



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“MODELADO DE LA DISPONIBILIDAD DE CANALES DE LA
BANDA UHF-TV PARA EL USO POTENCIAL DE SISTEMAS
CON ACCESO OPORTUNISTA AL ESPECTRO (OSA) EN UNA
ZONA URBANA”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo la obtención del Título de:

MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

Presentada por:

JORGE LUIS GÓMEZ PONCE

Guayaquil – Ecuador
2015

AGRADECIMIENTO

Agradezco a DIOS en primer lugar por haberme permitido llegar hasta aquí y a todas las personas que me han ayudado e incentivado durante este nuevo reto.

A mis padres, mis colegas de trabajo que dieron sus consejos y apoyo en los momentos difíciles y en especial a mi director de tesis Dr. Francisco Novillo por haberme guiado en el transcurso de este proceso de aprendizaje e inculcado en mí el hábito investigativo y de superación.

Jorge Luis Gómez Ponce.

DEDICATORIA

*A DIOS por ser el pilar de mi existencia,
a mi padre Jorge, mi madre Haydeé, y
mi hermana Jennifer por sus consejos
en cada paso que he dado durante mi
vida.*

*A mis familiares y colegas que
estuvieron pendientes durante el
transcurso de esta etapa. Gracias por
su apoyo incondicional.*

Jorge Luis Gómez Ponce

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Sara Rios, M.Sc.

SUBDECANA DE LA FIEC

Francisco Novillo, Ph.D

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Germán Vargas, Ph.D

PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Trabajo de Titulación me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”. (Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

Jorge Luis Gómez Ponce

RESUMEN

A lo largo de los últimos años, el número de tecnologías y de dispositivos inalámbricos han crecido de tal forma que ahora existen más dispositivos que personas. Estos factores en conjunto generan un consumo excesivo del espectro radioeléctrico asignado para estas tecnologías, el cual conlleva a una escasez del recurso radio. Ejemplos de este hecho son las redes WLAN y celulares, que actualmente han acaparado la mayoría de los hogares debido a los grandes beneficios que este ofrece, sin embargo el gran número de usuarios que usan este tipo de redes hace que el espectro se congestione, y consecuentemente genera problemas en la calidad de servicio de estas tecnologías. Esta problemática ha dado pie para el estudio de tecnologías con acceso oportunista al espectro, las cuales monitorean el recurso radio que se encuentra disponible a su alrededor para luego usarse sin interferir con los usuarios primarios (usuarios licenciados) de la banda. Para el desarrollo de este tipo de tecnologías, es necesario conocer y modelar la disponibilidad del espectro con el objetivo de determinar los segmentos de espectro disponibles para el uso de tecnologías con OSA.

En el presente trabajo, se propone el estudio de disponibilidad de la banda de TV-UHF en una zona urbana durante una semana con miras a la implementación de tecnologías con acceso oportunista al espectro. Los resultados muestran que el esquema propuesto permite modelar y cuantificar

los segmentos de espectro disponibles para el escenario indoor propuesto. En resumen, se pudo determinar que el escenario ofrece una disponibilidad que oscila entre 90 y 114 MHz con un 87.11% de probabilidad de ocurrencia. Otro resultado importante, es la determinación del tiempo disponible por canal para la transmisión el cual dependiendo del canal entre pocos segundos (e.g 3.2 s) y varias horas (18 h, 47 min y 21.6 s). Por consiguiente, el modelo pudo ajustarse a las características de los diferentes tipos de canales.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ABREVIATURAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
INTRODUCCIÓN	xvii
Capítulo 1	1
1.1 Identificación del Problema.-.....	1
1.2 Justificación.-	3
1.3 Solución Propuesta.-.....	6
1.4 Objetivos de la tesis.-.....	6
1.4.1 Objetivos Generales.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos	7

1.5	Esquema de la tesis.-	7
1.6	Metodología.-.....	10
1.7	Alcance.-.....	11
Capítulo 2		13
2.1	Sistemas de Acceso Dinámico al Espectro (DSA).-.....	16
2.2.1	Acceso Oportunista al Espectro.-.....	23
2.2.2	Espacios en Blanco de TV (TVWS).-	26
2.3	Sistemas de TV usados en el Ecuador.-.....	27
2.3.1	Estándar Analógico de señal abierta de TV en Ecuador.-.....	28
2.3.2	Estándar Digital de señal abierta de TV en Ecuador.-.....	30
2.3.3	Espectro Radioeléctrico atribuido al servicio de señal abierta de TV en Ecuador.-	32
2.4	Diversos casos de uso de modelado de canal.-	34
2.4.1	Modelos Temporales.-.....	35
2.4.2	Modelos Estadísticos.-	37
2.4.3	Modelos de Markov.-.....	38
2.4.4	Modelos de Regresión Lineal.-.....	39
Capítulo 3		41
3.1	Descripción general del escenario.-.....	42

3.2	Condiciones de Interferencia para reuso de Canal.-.....	44
3.3	Modelamiento Matemático Propuesto.-	46
3.3.1	Modelamiento estocástico de datos.-	46
3.3.2	Modelo Predictivo Markoviano de predicción de estado propuesto.-	52
Capítulo 4	56
4.1	Descripción general del proceso de medición.-	57
4.1.1	Etapa de antena.-.....	59
4.1.2	Etapa de Radiofrecuencia y Captura.-	59
4.1.3	Etapa de Control.-	60
Capítulo 5	64
5.1	Configuración del Sistema.-	64
5.1.1	Localización geográfica y duración de la medición.-	65
5.1.2	Parámetros de Configuración.-	67
5.2	Análisis de datos del Escenario	68
5.2.1	Análisis temporal de los datos.-	69
5.2.2	Modelamiento estocástico de los datos.-	77
5.2.3	Modelo Predictivo Markoviano en base a los datos.-	82
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84

ANEXOS.....	86
BIBLIOGRAFIA.....	96

ABREVIATURAS

BS:	Estación Base
BW:	Ancho de Banda
FCC:	Federal Communications Commission
G:	Ganancia del amplificador
G _{ANT} :	Ganancia de la antena
L _c :	Pérdidas por cables
L _{cc} :	Pérdidas por conectores
λ :	Umbral de detección
M:	Margen de interferencia
NTSC:	Comité Nacional de Servicio de Televisión
OSA:	Acceso al espectro de manera oportunista
OSAN:	Redes de Acceso Oportunista al Espectro
P _N :	Nivel del ruido
P _R :	Potencia del analizador espectral
P _{R-ANT} :	Potencia real a la entrada de la antena
SDR:	Radio definido por Software
TDT:	Televisión Digital Terrestre

UHF:	Ultra High Frequency
USRP:	Universal Serial Radio Peripheral
VHF:	Very High Frequency

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema de Tesis:	9
Figura 2-1: Clasificación del Acceso Dinámico al Espectro [6]	17
Figura 2-2: Espectro bajo el nivel del ruido	21
Figura 2-3: Espectro sobre el nivel del ruido.....	22
Figura 2-4: Arquitectura de Red [8].....	24
Figura 2-5 Espacios en Blanco [8]	27
Figura 3-1: Escenario Urbano con gran concentración de edificios	42
Figura 3-2: Proceso de Sensado de Espectro	43
Figura 3-3: Vista Lateral del Escenario	44
Figura 3-4: Función de densidad de probabilidad de la potencia recibida	48
Figura 3-5: Diagrama de Transición de una Cadena Markoviana de Tiempo Discreto.....	53
Figura 4-1: Sistema de Medición	57
Figura 4-2: Diagrama de Bloques del sistema de medición.....	58
Figura 4-3: Etapa de Control.....	61
Figura 5-1: Localización del Escenario de Estudio	65
Figura 5-2: Perfil de Propagación del Escenario.....	66
Figura 5-3: Niveles de Potencia en la banda UHF-TV (Planta Baja).....	71
Figura 5-4: Niveles de Potencia en la banda UHF-TV (Azotea).....	72

Figura 5-5 Disponibilidad temporal de los canales de la banda UHF-TV en la planta baja	75
Figura 5-6 Disponibilidad Temporal de los canales de la banda UHF-TV en la azotea	76
Figura 5-7 Número de canales disponibles al mismo tiempo.....	77
Figura 5-8 Modelamiento Estadístico de la disponibilidad de canales de la banda UHF-TV en la planta baja.....	79
Figura 5-9 CDF de la disponibilidad de canales de la banda UHF-TV en la azotea	81
Figura 5-10 Modelado de tiempo de disponibilidad de espacios en blanco en la planta baja	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros del estándar NTSC	30
Tabla 2 Bandas asignadas para los sistemas de Televisión en Ecuador	33
Tabla 3 Ciclo de Trabajo de diferentes bandas	35
Tabla 4: Pseudocódigo de Captura.....	63
Tabla 5: Parámetros de configuración	67
Tabla 6 Tabla de Canalización de las bandas asignadas a los sistemas de Televisión en Ecuador	90
Tabla 7 Estaciones de Televisión Analógica asignadas en el Ecuador	92
Tabla 8 Estaciones de Televisión Digital asignadas en el Ecuador	93
Tabla 9 Prueba Kolmogorov Smrinov con confiabilidad del 99.9%.....	94
Tabla 10 Tiempo de disponibilidad máximo por canal	95

INTRODUCCIÓN

La proliferación de dispositivos inalámbricos ha generado un incremento en el espectro usado por los mismos, no solo por el gran número de dispositivos activos, sino también por los recursos requeridos para su correcta operación, consecuentemente los canales asignados para la operación de estos dispositivos han tenido que ser ajustados para cumplir con los requerimientos antes expuestos [1],[2]. Sin embargo, la rigidez de los esquemas de asignados en la actualidad no permiten el desarrollo de nuevas estrategias para asignar dinámicamente el espectro, por consiguiente existen escenarios con canales congestionados debido a la escasez de canales [3]. Por ejemplo, en las redes celulares, el tráfico generado por los usuarios puede incrementarse de forma repentina debido a eventos no programados, inclusive pueden llegar a niveles que superen la capacidad ofrecida por los recursos asignados a la estación base, esto puede generar falta de recursos y elevados niveles de interferencia, los cuales pueden desencadenar fallas en los servicios ofrecidos [4].

Otro ejemplo son los dispositivos WLAN, la gran cantidad de dispositivos existentes generan incontrolables niveles de interferencia que causan reducción de cobertura y calidad de servicio [5]. Las soluciones actuales para resolver este problema están enfocadas en el reuso de recursos radio asignado a cada sistema, por ejemplo el despliegue de celdas de cobertura pequeña en el caso de redes celulares o el uso de mecanismos de

reasignación automática de canales para Wi-Fi. Sin embargo, este tipo de soluciones se han dificultado a causa de la escasez del espectro asignado a cada tecnología.

Por otra parte, el acceso oportunista al espectro (OSA, por sus siglas en inglés) aparece como una solución distinta para resolver los problemas expuestos con antelación. Los dispositivos con OSA pueden buscar segmentos no usados de bandas licenciadas (i.e White Spaces) para ser explotados de una forma oportunista por usuarios no licenciados (i.e usuarios que no tienen concesión de uso de la frecuencia), con la consigna de no interferir con los usuarios licenciados o primarios de la banda [6],[7],[8].

En este contexto, los estudios explicados están enfocados en análisis teóricos y experimentales, con el objetivo de medir la disponibilidad de canales en ambientes exteriores e interiores. En los Estados Unidos se desarrolló un estudio teórico con el objetivo de determinar la cantidad de WS existente en el territorio nacional, para lo cual se utilizaron umbrales predefinidos, radio de protección respecto a las emisoras de TV y un modelo de propagación Longley-Rice [9],[10]; Shinomura *et al* realizaron un estudio teórico en Japón donde se establecieron radios de protección en los sistemas de transmisión de TV ($41 \text{ dB}\mu\text{V} / \text{m}$), lo cual redujo la interferencia de los sistemas que usan TVWS con los usuarios que poseen concesión de la frecuencia, adicionalmente el modelo ITU-R P.1546 fue utilizado para determinar la cantidad de WS disponibles en todo el escenario de estudio [11]. De la misma

forma, Mahonen *et al* mostraron un estudio teórico de densidad de WS en múltiples países europeos, para lo cual usaron expresiones que permitieron identificar el mínimo valor de potencia requerido por los receptores de TV tanto analógicas como digitales, esto junto con modelos de propagación como Longley-Rice y el ITU-R P.1546, permitieron determinar las zonas en las cuales se aprovecharía al máximo el uso de WS, debido a la gran población existente en dichas demarcaciones territoriales [12].

En [13], se desarrolló un método novedoso el cual en base a herramientas matemáticas bien conocidas como Cadenas Markovianas y Funciones de Probabilidad, permitieron no sólo cuantificar sino modelar la disponibilidad de espacios en blanco en diferentes segmentos de espectro, como TETRA, DECTS, GSM, entre otros.

Por último, en [14] se desarrolló un estudio teórico orientado a escenarios indoor de edificios dentro de zonas urbanas, para lo cual se establecieron condiciones de interferencia y modelos de propagación para los diferentes tipos de sistemas que existen en el escenarios, esto en conjunto con el uso de umbrales de potencia definidos permitieron encontrar una relación entre la disponibilidad de un canal y del piso en el cual se desarrollaron las mediciones. Estos resultados fueron importantes ya que da la posibilidad de encontrar WS en el interior de edificios en escenarios urbanos.

A diferencia de los trabajos anteriores en el presente trabajo se propone un estudio experimental que permita modelar matemáticamente la disponibilidad

de espectro en cierta banda licenciada de frecuencia (e.g. Sistemas de Radiodifusión), dentro de edificaciones y en una zona urbana densa. Se tomará en cuenta el comportamiento de cada canal considerando su potencia, y disponibilidad temporal y espacial.

Para lo cual, es necesario establecer condiciones de interferencia que permitan definir la disponibilidad de canal, es decir, reglas que permitan determinar si cierto canal está disponible u ocupado y que en caso de uso oportunista no cause problemas de interferencia a los usuarios primarios, ya que la disponibilidad no sólo depende del comportamiento temporal del nivel de potencia recibido sino a su vez también puede ser afectado por el lugar o escenario en donde se encuentre, en este caso en una zona urbana la señal es afectada por paredes, ventanas y/o puertas que mitigan la señal dentro de una edificación, lo cual daría la oportunidad que en ciertos pisos del edificio existieran WS. Esto en conjunto a herramientas matemáticas y teoría de probabilidades, tales como cadenas de Markov, permitirán modelar el comportamiento de cada canal de manera que se pueda determinar la posibilidad de que un canal esté disponible o no en espacio y tiempo.

Con el objetivo de realizar este proceso, un conjunto de dispositivos de radio definida por software se han desplegado en el interior de cierta edificación de manera que permita realizar mediciones de espectro de acuerdo a las condiciones de disponibilidad, para así ser modeladas matemáticamente.

En el capítulo 1 se establecerán los objetivos de la tesis, el alcance y la metodología utilizada, en el capítulo 2 se detallara un estado del arte respecto a los tópicos que abarca la tesis, junto con trabajos científicos previos. En el capítulo 3 se describirá el escenario en el cual se desarrollará la experimentación, las condiciones de interferencia para determinar WS y el modelado matemático a usarse, después en el capítulo 4 se describirá el sistema de captura implementado y el algoritmo utilizado para la adquisición de los datos. Por último en el capítulo 5 se muestran los resultados experimentales del modelo planteado, y luego se colocan las conclusiones y anexos.

Capítulo 1

1. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

1.1 Identificación del Problema.-

Hoy en día las tecnologías de acceso inalámbrico representan una de las principales vías de acceso a servicios de Internet, especialmente en zonas urbanas donde se han realizado densos despliegues de estos dispositivos [1],[2].

En este contexto, la alta concentración de dispositivos puede causar problemas de congestión en las bandas de operación y deteriorar la calidad del servicio ofrecido por estas tecnologías de acceso inalámbrico. Por ejemplo,

en sistemas que usan bandas licenciadas como los celulares, a pesar de tener un uso exclusivo de las bandas, en ocasiones se dan casos no programados de altas concentraciones de usuarios que exceden la capacidad para la cual fue diseñada la red provocando insuficiencia de canales o niveles elevados de interferencia que por ende causan fallos en la oferta del servicio [4]. Por otro lado, los sistemas que operan en bandas no licenciadas (e.g. ISM) hacen uso de estas de manera compartida; esto junto al hecho de la no existencia de una coordinación en la instalación de dispositivos inalámbricos, está causando que los niveles de interferencia entre dispositivos se incrementen drásticamente provocando efectos como el aumento de la latencia, reducción de la cobertura y la disminución de la velocidad de conexión, entre otros [5].

Las problemáticas antes mencionadas junto a la escasez de espectro para la implementación de nuevas tecnologías de acceso inalámbrico, dan pie para buscar nuevas alternativas de explotación del espectro radioeléctrico [6].

En conclusión, tanto para sistemas con bandas licenciadas o no licenciadas, el elevado número de dispositivo y los despliegues descoordinados de estas tecnologías pueden generar problemas de congestión e interferencia en sus bandas de operación, lo que a su vez podría derivar en problemas de operatividad y calidad de servicio que recibe el usuario [1],[4].

1.2 Justificación.-

Actualmente se han introducido nuevos paradigmas para el uso del espectro, este es el caso de los sistemas con Acceso Oportunista al Espectro (OSA, por sus siglas en inglés) [6] los cuales plantean un uso más eficiente del espectro radioeléctrico, permitiendo a usuarios de sistemas de bandas no licenciadas acceder a segmentos de espectro en bandas licenciadas, siempre que éstos no afecten el funcionamiento de los sistemas que operan en banda licenciada. El concepto de OSA abarca múltiples tipos de tecnologías, las cuales permiten el desarrollo de dispositivos con estas características. Sin embargo, la tecnología más reconocida que permite el desarrollo de sistemas con capacidades OSA es la Radio Cognitiva (CR) [8], la cual posee la habilidad de compartir un canal inalámbrico con usuarios licenciados de una manera oportunista.

Para gestionar dispositivos con capacidades OSA, es necesario realizar un sensado previo del espectro radioeléctrico con la finalidad de detectar posibles espacios en blanco "White Spaces", en los cuales el dispositivo puede aprovechar para transmitir la información [15].

Estos espacios se han buscado por múltiples bandas, sin embargo una de las bandas que más ha sido tomada en consideración es la de TV debido a sus excelentes propiedades de propagación. A este factor se agrega el proceso actual de cambio de TV analógica a TV digital; lo cual ha dado como resultado

que esta banda ofrezca algunos espacios en blanco, que pueden ser aprovechados por dispositivos con OSA.

Al respecto, se han realizado múltiples estudios espectrales en diferentes países como Estados Unidos [10], Japón [11], India [15], Alemania [12], entre otros, donde se han realizado múltiples campañas de medición de espectro. Las mismas, que tienen como objetivo determinar qué bandas están siendo subutilizadas para así poder aprovecharlas mediante el uso de tecnologías actuales, es decir determinar la disponibilidad temporal del espectro (WS). Dichos estudios mostraron que una de las bandas que ofrecía mayores oportunidades era la banda de TV, debido a factores como el cambio de TV analógico a TV digital, entre otros; sin embargo, a nivel de Latino América, estos estudios son pocos y a nivel de Ecuador escasos.

Otro tipo de análisis desplegado en base a mediciones espectrales es el tipo estadístico, en el cual no sólo se limita a la detección temporal sino a un modelamiento más avanzado con miras a determinar probabilísticamente la disponibilidad de WS. En [18], se observa un estudio en el cual a través de Cadenas de Markov se modela el acceso oportunista al espectro para un sistema con estaciones móviles, este modelo permitió al sistema mantener su tasa de transmisión de datos en un 88.71%, lo cual no degrada su tasa nominal de transmisión.

No obstante, la mayoría de los estudios realizados se los ha hecho a nivel nacional, o rural. A nivel urbano se han realizado pocos estudios y muchos de

ellos no toman en cuenta la disponibilidad espacial. En [14], se puede observar un estudio teórico de disponibilidad espacial de un canal de la banda UHF en una zona urbana densa, se puede observar que en los pisos superiores de los edificios la disponibilidad es casi nula; en el caso de la planta baja se observa disponibilidad, la misma que varía dependiendo de cuantos pisos tenga el edificio.

Por lo tanto, la elaboración de estudios de disponibilidad del espectro ya sea determinísticos o probabilísticos con el objetivo de encontrar WS son necesarios, ya que son el principal insumo OSA en una zona geográfica. En el caso particular de una zona urbana, es necesario contemplar el efecto combinado de la disponibilidad temporal y espacial, lo cual permitirá determinar con mayor exactitud la disponibilidad de WS.

Con este antecedente, y recalcando el hecho de que este tipo de estudios no se han realizado en Latinoamérica y en especial en Ecuador, en el presente trabajo se propone realizar un estudio de disponibilidad de WS en la banda UHF-TV para un futuro despliegue de sistemas con OSA en Ecuador. En particular, el estudio es desarrollado en una zona urbana de la ciudad de Guayaquil, donde se pretende realizar un monitoreo y modelamiento temporal-espacial del espectro radioeléctrico.

1.3 Solución Propuesta.-

Como fue explicado en el apartado anterior, el mal uso del espectro junto a la sobre demanda de ancho de banda por parte de los usuarios ha desencadenado una voraz búsqueda por estrategias para poder gestionar las frecuencias asignadas, mejorar la calidad de la transmisión y suministrar el suficiente ancho de banda para sistemas de telecomunicaciones de última generación.

Por tal motivo, se propone el estudio y modelamiento de los segmentos vacíos de la banda de UHF-TV en una zona urbana con el objetivo de determinar qué capacidad de espectro se podría suministrar para un futuro despliegue de sistemas que puedan hacer uso de estos espacios de manera oportunista.

1.4 Objetivos de la tesis.-

1.4.1 Objetivos Generales

- Modelar la disponibilidad de los canales de la banda UHF-TV mediante cadenas de Markov para el uso potencial de sistemas con acceso oportunista al espectro en una zona urbana.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar algoritmos de configuración de los equipos de medición para el sensado de canales de la banda UHF-TV
- Medir los niveles de potencia de los canales de la banda UHF-TV en una zona urbana (en interiores y exteriores).
- Determinar la disponibilidad de los canales de la banda UHF-TV en una zona urbana para la detección de espacios en blanco.
- Determinar el modelo de predicción de disponibilidad de los canales de la banda UHF-TV basado en cadenas de Markov.

1.5 Esquema de la tesis.-

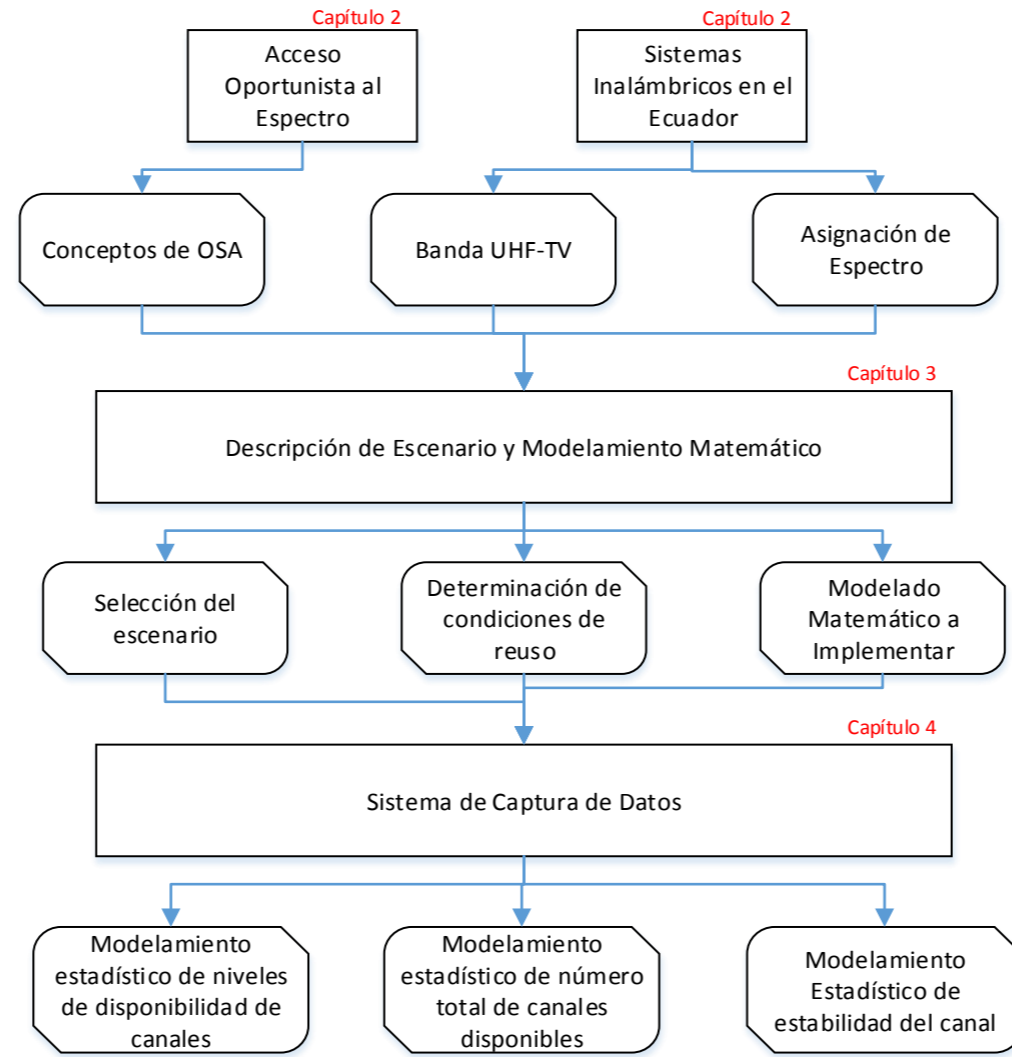
La tesis se estructura como se muestra en la Figura 1.1, la misma que describe el proceso por el cual se observa el resultado que ofrece cada capítulo y cómo este ayuda al desarrollo del siguiente. Es decir, cómo los tópicos de cada capítulo interactúan entre sí, como miras a cumplir los objetivos antes descritos. El capítulo 2 permite establecer los conceptos elementales y necesarios para poder plantear el problema. Tópicos como los sistemas de acceso dinámico al espectro (DSA), acceso oportunista al espectro (OSA), entre otros son tratados con miras a describir correctamente el marco teórico de los sistemas de telecomunicaciones del cual se habla en el proyecto. Sin

embargo, adicionalmente a los temas antes mencionados, se dará una introducción a los sistemas de telecomunicaciones en el Ecuador, haciendo un especial énfasis a los sistemas de Telefonía Celular, Redes de Área Local y TV en los ámbitos técnico y regulatorio.

El capítulo 3 toma los conceptos analizados en el capítulo 2, para poder establecer los lineamientos del escenario de estudio, el cual es una zona urbana densa. De la misma forma se describirán las condiciones de interferencia necesarias para poder identificar el estado del canal y por último se detalla explícitamente el modelo matemático planteado.

En el capítulo 4, tomando como referencia el escenario descrito en el capítulo anterior, se procederá a describir detalladamente el proceso de captura, el cual permitirá monitorear la potencia recibida en canal y con qué frecuencia se hará dicha medición. Por último en el capítulo 5 se realizará el análisis de los datos obtenidos a través del sistema descrito en el capítulo 4, el cual permitirá comprobar la fiabilidad del modelo matemático propuesto en 3. Por último, se presentarán las debidas conclusiones respecto al estudio y en ANEXOS se colocarán los algoritmos usados para la captura y procesado de la señal junto con las tablas referentes a la comprobación por medio del modelado a través del criterio de Kolmogorov-Smirnov.

Figura 1-1 Esquema de Tesis:



1.6 Metodología.-

La metodología del proyecto comienza con el desarrollo de un algoritmo de configuración que permita la medición de canales de la banda UHF-TV. El equipo de medición en el cual será implementado este algoritmo será una Radio Definida por Software (SDR por sus siglas en inglés), la cual medirá y almacenará los niveles de potencia de la banda antes mencionada en 2 escenarios distintos (interior y exterior).

Dada esta información, el siguiente paso es determinar la disponibilidad temporal de los canales, la cual permitirá conocer el comportamiento promedio y la variación de los mismos.

A través de dicho análisis se procederá al modelado estadístico mediante gráficas de función de densidad de probabilidad y función de densidad acumulada (PDF y CDF respectivamente), usando como base estándares establecidos por la ITU (International Communications Union) para establecer los márgenes de interferencia y ruido de canal. Y para poder comprobar su validez se utilizará la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS Test), la cual determinará si la distribución es válida o no.

Como último paso, se utilizarán los datos obtenidos del análisis estadístico de los canales de la banda UHF-TV para la formulación y creación de las cadenas

de Markov para cada canal de la banda, lo cual a su vez permitirá realizar el modelamiento final de todo el segmento de espectro UHF-TV.

Para poder comprobar si los datos obtenidos empíricamente corresponden al modelo Markoviano, se realizará una simulación de las cadenas de Markov usando el software MATLAB, donde se configurará un algoritmo el cual permite obtener datos de la cadena de Markov de los cuales se obtendrán los tiempos de disponibilidad y de ocupación y por ende estos resultados sean contrastados con los datos reales obtenidos por la captura inicial utilizando el estimador de error cuadrático medio.

1.7 Alcance.-

El alcance del presente proyecto es grande, debido a sus múltiples aplicaciones en el mercado actual y condiciones.

A través de esta investigación se pueden extrapolar nuevas investigaciones para el desarrollo de sistemas inteligentes de acceso oportunista al espectro, especialmente debido a que este tipo de investigaciones no se han realizado en el país.

Adicionalmente, a través del análisis de la disponibilidad se puede diseñar sistemas de coberturas a nivel de pico y femtoceldas, como Wi-Fi, 4G ó 3G, los cuales pueden ser usados en ambientes indoor. Por último, a través de este tipo de tecnologías, se pueden desarrollar sistemas de Green

Communications, debido al hecho de que se usan frecuencias menores y por lo tanto la potencia que se necesita es menor.

De la misma manera, conociendo la problemática, los objetivos del proyecto y el alcance definidos; es necesario tener un previo conocimiento teórico de las tecnologías implicadas y la normativa que actualmente rige en Ecuador, por motivo de conocer el ambiente en el cual se desarrollará la investigación.

Capítulo 2

2. ESTADO DEL ARTE

Las telecomunicaciones hoy en día han sufrido cambios de una manera vertiginosa. Tecnologías han ido apareciendo y desapareciendo a través del tiempo y como consecuencia por cada de una de ellas existen millones de equipos que usan dichas tecnologías. Las nuevas tecnologías tienen nuevos requerimientos los cuales deben ser satisfechos para un óptimo desarrollo de los mismos en términos de calidad de servicio hacia el cliente.

A pesar del hecho de que las tecnologías han ido cambiando constantemente, las asignaciones del espectro se han mantenido fijas durante mucho tiempo. Los organismos gubernamentales se han encargado de distribuir las bandas

de frecuencias de acuerdo a las necesidades tecnológicas de cada sistema, es decir las concesiones para frecuencias de Radiodifusión y Televisión.

Según estudios realizados a nivel de países [10],[11],[12], se ha observado que la disponibilidad del espectro radioeléctrico no es homogénea, ni eficiente, debido a que no se adapta a las nuevas tendencias tecnológicas que actualmente existen en el mercado. Por tal motivo, podemos ver algunas zonas del espectro, por ejemplo las bandas ISM, están congestionadas por el gran número de usuarios que estas poseen, especialmente en zonas urbanas donde la concentración de las mismas es extremadamente grande [5]. Otro ejemplo muy común es el caso de las redes celulares, debido a que para poder ofrecer un mejor servicio estas redes necesitan consumir más ancho de banda [4], y si a esto aumentamos el efecto de la cantidad de usuarios de este servicio, podemos concluir que este servicio en casos extremos podría colapsar.

En general, el mayor factor que conlleva al uso ineficiente del espectro es el esquema de concesión de frecuencias en sí. Durante mucho tiempo se ha gestionado la asignación del espectro usando el modelo de comando y control, donde el espectro concesionado no usado no puede ser reutilizado por otros sistemas secundarios no licenciados que necesitan de esas bandas. Debido a este esquema fijo e inflexible, los sistemas inalámbricos están confinados a usar ciertas bandas de operación y no pueden cambiar a otra banda aun cuando la misma se encuentre desocupada [8].

El derecho de acceder al espectro es definido comúnmente por aspectos como frecuencias, espacio (cobertura), potencia de transmisión, empresa con la concesión, tipo de uso y duración de la concesión. Normalmente, cada banda de espectro es concesionada a una sola entidad, la cual puede usar el espectro adquirido bajo los términos del contrato establecido con el ente regulador local. Y más aún, la concesión no permite el cambio de tipo de uso o el beneficiario de la misma. Sin embargo, dado esta asignación de bandas de espectro, se encontró que las bandas no son usadas al 100%, esta situación dió lugar a la aparición de los Espacio en Blanco (White Spaces)

Dado los hechos antes expuestos es necesario cambiar el paradigma de uso de espectro, de uno de asignación fija a una asignación dinámica, con el objetivo de usar de forma más eficiente el espectro radioeléctrico de tal forma que se pueda mejorar la eficiencia de los sistemas.

Dentro del ambiente de asignaciones dinámicas, es necesario considerar al acceso oportunista al espectro (OSA), el cual es una técnica basada en mecanismos de radio cognitiva (CR), donde se permite que usuarios que no tienen concesión en la banda (usuarios secundarios) puedan acceder a la misma, con la consigna de no causar niveles de interferencia superiores a los rangos establecidos por el sistema concesionado, en otras palabras que no entorpezca el desempeño del sistema que tiene la concesión [19]. A través de este concepto es posible mejorar el manejo del espectro debido a que permite

distribuirlo de una forma más eficiente dependiendo del uso del mismo, esto conllevaría a una mejora en el problema de escasez espectral [20].

2.1 Sistemas de Acceso Dinámico al Espectro (DSA).-

El espectro radioeléctrico en Ecuador es considerado un recurso natural renovable pero limitado. Este recurso es administrado por los entes reguladores bajo ciertos criterios, los cuales son algunas veces adoptados de normas internacionales o pueden basarse en necesidades locales de la población. Sin embargo, actualmente este tipo de políticas de asignación de espectro son ineficientes ya que no responden a las demandas tecnológicas actuales que necesitan la sociedad [3][20]. Debido a este factor, algunos entes reguladores de las telecomunicaciones realizaron planteamientos a la forma cómo se asigna el espectro. En 2013, OFCOM (Reino Unido) [21] mostró un análisis detallado de la disponibilidad de espectro en la banda UHF-TV con miras a poder determinar la existencia de Espacios en blanco (White Spaces), o lapsos de tiempo donde el espectro no es usado., en general el resultado mostrado por el informe del OFCOM indicó que al menos existen 30 canales (240 MHz) disponibles para el desarrollo de nuevas tecnologías, es decir casi el 75% de la banda se encuentra disponible. Este hecho se produjo debido al cambio de televisión analógica a digital, lo cual permitió la liberación de dichas bandas. De la misma forma, en Estados Unidos [9],[10], el Comité Federal de

Comunicaciones (FCC) realizó un estudio y planteó la idea de cambiar el paradigma de gestión y manejo del espectro radioeléctrico, por motivo de aprovechar este recurso de una forma más eficiente y ajustarlo a las necesidades de los sistemas de telecomunicaciones inalámbricos actuales. Debido a esto la comunidad científica presentó diversas ideas ante el llamado propuesto por la FCC. Por tal motivo, se realizó el primer Simposio de la IEEE en Nuevas Fronteras en Redes con Acceso Dinámico al Espectro (DySPAN). En el DySPAN se plantearon nuevas estrategias que pueden ser categorizadas en 3 modelos. Los mismos se encuentran especificados en la Figura 2.1 a continuación.

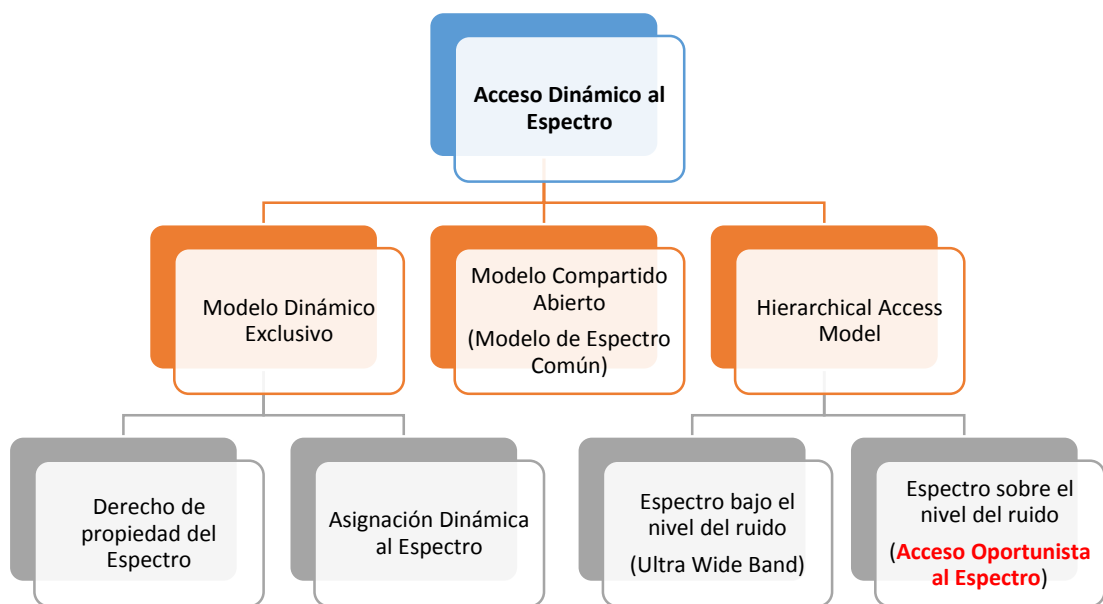


Figura 2-1: Clasificación del Acceso Dinámico al Espectro [6]

Modelo Dinámico de Uso Exclusivo

Este modelo mantiene la base de las políticas de asignación fija. Es decir, las bandas de espectro son concesionadas a los operadores, tecnologías para uso exclusivo, pero con cierto grado de flexibilidad con el objetivo de mejorar la eficiencia espectral. Bajo este esquema, 2 diferentes enfoques se pueden distinguir, los cuales son:

Derechos de propiedad del espectro.- Permite a los usuarios concesionados alquilar o subcontratar ciertas porciones del espectro asignado a ellos e inclusive elegir la tecnología o servicio a implementarse. Aunque la parte económica juega un valor importante debido a que se buscaría la forma más redituable de vender o alquilar el espectro asignado, los entes reguladores no contempla este tipo de compartición de espectro, en otras palabras no está permitido.

Asignación Dinámica de Espectro.- Este enfoque propuesto por el proyecto europeo DRiVE se basa en el manejo del espectro utilizado por un sistema de radio dentro de una localidad delimitada, la misma que dependiendo de uso puede compartir su banda entre diferentes sistemas de acceso por radio (RANs). Es decir, este enfoque se basa en el hecho que la mayoría de las características de los sistemas de comunicación están relacionados al tiempo en el cual se usa el sistema y a la zona donde se encuentra. Esto permite determinar las variaciones de uso del espectro y la máxima carga que pueda

experimentar el sistema. Como resultado se puede determinar los lapsos de tiempo en el cual no está siendo usado el espectro junto con el área en el cual no cubre el sistema de telecomunicaciones. Por ende, conociendo los lapsos en el cual el sistema no transmite y la zona que no cubre el sistema es posible poder optimizar dicho espacios de frecuencia.

Es importante recalcar el hecho que este tipo de asignación varía más rápido que las actuales políticas de asignaciones, sin embargo este enfoque ha captado la atención de la comunidad científica.

Modelo de Compartición Abierta

Este modelo es conocido también como espectro común (spectrum commons). Emplea la compartición abierta entre dispositivos en base al manejo espectral dado por un ente regional. Un ejemplo de estos sistemas son los que operan en la banda ISM, tal como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, entre otros.

Algunos defensores de este modelo se sustentan en el éxito de las redes Wi-Fi que han logrado coexistir durante mucho tiempo sin regulación.

Spectrum commons propone que las comunicaciones inalámbricas pueden ser reguladas, permitiendo a los usuarios coordinar el uso de la banda de operación, evitando interferencias producto de las colisiones y previniendo congestión en la banda.

Este modelo puede ser implementado a través de estrategias de compartición centralizada o compartida, las cuales han sido investigadas sin embargo

existen aún muchas interrogantes a partir de estos esquemas propuesto para el modelo en cuestión [22].

Modelo de Acceso Jerárquico

Este modelo puede ser considerado como un híbrido entre los dos modelos antes mencionados. Se basa en una estructura jerárquica de acceso la cual distingue dos tipos de usuarios: los licenciados (primarios) y los no licenciados (secundarios). La idea principal consiste en permitir el acceso de los usuarios secundarios a la banda primaria limitando la interferencia permitida por el usuario. Dado el concepto antes expuesto, 2 enfoques han sido considerados para la compartición del espectro a través de este método:

Espectro bajo el nivel del ruido (Spectrum Underlay).- Este enfoque permite traslapar las transmisiones de los usuarios secundarios, pero bajo severas restricciones de potencia de transmisión, básicamente el comportamiento de los mismos es controlado por los niveles de interferencia que pueden producir. Uno de los sistemas que puede cumplir con los requerimientos planteados por este enfoque son los sistemas de espectro ensanchado como Code Division Multiple Access (CDMA) o Ultra Wide Band (UWB), ya que estos sistemas esparcen su potencia en un gran ancho de banda, como se observa en la Figura 2.2

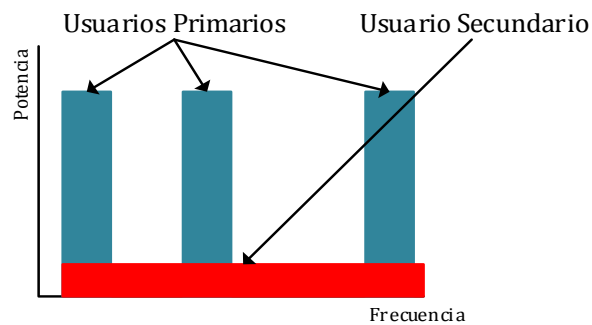


Figura 2-2: Espectro bajo el nivel del ruido

A través de estos sistemas se pueden ofrecer grandes tasas de datos a corto alcance y con muy baja potencia de transmisión, lo cual permitiría operar debajo del umbral de ruido de los sistemas primarios, lo cual en sí es una gran ventaja, ya que en otras palabras para el sistema primario las transmisiones del sistema secundario serían ruido en el sistema.

Otra ventaja es la no complejidad del sistema debido a que no es necesario detectar la señal del sistema primario en uso. Sin embargo, a pesar de las ventajas antes expuestas, estos sistemas presentan la gran limitación de tener pequeñas zonas de cobertura.

Espectro sobre el nivel del ruido (Spectrum Overlay). - Este enfoque difiere del anterior debido a no tener exigentes restricciones en término de los niveles de potencia de transmisión de los usuarios secundarios, sin embargo si los posee en cuanto a cuándo puede transmitir o no [6],[8].

Es decir, que en un tiempo y frecuencia determinados, si la frecuencia no es usada por un usuario primario, puede ser usado el espectro de forma oportunista por parte de un usuario secundario (ver Figura 2.3).

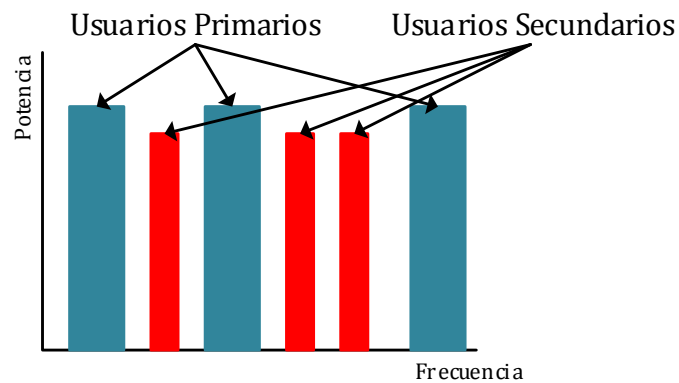


Figura 2-3: Espectro sobre el nivel del ruido

Por lo tanto, para poder desarrollar este tipo de sistemas es necesario realizar un sensado de espectro previamente con miras a detectar la actividad de los usuarios primarios que se encuentran en la banda. Si un espacio de frecuencia (White Space) es encontrado, un usuario secundario puede acceder al espectro. Adicionalmente, la decisión de usar o no la banda por parte de un usuario secundario dependerán de condiciones como la probabilidad de colisión, probabilidad que un usuario primario y un secundario transmitan al mismo tiempo [20].

2.2.1 Acceso Oportunista al Espectro.-

Dada la explicación anterior, es necesario recalcar que el enfoque del presente trabajo es *Spectrum Overlay*, o Espectro sobre el nivel del ruido, el cual forma parte de los modelos pertenecientes al concepto de DSA. OSA es un modelo de gestión de espectro el cual se basa en el principio de que los usuarios primarios y secundarios pueden coexistir en el mismo medio, siempre que no interfieran con los usuarios primarios.

Los módulos básicos de este concepto, son la oportunidad de identificación de espectro, explotación del mismo y la política regulatoria.

El módulo de identificación de espectro es el responsable de identificar de forma precisa y seguir inteligentemente las bandas de frecuencia disponible. El módulo de explotación recoge los datos del primer bloque y decide como la transmisión debe ser ejecutada. Por último la política regulatoria es la encargada de definir los parámetros base con el objetivo de asegurar la compatibilidad con el resto de sistemas. Este proceso tiene la finalidad de beneficiar a los usuarios secundarios sin interferir con los usuarios primarios [6].

Arquitectura de una Red de acceso oportunista al espectro

Los elementos que forman parte de la arquitectura de una red de acceso oportunista al espectro (OSAN) se pueden clasificar en 2 grupos: Red primaria y secundaria [8],[23]. Como se ve en la Figura 2.4, las bandas concesionadas no usadas por los usuarios licenciados (PUs) pueden ser adquiridos para el funcionamiento de los usuarios secundarios (SUs).

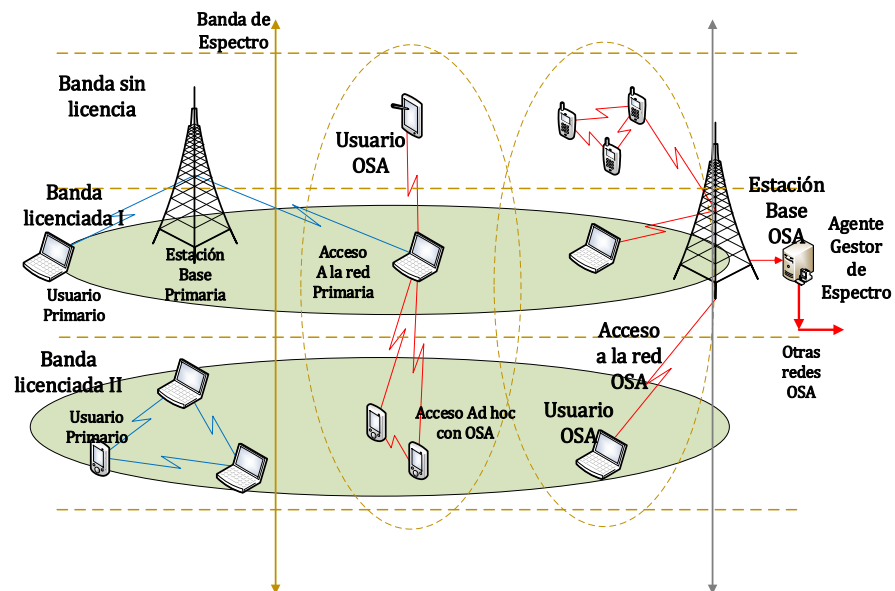


Figura 2-4: Arquitectura de Red [8]

Red primaria o licenciada

En la Figura 2.4, se puede observar la infraestructura de una red de telecomunicaciones, donde los usuarios primarios poseen una concesión que les permita operar dentro de la banda asignada en la

localidad asignada por el regulador. Se puede observar que el manejo de la red se basa en la operación de estaciones bases que controlan los parámetros de la red. Las operaciones de los usuarios de la red primaria no pueden ser interferidas por usuarios que no tengan la concesión.

Red secundaria o no licenciada

La red secundaria, o red OSA (OSAN) [8], es el conjunto de usuarios y equipos que no tienen licencia para operar en un determinado segmento de espectro. Debido a este hecho el acceso al espectro es de forma oportunista. La red secundaria que se muestra en la Figura 2.4 puede desplegarse como una red de infraestructura o como una red ad-hoc. Sin importar el tipo de red los componentes que conforman una OSAN son:

- *Usuarios OSA:* Los usuarios de la red OSAN no tienen licencia para poder usar la banda, por ese motivo es necesario que los usuarios tengan funcionalidades adicionales que permitan el uso compartido de la banda.
- *Estación Base OSA:* A través de tipo de infraestructura, los usuarios OSA pueden establecer conexiones con otros usuarios OSA y redes diferentes.
- *Agente del espectro:* Es un ente de la red centralizado que posee funcionalidades de distribución del espectro entre las OSANs.

2.2.2 Espacios en Blanco de TV (TVWS).-

Actualmente, el uso de las bandas concesionada por sistemas primarios no es eficiente, por motivo de la configuración y asignación de frecuencias de los sistemas antes mencionados. Por lo cual a la banda que no es usada durante un lapso de tiempo determinado se conoce como “Espacio en blanco” (WS por sus siglas en inglés) [24]. En la Figura 2.5, se puede apreciar cierto segmento del espectro radioeléctrico cuyo uso es dependiente de la cantidad de usuarios y datos que pasan por la banda. Es decir, debido al tráfico de datos y usuarios, es posible encontrar segmentos de tiempo en los cuales un respectivo segmento de espectro no se encuentre usado por un usuario licenciado, esto da pie a que los equipos secundarios puedan acceder a esas bandas usando técnicas de acceso dinámico al espectro, las cuales fueron detalladas previamente.

Existen estudios realizados en diferentes partes del mundo con el objetivo de determinar la disponibilidad de espectro que poseen. Una particularidad de las mediciones antes mostradas es que el espectro asignado a TV muestra porciones del espectro que no se usan y junto a las excelentes propiedades de propagación que posee, ha captado la atención de la comunidad científica [10],[11],[12]. Estas porciones de espectro que están localizadas en la banda de TV son conocidas como Espacios en Blanco de TV (TVWS, por sus siglas en inglés). Estos

TVWS han sido tomados en cuenta por los organismos reguladores con miras a explotarlos de forma eficiente.

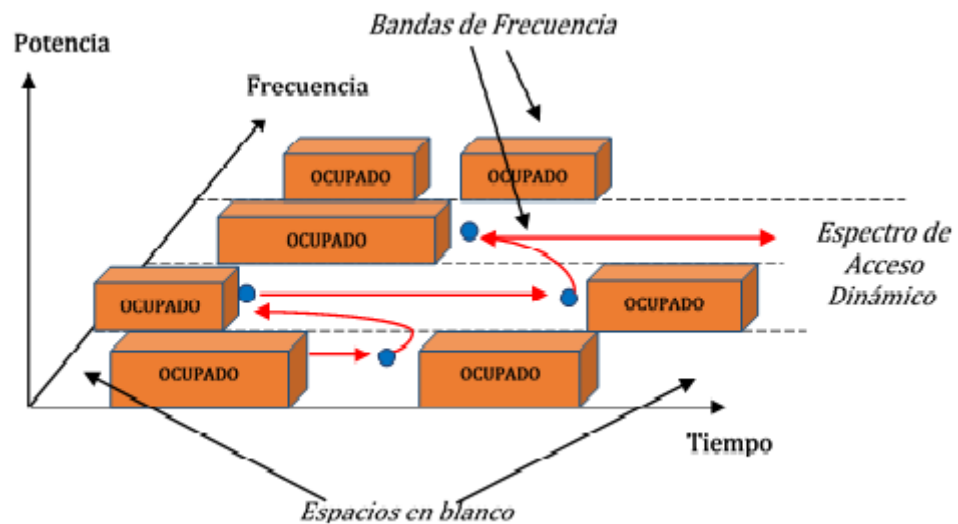


Figura 2-5 Espacios en Blanco [8]

2.3 Sistemas de TV usados en el Ecuador.-

En todo el mundo, uno de los sistemas de telecomunicaciones que ha tenido mayor impacto en la sociedad ha sido la televisión. Este sistema ha sufrido cambios drásticos a lo largo de los años que ha estado activo, desde la pantalla en blanco y negro hasta los nuevos sistemas de alta definición.

Durante los últimos años, los sistemas de televisión han estado en un proceso de transición (switch-over), el cual permitirá la migración a una tecnología completamente digital que promete múltiples ventajas [25].

Por tal motivo, Ecuador siguiendo la tendencia mundial ha decidido cambiar sus sistemas de transmisión de televisión abierta analógica a uno digital. Este proceso se ha realizado en varias fases con el objetivo de realizar una migración de tecnologías que no afecte a los usuarios. Actualmente, el Ecuador está en un periodo de simulcast, el cual consiste en enviar tanto la señal analógica y digital durante un cierto espacio de tiempo. Se tiene previsto que el proceso de transición a televisión digital se complete en todo el territorio nacional para el año 2018.

Dado los motivos antes expuestos, a continuación se presentan las características de los estándares analógico y digital que están vigente en el territorio nacional durante el periodo de simulcast.

2.3.1 Estándar Analógico de señal abierta de TV en Ecuador.-

El sistema que usado en el Ecuador para la transmisión de televisión en señal abierta es el sistema propuesto por el Comité Nacional de servicios de Televisión (NTSC, por sus siglas en inglés) [26]. Este sistema permite la transmisión de señales de televisión a color a través de modulaciones analógicas.

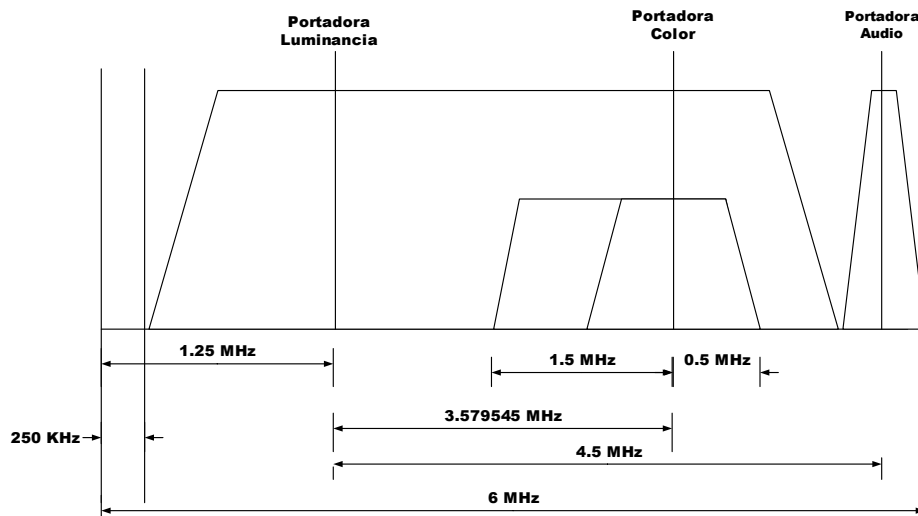


Figura 2-6 Espectro de señal de Televisión NTSC

Como se observa en la Figura 2.6, la señal del sistema NTSC consta de dos componentes:

- Video: Formado por las señales de luminancia, cromancia y parámetros de sincronización. La primera señal representa la intensidad de luz en las imágenes, mientras que la segunda indica el color de las mismas. En conjunto las señales de luminancia y cromancia ocupan un ancho de banda de 4.2 MHz.
- Audio: En el caso del sonido la señal que se usa en el sistema NTSC es de tipo FM, lo cual sólo consume alrededor de 0.25 MHz.

En total, la señal del sistema NTSC consume 6 MHz entre la señal de video y la señal de audio. Algunas características adicionales del sistema son presentadas a continuación en la Tabla 1

Tabla 1 Parámetros del estándar NTSC

Estándar NTSC	
Número de líneas:	525
Cuadros por segundo:	30
Frecuencia Barrido Horizontal:	15,734 KHz
Frecuencia Barrido Vertical:	60 Hz
Subportadora de color:	3,57 MHz
Ancho de Banda Video:	4,2 MHz
Portadora de Audio:	4,5 MHz
Portadora de Video:	1,25 MHz
Relación de Aspecto:	4:3
Ancho de Banda Canal [MHz]	6

2.3.2 Estándar Digital de señal abierta de TV en Ecuador.-

En la actualidad existen varios estándares para difusión de Televisión Digital Terrestre, por lo cual el Estado Ecuatoriano a través de su ente regulador de las telecomunicaciones realizó pruebas en diferentes zonas del país con el objetivo de determinar cuál estándar ofrecía mejores características [27] (Ver Figura 2.7).

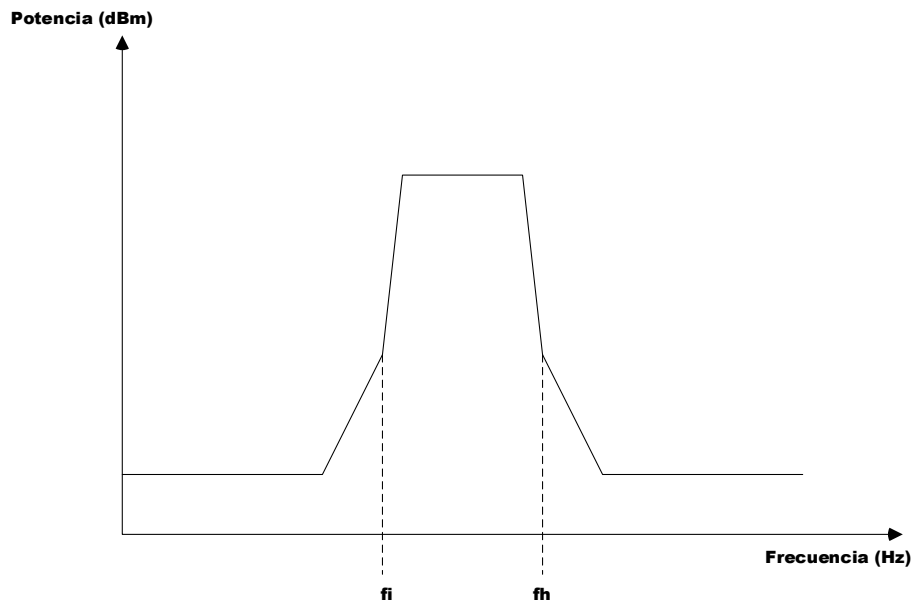


Figura 2-7 Máscara de Transmisión del sistema ISDB-Tb

Como resultado, el Ecuador optó por el estándar japonés ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting) con variaciones brasileñas. A través de esta tecnología se abre las puertas al desarrollo de nuevos servicios de software, especialmente en la creación de middleware, si se realiza una comparación respecto a la televisión analógica, podemos destacar los siguientes puntos:

- Ancho de Banda Optimizado: Debido a las técnicas de compresión digital permite transmitir varias señales simultáneas en el mismo ancho de banda de un canal analógico (6 MHz). Adicionalmente, la Televisión Digital Terrestre (TDT) permite transmitir canales adyacentes, que en el caso del sistema NTSC no se podía realizar.

- Calidad de las imágenes: La calidad de la imagen puede variar dependiendo de los requerimientos de calidad de servicio que tenga la red.
- Interactividad: Permite que el sistemas de televisión se convierta de un sistema unidireccional a uno bidireccional debido a su canal de interactividad por Internet.
- Optimización de Potencia: Dado los nuevos sistemas de transmisión para sistemas TDT, el consumo de potencia es mucho menor.
- Supresión de Interferencia: Las modulaciones, codificaciones y sistemas de reducción de interferencia, (i.e Interleaving) permiten la reducción de la Interferencia y errores provocados por múltiples factores ambientales.

2.3.3 Espectro Radioeléctrico atribuido al servicio de señal abierta de TV en Ecuador.-

Los sistemas antes mencionados necesitan segmentos del espectro radioeléctrico para poder realizar su operación. En Ecuador las bandas asignadas para el sistema de Televisión Abierta, tanto analógica como digital son las bandas VHF y UHF [3].

Esto, es en base al reglamento de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Este reglamento indica que las bandas para

el sistema de TV abierta están en la banda VHF (canales del 2 al 13) y UHF (canales del 21 al 51), esto se muestra detalladamente en la Tabla 2.

Tabla 2 Bandas asignadas para los sistemas de Televisión en Ecuador

Banda de Radio ITU	Frecuencias (MHz)	Canales
VHF	54-72	2,3,4
	76-88	5,6
	174-216	7,8,9,10,11,12 y 13
UHF	500-608	21,22,23.....36
	614-644	38,39,40,41,42
	644-698	43,44,45.....51

Como fue explicado en el párrafo anterior, las bandas asignadas para el servicio de TV son las bandas VHF y UHF. Adicionalmente. Cada canal de TV tiene un ancho de banda de 6 MHz, por lo que dado el ancho de banda asignado se pueden contabilizar 42 canales. Esta canalización es mostrada en ANEXOS. En resumen, existen nueve canales digitales (i.e canal 21, 23, 25) y catorce analógicos (i.e canal 22, 24,26) asignados para operar. Sin embargo, a pesar de los 23 canales usados, también existen canales que no se encuentran operando ya que no tienen ninguna asignación de prueba.

2.4 Diversos casos de uso de modelado de canal.-

En esta sección se desea presentar un estado del arte de estudios de modelado espectral con el objetivo de detectar y/o predecir White Spaces. En sí, el Spectrum Sensing es de vital importancia en los estudios para desarrollar sistemas con Acceso Oportunista al Espectro (OSA), ya que es necesario determinar el espectro disponible para el funcionamiento del sistema. Estos estudios se basan en grandes campañas de medición las cuales fueron realizados en diferentes partes del mundo. Dependiendo del rigor matemático que se emplee en los estudios, se puede sólo medir y cuantificar los espacios en blanco o incluso predecir cuándo aparecerán los espacios en blanco.

En resumen, de acuerdo a la herramienta usada podemos clasificar a los estudios, como Temporales, Estadísticos, Markovianos o de Regresión Lineal, los cuales serán detallados a continuación (Ver Figura 2.8).

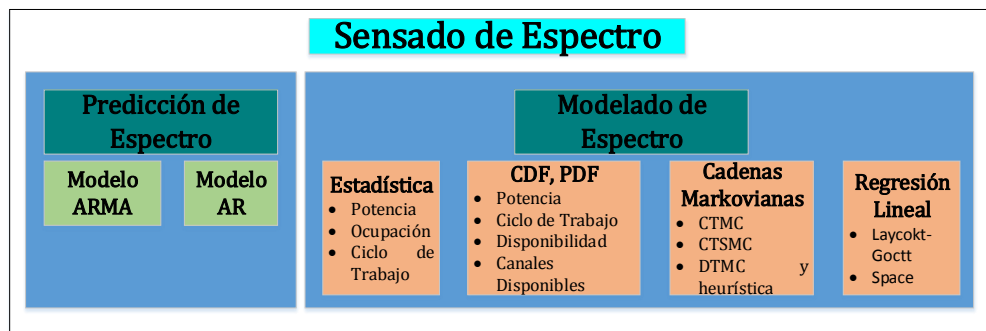


Figura 2-8 Tipos de Estudio de Sensado de Espectro

2.4.1 Modelos Temporales.-

En este tipo de estudios, las mediciones que son tomadas permiten determinar la disponibilidad del espectro respecto al tiempo, lo cual permite determinar los lapsos de tiempo, cuando la banda está disponible para ser utilizado por los usuarios secundarios.

En [13], se observa un estudio en el cual se desarrolla un Modelo Uso de Espectro. Este estudio fue realizado en Barcelona, y muestra la disponibilidad temporal de la banda comprendida entre 75 y 7075 MHz. Como resultado a este estudio se pudo observar que el uso de las bandas no es eficiente, la Tabla 3 muestra sectores del espectro subutilizados, lo cual da pie para el desarrollo de sistemas con OSA.

Tabla 3 Ciclo de Trabajo de diferentes bandas

Rango de Frecuencia (MHz)	Ciclo de Trabajo Promedio		
75-1000	42,00%	31,02%	17,78%
1000-2000	13,30%		
2000-3000	3,73%	2,75%	
3000-4000	4,01%		
4000-5000	1,63%		
5000-6000	1,98%		
6000-7075	1,78%		

En Singapore [17], se realizó una campaña de medición con el objetivo de poder determinar White Spaces. Esta campaña comprendió frecuencias desde los 80 a 5875 MHz, donde se observa el

comportamiento de múltiples sistemas como TV, GSM, ISM, entre otros. Los resultados de dicho estudio mostraron que la disponibilidad de las bandas es muy baja. Por ejemplo la banda de 80 a 174 MHz, donde se encuentra sistemas como la Radio FM, Radares y servicios fijo-móvil, muestra una disponibilidad de 55.16%. En las bandas de 174 a 230 MHz y 490 a 614 MHz se muestra una disponibilidad de 50.95% y 47.65% respectivamente. Una de las bandas menos utilizadas es la banda GSM (824 a 890 MHz), la cual muestra una disponibilidad del 72.66%. En el caso de las bandas de 900 y 1800 MHz la disponibilidad es del 61.89% y 80.18% para ambos casos. En general se puede observar segmentos de espectro que no son usados eficientemente, como es el caso de la banda GSM (900 y 1800), en cambio sistemas como la TV presentan niveles menores de disponibilidad.

En ambos casos, el estudio temporal permite determinar la disponibilidad total de la banda medida, sin embargo este tipo de estudios no permite determinar características del comportamiento del canal, por lo cual para obtener más información del canal es necesario realizar estudios más profundos.

2.4.2 Modelos Estadísticos.-

En el caso de los modelos estadísticos, se deben usar mediciones que permitan determinar si la disponibilidad de la banda sigue una distribución probabilística (PDF y CDF).

Al momento de poder representar el comportamiento del uso del canal a través de una función probabilística permite determinar de forma más precisa la probabilidad de que una banda esté disponible.

En un estudio realizado en la ciudad de Barcelona de 7 días, en el cual se analizó el comportamiento de las bandas de ciertos sistemas. Debido a la diversidad de sistemas que fueron analizados, se observaron diferentes comportamientos.

No obstante, a pesar de los diferentes comportamientos que se observaron, todos pueden ser modelados usando una distribución beta o una distribución Kumaraswamy.

Igualmente, en [12] se puede observar un estudio realizado en la ciudad de Aachen donde se analiza el comportamiento del uso espectral desde los 20 MHz a 6 GHz. Como resultado de este experimento se muestran gráficas de función de distribución de probabilidad (PDF) respecto al ancho de banda que puede suministrado el espectro seleccionado. Adicionalmente, se muestra el comportamiento estadístico de la ocupación del canal, el cual posee una tendencia gaussiana.

A pesar de la información que se puede obtener de un análisis estadístico, el tiempo no es considerado, por lo cual es necesario utilizar otro tipo de herramientas con miras a poder detectar y predecir el uso de la banda.

2.4.3 Modelos de Markov.-

Cómo fue explicado en los ítems anteriores, los modelos temporales y estadísticos de uso de la banda, sin embargo, tienen la desventaja de no predecir la existencia de White Spaces en la banda, por lo cual es necesario el uso de herramientas estadísticas más avanzadas, una de las cuales es la Cadena Markoviana.

Por tal motivo el estudio planteado en esta tesis utiliza modelos Markovianos, ya que permite modelar y predecir White Spaces. En [13], se puede observar un estudio en el cual se realizó un modelamiento Markoviano, con el objetivo de poder predecir los espacios en blanco de las bandas de los sistemas DCS, TETRA e ISM. El modelo Markoviano permite replicar la tendencia estadística de los periodos donde la banda se encuentra libre u ocupada y disponibilidad del espectro.

En [28], se puede observar otro estudio realizado en Estados Unidos en la banda de 928-948 MHz. En este caso el modelo usado fue un Modelo Markoviano Oculto, el cual permite incluir estados de observación

adicionales útiles al momento de predecir correctamente los Espacios en Blanco.

En general, los modelos markovianos son herramientas útiles para poder predecir los espacios en blanco, sin embargo de la misma forma que los modelos temporales y estadísticos, los modelos markovianos no toman en consideración el tiempo, es decir la predicción no toma en consideración los valores pasados para predecir los futuros, por lo que la predicción dada por los modelos markovianos tienen un grado de error de máximo 5%.

2.4.4 Modelos de Regresión Lineal.-

Para poder predecir los espacios en blanco con gran exactitud es necesario utilizar métodos matemáticos que tomen en consideración valores pasados para poder predecir el siguiente valor.

Este tipo de modelos pueden ser usados al momento de predecir si en un instante de tiempo posterior el canal va a estar libre para ser usado por sistemas secundarios.

En [29], se realizó un modelo de predicción para Espacios en Blanco (White Spaces) que trabaja en la banda ISM. El esquema se basó en un modelo ARMA, el cual permite predecir los WS tomando en consideración si en anteriores instantes de tiempo hubo o no disponibilidad.

A pesar de que el modelo es muy preciso al momento de detectar Espacios en Blanco (White Spaces), sin embargo el procesamiento requerido para realizar el modelo de regresión lineal es extremadamente grande, por lo cual este tipo de esquemas de modelamiento de uso de espectro no es recomendable para sistemas que necesiten implementar eficiencia energética.

En resumen, existen diferentes modelados del espectro los cuales permiten obtener diferentes tipos de información, Sin embargo, dependiendo del tipo de modelado, la cantidad de procesamiento que se requiere, por lo cual el tipo de modelado dependerá de la aplicación para la cual se la requiera. En consecuencia, dada las ventajas de los modelos y los requerimientos computacionales requeridos para el desarrollo de los mismos, se escogió la cadena Markoviana por sus excelentes características para modelar y predecir la disponibilidad de canales y su bajo requerimiento en recursos computacionales

En el siguiente capítulo se detallará el escenario en el cual el proyecto es desarrollado, el cual es un escenario urbano tipo Manhattan que permite el desarrollo del análisis de disponibilidad.

Capítulo 3

3. ESCENARIO DE ESTUDIO

En los capítulos anteriores se realizó una breve descripción de los antecedentes, la problemática, la solución propuesta, el alcance y un resumen del estado del arte de las telecomunicaciones. Teniendo en cuenta los sistemas de telecomunicaciones que están actualmente en las bandas de UHF-TV, se procederá a la descripción detallada del escenario donde se desplegará el estudio.

Dentro de este capítulo se describirá todo el proceso de medición el cual será dividido en 3 etapas: Antena, Radiofrecuencia y Captura y Control. Además, se detallarán las expresiones matemáticas que definen las métricas a utilizar en el estudio.

3.1 Descripción general del escenario.-

En el contexto de este trabajo, el escenario está situado en una zona urbana con gran densidad de edificios (Escenario Tipo Manhattan). Debido a la gran concentración de edificios, se puede apreciar que existen sistemas de cobertura de picoceldas o femtoceldas trabajando dentro del edificio, como se muestra en la Figura 3.1.

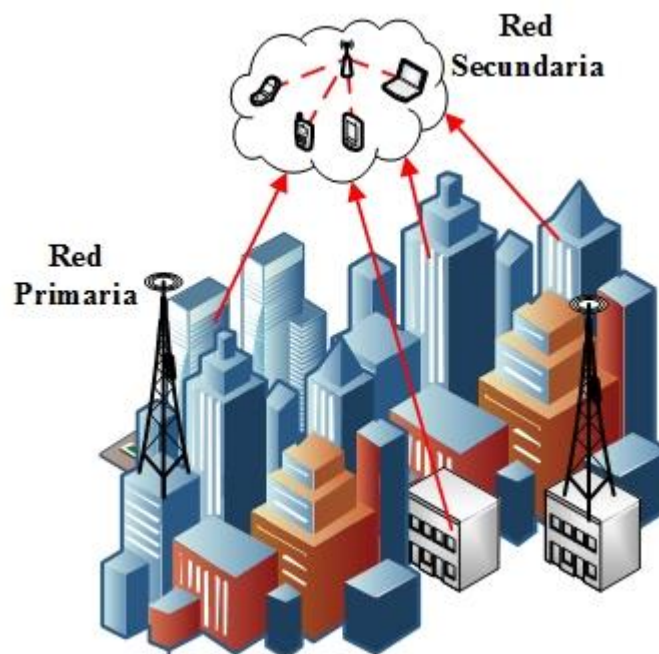


Figura 3-1: Escenario Urbano con gran concentración de edificios

De la misma forma, se puede observar la existencia de un sistema de gran cobertura dentro de la cual se observan los edificios. Sin embargo, debido a pérdidas por absorción ya sea de paredes, pisos o ventanas en ciertas zonas del edificio la señal se atenuará en tal magnitud que se puede considerar libre

el espectro. Este efecto permite el estudio y desarrollo de sistemas con acceso oportunista al espectro (OSA), los cuales pueden hacer uso de los espacios encontrados en este tipo de escenario para su desarrollo.

De la misma forma, se puede observar en la Figura 3.2 la banda a analizar. Este segmento de espectro, perteneciente a un sistema licenciado posee un ancho de banda BW , en el cual cada división del mismo o canal i , tiene una máscara Δf . Estos canales están separados entre sí una distancia de $f_1 + (N-1)\Delta f$ Hertz, donde f_1 es el primer canal de la banda en estudio (Banda UHF-TV) y N es el número de canales que se encuentran en la banda de estudio. Adicionalmente, de acuerdo a la regulación local cada canal posee un identificador Ch_i , el cual permite su mejor control y seguimiento.

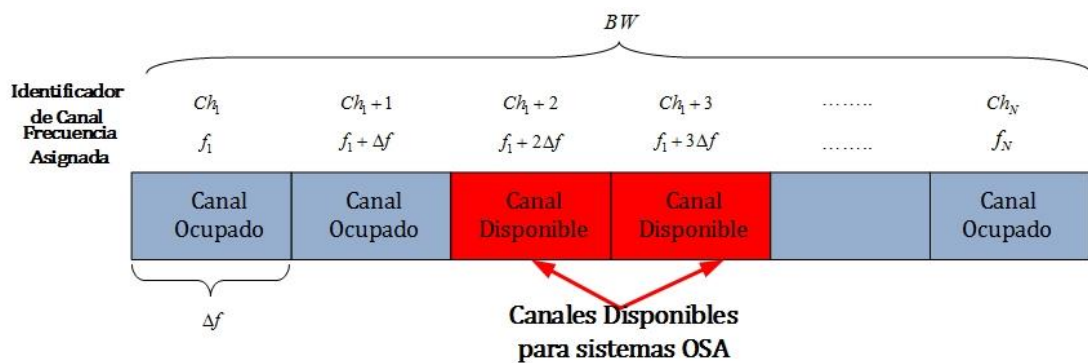


Figura 3-2: Proceso de Sensado de Espectro

Como fue explicado en párrafos anteriores, el objetivo de este análisis es el desarrollo de sistemas con criterio OSA, para lo cual es necesario realizar un sensado y análisis de disponibilidad de la zona escogida. Estos insumos se

obtienen monitoreando la banda seleccionada del espectro por un tiempo prudencial. Luego del sensado, dependiendo de la intensidad con la cual llega la señal a la zona de medición se determina si el canal está siendo usado o no, lo cual puede variar dependiendo de varios factores como la zona de despliegue y el horario. Al final con dichos resultados se puede determinar los Espacios en Blanco (i.e TVWS) que existen en el espectro seleccionado lo cual permitirá el desarrollo de sistemas con OSA.

3.2 Condiciones de Interferencia para reuso de Canal.-

En este estudio, el enfoque propuesto indica que la disponibilidad no solo depende del comportamiento temporal de la potencia de canal recibido, así mismo depende del efecto espacial que influencia el nivel de la señal recibido en los niveles más bajos del edificio.

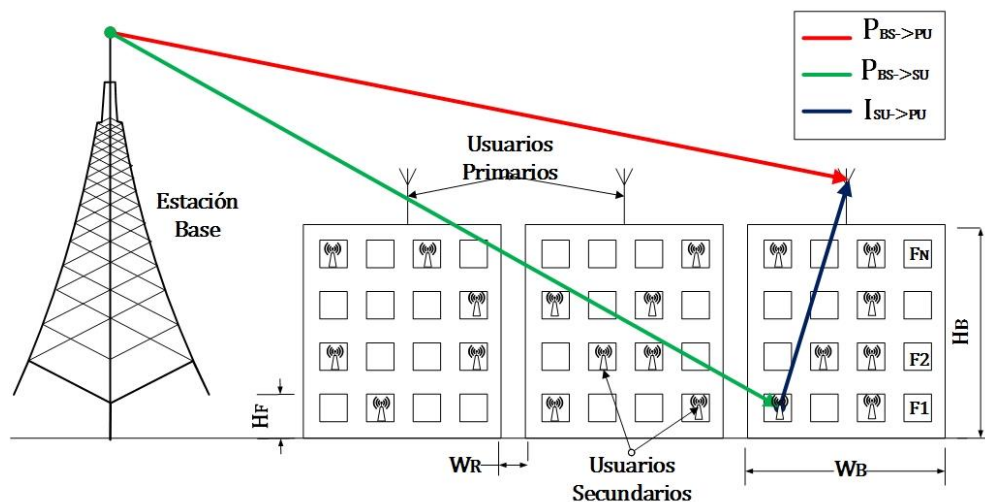


Figura 3-3: Vista Lateral del Escenario

En la Figura 3.3 se puede observar el escenario lateralmente, en el cual se observan una zona con gran densidad de edificios, donde existe una gran concentración de usuarios secundarios dentro de ellos. Cada edificio tiene dimensiones de H_B de alto por W_B de ancho, donde cada uno de los N pisos tiene una altura H_F , por último cada edificio está separado una distancia de W_R de su edificio contiguo.

Así, para determinar la disponibilidad de cada canal es necesario evaluar las siguientes condiciones de interferencia:

$$P_{BS \rightarrow PU} \leq \lambda \quad (1)$$

$$P_{BS \rightarrow SU} \leq \lambda \quad (2)$$

$$I_{SU \rightarrow PU} \leq \lambda \quad (3)$$

Para determinar si un canal está disponible o no, es necesario medir la señal recibida desde la estación base al usuario primario $P_{BS \rightarrow PU}$, al usuario secundario $P_{BS \rightarrow SU}$, y la interferencia producida por la transmisión de SU a un PU. Cada uno de los niveles antes mencionados es comparado con un nivel de umbral establecido λ para así determinar el estado del canal.

Si las ecuaciones (1) y (2) son verdaderas, el canal es considerado como disponible para el uso de dispositivos con OSA, caso contrario es necesario determinar si la interferencia producida por SU es percibida por parte del usuario primario $I_{SU \rightarrow PU}$; esto es validado a través de la ecuación (3). Es decir,

si el PU no percibe la transmisión por parte del SU, el canal es considerado disponible aun cuando este sea utilizado por un PU.

3.3 Modelamiento Matemático Propuesto.-

Ya analizado el escenario de estudios y conocida las variables a tener en cuenta durante el análisis, es imperativo desarrollar las expresiones matemáticas en las cuales se fundamentará el análisis de este estudio.

3.3.1 Modelamiento estocástico de datos.-

Para el modelado estocástico se debe tener en cuenta el escenario donde se realiza la medición. En este escenario se realizan múltiples mediciones (Y_n), las cuales son el resultado de la señal enviada por la estación base (BS), el ruido (*Noise*) y la interferencia del medio (I), las mismas que son independientes e idénticamente distribuidas (i.i.d) y presentan características ergódicas.

$$Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_N] = X + \text{Noise} + I \quad (4)$$

El ruido que sufre el canal se asume que posee características gaussianas ($N(0, \sigma^2)$), y el margen de Interferencia se asume nulo

debido a que la banda a estudiar es de uso exclusivo y no permite interferencia de ningún tipo. Por tal motivo podemos asumir que:

$$Y \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (5)$$

Es decir la potencia recibida posee características gaussianas del ruido pero con el nivel de potencia promedio igual al nivel de potencia que llega desde la BS menos la pérdida por espacio libre.

Teniendo en consideración esto, para poder determinar el estado se realizará la siguiente transformación lineal:

$$\varphi_i = \begin{cases} 1; Y_i \leq \lambda \\ 0; \text{d.o.m} \end{cases} \quad (6)$$

La variable φ_i representa el estado del canal respecto a un nivel de umbral λ en el instante i ; es decir, permite determinar si el canal está disponible para ser usado ($\varphi_i = 1$) u ocupado ($\varphi_i = 0$). Debido a transformación lineal que permitió la generación de la variable φ_i , esta sigue una distribución de tipo Bernoulli con probabilidad de éxito p igual a:

$$p = P(Y_i \leq \lambda) \quad (7)$$

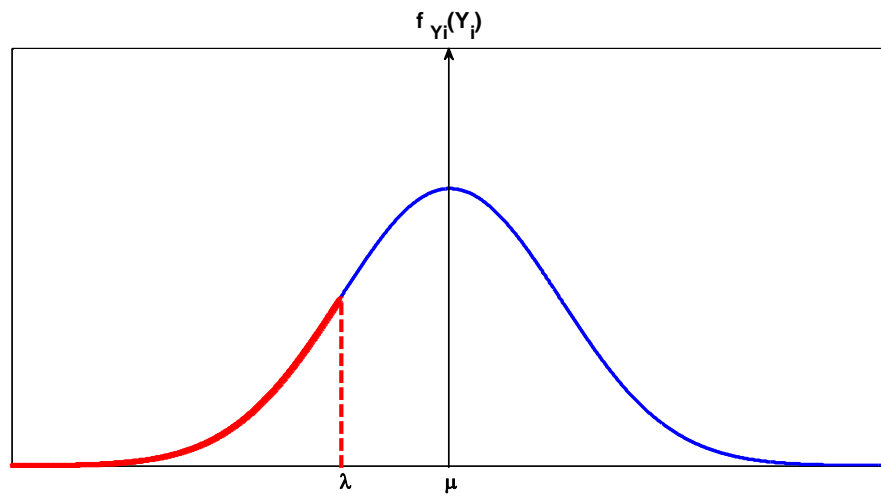


Figura 3-4: Función de densidad de probabilidad de la potencia recibida

Como se puede observar en la Figura 3.4, el área bajo la curva representa la probabilidad de que la potencia Y_i sea menor que el umbral configurado λ . Esta probabilidad se puede obtener a través de la función acumulada de la función PDF Gaussiana.

$$P(Y_i \leq \lambda) = P\left(Z_i \leq \frac{\lambda - \mu}{\sigma}\right) = F_{z_i}\left(\frac{\lambda - \mu}{\sigma}\right) = 1 - Q\left(\frac{\lambda - \mu}{\sigma}\right) \quad (8)$$

Ahora, que se tiene la función probabilística referente al estado del canal es posible obtener el modelo estocástico que permita representar la disponibilidad del canal en un lapso de tiempo. Esto se realiza utilizando la siguiente expresión:

$$\Omega_j = \frac{\sum_{n=1}^{N_S} \varphi_n}{N_S} \quad (9)$$

La variable Ω_j representa la disponibilidad del canal en un lapso de tiempo j , donde se toman N_s muestras de la variable φ_i y se realiza un promedio. A través de este proceso se desea conocer la probabilidad de que un canal se encuentre disponible o no en un lapso de tiempo determinado. Es imperativo detallar que a medida que la cantidad de muestras se haga más grande, es decir $N_s \rightarrow \infty$, la variable Ω_j tenderá a comportarse más como una variable aleatoria continua.

Aplicando la Ley de los Grandes Números, se puede determinar la media y la varianza de la variable Ω_j , la cual es:

$$\mu_{\Omega_j} = E[\Omega_j] = E\left[\frac{\sum_{n=1}^{N_s} \varphi_n}{N_s}\right] = \frac{E\left[\sum_{n=1}^{N_s} \varphi_n\right]}{N_s} = \frac{N_s \mu_\varphi}{N_s} = \mu_\varphi \quad (10)$$

$$\text{Var}(\Omega_j) = \frac{\text{Var}(\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_N)}{N_s^2} = \frac{N_s \sigma_\varphi^2}{N_s^2} = \frac{\sigma_\varphi^2}{N_s} \quad (11)$$

Esto es posible ya que el conjunto de variables φ es i.i.d, lo cual permite asumir que la correlación entre 2 muestras en diferentes tiempos es 0, es decir $E[\varphi_i, \varphi_j] = 0; i \neq j$.

En resumen, los puntos expuestos permiten identificar las características que debe tener la función probabilística:

- Una función PDF continua comprendida entre 0 y 1.
- Con parámetros ajustables dependiendo de los datos.

Por tal motivo, en base al estudio realizado en [13] se decidió usar la variable Beta, la cual cumple con las características antes mencionadas:

$$f_x(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}; 0 \leq x \leq 1 \wedge B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1}(1-t)^{\beta-1} dt \quad (12)$$

La ecuación (12) muestra la PDF de una función Beta, la cual está definida entre 0 y 1 y los parámetros α, β permiten modificar la forma de la PDF dependiendo de las características. La media y la varianza de la PDF Beta se definen como:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \\ \sigma^2 &= \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)(\alpha + \beta + 1)} \end{aligned} \quad (13)$$

La ecuación en (13), demuestran la relación entre la media y varianza y los parámetros α, β . Sin embargo, dado el principio de ergodicidad es posible obtener los parámetros μ, σ^2 empíricos, por lo que para poder obtener la PDF Beta es necesario encontrar los parámetros α, β , eso se puede realizar a través de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\mu}{\sigma^2}(\mu - \mu^2 - \sigma^2) \\ \beta &= \frac{(\mu - \mu^2 - \sigma^2)(1 - \mu)}{\sigma^2}\end{aligned}\tag{14}$$

Las expresiones en (14), permiten obtener los parámetros α, β que permitirán hallar las funciones PDF de los datos de disponibilidad experimentales.

Después de hallar el modelado estocástico de la disponibilidad es necesario comprobar si la PDF hallada se ajusta a la PDF empírica de los datos experimentales. Para lograr esto se usará la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS Test), el cual consiste en la comparación de la función CDF de la función empírica y de la hallada.

$$\begin{aligned}F_n(x) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I(x(n) \leq X) \\ T_{KS} &= \sup_{x \in \mathbb{R}} \{|F(x) - G(x)|\} = \max_i \{|F(x_i) - G(x_i)|\} \leq k(\alpha, N_s)\end{aligned}\tag{15}$$

La ecuación (15) muestra el proceso que se realiza en la prueba KS Test, la cual se toma en cuenta las CDF tanto empírica como la calculada. Luego, se encuentra la máxima diferencia entre las 2 CDFs y se la compara con el valor $k(\alpha, N_s)$, el cual se basa en la confiabilidad que se desea (α) y el número de muestras (N_s) que se ha utilizado para encontrar la CDF.

3.3.2 Modelo Predictivo Markoviano de predicción de estado

propuesto.-

Dado el modelado estocástico explicado en el inciso anterior, se puede dar el siguiente paso, el cual consiste en crear un modelo predictivo de disponibilidad de canal.

Este modelo se realizará en base a Modelos Markovianos de primer orden debido a las características que poseen. Con el objetivo de poder realizar el modelo Markoviano se asume que la variable a tener en consideración X_j , debe cumplir con la siguiente característica:

$$P[X_{j+1} = W | X_0 = S_0, X_1 = S_1, \dots, X_j = S_j] = P[X_{j+1} = W | X_j = S_j] \quad (16)$$

La ecuación (16) muestra la propiedad Markoviana, la cual indica que la probabilidad de que la variable X_{j+1} tenga el valor W , es dependiente únicamente del estado anterior (X_j).

Para este caso asumiremos 2 casos, es decir que $S = [S_0, S_1]$, donde S_0 representa el estado disponible (IDLE) y S_1 representa el estado ocupado (BUSY). La figura 3.5 representa el diagrama de transiciones de dicha cadena Markoviana, además debido a que las se realizan cada

$t = kT_s$ se considera que el proceso es discreto, es decir es una cadena Markoviana en tiempo discreto (DTMC).

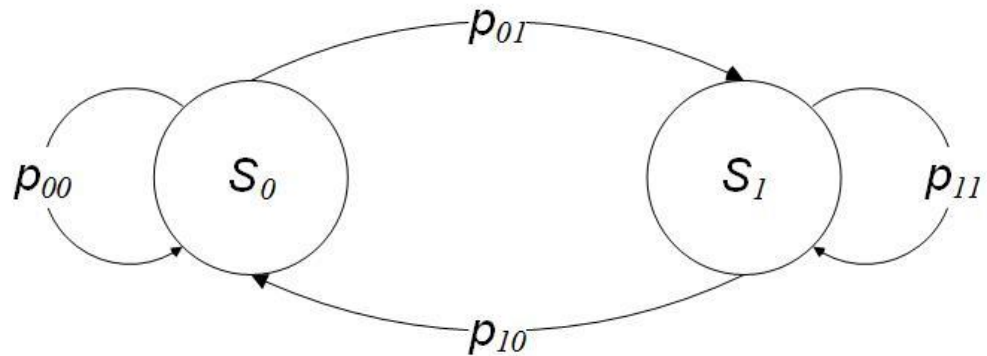


Figura 3-5: Diagrama de Transición de una Cadena Markoviana de Tiempo Discreto

A través del diagrama mostrado en la Figura 3.5, se puede determinar varios parámetros de importancia para la cadena DTMC, uno de esos parámetros es la matriz de transición, que se muestra a continuación:

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix} \quad (17)$$

En la ecuación (17), se observan los valores de transición los cuales representan la probabilidad de cambiar de estado o de permanecer en el mismo estado durante el siguiente lapso de tiempo. De forma general se obtiene la probabilidad de transición utilizar la fórmula a continuación:

$$\widehat{P}_{ij} = \begin{cases} \frac{n_{ij}}{n_i}; n_i > 0 \\ 0; n_i = 0 \wedge i = j \\ 1; n_i = 0 \wedge i \neq j \end{cases} \quad (18)$$

$$n_i = \sum_{k=0}^{N-1} n_{ik}$$

La ecuación (18) muestra cómo se obtiene empíricamente la probabilidad de transición. Esta probabilidad se la obtiene dividiendo el número de veces que en el proceso se haya realizado un cambio del estado S_i al estado S_j dividido para el número de veces que el proceso haya estado en S_i

Si desea saber la probabilidad de estar ya sea en el estado S_0 o en S_1 , se la obtiene de la siguiente manera:

$$P(X = S_0) = \frac{P_{10}}{P_{01} + P_{10}} = \Omega \quad (19)$$

$$P(X = S_1) = \frac{P_{01}}{P_{01} + P_{10}} = 1 - \Omega$$

Como se puede observar, la disponibilidad es equivalente a la probabilidad de estar en el estado S_0 en un instante t y su complemento sería la probabilidad de estar en S_1 , de esta forma la matriz de transición puede ser descrita de la siguiente manera:

$$P \begin{bmatrix} \Omega & 1-\Omega \\ \Omega & 1-\Omega \end{bmatrix} \quad (20)$$

De esta forma queda demostrado que las probabilidades de transición están directamente relacionadas con la disponibilidad del canal. Por último el modelo DTMC se considerará no-estacionario con el objetivo de poder mejorar su precisión, ya que caso contrario el valor de las transiciones quedaría configurado estáticamente en la media de la variable aleatoria que representa la disponibilidad, es decir $\Omega = \mu_{\Omega}$. En general, mantener un modelo DTMC estacionario no permitiría predecir de forma correcta la disponibilidad del canal, por tal motivo la variable Ω se actualizará cada N_s muestras con el objetivo de poder reproducir de forma correcta las características estocásticas del canal.

Finalmente, con las expresiones matemáticas y el modelo estocástico y predictivo ya explicado, se procederá a detallar el sistema por el cual se procederá a capturar la información necesaria para el análisis.

Capítulo 4

4. SISTEMA DE CAPTURA Y ALGORITMO DE PROCESAMIENTO

Para poder realizar la experimentación es necesario realizar la captura de datos utilizando un sistema de radiofrecuencia que permita ajustarse de forma automática con miras a poder obtener datos de cada uno de los canales. Para cumplir con este objetivo se utilizarán dispositivos lógico-programables, elementos de radiofrecuencia y un ordenador para poder almacenar y procesar los datos correspondientes.

4.1 Descripción general del proceso de medición.-

El sistema de medición usado para el experimento consta de varias etapas, las cuales están detalladas en la Figura 4.1.

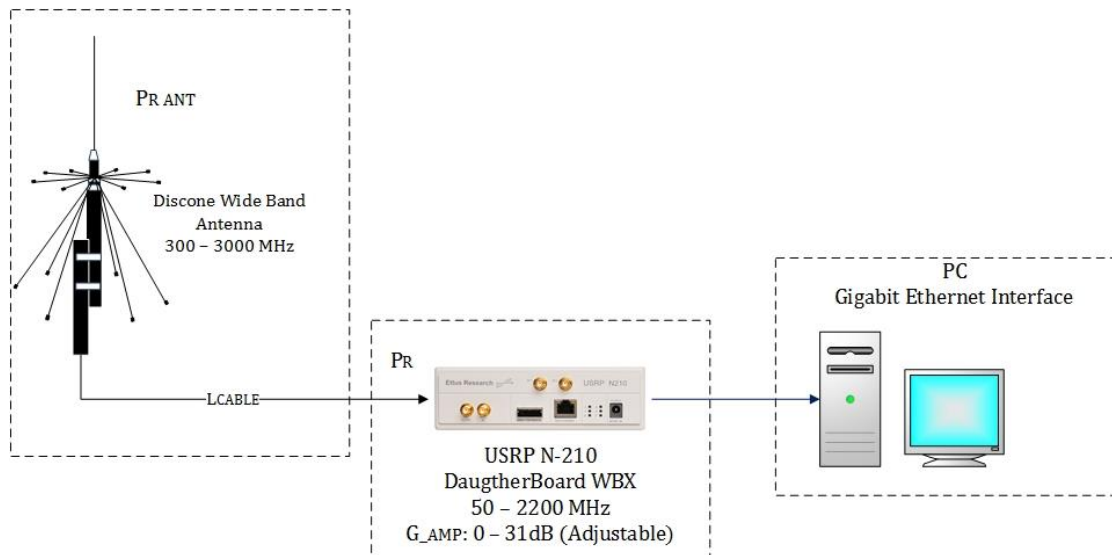


Figura 4-1: Sistema de Medición

El USRP sensa los niveles de potencia P_R que le llegan después de la operación del amplificador interno (G) que el equipo tiene. Sin embargo, el nivel de potencia que se desea obtener es aquel que llega a la antena ($P_{R_{ANT}}$), el cual es el directamente medido del ambiente, esto teniendo en consideración la ganancia proporcionada por la antena (G_{Ant}). Con la ayuda del amplificador integrado del USRP se puede compensar los efectos de pérdidas tanto del cable como de los conectores, en otras palabras que el valor de $P_{R_{ANT}}$ sea igual a P_R .

$$P_{R_{ANT}} = P_R + L_c + L_{cc} - G - G_{Ant} \quad (21)$$

Donde L_c es la pérdida ofrecida por el cable usado para conectar la antena con el equipo de medición y L_{cc} es la pérdida que producen los conectores en el circuito de radiofrecuencia.

Dentro de este sistema se pueden observar 3 subsistemas definidos los cuales son: Subsistema de Antena, Subsistema de Radio Frecuencia, Subsistema de captura y Subsistema de Control, los cuales en conjunto permite el sensado de la potencia en la banda seleccionada y permite almacenar dicha información en un archivo de Excel. El algoritmo de captura de datos fue desarrollado bajo la plataforma de Labview, la cual permitió la configuración del dispositivo de captura, en adición el procesamiento posterior será desarrollado usando el Software MATLAB, con lo cual se obtendrán los resultados a mostrar (ver ANEXO).

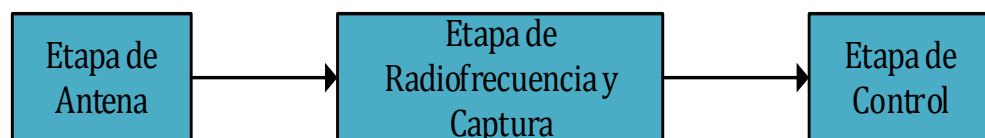


Figura 4-2: Diagrama de Bloques del sistema de medición

En resumen, el sistema puede ser detallado en 3 etapas, tal como es mostrado en la Figura 4.2. Cada una de ellas desempeñando funciones específicas para

obtener las mediciones de una forma más precisa. Estas etapas son desarrolladas de forma más profunda a continuación.

4.1.1 Etapa de antena.-

Debido a la banda seleccionada (Banda UHF), se seleccionó una antena que permita monitorear dicho segmento de espectro. Para lo cual, se escogió una antena de tipo Discone SIRIO SD-3000 N (ver ANEXO) hecha de aleación de aluminio, cromo acero inoxidable y Nylon. Posee polarización vertical y patrón de radiación omnidireccional con una ganancia de 0 dBd (2.2 dBi). Por otra parte, tiene un rango de 300 a 3000 MHz, lo cual permite capturar sin problemas la banda UHF-TV (512 – 698 MHz).

4.1.2 Etapa de Radiofrecuencia y Captura.-

Con el objetivo de realizar la captura sin la necesidad de causar pérdidas extremadamente grandes se usó un cable Wilson 400 de ultra baja pérdida con 100ft de longitud, el cual provee una atenuación menor a 2 dB.

Adicionalmente, el equipo usado en la medición fue el USRP N-210 de marca Ettus Software, el cual es un dispositivo lógico programable con la capacidad de trabajar en múltiples bandas.

Debido a la banda a ser sensada, se colocó al USRP N-210 la tarjeta WBX, que permite medir en un rango amplio de frecuencias (50 – 2200 MHz), con un ancho de banda máximo de 40 MHz.

La comunicación con este dispositivo es a través de un cable Giga bit-Ethernet el cual permite la transmisión de información a 400 MSamples/s para luego ser sub-muestreada a la tasa requerida (6 MSamples/s).

Gracias a la versatilidad del dispositivo para poder cambiar su frecuencia de operación, es posible monitorear la potencia por canal, lo cual permite reducir el ruido térmico ingresado por el ancho de banda recibido y aumentar la sensibilidad del sistema.

Del mismo modo, el USRP-N210 posee un amplificador de ganancia ajustable (0-31 dB), el cual permite recibir la señal de mejor forma.

4.1.3 Etapa de Control.-

En esta etapa, se supervisa que el proceso se realice con normalidad, obteniendo los datos desde el USRP hacia la PC (ver Figura 4.3). Cada medición es almacenada en un archivo de Excel (.xlsx) con el objetivo de poder grabar todos los datos sin pérdidas.

Se puede observar en la Figura 4.3, que los datos capturados por el USRP son enviados vía Gigabit Ethernet a la PC, la cual corre un algoritmo en la plataforma Labview. A través de este algoritmo se realiza la captura de la información canal por canal, para luego ser guardado en un archivo de Excel. A continuación se detalla el algoritmo usado para la captura de datos en el USRP.

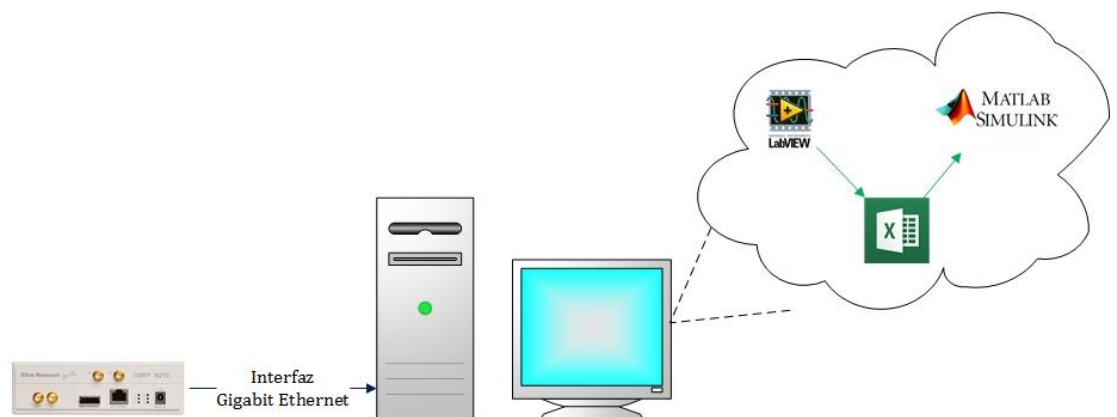


Figura 4-3: Etapa de Control

Algoritmo de medición

En el USRP N-210, se ha implementado un algoritmo el cual permite monitorear el nivel de potencia de los canales de la banda en análisis. El pseudocódigo mostrado en la Tabla 4, presenta el algoritmo usado para la captura de datos. Como insumos para este procedimiento se necesita: frecuencia inicial (f_1), frecuencia final (f_N), correspondientes a la banda UHF-TV, el tiempo de muestreo por canal (T_s), que es el tiempo entre muestras de dos canales consecutivos, tiempo de

muestreo del canal (T_c), tiempo entre muestras del mismo canal, velocidad de muestreo de canal (f_s), ganancia del equipo (G), dirección IP (IP), estado del programa ($State$) y el número de canales de la banda (N). Como resultado de este algoritmo se tiene un archivo por canal (S_i) el cual contiene el nivel de potencia medido del mismo (Pr_{f_i}). El algoritmo comienza con la configuración de parámetros iniciales del USRP-N210 como dirección IP (IP), ganancia (G), frecuencia inicial (f_1) y velocidad de muestreo (f_s) necesarios para la comunicación con la PC. Luego se inicializan el contador de canal (i) para el muestreo del canal (line 2). Después se inicia el programa el cual consiste en el escaneo canal por canal de los niveles de potencia (line 3-5). Cuando el canal es seleccionado para la medición, la captura se realiza durante T_s segundos, el resultado es guardado en una variable temporal el cual servirá para su almacenamiento en el documento S_i respectivo, al final de este proceso la variable contador es actualizada para su siguiente iteración (line 6-11). Cuando el contador i llega a su valor máximo, es decir N , se reinicia a uno, esto con el objetivo que el proceso sea ininterrumpido hasta que el usuario detenga el algoritmo cambiando el valor de la variable $State$ a 1. (line 12).

Tabla 4: Pseudocódigo de Captura

<p>Entradas: $f_1, f_N, f_S, T_c, N, G, IP, State$</p> <p>Resultados: Archivos por canal con: Frequency and Power</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La comunicacion entre el USRP y la PC es establecida. 2. $i=1$; el contador de canal es inicializado 3. while $State \neq 1$ Se mantiene en estado de captura hasta que el usuario decida ($State$). 4. while $i \leq N$ 5. Comenzar el escaneo de canal i; 6. while $t \leq T_c$ 7. $Temp = (f_i, P_{R,i})$; ; informacion de la medicion correspondiente al canal i son almacenados en una variable temporal $Temp$. 8. End 9. Save in S_i 10. $i=i+1$; 11. End 12. $i=1$; se reinicia el contador de canales cuando se ha llegado al máximo, para la siguiente captura 13. End
--

Con el escenario descrito y las subrutinas de captura de potencia por canal detallada, es necesario describir las métricas que permitirán obtener los resultados del presente trabajo.

Con el sistema de captura descrito y las métricas a utilizar detalladas, se procederá a realizar el análisis y modelamiento utilizando los datos obtenidos a través de los sistemas antes descritos.

Capítulo 5

5. EXPERIMENTACIÓN Y ANALISIS DE DATOS

5.1 Configuración del Sistema.-

En el presente capítulo se mostrarán los parámetros usados en la configuración de los equipos para la medición de potencia de los canales de la banda UHF-TV; así también se describirá el sitio de la medición. Posterior a la descripción detallada del escenario de medición se realizará el análisis de potencia de la banda UHF-TV, que permitirán a su vez determinar la disponibilidad temporal y así poder generar los modelos estocásticos y de predicción. Finalmente, se realizará un análisis en base a los resultados

obtenidos con miras a determinar la capacidad total ofrecida por la banda en el sitio de medición.

5.1.1 Localización geográfica y duración de la medición.-

Dadas las condiciones que debía cumplir el escenario de estudio, se escogió una zona industrial comercial con alta concentración de edificios. La edificación escogida tiene 4 pisos de los cuales se procedió a realizar el proceso de medición tanto en la planta baja como en la azotea, esto con el objetivo de poder determinar la disponibilidad en el escenario. Esta medición se la realizó durante una semana tanto en la planta baja como en la azotea. La localización de la edificación es en el centro de la Guayaquil (Latitud $2^{\circ}13'12.94''S$ y Longitud $79^{\circ}53'12.74''W$) (Ver Figura 5.1).

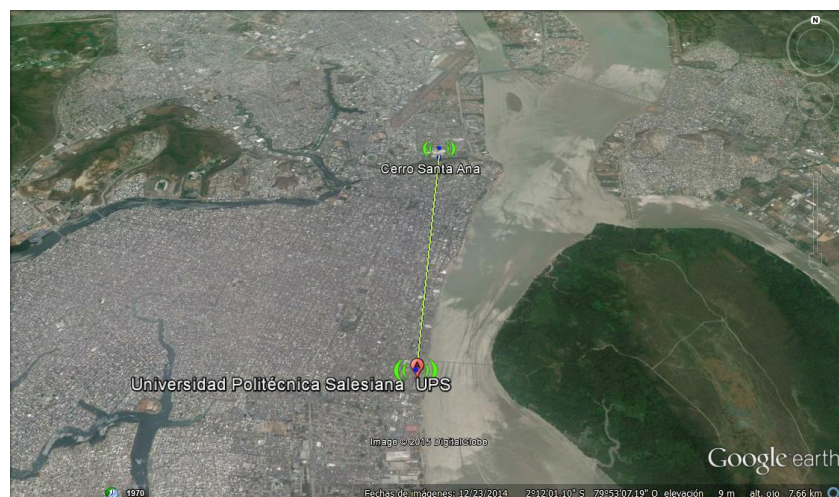


Figura 5-1: Localización del Escenario de Estudio

Se usó la herramienta RMPATH, para determinar las condiciones orográficas del medio con miras a determinar si existe algún problema debido a la curvatura de la Tierra.

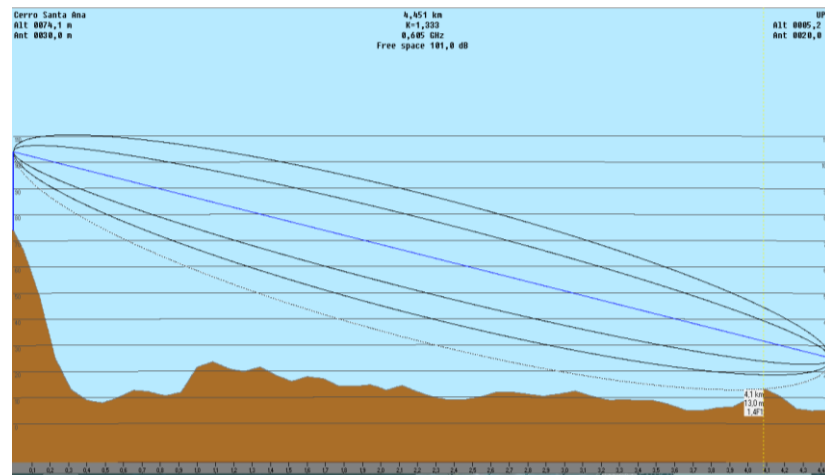


Figura 5-2: Perfil de Propagación del Escenario

En la figura 5.2 se puede observar el perfil de propagación, que muestra que no existen obstáculos importantes al momento de la transmisión de la señal desde las torres de transmisión localizadas en el Cerro Santa Ana de la ciudad de Guayaquil (Latitud $2^{\circ}10'49''S$ y Longitud $79^{\circ}52'58.25''W$).

5.1.2 Parámetros de Configuración.-

Con miras a poder desarrollar el experimento se estableció la banda de análisis en la banda UHF-TV en el Ecuador, la cual se extiende desde los 512 MHz a los 698 MHz (i.e canales del 21 al 51). Cada canal consta con un ancho de 6 MHz, como se mencionó en el Capítulo 2.

Tabla 5: Parámetros de configuración

Parámetros	Valores
Ancho de Banda, BW	512-698 MHz
Ancho de banda del canal, Δf	6 MHz
Frecuencia inicial, f_0	512 MHz
Frecuencia Final, f_N	698 MHz
Canal Inicial, Ch_1	21
Canal Final, Ch_N	51
Numero de canales, N	31
Numero de muestras (Disponibilidad), N_s	25
Potencia umbral [27], λ	-75 dBm
Tiempo de captura por canal, T_c	0,24 s
Tiempo de muestreo por canal, T_s	7,2 s

Por tal motivo se muestra en la Tabla 5 los parámetros necesarios para la configuración del USRP. El número de muestras de canal (N_s) que se tomarán en consideración para el cálculo de disponibilidad. Adicionalmente se determinó los tiempos de captura por canal (T_s) y por banda (T_c), los cuales son de vital importancia al momento de

determinar la granularidad de la variable de disponibilidad. Debido a que la medición se la realizó canal por canal, el USRP fue configurado para medir la potencia de la portadora de luminancia en el caso de los canales analógicos, debido a que esta componente es la de mayor potencia en la señal de TV analógica. Por otra parte en el caso de los canales digitales se monitorearon los 13 segmentos de la banda en miras a encontrar si alguno de los segmentos presentaba altos niveles de potencia, al final al momento de cambiar la configuración el equipo se configura automáticamente en el canal contiguo, es decir se mueve una distancia de Δ_f .

5.2 Análisis de datos del Escenario

Como fue explicado en el capítulo 4, el procedimiento consta de una etapa de medición, donde se realizan múltiples captura de información durante un lapso de 1 semana para luego ser procesados. La información fue obtenida en 2 puntos de captura: la planta baja y la azotea con miras a tratar los 2 peores casos. A continuación se detallarán los resultados obtenidos de los canales de la banda UHF-TV ($Ch_1=21$ - $Ch_N=51$).

5.2.1 Análisis temporal de los datos.-

En las Figura 5.3 y 5.4 se puede observar los niveles de potencia de la planta baja y la azotea respectivamente. Podemos observar en la gráfica la variación de niveles de la potencia recibida, lo cual es representado a través de colores. El color rojo representa los niveles de potencia más elevados mientras que el azul representa los niveles más bajos.

En el caso de la planta baja se puede observar en general que los canales presentan una tonalidad predominantemente azul, esto permite inferir que existe una gran disponibilidad de canales en dicha zona.

En la Figura 5.3 se observa que durante el transcurso de la semana de medición, ciertos canales como el 31, 41, 47 y 49 presentan niveles extremadamente bajos ($P_{R_{Ant}} \leq -85dBm$) y no existe mucha variabilidad de los mismos, lo que permitiría concluir que son disponibles para uso de sistemas con Acceso Oportunista al Espectro (OSA). De la misma forma, canales como el 24 y el 30 presentan niveles relativamente elevados durante la semana ($P_{R_{Ant}} \approx -50dBm$). Si este nivel es comparado con el umbral ($\lambda = -75dBm$), se puede observar que en la mayoría del tiempo estos canales no están disponibles para uso.

Adicionalmente existen canales que tienen niveles muy cercanos al valor del umbral, como los canales 22, 34, 35 y 42 presentan niveles de potencia promedio $P_{R_{Avt}} \approx -75dBm$ pero con gran variabilidad, lo cual da como resultado intermitencia, es decir en ciertos lapsos de tiempo el canales se encuentran disponibles mientras que en otros no lo está.

Tomando como ejemplo el canal 34 se observa que durante el día en ciertos lapsos de tiempo el nivel de potencia se eleva ($P_{R_{Avt}} \approx -55dBm$), lo cual se observa como segmentos de color amarillo en la franja correspondiente al canal, sin embargo en otros instantes del día se puede apreciar tonalidades celestes y/o azules, lo cual indica un nivel de potencia inferior al umbral, es decir el canal presenta disponibilidad para el despliegue de sistemas con OSA.

Figura 5-3: Niveles de Potencia en la banda UHF-TV (Planta Baja)

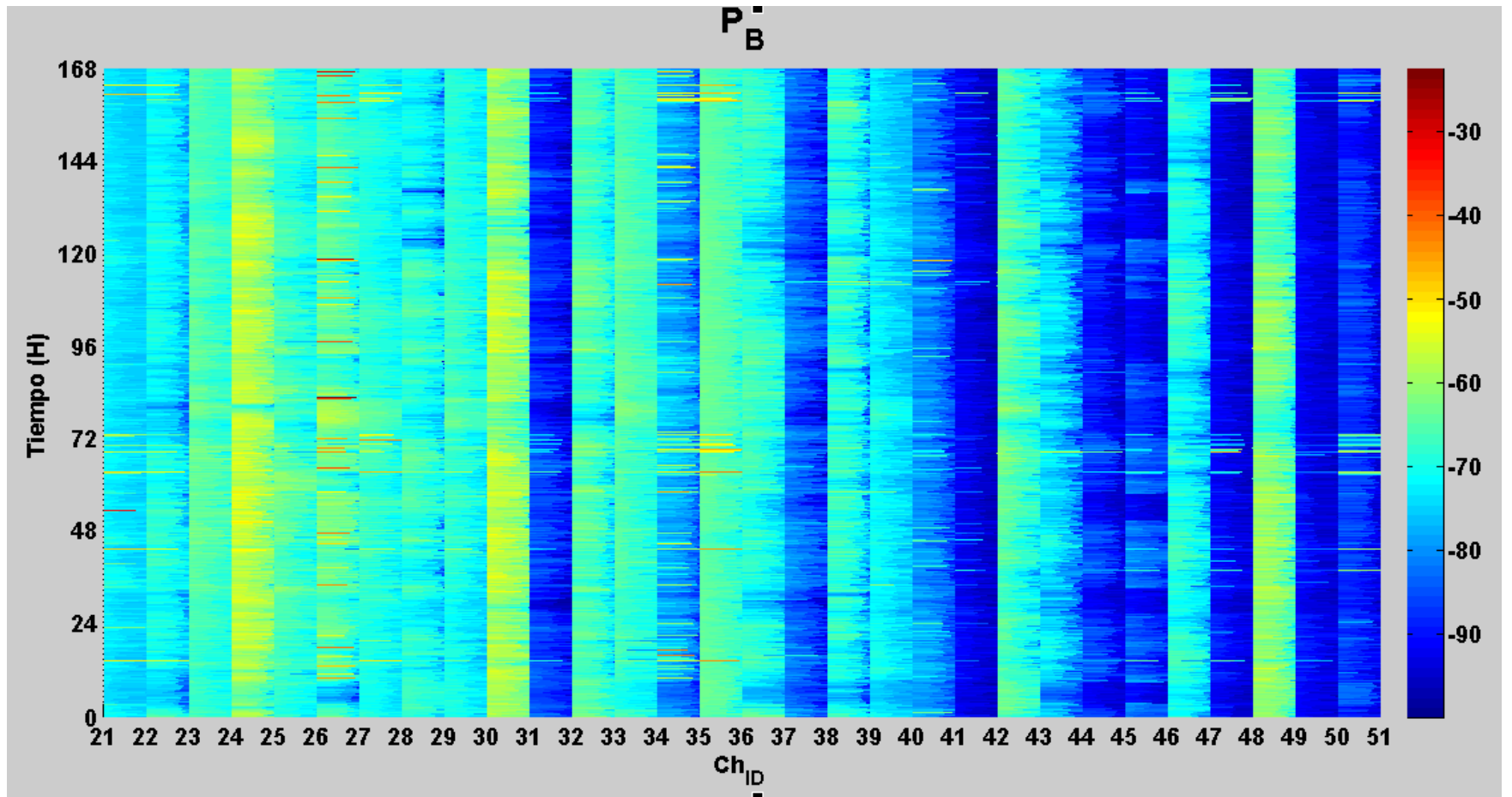
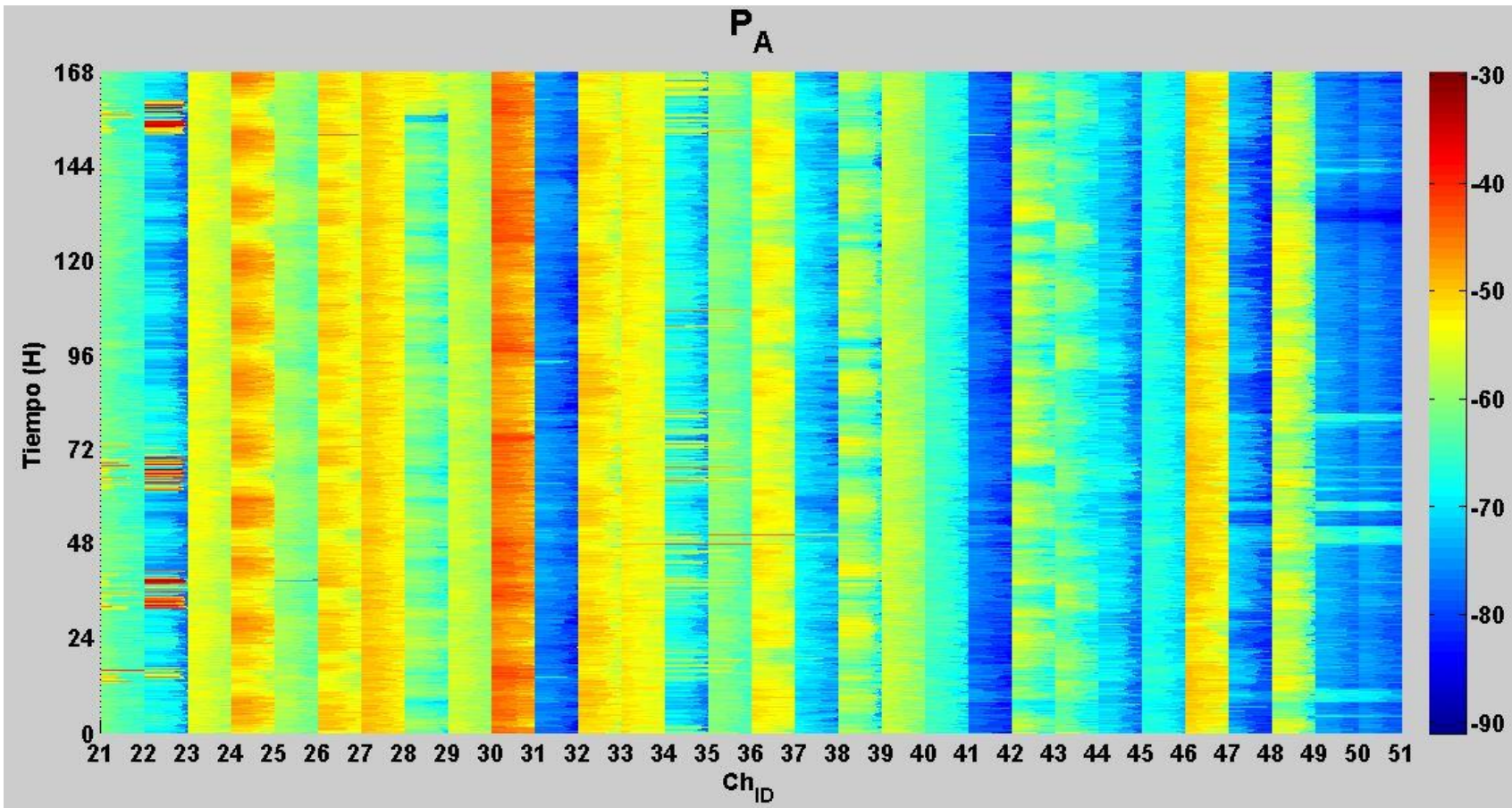


Figura 5-4: Niveles de Potencia en la banda UHF-TV (Azotea)



En el caso de la Figura 5.4, se realiza el mismo análisis desarrollado con los datos de la planta baja, sin embargo debido al lugar, las mediciones fueron distintas. La mayoría de los canales presentan niveles elevados ($-40dBm \leq P_R \leq -60dBm$), lo cual implica que en la mayoría del tiempo la disponibilidad de estos canales será muy pequeña. Un ejemplo de este comportamiento lo tienen los canales 23, 24, 27, 30. Estos altos niveles son representados en la gráfica por una tonalidad amarilla, naranja o roja dependiendo del nivel de la señal en dichos canales. Otros canales como 22, 28, 34 y 42 presentan niveles comparables con el umbral, lo que permite que exista disponibilidad mayor.

Dado este análisis se puede observar el comportamiento temporal que tiene la disponibilidad de los canales en los diferentes puntos de medición.

En la Figura 5.5, se muestra la disponibilidad de canales en la planta baja. En los canales cuyo nivel de potencia es extremadamente bajo como el 31, 41, 47 y 49 la disponibilidad es extremadamente alta, esto es demostrado con la tonalidad roja de estos canales. Ciertos canales como el 21, 28, 32 y 38 muestran niveles de disponibilidad intermitentes, lo cual es consecuencia de los niveles de potencia muy cercanos al umbral.

Los canales 21 y 38 muestran una tendencia a permanecer más disponible, por motivo de que a pesar de su intermitencia tienen largos lapsos de tiempo donde el canal no es usado, esto es representado con la tonalidad rojiza del canal. En el caso de los canales 28 y 32, se observa una tonalidad azulada, lo cual implica que la disponibilidad de estos canales tienden a ser reducida, tomando en consideración que en ciertos lapsos de tiempo hay un cierto nivel de disponibilidad. Existen canales como 23, 33 y 35 donde la disponibilidad es extremadamente baja, lo que es producto de sus niveles elevados de potencia en el punto de medición.

Por otra parte, en la azotea se observa que la disponibilidad cambia drásticamente debido a que no existe obstáculo en la trayectoria del haz hasta este punto. Los canales 31 y 41 presentan una tonalidad rojiza, lo cual implica disponibilidad total, en canales como 21, 23, 26, 27 y 30 la disponibilidad es nula, hecho que es representado con la tonalidad azul en todo el lapso de la medición. De la misma forma, canales como el 22, 34, 38 y 44 muestran niveles variables de disponibilidad, debido a sus tonalidades variables, esto se debe a los niveles de potencia cercanos al umbral que se monitorearon en dichas bandas de frecuencia. Este tipo de comportamiento puede ser ocasionado debido a que la estación emisora de dichos canales puede encontrarse lejos del escenario de estudio.

Figura 5-5 Disponibilidad temporal de los canales de la banda UHF-TV en la planta baja

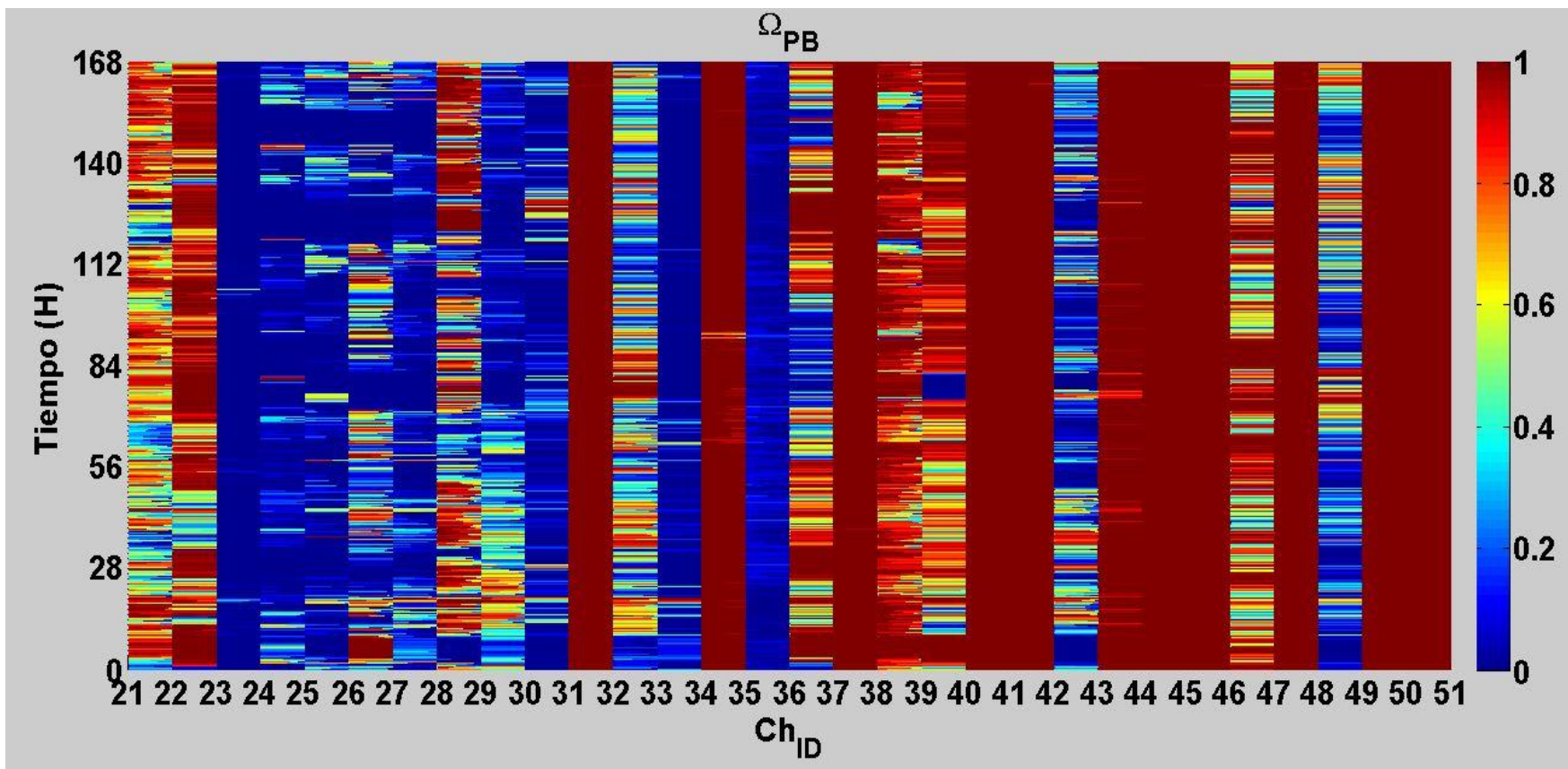
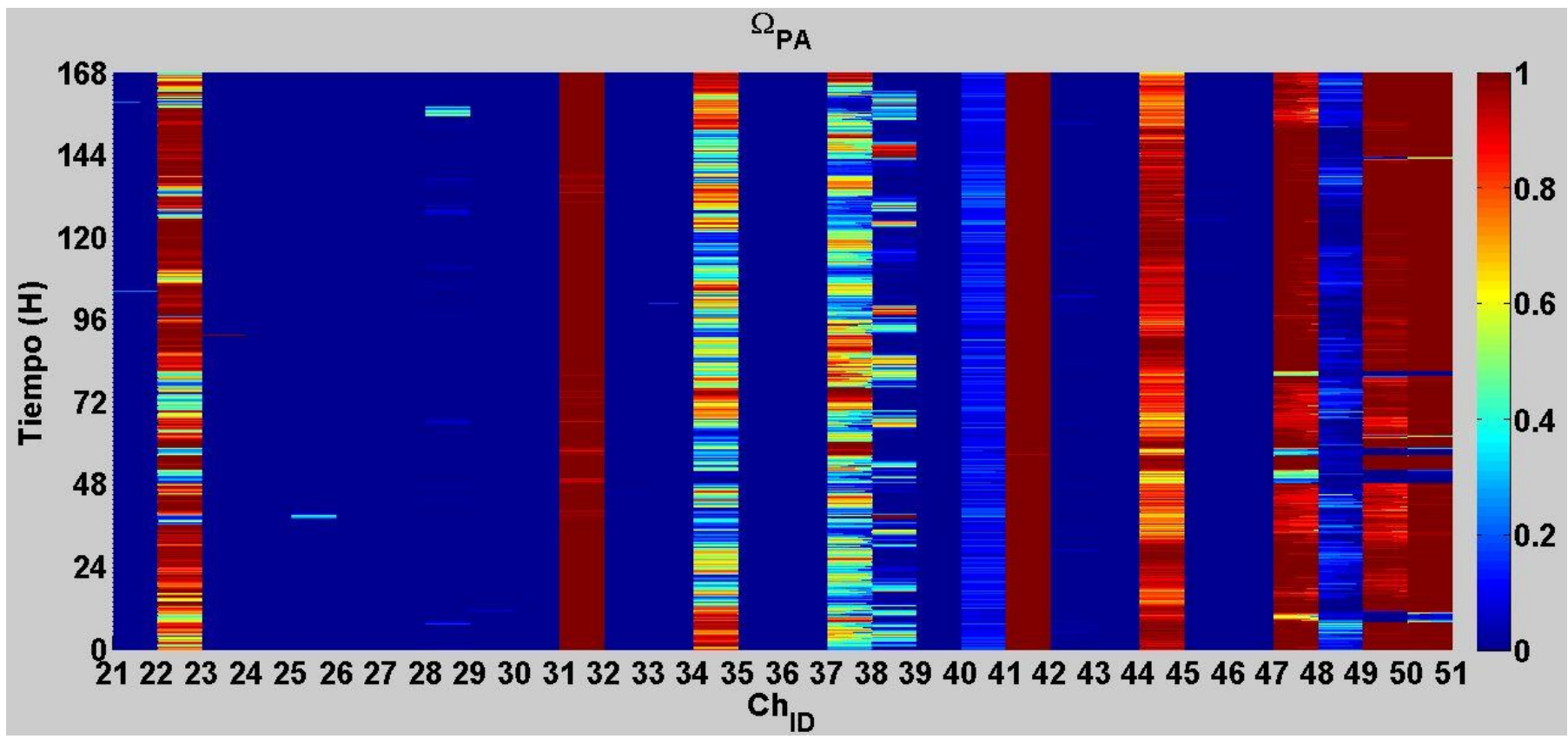


Figura 5-6 Disponibilidad Temporal de los canales de la banda UHF-TV en la azotea



En la Figura 5.6 se puede determinar en primera instancia cuáles son los canales que pueden ser tomados en cuenta para el desarrollo de un sistema OSA. Dado este factor, se puede analizar desde la gráfica que todos los canales en un lapso de tiempo pueden ser considerados como disponible, excepto los canales 23 y 35, debido a su nivel extremadamente bajo de disponibilidad.

5.2.2 Modelamiento estocástico de los datos.-

En referencia al análisis temporal de los datos efectuado en el inciso anterior, se procederá a realizar un análisis holístico de la banda tanto en planta baja como en la azotea.

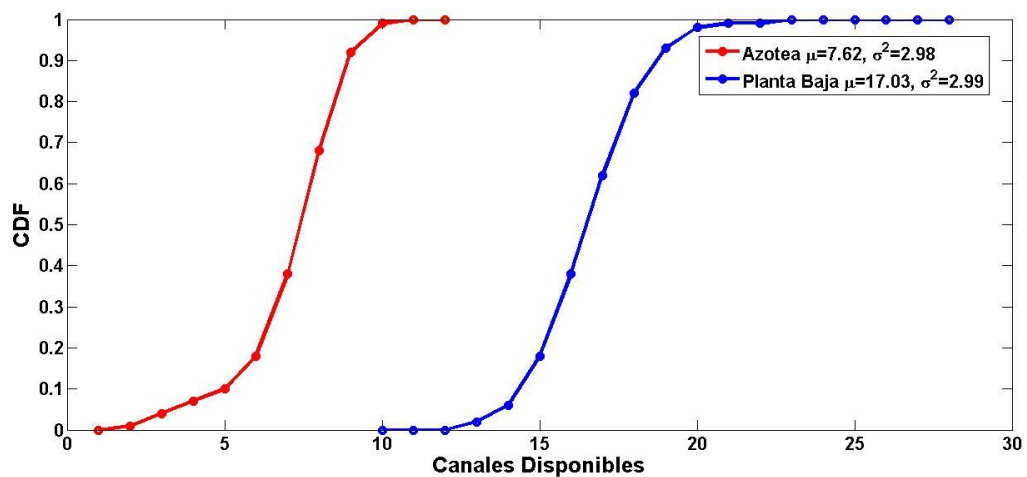


Figura 5-7 Número de canales disponibles al mismo tiempo

Como se observa en la Figure 5.7, la CDF del número de canales disponible en un instante de tiempo, en donde la gráfica azul representa la medición en la planta baja mientras que la roja representa la medición en la azotea de la edificación. Se aprecia que la disponibilidad en la planta baja es mayor, la media de canales disponibles en la planta baja es de 17 canales (102 MHz) y se pueden obtener entre 15 y 19 canales (90 – 114 MHz) con un 87.11% de probabilidad de ocurrencia. En otras palabras existen entre 90 y 114 MHz para uso de sistemas con OSA, lo que permitiría el desarrollo de servicios con gran ancho de banda.

En el caso de la azotea, se observa que la disponibilidad es relativamente baja ya que en promedio ofrece 7 canales disponibles (42 MHz) y entre 6 y 10 canales (36 – 60 MHz) con una probabilidad de ocurrencia del 88.57%. Es decir, que existen disponibles entre 36 y 60 MHz de espectro en un 88.57% del tiempo, el cual puede también ser considerado para uso de sistemas con OSA en dicho punto. Cabe recalcar, que dichas mediciones aunque fueron realizadas en puntos distintos, presentan varianzas extremadamente similares, lo cual permite concluir que el efecto espacial respecto a la CDF es el desplazamiento de la misma hacia la derecha.

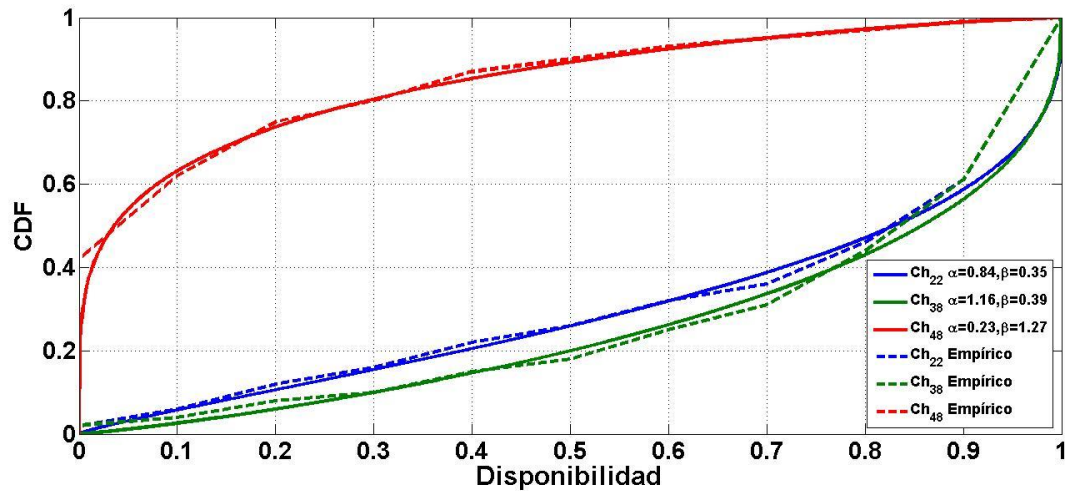


Figura 5-8 Modelamiento Estadístico de la disponibilidad de canales de la banda UHF-TV en la planta baja

En base a los datos empíricos obtenidos por el sistema de captura, se seleccionaron los canales 22, 38 y 48 medidos desde la planta baja para poder probar la fiabilidad del modelo. Se puede observar que en la Figura 5.8 las distribuciones de probabilidad acumulada de los datos empíricos y del modelo propuesto en el cual se observa una gran similitud entre ellos, esto permite corroborar de primera mano que el modelo permite representar el comportamiento estadístico de la disponibilidad de un canal.

Además se observa que los valores de α y β pueden variar dependiendo del comportamiento del canal. Por ejemplo, si el canal posee baja disponibilidad (canal 48), el valor de α es muy cercano a 0 y la forma de la distribución acumulada es cóncava, lo cual permite

observar que en valores bajos de disponibilidad, el valor de la cdf es alto. Por el contrario, si el canal tiene gran disponibilidad (canal 22 y 38), el valor de α se incrementa y la forma de la cdf es ahora convexa, lo cual permite observar que a valores pequeños de disponibilidad el valor de la cdf es también pequeño. Para comprobar matemáticamente el modelado se utilizó el modelo KS de bondad de ajuste para determinar la fiabilidad del esquema propuesto, (ver ANEXOS).

Sin embargo, cómo fue expuesto en los gráficos de datos experimentales, algunos canales no cumplen con las condiciones establecidas en las ecuaciones (1) y (2) para ser considerados como disponibles, por lo que es necesario recurrir a la restricción descrita en la ecuación (3), para comprobar si los canales que cumplieron con el requisito anterior pueden ser usados para un sistema con OSA.

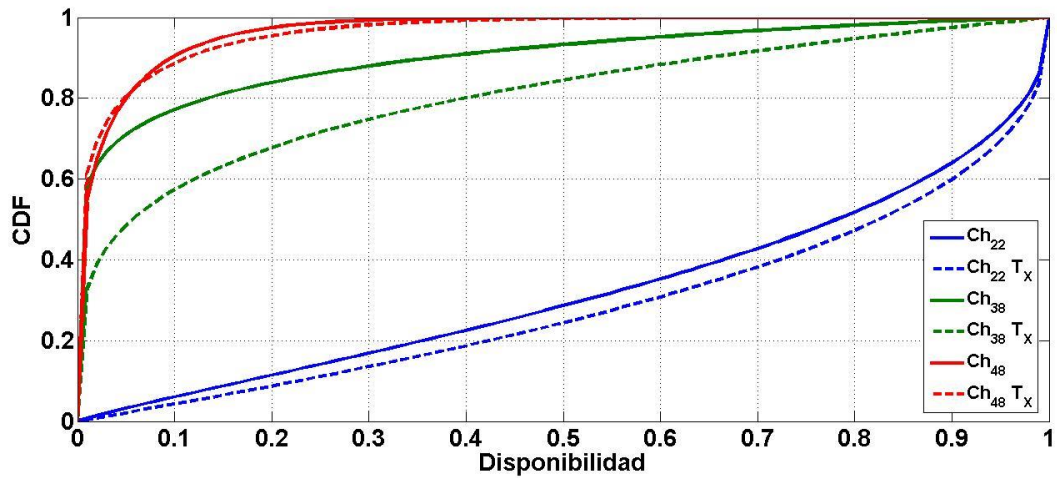


Figura 5-9 CDF de la disponibilidad de canales de la banda UHF-TV en la azotea

En la Figura 5.9 se observa la disponibilidad de los canales en la azotea del edificio antes y después de la transmisión del SU en la planta baja. Los canales 22 y 48 no muestran grandes variaciones en el comportamiento de la disponibilidad ya que la CDF de cada canal antes de la transmisión (líneas roja, verde, azul llanas), es muy similar disponibilidad durante la transmisión (líneas roja, verde y azul segmentadas). Consecuentemente, se puede deducir que en estos canales el efecto de la transmisión del SU no afecta la disponibilidad de estos canales. Sin embargo, en el caso del canal 38 (línea verde), la disponibilidad presenta variaciones considerables antes y durante la transmisión. Lo cual implica que la condición expresada en la ecuación (3) no se cumple, no obstante no significa que los canales no sean utilizables para sistemas con OSA, por el contrario, lo que se debe hacer

es reajustar los parámetros de transmisión del equipo para que la señal del SU no afecte al PU.

5.2.3 Modelo Predictivo Markoviano en base a los datos.-

A través del modelo propuesto existe la posibilidad de poder conocer el tiempo de transmisión que puede tener un dispositivo dentro del canal, por lo cual en la Figura 5.10, se aprecia la distribución acumulada de los espacios en blanco consecutivos contrastada con la distribución acumulada de los datos empíricos. Esto permite determinar en cuánto tiempo el canal puede permanecer disponible de manera ininterrumpida para realizar sus operaciones. En todos los casos, el modelo propuesto muestra valores cercanos a los datos empíricos, sin embargo existen ciertas discrepancias en el lapso de entre 4 y 10 tiempos de slot consecutivos. Sin embargo, gracias a este modelo es posible determinar el tiempo máximo que puede tener una transmisión dentro de un canal para OSA. Por ejemplo, el canal 48 ofrece hasta 20 periodos consecutivos (2 min 46 s), en cambio los canales 22 y 38 puede ofrecer más de 50 periodos consecutivos (6 min), lo cual guarda relación con el modelo estadístico mostrado en la Figura 5.10.

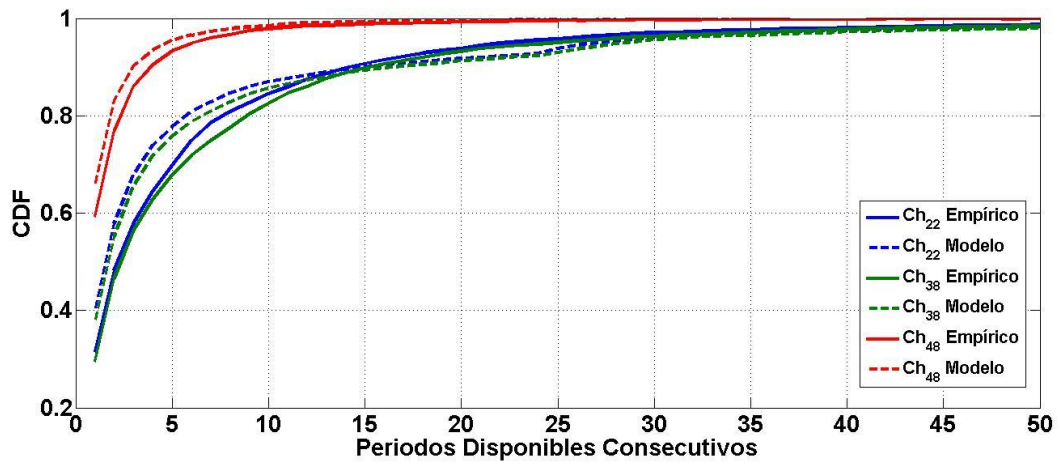


Figura 5-10 Modelado de tiempo de disponibilidad de espacios en blanco en la planta baja

En ANEXOS, existe una tabla en la cual se aprecia la relación entre el resultado del modelo propuesto y el tiempo máximo de disponibilidad, en el cual se concluye que a medida que la disponibilidad aumenta, los periodos de disponibilidad se alargan lo cual permite una transmisión ininterrumpida y sin problemas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) En este trabajo se ha demostrado un modelo para la disponibilidad de canal en zonas urbanas densas. Una característica novedosa es que toma en consideración el efecto espacial en el espectro, lo cual permite mejorar la toma de decisión de canales para el uso de sistemas con OSA.
- 2) A través de la medición espectral de la banda UHF para TV se logró detectar que existen en promedio 17 canales disponibles para ser utilizados, lo cual es equivalente a 102 MHz. El ancho utilizable oscila entre 90 y 114 MHz con un 87,11% de probabilidad de ocurrencia.
- 3) Dada la disponibilidad, existe la posibilidad de desplegar sistemas con cobertura de pico y femtoceldas (sistemas celulares o WLAN) siempre que la potencia emitida por estos sistemas no afecte al usuario primario.

- 4) Dado el modelado estadístico, se observa una relación entre el valor del parámetro α y el tiempo promedio de disponible del canal, sin embargo, esto es válido sí $\beta \rightarrow 0$.
- 5) Los resultados obtenidos pueden ser usados en el desarrollo de nuevos tipos de dispositivos inalámbricos con miras a tecnologías celulares (LTE o UMTS), que puede incurrir el desarrollo de equipo para femtoceldas con capacidad de trabajar en múltiples bandas o equipos para redes WLAN.
- 6) Esta investigación puede ser el preámbulo para la creación de equipos con la metodología de Green Communications, los cuales podrían acceder a una banda de radio óptima que les permita minimizar el consumo de energía.
- 7) En futuros trabajos derivados se analizará y modelara el efecto espacial sobre la cantidad de canales disponibles totales dentro de un edificio, lo cual permitirá describir mejor dicho efecto.
- 8) Adicionalmente, se analizará el efecto de la parametrización en el modelado de disponibilidad de canal.
- 9) Por último, se puede realizar una comparativa entre diferentes técnicas de modelado como Modelado Markoviano Oculto (HMM) o Modelo de Decisión Markoviano Parcialmente Observable (POMDP), en el cual se determine cuál permite un mejor ajuste a las características de los escenarios indoor.

ANEXOS

Calcular_AV.m

```
Av_mean=[];
Av_var=[];

for i=1:31
    x=State(:,i);
    y=mean(reshape(x(1:62675),25,2507))';
    z=var(reshape(x(1:62675),25,2507))';
    Av_mean=[Av_mean y];
    Av_var=[Av_var z];
end
```

Rellenar.m

```
[k l]=size(Pot);
for i=1:l
    temp=Pot(:,i);
    for j=1:length(temp);
        if temp(j)==0 || isnan(temp(j))
            temp(j)=temp(j-1);
        end
    end
    Pot(:,i)=temp;
end
```

cont_temp.m

```
function [cuenta] = cont_tem(a)
cuenta=[];
temp=0;
for i=1:length(a)
    if a(i)==1
        temp=temp+1;
    elseif temp~=0 || i==length(a)
        cuenta=[cuenta;temp];
        temp=0;
    end
end
if temp~=0
    cuenta=[cuenta;temp];
end
```

idle_time.m

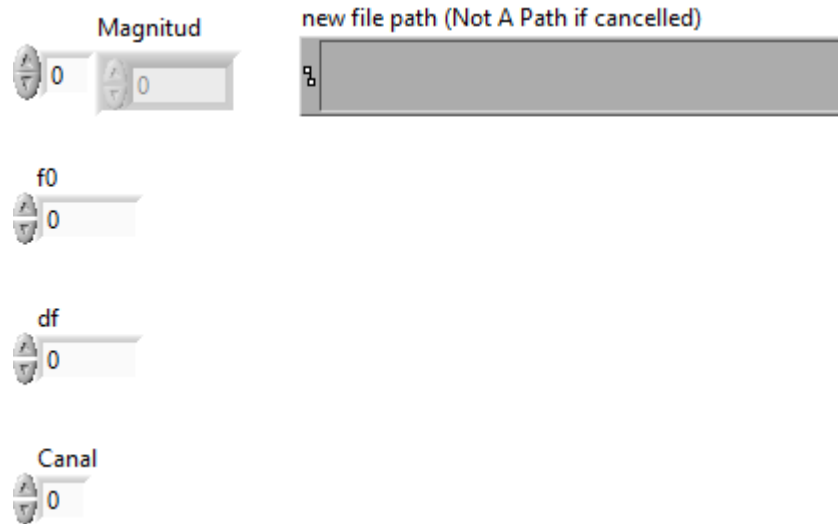
```
function [sal]=idle_time(a,b,m)
Availability=betarnd(a,b,m,1);
y=[];
```

```

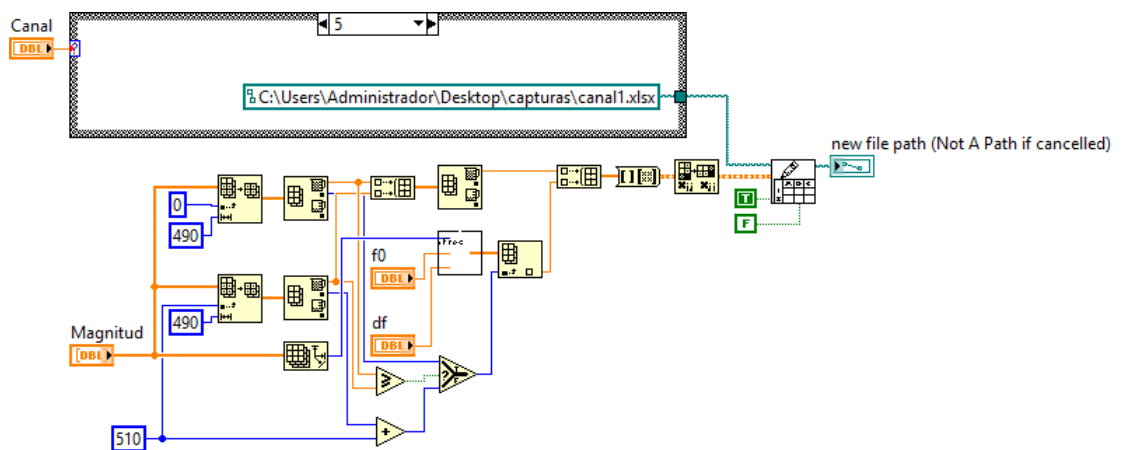
for i=1:m
    x=binornd(1,Availability(i),25,1);
    y=[y;x];
end
sal=cont_tem(y);

```

Grabar.vi

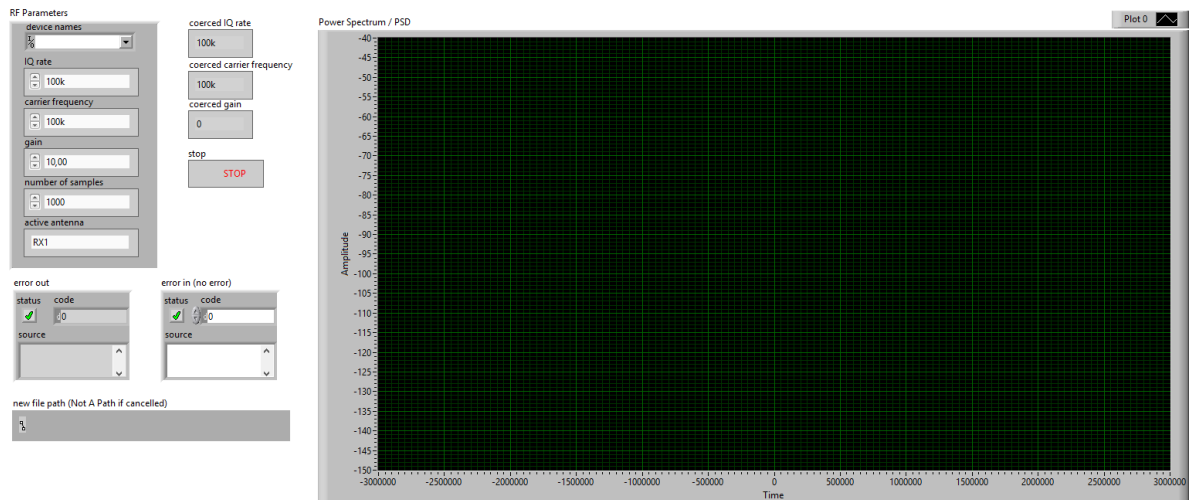


Anexo 1 Panel Frontal Grabar.vi

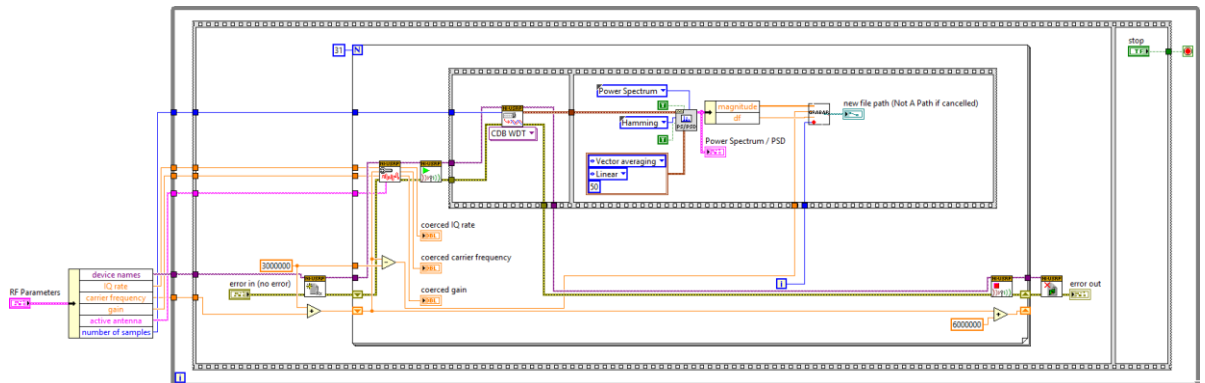


Anexo 2 Diagrama de Bloques Grabar.vi

Rx.vi

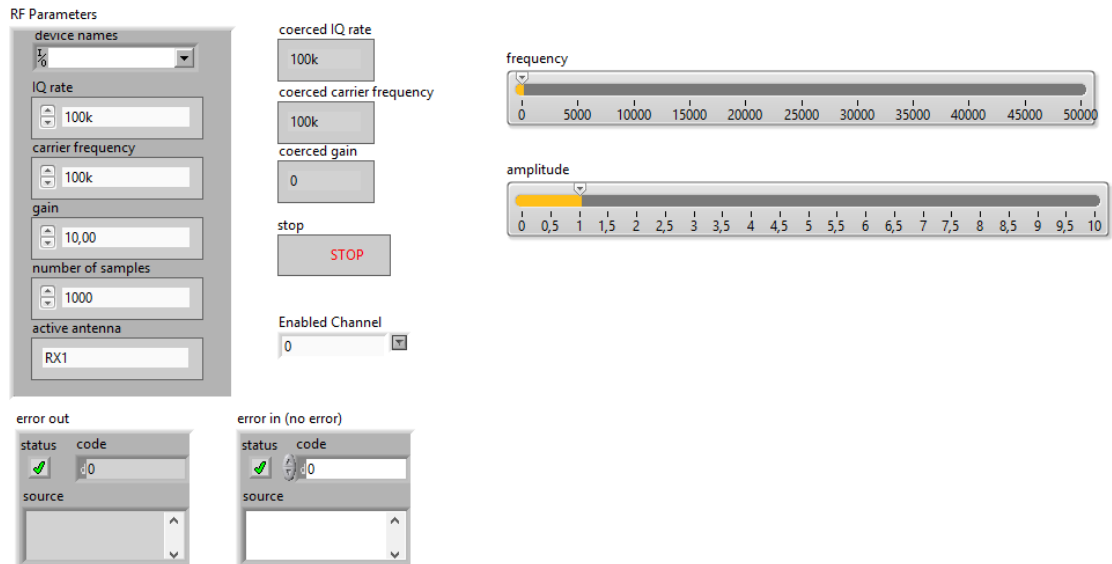


Anexo 3 Panel Frontal Rx.vi

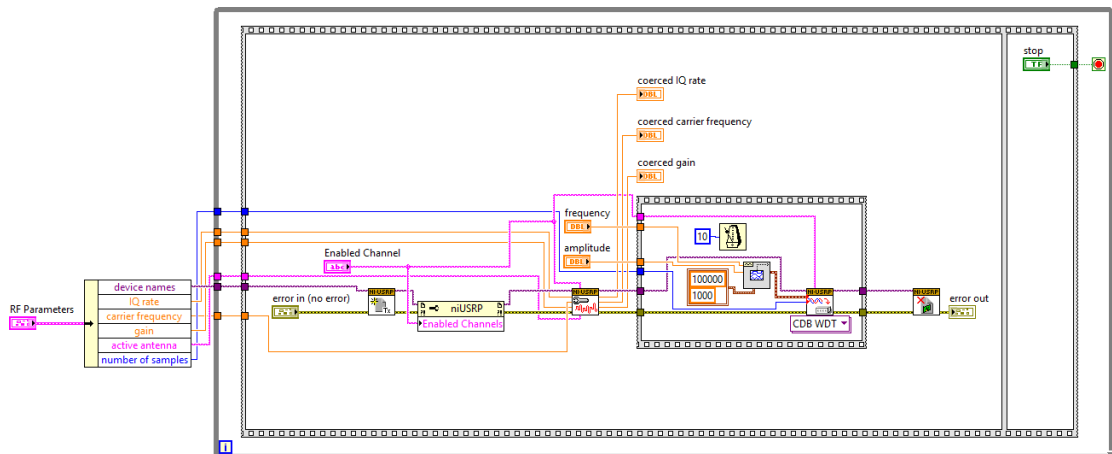


Anexo 4 Diagrama de Bloques Rx.vi

Tx.vi



Anexo 5 Panel Frontal Tx.vi



Anexo 6 Diagrama de Bloques Tx.vi

Tabla 6 Tabla de Canalización de las bandas asignadas a los sistemas de Televisión en Ecuador

Banda ITU	CANAL		PORTADORAS	
	No.	Rango de Frecuencias (MHZ)	Video (MHz)	Audio (MHz)
VHF	2	54-60	55,25	59,75
	3	60-66	61,25	65,75
	4	66-72	67,25	71,75
	5	76-82	77,25	81,75
	6	82-88	83,25	87,75
	7	174-180	175,25	179,75
	8	180-186	181,25	185,75
	9	186-192	187,25	191,75
	10	192-198	193,25	197,75
	11	198-204	199,25	203,75
	12	204-210	205,25	209,75
	13	210-216	211,25	215,75
	UHF	21	512-518	513,25
22		518-524	519,25	523,75
23		524-530	525,25	529,75
24		530-536	531,25	535,75
25		536-542	537,25	541,75
26		542-548	543,25	547,75
27		548-554	549,25	553,75
28		554-560	555,25	559,75
29		560-566	561,25	565,75
30		566-572	567,25	571,75
31		572-578	573,25	577,75
32		578-584	579,25	583,75
33		584-590	585,25	589,75
34		590-596	591,25	595,75
35		596-602	597,25	601,75
36		602-608	603,25	607,75
37	608-614	Radioastronomía		
38	614-620	615,25	619,75	
39	620-626	621,25	625,75	

40	626-632	627,25	631,75
41	632-638	633,25	637,75
42	638-644	639,25	643,75
43	644-650	645,25	649,75
44	650-656	651,25	655,75
45	656-662	657,25	661,75
46	662-668	663,25	667,75
47	668-674	669,25	673,75
48	674-680	675,25	679,75
49	680-686	681,25	685,75
50	686-692	687,25	691,75
51	692-698	693,25	697,75

Tabla 7 Estaciones de Televisión Analógica asignadas en el Ecuador

Estación	Frecuencia (MHz)	Canal	Tipo	Area Servida	Concesionario
CORPORACION ECUATORIANA DE TELEVISION	54-60	2	M	GUAYAQUIL	CORPORACION ECUATORIANA DE TELEVISION S.A.
RED TELESISTEMA (R.T.S)	66-72	4	M	GUAYAQUIL Y ALREDEDORES	TELECUATRO GUAYAQUIL C.A.
TELEAMAZONAS GUAYAQUIL	76-82	5	M	GUAYAQUIL	TELEAMAZONAS GUAYAQUIL S.A.
ECUADOR TV	174-180	7	R	GUAYAQUIL	EMPRESA PUBLICA TELEVISION Y RADIO DE ECUADOR E.P. RTVECUADOR
TELEVISION DEL PACIFICO	180-186	8	R	GUAYAQUIL	TELEVISION DEL PACIFICO S.A. TELEDOS
CADENA ECUATORIANA DE TELEVISION	186-192	9	R	LOS CEIBOS	CADENA ECUATORIANA DE TELEVISION (CANAL 10)
CADENA ECUATORIANA DE TELEVISION	192-198	10	M	GUAYAQUIL, DURAN, MILAGRO.	CADENA ECUATORIANA DE TELEVISION (CANAL 10)
TELEVISION DEL PACIFICO	198-204	11	R	LOS CEIBOS Y ALREDEDORES	TELEVISION DEL PACIFICO S.A. TELEDOS
CANAL UNO	204-210	12	M	GUAYAQUIL	RELAD S.A.
RED TELESISTEMA (R.T.S)	210-216	13	R	LOS CEIBOS	TELECUATRO GUAYAQUIL C.A.
TV LEGISLATIVA	518-524	22	R	GUAYAQUIL	ASAMBLEA NACIONAL
CANELA TV	530-536	24	M	GUAYAQUIL, ELOY ALFARO (DURAN), YAGUACHI, SAMBORONDON	AGUIRRE NAVARRETE CARLOS ISIDRO
TV+ (TVMAS)	542-548	26	M	GUAYAQUIL Y ALREDEDORES	PERONE S.A.
ASOMAVISION	554-560	28	R	GUAYAQUIL	ASO.DE MINISTERIOS ANDINOS ASOMAVISION
COSTANERA TV (RTU)	566-572	30	M	GUAYAQUIL Y ALREDEDORES	MUVESA C.A.
COSTANERA TV (RTU)	572-578	31	R	CEIBOS,PTO.AZUL, OLIVOS,COLINAS	MUVESA C.A.
TELERAMA	578-584	32	R	GUAYAQUIL	TELEVISION ECUATORIANA TELERAMA S.A.
CANAL INTIMAS	590-596	34	M	**GUAYAQUIL	AMERICAVISION S.A.
TELEVISION SATELITAL	602-608	36	M	GUAYAQUIL Y ALREDEDORES	TELEVISION SATELITAL S.A. TV-SAT
RED TV ECUADOR	614-620	38	M	GUAYAQUIL Y ALREDEDORES	TELEVISION INDEPENDIENTE INDETEL S.A.
UCSG TELEVISION	638-644	42	M	GUAYAQUIL	UNIVERSIDAD CATOLICA SANTIAGO GUAYAQUIL

CARAVANA TELEVISION	650-656	44	M	GUAYAQUIL	RADIO CARAVANA S. A.
ABC TV	662-668	46	M	GUAYAQUIL	JUAYATABC TELEVISION S.A.
TELEVISION CIUDADANA	674-680	48	R	GUAYAQUIL	SECRETARIA NACIONAL DE COMUNICACION SECOM
M: Matriz de transmisión					
R: Repetidora					

Tabla 8 Estaciones de Televisión Digital asignadas en el Ecuador

Estación	Frecuencia (MHz)	Canal	Tipo	Cobertura	Concesionario
ECUADOR TV	512-518	21	R	GUAYAQUIL, ELOY ALFARO (DURAN), SAN JACINTO DE YAGUACHI, SAMBORON DÓN	EMPRESA PUBLICA TELEVISION Y RADIO DE ECUADOR E.P. RTVECUADOR
CORPORACION ECUATORIANA DE TELEVISION	524-530	23	M	GUAYAQUIL, ELOY ALFARO (DURAN), MILAGRO, SAMBORON DÓN, SAN JACINTO DE YAGUACHI	CORPORACION ECUATORIANA DE TELEVISION S.A.
RED TELESISTEMA (R.T.S)	536-542	25	M	GUAYAQUIL, SAMBORON DÓN, SAN JACINTO DE YAGUACHI, MILAGRO, ELOY ALFARO (DURAN)	TELECUATRO GUAYAQUIL C.A.
TELEAMAZONAS GUAYAQUIL	548-554	27	M	GUAYAQUIL, ELOY ALFARO (DURAN), MILAGRO, SAMBORON DÓN, SAN JACINTO DE YAGUACHI	TELEAMAZONAS GUAYAQUIL S.A.
CADENA ECUATORIANA DE TELEVISION	560-566	29	M	GUAYAQUIL, ELOY ALFARO (DURAN), MILAGRO, SAMBORON DÓN, SAN JACINTO DE YAGUACHI	CADENA ECUATORIANA DE TELEVISION (CANAL 10)
CANAL UNO	584-590	33	M	GUAYAQUIL, SAMBORON DÓN, SAN JACINTO DE YAGUACHI, ELOY ALFARO (DURAN)	RELAD S.A.
TV+ (TVMAS)	596-602	35	M	GUAYAQUIL, SAMBORON DÓN, SAN JACINTO DE YAGUACHI, ELOY ALFARO (DURAN)	PERONE S.A.
TELEVISION SATELITAL	620-626	39	M	GUAYAQUIL, SAMBORON DÓN, SAN JACINTO DE YAGUACHI, ELOY ALFARO (DURAN)	TELEVISION SATELITAL S.A. TV-SAT
COSTANERA (RTU)	632-638	41	M	GUAYAQUIL, SAMBORON DÓN, SAN JACINTO DE YAGUACHI, MILAGRO, ELOY ALFARO (DURAN)	MUVESA C.A.
M: Matriz de transmisión					
R: Repetidora					

Tabla 9 Prueba Kolmogorov Smirnov con confiabilidad del 99.9%

<i>Ch</i>	<i>α</i>	<i>β</i>	<i>D_n</i>	<i>KS Test Status</i>
21	1,12	1,056033366	0,029347026	ACEPTA
22	0,84	0,352896673	0,032193348	ACEPTA
23	0,01	5,029429783	0,007608022	ACEPTA
24	0,06	1,782418511	0,009916644	ACEPTA
25	0,10	2,394933708	0,007996492	ACEPTA
26	0,14	0,699720761	0,020247933	ACEPTA
27	0,13	2,488746691	0,021467971	ACEPTA
28	0,33	0,429492545	0,021378746	ACEPTA
29	0,22	1,6700343	0,010766059	ACEPTA
30	0,06	1,475909812	0,00903592	ACEPTA
31	16,90	0,002971108	7,93E-05	ACEPTA
32	0,45	1,195575732	0,021527998	ACEPTA
33	0,02	1,248962609	0,010932996	ACEPTA
34	3,20	0,029155688	0,0074911	ACEPTA
35	0,29	17,34945199	0,006808282	ACEPTA
36	0,34	0,417285282	0,024427897	ACEPTA
37	24,02	0,001125951	2,89E-05	ACEPTA
38	1,16	0,394112685	0,027618779	ACEPTA
39	0,97	0,514061757	0,029725249	ACEPTA
40	16,32	0,008416917	0,000373158	ACEPTA
41	15,67	0,000734705	6,35E-05	ACEPTA
42	0,20	1,275065285	0,015546272	ACEPTA
43	4,53	0,1855669	0,015640018	ACEPTA
44	24,00	0,000562406	1,45E-05	ACEPTA
45	19,06	0,003573959	0,000186654	ACEPTA
46	0,68	0,557773424	0,029584339	ACEPTA
47	18,30	0,004289956	0,000250752	ACEPTA
48	0,23	1,270547228	0,013368039	ACEPTA
49	N.D	N.D	N.D	N.D
50	12,85	0,004819887	0,000361428	ACEPTA
51	11,76	0,003998009	0,000194757	ACEPTA

Tabla 10 Tiempo de disponibilidad máximo por canal

Ch	Max Time	α	β
21	8.77 s	1,12	1,056033366
22	18.45 s	0,84	0,352896673
23	3.56 s	0,01	5,029429783
24	4.84 s	0,06	1,782418511
25	4.28 s	0,10	2,394933708
26	7.66 s	0,14	0,699720761
27	4.46 s	0,13	2,488746691
28	11.58 s	0,33	0,429492545
29	5.05 s	0,22	1,6700343
30	4.87 s	0,06	1,475909812
31	5 h, 30.04 s	16,90	0,002971108
32	6.7 s	0,45	1,195575732
33	5.31 s	0,02	1,248962609
34	7 min, 11.13 s	3,20	0,029155688
35	3.21 s	0,29	17,34945199
36	11.78 s	0,34	0,417285282
37	18 h, 28 min, 3.54 s	24,02	0,001125951
38	19.27 s	1,16	0,394112685
39	14.39 s	0,97	0,514061757
40	1 h, 41 min, 49.1 s	16,32	0,008416917
41	18 h, 47 min, 21.6 s	15,67	0,000734705
42	5.59 s	0,20	1,275065285
43	1 min, 32.99 s	4,53	0,1855669
44	36 h, 3 min, 10.21 s	24,00	0,000562406
45	4 h, 49 min, 1.64 s	19,06	0,003573959
46	11.68 s	0,68	0,557773424
47	3 h, 51 min, 25.69 s	18,30	0,004289956
48	5.66 s	0,23	1,270547228
49	∞	N.D	N.D
50	2 h, 17 min, 36.43 s	12,85	0,004819887
51	2 h, 34 min, 30.89 s	11,76	0,003998009

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CISCO Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019, Feb 5, 2015, CISCO Systems
- [2] CISCO Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019, May 27, 2015, CISCO Systems
- [3] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones Ecuador. Plan Nacional de Frecuencias Ecuador 2012, 2012
- [4] Ericsson Mobility Report, June 2015, ERICSSON
- [5] J. Pierre De Vries, Ljiljana Simic, Andreas Achtzehn, Marina Petrova, and Petri Mahonen. The emperor has no problem: Is Wi-Fi spectrum really congested? In TPRC 41: The 41st Research Conference on Communication, Information and Internet Policy, March 2013
- [6] Qing Zhao; Sadler, B.M., "A Survey of Dynamic Spectrum Access," *Signal Processing Magazine, IEEE* , vol.24, no.3, pp.79,89, May 2007
- [7] Haykin, Simon, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* , vol.23, no.2, pp.201,220, Feb. 2005
- [8] I. F. Akyldiz, W-Y Lee, M C. Vuran, S Mohanty,_"NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio Wireless networks: A Survey", Elsevier, 2006.

- [9] Federal Communications Committee, Mobile Broadband: The benefits of additional spectrum. Technical Report, Federal Communications Committee (FCC), 2010
- [10] Realizing the Full Potential of Government-held Spectrum to Spur Economic Growth, Jul 2012, President's Council of Advisors on Science and Technology
- [11] Shimomura, T.; Oyama, T.; Seki, H., "Analysis of TV White Space Availability in Japan," Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE , vol., no., pp.1,5, 3-6 Sept. 2012
- [12] van de Beek, J.; Riihijarvi, J.; Achtzehn, A.; Mahonen, P., "TV White Space in Europe," *Mobile Computing, IEEE Transactions on* , vol.11, no.2, pp.178,188, Feb. 2012
- [13] Miguel López Benítez. Spectrum Usage Models for the Analysis, Design and Simulation of Cognitive Radio Networks. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2011
- [14] Novillo, F.; Galeana, H.; Ferrus, R.; Agusti, R., "Spectrum Availability in Indoor Locations for Opportunistic Spectrum Access in Dense Urban Scenarios," *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th* , vol., no., pp.1,5, 26-29 April 2009
- [15] Saeed, R.A.; Mokhtar, R.A., "TV white spaces spectrum sensing: Recent developments, opportunities and challenges," *Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications*

- (SETIT), 2012 6th International Conference on , vol., no., pp.634,638, 21-24 March 2012
- [16] Naik, G.; Singhal, S.; Kumar, A.; Karandikar, A., "Quantitative assessment of TV white space in India," *Communications (NCC), 2014 Twentieth National Conference on* , vol., no., pp.1,6, Feb. 28 2014-March 2 2014
- [17] Ying, X.; Zhang, J.; Yan, L.; Zhang, G. ; Chen, M. ; Chandra R., "Exploring Indoor White Spaces in Metropolises," *MobiCom'13* ,Sept 30-Oct-4 Miami, FL,USA.
- [18] Li Zhang; Kai Zeng; Mohapatra, P., "Opportunistic spectrum scheduling for mobile cognitive radio networks in white space," *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2011 IEEE* , vol., no., pp.844,849, 28-31 March 2011
- [19] Hossain, E.; Niyato, D. & Han, Z. Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks *Cambridge University Press*, 2009
- [20] Qing Zhao and Ananthram Swami, Chapter 4 - Spectrum sensing and identification, In *Cognitive Radio Communications and Networks*, edited by Alexander M. WyglinskiMaziar NekoveeY. Thomas Hou, Academic Press, Oxford, 2010, Pages 85-111, ISBN 9780123747150, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374715-0.00004>

- [21] Ofcom, Sep. 2013. TV white spaces: approach to coexistence. Technical analysis. Tech. rep., Ofcom
- [22] Alireza Attar, Oliver Holland and Hamid Aghvami, Chapter 5 - Spectrum access and sharing, In Cognitive Radio Communications and Networks, edited by Alexander M. WyglinskiMaziar NekoveeY. Thomas Hou, Academic Press, Oxford, 2010, Pages 113-148, ISBN 9780123747150, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374715-0.00005-8>.
- [23] Petri Mähönen and Janne Riihijärvi, Chapter 9 - Cognitive radio network architectures, In Cognitive Radio Communications and Networks, edited by Alexander M. WyglinskiMaziar NekoveeY. Thomas Hou, Academic Press, Oxford, 2010, Pages 235-260, ISBN 9780123747150, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374715-0.00009-5>.
- [24] Mishra, A. & Johnson, D. White Space Communication: Advances, Developments and Engineering Challenges *Springer International Publishing*, 2014.
- [25] Resolución RTV-681-24-CONATEL-2012, “Plan Maestro de Transición a la Televisión Terrestre”, ARCOTEL, 2012, URL <http://www.advicom.ec/userFiles/files/RTV-681-24-CONATEL.pdf>

- [26] ITU-R Recommendation BT.804, "Characteristics of TV receivers essential for frequency planning with PAL/SECAM/NTS television systems," 1992.
- [27] Association of Radio Industries and Businesses. ARIB STD-B21: Receiver for Digital Broadcasting, March 2007
- [28] Liang Yin; Kaishun Wu; Sixing Yin; Shufang Li; Ni, L.M., "Reuse of GSM White Space Spectrum for Cognitive Femtocell Access," *Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2012 IEEE 18th International Conference on* , vol., no., pp.1,7, 17-19 Dec. 2012
- [29] Yanpeng Yang; Lei Shi; Zander, J., "On the capacity of Wi-Fi System in TV white space with aggregate interference constraint," *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks (CROWNCOM), 2013 8th International Conference on* , vol., no., pp.123,128, 8-10 July 2013.