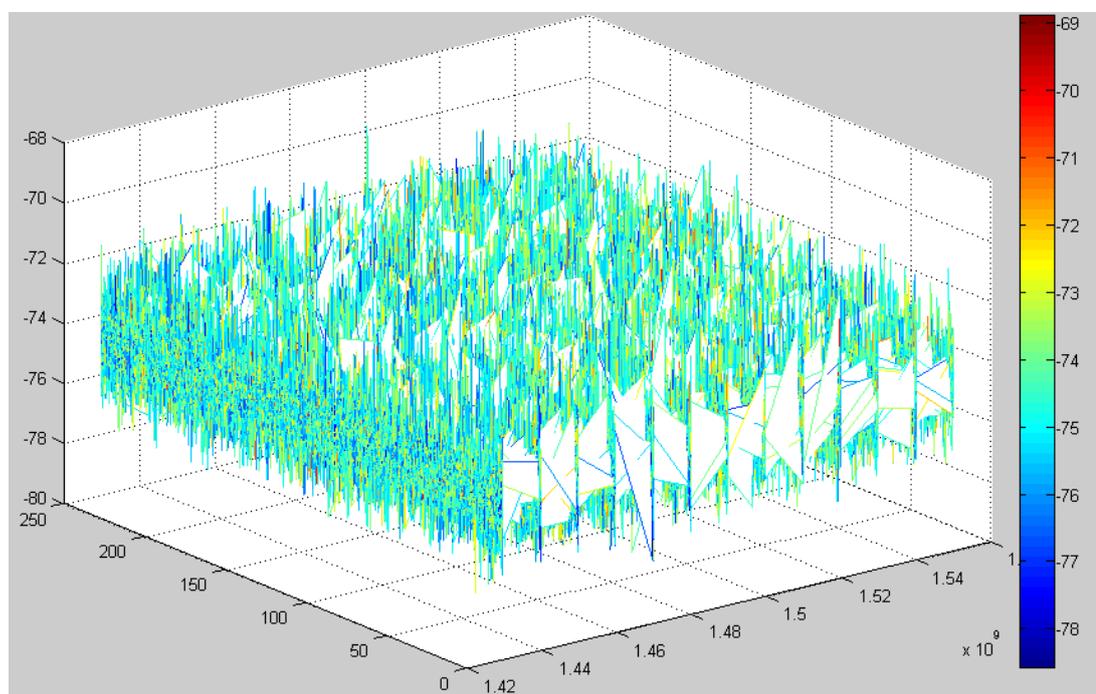
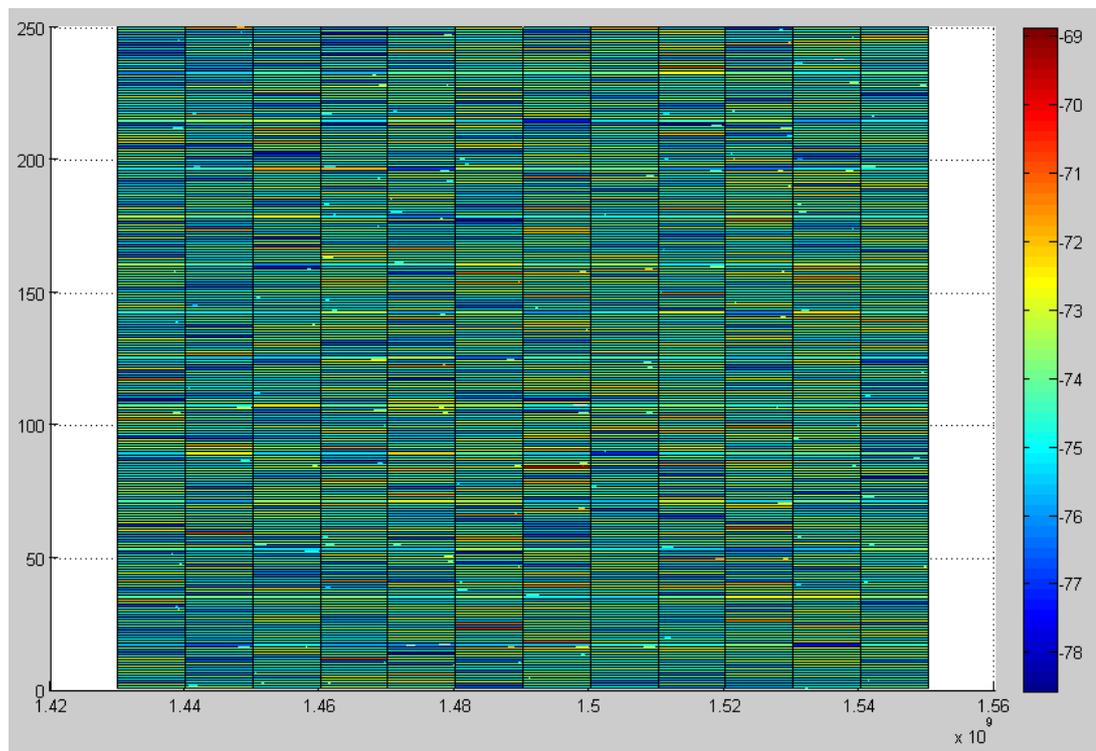


Figura 3.15 Espectrograma Día 1 (noche)

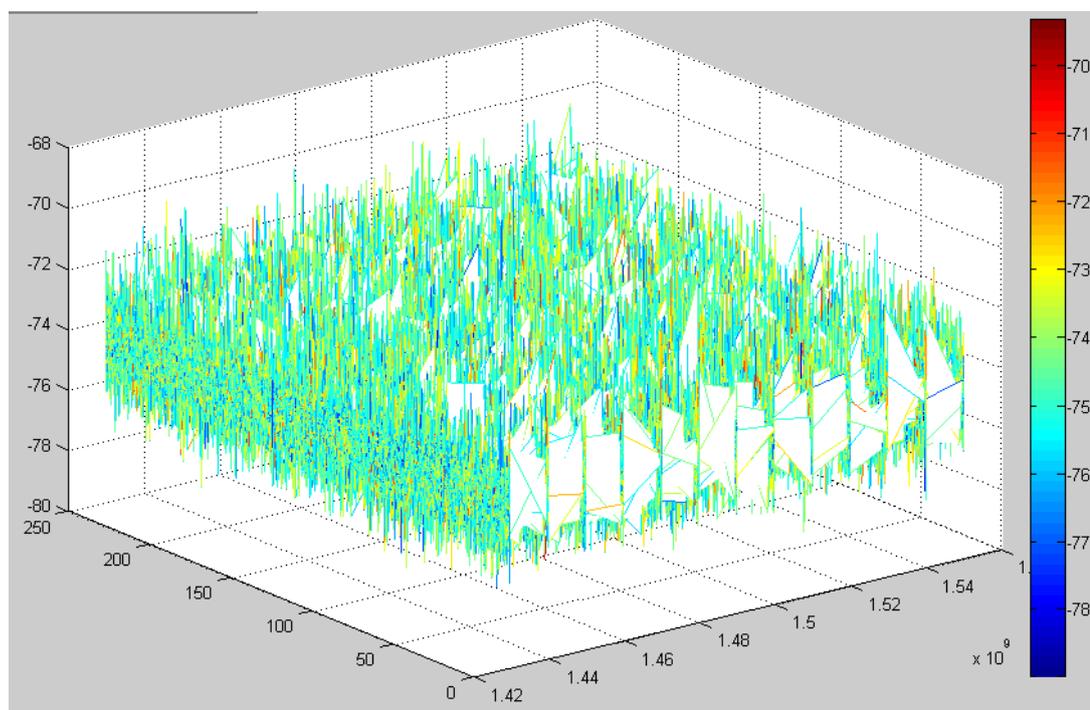
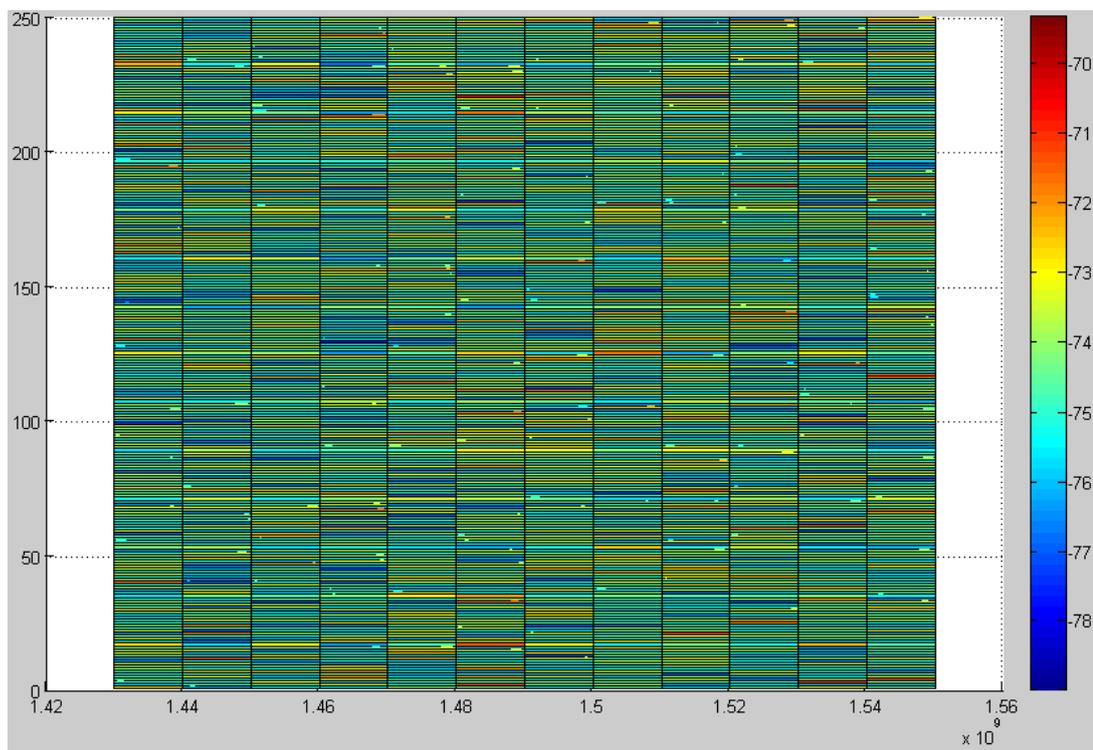


Figura 3.16 Espectrograma Día 2

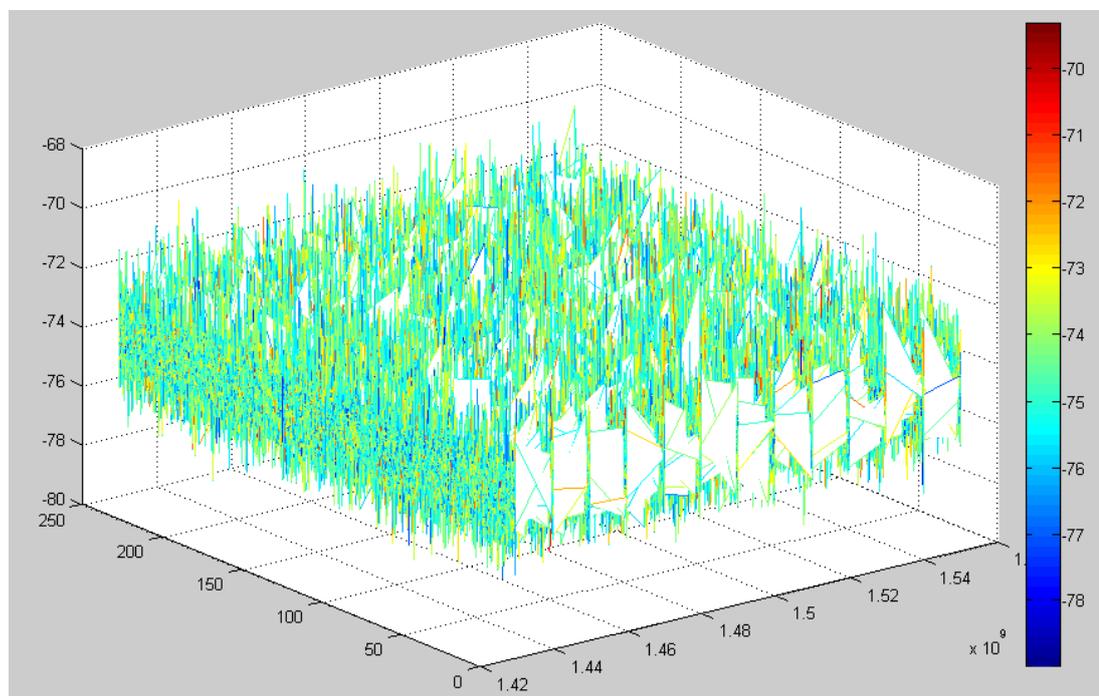
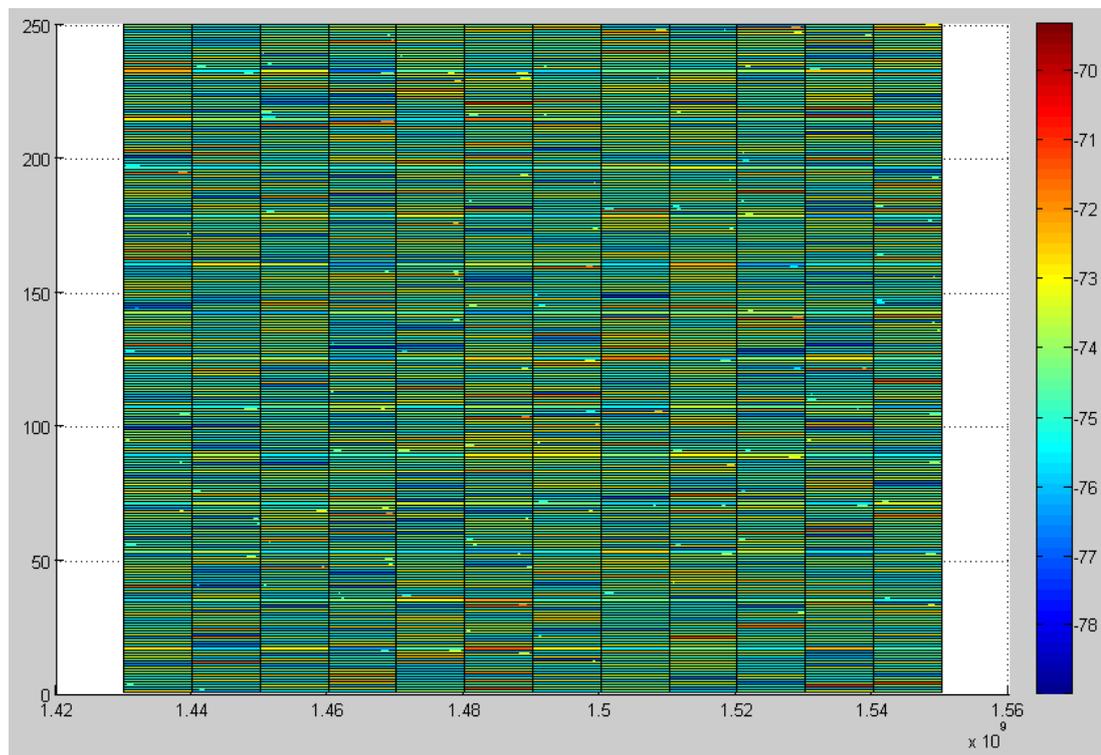


Figura 3.17 Espectrograma Día 3

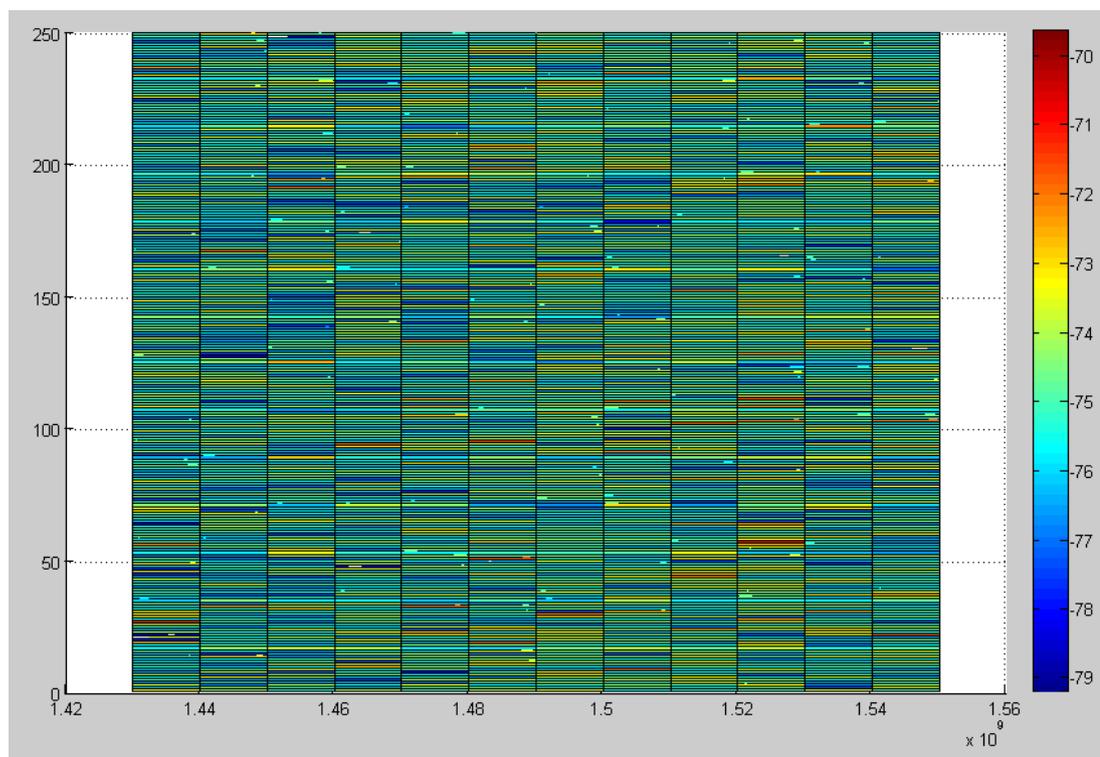


Figura 3.18 Espectrograma Día 4 (día)

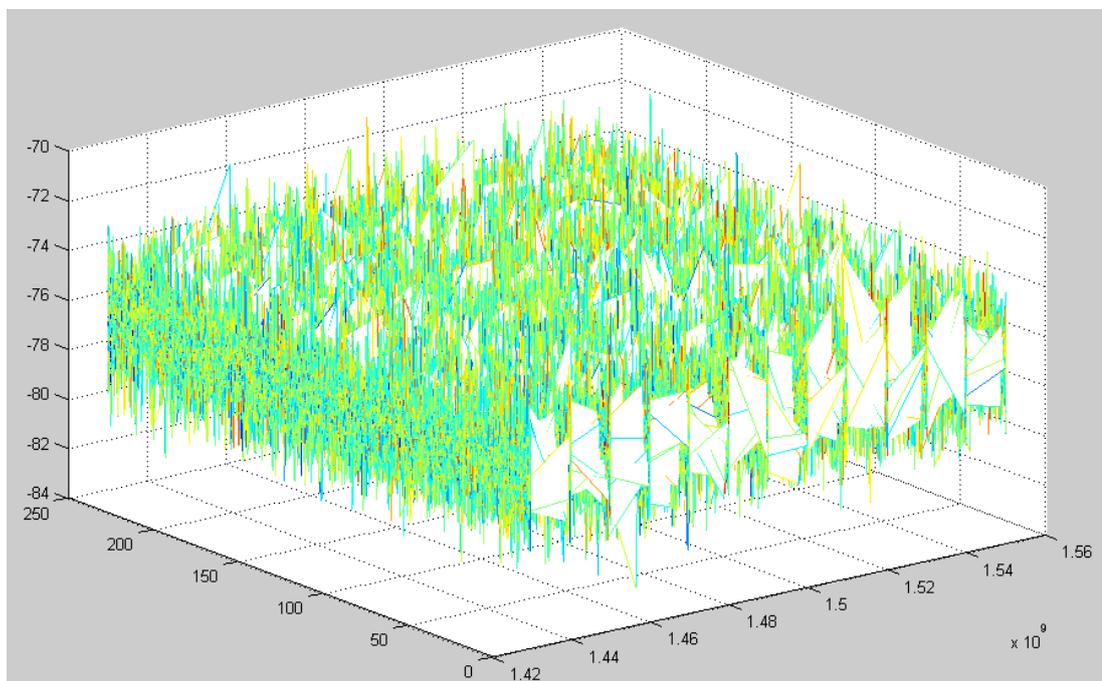
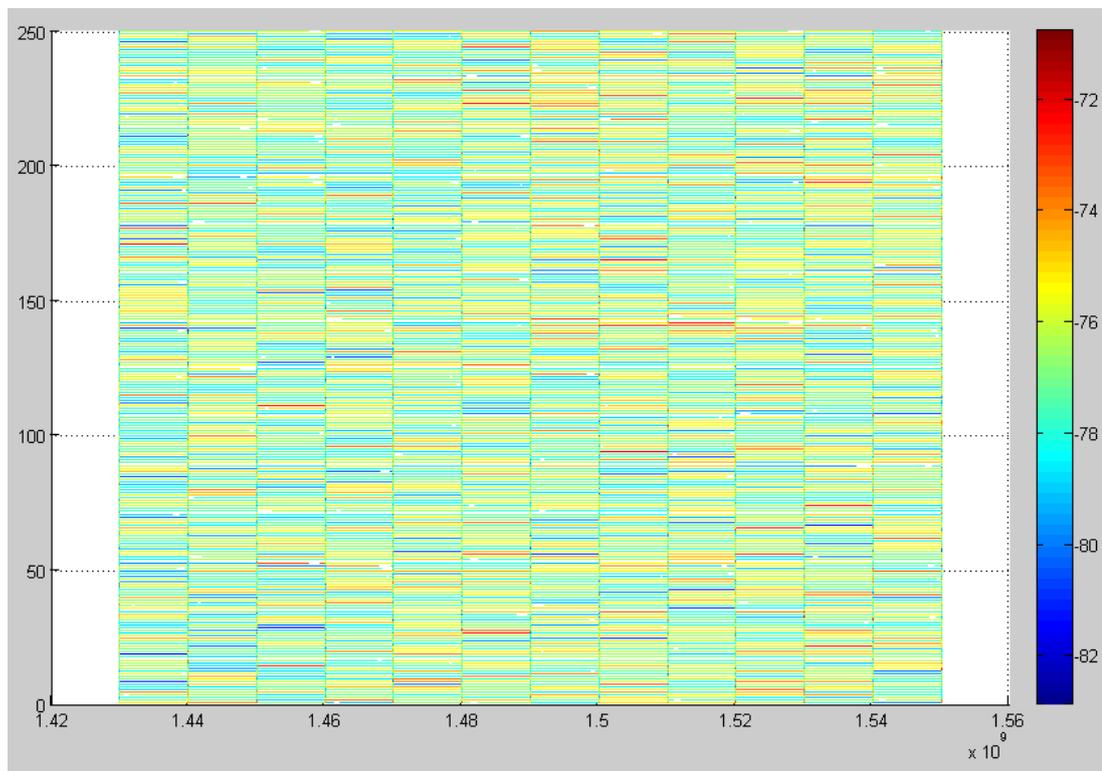


Figura 3.19 Espectrograma Día 5 (noche)

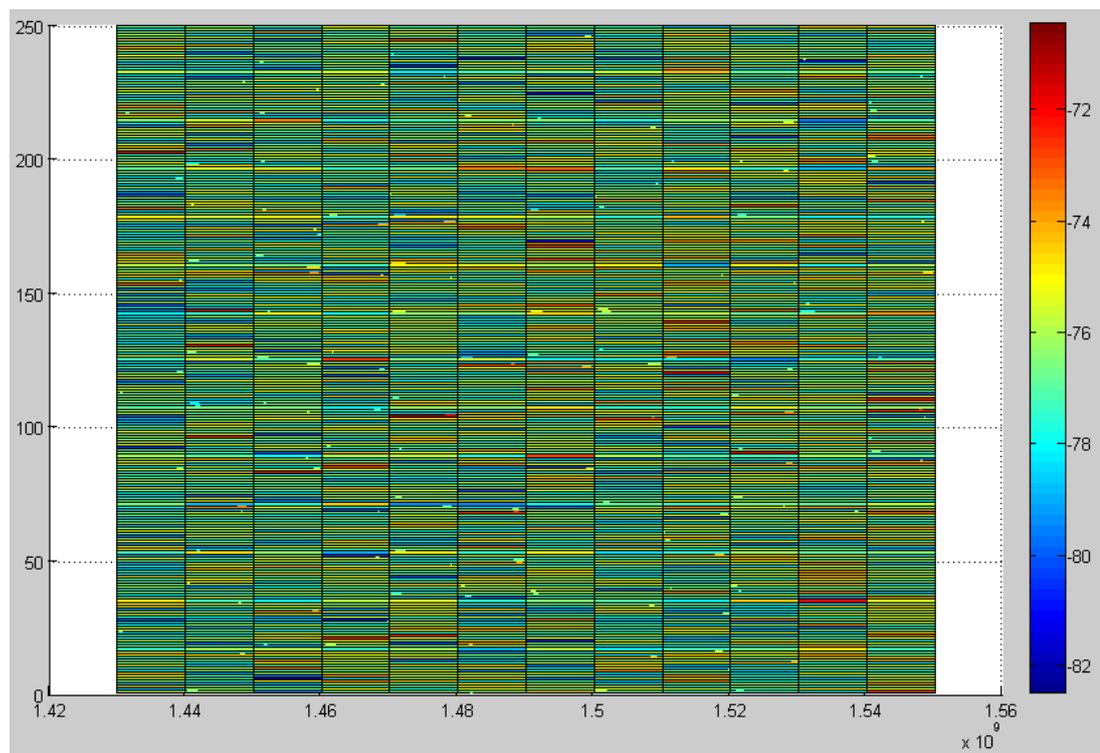
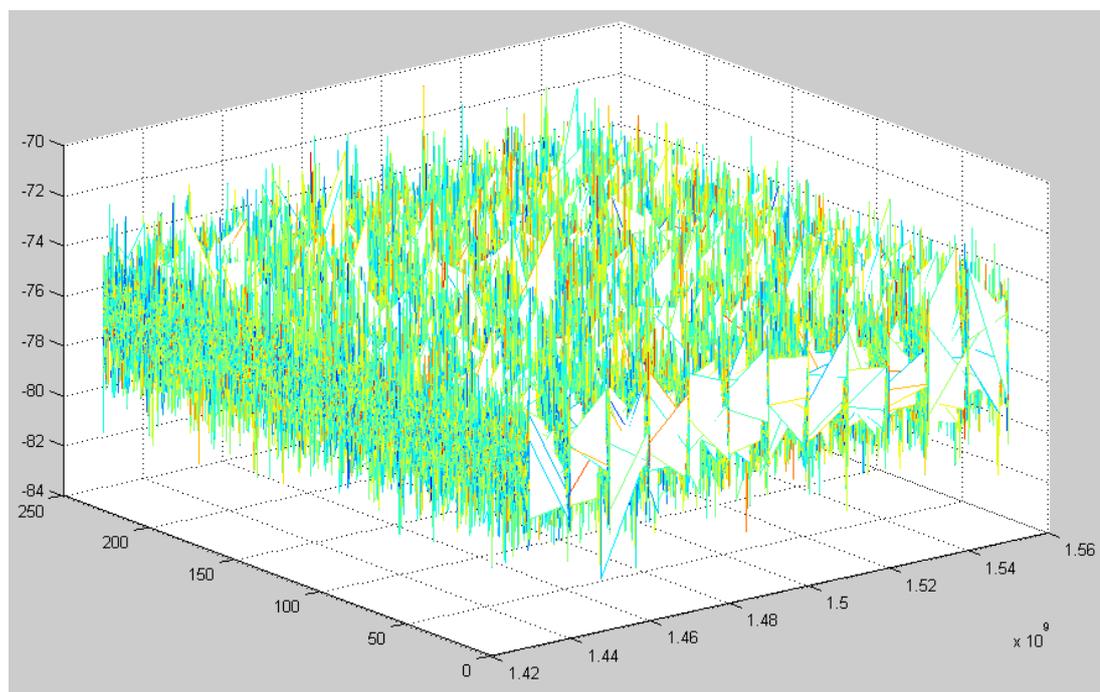


Figura 3.20 Espectrograma Día 6 (día)

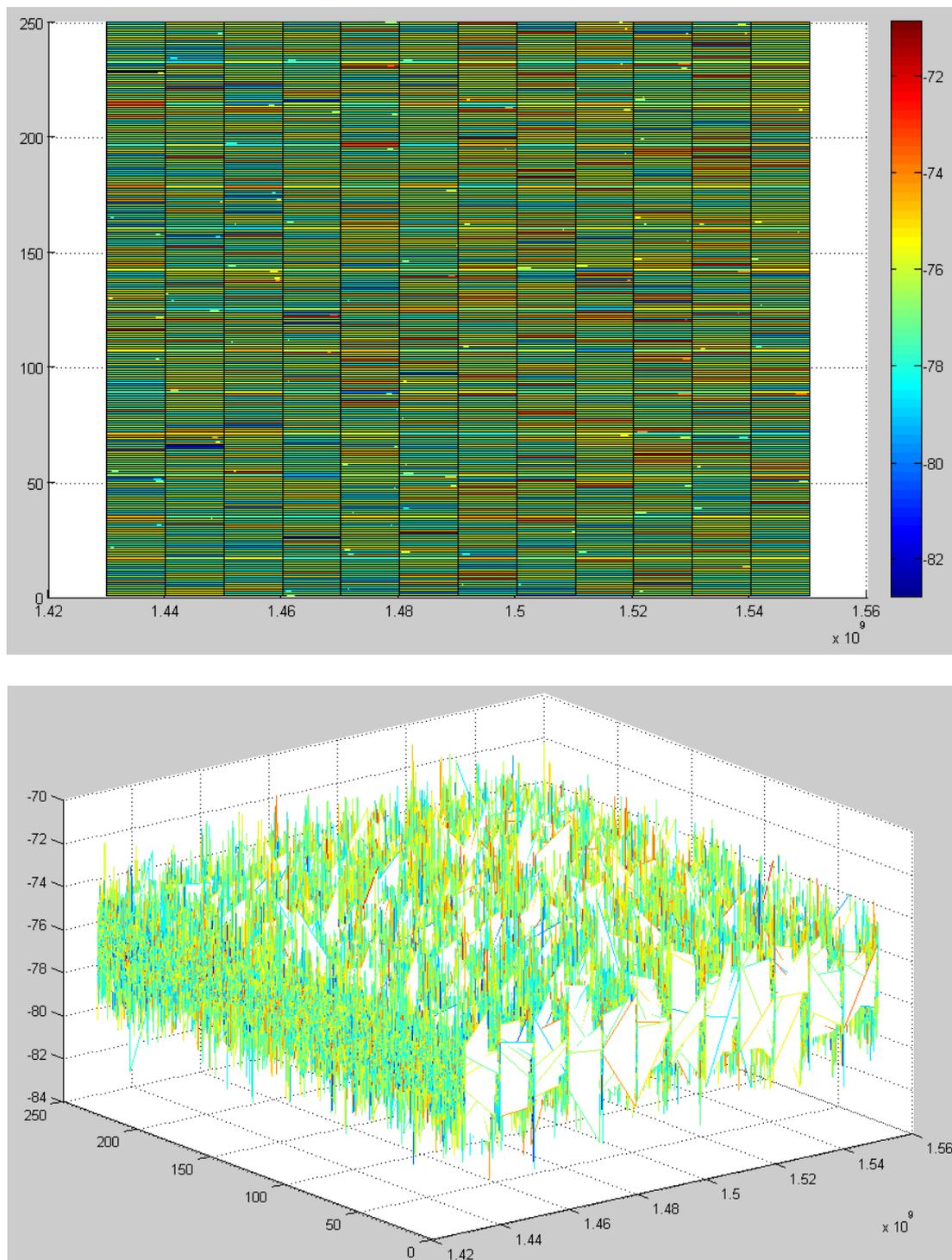


Figura 3.21 Espectrograma Día 7 (noche)

Luego de realizar el proceso de evaluación espectral con la obtención de datos en campo para evaluar el espectro radioeléctrico en la banda de 1427 a 1518 MHz, se puede apreciar claramente en el analizador de espectro la ausencia de portadoras que denoten la presencia de señales electromagnéticas que correspondan a la aplicación de algún tipo de servicio y que para este caso debería corresponder con servicios fijos para la banda en estudio.

De acuerdo a la métrica de evaluación propuesta en el apartado 3.8.2 sobre el nivel de recepción mínimo a requerir (umbral) , observamos que los valores obtenidos están por debajo de los -73.81 dBm , imposibilitando cualquier tipo de comunicación para el servicio fijo punto a punto, de acuerdo al Registro oficial de la CONATEL sobre los servicios que se brindan en nuestro país.

Teniendo en cuenta estos resultados es clara la necesidad de proponer el uso de nuevas e innovadoras tecnologías en telecomunicaciones que permitan utilizar estos “espacios libres” del espectro radioeléctrico para el acceso de manera dinámica y proporcionar los servicios inalámbricos más idóneos.

En el Capítulo 2 se citó varias medidas que los entes reguladores, basadas en las recomendaciones UIT, buscan promover a fin de

afrontar esta problemática mientras incrementa la demanda por mayor ancho de banda y el número de usuarios solicitando banda ancha.

En definitiva, el uso ineficiente de este recurso se ha convertido en un tema crucial en las telecomunicaciones que ha impulsado en gran medida la investigación de mecanismos de acceso dinámico del espectro en espacios que no se detecte alguna señal transmisora. Estrategias como la detección de una portadora antes de empezar a transmitir marcaron los inicios de la radio cognitiva; sin embargo esta alternativa se viene fortaleciendo y mejorando a través de la implementación de sistemas que permitan no sólo detectar sino modelar y predecir la ocupación y utilización de determinada banda, convirtiéndose ya una solución y recomendación, estandarizada, a fin de promover sistemas más eficientes y mejorar los servicios inalámbricos de comunicaciones.

En el siguiente capítulo, se revisarán algunos casos de estudio de varios países del mundo donde se evidencia la escasez de espectro radioeléctrico; así como se explicará un modelo ilustrativo sobre el funcionamiento de un sistema de acceso dinámico utilizando la tecnología de radio cognitiva.

3.15 Posicionamiento geográfico de algunos proveedores de servicio en el sector

Una vez obtenidos los datos de la SUPERTEL de los concesionarios con su respectivo servicio, se realiza un filtrado de las ubicaciones geográficas más próximas al lugar de evaluación espectral (FIEC - ESPOL), Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Coordenadas de Ubicación de Radio Bases de los Concesionarios

Concesionario / Propietario	Locación	Frecuencia	Ancho de Banda	Longitud	Latitud
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	KM 23.5 VÍA PERIMETRAL Y KM 14 VÍA DAULE	1505	3500	079°56'34,0"	02°04'57,0"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	VÍA DAULE KM 14	1473	3500	079°56'16,2"	02°05'04,4"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	KM 22.5 VÍA PERIMETRAL, CDLA. MONTEBELLO, TERMINAL DE TRANSFERE	1473	3500	079°56'36,0"	02°05'16,0"S
CORPORACION NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES CNT EP	CIUDADELA EL CARACOL 12.5 KM VÍA DAULE ÁREA VERDE JUNTO A LA VI	1460	2500	079°56'21,3"	02°05'25,6"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	KM 9.5 VIA A PERIMETRAL	1473	3500	079°57'11,5"	02°05'36,7"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	VÍA DAULE KM 12 PARQUE CALIFORNIA II	1473	3500	079°56'13,0"	02°05'46,0"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	CALLE ORQUIDEAS Y D. EL MAIZAL, COOP. JUSTICIA SOCIAL MZ. B SOL	1490,5	3500	079°54'30,7"	02°07'14,5"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	COOP. JUAN MONTALVO, CALLE SAN JUAN, ALTURA DEL KM 8.5 VÍA A DA	1473	3500	079°55'21,0"	02°07'18,0"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	CALLE PRINCIPAL, MZ 336 -F SOLAR # 31	1490,5	3500	079°53'52,0"	02°07'34,5"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	BRAZIL ENTRE QUITO Y MACHALA-DIAGONAL A HOSPITAL DEL NIÑO	1520	1500	079°53'53,3"	02°08'20,9"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	CENTRO COMERCIAL LA ROTONDA, AV. BENJAMÍN CARRION	1490,5	3500	079°54'29,8"	02°08'21,5"S

	MORA				
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	AV. GUILLERMO ROLANDO PAREJA Y TERCERA	1490,5	3500	079°53'46,7"	02°08'32,3"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	URB. LA GARZOTA SECTOR 3 MZ. 47, (ANTIGUA EMELEC ATRAS PACIFIC)	1490,5	3500	079°53'27,6"	02°08'33,7"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	TERMINAL TERRESTRE GUAYAQUIL AV. BENJAMÍN ROSALES A. Y AV. DE L	1490,5	3500	079°52'46,9"	02°08'35,0"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	CAMPUS ESPOL, LA PROSPERINA	1439,5	3500	079°57'08,5"	02°08'49,9"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	AV. OCTAVA, ENTRE 2DO PASAJE Y CALLE O, MAPASINGUE OESTE CC EL	1490,5	3500	079°55'57,0"	02°09'08,0"S
LEVEL 3 ECUADOR LVLT S.A.	URB. SANTA LEONOR MZ 9 SOLAR 6	1490,5	3500	079°52'42,5"	02°09'11,0"S

Se tiene que enfatizar que el único tipo de servicio que se ofrece en el rango de frecuencias de este caso de estudio es el Fijo con enlaces Punto –Punto y Punto Multipunto.

A continuación, se procede con el ingreso de los respectivos parámetros solicitados por el Software Radio Mobile tales como las coordenadas de las ubicaciones de las radio bases, la frecuencia y el ancho de banda, correspondientes a las propiedades de las unidades como lo muestran las Figuras 3.22 y 3.23.

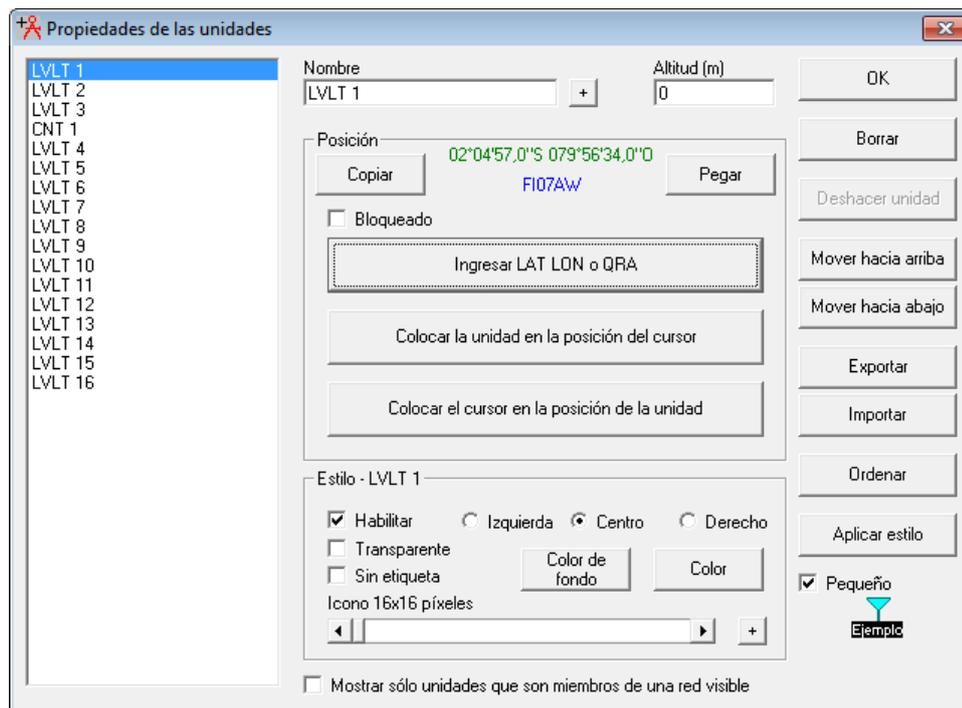


Figura 3.22 Configuración de las Redes

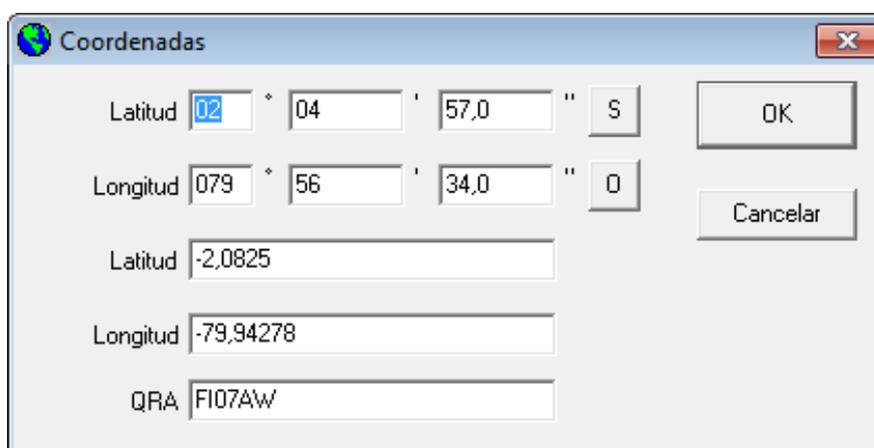


Figura 3.23 Ingreso de Cordenadas

Una vez culminado con el proceso de ingreso de datos el software presentará por pantalla una mapa con la ubicación exacta de las radiobases como se muestra en la Figura 3.24.

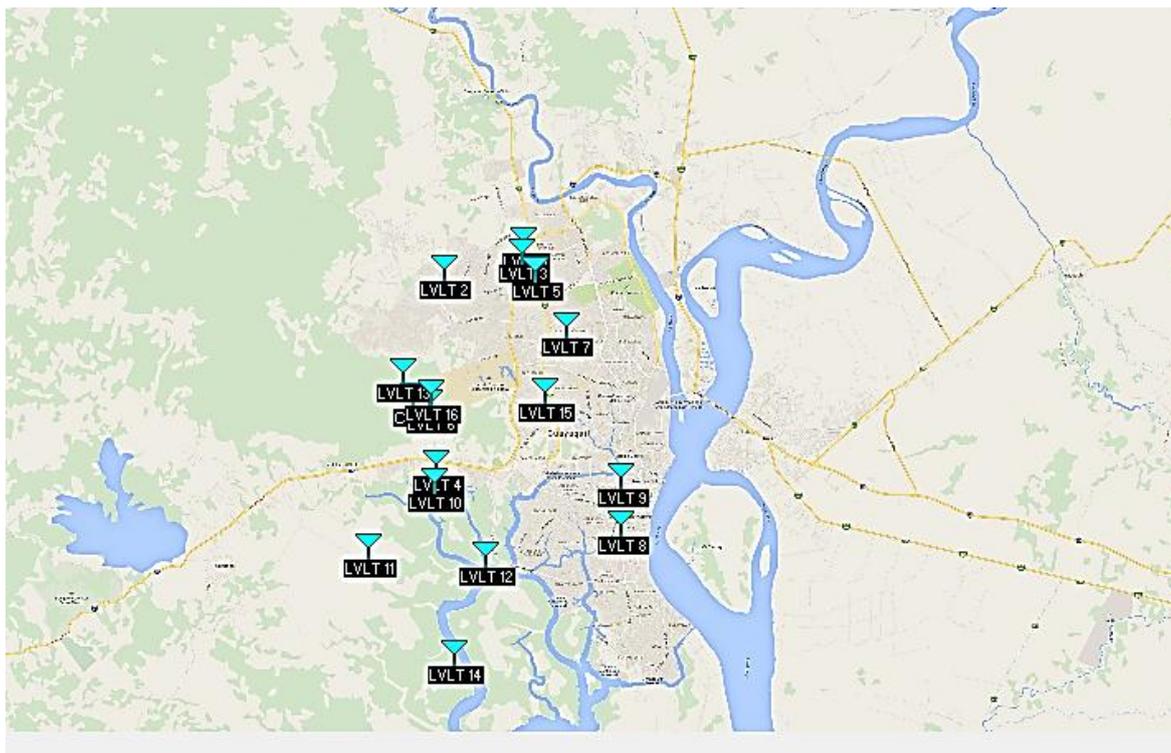


Figura 3.24 Ubicación de las Estaciones de Radio Base

Como se ve a continuación en la Figura 3.25, también es posible mediante el software realizar un posicionamiento en base a la altitud geográfica del sector donde se ubican las estaciones de transmisión.

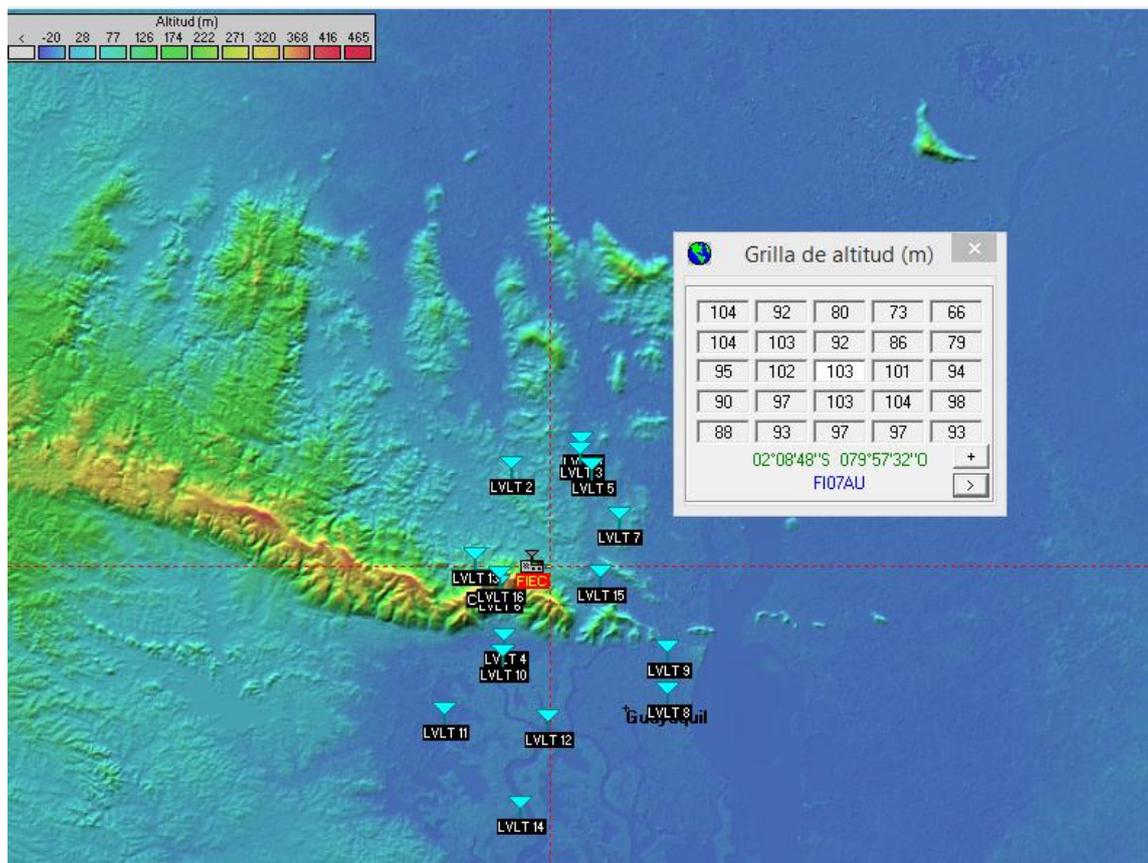


Figura 3.25 Posicionamiento Geográfico de Algunos Proveedores de Servicios Punto a Punto en el Sector

El objetivo de esta gráfica es ilustrar que a pesar de la ausencia de portadoras en el analizador gráfico sí existen operadoras que trabajan en la banda de estudio alrededor del sector donde se tomaron las medidas.

La particularidad de las estaciones transmisoras y receptoras es que la mayoría de ellas se encuentran en montañas y cerros alrededor del

sector, imposibilitando la línea de vista de las transmisiones con respecto a la estación de medición que se encuentra en la Facultad.

CAPÍTULO 4

4. MODELAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE RESULTADOS

Para poder llegar a modelar el comportamiento de una señal, es necesario conocer los diferentes fenómenos que sufre una señal como por ejemplo el desvanecimiento de la señal a través del tiempo y el espacio, “fast fading”, características propias de la señal dependiendo de la frecuencia de operación, el efecto multi-trayectoria, entre otras.

Antes de determinar si un espacio en el espectro radio eléctrico se trata de un espacio en blanco con disponibilidad de ser utilizado por otro usuario, es necesario lograr la caracterización del espectro en donde se

recopilarán datos estadísticos sobre el uso del espectro utilizando el modelo de ciclo de trabajo, por ejemplo. Dentro de este mismo proceso tenemos la caracterización que no sólo se basa en las condiciones actuales del entorno de radio, sino también en las actividades y uso del Usuario Primario (PU).

El segundo paso implica la selección del espectro, mediante el cual se selecciona la banda de espectro más adecuado para satisfacer requisitos de Calidad de Servicios (QoS). Finalmente, el sistema de Radio Cognitiva (CR) a proponer deberá ser capaz de reconfigurar sus parámetros de transmisión para permitir la comunicación en la banda seleccionada.

La clave para la caracterización del espectro es lograr conseguir un modelo que caracterice la actividad del usuario primario, que comúnmente se basa en datos históricos, para proporcionar los medios para predecir futuros patrones de tráfico en una determinada banda del espectro.

4.1 Modelo Propuesto

El gran desafío o el principal objetivo de los Sistemas de Acceso Dinámicos (DSA) es lograr conseguir que usuarios primarios y secundarios puedan coexistir y compartir una banda del espectro sin

que ocasione interferencias uno al otro. Este algoritmo permitiría asignar canales de frecuencia sin utilizar de manera eficiente y reducir el número de espacios en blanco que existen aun cuando existe una alta demanda de solicitudes para acceder o aumentar el ancho de banda asignado.

Un conjunto de estrategias y modelos que actualmente se analizan para la implementación de la tecnología DSA son:

Uso Exclusivo Dinámico

Modelo bajo el cual se sustenta la regulación y administración del espectro en el que una banda es concesionada a un único usuario otorgándole la licencia para brindar sus servicios.

La idea o lo ideal para mejorar la eficiencia del espectro sería asignar de forma dinámica ciertas bandas o conjunto de frecuencias a fin de que luego de proceder con la exploración de dichas bandas en tiempo y espacio, llevando un registro estadístico, el usuario final seleccione una banda y pueda operar en la misma siempre que no cause interferencia con otro usuario.

Modelo Abierto Comparticionado

Son los usuarios finales que deciden si utilizar determinada banda, volviéndose administradores del mismo. No se garantiza la no interferencia con otros usuarios, ni la compartición exclusiva si ya está en uso, ejemplo de aquello tenemos los sistemas WiFi o ISM.

Modelo de Acceso Jerárquico

Posibilitando el uso de una misma banda a un segundo usuario siempre que opere por debajo del piso de ruido del usuario primario, ejemplo de aquello tenemos la tecnología de banda angosta (UWB).

Otro escenario a plantearse es bajo el esquema “acceso oportuno” en el que un segundo usuario pudiera transmitir en las mismas condiciones que uno primario siempre que el primario no se encuentre operando en la zona geográfica a transmitir, modelo el cual ahondaremos en la siguiente sección.

4.2 Modelo de Acceso Oportuno al Espectro

La principal tecnología que lograría la asignación dinámica del espectro es la radio cognitiva, en el cual un segundo dispositivo participaría en este modelo censando concurrentemente la ocupación del espectro,

determinando posibles bandas sin utilizar para seleccionar la más oportuna, tal como se muestra en la siguiente Figura 4.1.



Figura 4.1 Diagrama del Modelo de Acceso Oportuno al Espectro

Una propuesta de modelo, sugerido por algunos autores [32] para representar la ocupación de un canal sería:

$$a(b) = \left\{ \begin{array}{l} s(x), T_o \\ z(b) + y(b), T_i \end{array} \right\}$$

donde $z(b)$ es la señal transmitida por el usuario primario, $y(b)$ es el ruido aditivo gaussiano, T_o la hipótesis nula y T_i la hipótesis alternativa.

El procedimiento como se observa en la Figura 4.1 empieza detectando una o un conjunto de bandas y determinar si existe la presencia de alguna portadora. Para el modelo propuesto es necesario conocer el piso de ruido de la banda que se pretende utilizar a fin de discriminar si se trata de alguna señal del Usuario Primario (PU) o de espacio en blanco.

A continuación, en caso de no detectar la presencia de alguna señal, se selecciona el mejor canal disponible, este proceso se denomina Administración del Espectro. Luego, el usuario secundario accede a esa banda, Para el estado “Compartición del Espectro” se mantiene a menos que detecte la presencia del usuario primario. De detectarse la presencia de un PU, deberá desocupar ese canal moviéndose a otro que se encuentre disponible reconfigurando los parámetros de

transmisión o suspender la transmisión, también conocido como Salto de Canal o Movilidad en el Espectro.

4.3 Capacidad Cognitiva y reconfiguración de parámetros

Algunas características funcionales del equipo presente serían la exploración concurrente de un espacio electromagnético, la detección de un espacio en blanco, correr un algoritmo que ayude a decidir el canal más óptimo, llevar un registro estadístico, auto-configurarse, cuidar la seguridad y fidelidad de la transmisión, algoritmos adaptativos y cognitivos para que de forma autónoma y dinámica ajuste sus parámetros operativos de acuerdo a los registros almacenados con el fin de alcanzar los objetivos predefinidos y aprender de los resultados obtenidos.

Un sistema cognitivo debe ser dinámico, cíclico, con tres funciones claramente definidas:

Exploración del espectro

Determina qué porción del espectro se encuentra disponible; este proceso implica detectar la presencia del transmisor y receptor primario y monitorear los diferentes niveles de recepción e interferencia.

Análisis del Espectro

Determina el espacio en blanco a utilizarse estimando cuánto podría utilizar, cuidando de las bandas de guardia necesarias para evitar una posible interferencia.

Decisión y Selección

El sistema radio cognitivo determina la capacidad del canal disponible, parámetros técnicos del espacio en blanco, tasa de transmisión y ancho de banda de la transmisión. Una vez seleccionada la banda a utilizar, algunos parámetros a definir serían:

- Potencia de transmisión sin causar interferencia
- Un estimado de la pérdida en la trayectoria considerando sólo la frecuencia y distancia, asegurando alcanzar el umbral mínimo del equipo receptor.
- Garantizar una baja tasa de error, modificando el esquema de modulación y disminuyendo la tasa de transmisión.

La capacidad cognitiva del dispositivo a implementar no sólo yace en la búsqueda de un espacio en blanco que pueda ser utilizado; sino también que pueda reconfigurarse durante la marcha, dinámico, dependiendo de las condiciones del sitio.

Este equipo podrá transmitir y recibir en una gran variedad de frecuencias, utilizar diferentes tecnologías de acceso, variar la potencia de transmisión, el esquema de modulación y los protocolos de comunicación sin algún cambio en el equipo de hardware para cada cambio.

La Figura 4.2 explica los componentes de un sistema típico de radio cognitiva, que le proveerá al sistema inalámbrico adaptabilidad y dinamismo en la exploración y asignación del espectro, manteniendo la calidad de la transmisión inalámbrica al mismo tiempo que se mejora la eficiencia del uso del espectro.

Predisponer de una base de datos de ubicación de espacios en blanco es una tecnología colaborativa que permitirá la compartición del espectro. Con esta base, el usuario primario debe estar registrado, de tal manera que si un usuario desea acceder a través de esta tecnología, el equipo deberá primero acceder a esta base periódicamente para confirmar la disponibilidad de cierto canal.

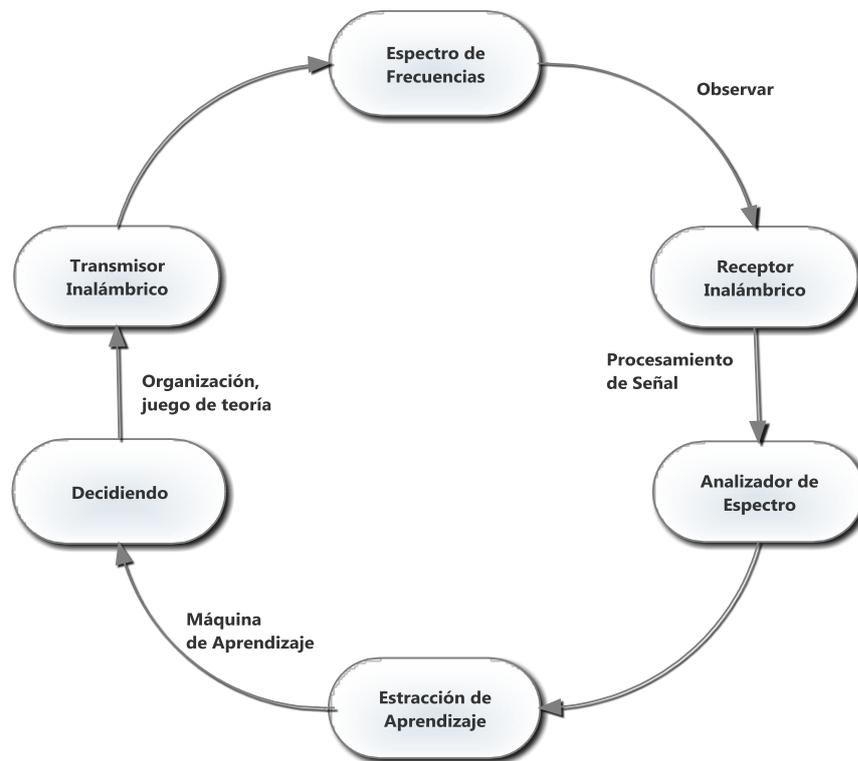


Figura 4.2 Componentes Típicos de Radio Cognitiva

Existen argumentos a favor de esta medida porque así se evitaría tener un equipo complejo para la exploración de RF por cada usuario que requiera aplicar esta tecnología. Por otro lado, existen estudios [6,17] que sostienen que en el futuro, predisponer de acceso a la base de datos así como poseer un equipo con técnicas de detección de espectro serán utilizados en conjunto a fin de tener flexibilidad y lograr la máxima eficiencia para un uso secundario del espectro, compartido, sin repercutir en la calidad de las otras transmisiones de los alrededores.

Existen estudios [8, 16], que explican en detalle cómo funcionaría esta base de datos no del todo pública, con sus fundamentos y la autenticación requerida para su acceso. De manera general esta base combinaría información acerca del espacio espectral en uso con información de la geografía del sitio y un cálculo del modelo de propagación para determinar cobertura, alcance y frecuencias en uso.

A continuación en el siguiente capítulo ahondaremos detalles sobre la tecnología de espacios en blanco, funcionamiento y casos de estudio.

CAPÍTULO 5

5. TECNOLOGÍAS DE ESPACIOS EN BLANCO Y RADIO COGNITIVA

5.1 Introducción

En los últimos años algunas operadoras telefónicas y servicios de broadcast vienen experimentando congestión en sus sistemas al mismo tiempo que sus entes reguladoras se ven limitados de otorgar mayores concesiones, sin embargo, las campañas de medición y estudios académicos demuestran que, en su conjunto, el espectro está siendo

inutilizado [1-3]. De hecho, en algunas regiones, en ciertos períodos, no se utiliza una gran parte de la concesión en absoluto.

Esto da lugar al llamado " espacios en blanco " del espectro. Los espacios en blanco son, pues, los agujeros del espectro donde no existe señal a pesar de ser atribuida a un servicio específico y para una empresa u organización específica. Esto se muestra en la Figura 5.1 [37].

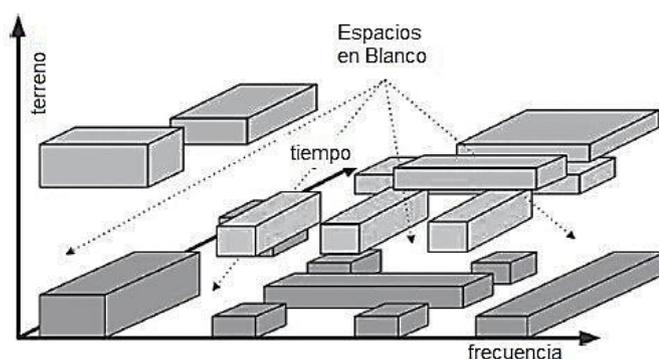


Figura 5.1 Espacios en Blanco [36]

Dado que estos espacios no se utilizan en absoluto la mayoría del tiempo, sería económicamente y socialmente ventajoso cambiar la política actual de regulación sobre la asignación del espectro de una tecnología, servicio o empresa a un esquema más flexible que hace uso eficiente de estos espacios en blanco.

Los espacios de radio en blanco deben de ser ágiles y adaptarse a la interfaz de radio con una visión clara y un óptimo funcionamiento, un proceso bastante complejo debido a los fenómenos que sufre una señal inalámbrica.

Con el fin de poner en práctica e implementar dispositivos con tecnología de espacio en blanco, el mayor desafío es determinar cómo lograr utilizar canales previamente asignados a concesionario primarios. Como se hizo mención anteriormente, los radios deben de ser ágiles, dinámicos, entendiendo que la portadora central, el ancho de banda, el tipo de modulación y la potencia de transmisión estén monitoreadas y controladas por un histórico arreglo de datos correspondiente a una base de datos dinámica, a fin de identificar oportunidades de transmisión sin que exista interferencia con el concesionario primario. En la Figura 5.2 [37] se presenta una disposición típica de un radio de trabajo en un espacio en blanco, en el que el transmisor está cambiando continuamente durante tiempo para llenar los agujeros de espectro disponible.

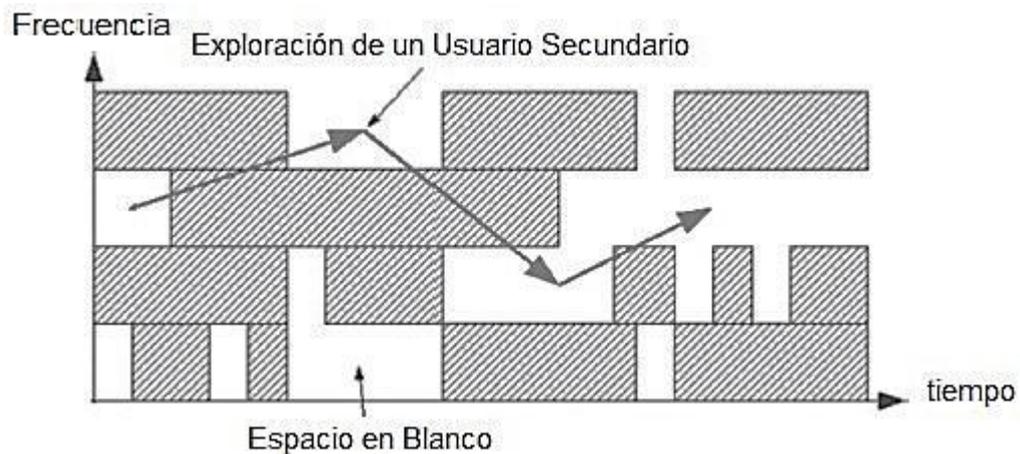


Figura 5.2 Transmisor de Espacio en Blanco [36]

Recientes avances en estudios de radios definidos por software [11] y la radio cognitiva (CR) [6], [22] en un entorno donde crece la demanda por acceder al recurso espectral, se confabulan creando un espacio propicio para promover el desarrollo de nuevas tecnologías como el acceso dinámico al espectro. Desarrollar dispositivos con la capacidad de detectar la disponibilidad de espectro y flexibilidad para ajustar las frecuencias de funcionamiento y parámetros de transmisión son algunos de los desafíos que se analiza en el siguiente punto y las propuestas que existen para superarlo.

5.2 Aspectos Generales de la Tecnología de Radio Cognitiva

Antes de abordar este tema se debe tener en cuenta que de acuerdo con la Real Academia Española (RAE) Cognitivo pertenece o es relativo al conocimiento [38].

Un Sistema de Radio Cognitiva (CRS) no es un servicio de radiocomunicaciones, sino más bien un sistema que emplea la tecnología que a futuro pueda ser implementada en una amplia gama de aplicaciones en el servicio móvil terrestre. Cabe señalar que cualquier sistema de radiocomunicación o servicio que utiliza la tecnología CRS en una banda de frecuencia dada, funcionará de acuerdo a las disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones y normativas legales que rigen el uso de esa banda [6-7].

Es importante destacar que los sistemas de radio cognitivas son un campo de investigación con aplicaciones asociadas en estudio y ensayo, aún en desarrollo. A continuación se ilustra el concepto de radio cognitiva, Figura 5.3

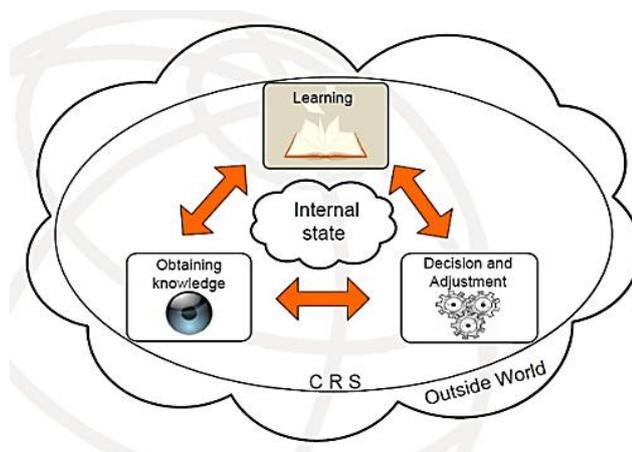


Figura 5.3 Ilustración del Concepto de Sistema de Radio Cognitiva [6]

5.3 Beneficios de la Radio Cognitiva

- Mejora la eficiencia del uso del espectro.
- Tolerancia a fallos y autocorrección.
- Permite la implementación de nuevos sistemas de comunicaciones en zonas afectadas por desastres o en situaciones de emergencia.
- Usando CRS se puede lograr eficiencia energética adicional.
- Permite el potencial desarrollo de aplicaciones de comunicaciones móviles.

5.4 Retos para la Aplicación de la Radio Cognitiva

Las radios WSD deben llegar a ser lo más ágil posible para cambiar la frecuencia de la portadora de funcionamiento, ancho de banda, tipo de

modulación, y potencia transmitida, pero al mismo tiempo deberán poder cumplir con todas las regulaciones y ser tan eficientes como sea posible. De lo contrario, aunque las radios WSD puedan ser un buen experimento académico, no van a intensificar las soluciones comercialmente viables [37].

En la detección del espectro, los receptores de radio WSD deben hacer frente con un gran ancho de banda y lograr capturar señales de diferentes potencias, impulsando a utilizar receptores de radio que trabajen en los límites de ancho de banda y de gama dinámica disponible en el mercado. Esto es por qué deben ser diseñados para aumentar el ancho de banda y el rango dinámico tanto como sea posible, ver Figura 5.4 [37].

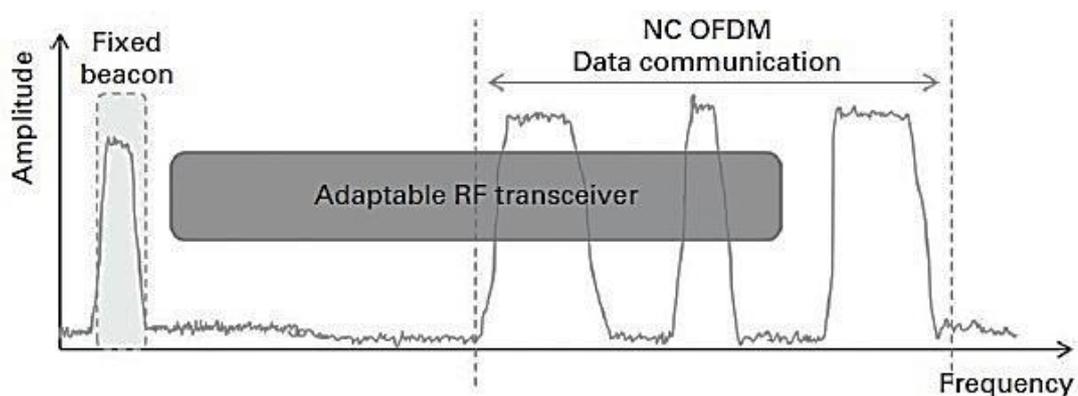


Figura 5.4 Agregación del espectro [36]

El futuro real de la radio cognitiva será algo así como el esquema de la Figura 5.5 [37], que contendrá dos módulos principales: la cadena de radio de detección y el transceptor de radio típica. De este modo, la radio “front-end” de detección trabajará con el algoritmo cognitivo con un procesador que garantizará que el transceptor se adapte para el medio ambiente y reduzca cualquier interferencia con otros WSDs.

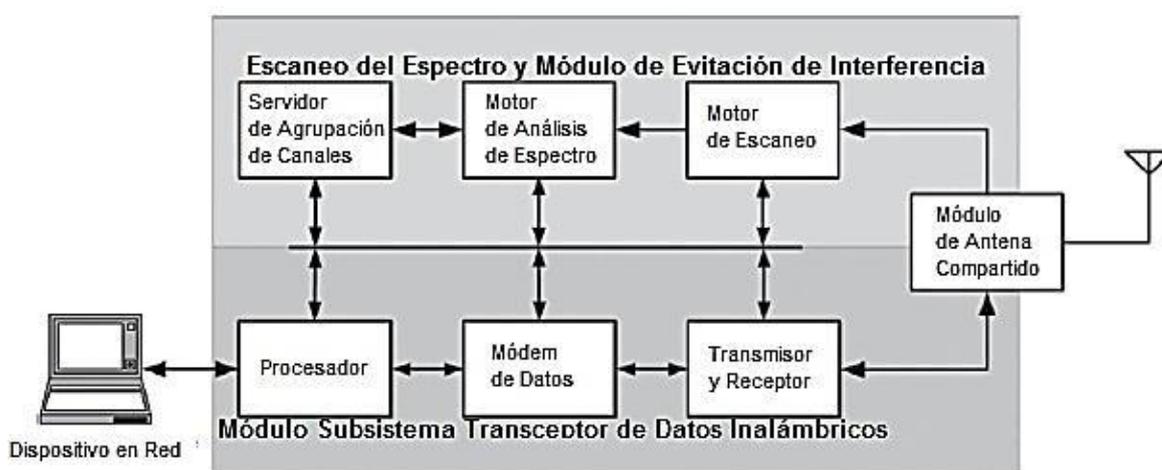


Figura 5.5 Subsistema de Detección [36]

De esta manera, el diseño de receptores de radio WSD con capacidades de exploración en un gran ancho de banda y detección de diferentes niveles de potencia de señal simultánea, se encuentra entre los mayores desafíos para el desarrollo de esta tecnología.

Esto desde el punto de vista electrónico, implica una amplia variedad de componentes de RF en el diseño, tales como una antena con grandes

ganancia, filtro / duplexor, amplificador de potencia (PA), y los circuitos del transceptor los cuales siguen teniendo problemas para conseguir una alta tolerancia contra la interferencia debido a los altos rangos dinámicos involucrados. Los actuales diseños de antena y actuales prototipos son todavía insuficientes en términos de flexibilidad, ancho de banda, rendimiento, así como sus costos, etc, lo cual no ha logrado que se promueva el uso de esta tecnología fuera del ámbito académico.

Un esquema funcional de qué módulos debería contar un sistema receptor radio cognitivo sería algo como la Figura 5.5 [37]. Entre ellos podemos observar dos módulos principales como el módulo de Escaneo del Espectro el cual inspeccionará los espacios en blanco disponibles sin que exista interferencia, y el segundo es un Módulo Transceptor de radio típica que es el que reconfigurará sus parámetros de transmisión y recepción, adaptándose al medio, durante la comunicación.

Lo segundo será logrado gracias al concepto de SDR, software definido por radio, que permitirá el análisis y procesamiento de la señal recibida y transmitida respectivamente.

5.5 Aplicaciones para el Uso de Espacios Blancos del Espectro

En los últimos años, se han realizado una gran cantidad de trabajos de investigación en relación a la tecnología de radio cognitiva. La mayor parte de la investigación se centra en los mecanismos de detección y gestión del espectro, así como en diseños de capa física. Estos estudios han sugerido una serie de casos previstos donde la implementación de la tecnología radio cognitiva es viable, Figura 5.6-7-8 [7-37].

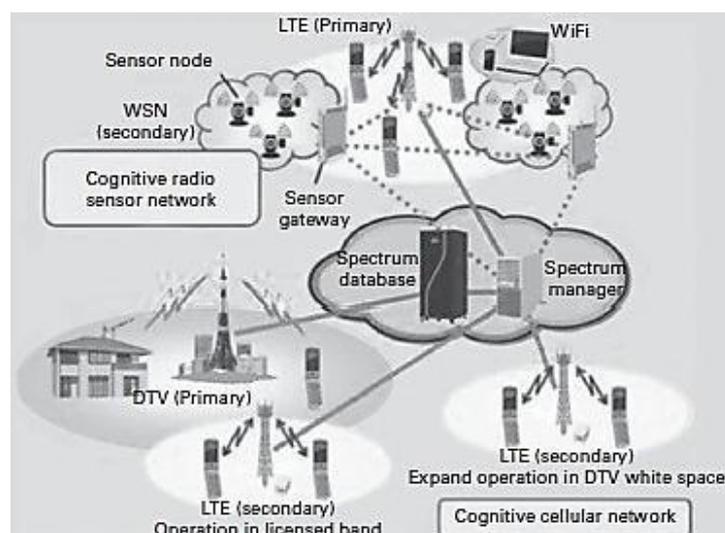


Figura 5.6 Ejemplo de Arquitectura de una Red de Radio Cognitiva y Ejemplos de Uso del Espectro [36]

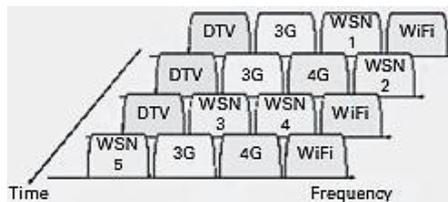


Figura 5.7 Red de Sensores de Radio Cognitiva [36]

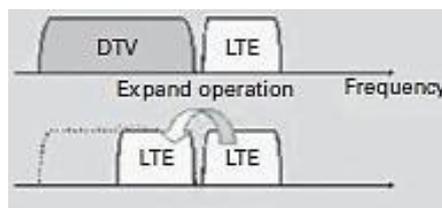


Figura 5.8 Sistema Celular Cognitivo [36]

Las investigaciones en temas de radio cognitiva llegaron a tomar mayor impulso a partir de los resultados de las campañas de medición de la ocupación del espectro (campañas de [4] - [8]) propuestas alrededor del mundo). En estas campañas se evidenció cómo una gran porción del espectro con licencia no se utiliza. Así la radio cognitiva, una tecnología innovadora, se presenta como alternativa revolucionaria que conllevaría cambios en el futuro para la gestión del espectro, proporcionando acceso al espectro no utilizado.

Estos casos revelan cómo en algunas partes del mundo, la implementación de esta tecnología pareciera ser una muy buena oportunidad para mejorar los actuales sistemas de servicio en el lugar o bien aprovechar responsablemente los espacios en blanco y poner en

práctica la gran cantidad de ideas a continuación a detallar. A continuación mencionaremos varias aplicaciones potenciales previstas para ser explotadas en el uso de Acceso Dinámico al Espectro (DSA) con la tecnología de Radio Cognitiva (CR9).

5.6 Escenarios de Aplicación de Radio Cognitiva

5.6.1 Extensión de Sistemas de Comunicaciones Móviles

En este escenario, un operador de telefonía móvil celular pudiera ampliar su señal adicional al ancho de banda licenciado o mejorar su cobertura implementando una picocelda o femtocelda siempre que no interfiere con otros usuarios primarios. Las bandas de frecuencias disponibles pueden ser las bandas de frecuencias licenciadas a otro operador en lugares remotos o en espacios de baja cobertura, valles y hoyas, o la TV luego del apagón analógico.

La disponibilidad de este tipo de bandas de frecuencia se detectaría a través de la exploración del espectro (tanto en las estaciones base y terminales móviles). Este espectro adicional permitía a los operadores móviles obtener anchos de banda adicional para beneficio del usuario, particularmente aquellos que se han visto excluidos de este servicio o facilitar la incorporación de nuevas aplicaciones [37].

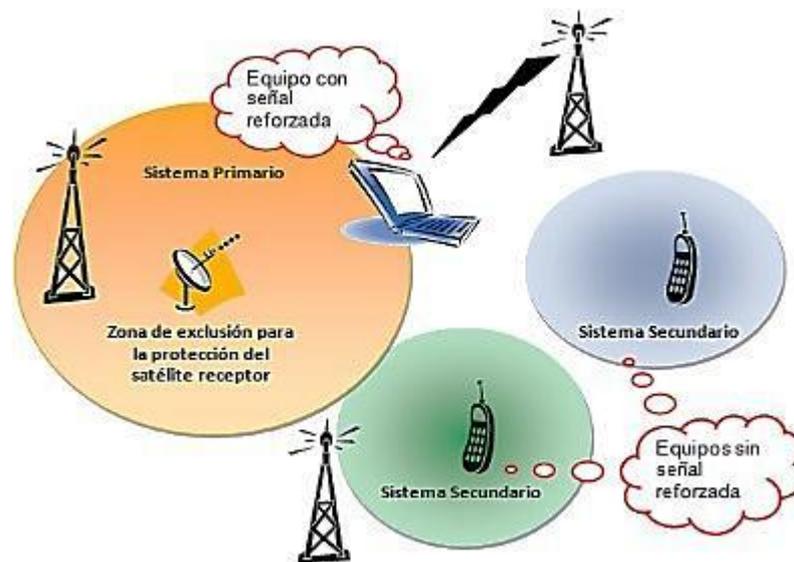


Figura 5.9 Esquema de Extensión de Sistemas de Comunicaciones Móviles

5.6.2 Comunicación Directa Dispositivo a Dispositivo

En este escenario, los terminales se comunican directamente entre sí. Además, los terminales móviles pueden identificar bandas de frecuencia disponibles a través de la detección de espectro o una base de datos y pueden utilizar esas bandas de frecuencias para la transmisión de señales de dispositivo a dispositivo. La aplicación de este escenario está limitado por el rango de transmisión del terminal móvil pero que complementaría el escenario presentado en la subsección 1.5.1 en términos de capacidad total del sistema [37].

5.6.3 Redes Cognitivas ad hoc

Una red ad hoc puede comprender diferentes tipos de nodos. Los nodos son típicamente diferentes terminales de usuario, que contienen algunas funciones de redes y pueden compartir sus recursos, comunicarse entre ellos. También puede incluir nodos de servidores especiales, que se constituyan temporalmente en el campo (en caso de una emergencia red ad hoc) o en el sitio del evento. Una red ad hoc cognitiva debe establecer una conexión a Internet con el fin de cumplir con las necesidades de reglamentación a fin de que pueda ser monitoreado y controlado. Con la falta de una conexión de este tipo, requisitos más estrictos sobre la funcionalidad de detección de espectro deberán ser establecidos. Este escenario incluye típicamente propiedades de mucha interacción, dinamismo, con diferentes nodos y terminales a fin de hacer posible la comunicación. La estructura de una red ad hoc a menudo es plana. Se puede incluir uno o más nodos con acceso a Internet a través de otras redes, pero es posible tener redes aisladas con fines específicos.

La topología puede variar de una red tipo estrella a una tipo malla con cualquier híbrido en el medio. La nodos de una red ad hoc serán típicamente terminales de usuario con alguna funcionalidad añadida

(utilizando sensores por ejemplo), o sólo de tipo retransmisión y reenvío [37].

5.6.4 Servicios de Banda Ancha en Espacios Rurales

Este escenario implica la conectividad inalámbrica a Internet para usuarios domésticos en zonas rurales a través de una estación base que esté transmitiendo en los espacios blancos disponibles en el espectro.

Los usuarios domésticos podrían estar a una distancia de hasta 20 km de la estación base. Se entiende que este escenario tiene altos requerimientos de calidad de servicio a fin de poder ofrecer todos los servicios que internet ofrece (voz, datos y video), por lo tanto como tal presenta algunas limitaciones como por ejemplo el asunto de movilidad, como por ejemplo que sea de uso para los hogares y no alrededor del sector.

Para que se despliegue este sistema en las zonas rurales de mayor tamaño, debe tener la flexibilidad de frecuencia tanto en los dispositivos la estación base como de los usuarios finales [37].

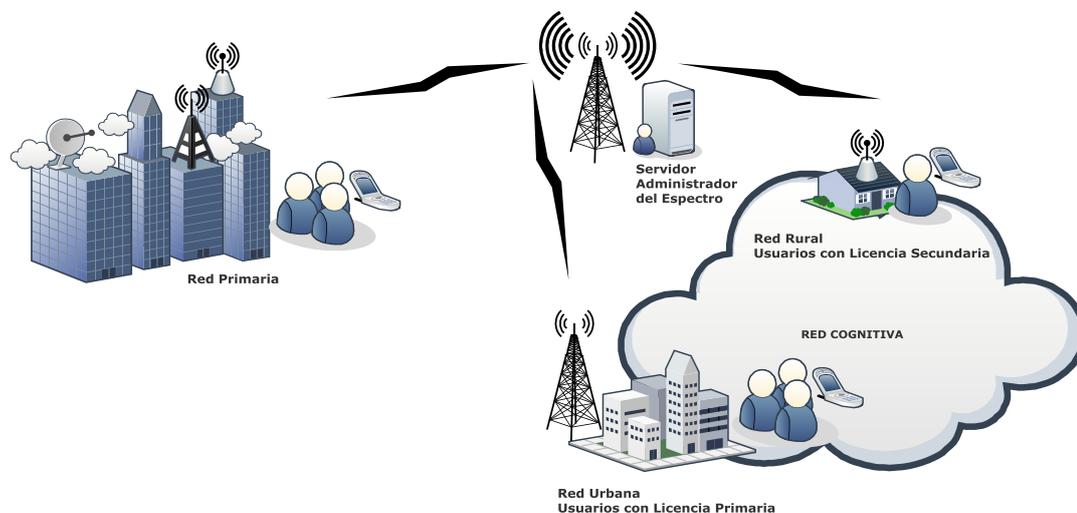


Figura 5.10 Servicios de Banda Ancha en Espacios Rurales

5.6.5 Redes Inteligentes de Sensores Inalámbricos

Este escenario involucra un Sistema de Medición Avanzada (AMI) el cual permitiría la medición y recolección de datos cuantitativos, así como contadores inteligentes, que permitan sensor o calcular niveles de electricidad, gas, calor, entre otras.

La mayoría de estos sistemas consisten de miles de medidores inteligentes, muchos puntos de acceso y una red de malla, que se forma entre los contadores inteligentes para el ruteo de datos utilizando bandas de frecuencia industriales, científicos y médicos (ISM) o en espacios en blanco en caso de que esta

banda se vea comprometida por el ruido electromagnético en la ciudad u otras fuentes de ruido [37].

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Existen muchas limitantes para evaluar de manera más extensa y efectiva el estado real del uso del espectro electromagnético, una de ellas es el rango de la banda asignado para este caso de estudio, el tipo de servicio que se brinda en esta banda, el sector y el tipo de geografía donde se realizaron las mediciones de campo.
2. Para la banda asignada, es claro que a pesar que se consideran normas internacionales de la UIT, es el estado Ecuatoriano quien decide qué tipo de servicios serán los que se concesionan; donde un gran porcentaje de las concesiones locales de frecuencias para la prestación de servicios fijos le corresponden a empresas estatales.

3. Los resultados de la medición de utilización del espectro encontrados a través de las métricas de evaluación establecidas evidencian la detección de sólo el piso de ruido, sin la detección de alguna portadora en el sitio de análisis.
4. Los resultados obtenidos demuestran amplias oportunidades para el desarrollo de la tecnología de radio cognitiva CR, con algunas limitaciones como su legitimidad en los alrededores de la Facultad FIEC del Campus Prosperina.
5. Definitivamente, la Gestión y Administración del Espectro es un tema político de gran impacto económico y social. Una buena administración de la misma, con leyes flexibles, apegados a la realidad de estos tiempos y a la vanguardia con espacios para debatir y analizar qué medidas se están tomando en otras partes del mundo, mejora la calidad de los servicios prestados y la competitividad en el mercado.
6. Durante el desarrollo de este proyecto, se compartió algunos casos de estudio, casos de éxito y diferentes propuestas en torno a posibles soluciones de la tecnología de radio cognitiva como una alternativa para el desarrollo de sistemas más eficientes de compartición del espectro [28, 29]. Entre algunos de los grandes desafíos se encuentra: algoritmos computacionales más eficientes y precisos de detección, el impulso de bases de datos locales que almacene información sobre la ocupación espectral en el sector, entre otras [27].

7. Se espera que la filosofía sobre la compartición del espectro basado en radio cognitiva permitirá el desarrollo de sistemas dinámicos de acceso al espectro como el descrito y recientemente probado experimentalmente en los espacios en blanco de TV analógica [6], una clara muestra que marcaría sólo el comienzo de una vertiginosa aparición de futuras redes inalámbricas basado en radio cognitiva [5, 16]. Mientras que la tecnología de “fullfledged” de detección espectro, aún esta en desarrollo.
8. La tecnología de compartición del espectro basado en bases de datos de espectro de geo-localización dominarán en el futuro cercano.
9. La escasez de espectro radioeléctrico ha obligado a no sólo desarrollar sistemas inalámbricos más eficientes en términos técnicos; sino que se espera reformas en la reglamentación de uso del espectro que posibiliten la aplicación legal de sistemas dinámicos y la implementación de tecnologías de radio cognitiva. En otros países como EEUU, comités de reglamentación del espectro ya vienen analizando posibles medidas [36] para el establecimiento de normas que abran las puertas a la implementación de DSA basadas en radio cognitiva.
10. El uso compartido de bandas libres entre usuarios primarios (con licencia) y usuarios secundarios utilizando acceso dinámico al espectro (DSA) va ganando impulso.

11. Existen algunos estudios experimentales llevándose a cabo en la banda de TV para probar esta tecnología y promover reglamentos que normalicen la implementación sin que afecte la calidad de los servicios.
12. Casos de estudio y éxito ya existen alrededor del mundo. En una publicación COMSOC [37], se implementó algoritmos de gestión del espectro (DSM) en tiempo real, gestionando el tráfico en la radio portadoras utilizadas, detectando la ocupación del espectro para ajustar dinámicamente los parámetros que posibiliten la comunicación de manera eficiente.
13. En esta publicación se describe un esquema de diseño, con sus respectivas limitaciones, y las variables a considerar para la implementación de redes ad hoc móviles (MANETs) utilizando espacios en blanco en la banda de uso militar.
14. Una forma de mejorar la eficiencia del espectro consiste en permitir que un usuario secundario pueda utilizar bandas con licencia cuando el usuario primario está ausente, entre otros mecanismos descritos en el Capítulo 5.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Asamblea Nacional de Ecuador, Ley Orgánica de Comunicación, http://www.asambleanacional.gob.ec/system/files/ley_organica_comunicacion.pdf, fecha de consulta octubre 2014
- [2] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos del Ecuador, Informe rendición de Cuentas, <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/06/Informe-de-Rendición-de-Cuentas-2012.pdf>, fecha de consulta octubre 2014
- [3] S. Ellingson, "Spectral occupancy at VHF: Implications for Frequency agile Cognitive Radios," in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., Dallas, TX, Sep. 2005, vol. 2, pp. 1379–1382.
- [4] UIT, Acerca de la UIT, <http://www.itu.int/es/about/Pages/whatwedo.aspx>, fecha de consulta octubre 2014
- [5] UIT, Manual Comprobación Técnica del Espectro, http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-S.pdf, fecha de consulta octubre 2014
- [6] UIT, Introduction to cognitive radio systems in the land mobile service,

http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2225-2011-PDF-E.pdf,
fecha de consulta octubre 2014

[7] UNAM, Radio Cognitiva,
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/894/A5.pdf?sequence=5>, fecha de consulta octubre 2014

[8] Asamblea Nacional de Ecuador, Ley de Telecomunicaciones,
<http://www.asambleanacional.gob.ec/noticia/concluyo-primer-debate-de-proyecto-de-ley-de>, fecha de consulta octubre 2014

[9] Asamblea Nacional de Ecuador, Informe Primer Debate de Ley de Telecomunicaciones,
<http://ppless.asambleanacional.gob.ec/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/a3dcb421-175d-4b30-a394-0b4039695c49/Informe%20Primer%20Debate%20Tr.%20194205.pdf>, fecha de consulta noviembre 2014

[10] Congreso Nacional de Ecuador, Ley Especial de Telecomunicaciones de Ecuador, Ley 184, Registro Oficial 996 de 10 de agosto 1992, Última Modificación 13 de octubre del 2011

[11] ICT Regulation Toolkit, Introduction to Spectrum Management Overview,
<http://www.ictregulationtoolkit.org/5.1>, fecha de consulta noviembre 2014

- [12] SENATEL Ecuador, Espectro Radioeléctrico,
<http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/espectro-radioelectrico/>,
fecha de consulta noviembre 2014
- [13]UIT, Proyecto de Valoración del Espectro, <https://www.itu.int/ITU-D/finance/work-cost-tariffs/events/tariff-seminars/paramaribo-04/john-prince-spectrum-pricing-model-sp.pdf> , fecha de consulta noviembre 2014
- [14] CCIR, Consejo Consultivo Internacional de las Comunicaciones de Radio, fecha de consulta noviembre 2014
- [15] UIT, Comisiones de Estudios del UIT-R, http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0A/0E/R0A0E0000010001PDFS.pdf, fecha de consulta noviembre 2014
- [16] ICT Regulation Toolkit, Radio Spectrum Management,
www.ictregulationtoolkit.org/en/Section.1247.html, fecha de consulta
noviembre 2014
- [17] Marcelo Ricardo Filián Narvárez, Sistema Automático para el Control del Espectro Radioeléctrico (SACER), SUPERTEL Comprobación Técnica del Espectro, Imprenta Don Bosco, Quito Ecuador, 2013
- [18] UIT-R, Article 1 Terms and Definitions,
<http://life.itu.ch/radioclub/rr/art01.htm>, fecha de consulta diciembre 2014

[19] SENATEL Ecuador, Plan Nacional de Frecuencias,
http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/plan_nacional_frecuencias_2012.pdf,
fecha de consulta diciembre 2014

[20] SENATEL Ecuador, Consulta en Línea de Frecuencias del Plan Nacional de Frecuencias, <http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/consulta-plan-nacional-de-frecuencias/>, fecha de consulta diciembre 2014

[21] CONATEL – SENATEL, Plan Nacional de Frecuencias Ecuador, 2012

[22] <http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/conatel/>, fecha de consulta diciembre 2014

[23] SENATEL Ecuador, Servicios SENATEL,
http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/servicios_senatel/, fecha de consulta diciembre 2014

[24] SUPERTEL Ecuador, <http://www.supertel.gob.ec/>, fecha de consulta diciembre 2014

[25] SUPERTEL, Asignación de Concesiones, fecha de consulta diciembre 2014

[26] J.M. Chapin, W.H Lehr, "Cognitive radios for dynamic spectrum access - The Path to market Success for dynamic spectrum access technology," Communications Magazine, IEEE , vol.45, no.5, pp.96,103, 2007.

[27] F. Granelli, P. Pawelczak, R.V. Prasad, K.P Subbalakshmi, R. Chandramouli, J.A. Hoffmeyer, H.S. Berger, "Standardization and research in cognitive and dynamic spectrum access networks: IEEE SCC41 efforts and other activities," Communications Magazine, IEEE , vol.48, no.1, pp.71,79, 2010.

[28] F. Mekuria, M. Masonta, T. Olwal, "Future networks to enable wireless broadband connectivity in Emerging Economies", Proceedings of EU Future Networks & Mobile Summit, 04-06 2012.

[29] Barnes, S. Daniel, P. A. Jansen van Vuuren, and B. T. Maharaj. "Spectrum occupancy investigation: measurements in South Africa." Measurement 46.9 ,3098-3112, 2013.

[30] Mfupe, Luzango,"Enabling dynamic spectrum access through locationaware spectrum databases." AFRICON, 2013. IEEE, 2013.

[31] Miguel López-Benítez, Fernando Casadevall, Anna Umbert and Jordi Pérez-Romero, "SpainSpectral Occupation Measurements and Blind Standard Recognition Sensor for Cognitive Radio Networks", Department of

Signal Theory and Communications Universitat Politècnica de Catalunya
(UPC) Barcelona.

[32] Elesä Ntuli, Fisseha Mekuria, Selesman Ngwira and Tranos Zuva , “A Review of Dynamic Spectrum Networks Using Cognitive Radio”, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II

[33] RONG YU, “Secondary users cooperation in cognitive radio networks: balancing accuracy and efficiency”, GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY YAN ZHANG, SIMULA RESEARCH LABORATORY AND UNIVERSITY OF OSLO.

[34] Yuhua Xu, Jinlong Wang, Qihui Wu , “A Discrete-time Model for Multichannel Opportunistic Spectrum Access Based on Preempted Queuing”, Institute of Communications Engineering

[35] Seung-Hoon Hwang and Jun-Ho Baek , “Multiple Antenna-Aided Spectrum Sensing Using Energy Detectors for Cognitive Radio”, Dongguk University-Seoul, Korea

[36] Nuno Borges Carvalho, Alessandro Cidonali, Roberto Gómez-García, “White Space Communication Technologies”, Cambridge University Press, 2015

[37] O. Younis, L. Kant, K. Chang, K. Young, C. Graff: Cognitive manet design for mission-critical networks, IEEE Communications Magazine vol. 47, No. 10, pp. 64-71, 2009.

[38] RAE, Cognitivo, <http://lema.rae.es/drae/srv/search?key=cognitivo>, fecha de consulta enero 2015