



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“MEDICIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO PARA EL ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE CANALES EN LA BANDA AWS (1700 – 2100 MHz), DE DOS OPERADORAS MÓVILES Y MODELAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL USO POTENCIAL DE SISTEMAS CON ACCESO OPORTUNISTA AL ESPECTRO (OSA) EN UN EDIFICIO UBICADO EN LA ZONA URBANA DE GUAYAQUIL”

### **INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

### **INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

DARÍO XAVIER ROMERO SANTISTEVAN

JOSÉ DAVID YUGCHA CHÉRREZ

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme guiado por el camino correcto en todo momento, a mi madre por mostrarme día a día su apoyo incondicional y sus sabios consejos que me dieron la fuerza necesaria para culminar este proyecto, a mi familia por sus consejos y ánimos para lograr mis metas, al grupo de ATELED que lo conformamos con amigos y me supieron mostrar su apoyo durante este proyecto.

Darío Xavier Romero Santistevan

Quiero empezar agradeciendo a Dios por permitirme cumplir esta meta, a mis padres por el apoyo constante en cada día de mi vida, a mi hermana, abuelos que me han incentivado a siempre superarme. A mis profesores por saber aconsejarme de la mejor manera en mi vida universitaria y a mis amigos por haber sido una buena compañía durante todo este proceso de aprendizaje.

José David Yugcha Chérrez

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi MADRE Sandra por su tenacidad y lucha diaria es mi ejemplo a seguir, mi ABUELO Wachito y mi TIA Sonia por sus sabios consejos que me han ayudado a ser mejor cada día; mis tres pilares fundamentales sin ustedes sencillamente nada sería posible en mi vida. A mis PRIMOS por su constante apoyo; y sobre todo dedico de manera especial el proyecto a mi amada ABUELA Mery (+), se lo orgullosa que estarías por mí.

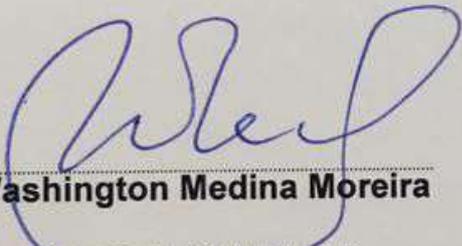
Darío Xavier Romero Santistevan

A las personas más importantes en mi vida, mi padre José, mi madre Lorena, mi hermana Daniela, mi tía Verónica, mi tía Lorena y mis abuelos Mariana, Esther y Gonzalo que son las persona que creyeron en mi desde el primer día. Gracias a todos su confianza y apoyo.

José David Yugcha Chérrez

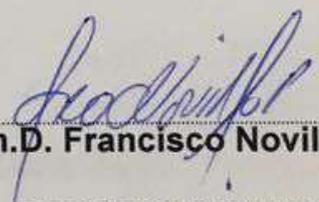
## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.



**M.Sc. Washington Medina Moreira**

PROFESOR EVALUADOR



**Ph.D. Francisco Novillo Parales**

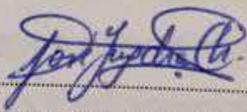
PROFESOR EVALUADOR

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Darío Xavier Romero Santistevan



José David Yugcha Chérrez

## RESUMEN

El avance tecnológico que ha tenido el ámbito de las telecomunicaciones en los últimos años es sorprendente, cada día que pasa existen más tecnologías que emergen; tecnologías que requieren de aún más espectro radioeléctrico para satisfacer los servicios que ofrecen a los usuarios. Espectro radioeléctrico que de acuerdo a la administración de los entes regulatorios, se encuentra saturado para ciertas tecnologías por la cantidad de usuarios que posee.

Existen tecnologías que emergieron hace poco tiempo de acuerdo al avance tecnológico y 4G LTE es una de ellas, esta tecnología pretende aumentar la velocidad de carga y descarga en cifras muy altas y rápidas, pero a su vez necesita de más canales disponibles en el espectro para poder lograr estos objetivos. Por esto es necesario realizar una medición del espectro radioeléctrico para el análisis de la disponibilidad de canales sobre la banda AWS (1700 – 2100 MHz) que es la banda perteneciente a la tecnología 4G LTE, con este análisis se podrá saber el comportamiento mediante un modelo estadístico que tiene cada uno de los canales que posee esta banda en cuestión del tiempo para así con esta información, aplicarlos a sistemas con Acceso Oportunista al Espectro que pretenden emigrar de una banda a otra para poder hacer uso de la disponibilidad de estos canales, es decir, ocupar este canal sin que haya una interferencia con los usuarios primarios (usuarios licenciados); es decir estos canales serán usados por usuarios de otras tecnologías cuyos canales ya se encuentren saturados.

Este proyecto propone el estudio de disponibilidad en la banda AWS para la tecnología LTE durante tres semanas en un edificio de la zona urbana densa de Guayaquil; esto debido a que en este escenario se encuentra concentrada la mayor recepción de señal por parte de los usuarios, y al realizar las mediciones en el interior de un edificio a diferentes alturas se logra un análisis propio del proyecto para entender el comportamiento del espectro; mediante este estudio se obtendrá un modelado estadístico para conocer el comportamiento probabilístico de disponibilidad en los canales de la banda analizada.

En base a los resultados obtenidos en este proyecto se pudo determinar en uno de los pisos medidos que existen canales disponibles entre 7 y 12, lo que nos daría un

ancho de banda disponible entre 35 y 60 MHz con un 86% de probabilidad de ocurrencia; cabe recalcar que el ancho de banda de cada canal asumido por configuración de la USRP en este proyecto es de 5MHz.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN .....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA .....	v
RESUMEN .....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	viii
CAPÍTULO 1 .....	1
1. ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Problema a resolver.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivo general y objetivos específicos.....	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
1.5 Metodología.....	5
1.6 Alcance.....	6
2. ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1 Tecnología de telecomunicación LTE.....	8
2.1.1 Requerimientos de LTE.....	9
2.1.2 Arquitectura de la red LTE.....	9
2.1.3 Enlaces de radio.....	11
2.1.4 Elementos de la arquitectura.....	15
2.1.5 MIMO (Multiple Input Multiple Output).....	17

2.2	Espectro radioeléctrico asignado a la tecnología LTE.....	20
2.2.1	Banda AWS (Advanced Wireless Services).....	20
2.3	Radio Cognitiva (RC).....	22
2.3.1	Redes cognitivas.....	23
2.3.2	Aprovechamiento del espectro.....	23
2.4	White Space.....	24
2.4.1	Requisitos para LTE en White Space.....	25
2.5	Acceso Dinámico al Espectro (DSA).....	26
2.6	Estudios del espectro radioeléctrico.....	28
CAPÍTULO 3.....		30
3.	PROCESO DE MEDICIÓN.....	30
3.1	Descripción del proceso de medición.....	30
3.2	Potencias recibidas.....	33
3.3	Proceso detallado de la medición.....	33
3.4	Variables aleatorias a analizar.....	34
CAPÍTULO 4.....		38
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	38
4.1	Ubicación geográfica y tiempo de medición.....	38
4.2	Parámetros de configuración.....	39
4.3	Análisis de los datos.....	40
4.3.1	Análisis de los niveles de potencia.....	40
4.3.2	Modelamiento estocástico.....	50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		62
BIBLIOGRAFÍA.....		63

ANEXOS ..... 66

## CAPÍTULO 1

### 1. ASPECTOS GENERALES.

#### 1.1 Introducción.

Las redes móviles han logrado un enorme desarrollo en los últimos 15 años, gracias a este desarrollo son las operadoras móviles las que cubren la gran demanda de los clientes; hoy en día gracias a nuevas tecnologías es posible no solo transmitir voz, si no también datos, video, e inclusive transmitir a grandes velocidades [1].

La telefonía móvil con el transcurrir de los años y la evolución de la tecnología hizo que se la caracterice por generaciones.

La primera generación 1G, apareció en 1979 era totalmente analógica y estrictamente para voz, también los enlaces de voz tenían una calidad muy baja ya que la transmisión entre celdas era muy pobre y la tecnología que predominaba era AMPS (Advanced Mobile Phone System). La segunda generación 2G, aparece en 1990, a diferencia de 1G este sistema es digital y más sofisticado las tecnologías que predominan son GSM (Global System for Mobile Communications), IS-136 y CDMA (Code Division Multiple Access); Los operadores de servicios de telecomunicaciones se mudaron a una red 2.5G, la cual es más veloz en transmisión de datos comparado su antigua generación además este ofrece tecnologías adicionales como GPRS (General Packet Radio System), EDGE(Enhanced Data Rates for Global Evolution). La tercera generación 3G, en esta generación convergen voz y datos, aquí se emplean protocolos enfocados a aplicaciones, video conferencia y conexión más rápida a internet usando la tecnología HSPA (High Speed Packet Access) [1].

El siguiente paso en la tecnología es LTE (Long Term Evolution) siendo la dominante para la cuarta generación 4G la cual es promovida por el 3GPP (3rd Generation Partnership Project).

LTE es una tecnología basada en protocolo IP es decir que transmiten los datos por paquetes, una de sus principales características es la velocidad en la que se

transmite superando los 100 Mbps. Esta tecnología es creada para clientes acostumbrados a servicios de banda ancha tales como VoIP (Voice Over IP), video conferencia, servicios de video en la web, ya que todos estos servicios tendrán un mayor rendimiento en cuanto su transferencia de datos. La tecnología LTE se desarrolla en la banda AWS (Advanced Wireless Services), banda asignada desde los 1700 – 2100 MHz [2].

Hay que mencionar que existe un método denominado OSA (Opportunistic Spectrum Access), el cual se ha desarrollado para minimizar la ineficiencia de la administración y asignación del espectro radioeléctrico; este método es un sistema que consiste en la detección del espectro radioeléctrico disponible para poder usarlo sin causar interferencia con los usuarios [2].

## **1.2 Problema a resolver.**

No es para nada desconcertante que cada vez haya menos frecuencias disponibles para el servicio móvil en el Ecuador y que las distintas redes inalámbricas existentes busquen la manera de crear métodos de acceso compartido entre ellas para utilizar la frecuencia que disponen en su totalidad.

En esta parte se hablará de la problemática que acontece en cuanto a la disponibilidad de frecuencias y los altos niveles de saturación producidos en la banda AWS perteneciente a la tecnología 4G LTE, que ha tenido lugar debido a la presencia de nuevas tecnologías implementadas en el campo de las telecomunicaciones, al creciente número de usuarios y el sobrepaso de la capacidad del diseño de la red; así como de los métodos que se están mejorando para poder cumplir esta demanda y poder usar al máximo el espectro radioeléctrico que, cabe mencionar, es un recurso limitado.

Lo que se está buscando es un modelo estadístico que defina el comportamiento en cuanto a la disponibilidad de canales en la banda AWS, para que en el momento que haya un alto nivel de interferencia, es decir, haya muchos dispositivos trabajando en la misma banda, se pueda saber mediante este modelo estadístico que canales están disponibles, teniendo el sistema OSA,

pueda emigrar a otra banda y ocupar dichos canales para evitar la congestión de la banda.

### **1.3 Justificación.**

Existen muchos problemas con la utilización del espectro radioeléctrico y la disponibilidad de los canales, cuya demanda es cada vez mayor. Es por eso que han surgido nuevos sistemas como lo es el sistema de acceso oportunista al espectro (OSA), el cual pretende ayudar a mejorar la utilización del mismo [3]. Lo que se busca es dar un acceso temporal y oportuno a los usuarios no licenciados, sin interferir a los usuarios licenciados mientras estos no estén utilizando sus canales, o que los niveles de interferencia con los usuarios licenciados no sean considerables.

Por lo tanto, es necesario realizar estudios en situaciones prácticas con respecto a la disponibilidad del espectro y su ocupación por los diferentes usuarios en la banda.

En la mayoría de los casos, las investigaciones que se han realizado son para lugares en específicos ubicados en zonas rurales o generalizando a nivel nacional; lo que se buscará es un modelo estadístico con respecto a la ocupación del espectro o la disponibilidad temporal del mismo, es por eso que es necesario realizar análisis en zonas de más interés común para las operadoras y distintas instituciones del estado.

Existen también diferentes bandas designadas para uso específico de telefonía móvil 4G, donde la mayoría de los países han tratado de que estas bandas se encuentren libres para poder hacer uso y poder ofrecer este servicio. Se habla de una necesidad de limpieza de las bandas pero en muchos países, principalmente de América Latina [3], esto se ve demorado por el famoso apagón analógico que para cada país es en diferentes fechas, es por eso que aún no han podido hacer entrega de este espectro libre para introducir la tecnología en dicho espectro.

Por eso es justo y necesario hacer un análisis de las posibles vías que se pueden seguir para tratar de ayudar con la administración y el uso del espectro para poder tener eficiencia con el mismo.

## **1.4 Objetivo general y objetivos específicos.**

### **1.4.1 Objetivo general.**

- Medir el espectro radioeléctrico para el análisis de la disponibilidad de canales en la banda AWS y realizar un modelamiento estadístico para el uso potencial de sistemas con acceso oportunista al espectro (OSA) en un edificio ubicado en la zona urbana de Guayaquil.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Investigar sobre un sistema OSA y tendencias de nuevas tecnologías.
- Medir niveles de potencia de los canales en la banda AWS, en tres pisos de un edificio (Planta Baja, 5<sup>to</sup> Piso, 11<sup>vo</sup> Piso).
- Analizar la disponibilidad de cada canal en la banda AWS tanto de Uplink y Downlink, para poder reutilizarlos y resolver el problema de congestión de canales.
- Modelar en base a los datos obtenidos una curva estadística, que represente la disponibilidad en cada canal.
- Determinar la probabilidad de OSA a una banda licenciada dentro de las frecuencias asignadas en Guayaquil desde (1700 – 2100 MHz).
- Comprobar el modelo estadístico de los canales.

## 1.5 Metodología.

El procedimiento empleado para cumplir con los objetivos de este proyecto se realizara en diferentes etapas.

Primero se debe definir el rango de frecuencias y los canales tanto de Uplink como de Downlink que posee la tecnología LTE, para así poder definir dichos canales en el programa que se utilizará, el cual se basa principalmente en un algoritmo creado en LabVIEW que permitirá medir niveles de potencia en la banda requerida, para fines de este proyecto será la banda AWS.

Luego se ubicará el equipo que utilizaremos para la medición en el edificio del Servicio de Rentas Internas (SRI) previamente establecido, ubicado en la zona urbana de la ciudad de Guayaquil. Este equipo es la USRP 2 (Universal Software Radio Peripheral), que en base a su programación estará guardando constantemente datos de niveles de potencia en cada canal de la banda, estos niveles serán receptados por la antena Sirio SD 3000.

La primera semana de adquisición de datos se lo realizará en la planta baja del edificio; solo se tomará una semana porque es tiempo suficiente para obtener alrededor de 60000 datos por canal que se necesita.

Este proceso de adquisición de datos se lo repetirá de la misma manera en las dos semanas siguientes tanto en el quinto piso y el onceavo piso del edificio; es de extrema importancia repetir este proceso en otros dos pisos de manera estratégica para analizar cómo cambian los niveles de interferencia en los canales dependiendo de la altura en que se midan.

Luego de obtenidos estos datos se tendrá una matriz de niveles de potencia y serán comparados con la sensibilidad en la que opera la tecnología LTE, en base a esta comparación se tendrá una nueva matriz de unos y ceros, aquí se hará una granularidad y se obtendrá un promedio con alrededor de 2000 datos de disponibilidad, con los cuales se modelará estadísticamente para obtener una curva de probabilidad de disponibilidad de canales para su posible uso en sistemas OSA.

## **1.6 Alcance.**

El proyecto que se está llevando a cabo tiene como finalidad la medición del espectro radioeléctrico en 3 pisos estratégicos del edificio de Servicios de Rentas Internas (SRI) ubicado en la zona urbana de la ciudad de Guayaquil para poder determinar un modelo estadístico que permita observar cómo se comporta la disponibilidad de canales y su eficiencia en la banda AWS (1700 - 2100 MHz) perteneciente a la tecnología LTE.

Una vez obtenido los resultados se podrá motivar a la implementación de algunas tecnologías innovadoras en el mundo de las telecomunicaciones, la cual conllevara a la aparición de sistemas de acceso oportunista al espectro (OSA) los cuales se encargan de optimizar la manera en que se los administra y poder usar de manera eficaz todo el ancho de banda disponible para satisfacer la demanda de usuarios, así como economizar la utilización del mismo.

Por otro lado se verá necesario el desarrollo de nuevos dispositivos, ya que de poner en práctica estos sistemas OSA, deberán existir dispositivos que tengan la capacidad de buscar los canales disponibles y la banda en los que estos estén operando, para poderlos usar de manera oportuna.

## CAPÍTULO 2

### 2. ESTADO DEL ARTE.

Es de conocimiento de la población en general el avance tecnológico que se está produciendo hoy en día con el surgimiento de nuevos dispositivos y tecnologías con respecto a las telecomunicaciones.

Estas tecnologías son cada vez más complejas y se necesita satisfacer su demanda para que ésta cumpla con su objetivo en específico, es por eso que se realizan estudios cada vez más minuciosos con respecto al espectro radioeléctrico. Pero su distribución no ha cambiado con el pasar del tiempo y eso se ha convertido en un problema para estas tecnologías que han surgido y que cada vez requieren aún más de este recurso. Los países tienen sus propias normas y estrategias para el uso eficiente del espectro y es su prioridad el hecho de usarlo al máximo.

Es necesario mencionar, según el Artículo 47 de la ley especial de telecomunicaciones reformada, el espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado cuya exclusividad para su control, regulación y gestión, le corresponde únicamente al Estado [4].

Existen diferentes fines para los cuales el uso del espectro radioeléctrico es necesario; es usado para servicios de telecomunicaciones, radiodifusión sonora, televisión, emergencias, defensa, seguridad, transporte e investigación científica, así como para muchas aplicaciones industriales y domésticas.

Actualmente el Ecuador está trabajando muy arduamente en el uso de las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación) para la educación y esto conlleva a un mayor uso del espectro. Para todos estos diferentes procesos que se encuentran en marcha, se ve necesaria la manera de surgir nuevas técnicas para el uso y aprovechamiento del mismo.

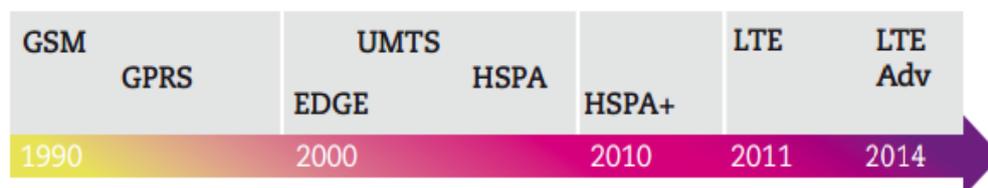
El espectro radioeléctrico a su vez se divide en franjas, conocidas comúnmente como bandas de frecuencias, son espacios designados los cuales no se limitan

por las fronteras de los países ya que este recurso natural se encuentra a lo largo de todo el mundo, pero sí se limita por tecnologías.

Estas tecnologías tienen designado un espacio de frecuencia correspondiente que van en el orden de los kHz, MHz y GHz para cada una, así se evita que haya interferencias entre ellas.

## 2.1 Tecnología de telecomunicación LTE.

El continuo desarrollo y crecimiento de las telecomunicaciones móviles ha provocado la evolución de las tecnologías ya existentes, así hasta llegar a nuevas generaciones como lo es 4G, la cual es la sucesora de todas las anteriores (GSM, GPRS, EDGE, UMTS) y que es referida como cuarta generación [2]. En la figura 2.1 se puede apreciar la evolución de las tecnologías de telecomunicaciones móviles.



**Figura 2.1: Evolución de las tecnologías móviles [2].**

Para esta generación se escogió la tecnología LTE para poder satisfacer el alto flujo de datos, así como las mayores velocidades de carga y descarga que demandan los usuarios de ésta red. Esta tecnología es la que mejor se adapta para poder cumplir con todos los requerimientos, sin tener de lado que seguramente llegarán nuevas tecnologías en este mundo de constante desarrollo tecnológico. [5].

LTE es una evolución de las tecnologías GSM y UMTS, esto se produjo a finales del 2009. Se predijo que su velocidad aumentaría, esta es a 100 Mbps para bajada y 30 Mbps para subida. [6].

Esta tecnología lo que busca es asegurar la compatibilidad con las anteriores tecnologías así poder asegurar un costo reducido y un escaso consumo de energía. Necesita también de diferentes parámetros o requerimientos para poder cumplir a cabalidad su eficiencia con los usuarios. Usa diferentes modulaciones tanto para enlace de subida como para el enlace de bajada.

### **2.1.1 Requerimientos de LTE.**

La tecnología LTE basándose en los diferentes requisitos, según la UIT para las tecnologías de cuarta generación, requiere de ciertos parámetros para complacer en cuanto a sus velocidades, y estos son, entre otros:

- Capacidad de inter funcionamiento con otros sistemas de acceso de radio.
- Servicios móviles de alta calidad.
- Velocidades de 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en reposo para satisfacer servicios y aplicaciones.
- Compartimiento de los recursos de la red, permitiendo varios usuarios por cada celda.
- Ancho de banda escalable desde (1.4 a 20) MHz.
- Redes de conmutación de paquetes IP.
- Eficiencia espectral de conexión de 15 bps/Hz en downlink y 6.75 bps/Hz en uplink.
- Eficiencia espectral del sistema de 3 bps/Hz para downlink y 2.25 bps/Hz para interiores.
- Modos de operación: TDD y FDD. [2], [5], [7], [8].

### **2.1.2 Arquitectura de la red LTE.**

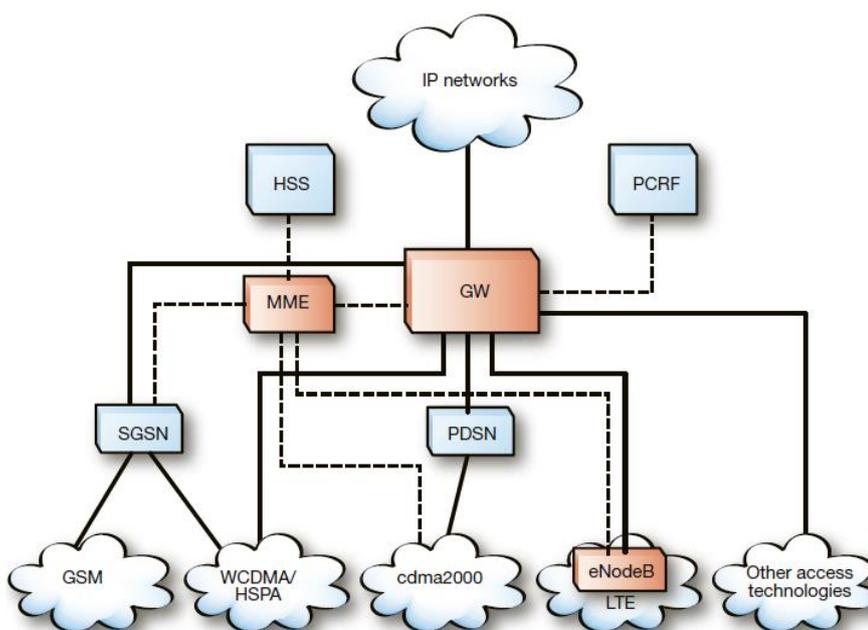
La arquitectura de una red LTE mantiene el mismo esquema en cuanto a la arquitectura básica de cualquier sistema de telefonía móvil, esto es, partiendo desde el dispositivo o equipo de usuario, atravesando por la red acceso que permite la transmisión entre los dispositivos de usuarios,

hasta llegar a la red troncal en la cual se efectúan situaciones como controlar el acceso a la red, es decir una autenticación de los usuarios, gestionar el tráfico de información, determinar los mecanismos de interconexión que se pueda dar con otras redes, etc. [5], [8].

### **Evolución de la arquitectura LTE.**

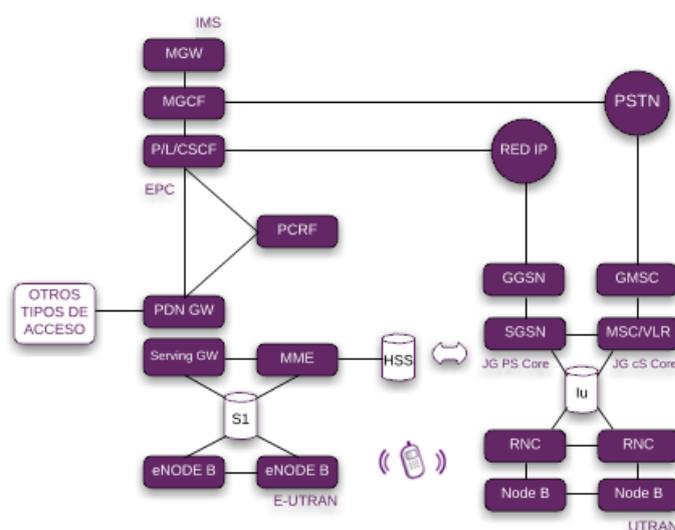
Uno de las principales notoriedades para poder entender de mejor manera lo que la tecnología LTE está visualizando es que una vez que los datos pasan la celda o fase telefónica, todo es IP. LTE es una de las primeras tecnologías que han logrado la transportación de datos a través de la conmutación de paquetes, incluyendo los datos de voz sobre IP, provocando un significativo aumento en la eficiencia espectral [2].

Los sistemas 3GPP (3rd Generation Partnership Project) tienen consigo el Equipo de Usuario UE (User Equipment) y una infraestructura que tiene una partición lógica en una Red Troncal CN (Core Network) y una Red de Acceso AN (Access Network). En la figura 2.2 se observa la arquitectura básica de una red LTE.



**Figura 2.2: Arquitectura simple de LTE [8].**

La arquitectura del sistema LTE conocido como EPS (Evolved Packet System) cuyos elementos que lo conforman, por un lado es la nueva red de acceso E-TRAN y el nuevo dominio de paquetes EPC (Evolved Packet Core) de la red troncal EPC, y por otro lado, el avance de los subsistemas IMS (IP Multimedia Subsystem) adquiridos en un principio de los sistemas UMTS. En la figura 2.3 se muestra la arquitectura 4G (morado) y su relación con la tecnología 3G (sombreado) y los nuevos componentes que se usan.



**Figura 2.3: Arquitectura 4G y su relación con 3G [2].**

Las redes de acceso, tanto las red E-UTRAN y la red troncal EPC, éstas redes tienen una finalidad en específico que es la transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuario y las redes externas, tales como plataformas IMS y/o distintas redes como Internet.

### 2.1.3 Enlaces de radio.

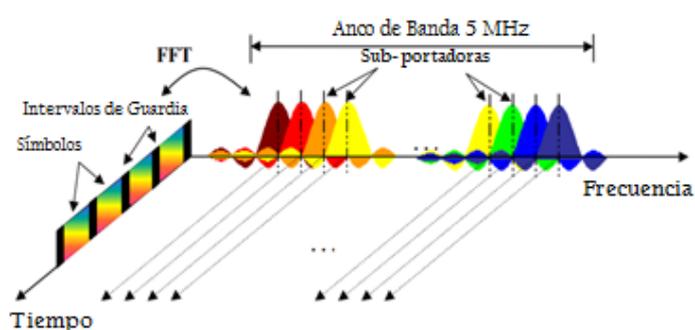
La tecnología LTE para transmitir requiere de diferentes enlaces de radio de acuerdo a sus requerimientos, tanto para el link de subida como para el link de bajada.

### OFDM como elemento de transmisión multi portadora.

La técnica de OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) se basa principalmente en la conocida técnica de FDM (Frequency Division Multiplexing), en la cual los distintos flujos de información se asignan de una manera separada y paralela a canales de frecuencia, estos canales se encuentran separados entre sí por una denominada “banda de guarda de frecuencia” para así poder reducir la interferencia en canales adyacentes.

Lo que diferencia a estas técnicas, una de la otra es que OFDM posee multiportadoras, llamadas también subportadoras, que son las que llevan el flujo de información y son ortogonales entre sí; también puede ser agregado a cada símbolo un tiempo de guarda para controlar la propagación de retardo de canal [9].

OFDM básicamente multiplexa un conjunto de símbolos sobre un grupo de subportadoras, y gracias a esto es posible transmitir simultáneamente los símbolos y separarlos una vez que son recibidos, esto es posible debido a la ortogonalidad que estas subportadoras poseen [7]. En la figura 2.4 se muestra una señal OFDM en relación al tiempo.



**Figura 2.4: Representación de una señal OFDM en función del tiempo [7].**

### OFDMA para el enlace descendente.

La técnica de OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) parte de OFDM, con la suposición de que en una subportadora existan diferentes símbolos modulados pertenecientes a diferentes usuarios. De esta manera al viajar en subportadoras distintas, se puede ajustar algunas transmisiones a la vez y que pertenezcan a diferentes flujos de información [10]. En la figura 2.5 se muestra la multiplexación de usuarios en OFDMA.

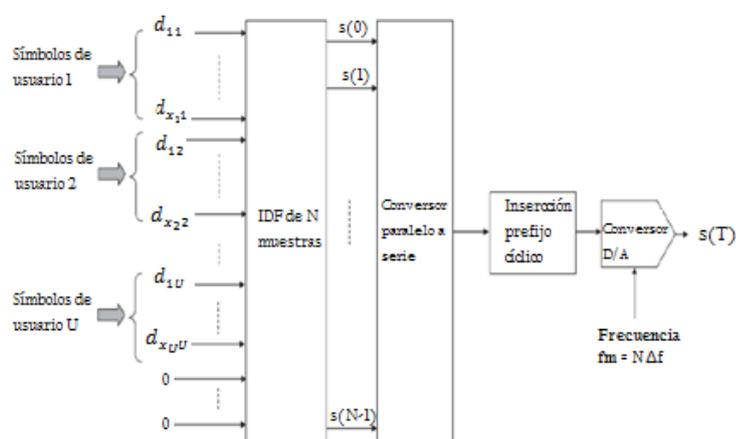


Figura 2.5: Multiplexación de usuarios en OFDMA [5].

Así mismo, en el receptor de cada uno de los usuarios, será suficiente con la recuperación de la información que se encuentre en la subportadora que le corresponda y así poder separar el contenido dirigido a ese usuario del resto. Esto será posible con una asignación previa de la subportadora por donde se envía la información y la notificación de la misma por medio de mecanismos de señalización.

La aplicación de esta técnica de acceso múltiple OFDMA tiene algunas ventajas:

- **Diversidad multiusuario:** ubicación de subportadoras a diferentes usuarios en pequeños espacios de bandas durante un periodo de tiempo establecido. Con esto se consigue que sabiendo

de una u otra manera que el canal presentara dificultades en cualquier momento, se puede asignar a la subportadora el mejor usuario, estableciendo la mejor señal/ruido del canal y así se optimiza la utilización de la banda obteniendo una mejor eficiencia espectral.

- **Diversidad de frecuencia:** Se puede asignar a un usuario subportadoras que no se encuentren seguidas en el espectro y que estén separadas para así tener un estado de canal independiente en las mismas.
- **Robustez frente a la propagación multi trayectoria:** con la aplicación del prefijo cíclico, la técnica OFDMA es bastante confiable debido a que siempre existe la interferencia entre símbolos como consecuencia de la propagación en distintos caminos. Esta distorsión se puede reducir con técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, que son mucho más eficientes que las técnicas de ecualización clásicas en el dominio temporal.
- **Flexibilidad en la banda asignada:** se puede obtener más velocidades de transmisión para los distintos usuarios, solo con el hecho de asignar más o menos subportadoras por usuario. [5].

### **SC-FDMA para el enlace ascendente.**

Mientras OFDMA cumple satisfactoriamente los requerimientos para el enlace descendente en la tecnología LTE, su elevado Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) hace que sea desfavorable para el enlace ascendente, es por eso que se usa la técnica Single-Carrier FDMA.

La técnica SC-FDMA es un sistema similar a OFDMA, tiene el mismo mecanismo con pre-codificación de los símbolos antes de modularlos y

con diferencia a OFDMA, incluye DTF (Discrete Fourier Transform) antes de la transmisión. Esto da cabida a la compresión de la información que se envía, la cual luego de pasar el proceso de modulación/demodulación, se realiza IDTF (Inverse Discrete Fourier Transform) obteniendo un menor PAPR y reduciendo energía en la terminal móvil. [7], [11].

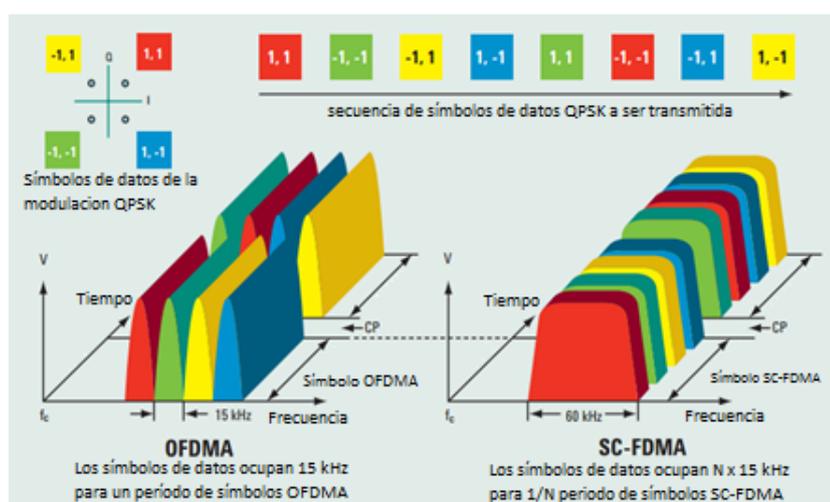


Figura 2.6: Comparación entre OFDMA y SC-FDMA [10].

#### 2.1.4 Elementos de la arquitectura.

Los equipos que forman parte una red LTE tienen funciones específicas y similares a sus antecesores en tecnologías anteriores pero a pesar de todo esto, existe un cambio considerable en la arquitectura de red. Esta arquitectura de LTE se conforma de dos redes, la red E-UTRAN y la red EPC, las cuales tienen diferentes conceptos.

La red E-UTRAN es la que se encarga de la comunicación de los equipos móviles con la red cableada y la red EPC (Evolved Packet Core) que es la que se encarga principalmente en el transporte de información entre los distintos equipos del core hasta el destino. La unión de estas dos redes es lo que se conoce como EPS (Evolved Packet System).

### **E-RAN (Evolved Radio Access Network) y los eNodeB.**

Es la parte de la red que se encarga de la comunicación con los equipos móviles, esto es posible a través de su elemento principal que son los eNodeB. Estos sNB poseen la capa física, MAC, RLC (Radio Link Control) y PDCP (Packet Data Control Protocol) que contienen las funciones del plano del usuario de comprensión de cabecera y encriptación.

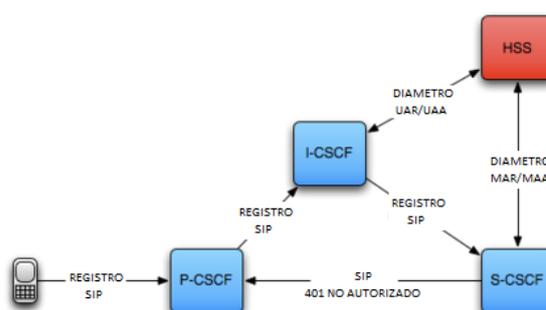
Se hace presente la RRC (Radio Resource Control) que se encarga del control de admisión, scheduling, cifrado y descifrado de los datos del plano de usuario y de control.

### **MMB (Mobility Management Entity).**

Este es el nodo principal clave para tener acceso a la red LTE. Es el encargado de proporcionar seguimiento para autenticación de abonados, roaming y traspasos a otras redes.

### **HSS (Home Subscriber Server).**

Es un elemento muy importante para lo que se conoce como redes all-IP ya que constituye la base de datos para un usuario determinado, es el encargado de las numeraciones, suscripciones, identificaciones, registro de autenticación y de cifrado, etc. [12]. En la figura 2.7 se observa los elementos por los cuales debe pasar la autenticación de un usuario antes de que el HSS sea notificado.



**Figura 2.7: Notificación de la autenticación de un usuario al HSS**

[12].

**SGW (Serving Gateway).**

El Serving Gateway es fundamental para la interfaz de los paquetes de datos que van a la E-UTRAN. Este también actúa como un anclaje de movilidad para el plano de usuario durante las transferencias entre los eNB y como el ancla para la movilidad entre otras tecnologías 3GPP LTE.

**PDN GW (Packet Data Network Gateway).**

Es similar al SGW, constituye el punto de anclaje para la interfaz de los paquetes de datos que se dirigen al PDN (Packet Data Network). Establece el punto de anclaje para la salida a PDN externos, como también es el punto de cambios entre la tecnología LTE y no 3GPP como 3GPP2 y WiMAX.

**PCRF (Policy and Charging Rules Functions) Server.**

Es aquel que regula las normas en la cual se basan las políticas de servicio y las QoS de las sesiones de cada usuario del sistema. [2], [13].

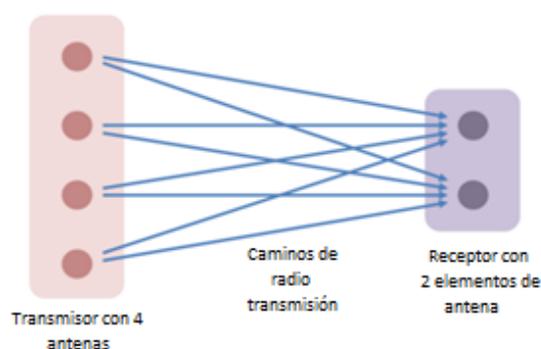
**2.1.5 MIMO (Multiple Input Multiple Output).**

Uno de los recursos que utiliza la tecnología LTE para poder abarcar todo los desafíos que conlleva es el sistema de antenas múltiple-entrada múltiple-salida (MIMO), que se considera una parte fundamental en la transmisión para poder alcanzar los requisitos de rendimiento y eficiencia espectral. MIMO se relaciona al uso de múltiples antenas en sus transmisores y receptores, es decir utilizan más de una antena para transmitir (Tx) una señal en la misma frecuencia a más de una antena en recepción (Rx). [14].

Las antenas MIMO pueden ofrecer un sin número de beneficios para la comunicación en los sistemas de radio móviles en escenarios donde exista altas condiciones de dispersión, donde las señales se reflejan en

torno al ambiente, donde haya multi caminos para que la señal pueda llegar hasta el dispositivo de usuario, donde las condiciones de señal sean pobres, logrando con esto una mayor eficiencia espectral y el aumento de la tasa de datos para cada usuario. [7], [15].

Estas antenas lo que tratan es de aumentar en algo la relación SNR con el propósito de compensar la degradación de la señal, que se produjo por el hecho de la presencia de objetos que alteran su ruta u otras señales de radiofrecuencia (RF) que interfieren con la misma. En la figura se puede apreciar un esquema conformado por 4 antenas de transmisión y 2 de recepción que hacen énfasis en el funcionamiento básico MIMO. En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de las diferentes configuraciones MIMO.



**Figura 2.8: Ejemplo de una configuración 4X2 MIMO [15].**

De acuerdo a los diferentes aspectos en el transmisor y receptor para la codificación y procesamiento de la señal, un sistema MIMO tiene la capacidad de aplicar diferentes técnicas en entornos de propagación, entre esas tenemos:

- **Diversidad espacial:** aprovechamiento al máximo de las distintas trayectorias de la señal para aprovechar su desvanecimiento independiente y mejorar la veracidad de un enlace de

comunicación. Esta técnica ofrece el favorecimiento para el receptor de las distintas señales que recibe, ya que cada una de estas señales proviene con una codificación diferente; se usa en condiciones robustas de señal escasa como en el borde de las células.

- **Multiplexación espacial:** ésta técnica puede ser comparada con la reutilización del espectro, es decir se puede transmitir las señales simultáneamente en la misma frecuencia pero por diferentes células y ser recibidas de forma independiente en el receptor; a su vez estas células deben estar separadas lo suficiente como para que no haya interferencia entre ellas y lograr utilizar las señales en la misma célula pero con diferente space-time. Esto podría ser utilizado para aumentar la velocidad de datos de un usuario o llevar dos flujos de datos independientes.
- **Retroalimentación de lazo cerrado y pre codificación:** da lugar a que el transmisor aproveche la información sobre el canal de transmisión, proporcionada por el receptor. Siempre que hay retroalimentación disponible, el transmisor puede cambiar la codificación de las señales que transmite teniendo en cuenta las características importantes del canal y con esto lograr una mejora de rendimiento en cuanto a procesamiento de señal en el receptor.

La técnica MIMO es de gran ayuda para entornos urbanos donde las estructuras tales como edificios u otros objetos hacen que la señal se disperse y se degrade por las trayectorias multi camino. MIMO es un elemento fundamental para el diseño de un sistema LTE, este sistema se basa en una configuración 2 x 2 MIMO, es decir dos antenas en transmisor y dos antenas en el receptor tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente. [15].

## **2.2 Espectro radioeléctrico asignado a la tecnología LTE.**

Es de sumamente relevante recalcar la importancia del espectro radioeléctrico para el ámbito de las telecomunicaciones y en general los servicios móviles. Actualmente, el mayor medio de acceso a internet es la banda ancha móvil y es por tal motivo que cada vez es necesario aún más espectro para las tecnologías.

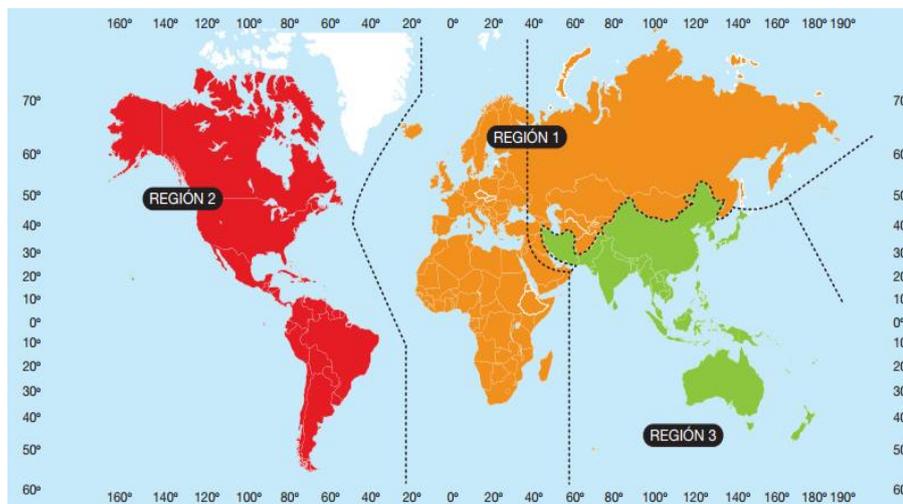
Una de las bandas de frecuencia más atractivas para el desarrollo de la tecnología LTE es la banda AWS (Advanced Wireless Services) en conjunto también con la banda 700 MHz. [3].

### **2.2.1 Banda AWS (Advanced Wireless Services).**

El uso exclusivo de la banda AWS es específicamente para servicios de telefonía y banda ancha inalámbrica 3G y 4G, la cual abarca tecnologías como WCDMA / HSPA, CDMA y LTE. Es una banda que se subdivide en pequeños espacios de frecuencias que están destinados a cada empresa que posee su licencia.

Esta banda es una mezcla de dos bandas apareadas, es decir posee una banda tanto para el link de subida y otra banda para el link de bajada. La banda para el link de subida corresponde a la transmisión de terminales móviles a estaciones bases, esto se efectúa en el rango de 1710 MHz a 1750 MHz; por otro lado tenemos que la banda para el link de bajada corresponde a la transmisión de torres hacia los teléfonos en el rango de los 2110 MHz a 2150 MHz [16].

La banda AWS es reconocida como la banda IV para la oferta de servicios móviles UMTS por la UIT para la Región II que corresponde a las Américas, es también conocida como banda UMTS 1700 o AWS-1; en la Región I y III se utiliza la Banda I UMTS (2100). En la figura 2.9 se muestra como las Regiones I, II y III están distribuidas.



**Figura 2.9: Distribución de las regiones I, II y III [3].**

El ancho de banda que comprende esta banda es desde los 1700 MHz hasta los 2100 MHz y está destinada para los servicios de modalidad por Dúplex por División de Frecuencia (FDD) y se encuentra en dos espacios del espectro radioeléctrico. Es posible que esta banda pueda ampliarse tomando los bloques 1755 – 1770 y 2155 – 2170 MHz, en este caso la banda tomaría el nombre de Banda X de AWS y AWS-X. Según sea el caso de la Banda IV o la Banda X, se tiene espectro disponible de 90 MHz y 120 MHz respectivamente [3]. En la figura 2.10 se muestra el ancho de banda correspondiente a la banda IV y banda X y los canales que posee.



**Figura 2.10: Canales existentes en la banda IV y la banda X [3].**

### 2.3 Radio Cognitiva (RC).

Es un sistema de comunicación que se basa específicamente en la “radio definida por software” o conocida con sus siglas en inglés como SDR, es muy importante para las tecnologías actuales ya que constituye la parte configurable de una red, es decir, implementa un sin número de componentes de un sistema tradicional como moduladores, filtros, amplificadores, etc. por software en vez de tener la parte física que sería el hardware.

Es una vía muy beneficiosa para las tecnologías existentes, ya que presenta un acceso configurable a su implementación que es software, todo esto es posible realizar mientras el sistema está en proceso y usarlo a conveniencia. Por ejemplo, la misma radio puede acceder a una red celular y a un sistema Wi-Fi, en pocas palabras su funcionamiento puede ser configurado por medio de un software.

En definitiva la RC (Radio Cognitiva) es una técnica en la que amplía las posibilidades del transmisor/receptor de un dispositivo para que se acople en el escenario que se le presente y pueda desarrollarse, es decir en el espectro radioeléctrico, y poder ser más eficiente al momento de su funcionamiento. Con la RC es posible hacer un uso más eficiente del espectro radioeléctrico y aprovechar esos espacios no utilizados por usuarios sin que haya interferencia entre ellos. La RC puede detectar espectro libre o que no esté siendo utilizado en ese momento, para hacer uso de ese espectro sin que haya interferencia con los usuarios autorizados en la banda (usuarios licenciados).

Se busca que en un futuro los dispositivos se adapten al medio donde se encuentran y si detectan que hay problemas de comunicación entonces estos emigraran a otras tecnologías como 3G o 4G por así mencionarlo, y si en la tecnología en la que están trabajando existen más canales disponibles, usen esos canales para aumentar el ancho de banda. Todo esto se realizara de manera automática sin importar la etapa física si no solo el protocolo lógico de alto nivel como por ejemplo TCP/IP, aumentando el rendimiento y eficiencia de las redes de manera exponencial. [16]

### **2.3.1 Redes cognitivas.**

Llamadas también redes del conocimiento, básicamente lo que estas redes procuran es la adaptación dinámica mediante su cualidad de auto-configuración para abarcar su demanda; satisfacen al operador y mejoran la capacidad de la red.

Las redes cognitivas realizan un proceso de identificación de condiciones, el estado de la red y basándose en esto realizan la toma de decisiones para mejorar el escenario. Los receptores proporcionan información valiosa en tiempo real de la red, por lo que se mejora su capacidad adaptativa y aumenta su agilidad. Se desenvuelven manejando las frecuencias de emisión y los parámetros de modulación; con la introducción de la microelectrónica se puede sustituir componentes físicos por programación, es decir por software y aumentar la eficacia de los dispositivos sin aumentar su coste. [17].

### **2.3.2 Aprovechamiento del espectro.**

El espectro radioeléctrico si bien se conoce que es un bien escaso, tampoco se está haciendo una buena administración del mismo, es decir se puede tener dos escenarios: el primero, el espectro está controlado por el estado y éste es el encargado de asignar el ancho de banda correspondiente a cada operadora o usuario licenciado y hay la posibilidad que estos usuarios no utilicen el espectro por completo; el segundo se refiere a el uso de bandas definidas como bandas de uso libre o bandas no licenciadas como lo es el caso de la tecnología Wi-Fi.

La situación gira entorno a el hecho de que existen políticas y normas que rigen estrictamente el uso del espectro radioeléctrico y en el caso de usuarios licenciados, al no poder usar nadie más su banda asignada, esto provoca que su uso sea bajo o nulo; por otro lado existen bandas que están muy congestionadas por las diferentes tecnologías como por

ejemplo las de telefonía celular, al menos a ciertas horas del día o en lugares específicos donde haya aglomeración de usuarios.

Para poder lograr un uso más eficiente del espectro se trata de hacer una asignación variable con la ayuda de antenas inteligentes, que permitieran a los usuarios no autorizados ocupar dichos canales que se encuentran vacíos, siempre y cuando su transmisión no haga interferencia; y de querer los usuarios licenciados hacer uso de estos canales, los no autorizados migren a otros canales de haber alguno disponible para continuar con su transmisión.

Por eso la radio cognitiva se enfoca en el testeado del espectro radioeléctrico para encontrar dichos “huecos” o “espacios en blanco” en tiempo real en las proximidades de un receptor y poder brindar esa información para que los usuarios no autorizados puedan acceder a ellos.

La aplicación de software en los protocolos de radiocomunicación predice en convertir a las redes móviles e inalámbricas en algo más eficaz para la sociedad, ya que se utilizará el espectro al máximo y así poder reducir costos. [18].

#### **2.4 White Space.**

En la actualidad existen muchas bandas de frecuencia asignadas a operadoras y usuarios particulares, sin embargo éstos no hacen el uso total del espectro durante todo el tiempo o en todas las partes geográficas. Esto provoca que existan los “White Space” que se son espacios de frecuencia no utilizados por los usuarios licenciados y que nadie más puede acceder.

Se procura encontrar la manera de que los usuarios autorizados hagan uso de este espectro disponible, suponiendo su transmisión no haga interferencia con las transmisiones licenciadas, y así hacer un uso más eficiente del espectro. Estos espacios en blanco se han producido en gran parte por el avance tecnológico que ha tenido la Televisión al producirse el denominado “apagón analógico” que no es más que la migración de la tecnología analógica a

tecnología digital. Los rangos de estos espacios en blanco por lo general son en bandas de frecuencia bajas entre los 50 MHz y 700 MHz que en particular tienen una gran característica de propagación. [19] [20].

El acceso a este espectro disponible podría agilizar la congestión en las redes ya existentes y obtener una mejor velocidad por usuario. En Estados Unidos, la comisión de comunicaciones federales ha dictaminado que los usuarios que puedan asegurar que no harán interferencia con las transmisiones asignadas, puedan hacer uso de estos espacios en blanco.

#### **2.4.1 Requisitos para LTE en White Space.**

LTE proporciona un sistema adecuado para aprovechar estos espacios en blanco y poder establecer su tecnología. Lo puede hacer de dos maneras: la primera es haciendo que los UE estén censando todo el espectro para hallar la disponibilidad de los canales e informar al eNodeB, éste analizará la información recibida y decidirá si el escenario es propicio para seguir transmitiendo o el UE deba migrar a otro canal disponible.

El segundo caso posible es que exista una base de datos donde haya información de la disponibilidad de canales y de geo-localización en tiempo real y que en eNodeB puede acceder a ella para estar informados. Estas maneras dinámicas de adaptarse al escenario en que se encuentran deben ir acompañadas de la capa física, la cual debe ser flexible para adaptarse a diferentes ocasiones y a cambiar de un canal a otro cuando se lo requiera sin perder la transmisión de los usuarios o que haya un error en la misma; al hablar de flexibilidad nos referimos que debe ser capaz de ajustar dinámicamente su ancho de banda, la modulación y esquemas de codificación basados en las condiciones cambiantes del espacio en blanco. [20].

## 2.5 Acceso Dinámico al Espectro (DSA).

Actualmente existen muchas ineficiencias con respecto al uso del espectro radioeléctrico, los entes reguladores no han podido hacer una repartición eficaz para el uso del mismo y cada vez se busca la forma de aprovecharlo de una manera óptima y en su totalidad, recurso que es limitado. Cada vez existe más demanda para el uso de las tecnologías que ya existen como por ejemplo, los sistemas basados en el estándar IEEE 802.11 han aumentado de manera considerable sobre las zonas geográficas densas, es decir donde hay mucho tráfico de datos por lo general son zonas urbanas y esto podría traer problemas de congestión y bajo rendimiento en las redes debido a los pocos canales disponibles y la cantidad de usuarios existentes. [21].

Es claro que una sola tecnología no podrá satisfacer las exigencias que en la actualidad se tienen, por eso será necesaria la convergencia de varias de ellas para poder obtener un fin beneficioso, es por eso que hay desarrollo en diferentes áreas y de forma simultánea. En la figura 2.11 se observa el procedimiento del ciclo cognitivo.

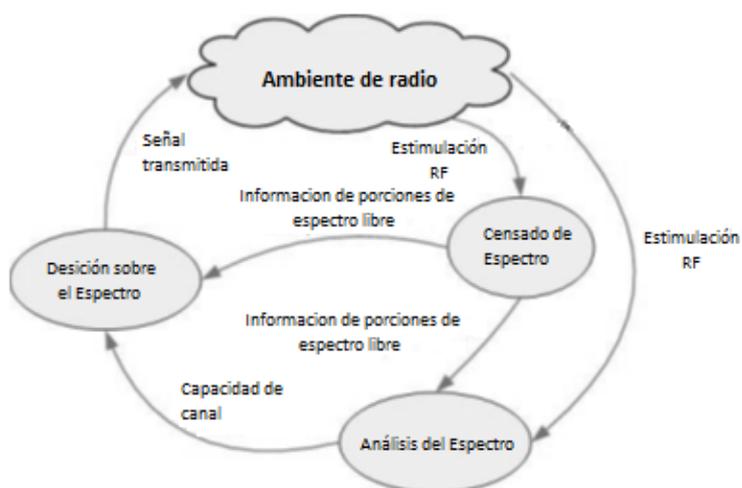


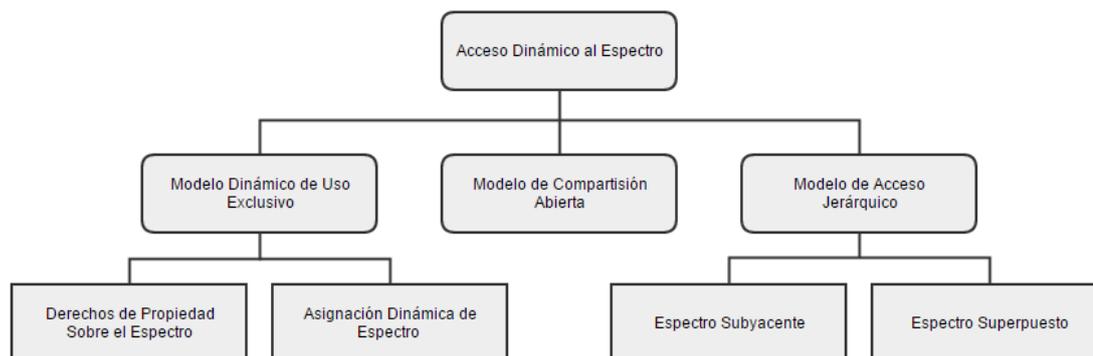
Figura 2.11: Ciclo cognitivo [22].

La configuración automática e inteligente de la capa física están siendo llevadas en práctica por dos tecnologías que se complementan, la una es SDR (Software Defined Radio) y la otra es CR (Cognitive Radio). La SDR es una tecnología basada en un software reconfigurable o reprogramable, sus parámetros y comportamiento pueden ser alterados en dicho software, esto representa una ventaja para usos en particular. La CR es una radio inteligente, la cual puede auto-configurarse dependiendo de los parámetros censados y de la información que tenga en esa ocasión. En la figura 2.12 se observa una representación de como la técnica DSA aprovecha los espacios en blanco y hacer uso de ellos sin hacer interferencia.



**Figura 2.12: Acceso Dinámico al Espectro [22].**

En lo que respecta a DSA (Dynamic Spectrum Access) usado para las funciones de análisis y decisión del espectro, se conoce que es un conjunto de técnicas para poder acceder al espectro bajo condiciones determinadas que dependen de la arquitectura de la red, de la frecuencia en la que opera y otros requerimientos [22]. Entre esas técnicas tenemos la siguiente taxonomía de DSA que se muestra en la figura 2.13.



**Figura 2.13: Acceso Dinámico al Espectro: Taxonomía de sus técnicas [22].**

## 2.6 Estudios del espectro radioeléctrico.

El espectro radioeléctrico es un recurso natural que resulta atractivo e indispensable para el campo de las telecomunicaciones en cada uno de los países existentes; no solo forma parte fundamental para que las personas puedan integrarse y mantenerse informados si no que inclusive proporciona fuentes de negocios y trabajos, así como también contribuye a la economía de cada uno de los países [23].

Algunos países con el objetivo de dimensionar la utilización del espectro radioeléctrico, por ejemplo, el Reino Unido estimó que el uso del mismo atrajo beneficios en su economía de £42.4 billones para el 2006.

En los países de la región de Centroamérica como son: Costa Rica, El salvador, Guatemala, Nicaragua y Panamá, se ha determinado que existe una mayor competencia en el sector de las telecomunicaciones.

Por ejemplo en Costa Rica existe el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) que es la compañía estatal que proporciona los servicios básicos de electricidad y telecomunicaciones a dicho país, este instituto maneja la telefonía celular y también la provisión del servicio de banda ancha. Es a través de la aprobación de la Ley General de Telecomunicaciones que obtuvieron la modernización y la flexibilidad en el sector de las telecomunicaciones. En tema a sus avances en materia de telecomunicaciones, Costa Rica digitalizó su red fija desde el 2005 y cuenta con la más alta penetración en telefonía fija que corresponde a 32 por

cada 100 habitantes en la región. También hay que mencionar que el estado costarricense ha aumentado la otorgación de espectro radioeléctrico a su único operador, este aumento consistió en pasar de 93 MHz a 117 MHz del año 2003 al 2009.

Así mismo en El Salvador durante los años del 2003 al 2009, su disponibilidad de espectro radioeléctrico pasó de 138 MHz a 177 MHz obteniendo reducciones en los precios con un promedio de 34% interanuales y un aumento en la tasa de penetración de 16 líneas a 107 líneas por cada 100 habitantes.

Guatemala es el país con más entrega de espectro radioeléctrico, otorgando de 140 MHz a 183 MHz desde el 2003 al 2009 y reduciendo sus llamadas por 3 minutos en un 9% interanual.

Esto da una pauta para estimar la situación del espectro radioeléctrico y poder tener un mejor aprovechamiento del mismo [23].

## CAPÍTULO 3

### 3. PROCESO DE MEDICIÓN.

En este capítulo se procederá a indicar todas las características necesarias para el proceso de medición, también datos referentes al escenario de medición como distancias entre los equipos y las antenas. Se detallarán las especificaciones técnicas usadas en el software de LabVIEW así también como las especificaciones de los equipos a usarse.

Se indicaran algunas expresiones matemáticas para poder definir ciertos parámetros necesarios para un correcto uso en los análisis correspondientes al siguiente capítulo. Se incluirán también el análisis de tres variables aleatorias para hacer una breve comparación entre ellas y llegar a un resultado de modelo estadístico definido para la disponibilidad de canales.

#### 3.1 Descripción del proceso de medición.

Para empezar a definir el proceso de medición, cabe recalcar primero que este va a ser procesado en una edificación en la zona urbana de Guayaquil, el cual fue elegido el Servicio de Rentas Internas (SRI) para capturar datos de Niveles de Potencia de la Tecnología LTE. También hay que tener en cuenta que se están midiendo un ancho de banda de frecuencia el cual abarca canales de Uplink y Downlink de las operadoras CNT y CLARO, por esto debemos tener cuenta las ubicaciones de sus respectivas Bases Station (BS), las distancias de las mismas con respecto a la zona de medición serán detalladas en el capítulo 4.

El proceso de medición será implementado como un sistema de tres fases: Fase de Recepción, Fase de Captura y Procesamiento de los Datos y la última es Fase de Control de Datos, como se observa en la figura 3.1.



**Figura 3.1: Fases de Medición**

### **Fase de recepción de la señal.**

En esta primera estancia, lo que se busca es recibir la señal de interés; esto se logra usando la antena SIRIO SD 3000 que se encarga de esta operación en específico. Esta antena abarca un amplio rango de frecuencia que parte desde los 300 MHz hasta los 3000 MHz, en donde se encuentra inmerso el ancho de banda que analizamos para la tecnología LTE (1700 – 2100 MHz).

El patrón de radiación de esta antena es omnidireccional, al recibir las señales en todos los sentidos o direcciones, representa una gran oportunidad para poder abarcar todas las señales que se requieren.



**Figura 3.2: Antena SIRIO SD 3000**

### **Fase de captura de datos y procesamiento.**

En esta fase, los datos en cuestión son valores de potencia recibidos por la antena y procesados por medio del equipo de la gama de National Instruments (NI) USRP-N210, a la vez que guarda dichos datos con ayuda del programa LabVIEW.

Cabe recalcar que para obtener mejores resultados en base a los datos obtenidos, se necesita que haya la menor pérdida posible en todo el proceso de adquisición de datos, es por eso que se utilizó un cable tipo N que proporciona baja pérdida.

Una de las características de la USRP-N210 de la figura 3.3 es que tiene un gran dinamismo de procesamiento y gracias a esto se pudo procesar datos de más de un canal a la vez (8 canales de Uplink y 8 canales de Downlink que se analizan), cada canal en un intervalo de tiempo, y se pudo obtener las 58795 muestras que se necesitan para estimar una buena curva estadística.



**Figura 3.3: USRP N210**

#### **Fase de control de datos.**

En esta fase el computador se encarga de procesar todos los datos mediante el software LabVIEW el cual está conectado con cable Ethernet a la USRP. Estos datos son guardados al software Excel, teniendo en cuenta que se generaran tantos archivos como canales estén siendo analizados con la USRP.

Gracias a esta fase se obtendrá todos los datos necesarios para proceder a hacer los respectivos análisis requeridos en el proyecto. Aquí es donde se podrá establecer los correctos parámetros para una medición muy precisa, todos estos parámetros serán ingresados en el software LabVIEW.

Cabe recalcar que en esta fase también se usará Matlab para realizar graficas de los niveles de potencia, disponibilidad, función de densidad acumulada CDF.

### 3.2 Potencias recibidas.

Para poder hacer un análisis de las potencias recibidas con la mayor exactitud posible, es necesario que las potencias obtenidas por la USRP sean las mismas que las que la antena está recepiendo. Gracias a que la USRP tiene un amplificador interno se puede contrarrestar los efectos de pérdida que se encuentran de manera inminente en el sistema, en base a el circuito de radiofrecuencia tenemos la ecuación (3.1).

$$PR_{Ant} = PR + L_c + L_{cc} - G - G_{Ant} \quad (3.1)$$

Donde.

$PR_{Ant}$ : Potencia recibida en la antena.

$PR$ : Potencia recibida por la USRP.

$L_c$ : Pérdida que genera el cable coaxial tipo N

$L_{cc}$ : Pérdida generada por los conectores.

$G$ : Ganancia del USRP.

$G_{Ant}$ : Ganancia de la antena.

### 3.3 Proceso detallado de la medición.

Se realizara el monitoreo en un rango de frecuencia de la banda AWS en el cual se obtendrá los niveles de potencia por canal medido, para esto cabe recalcar que el rango de frecuencia esta entre 1710 y 1750 MHz para los canales de Uplink de las dos operadoras y también se analizara el rango de Downlink que esta entre 2110 y 2150 MHz.

Para configurar en la USRP mediante LabVIEW se aplicarán las frecuencias centrales de cada canal, para fines prácticos la USRP se le configuró canales con un ancho de banda de 5 MHz pero hay que tener en cuenta que el ancho de banda de canal de la tecnología LTE es de 10 MHz, se tendrán 16 canales en total para el análisis.

Es necesario establecer la conexión entre la USRP y el ordenador mediante direcciones IP, ya que sin esto el algoritmo para la medición no podría hacer su trabajo.

### 3.4 Variables aleatorias a analizar.

Luego de haber analizado el escenario de estudio en el que se está realizando después de la obtención de datos, se continúa con el modelamiento estadístico de dichos datos para poder saber su comportamiento.

Se debe tomar en consideración que los datos obtenidos presenten una variación con respecto al tiempo, es decir, que el comportamiento que presenten estos datos sea de tipo estocástico; luego se continúa con el modelado, es por esto que los datos serán considerados como una variable aleatoria como se muestra en la ecuación (3.2).

$$P = [P1, P2, P3, \dots Pn] \quad (3.2)$$

Una vez obtenidos estos datos se procede a hacer la comparación con el nivel de umbral, el mismo que será calculado con respecto a la estación base (BS) y el nivel de ruido (SNR) de la modulación usada por las operadoras en el Ecuador. El valor mínimo teórico del SNR es de 7.9 dB el cual fue obtenido porque las operadoras modulan en 16 QAM [24].

El umbral de sensibilidad en una estación base (BS) de área local y para ancho de banda de 5 MHz que tiene cada canal es de -93.5 dBm [25].

A este nivel de sensibilidad habrá que sumarle el valor mínimo de SNR y a partir de esta operación se obtendrá el umbral  $\lambda$  como se muestra en la ecuación (3.3).

$$\lambda = S + SNR = -93.5 + 7.9 = -85.6 \text{ dBm} \quad (3.3)$$

Con este umbral obtendremos valores de ceros y unos en base a una comparación que se realizara con los niveles de potencia medidos como se observa en las ecuaciones (3.4) y (3.5). Si la potencia medida está por encima del umbral el valor será de cero mientras que si se encuentra por debajo del umbral muestra un valor de uno.

$$si P \geq \lambda, entonces D = 0 \quad (3.4)$$

$$si P < \lambda, entonces D = 1 \quad (3.5)$$

Donde D es la disponibilidad mostrada en cada canal siendo 1 el máximo valor de disponibilidad posible.

Una vez realizada esta comparación se procederá a evaluar un promedio de las mismas con una granularidad de 5 minutos como se ve en la ecuación (3.6) ya que en base al tiempo que se demora una muestra se obtienen una buena cantidad de datos, alrededor de 2000 que ya con esa muestra se puede realizar una muy buena aproximación en el modelado.

$$X = \frac{300 \text{ seg}}{10.46 \text{ seg}} = 28 \text{ Muestras} \quad (3.6)$$

Con esta granularidad de la disponibilidad se obtendrá un total de 2099 datos que son con los que se empezará a hacer el análisis para saber si algún canal está o no disponible.

Para esto cabe recalcar que se analizarán 3 distribuciones estadísticas y llegar a concluir que una de estas 3 es la adecuada para el modelamiento de disponibilidad, estas 3 distribuciones son: Gamma, Beta y Erlang.

### Distribución Gamma.

Una variable aleatoria  $D$  continua tiene distribución gamma con parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  si su densidad es la que se muestra en la ecuación (3.7).

$$f(D) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} D^{\alpha-1} e^{-D/\beta} \quad (3.7)$$

Dónde:  $D \geq 0$ ,  $\alpha > 0$  y  $\beta > 0$ ; con media y varianza mostradas en las ecuaciones (3.8) y (3.9).

$$\mu = \alpha\beta \quad (3.8)$$

$$\sigma^2 = \alpha\beta^2 \quad (3.9)$$

### Distribución Beta.

Una variable aleatoria  $D$  continua tiene distribución beta con parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  si su densidad es la que se muestra en la ecuación (3.10).

$$f(D) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} D^{\alpha-1} (1-D)^{\beta-1} \quad (3.10)$$

Dónde:  $0 \leq D \leq 1$ ,  $\alpha > 0$  y  $\beta > 0$ ; con media y varianza mostradas en las ecuaciones (3.11) y (3.12).

$$\mu = \frac{\alpha}{\alpha+\beta} \quad (3.11)$$

$$\sigma^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)} \quad (3.12)$$

**Distribución Erlang.**

Una variable aleatoria  $D$  continua tiene distribución erlang con parámetros  $\kappa$  y  $\lambda$  si su densidad es la que se muestra en la ecuación (3.13).

$$f(D) = \lambda e^{-\lambda D} \frac{(\lambda D)^{\kappa-1}}{(\kappa-1)!} \quad (3.13)$$

Dónde:  $D \geq 0$ ,  $\lambda \geq 0$ ; con media y varianza mostradas en las ecuaciones (3.14) y (3.15).

$$\mu = \frac{\kappa}{\lambda} \quad (3.14)$$

$$\sigma^2 = \frac{\kappa}{\lambda^2} \quad (3.15)$$

## CAPÍTULO 4

### 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

En este capítulo se presentarán los parámetros usados para la configuración del software que mide los niveles de potencia de la banda AWS, también se procederá a describir la ubicación geográfica del edificio donde se realizaron las mediciones. Seguido de esto se realizara el análisis de los niveles de potencia, para así determinar si existe disponibilidad en los canales estudiados y poder realizar un modelamiento estocástico.

#### 4.1 Ubicación geográfica y tiempo de medición.

En base a los requerimientos del proyecto integrador se realizaron las mediciones en un edificio de la zona urbana de Guayaquil, este edificio consta de 13 pisos de los cuales fueron escogidos planta baja, quinto piso y undécimo piso, para en estos realizar las mediciones de niveles de potencia. Dicho edificio se encuentra ubicado en base a coordenadas obtenidas de la aplicación Google Earth son (Latitud: 2° 9'46.43"S y Longitud: 79°53'52.50"O).



**Figura 4.1: Ubicación geográfica del edificio en estudio**

En la figura 4.1 se aprecia la ubicación del edificio y sus BS más cercanas, en el edificio Centrum se encuentra la Radio Base de CLARO y en el edificio del Gobierno Zonal se encuentra la Radio Base de CNT.

#### 4.2 Parámetros de configuración.

Como se mencionó en capítulos anteriores la banda a analizar es la AWS en el Ecuador, cada canal tiene un ancho de banda de 10 MHz como se especificó en el capítulo 3, debido a configuración de la USRP el ancho de banda de canal de la tecnología será de 5 MHz.

Parámetros	Valores
Ancho de banda, BW	1710 - 2110 MHz
Ancho de banda del canal, $\Delta f$	5 MHz
Frecuencia inicial, $f_0$	1710 MHz
Frecuencia final, $f_N$	2110 MHz
Canal inicial, $Ch_1$	1
Canal final, $Ch_N$	16
Número de canales, N	16
Número de muestras (Disponibilidad), $N_s$	8
Potencia umbral [#], $\lambda$	-85,6 dBm
Tiempo de captura por canal, $T_c$	10,46 s

**Tabla 1: Parámetros de configuración**

En la tabla 1 se observan los parámetros a ser configurados en el USRP, el número de muestras de canales que serán analizados para la disponibilidad. También se tiene el tiempo de captura por canal el cual será usado para obtener la granularidad de la disponibilidad.

### 4.3 Análisis de los datos.

En capítulos anteriores se había dicho que el proyecto integrador constaba de una parte de medición de niveles de potencia, a continuación se procederá a hacer el análisis de estos datos. Cabe recalcar que dichos datos fueron obtenidos en tres niveles del edificio, cada nivel durante un tiempo de una semana.

#### 4.3.1 Análisis de los niveles de potencia.

Para empezar este análisis se lo enfocará en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4, que muestran los niveles de potencia de la planta baja, quinto piso y undécimo piso respectivamente. Cabe recalcar que el color rojo indica el mayor nivel de potencia, mientras que el azul indica los niveles más bajos.

Analizando la figura 4.2 que corresponde a la planta baja se puede apreciar que los 8 primeros canales que son los de uplink de CNT y CLARO muestran un color azul oscuro ( $PR_{Ant} \approx -90 \text{ dBm}$ ) y tampoco se observa mucha variabilidad lo que permite concluir que estos canales están disponibles para posible uso de Sistemas con Acceso Oportunista al Espectro (OSA).

Así mismo los canales 9, 10, 11 y 12 que son los canales de downlink de CNT muestran una tonalidad más celeste la mayor parte del tiempo ( $PR_{Ant} \approx -60 \text{ dBm}$ ) y si se realiza la comparación con el umbral de potencia de LTE que es ( $\lambda = -85,6 \text{ dBm}$ ), entonces debido a que el nivel de potencia de la antena se encuentra sobre el nivel del umbral se puede concluir que estos canales se encuentran ocupados.

También se observa que en los canales 13, 14, 15 y 16, canales que son de downlink de la operadora CLARO muestran una tonalidad entre azul y celeste ( $PR_{Ant} \approx -85 \text{ dBm}$ ) por ende se dice que estos canales están intermitentes, esto significa que en ciertos lapsos de tiempo los canales se encuentran disponibles y en otros lapsos de tiempo se encuentran ocupados.

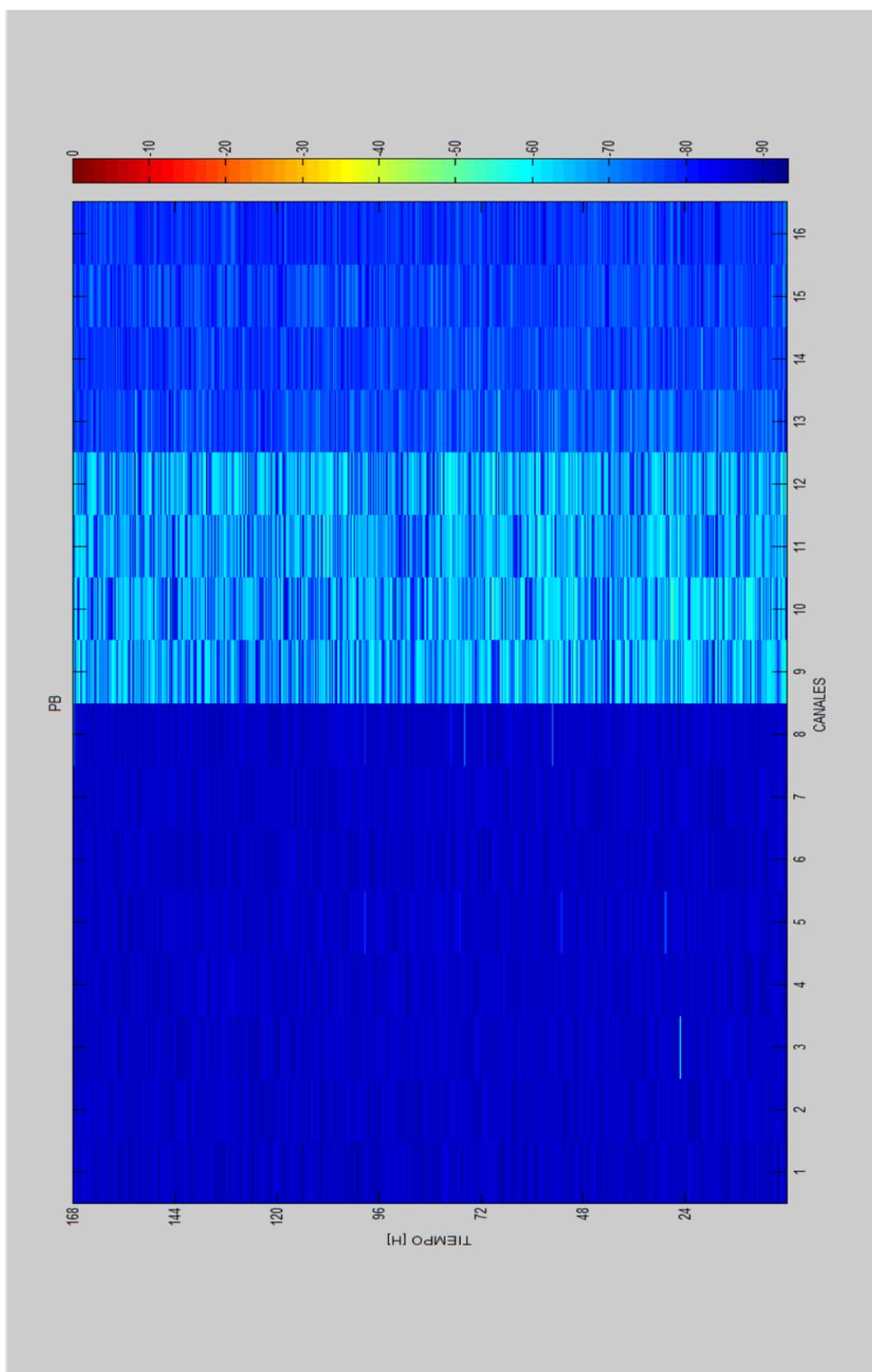


Figura 4.2: Niveles de potencia de la banda AWS (planta baja)

A continuación en la figura 4.3 correspondiente a el quinto piso realizando el mismo análisis se puede observar que los niveles de potencia de los canales de uplink de ambas operadoras móviles, es decir los 8 primeros canales están en una tonalidad entre azul y celeste, y la mayor parte del tiempo está muy cerca del umbral ( $PR_{Ant} \approx -85dBm$ ) es decir estos canales de uplink en el quinto piso se encuentran intermitentes.

Sin embargo los canales de downlink se encuentran con una tonalidad la mayor parte del tiempo celeste ( $PR_{Ant} \approx -80dBm$ ), entonces estarían por encima del umbral de LTE que es ( $\lambda = -85,6 dBm$ ) y se puede concluir que estos canales al igual que en la planta baja también se encuentran ocupados, por lo tanto no es posible usar estos canales para un Sistema de Acceso Oportunista al Espectro (OSA).

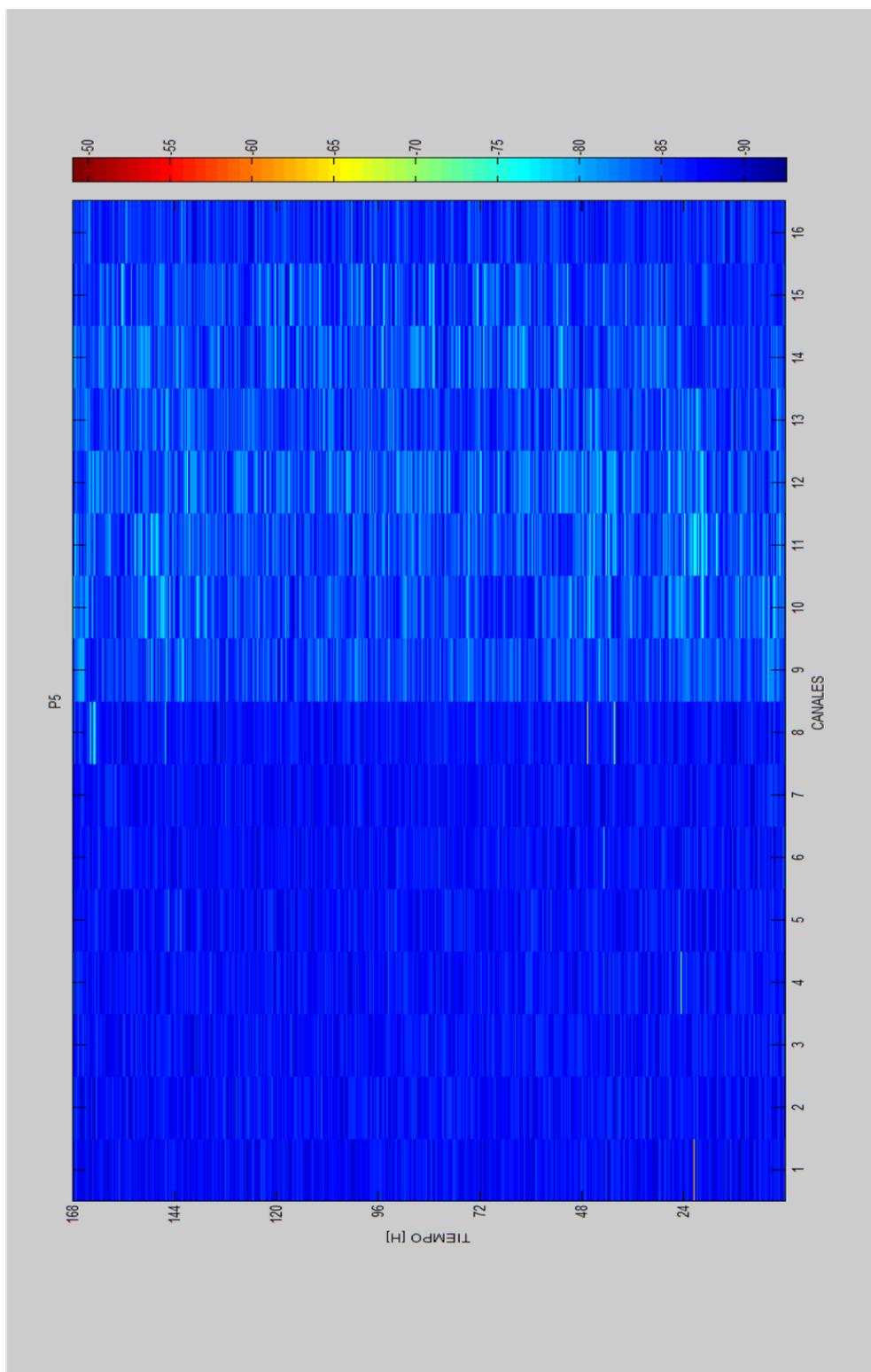


Figura 4.3: Niveles de potencia de la banda AWS (quinto piso)

En la figura 4.4 correspondiente a el undécimo piso se puede observar que en los canales de subida de datos en ambas operadoras tienen como una tonalidad azul oscuro ( $PR_{Ant} \approx -85 \text{ dBm}$ ) es decir se encuentra cerca del umbral ( $\lambda = -85,6 \text{ dBm}$ ), y por lo tanto se concluirá que en este piso dichos canales de uplink se encuentran intermitentes.

También se puede apreciar en los canales de downlink de CNT se encuentran con un color celeste ( $PR_{Ant} \approx -70 \text{ dBm}$ ), es decir están sobre el umbral ( $\lambda = -85,6 \text{ dBm}$ ) y entonces estos canales están ocupados la mayor parte del tiempo.

En los canales de downlink de CLARO se observa una tonalidad un poco más oscura que los canales pertenecientes a CNT ( $PR_{Ant} \approx -78 \text{ dBm}$ ), pero también se encuentran sobre el umbral permitido por ende estos canales se encuentran ocupados.

Entonces como conclusión se dirá que los canales 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 que cabe recalcar son canales de downlink no están disponibles para uso de sistemas con Acceso Oportunista al Espectro (OSA).

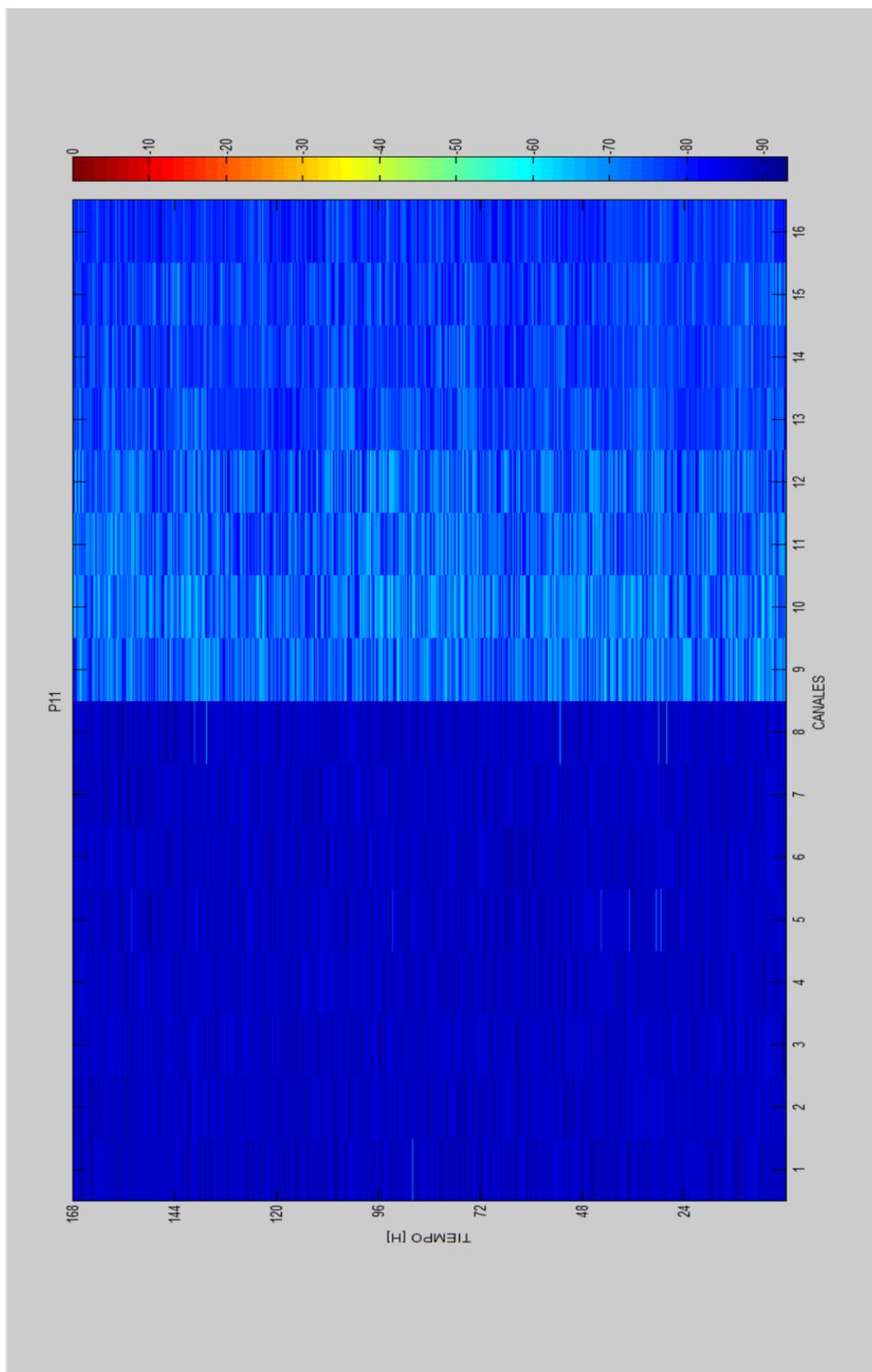


Figura 4.4: Niveles de potencia de la banda AWS (undécimo piso)

En la figura 4.5 se observa la disponibilidad de canales en la planta baja. Aquí se puede notar que en los canales cuyos niveles de potencia son muy bajos se observara una muy alta disponibilidad y será mostrada con color rojo. Entonces notamos esa tonalidad roja en los 8 canales de uplink por ende son canales totalmente disponibles.

En los canales 9, 10, 11 y 12 correspondientes a downlink se encuentra con un color entre celeste pero la mayor parte del tiempo azul oscuro con esto podremos interpretar que estos canales se encuentran de manera intermitente.

En la figura 4.6 correspondiente a el quinto piso podemos observar una gran variación en las tonalidades al menos en los canales de downlink se ve que estos canales están muy intermitentes, esto debe ser debido a que su radio base se encuentra a una altura muy similar y en base a el patrón de radiación de las antenas sectoriales la mayor potencia irradiaría en este piso.

En los canales de uplink también se observa una variación pero esta es muy tenue es decir igual se puede concluir que la mayor parte del tiempo estos canales se encuentran disponibles.

Se puede resaltar el canal 16 que es downlink de CLARO que tiene una tonalidad amarilla es decir su disponibilidad está en 0,5 aproximadamente, este canal podría ser el que en la mayor parte del tiempo esta intermitente.

En la figura 4.7 se observa la disponibilidad en el undécimo piso aquí notamos que en los canales 10 y 13 que son de downlink de CNT y CLARO respectivamente un color azul es decir disponibilidad cero. También se puede concluir en base al tiempo en que permanecen azules que todos los canales de downlink se encuentran ocupados.

En los canales de uplink se observa una tonalidad roja la mayor parte del tiempo es decir estos canales se encuentran disponibles para posible uso con sistemas de Acceso Oportunista al Espectro.

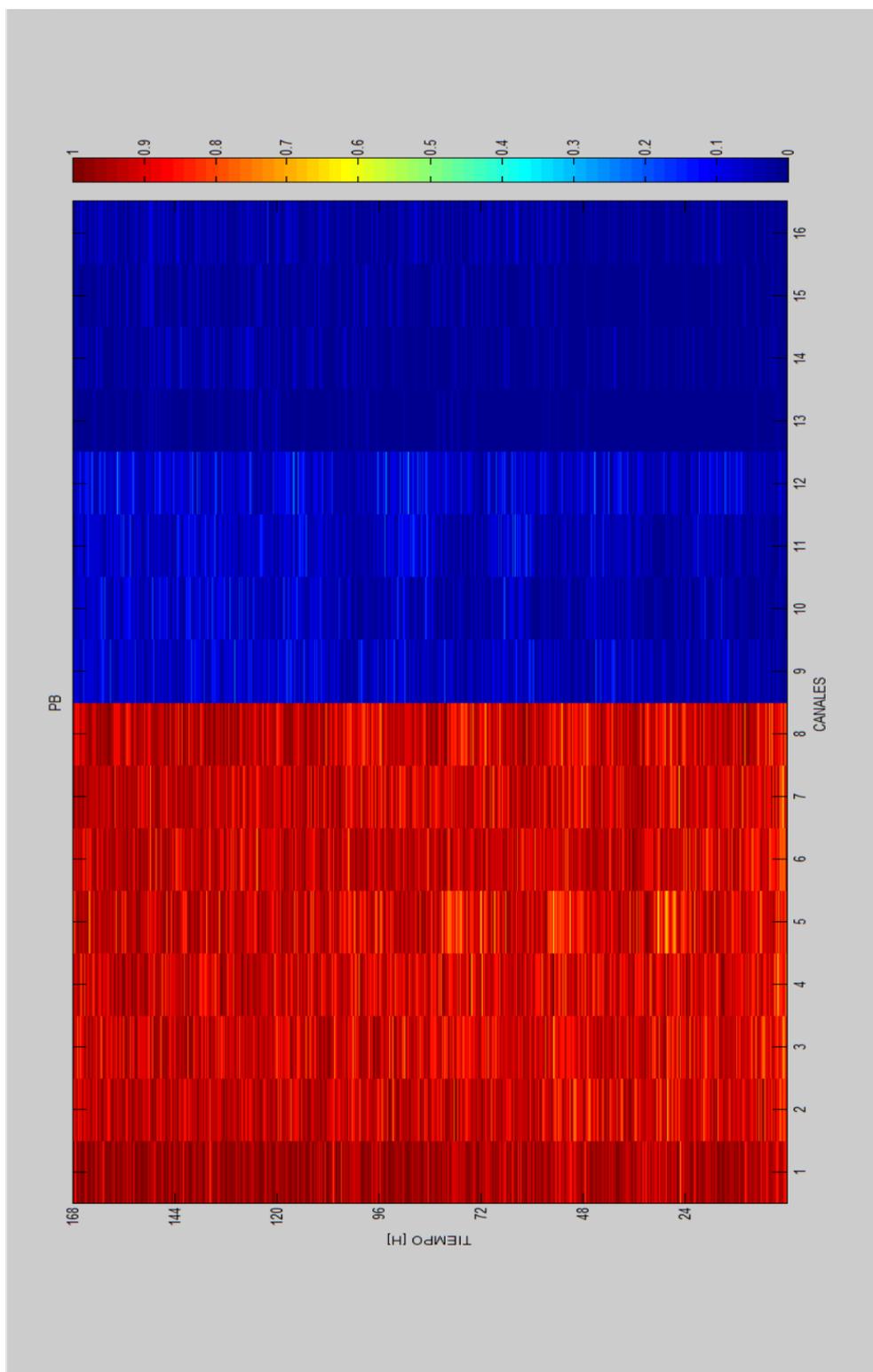


Figura 4.5: Disponibilidad temporal de la banda AWS (planta baja)

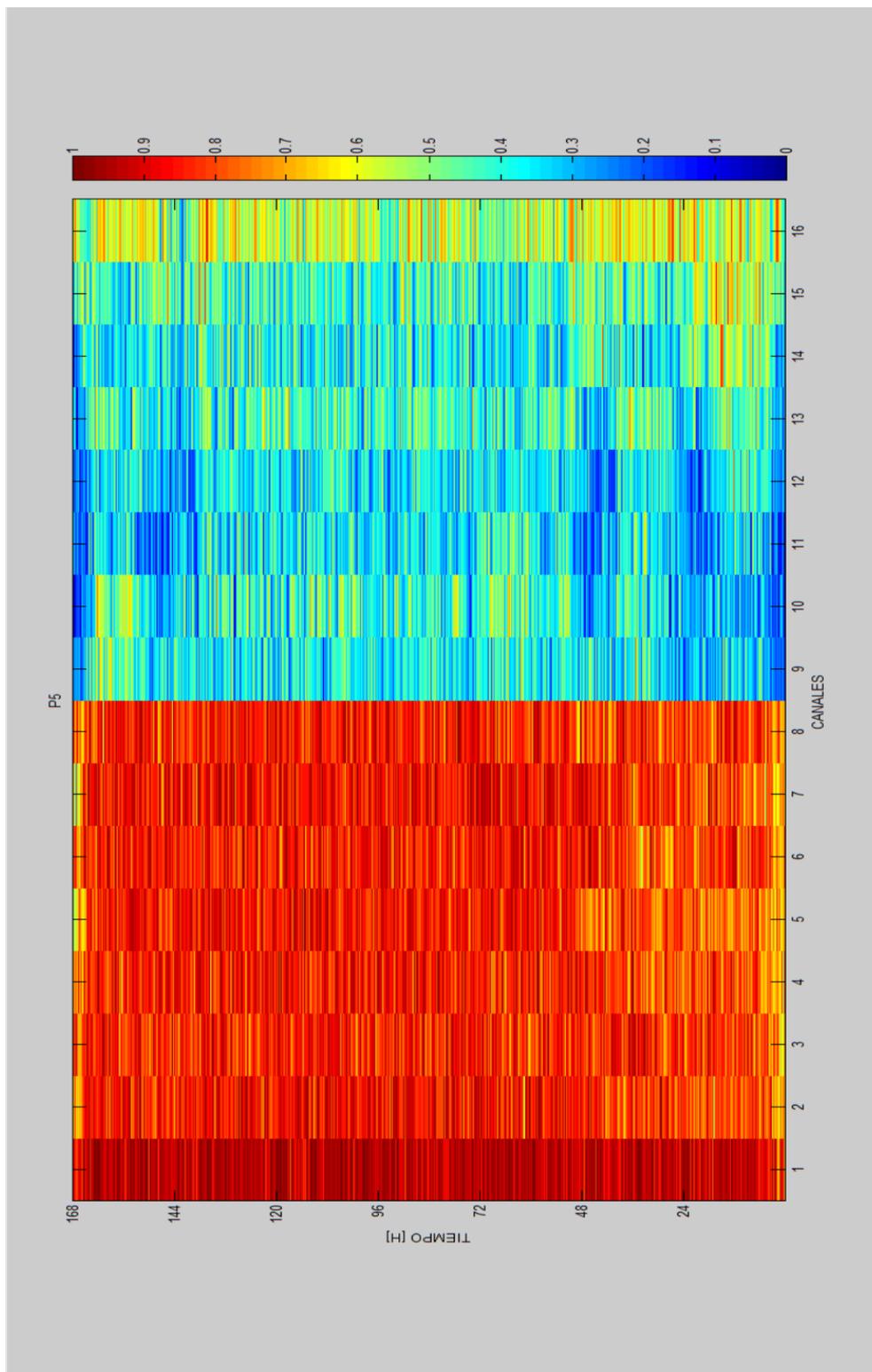


Figura 4.6: Disponibilidad temporal de la banda AWS (quinto piso)

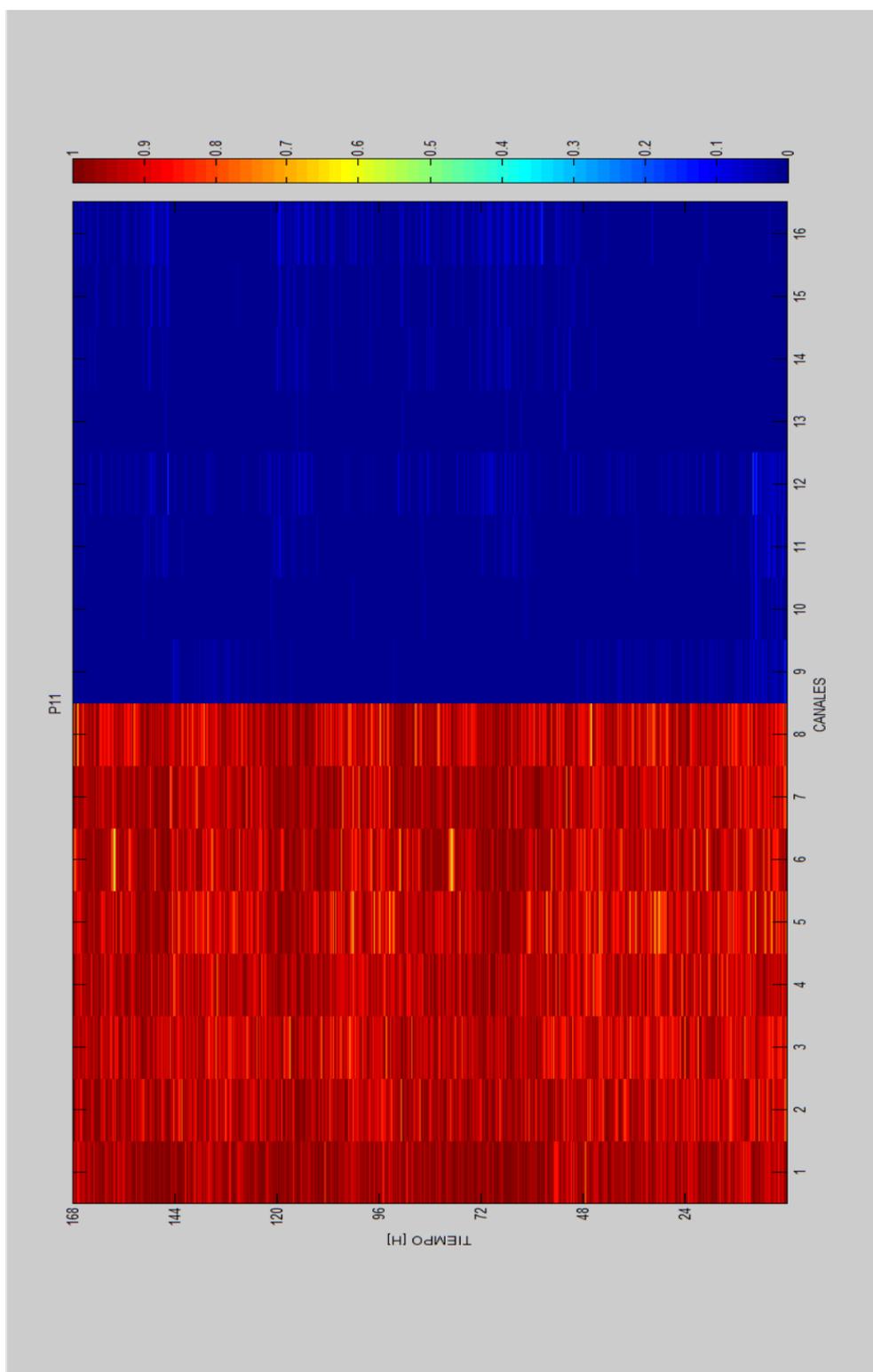
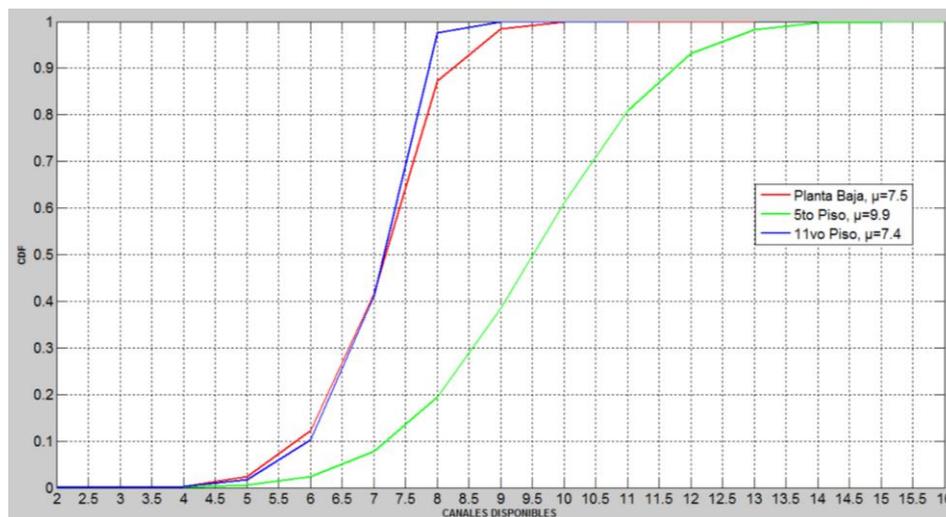


Figura 4.7: Disponibilidad temporal de la banda AWS (undécimo piso)

### 4.3.2 Modelamiento estocástico.

Luego de haber realizado un análisis en función del tiempo de los canales, en esta sección se procederá a hacer un análisis estadístico para así ver un comportamiento de los canales en la banda AWS.



**Figura 4.8: Canales disponibles en el mismo tiempo**

En la figura 4.8 la gráfica roja representa la planta baja, la gráfica verde al quinto piso y la gráfica de color azul el undécimo piso. Se puede observar que en el quinto piso existe mayor disponibilidad de canales, tiene una media de 10 canales es decir un ancho de banda de 50 MHz y podemos observar entre 7 y 12 canales es decir existe entre 35 y 60 MHz de ancho de banda disponibles para uso con sistemas de Acceso Oportunista al Espectro (OSA) con una probabilidad de 86%.

En la planta baja se obtuvo una media de 8 canales, un ancho de banda de 40 MHz, en base a los extremos obtenidos con la desviación estándar y la media se tiene canales entre 6 y 9 es decir un ancho de banda que va desde los 30 y 45MHz, con una probabilidad de ocurrencia de 85%.

En el undécimo piso la media fue de 7 es decir un ancho de banda de 35 MHz, entonces se tiene canales entre 6 y 8 con un ancho de banda entre

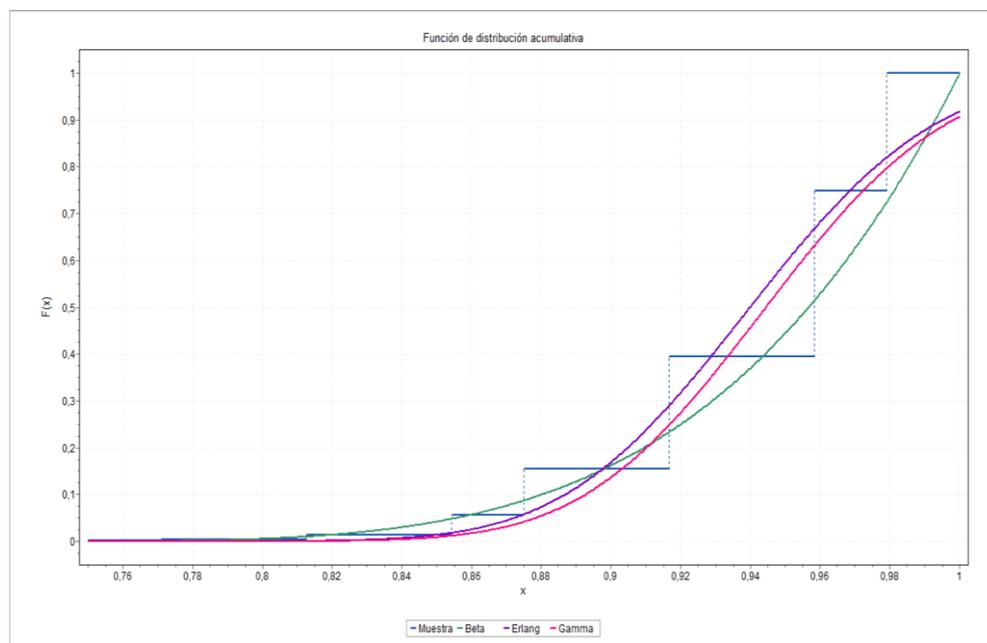
30 y 40 MHz de espectro con una probabilidad de 88% disponibles para sistemas OSA.

En base a los análisis realizados en las gráficas anteriormente mostradas se van a elegir los 3 canales más relevantes, es decir un canal que esté disponible otro ocupado y finalmente se elegirá un canal que se encuentre intermitente, estos 3 canales serán elegidos del piso con mayor disponibilidad, es decir el quinto piso.

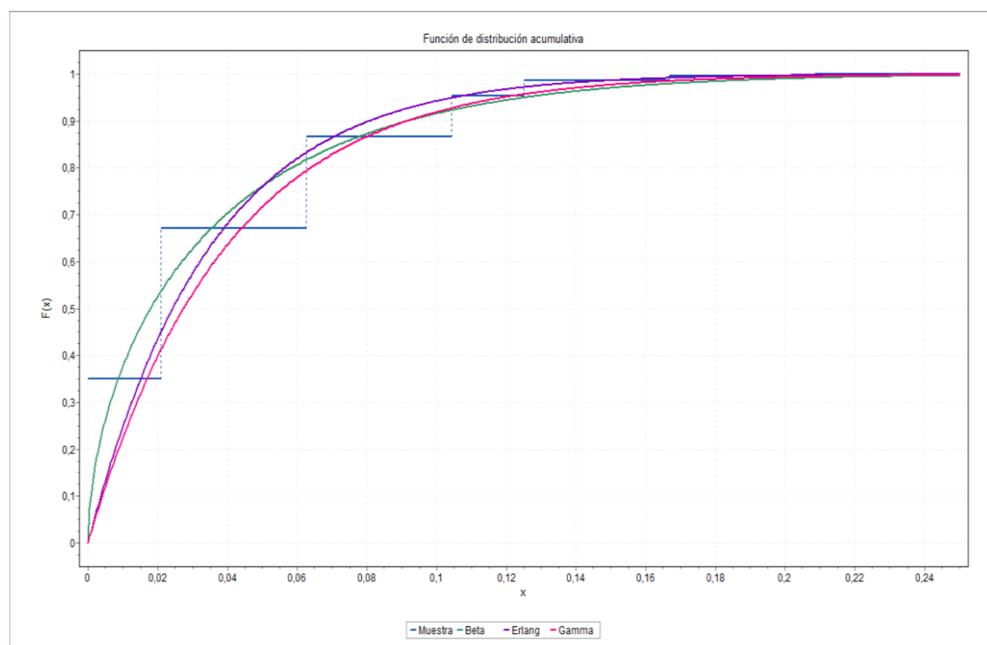
A partir de estos 3 canales se procederá a hacer un modelamiento estadístico para observar su comportamiento de disponibilidad de manera estadística, estos mismos 3 canales serán evaluados en los 3 pisos de la edificación para así poder hacer las respectivas conclusiones de sus disponibilidades. Se eligieron también 3 distribuciones estadísticas: beta, gamma y erlang, ya que estas fueron las que más similitudes mostraban con respecto a los histogramas de disponibilidad.

A continuación en las figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 se mostrarán los canales 1 que es el de mayor disponibilidad, el canal 10 que se encuentra ocupado y el canal 16 que muestra un grado de intermitencia, todos estos canales mostrados en los 3 pisos.

## PLANTA BAJA.



**Figura 4.9: Modelado estadístico Canal 1**



**Figura 4.10: Modelado estadístico Canal 10**

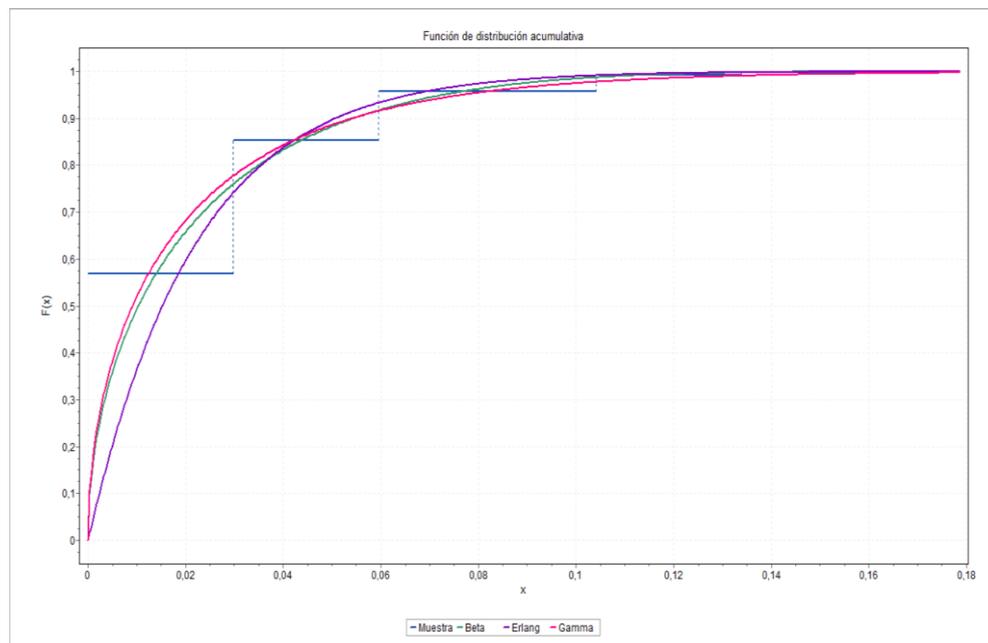


Figura 4.11: Modelado estadístico Canal 16

### QUINTO PISO.

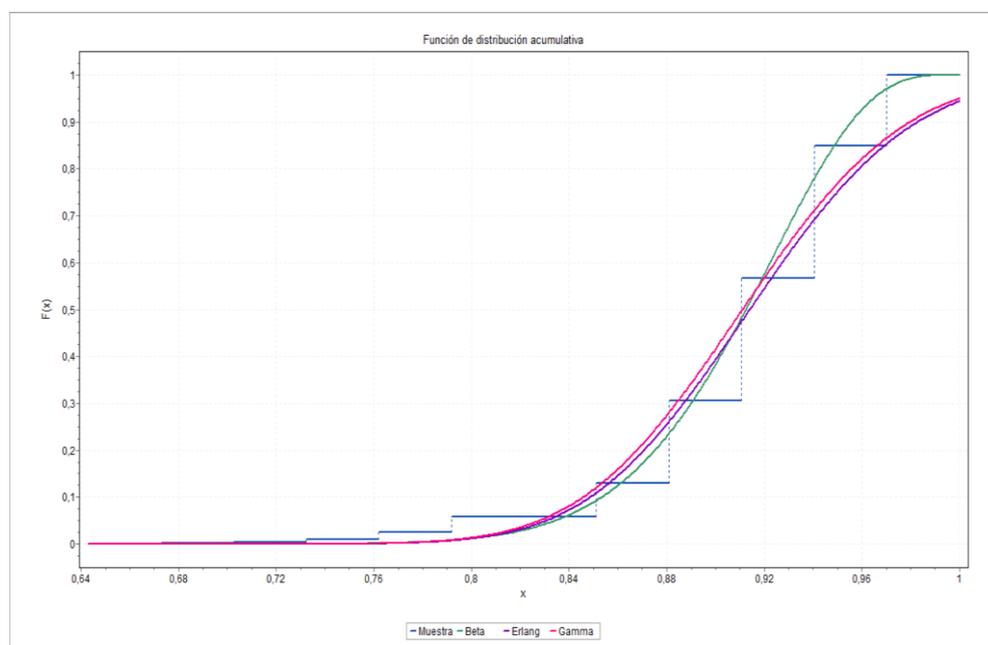
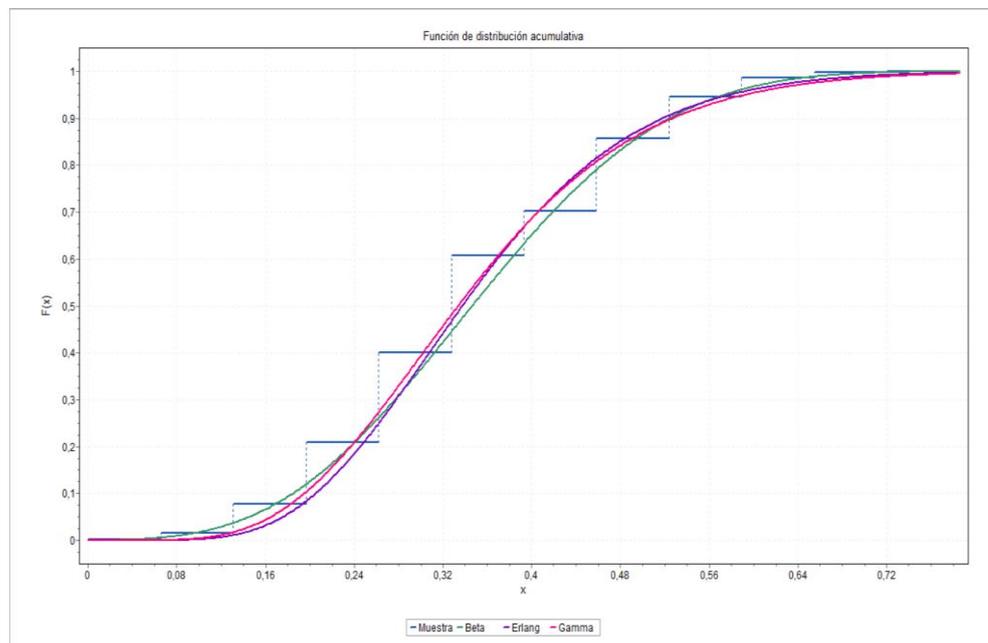
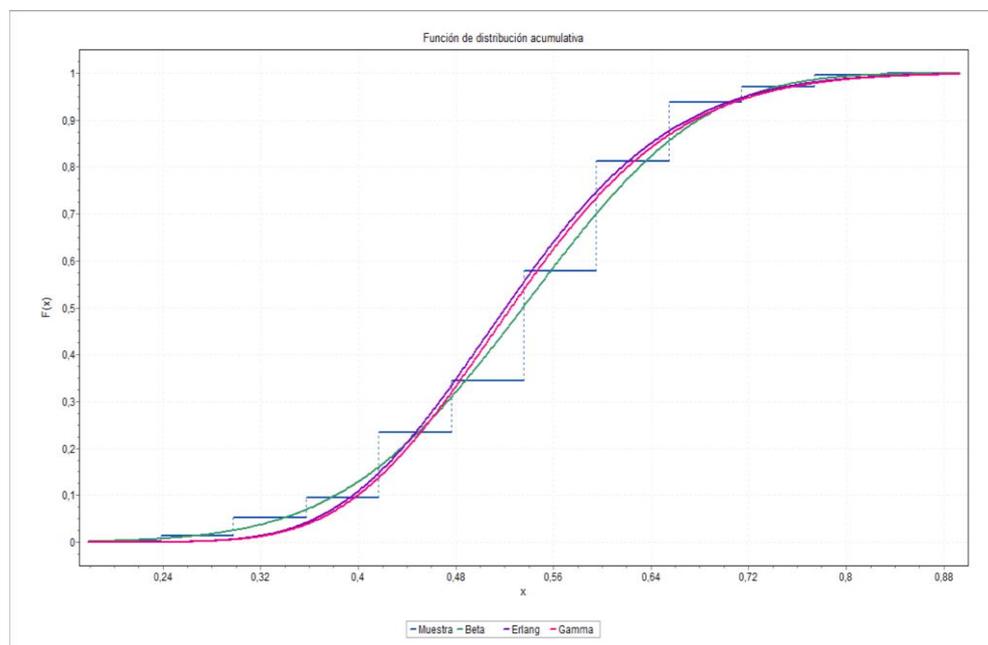


Figura 4.12: Modelado estadístico Canal 1

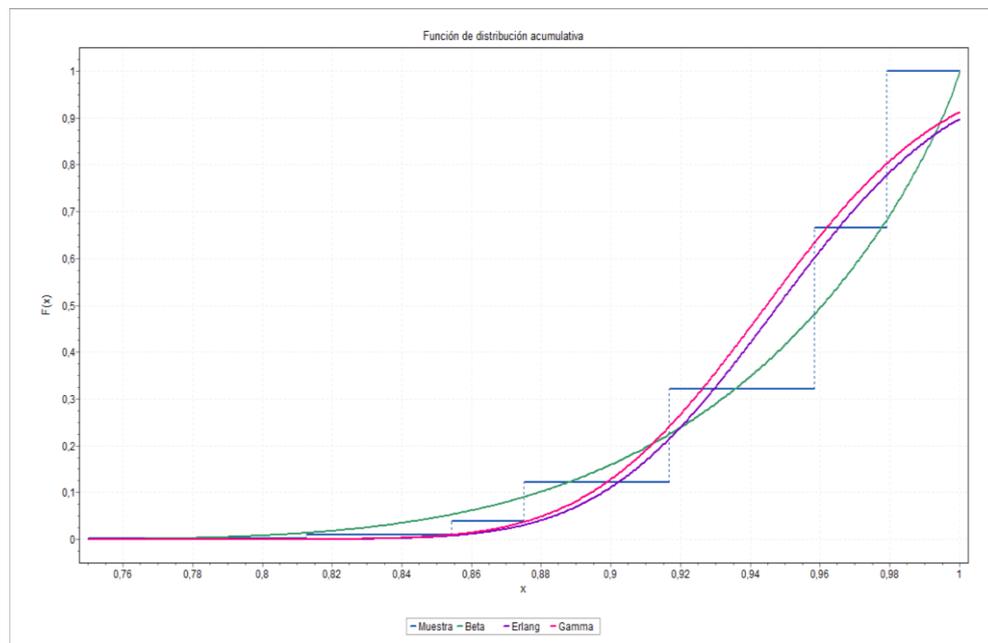


**Figura 4.13: Modelado estadístico Canal 10**

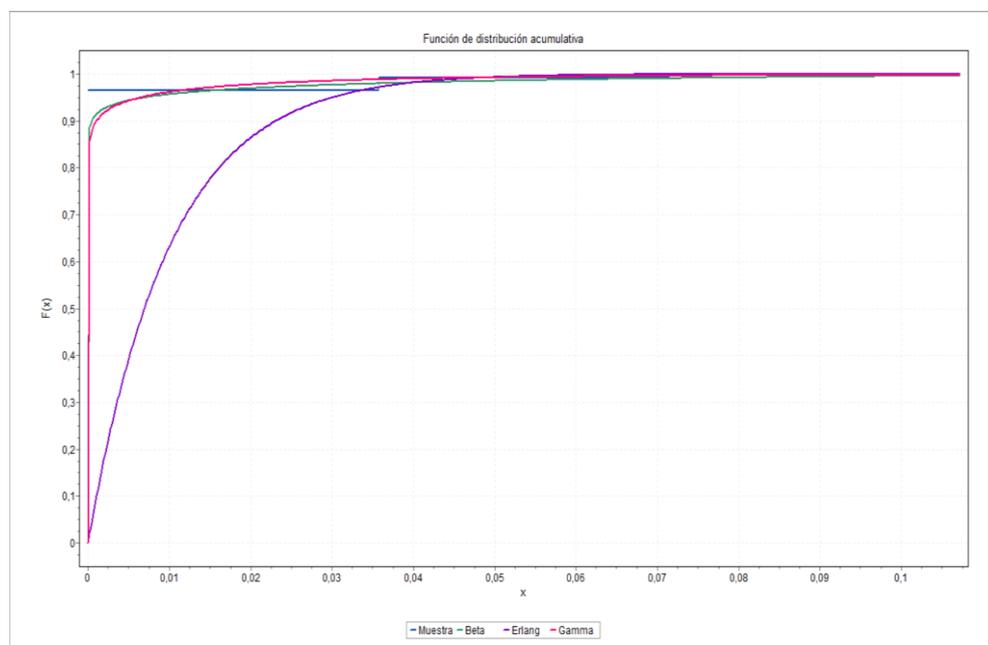


**Figura 4.14: Modelado estadístico Canal 16**

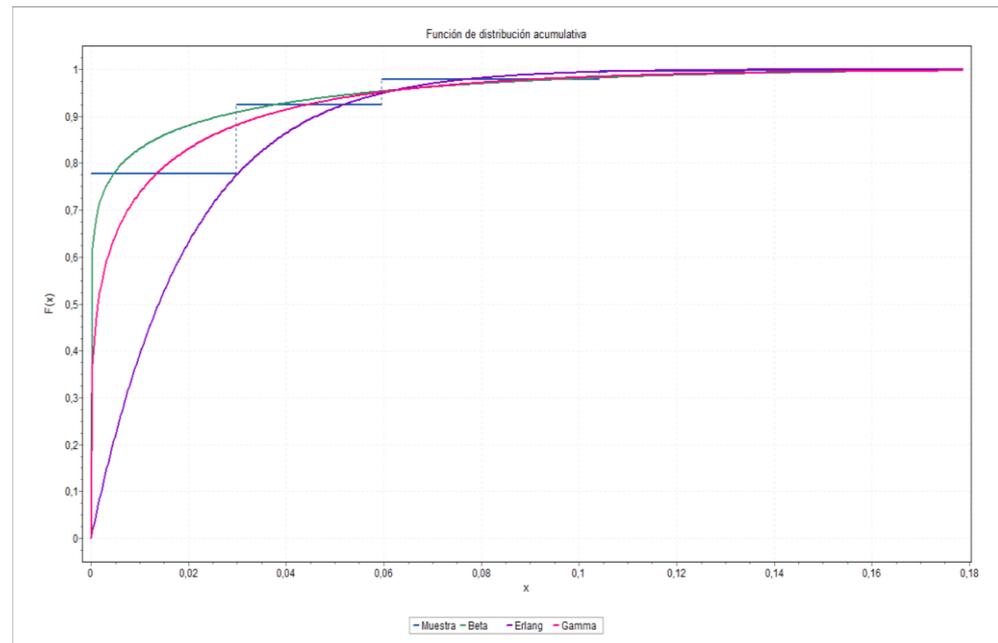
## UNDÉCIMO PISO.



**Figura 4.15: Modelado estatístico Canal 1**



**Figura 4.16: Modelado estatístico Canal 10**



**Figura 4.17: Modelado estadístico Canal 16**

Analizando las CDF de los canales 1, 10 y 16 en todos los pisos se puede observar que las distribuciones que más se asemejan son la Beta y la Gamma, pero al analizar sus medias notamos que es la Beta quien muestra mejor disponibilidad.

Para proceder a hacer el modelado y compararlo con el empírico de los datos se deben obtener los parámetros de la distribución beta que son  $\alpha$  y  $\beta$ , estos los obtendremos despejando de la media (Ecuación 3.11) y reemplazando en la varianza (Ecuación 3.12), los valores de media y varianza son obtenidos por el software EasyFit (Ver Anexos).

$$\alpha = \frac{\mu}{\sigma^2} (\mu - \mu^2 + \sigma^2) \quad (4.1)$$

$$\beta = \frac{(\mu - \mu^2 + \sigma^2)(1 - \mu)}{\sigma^2} \quad (4.2)$$

Con las ecuaciones (4.1) y (4.2) se puede hacer el respectivo cálculo para poder realizar el modelado, son mostrados a continuación en la tabla 2.

	<b>Alfa</b>	<b>Beta</b>	
<b>PLANTA BAJA</b>	23,3452598	1,34905016	<b>Canal 1</b>
	0,56370384	15,7802753	<b>Canal 10</b>
	0,6228612	30,5357781	<b>Canal 16</b>
<b>QUINTO PISO</b>	46,3473587	4,71567077	<b>Canal 1</b>
	4,37852981	8,09911349	<b>Canal 10</b>
	9,34970915	8,2315416	<b>Canal 16</b>
<b>UNDÉCIMO PISO</b>	20,5959813	1,14257871	<b>Canal 1</b>
	0,03047619	13,8855914	<b>Canal 10</b>
	0,11939834	13,4950076	<b>Canal 16</b>

**Tabla 2: Parámetros de la distribución beta**

A continuación en las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se muestran las CDF empíricas en contraste con su modelo beta, y efectivamente se observa que el modelo elegido es correcto.

Para poder verificar de manera matemática este modelado se hará la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Test KS) revisar (Anexos).

En estas gráficas se puede observar que el comportamiento de las CDF en la planta baja como en el undécimo piso son muy similares, esto es debido a el patrón de radiación de las antenas sectoriales, ya que estas se encuentran a una altura de unos 4 pisos aproximadamente y su ubicación ya fue detallada al comienzo de este capítulo.

En estas graficas se puede apreciar que efectivamente el canal 1 se encuentra disponible en los 3 pisos, así mismo el canal 10 que se encontraba ocupado con una disponibilidad media de 0.4 se nota que en la planta baja y en el undécimo piso este canal tiene una disponibilidad muy cercana a cero, el mismo caso con el canal 16 que era el intermitente en el quinto piso en los otros dos pisos este canal ya se encuentra ocupado con una muy baja disponibilidad.

Es decir el canal 1 está disponible para ser usado con un sistema OSA, mientras los otros dos canales analizados en este proyecto no están disponibles para ser usados con sistemas OSA.

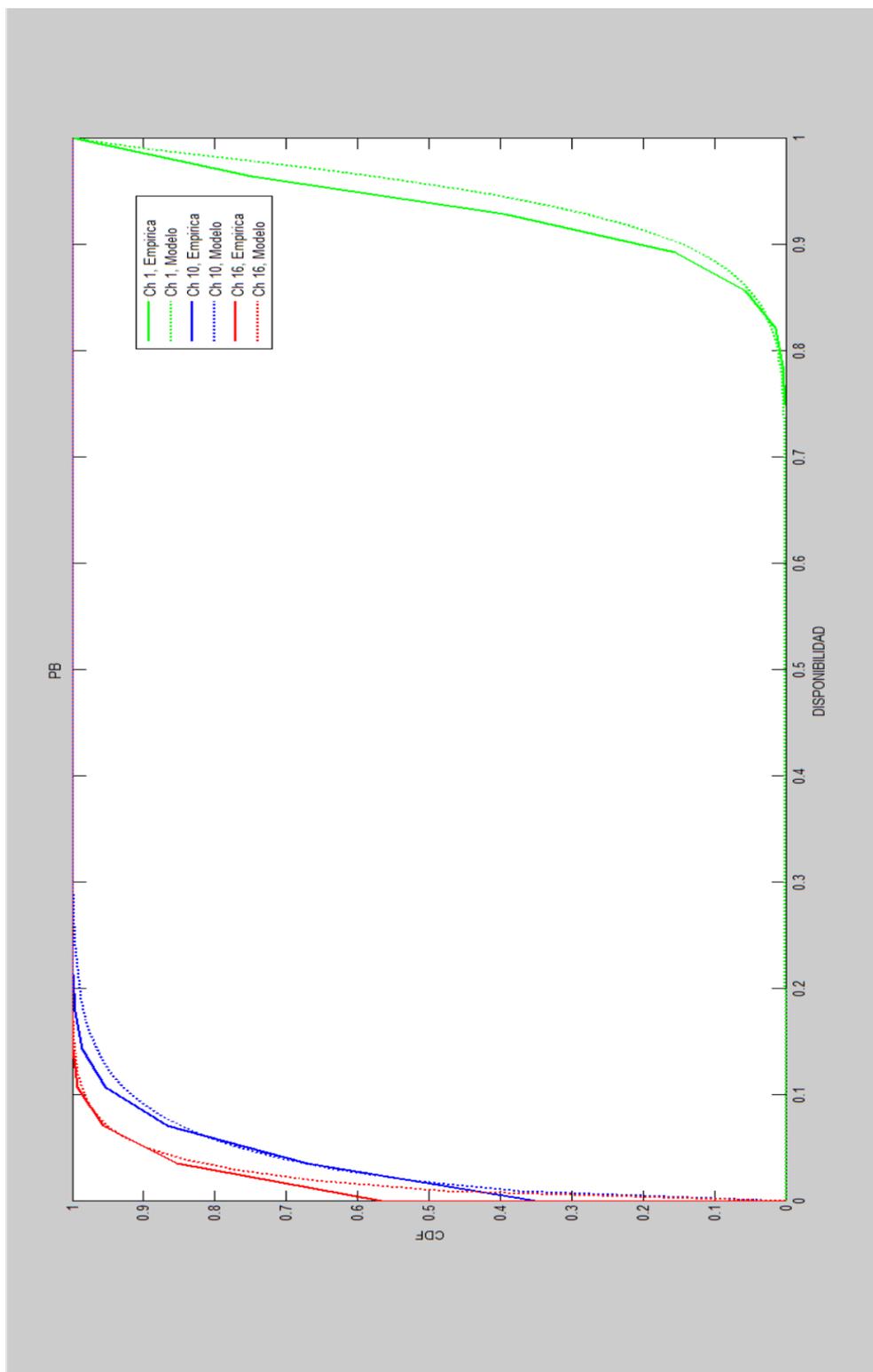


Figura 4.18: Modelado estadístico en la banda AWS (Planta Baja)

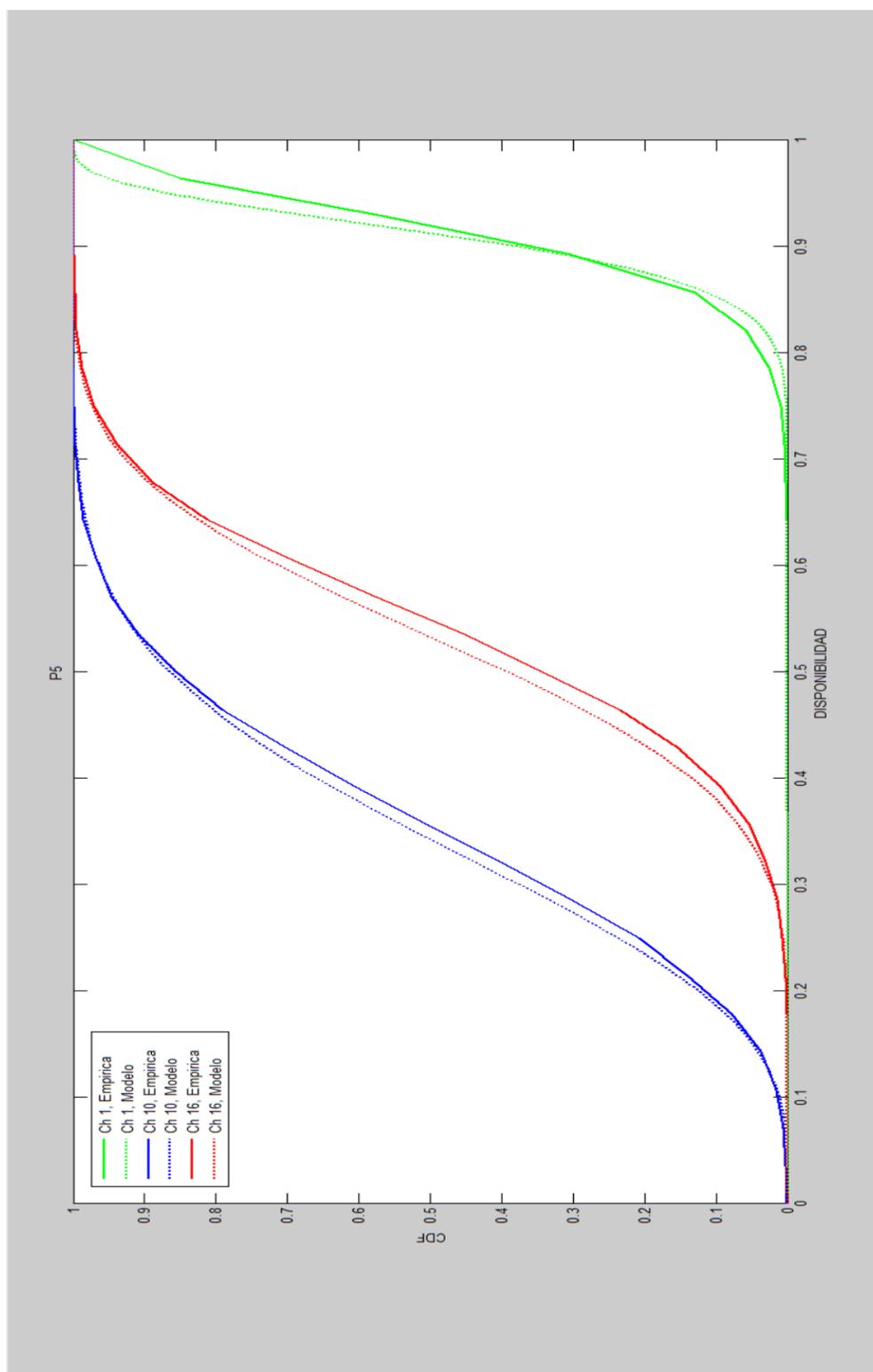


Figura 4.19: Modelado estadístico en la banda AWS (quinto piso)

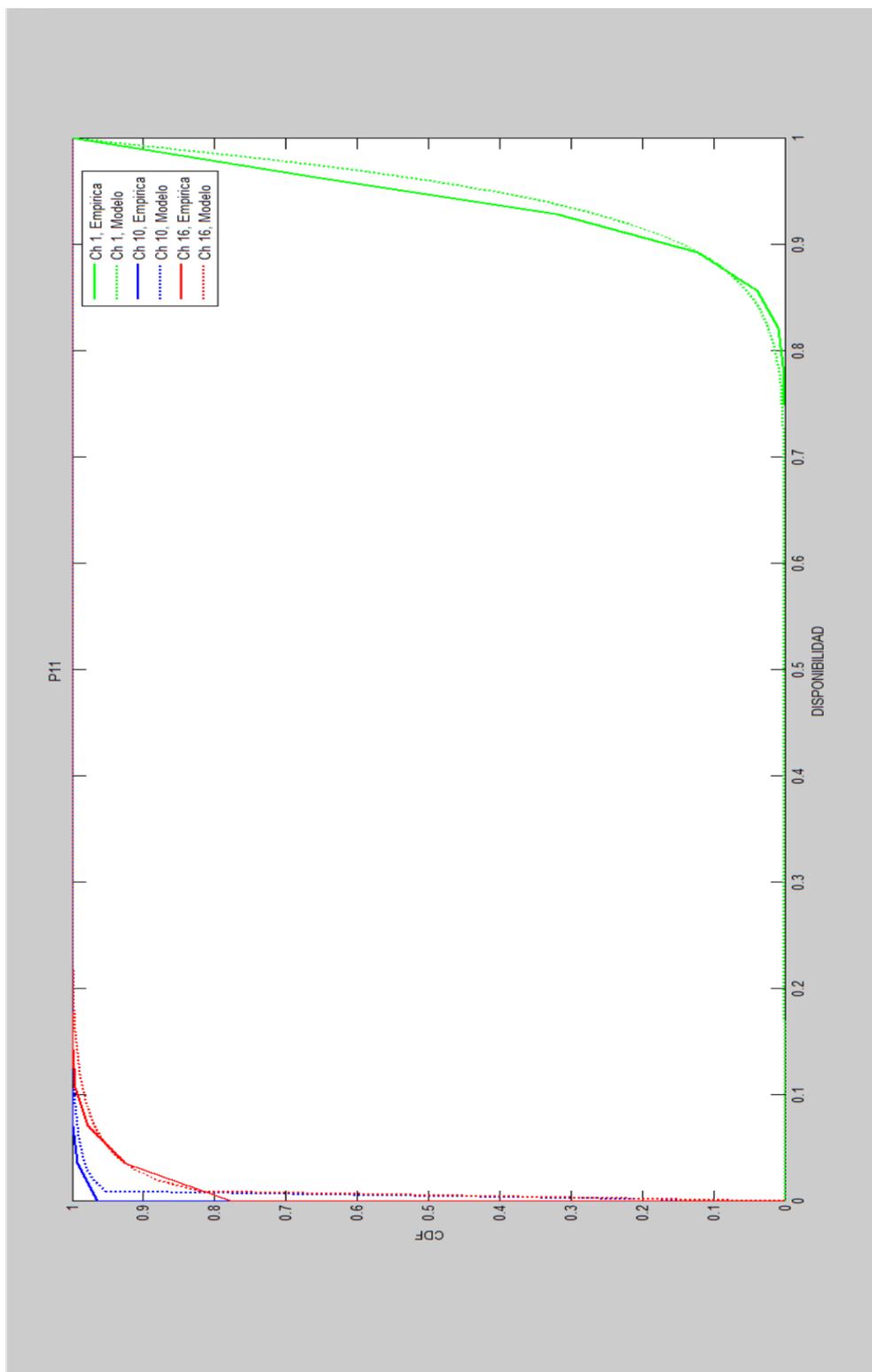


Figura 4.20: Modelado estadístico en la banda AWS (undécimo piso)

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. Se obtuvo la mayor disponibilidad de canales en el quinto piso debido a que éste se encuentra en línea de vista con la estación base (BS) y por ende es el que mayor niveles de potencia capta.
2. En la planta baja y el undécimo piso se obtuvieron resultados muy similares debido a la ubicación de la estación base, pero en estos pisos se obtiene una definición más clara de disponibilidad en los canales de uplink.
3. El canal 16 (downlink de CLARO) en el quinto piso se comporta de una manera intermitente, mientras que en los otros pisos este se encuentra ocupado.
4. En el quinto piso se tiene entre 7 y 12 canales disponibles con una probabilidad de ocurrencia del 86%, es decir se tiene un ancho de banda disponible entre 35 y 60 MHz.
5. Analizando las gráficas obtenidas se puede concluir que el canal 1 es apto para ser usado por sistemas de Acceso Oportunista al Espectro (OSA).

### Recomendaciones

1. Al momento de hacer el modelado hay que hacerlos con minuciosidad ya que al momento de hacer la prueba de bondad de ajuste podría no aceptar el modelo.
2. En futuros estudios realizar las mediciones en todos los pisos de un edificio para observar claramente el comportamiento de la disponibilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Lopez y F. Casadevall, "Oportunidades de despliegue para redes radio cognitivas de acceso dinámico al espectro en diversos escenarios realistas" de *XIX Jornadas Telecom I+D (Telecom I+D 2009)*, Madrid, 2009.
- [2] Iquall S.A., "LTE" Iquall Networks, Madrid, 2014.
- [3] Convergencia Research, "Situación de AWS en las Américas", Buenos Aires, 2014.
- [4] *Reglamento General a la Ley Especial de Telecomunicaciones*, 2009.
- [5] J. Contreras y N. Santiago, "Hacia la nueva revolución en telecomunicaciones: La red LTE (4G)", Mérida, 2012.
- [6] ROHDE & SCHWARZ, "LTE-Advanced Technology Introduction", Mühldorfstrabe, München, 2012.
- [7] ROHDE & SCHWARZ, "UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction", Mühldorfstrabe, München, 2007.
- [8] P. Beming, G. Hall, P. Malm, T. Noren, M. Olsson y G. Rune, "Long-term evolution - system architecture evolution", *LTE-SAE architecture and performance*, vol. I, nº 7, pp. 98-104, 2007.
- [9] 3GPP TR 25.892, "Technical Specification Group Radio Access Network", Valbonne, 2004.
- [10] M. Rumney, "3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA", Agilent Technologies, California, 2008.

- [11] R. Surgiewicz, N. Ström, A. Ahmed y Y. Ai, "LTE Uplink Transmission Scheme", California, 2014.
- [12] 3GPP. The 3Gdb Home Subscriber Server (HSS). [online]. Disponible en: <https://code.google.com/archive/p/hss/>.
- [13] M. Alvarez, "LTE Arquitectura Funcional y Protocolos", Catedra Isdefe, Madrid, 2015.
- [14] PCTEL, Inc, "Maximizing LTE Performance Through MIMO Optimization", RF Solutions, Germantown, 2011.
- [15] A. Brydon, (2013, Octubre). UNWIRED INSIGHT. [online]. Disponible en: <http://www.unwiredinsight.com/2013/lte-mimo>.
- [16] R. Brome y E. Zeman, (2001, Diciembre). Phone Scoop. [online]. Disponible en: <http://www.phonescoop.com/glossary/term.php?gid=324>.
- [17] P. Surampudi, "LTE-Advanced in White Space", Radisys, Hillboro, 2011.
- [18] J. Huidobro, "Radio Cognitiva. La radio se vuelve inteligente", *Antena de Telecomunicación*, vol. I, nº 3, pp. 38-40, 2011.
- [19] C. Torres, "Medición y Análisis Espectral en un Entorno Urbano", Bogota, 2012.
- [20] The University of Strathclyde. White Space Communications. [online]. Disponible en: <http://www.wirelesswhitespace.org/about-us/what-is-white-space.aspx>.
- [21] L. Mendoza, V. Sarmiento y F. Novillo, "Disponibilidad Espacial del Espectro Dentro de Zonas Urbanas Densas", Guayaquil, 2015.
- [22] A. Galvis, "ACCESO DINAMICO AL ESPECTRO: ESTADO ACTUAL, TENDENCIAS Y RETOS", Medellin, 2008.

- [23] DIRSI, "ASIGNACIÓN Y ADMINISTRACIÓN DEL ESPECTRO RADIOELECTRICO EN PAÍSES DE CENTROAMERICA Y SU IMPACTO EN EL DESARROLLO DEL SECTOR DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACION MOVIL", Ottawa, 2010.
- [24] ROHDE & SHWARZ, "LTE System Specifications and their Impact on RF & Base Band Circuits", München, 2013.
- [25] ETSI TS, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception", Cedex, 2013.

## ANEXOS

Datos	Frecuencia	F. Acum	CDF	BETA	Resta de CDF
0,75	3	3	0,00142993	7,04086E-05	0,001359525
0,78571429	4	7	0,00333651	0,002373462	0,000963049
0,82142857	22	29	0,01382269	0,014994941	0,001172253
0,85714286	90	119	0,05672069	0,052758808	0,003961879
0,89285714	206	325	0,15490944	0,137324591	0,017584846
0,92857143	504	829	0,39513823	0,297375439	0,097762788
0,96428571	739	1568	0,74737846	0,569119919	0,178258536
1	530	2098	1	1	0

Estadístico KS	0,178258536
99%	0,035586466
Hipótesis	RECHAZA

Anexo 1: Test KS para canal 1 de la planta baja

Datos	Frecuencia	F. Acum	CDF	BETA	Resta de CDF
0	736	736	0,3508103	NO APLICA	NO APLICA
0,03571429	671	1407	0,6706387	0,67363504	0,00299634
0,07142857	411	1818	0,86653956	0,84821171	0,018327851
0,10714286	182	2000	0,95328885	0,92733634	0,025952509
0,14285714	69	2069	0,98617731	0,96537421	0,020803101
0,17857143	22	2091	0,99666349	0,98382129	0,012842201
0,21428571	6	2097	0,99952336	0,99266192	0,006861438
0,25	1	2098	1	0,99679666	0,003203339

Estadístico KS	0,025952509
99%	0,035586466
Hipótesis	ACEPTA

Anexo 2: Test KS para canal 10 de la planta baja

Datos	Frecuencia	F. Acum	CDF	BETA	Resta de CDF
0	1191	1191	0,56768351	NO APLICA	NO APLICA
0,03571429	600	1791	0,85367016	0,80550281	0,04816735
0,07142857	217	2008	0,957102	0,94728133	0,00982067
0,10714286	73	2081	0,99189704	0,98883533	0,00306171
0,14285714	14	2095	0,99857007	0,99864612	7,6049E-05
0,17857143	3	2098	1	0,99996232	3,7682E-05

Estadístico KS	0,04816735
99%	0,03558647
Hipótesis	RECHAZA

### Anexo 3: Test KS para canal 16 de la planta baja

Datos	Frecuencia	F. Acum	CDF	BETA	Resta de CDF
0,64285714	1	1	0,00047664	1,69576E-07	0,00047647
0,67857143	3	4	0,00190658	5,09894E-06	0,00190148
0,71428571	4	8	0,00381316	8,27949E-05	0,00373036
0,75	12	20	0,00953289	0,000844131	0,00868876
0,78571429	34	54	0,0257388	0,005917913	0,01982089
0,82142857	67	121	0,05767398	0,030104285	0,02756969
0,85714286	151	272	0,12964728	0,114096066	0,01555122
0,89285714	369	641	0,30552908	0,322638745	0,01710967
0,92857143	549	1190	0,56720686	0,663335421	0,09612856
0,96428571	591	1781	0,84890372	0,948492816	0,0995891
1	317	2098	1	1	0

Estadístico KS	0,0995891
99%	0,03558647
Hipótesis	RECHAZA

### Anexo 4: Test KS para canal 1 del quinto piso

Datos	Frecuencia	F. Acum	CDF	BETA	Resta de CDF
0	1	1	0,00047664	0,00021759	0,00025906
0,03571429	3	4	0,00190658	0,0017758	0,00013078
0,07142857	8	12	0,00571973	0,00742525	0,00170552
0,10714286	22	34	0,01620591	0,02132448	0,00511857
0,14285714	44	78	0,03717827	0,04806179	0,01088353
0,17857143	85	163	0,07769304	0,09136053	0,01366749
0,21428571	129	292	0,13918017	0,15297067	0,0137905
0,25	145	437	0,20829361	0,23207488	0,02378126
0,28571429	198	635	0,30266921	0,32531922	0,02265001
0,32142857	206	841	0,40085796	0,4273918	0,02653384
0,35714286	219	1060	0,50524309	0,53195226	0,02670917
0,39285714	213	1273	0,60676835	0,63266996	0,02590161
0,42857143	199	1472	0,70162059	0,72414662	0,02252603
0,46428571	188	1660	0,79122974	0,80256191	0,01133216
0,5	138	1798	0,85700667	0,86596359	0,00895692
0,53571429	108	1906	0,90848427	0,91420744	0,00572317
0,57142857	79	1985	0,94613918	0,94861892	0,00247974
0,60714286	47	2032	0,96854147	0,97148957	0,0029481
0,64285714	38	2070	0,98665396	0,98553211	0,00112185
0,67857143	13	2083	0,99285033	0,99340239	0,00055206
0,71428571	10	2093	0,99761678	0,99736147	0,00025531
0,75	4	2097	0,99952336	0,99910652	0,00041684
0,78571429	1	2098	1	0,99975704	0,00024296

Estadístico KS	0,02670917
99%	0,03558647
Hipótesis	ACEPTA

Anexo 5: Test KS para canal 10 del quinto piso

Datos	Frecuencia	F. Acum	CDF	BETA	Resta de CDF
0,17857143	3	3	0,00142993	0,00190967	0,00047974
0,21428571	2	5	0,00238322	0,0044895	0,00210628
0,25	10	15	0,00714967	0,00985981	0,00271014
0,28571429	13	28	0,01334604	0,02024254	0,0068965
0,32142857	36	64	0,03050524	0,03887392	0,00836867
0,35714286	48	112	0,05338418	0,06987489	0,01649071
0,39285714	87	199	0,09485224	0,11764179	0,02278955
0,42857143	124	323	0,15395615	0,18568104	0,03172489
0,46428571	169	492	0,23450906	0,27508373	0,04057468
0,5	229	721	0,34366063	0,38317158	0,03951095
0,53571429	229	950	0,4528122	0,50303544	0,05022324
0,57142857	262	1212	0,57769304	0,6245078	0,04681476
0,60714286	254	1466	0,69876072	0,73651391	0,03775318
0,64285714	236	1702	0,81124881	0,82999752	0,01874871
0,67857143	165	1867	0,88989514	0,90019337	0,01029823
0,71428571	102	1969	0,93851287	0,94727443	0,00876156
0,75	67	2036	0,97044805	0,97524146	0,00479342
0,78571429	36	2072	0,98760724	0,98980706	0,00219981
0,82142857	16	2088	0,99523356	0,99637852	0,00114497
0,85714286	6	2094	0,99809342	0,99890997	0,00081654
0,89285714	4	2098	1	0,99972814	0,00027186

Estadístico KS	0,05022324
99%	0,03558647
Hipótesis	<b>RECHAZA</b>

Anexo 6: Test KS para canal 16 del quinto piso

Datos	Frecuencia	F. Acum	CDF	BETA	Resta de CDF
0,75	3	3	0,00142993	0,00032182	0,00110812
0,78571429	3	6	0,00285987	0,00415064	0,00129077
0,82142857	13	19	0,00905624	0,01914699	0,01009075
0,85714286	61	80	0,03813155	0,05756029	0,01942873
0,89285714	178	258	0,12297426	0,13696405	0,01398979
0,92857143	417	675	0,32173499	0,28225391	0,03948107
0,96428571	721	1396	0,66539561	0,53200028	0,13339534
1	702	2098	1	1	0

Estadístico KS	0,13339534
99%	0,03558647
Hipótesis	RECHAZA

Anexo 7: Test KS para canal 1 del undécimo piso

Datos	Frecuencia	F. Acum	CDF	BETA	Resta de CDF
0	2023	2023	0,96425167	NO APLICA	NO APLICA
0,03571429	60	2083	0,99285033	0,97963835	0,01321199
0,07142857	12	2095	0,99857007	0,99078526	0,0077848
0,10714286	3	2098	1	0,9961473	0,0038527

Estadístico KS	0,01321199
99%	0,03558647
Hipótesis	ACEPTA

Anexo 8: Test KS para canal 10 del undécimo piso

Datos	Frecuencia	F. Acum	CDF	BETA	Resta de CDF
0	1632	1632	0,7778837	NO APLICA	NO APLICA
0,03571429	308	1940	0,92469018	0,92080242	0,00388776
0,07142857	111	2051	0,97759771	0,96360003	0,01399768
0,10714286	40	2091	0,99666349	0,98307304	0,01359045
0,14285714	4	2095	0,99857007	0,99291029	0,00565977
0,17857143	3	2098	1	0,99768949	0,00231051

Estadístico KS	0,01399768
99%	0,03558647
Hipótesis	ACEPTA

Anexo 9: Test KS para canal 16 del undécimo piso