



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de ocupación de canales para redes de Radio Cognitiva en el espectro de señales GSM durante un periodo de seis meses

Andrés Fernando Mejía Ardila

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial
Bogotá DC, Colombia
2017

Análisis de ocupación de canales para redes de Radio Cognitiva en el espectro de señales GSM durante un periodo de seis meses

Andrés Fernando Mejía Ardila

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Telecomunicaciones

Directora:

Ph.D. Ingrid Patricia Páez

Codirector:

Ph.D. Luis Fernando Pedraza Martinez

Línea de Investigación:

Redes Inalámbricas - Telecomunicaciones

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial

Bogotá DC, Colombia

2017

*Dedicado a mi esposa por su apoyo incondicional y por acompañarme en este duro reto.
Su amor fue mi principal alimento.*

A mis padres que con toda una vida de trabajo han logrado darnos una formación en valores y una educación que nos ha permitido tener las mejores herramientas para afrontar de una forma inmejorable el camino de la vida.

A mi hermano que constantemente me motivo a culminar mi investigación y me brindo toda su colaboración.

A Dios por darme la oportunidad de estar vivo y aportar al desarrollo de la sociedad.

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mi Directora, la Ingeniera Ingrid Patricia Páez profesora de la Universidad Nacional, quien me brindo todo su apoyo durante el desarrollo de la investigación, y me guío para alcanzar este objetivo.

A mi Codirector, el Ingeniero Luis Fernando Pedraza, profesor de la Universidad Distrital, quien me oriento desde el inicio de la investigación y me brindo un apoyo fundamental durante todo el proceso, sus orientaciones fueron definitivas para el desarrollo del proyecto.

A la Universidad Nacional de Colombia que ha sido mi alma mater, mi segundo hogar y me ha enseñado lo valioso que es investigar para contribuir a una mejor sociedad, a ella le debo mis logros.

Mi Esposita, mis Padres y mi Hermano a ellos mi mayor agradecimiento por su constante apoyo y motivación para sacar adelante esta investigación a pesar de los constantes inconvenientes, ellos me dieron la energía para seguir adelante. Dios como mi guía espiritual que me da la fortaleza para alcanzar las metas propuestas y me brinda la oportunidad de alcanzar este anhelado objetivo.

Resumen

Este documento resume los detalles y resultados de una campaña de medición realizada en la ciudad de Bogotá (Colombia) durante un periodo de seis meses, desde octubre de 2014 a abril de 2015.

Para el desarrollo de la investigación se realizó inicialmente un análisis de ocupación a tres canales dentro del enlace ascendente de la banda GSM850 y su comportamiento con el fin de constatar el tiempo adecuado que durante el cual se requiere medir un canal para predecir con precisión el nivel de ocupación del espectro y así optimizar el proceso de diseño de redes de Radio Cognitiva.

De igual manera, se analizó el parámetro de Auto-similitud para determinar la probabilidad de pronóstico de cada uno de los tres canales analizados, junto con un análisis del ciclo de trabajo. El resultado de la investigación permite ver que los tres canales tienen una alta probabilidad de pronóstico tras analizar tan solo una semana, la cual resulta ser mayor para un periodo semanal de Lunes a Viernes que en un periodo seis meses de medición incluyendo sábado y domingo. El análisis realizado permite ver adicionalmente que el comportamiento de los canales durante el día sábado y domingo es diferente al de los demás días de la semana.

Palabras clave: Radio Cognitiva, Espectro Radioeléctrico, Análisis de Ocupación, Parámetro de Hurst, Dependencia de Largo Rango, Auto-similitud

Abstract

This document summarizes the details and results of a measurement campaign carried out in the city of Bogotá (Colombia) during a period of six months, from October 2014 to April 2015.

For the development of the research, an occupation analysis was performed initially to three channels on the uplink of the GSM850 band and its behavior in order to verify the adequate time that a channel must be measured to accurately predict the occupation level of the spectrum and thus optimize the process of designing Cognitive Radio networks.

Likewise, the Self-similarity parameter was analyzed to determine the probability of forecast of each of the three channels studied, together with an analysis of the work cycle. The result of the investigation shows that the three channels have a high probability of prognosis after analyzing only one week, which is higher in a period from Monday to Friday than in a period of six months of measurement. including Saturday and Sunday. Additionally the investigation shows that the behavior of the channels during Saturday and Sunday is different from the other days of the week.

Keywords: Cognitive Radio, Radioelectric spectrum, Occupation analysis, Hurst parameter, Long Range Dependence, Self-similarity.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract.....	X
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	17
Introducción	19
1. Fundamentos para el análisis de ocupación en redes de Radio Cognitiva	23
1.1 Funcionamiento de la Radio Cognitiva.....	23
1.1.1 Características de la Radio Cognitiva.....	25
1.1.2 Gestión de espectro en Radio Cognitiva	26
1.2 Parámetro de Auto-similaridad.....	28
1.2.1 Análisis de Series de Tiempo	29
1.3 Análisis de Ocupación previos	31
2. Definición de parámetros para las mediciones.....	35
2.1 Selección del canal a analizar.....	35
2.2 Técnica en la Medición del espectro	36
2.2.1 Configuración del Analizador de Espectros	38
2.2.2 Localización	39
2.3 Descripción de la recolección y organización de datos	40
2.3.1 Archivos Generados por el Analizador	41
2.3.2 Descripción del equipo de cómputo.....	43
3. Método para análisis de las series de tiempo	45
3.1 Métodos para calcular el parámetro de Hurst	45
3.1.1 Transformada Wavelet	45
3.1.2 Potencia de Espectro	47
3.1.3 Longitud de Rizo	48
3.1.4 Semi-variograma.....	49
3.1.5 Rango Reescalado.....	50
3.2 Método seleccionado para calcular H	51
4. Desarrollo de los Métodos RS y WT para diferentes canales	57
4.1 Aplicación de los métodos WT y RS	57

4.2	Calculo de Hurst.....	58
4.2.1	Calculo Hurst por semana	58
4.2.2	Calculo Hurst por mes	62
4.2.3	Calculo Hurst por dos meses	64
4.2.4	Calculo Hurst por 6 meses.....	66
4.2.5	Calculo Hurst por día	68
4.2.6	Resultados cálculo de Hurst	82
5.	Análisis estadístico para las mediciones de la red GSM	89
5.1	Umbral de decisión.....	89
5.2	Ocupación Espectral Instantánea.....	89
5.3	Ciclos de Trabajo	90
5.4	Análisis de Ocupación en redes inalámbricas	91
5.4.1	Componente de Tendencia.....	91
5.4.2	Componente Cíclico.....	92
5.4.3	Componente Estacional.....	92
5.4.4	Componente Aleatorio	92
5.5	Análisis estadístico de los canales durante los seis meses	92
5.6	Análisis estadístico de los canales durante una semana	95
5.7	Análisis estadístico de los canales durante un día.....	100
5.7.1	Análisis día Lunes.....	101
5.7.2	Análisis día Martes	103
5.7.3	Análisis día Miércoles	105
5.7.4	Análisis día Jueves	107
5.7.5	Análisis día Viernes	109
5.7.6	Análisis día Sábado	111
5.7.7	Análisis día Domingo	113
5.7.8	Resultados Análisis diario	115
5.8	Contribución al desarrollo de la Radio Cognitiva	116
6.	Conclusiones y recomendaciones	120
6.1	Conclusiones.....	120
6.2	Recomendaciones.....	121
A.	Anexo: Muestras recopiladas en la campaña de medición.....	123
	Bibliografía	128

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Concepto de radio cognitiva, Imagen tomada de [24].....	26
Figura 1-2: Hueco espectral y acceso dinámico al espectro, Imagen tomada de [22]..	27
Figura 1-3: Ciclo Cognitivo, Imagen tomada de [22].....	28
Figura 1-4: Sistema de Monitoreo de espectro 100-1500 MHz, Imagen tomada de [39].	32
Figura 1-5: Sistema de Monitoreo de espectro 1500-2400 MHz, Imagen tomada de [39].	32
Figura 2-1: Configuración de las mediciones, imagen tomada de [41].....	37
Figura 2-2: Montaje físico de la estación de medición.	37
Figura 2-3: Ubicación del sitio de medición	39
Figura 2-4: Punto de medida en la zona norte de Bogota DC, imagen tomada de [13]	40
Figura 2-5: Flujograma del proceso de recolección, extracción y organización de datos	41
Figura 3-1: Transformada Wavelet para serie con $H=0.7$, tomada de [44].....	46
Figura 3-2: Potencia de Espectro (PS) para serie con $H=0.7$, tomada de [44].....	47
Figura 3-3: Longitud de Rizo (RL) para serie con $H=0.7$, tomada de [44]	48
Figura 3-4: Semi-Variograma (SV) para serie con $H=0.7$, tomada de [44].....	49
Figura 3-5: Rango Rescalado (RS) para serie con $H=0.7$, tomada de [44]	50
Figura 3-6: Calculo de H; a) serie con $H=0.6$, con 500 puntos; b) WT; c) PS; d) RL; e) SV; f) RS, tomada de [44].....	52
Figura 3-7: RMS error para diferentes métodos $H=0.4-0.9$, tomada de [44]	53
Figura 3-8: Porcentaje de error en diferentes métodos para $H=0.4-0.9$, tomada de [44]	54
Figura 4-1: Medición de Ocupación Canales - Semana 1	59
Figura 4-2: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 - Semana 1	59
Figura 4-3: Medición de Ocupación Canales - Semana Promedio.....	60
Figura 4-4: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 - Semana Promedio	61
Figura 4-5: Medición de Ocupación Canales – Mes 1	62
Figura 4-6: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Mes 1.....	63
Figura 4-7: Medición de Ocupación Canales – Meses 1 y 2.....	65
Figura 4-8: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Meses 1 y 2	65
Figura 4-9: Medición de Ocupación Canales – 6 Meses.....	66
Figura 4-10: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – 6 Meses	67

Figura 4-11:	Medición de Ocupación Canales – Lunes	68
Figura 4-12:	Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Lunes.....	69
Figura 4-13:	Medición de Ocupación Canales – Martes	70
Figura 4-14:	Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Martes.....	71
Figura 4-15:	Medición de Ocupación Canales – Miércoles	72
Figura 4-16:	Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Miercoles	72
Figura 4-17:	Medición de Ocupación Canales – Jueves	74
Figura 4-18:	Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Jueves	75
Figura 4-19:	Medición de Ocupación Canales – Viernes	76
Figura 4-20:	Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Viernes	77
Figura 4-21:	Medición de Ocupación Canales – Sábado	78
Figura 4-22:	Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Sábado	79
Figura 4-23:	Medición de Ocupación Canales – Domingo	80
Figura 4-24:	Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Domingo	81
Figura 4-25:	Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Lunes a Viernes durante las 24 semanas.....	83
Figura 4-26:	Estimación Hurst canal 24, para diferentes periodos de tiempo	87
Figura 4-27:	Variación Hurst en % canal 24, para diferentes periodos de tiempo comparado con la semana 1 de medición	88
Figura 5-1:	Ocupación de los tres canales durante las 24 semanas	93
Figura 5-2:	Medición de ocupación de los tres canales durante las 24 semanas	95
Figura 5-3:	Análisis Canal 24 durante una semana.....	96
Figura 5-4:	Análisis Canal 25 durante una semana.....	97
Figura 5-5:	Análisis Canal 31 durante una semana.....	99
Figura 5-6:	Ocupación de los tres canales durante el día Lunes	101
Figura 5-7:	Ocupación de los tres canales durante el día Martes.....	103
Figura 5-8:	Ocupación de los tres canales durante el día Miércoles	105
Figura 5-9:	Ocupación de los tres canales durante el día Jueves	107
Figura 5-10:	Ocupación de los tres canales durante el día Viernes	109
Figura 5-11:	Ocupación de los tres canales durante el día Sábado.....	111
Figura 5-12:	Ocupación de los tres canales durante el día Domingo.....	113
Figura 5-13:	Ciclo de trabajo diario Lunes a Domingo	118
Figura 5-14:	Ciclo de trabajo diario Lunes a Viernes	119

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Equipos utilizados para la medición [41].....	36
Tabla 2-2: Archivos generados por el Analizador de Espectros	42
Tabla 2-3: Archivos correspondientes a los canales 24, 25 y 31	42
Tabla 3-1: Valores de H calculados por diferentes métodos, tomado de [44]	51
Tabla 3-2: Comparación métodos para calcular el valor de Hurst [44].....	55
Tabla 4-1: Fechas primera semana de medición.....	58
Tabla 4-2: Parámetro Hurst primera semana de medición	60
Tabla 4-3: Parámetro Hurst semana 2	61
Tabla 4-4: Datos primer mes de medición.....	62
Tabla 4-5: Parámetro Hurst Mes 1	63
Tabla 4-6: Datos dos meses de medición	64
Tabla 4-7: Parámetro Hurst dos meses.....	66
Tabla 4-8: Parámetro Hurst seis meses	67
Tabla 4-9: Parámetro Hurst Lunes	69
Tabla 4-10: Parámetro Hurst Martes.....	71
Tabla 4-11: Parámetro Hurst Miércoles	73
Tabla 4-12: Parámetro Hurst Jueves	75
Tabla 4-13: Parámetro Hurst Viernes	77
Tabla 4-14: Parámetro Hurst Sábado	79
Tabla 4-15: Parámetro Hurst Domingo	81
Tabla 4-16: Parámetro Hurst Lunes a Viernes.....	83
Tabla 4-17: Parámetro Hurst calculado por periodos de tiempo y su variación respecto a los valores obtenidos en la semana 1 de medición	84
Tabla 4-18: Parámetro Hurst calculado por día y su variación respecto a los valores obtenidos en la semana 1 de medición	85
Tabla 4-19: Parámetro Hurst calculado por periodos de tiempo y su variación respecto a los valores obtenidos en la semana 1 de medición únicamente de Lunes a Viernes	86

Tabla 5-1:	Ciclo de trabajo de los tres canales durante las 24 semanas de medición.	92
Tabla 5-2:	Datos Canal 24 durante una semana.....	96
Tabla 5-3:	Datos Canal 25 durante una semana.....	98
Tabla 5-4:	Datos Canal 31 durante una semana.....	99
Tabla 5-5:	Ciclo de trabajo día Lunes	102
Tabla 5-6:	Ciclo de trabajo día Martes	104
Tabla 5-7:	Ciclo de trabajo día Miércoles.....	106
Tabla 5-8:	Ciclo de trabajo día Jueves.....	108
Tabla 5-9:	Ciclo de trabajo día Viernes	110
Tabla 5-10:	Ciclo de trabajo día Sábado	112
Tabla 5-11:	Ciclo de trabajo día Domingo	114
Tabla 5-12:	Ciclo de trabajo Lunes a Viernes.....	115
Tabla 5-13:	Periodo óptimo para medir y pronosticar comportamiento de una red GSM	117

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>3GPP</i>	Proyecto de Asociación de Tercera Generación
<i>ACF</i>	Función de Autocorrelación
<i>AE</i>	Analizador de Espectros
<i>AFE</i>	Análogo de frente a fin
<i>AR</i>	Autorregresivo
<i>ARFIMA</i>	Autoregressive fractionally integrated moving average
<i>AWC</i>	Coefficiente Promedio Wavelet
<i>CR</i>	Radio Cognitiva
<i>CRAHN</i>	Red de Radio Cognitiva Ad Hoc
<i>DEP</i>	Densidad espectral de potencia
<i>DSA</i>	Acceso Dinámico al Espectro
<i>FBM</i>	Movimiento fraccional Browniano
<i>FFT</i>	Transformada Rápida de Fourier
<i>FPE</i>	Criterio de predicción final de error de Akaike
<i>GSM</i>	Sistema Global para comunicaciones Mviles
<i>ITU</i>	Union Internacional de Telecomunicaciones
<i>LRD</i>	Dependencia de Largo Plazo
<i>LTE</i>	Sistema de evolución a largo plazo
<i>MEM</i>	Método de la máxima entropía
<i>P_{fa}</i>	Probabilidad de Falsa Alarma
<i>PS</i>	Potencia de Espectro
<i>PU</i>	Usuario Primario
<i>RL</i>	Longitud de Rizo
<i>RS</i>	Rango Reescalado
<i>SDR</i>	Radio definido por Software
<i>SRA</i>	Adición Sucesiva Aleatoria
<i>STD</i>	Desviación estandar
<i>SV</i>	Semi-variograma
<i>UMTS</i>	Sistema Universal para Telecomunicaciones Mviles
<i>WIMAX</i>	Worldwide Interoperability for Microwave Access
<i>WT</i>	Transformada Wavelet

Introducción

La radiación Electromagnética es la propagación de energía que viaja a través del espacio en forma de ondas. Esto incluye el espectro de luz visible, también infrarroja, ultravioleta y rayos x, el espectro electromagnético es teóricamente ilimitado, mientras el espectro de frecuencia de radio que es la porción de espectro electromagnético disponible para las comunicaciones es finito [1].

Las propiedades de propagación de ondas de radio y equipos electrónicos se limitan a comunicaciones de radio en frecuencias entre 9 KHz y 30 GHz. Estas propiedades también obligan a tipos particulares de sistemas de comunicaciones a trasladarse a ciertas porciones de espectro localizado, limitando el espectro disponible para usos específicos. [1]

El comportamiento del espectro tiene dos características importantes, las características de propagación y la cantidad de información que las señales pueden llevar. En general las señales se envían usando altas frecuencias que tienen distancias de propagación más pequeñas pero una capacidad más alta de transmisión de información. El rango de espectro que va de 30 MHz a 3000 MHz es el adecuado para una amplia variedad de servicios y tiene una gran demanda, el objeto de esta investigación está basado en ese rango de espectro [2].

Los estándares Global System for Mobile Communications (GSM) y Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) que funcionan en este rango de espectro de 30 a 3000 MHz, lideran la comunicación móvil digital, con 5.4 billones de usuarios cerca del 90% del mercado mundial [2].

Desde sus inicios en 1982 la red GSM ha tenido múltiples estándares y una constante evolución, pasando por el estándar Third Generation Partnership Project (3GPP) en 1998, 3G y un nuevo sistema 4G Long-Term Evolution (LTE). La Divergencia de trayectorias tecnológicas y patrones se debe a varios factores, incluyendo la regulación del gobierno, estructura de mercado y comportamiento socio cultural. Todos estos factores son relevantes cuando se estudia la tecnología de Radio Cognitiva (CR) como un sub sistema

de los sistemas de comunicación de radio, la Radio Cognitiva dentro de la nueva tecnología de Radio definido por Software (SDR) emerge como un nuevo punto de convergencia para la industria de las comunicaciones inalámbricas. La CR como SDR es el combustible necesario para la optimización de las redes y servicios de telecomunicaciones modernas, a través de la automatización e implementación de técnicas de inteligencia artificial a los sistemas de comunicación existentes. [3, 2, 4]

Debido a la creciente demanda de espectro en los últimos años se ha evidenciado un problema de escasez virtual del espectro, generado principalmente por las ineficientes e inflexibles políticas de acceso al espectro establecidas por las entidades regulatorias, la CR emerge como una alternativa de solución frente a esa limitante de acceso al espectro. Su principio de su funcionamiento se basa en permitir que los usuarios no licenciados accedan a las bandas temporalmente desocupadas sin interferir con los usuarios primarios (PU) que cuentan con las licencias para operar en ese rango de espectro. El punto clave de la CR está en monitorear el nivel de ocupación del espectro y detectar huecos de espectro no utilizados por los PU y usarlos como una oportunidad de transmitir para los usuarios no licenciados. [5, 6]

La tecnología de CR ha emergido como una oportunidad de Acceso Dinámico al Espectro (DSA), las investigaciones en este sentido han sido motivadas por los resultados de campañas de medición de ocupación del espectro realizadas en todo el mundo [7, 8, 9, 10, 11, 12], enfocadas en identificar los rangos de espectro radioeléctrico con baja ocupación por parte de los PU y las oportunidades de uso por parte de los usuarios no licenciados haciendo uso del espectro radio. [13, 5]

En este trabajo de investigación se realiza una campaña de medición durante un periodo de seis meses, se seleccionan tres canales de la red GSM, se realiza un análisis de su ocupación y su posibilidad de pronóstico.

El documento consta de seis capítulos, distribuidos así: en el Capítulo 1, se describe el funcionamiento de la tecnología CR, manejo de series de tiempo y análisis de ocupación realizados. En el Capítulo 2, se describe el procedimiento para la medición del espectro, recolección y organización de la información. En el Capítulo 3, se exponen los métodos para calcular el parámetro de auto-similitud y se selecciona el más adecuado de acuerdo a las características de los datos recolectados. En el Capítulo 4, se exponen los cálculos del parámetro de auto-similitud con el método seleccionado. En el Capítulo 5, se realiza un análisis estadístico de las mediciones y sus contribuciones a la CR. En el Capítulo 6, se relacionan las conclusiones y recomendaciones.

Justificación

La CR es una tecnología que busca un uso eficiente del espectro, realizando un análisis previo de la ocupación de los canales, de forma que se pueda realizar un “handoff” entre las tecnologías disponibles para ser usadas en la red de radio cognitiva, es decir que en canales que no estén siendo usados por el PU, un usuario no licenciado puede hacer uso de este sin causar interferencias. [1, 5].

Diversos análisis de ocupación realizados previamente han permitido hacer pronósticos de ocupación de la red móvil usando mediciones de periodos no mayores a una semana, por esta razón se realiza este análisis por un periodo de seis meses, para analizar el comportamiento de la red móvil en un largo periodo de tiempo. Para determinar la probabilidad de pronóstico de la red móvil se calcula el parámetro de auto-similitud que permite evidenciar la presencia de Dependencia de Largo Plazo (LRD), es necesario realizar el análisis para diferentes periodos de tiempo con el fin de identificar el que presente mejor probabilidad de pronóstico [7, 8, 9, 10, 11, 12].

Como resultado de esta investigación, empresas de servicios de telecomunicaciones, investigadores y aquellos interesados en las redes de radio cognitivas se verán beneficiados con el análisis de la ocupación de canales en redes GSM, ya que se logra determinar el periodo de tiempo que es necesario medir para predecir con precisión el nivel de ocupación del espectro y así optimizar el proceso de diseño de las redes de CR [10].

Las mediciones de la ocupación del espectro son muy útiles para el desarrollo de nuevas técnicas de acceso al espectro que garanticen una administración eficiente del mismo, por lo tanto, esta tesis consiste en el análisis de ocupación de tres canales de la red GSM medidos durante un periodo de seis meses y determinar el periodo de tiempo que se requiere medir para hacer un pronóstico adecuado del nivel de ocupación de los canales analizados [11]. El análisis realizado en esta tesis responde al interrogante de cuánto tiempo es necesario medir para predecir si un canal está ocupado [1, 14].

Objetivos

Objetivo General:

Realizar un análisis de ocupación de canales para redes de Radio Cognitiva en el espectro de señales GSM durante un periodo de seis meses

Objetivos Específicos:

- Seleccionar un método para analizar las series de tiempo recolectadas de la red GSM.
- Desarrollar el modelo seleccionado para diferentes canales de la señal GSM medida.
- Analizar las series de tiempo GSM y sus contribuciones al desarrollo de las redes de Radio Cognitiva en el largo plazo.

1. Fundamentos para el análisis de ocupación en redes de Radio Cognitiva

El rápido desarrollo de las capacidades de la electrónica digital y el procesamiento de señales están haciendo realidad muchos procesos que habían sido posibles únicamente en la teoría. Un sistema SDR es un sistema de comunicación por radio cuyos canales de modulación de formas de onda y otros componentes de la comunicación son definidos e implementados en software antes de ser implementados en Hardware, su principio de funcionamiento dio la partida a la tecnología de CR [1].

Las redes de CR han ganado mucha atención en la comunidad investigativa en la última década y han emergido como una opción para resolver los temas de escasez del espectro [15].

1.1 Funcionamiento de la Radio Cognitiva

La tecnología de CR, es introducida como el próximo paso de la SDR, es un paradigma para la comunicación inalámbrica, en la cual cualquier red o nodo inalámbrico cambia sus parámetros de recepción o transmisión para comunicarse eficientemente evitando interferencias con usuarios licenciados o no licenciados. Esta modificación de los parámetros está basada en el monitoreo activo de varios factores en el ambiente de radio externo e interno, tales como el espectro de las frecuencias de radio, el comportamiento del usuario y el estado de la red. [16]

De acuerdo a la regulación de la International Telecommunication Union (ITU) [17], un sistema de comunicación de radio es más eficiente en el uso del espectro que otro, si la información transmitida es entregada usando menos recurso de espectro que en otro

sistema. El espectro es usado ineficientemente cuando las bandas de frecuencia no están equitativamente ocupadas tanto como sea posible, o cuando se usan demasiadas bandas de frecuencia, o cuando porciones de bandas de frecuencia están sin uso mientras otras bandas con características físicas similares están congestionadas [17].

El continuo crecimiento en el campo de las telecomunicaciones ha traído consigo la aparición de varios protocolos, terminales y estándares que han incrementado la demanda de transmisión de datos a través de la red, lo que se traduce en un espectro de radio más congestionado. La CR como una tecnología SDR promete una solución al escenario actual con acceso inteligente al espectro para todo tipo de señales. [18]

La tecnología SDR basada en CR se refiere a comunicaciones reconfigurables donde las decisiones de reconfiguración son tomadas con la ayuda de una serie de sensores. Uno de esos sensores es el sensor de espectro, el cual usando sentidos de enfoque oportunista identifica anchos de banda disponibles y asiste en el establecimiento de comunicaciones a través de frecuencias adecuadas. En este escenario, un terminal debe ser capaz de acceder a un ancho de banda disponible que permita cumplir sus requerimientos de transmisión de datos. De todos modos, este acceso al espectro en el contexto de la CR es posible únicamente si los anchos de banda propuestos por el sensor de espectro no implican alguna modificación al sistema Analog front end (AFE) [18].

El sistema AFE está compuesto por elementos tales como filtros, antenas y amplificadores de potencia. El diseño y funcionamiento de estos componentes AFE depende de propiedades temporales y espectrales de la señal, en el caso de las antenas son diseñadas para un rango de frecuencias específico, o los amplificadores cuyo diseño depende de la amplitud de la señal de entrada [15].

La CR es la tecnología que trae el paradigma de Acceso Dinámico al Espectro (DSA). En DSA, las redes de Radio Cognitiva están sobre las redes licenciadas, también conocidas como redes primarias, por acceso oportunista al espectro [19]. Consecuentemente, en una red que utiliza DSA, los usuarios son clasificados como PU si ellos son licenciados para operar en una banda de frecuencia particular, y secundarios en caso contrario. Los usuarios secundarios pueden operar en la porción vacía de la banda licenciada solo si ellos no interfieren con los usuarios primarios [20].

Cuando una red de Radio Cognitiva Ad hoc (CRAHN) es establecida, los usuarios secundarios necesitan cooperar con el intercambio de información de control para lograr encontrar sin fallar bandas de frecuencia vacías. Para el intercambio de información de control en la red de Radio Cognitiva es necesario establecer un canal de control, son muchos los métodos disponibles para implementar canales de control en redes de radio Cognitiva [21].

Con el objetivo de promover el uso eficiente del espectro se deben tener en cuenta dos aspectos para alcanzar este objetivo. El primero sería el nivel de administración del espectro y el otro es el nivel puramente técnico. La regla general de administración del espectro es asegurarse que dos usuarios no transmitan en la misma frecuencia y en el mismo tiempo para evitar interferencias, de forma que las decisiones de la administración están basadas en técnicas relativas al uso eficiente del espectro [1].

1.1.1 Características de la Radio Cognitiva

La CR es una tecnología fundamental para gestionar un acceso dinámico al espectro, surge como una tecnología promisoriosa e innovadora llamada a solucionar los problemas de escasez de espectro y sub utilización de las bandas licenciadas, la CR tiene la capacidad de compartir de manera oportunista el canal inalámbrico licenciado por un PU con otro usuario no licenciado, adicionalmente está diseñada para cambiar los parámetros del transmisor basado en la interacción con el entorno que este opera, en base a estas consideraciones es importante mencionar las dos características principales de la CR [13, 22, 23, 24]:

- **Capacidad Cognitiva:** se trata de la habilidad de la tecnología de radio para capturar o detectar la información y adaptarse a su entorno de radio. Una forma de lograrlo es a través de un monitoreo de la potencia en la banda de frecuencia que se desea utilizar, pero adicionalmente es posible lograrlo con técnicas más sofisticadas, tales como el aprendizaje autónomo, acompañado por un algoritmo que permita definir los parámetros de operación necesarios para utilizar las bandas de frecuencia libres sin causar interferencia con otros usuarios [13, 6].
- **Reconfigurabilidad:** consiste en la capacidad propia de la CR de modificar sus parámetros de operación, como frecuencia, potencia y modulación, con el objetivo

de habilitar la radio para ser programada dinámicamente para transmitir y recibir en una gran variedad de frecuencias en función del ambiente de radio, igualmente brinda la posibilidad de usar diferentes tecnologías de acceso a la transmisión [6, 25, 26].

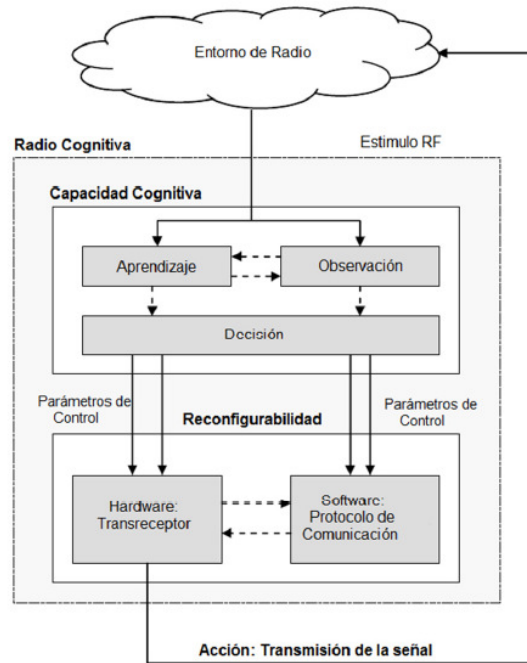


Figura 1-1: Concepto de radio cognitiva, Imagen tomada de [24]

En la figura 1-1 es posible ver cómo funciona la CR a través de sus dos características principales, inicialmente la CR monitorea el espectro radioeléctrico a través de la observación y los procesos de aprendizaje, en base a estos, toma las decisiones adecuadas para ajustar los parámetros de operación. Luego, la CR reconfigura los parámetros de operación de acuerdo a las decisiones tomadas en la primera fase [24, 13].

1.1.2 Gestión de espectro en Radio Cognitiva

A través de las características de Capacidad Cognitiva y Reconfigurabilidad, la CR hace una gestión del espectro, de forma que permite el uso del espectro no utilizado temporalmente, lo que se conoce como *hueco espectral* [27]. En caso de que la banda sea utilizada por un PU, la CR se mueve a otro *hueco espectral* para evitar interferencia a los usuarios licenciados. En la figura 1-2 se muestra el concepto de *hueco espectral* y como gestiona el acceso al espectro la CR [27, 13].

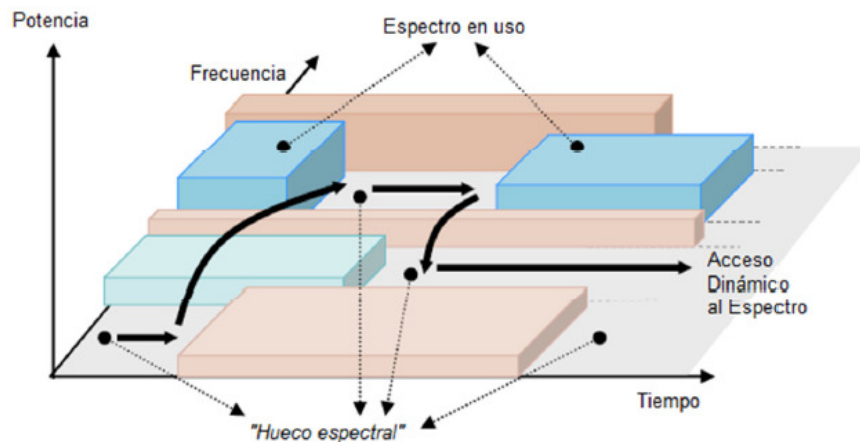


Figura 1-2: Hueco espectral y acceso dinámico al espectro, Imagen tomada de [22]

Con el uso de los huecos espectrales y el control del acceso dinámico al espectro la tecnología CR busca mejorar la eficiencia espectral. Para tener un control total del espectro y aprovechar las oportunidades de utilización es necesario conocer las operaciones del espectro que forman un ciclo cognitivo. El ciclo se puede ver en la figura 1-3, este consta de cuatro acciones para gestionar el espectro: detección de espectro, decisión de espectro, compartir el espectro y movilidad de espectro. Todas las acciones deben estar incorporadas dentro de los protocolos clásicos de las capas, de forma que sea posible implementar una red de CR, a continuación, se relacionan las características de estas acciones [22, 13],

- **Detección de espectro:** un usuario de CR supervisa las bandas disponibles del espectro, captura su información y después detecta los huecos de espectro [13].
- **Decisión de espectro:** de acuerdo a la disponibilidad del espectro, los usuarios de CR pueden seleccionar la banda más adecuada a utilizar. Esta operación no solo depende de la disponibilidad de espectro, sino también de las políticas regulatorias [13].
- **Compartir el espectro:** en caso de que existan múltiples usuarios de CR se debe coordinar el acceso a estos huecos espectrales para evitar que los múltiples usuarios colisionen [13].
- **Movilidad de espectro:** Los usuarios de CR son considerados como "visitantes" en el espectro. De forma que si los PU necesitan una parte específica del espectro o si las condiciones del canal se deterioran, los usuarios de CR deben buscar otra parte vacante del espectro [13].

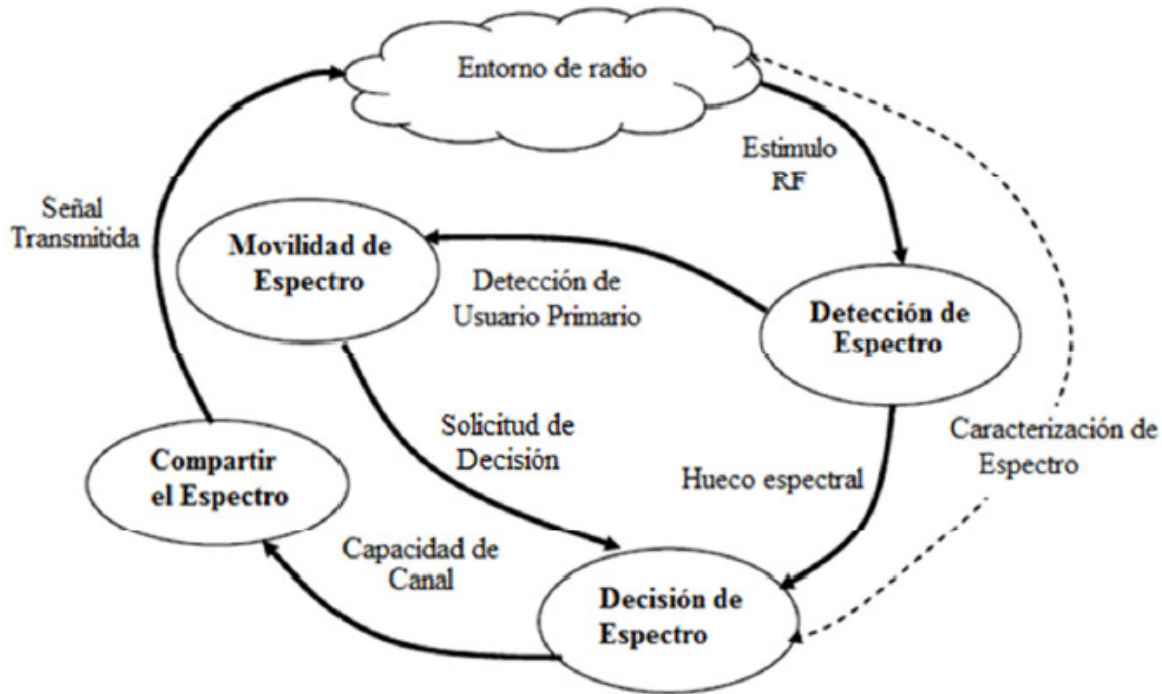


Figura 1-3: Ciclo Cognitivo, Imagen tomada de [22]

El ciclo inicia con la monitorización del espectro para detectar las Oportunidades espectrales correspondientes a canales no utilizados, luego la decisión de espectro selecciona una de ellas para ser utilizada por el usuario de CR, si un PU hace uso de la misma oportunidad espectral, el usuario de CR debe realizar la movilidad espectral y seleccionar una nueva oportunidad espectral. En el caso de varios usuarios no licenciados, se puede realizar una compartición del espectro [26].

1.2 Parámetro de Auto-similaridad

En el proceso de análisis de ocupación de canales se utiliza una herramienta que permita simplificar la serie de datos recolectada, posteriormente esta serie de datos simplificada es analizada usando métodos que permitan encontrar la fuente de dichas ocupaciones y obtener patrones que permitan predecir su comportamiento [28].

En el análisis de tráfico de redes la Auto similaridad o invariancia en la escala es una noción importante. Un proceso es auto similar si su comportamiento estadístico es independiente de la escala de tiempo, lo cual significa que las características estadísticas del proceso pueden parecer similares en diferentes escalas de tiempo. Se han realizado una serie de

estudios empíricos para la medición de tráfico en varias redes de comunicaciones [28], los cuales han probado que el tráfico actual en redes Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) es auto similar y con presencia de Long Range Dependency (LRD). Varios modelos de procesos con LRD han sido introducidos, en su mayoría modelos bien conocidos como Auto similaridad de segundo orden (fGn) y Autoregressive fractionally integrated moving average (ARFIMA). En procesos de tiempo continuo la auto-similaridad está definida en dimensiones finitas de acuerdo al parámetro de auto similaridad, conocido como parámetro de Hurst (H) [29].

El parámetro H permite determinar la presencia de tráfico LRD en la red, para estimarlo se utilizan varias técnicas estadísticas como el estimador R/S y el estimador basado en Wavelets, entre otros que se estudian en el capítulo 3. El parámetro H permite establecer cuáles estaciones base están mal posicionadas y cuáles deberían ser reposicionadas en el futuro. [30]

Un proceso puede ser caracterizado de acuerdo al parámetro H en términos del grado de auto-similaridad y LRD que representa el grado de persistencia de un fenómeno estadístico [30]. El grado de auto-similaridad y LRD se incrementa hasta $H=1$, teóricamente el valor de H debe estar entre 0 y 1 [31]. Un valor de H igual a 0.5 indica la falta de auto-similaridad o la presencia Short Range Dependency (SRD). Un valor más grande que 0.5 indica la existencia de LRD [30].

El fenómeno de LRD está relacionado al comportamiento de procesos estadísticos de segundo orden con respecto a la duración de la observación, los estimadores del parámetro H pueden clasificarse en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia [31].

1.2.1 Análisis de Series de Tiempo

Una de las mayores dificultades para el análisis de series de tiempo con gran cantidad de datos, como lo es el caso de las medidas recolectadas del comportamiento del tráfico en las estaciones base objeto de este trabajo, es la complejidad que implica el analizar esta gran cantidad de datos, por tal razón es necesario usar técnicas eficaces para simplificar el manejo de estos datos [32].

De acuerdo a [32], una representación más favorable de datos recolectados de una medición de tráfico en una red inalámbrica puede ser obtenida usando la transformada

Wavelet, la cual reduce la complejidad de las series de datos, una de las propiedades de la transformada discreta de Wavelet es su localización en el dominio del tiempo lo cual la hace adecuada para el análisis de señales no estacionarias. [32]

La variabilidad del tráfico en la red es más importante que la predicción de la tendencia general del tráfico pues permite obtener pronósticos del tráfico para cortos periodos de tiempo, por tal razón es más importante la localización en tiempo que en frecuencia. Al incrementarse los momentos de desvanecimiento, la precisión de la predicción de tráfico se ve deteriorada para cortos periodos de tráfico. Teniendo en cuenta estos factores, al realizar una asociación de la transformada de wavelet estacionaria con redes neuronales artificiales como técnica de predicción de tráfico, es posible obtener mejores rendimientos en el pronóstico de tráfico de varias semanas [33].

De esta forma, comparando el rendimiento de las redes neuronales artificiales con otras técnicas utilizadas, se puede concluir que esta técnica es más efectiva en la predicción de tráfico en tiempos cortos basada en el análisis de la variabilidad del tráfico, las series de tiempo objeto del análisis en [33] fueron reducidas usando transformada wavelet [32].

La transformada Wavelet ha sido usada para analizar varios datos estudiados en varios dominios, en [34] fue usada para analizar las series de tiempo de señales de radar, permitiendo realizar una simplificación de la serie de tiempo en una wavelet que es una onda localizada en tiempo y espacio con energía finita, lo que permite su análisis como una señal transitoria [34].

La transformada de Wavelet es ahora usada en muchas aplicaciones, reemplazando a la tradicional transformada de Fourier. Las Wavelet son ampliamente usadas en Procesamiento de Imágenes y Señales [35], Comunicaciones [36], Gráficos de computadores, Finanzas, Medicina [37], Biología [37], Geología [34] y muchos otros campos [34].

Las Wavelets también han sido utilizadas para encontrar los bordes en imágenes digitales, para comprimir digitalmente huellas digitales, en el modelamiento de las galaxias distantes. Los Musicólogos han usado las Wavelets para reconstruir archivos de grabación dañados [38].

1.3 Análisis de Ocupación previos

Se han desarrollado análisis de series de tiempo en canales WiMAX cuyo periodo de análisis máximo ha sido de ocho semanas [30]. A partir de los trabajos previos realizados en redes WiMAX se ha podido detectar LRD en el tráfico de la red, lo cual genera una afectación directa al rendimiento de la red [30].

Aunque la presencia de LRD en una red inalámbrica es un fenómeno común, los objetivos han estado enfocados en estudiar las causas de su aparición, en estos estudios se ha podido determinar que se debe a periodicidades de hasta un mes, esto fue posible en un estudio realizado en dos semanas tomando como base 66 estaciones base de una red WiMAX [30].

Se han realizado análisis de ocupación del espectro en redes GSM, en [10] se realizó una medición banda por banda de la ocupación del espectro en el dominio de tiempo, frecuencia y espacio en la región espectral entre 100 MHz a 2500 MHz, la medición fue realizada durante siete días [10].

En [11] se realiza una medición del espectro por siete días en las bandas de 900 MHz y 1800 MHz basadas en radio cognitiva. Los análisis estadísticos realizados muestran que la utilización de las bandas para diferentes servicios no es la misma, y tiene diferencias significativas entre las ocupaciones de los canales de subida y bajada. La ocupación del canal de subida es menor que el de bajada, reflejando el fenómeno de estar más libre en la noche mientras la gente está descansando y más ocupado mientras están trabajando. Igualmente, en [11] las distribuciones de probabilidad de ocupación de los canales y niveles de señal fueron analizadas. Finalmente se realizó una simulación de los efectos de la radio cognitiva con diferentes niveles de utilización del espectro [11].

En [39] se realizó un análisis de ocupación del espectro GSM en el rango de frecuencias de 100 MHz a 2500 MHz se realizó una medición por un periodo de siete días [39], para el cual se usaron dos sistemas de monitoreo diferentes de acuerdo a la banda de frecuencias a medir, así:

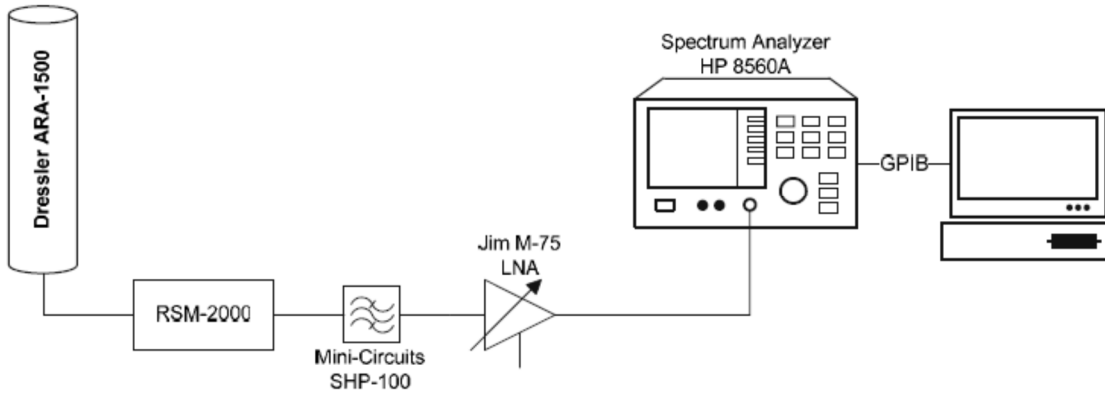


Figura 1-4: Sistema de Monitoreo de espectro 100-1500 MHz, Imagen tomada de [39].

Para el sistema de monitoreo en el espectro de 100-1500 MHz, el sistema consistía de una antena omnidireccional Dressler ARA-1500 con un rango de frecuencias de 50-1500 MHz conectada por un cable RF de 6m a un diplexor RSM-2000 el cual permite que la corriente DC para el preamplificador sea aplicada al conductor central del cable coaxial RF, eliminando la necesidad de una fuente DC adicional para alimentar el conductor. El diplexor RSM-2000 también contenía un atenuador RF ajustable de 20 Db permitiendo recibir señales del rango de frecuencias entero y después atenuarlas, lo que incrementa el rango dinámico del sistema [39, 11].

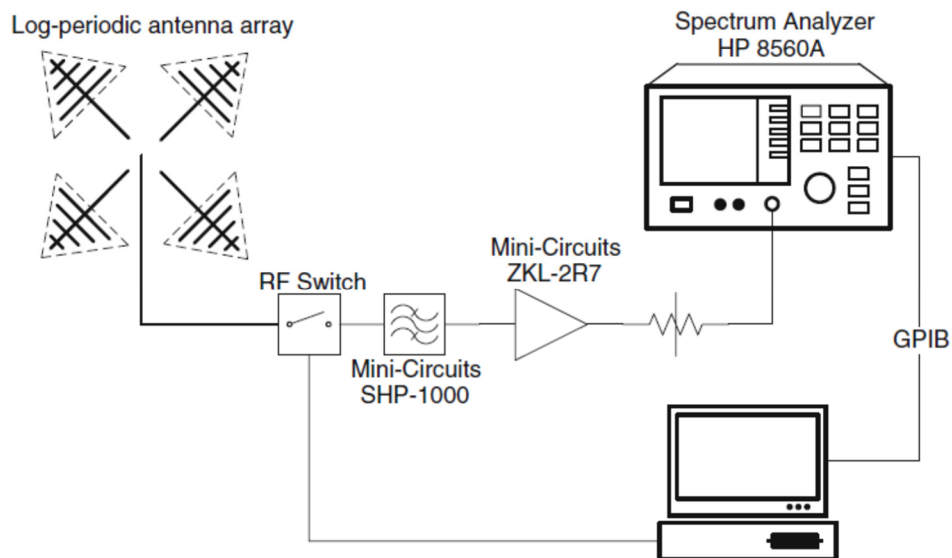


Figura 1-5: Sistema de Monitoreo de espectro 1500-2400 MHz, Imagen tomada de [39].

Para el sistema de monitoreo en el rango de 1500-2400 Mhz la antena fue modificada por un arreglo de cuatro bandas duales direccionales verticalmente, con un ancho de haz de 55-60° para habilitar la detección de la dirección de las ondas entrantes [39] [11].

Los datos fueron analizados usando análisis de series de tiempo, un modelo ARIMA fue idóneo para los datos en la banda GSM. Los datos muestran que la ocupación del espectro es escasa y el 80% del tiempo las bandas superiores a 2 MHz están disponibles, lo cual es significativo para la radio cognitiva. El análisis de series de tiempo puede ser usado para predecir el uso futuro del espectro de frecuencia. Si las estaciones base de la radio cognitiva monitorean la ocupación de un espectro dado, los mensajes de predicción de ocupación pueden ser transmitidos a los dispositivos de la radio cognitiva, los cuales pueden almacenar una gran cantidad de tiempo de escaneo, permitiendo así un desempeño adecuado de estos dispositivos en la red de radio cognitiva [39, 11, 40].

2. Definición de parámetros para las mediciones

En este capítulo se detalla el procedimiento empleado para la recolección de las mediciones de ocupación del espectro, los equipos utilizados, la selección de los canales objeto del estudio y la metodología empleada para la organización de los datos que son la base de este trabajo de investigación.

2.1 Selección del canal a analizar

El objetivo de la investigación es analizar el comportamiento de una banda GSM en la ciudad de Bogotá [41, 7, 42], respecto a la banda del espectro asignada para el enlace ascendente de la banda GSM850, que se encuentra entre 824 y 849MHz se presenta un ciclo de trabajo total que no supera el 20 %; mientras que para la porción de espectro asignada al enlace descendente de la banda GSM850 (entre 869 y 894MHz), se exhibe un ciclo de trabajo mucho más alto, cercano al 80% en la mayoría de sus canales. Al examinar el enlace ascendente de la banda GSM1900, esto es entre 1850-1910MHz, la ocupación espectral puede ser considerada despreciable en relación con el correspondiente enlace descendente, es decir, la banda entre 1930- 1990MHz, ya que la mayoría de los canales tienen niveles de ocupación espectral cercanos al 100 %. Esto prueba que, incluso para tecnologías de gran demanda (como el servicio de voz de la telefonía celular), se pueden encontrar huecos espectrales [41, 7, 42].

En base a las anteriores consideraciones realizadas en el estudio de ocupación del espectro [41, 7, 42], se selecciona el enlace ascendente de la banda GSM850, que se encuentra entre 824 y 849MHz, ya que reúne las características necesarias para la investigación, garantiza unos niveles bajos de ciclo trabajo y garantiza una alta probabilidad de encontrar huecos espectrales, de ahí la importancia de poder analizar su

probabilidad de pronóstico, esta parte del espectro está compuesta por 60 canales, dentro de los cuales se seleccionaron 3 canales, cada uno con niveles de ocupación diferentes (bajo, medio, alto), pues se busca analizar comportamiento de los canales con diferentes niveles de ocupación.

Para la recolección de las medidas se utiliza el analizador de espectro usado en el estudio de ocupación realizado en [41, 7, 42]. En base a la evaluación de ocupación del espectro realizada en [41], se seleccionaron tres canales con diferentes niveles de ocupación: alto, medio y bajo.

Los canales analizados fueron,

- Canal 24: 828.6 – 828.81 MHz (Alta ocupación)
- Canal 25: 828.9 – 829 MHz (Baja ocupación)
- Canal 31: 830.09 – 830.18 MHz (Media ocupación)

2.2 Técnica en la Medición del espectro

En esta sección se describe el procedimiento utilizado para realizar la medición de los Canales 24, 25 y 31 seleccionados para el análisis objeto de esta investigación.

Para la medición de los canales se utilizó la misma configuración utilizada en [41], donde se realizó la medición del espectro en Bogota, durante diez meses en intervalos de 48h, en [41] se realizó un análisis de ocupación de las bandas de frecuencias que van desde 54 MHz a 6 GHz, como resultado se obtuvo una visión clara de los ciclos de trabajo asociados a las diferentes tecnologías que operan en estas bandas. Se utilizaron los siguientes equipos para la medición de la energía [41],

Tabla 2-1: Equipos utilizados para la medición [41].

Descripción	Referencia	Frecuencia
Analizador de Espectros ANRITSU	MS2721B	9 kHz-7.1GHz
Antena de Banda Ancha Omnidireccional tipo discono	Super M ultra base	25MHz-6GHz
Cable de Banda Ancha DC	CLB-6FT SMNM+	18GHz
Amplificador de Bajo Ruido	ZX608008E-S+	20MHz-8GHz

En la figura 2-1 se muestra la configuración del montaje utilizado para la medición [41].

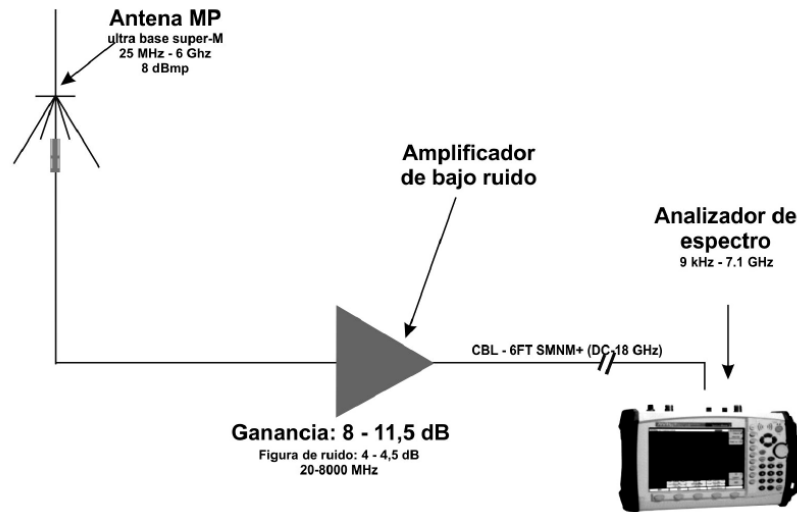


Figura 2-1: Configuración de las mediciones, imagen tomada de [41]

En la figura 2-2 se muestra el montaje físico utilizado para la recolección de los datos teniendo en cuenta los factores propios de una red GSM, el montaje se realiza al aire libre en un sitio que facilita la medición y recolección de los datos durante las 24 horas del día [41].

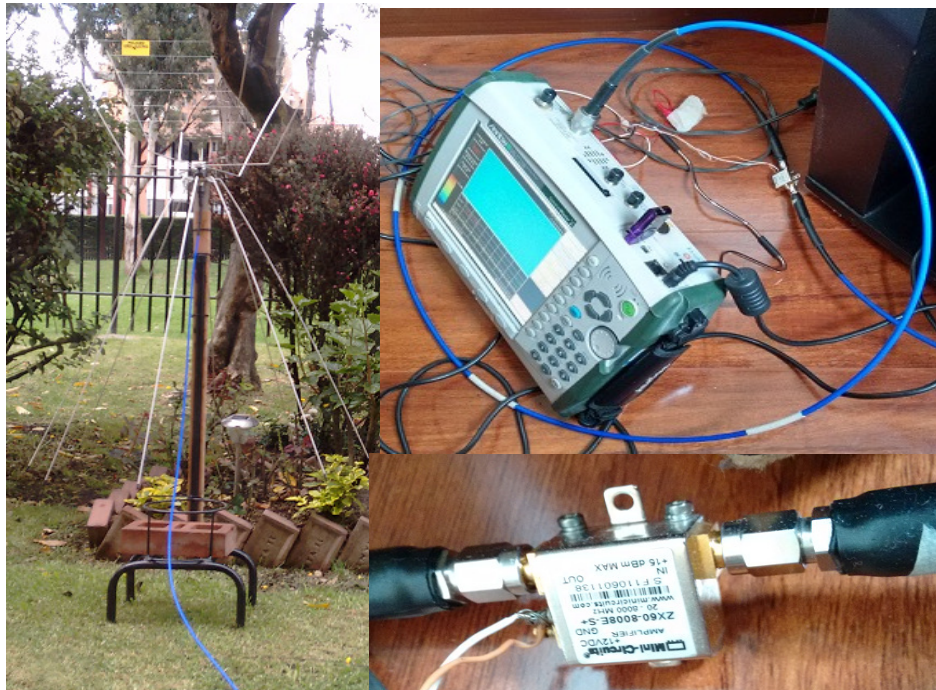


Figura 2-2: Montaje físico de la estación de medición.

2.2.1 Configuración del Analizador de Espectros

Para el caso objeto de la presente investigación se configuró el AE teniendo en cuenta los parámetros calculados para analizar el enlace ascendente de la banda GSM850, el cual va de 824 a 849 MHz [41].

La configuración de la medición se realizó teniendo en cuenta aspectos como el tiempo de barrido, el ancho de banda de resolución (RBW) y el *span* [41], estos aspectos se calcularon de forma que se garantice una medida adecuada en función del piso de ruido y el ancho de banda del canal seleccionado [14].

En el analizador de espectro se configuraron los parámetros de medición, con base en (1, 2) [41],

$$AB_T > f_b \quad (1)$$

AB_T es el ancho de banda del canal a medir, en este caso el ancho de banda es de 200 kHz, f_b es el *bin* de frecuencia [41].

$$f_b = \frac{SPAN}{pps - 1} \quad (2)$$

pps es el número de puntos por *span* del analizador, que para este caso es 551 [41].

Se configuraron entonces los siguientes parámetros, RBW = 100 kHz, ya que $RBW \leq AB_T$, tiempo de barrido de 290 ms [41].

Adicionalmente, de acuerdo a investigaciones de ocupación del espectro realizados previamente [14, 41], teniendo en cuenta que se utiliza un amplificador a la entrada, se ajustan los niveles de potencia del analizador de espectros para que las señales se encuentren dentro del Margen Dinámico Libre de Espurios (SFDR) [41],

$$SFDR(db) = P_I(dBm) - P_N(dBm) \quad (3)$$

P_I potencia de la señal a la entrada, P_N potencia de ruido equivalente a la entrada.

Se tiene en cuenta este factor, teniendo en cuenta que el objetivo es garantizar la fiabilidad de las mediciones del analizador implementando el amplificador a la entrada, de esta forma se garantiza que los niveles de espurios no sean detectados como la actividad de un



Figura 2-4: Punto de medida en la zona norte de Bogotá DC, imagen tomada de [13]

2.3 Descripción de la recolección y organización de datos

Para la recolección de datos adquiridos mediante el analizador de espectros y el montaje descrito en la sección 2.1 se dispuso ubicar la estación de medición en un punto que permitiera almacenar los datos durante las 24 horas del día los seis meses que tomo el proceso de recolección de datos, de forma que fuese posible hacer un seguimiento continuo del comportamiento del espectro en los canales seleccionados, con la cantidad suficiente de muestras para alcanzar un intervalo de confianza adecuado [43].

La campaña de medición se desarrolló en la ciudad de Bogotá en el periodo comprendido entre el 1 de Octubre de 2014 y el 14 de Abril de 2015, se recopilaron datos de 24 semanas correspondientes a 168 días.

En el Anexo A se relacionan los ciclos de trabajo de cada uno de los días analizados durante la campaña de medición, junto con la cantidad de muestras tomadas.

El procedimiento de recolección, extracción y organización de datos siguió el siguiente flujograma, en el cual se relacionan los tiempos empleados en cada una de las etapas del proceso, véase figura 2-5.

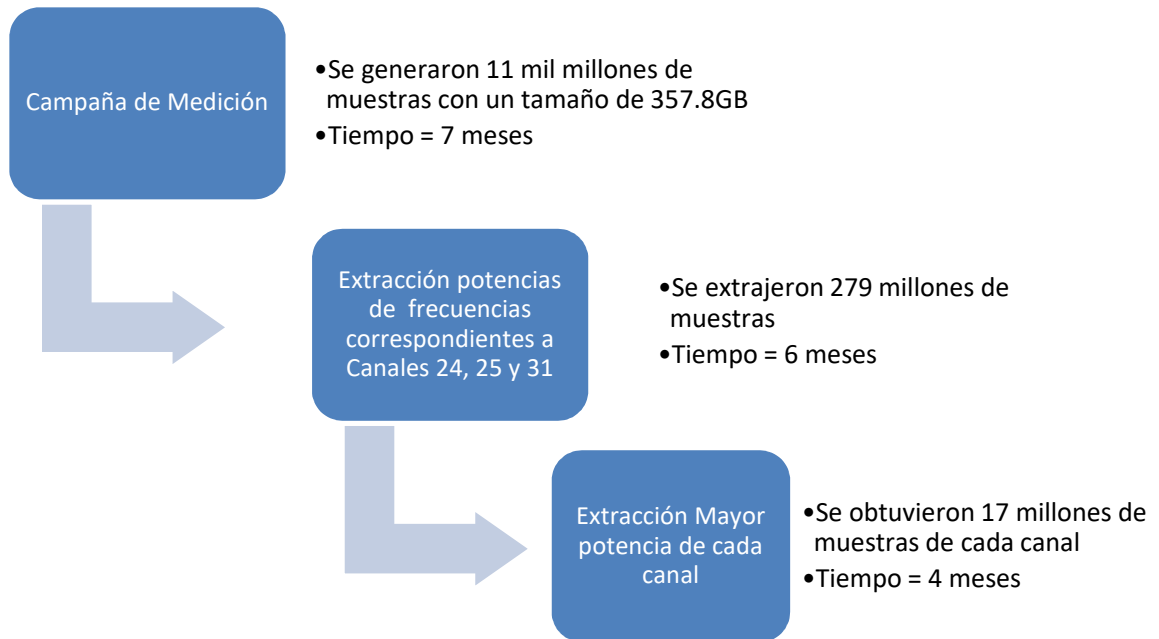


Figura 2-5: Flujograma del proceso de recolección, extracción y organización de datos

El proceso de medición, extracción y organización de las mediciones tomadas con el analizador de espectros tardó 17 meses hasta obtener la serie de tiempo correspondiente a los canales 24, 25 y 31 utilizadas para el desarrollo de este trabajo de investigación.

2.3.1 Archivos Generados por el Analizador

El Analizador de espectros genera archivos *.ia con las mediciones del rango de frecuencias que va de 824 a 850 MHz en 551 intervalos de 47.2 kHz cada uno, cada archivo contiene 156 trazos en los cuales se relacionan las mediciones de potencia en dB de la banda seleccionada para el análisis con un tiempo de barrido de 290 ms, durante el periodo de medición se generaron 128.016 archivos *.ia, por lo tanto el tiempo de organización y análisis de la información recolectada fue demasiado dispendioso.

Tabla 2-2: Archivos generados por el Analizador de Espectros

Días	Total Archivos IA	Tamaño de archivos [GB]	Total muestras recopiladas
168	128016	357.8	11.003'743.296

Dentro de cada archivo *.ia se tienen entonces 85.956 datos de potencia por cada uno de los archivos generados por el analizador de espectros. De esta forma en total durante los seis meses de medición se recopilaron 11.004 millones de muestras. Para procesar esta cantidad de información y obtener las series de tiempo con los datos de DEP para cada uno de los canales seleccionados se desarrolló una aplicación en Python que permitiera obtener de estos archivos únicamente los puntos correspondientes a los canales objeto del estudio, como se puede apreciar en la tabla 2-3.

Tabla 2-3: Archivos correspondientes a los canales 24, 25 y 31

Canal	Muestras por archivo IA	Muestras Totales
CH24	936	119,822,976
CH25	624	79,881,984
CH31	624	79,881,984
TOTAL		279,586,944

Finalmente se desarrolla una aplicación en Python que obtenga el mayor valor de cada una de las mediciones de potencia de las frecuencias que conforman cada uno de los canales objeto de estudio, como resultado se obtiene una serie de tiempo con 17'417.683 muestras del valor de potencia en dBm por cada uno de los tres canales, las series de tiempo que contienen los valores de potencia de los tres canales junto a la fecha y hora asociada a cada muestra tienen un tamaño final de 1.4 GB.

Debido a la gran cantidad de información que se requería analizar, se desarrolló una aplicación en Python, que permite realizar la extracción de las mediciones de potencia generadas por el Analizador de Espectros durante los seis meses en que se desarrolló la campaña de medición, y organizarlos de forma que se simplifica el proceso de análisis de dicha información.

2.3.2 Descripción del equipo de cómputo

La extracción, organización y procesamiento de las mediciones recopiladas por el analizador de espectros se realizó en un computador que cuenta con las siguientes características,

Procesador: Intel Core i5-5200U CPU @ 2.20 GHz, Memoria RAM: 8 GB, Sistema Operativo de 64 bits.

Para el análisis de las series de tiempo y estimación de los parámetros estadísticos de los tres canales seleccionados se utilizó el mismo computador.

El análisis de cada una de las series de tiempo de 17'417.683 muestras tardo 71 horas, cada vez que se aplicaba algún análisis estadístico sobre estos datos.

3. Método para análisis de las series de tiempo

En este capítulo se realiza una recopilación de los métodos empleados para calcular el parámetro de Hurst, en base al cual se determinará la dependencia de largo rango de las series de tiempo de los canales 24, 25 y 31. Se revisarán los cuatro componentes fundamentales de una serie de tiempo y en base a estos se determina el método más adecuado de acuerdo a los objetivos del trabajo de investigación [44, 45].

3.1 Métodos para calcular el parámetro de Hurst

La estimación del parámetro de Hurst por diferentes técnicas es sensible a la longitud de la serie de tiempo y al ruido. En un análisis sobre fraccionales brownianos, se han generado series de tiempo con diferentes valores de H , las cuales han sido probadas con varias técnicas para probar la eficiencia de las mismas. Los valores de H son calculados por los métodos: Transformada Wavelet (WT), potencia de espectro (PS), longitud de rizo (RL), semi-variograma (SV) y rango reescalado (R/S). Los métodos disponibles para el cálculo del parámetro de Hurst son: [44]

3.1.1 Transformada Wavelet

La aplicación de Wavelet ha sido sugerida recientemente para calcular los coeficientes de Hurst, es un método que se ha desarrollado en tiempo atrás [46, 47, 48], pero sus conclusiones se mantienen vigentes en cuanto a la aplicación de las Wavelet para el análisis de series temporales. La transformada Wavelet (WT) ha proporcionado una oportunidad de analizar conjuntos de datos no estacionarios, para el caso de este trabajo de investigación se requiere de un método que permita analizar gran cantidad de datos. La transformada Wavelet trabaja como un microscopio matemático representando la

amplitud como una función de la posición y de la escala. La aplicación de la WT se basa en la aplicación de tres métodos [44],

- Modulo máximo WT [47]
- Análisis de paquetes Wavelet [48]
- Coeficiente promedio Wavelet (AWC) [46]

El método AWC es más simple que los otros métodos basados en Wavelet, su aplicación e implementación es más rápida y es capaz de proporcionar resultados altamente confiables [44].

En el dominio Wavelet, una señal es descompuesta en Wavelet de duración finita, esta Wavelet utilizada es llamada la Wavelet madre de la señal a analizar, la Wavelet madre se representa como [44],

$$\psi_{a,b}(x) = \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (3.3.1-1)$$

En esta ecuación, $a > 0$ es el parámetro de escala y $-\infty < b < \infty$ es el parámetro de traslación. Para una función $h(x)$, la transformada de Wavelet Continua (WTC) es definida cómo [44],

$$W[h](a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}^*(x) h(x) dx. \quad (3.3.1-2)$$

El valor de H se estima de la pendiente de la línea recta resultante de la gráfica del el $\log(W[h](a))$ contra $\log(a)$. A continuación, se relaciona el resultado de un caso en que se tiene una serie con $H=0.7$, se calcula el valor de H con 500 puntos usando WT [44].

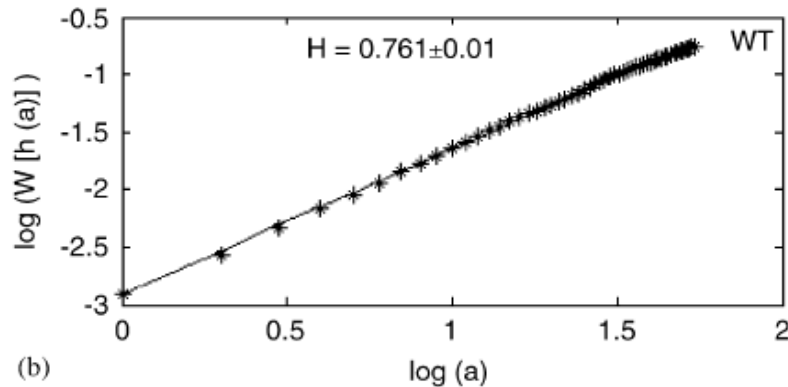


Figura 3-1: Transformada Wavelet para serie con $H=0.7$, tomada de [44]

3.1.2 Potencia de Espectro

Es posible analizar una serie de tiempo desde el dominio de la frecuencia utilizando el método de la potencia de espectro (PS), el cual representa la potencia de la señal dentro de una banda de frecuencia dada [49]. Hay varias formas de calcular la PS, pero el método más usado comúnmente es la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Los fractales autoafines son representados en el dominio de Fourier como [50, 51],

$$P(f) = Af^{-\beta} \quad (3.3.2-1)$$

Una gráfica del logaritmo de PS contra el logaritmo de la frecuencia da como resultado los exponentes de escala. El método de la FFT asume cero para valores no repetidos, entonces la PS calculada usando la FFT es la convolución del valor real de PS con la función de espectro [52]. Para contrarrestar esas limitaciones del método FFT se introdujo el método de la máxima entropía (MEM). El MEM no recupera información faltante ni tampoco hace ajustes de la serie para calcular PS en serie de datos cortas. En el MEM, una serie de tiempo es aproximada como un proceso Auto regresivo (AR) de orden M. El orden del proceso es seleccionado usando el criterio de predicción final de error de Akaike (FPE), y se define como [44],

$$\text{FPE} = \frac{N + M + 1}{N + M - 1} \sigma^2 \quad (3.3.2-2)$$

En la figura 3-2 se relaciona el resultado de un caso en que se tiene una serie con $H=0.7$, se calcula el valor de H con 500 puntos usando PS [44].

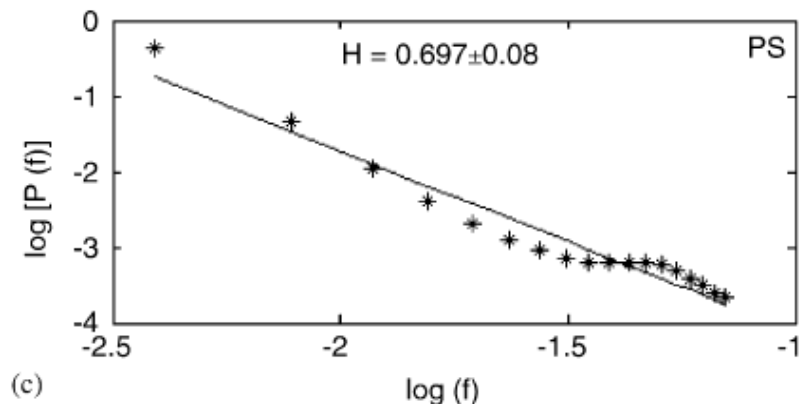


Figura 3-2: Potencia de Espectro (PS) para serie con $H=0.7$, tomada de [44]

3.1.3 Longitud de Rizo

El método de longitud de rizo (RL) se basa en el hecho de que, para series auto similares, la desviación estándar medida en la longitud de la ventana es proporcional a esta [53]. En este método la raíz promedio cuadrada (RMS) del rizo es calculada para diferentes longitudes para estimar el valor de los coeficientes de Hurst y representarlos como [44, 53],

$$R(w) = Aw^H \quad (3.3.3-1)$$

Donde, A es una constante, w la longitud de la ventana, H el coeficiente de Hurst y R(w) el valor RMS del rizo y se calcula como [53],

$$R(w) = \frac{1}{n_w} \sum_{i=1}^{n_w} \sqrt{\frac{1}{(m_i - 2)} \sum_{j \in W_i} (r(j) - \bar{r})^2} \quad (3.3.3-2)$$

El método usa $m_i - 2$ grados de libertad para calcular el valor RMS del rizo, porque los parámetros (intersección y pendiente), son calculados en base a la serie. El coeficiente de Hurst puede ser calculado estimando la pendiente de la línea recta resultante de la gráfica del $\log(R(w))$ contra $\log(w)$ [44].

En la figura 3-3 se relaciona el resultado de un caso en que se tiene una serie con $H=0.7$, se calcula el valor de H con 500 puntos usando RL [44, 53].

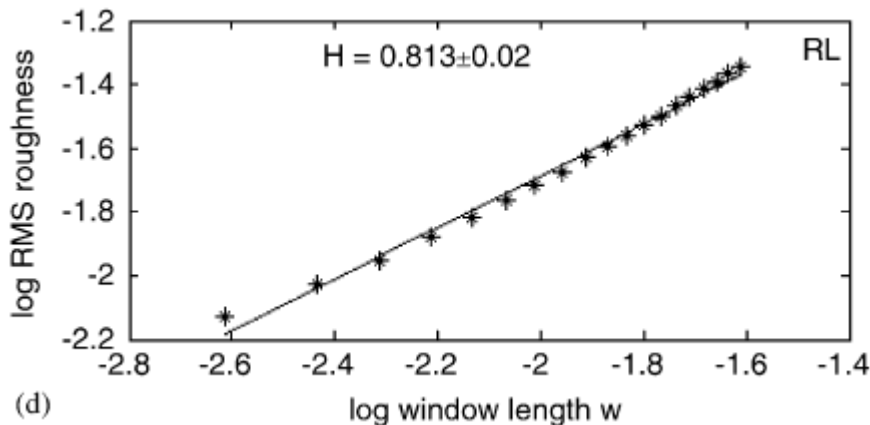


Figura 3-3: Longitud de Rizo (RL) para serie con $H=0.7$, tomada de [44]

3.1.4 Semi-variograma

El método del semi-variograma (SV) puede ser utilizado para determinar las propiedades de escala de las series auto similares, el semi variograma $V(h)$ está relacionado con el retraso (h), [44, 54]

$$V(h) = ah^{2H} \quad (3.3.4-1)$$

En base a la anterior ecuación, el valor de SV se calcula como [54],

$$V(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(i) - z(i+h))^2 \quad (3.3.4-2)$$

Para calcular el valor de H , las variaciones de los retrasos son graficadas solo una cuarta parte por encima de la longitud de la serie de datos porque el SV no es confiable por encima de este límite [54].

En la figura 3-4 se relaciona el resultado de un caso en que se tiene una serie con $H=0.7$, se calcula el valor de H con 500 puntos usando SV [44].

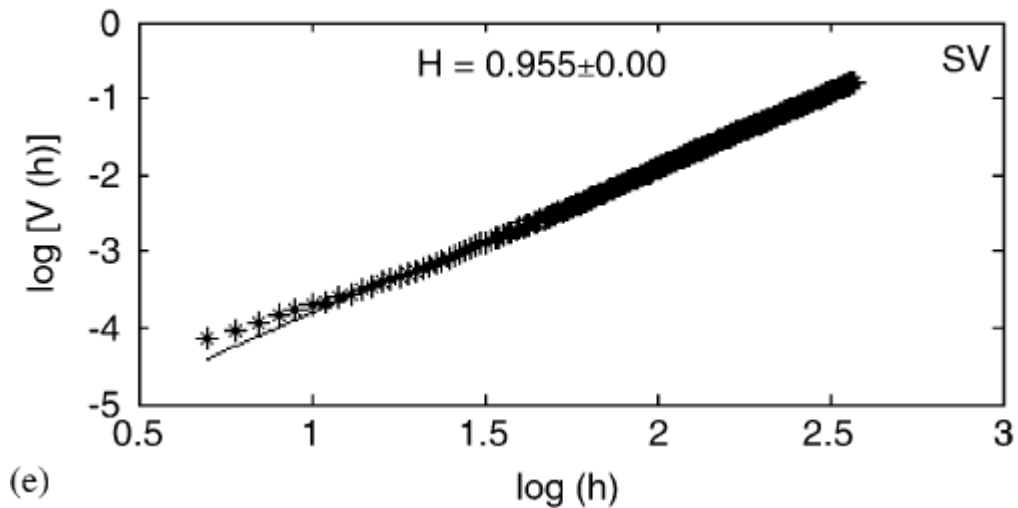


Figura 3-4: Semi-Variograma (SV) para serie con $H=0.7$, tomada de [44]

3.1.5 Rango Reescalado

En este método inicialmente la serie es dividida en dos partes y el radio de R_n y S_n es calculado para esas partes. El valor promedio de R_n/S_n es calculado para la correspondiente longitud de las dos partes, luego nuevamente estas partes son subdivididas y el valor promedio de R_n/S_n es calculado, el proceso continua hasta que la longitud de la parte subdividida es igual a 2. La gráfica Log-Log entre el valor promedio de R/S y n puede ser usada también para calcular el coeficiente de Hurst [50, 55],

$$\left(\frac{R_n}{S_n}\right)_{av} = \left(\frac{n}{2}\right)^H \quad (3.3.5-1)$$

En la ecuación anterior S_n es la desviación estándar, n varia de 2 hasta $N-1$, N es el número de puntos de la serie de datos [44].

En la figura 3-5 se relaciona el resultado de un caso en que se tiene una serie con $H=0.7$, se calcula el valor de H con 500 puntos usando RS [44].

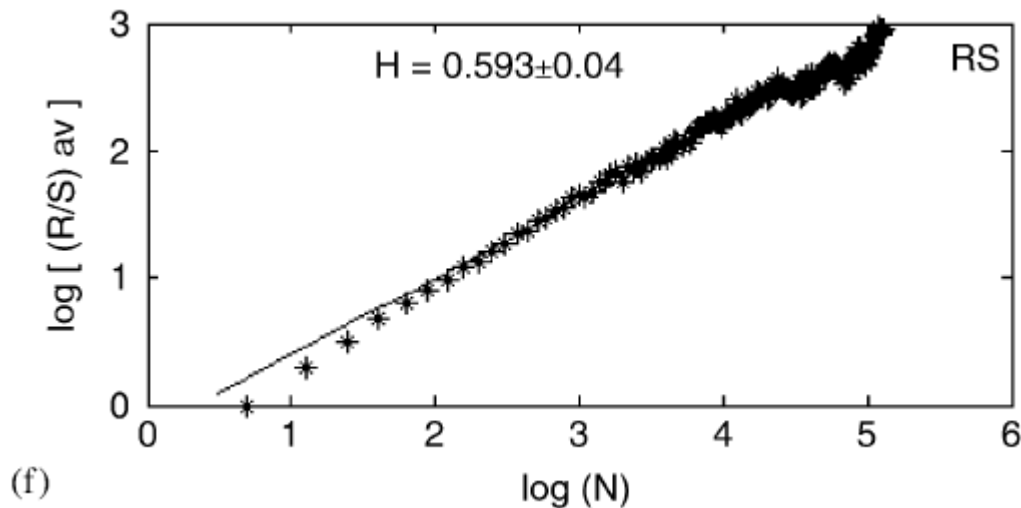


Figura 3-5: Rango Rescalado (RS) para serie con $H=0.7$, tomada de [44]

3.2 Método seleccionado para calcular H

Para realizar el análisis de dependencia de largo rango, se revisó el procedimiento y las características de cinco métodos que permiten calcular el parámetro H, en la Tabla 3-1 se relacionan los resultados del valor de H de una serie de tiempo generada con $H=0.7$ [44].

Tabla 3-1: Valores de H calculados por diferentes métodos, tomado de [44]

Number of data points	Wavelet transform method	MEM method	Roughness length method	Semi-variogram method	Rescaled-range analysis
100	0.715±0.02	0.574±0.09	0.583±0.01	0.823±0.01	0.729±0.06
120	0.716±0.02	0.607±0.08	0.583±0.01	0.818±0.00	0.664±0.06
140	0.770±0.01	0.637±0.09	0.613±0.02	0.783±0.01	0.668±0.05
160	0.763±0.01	0.603±0.11	0.639±0.02	0.827±0.01	0.645±0.05
180	0.752±0.02	0.610±0.13	0.661±0.02	0.846±0.01	0.661±0.05
200	0.782±0.01	0.532±0.12	0.681±0.02	0.878±0.01	0.686±0.05
220	0.767±0.01	0.511±0.11	0.681±0.02	0.899±0.01	0.694±0.05
240	0.767±0.01	0.601±0.07	0.699±0.02	0.904±0.01	0.702±0.05
260	0.782±0.01	0.596±0.07	0.715±0.02	0.909±0.01	0.704±0.05
280	0.774±0.01	0.583±0.07	0.729±0.02	0.904±0.01	0.683±0.05
300	0.790±0.01	0.601±0.07	0.742±0.02	0.903±0.01	0.665±0.05
320	0.776±0.01	0.614±0.07	0.742±0.02	0.903±0.01	0.654±0.05
340	0.787±0.01	0.617±0.07	0.753±0.02	0.907±0.00	0.676±0.05
360	0.777±0.01	0.627±0.07	0.764±0.02	0.916±0.00	0.657±0.05
380	0.778±0.01	0.631±0.06	0.773±0.02	0.920±0.00	0.635±0.05
400	0.789±0.00	0.608±0.07	0.782±0.02	0.918±0.00	0.621±0.05
420	0.772±0.01	0.689±0.16	0.782±0.02	0.927±0.00	0.602±0.04
440	0.765±0.01	0.710±0.15	0.790±0.02	0.936±0.00	0.592±0.04
460	0.775±0.00	0.707±0.14	0.798±0.02	0.947±0.00	0.592±0.04
480	0.753±0.01	0.701±0.14	0.806±0.02	0.955±0.00	0.593±0.04
500	0.761±0.01	0.697±0.13	0.813±0.02	0.960±0.00	0.603±0.04

De acuerdo a los valores calculados de H, es posible apreciar que utilizando los métodos WT y RS, el valor es estable a pesar de incrementar la cantidad de puntos que se utilizan en el análisis [44].

Los valores calculados de H se desvían del valor teórico si los datos con que se realiza la estimación no son suficientes, o si por el contrario los datos contienen ruido, las series de Movimiento Fraccional Browniano (FBM) fueron generadas usando el método de Adiciones sucesivas aleatorias (SRA), para la comparación de los métodos se generaron seis series con valores de H que varían desde 0.4 hasta 0.9. Se utilizaron los cinco métodos descritos en el numeral anterior para calcular el valor de H para cada una de las seis series generadas. [44, 56, 50]

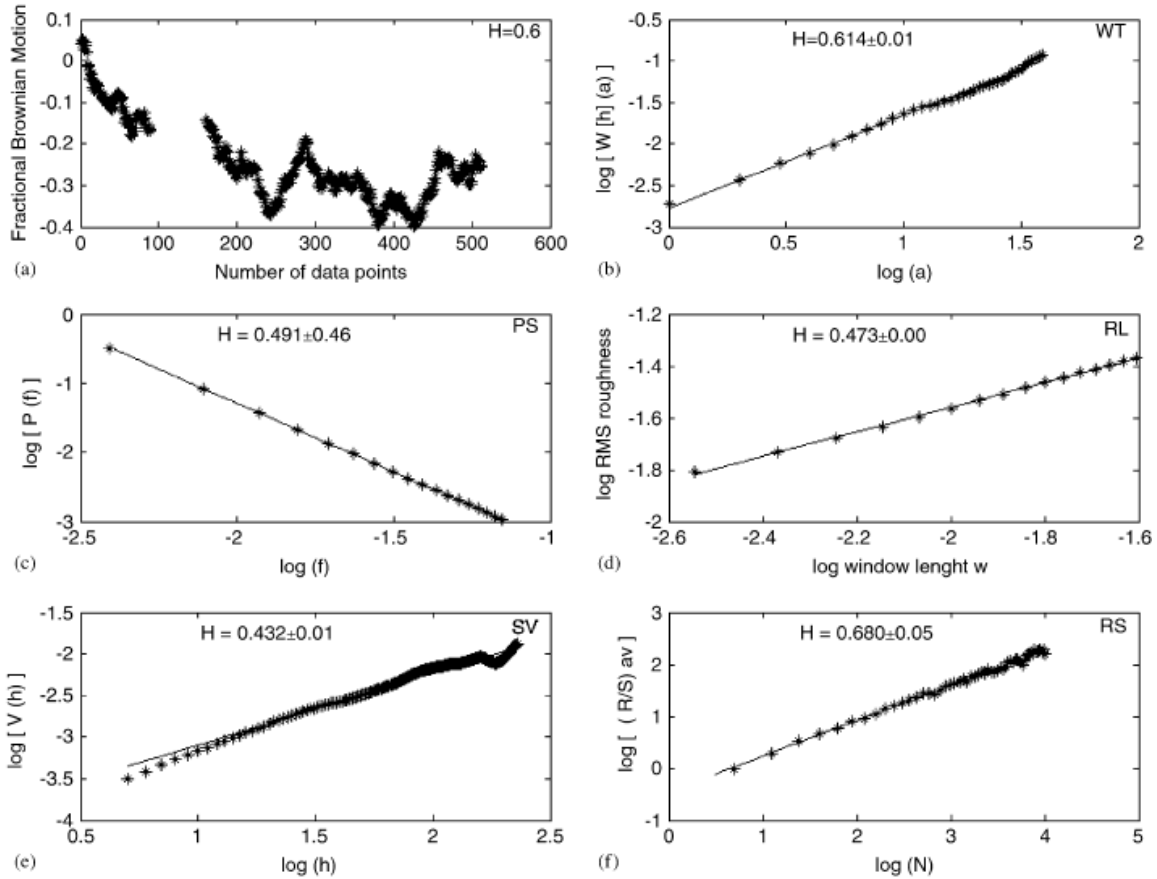


Figura 3-6: Cálculo de H; a) serie con $H=0.6$, con 500 puntos; b) WT; c) PS; d) RL; e) SV; f) RS, tomada de [44]

Para el caso del método PS, los coeficientes de Hurst son calculados usando la FFT y el MEM, los cálculos usando el MEM se encontraron consistentes y más confiables que usando la FFT [44].

En base al análisis de los valores obtenidos en el cálculo de H y que se muestran en la tabla 3-1, dos métodos son sugeridos para el cálculo de H en conjuntos de datos cortos y largos, el análisis R/S y WT. [44, 55]

Se calcula el error RMS para cada uno de los métodos utilizados para estimar el valor de H correspondiente a las seis series generadas con valor de H desde 0.4 hasta 0.9, en la figura 3-7 se muestran los resultados de los valores de error RMS [44, 55].

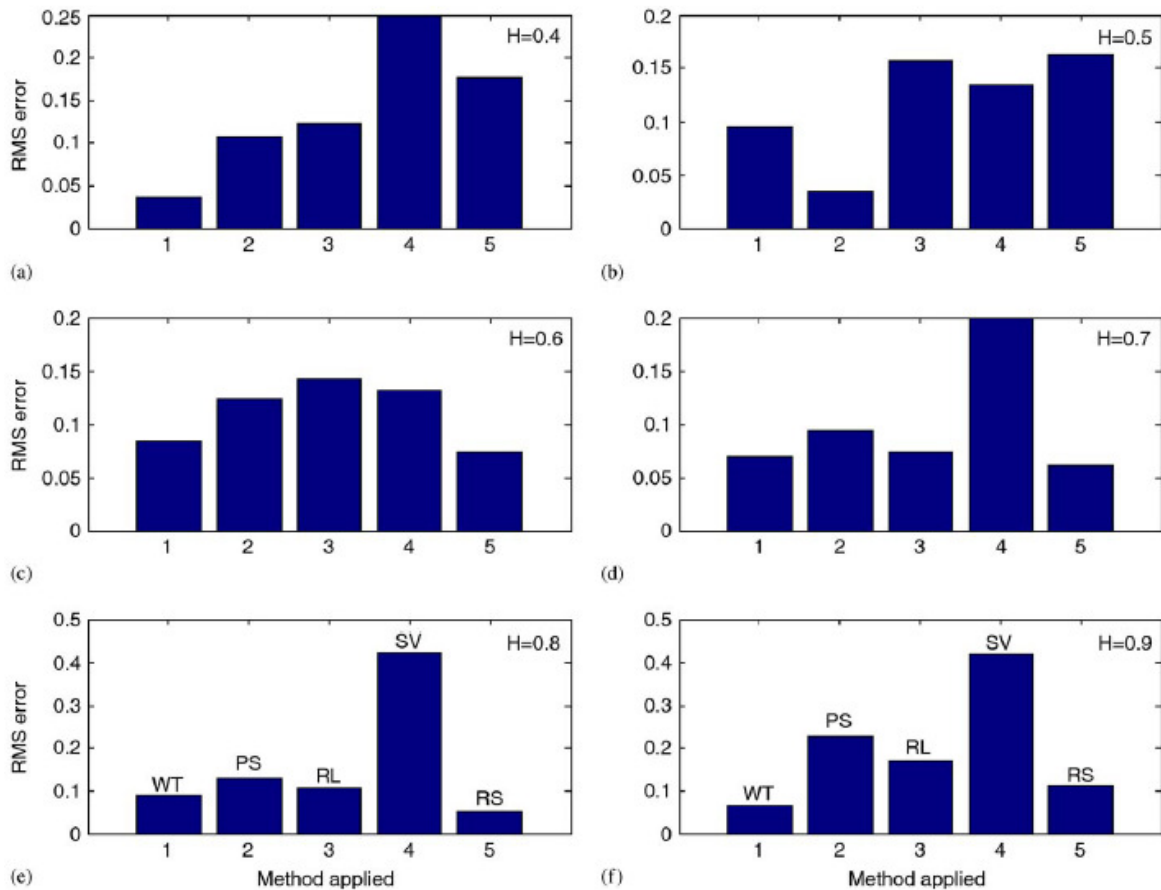


Figura 3-7: RMS error para diferentes métodos $H=0.4-0.9$, tomada de [44]

Es posible apreciar en base a la figura 3-7, que el error es significativamente bajo en el caso del método WT para series con $H=0.4$ y 0.9 , en los casos donde $H=0.6$, 0.7 y 0.8 los métodos WT y R/S arrojan valores de error comparablemente bajos, de forma que los métodos WT y R/S proporcionan buenos valores de H de acuerdo a las pruebas realizadas [44].

Adicionalmente es importante resaltar los resultados de la investigación realizada en [56], donde se probó que el método de rango R/S proporciona una gran precisión del valor de H para los casos en que se analizan series que contienen entre 1.000 y 10.000 puntos [56].

En la mayoría de casos con más de 10.000 puntos todos los métodos proporcionan buenos resultados, aunque los tiempos de procesamiento aumentan de un método a otro, para series de datos de longitud corta los métodos R/S y WT arrojan resultados consistentes de

H. En [45] se relacionan las múltiples limitaciones que supone la utilización de los métodos RL y PS para el análisis de series de tiempo cortas [44].

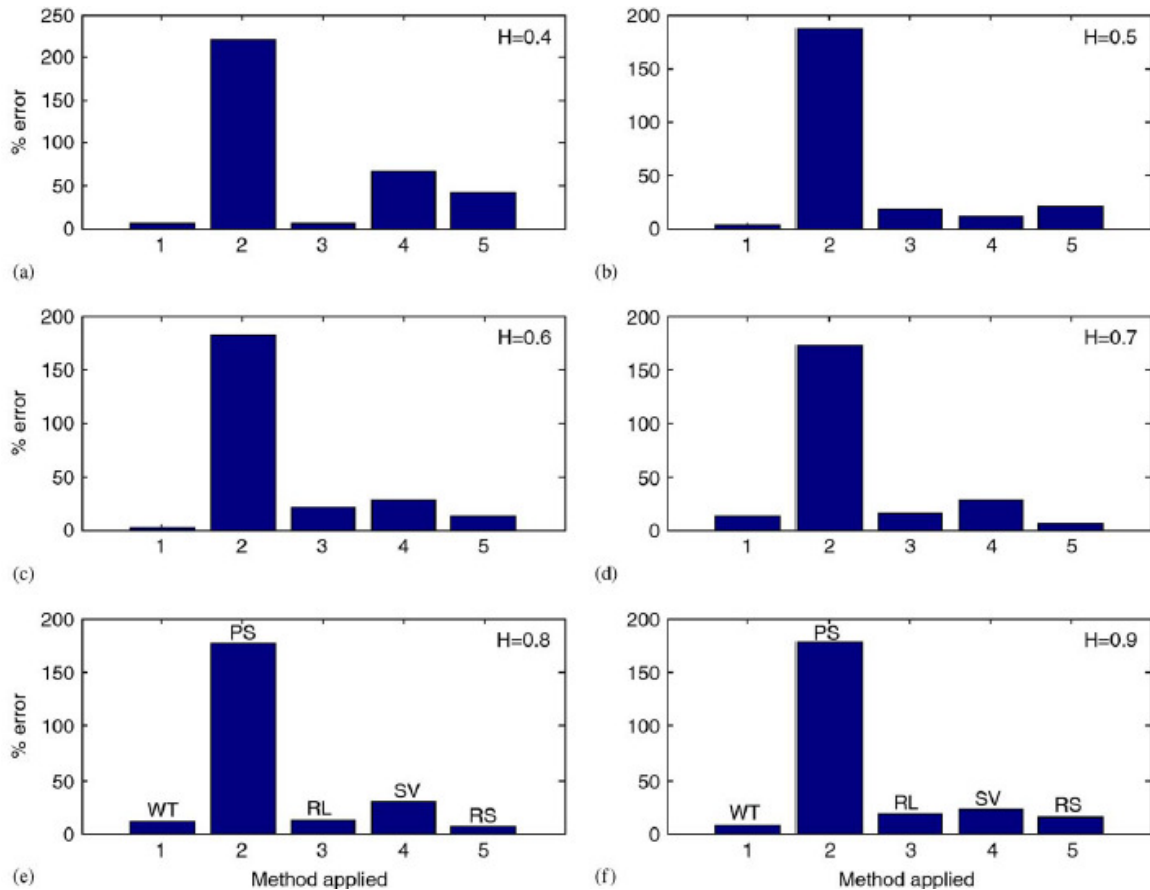


Figura 3-8: Porcentaje de error en diferentes métodos para $H=0.4-0.9$, tomada de [44]

Finalmente se resumen las características de cada uno de los cinco métodos analizados para estimar el parámetro de Hurst, se tienen en cuenta la consistencia de los resultados obtenidos en función de la cantidad de datos disponibles para hacer la estimación del parámetro, igualmente los errores obtenidos en las pruebas realizadas en las cuales se calculó el valor de H para series previamente generadas y los tiempos de procesamiento, ya que es un factor de suma importancia al momento de realizar el procesamiento de los datos de potencia obtenidos de los canales 24, 25 y 31 objeto del presente trabajo de investigación [40, 50].

Tabla 3-2: Comparación métodos para calcular el valor de Hurst [44]

Método	Error cuadrático medio - H	Porcentaje de error [%]	Tiempo de Procesamiento por 10.000 datos [segundos]
Wavelet Transform (WT)	0.06	2.5%	72.35
Potencia de Espectro (PS)	0.14	180.1%	93.22
Longitud de Rizo (RL)	0.13	12.2%	87.11
Semi-Variograma (SV)	0.26	22.3%	85.09
Rango Reescalado (R/S)	0.09	5.2%	77.46

De acuerdo a los resultados evidenciados en la tabla 3-2, es posible concluir que el método PS proporciona la estimación del error más alta, nuevamente se puede apreciar que los métodos WT y RS exhiben las mejores características para estimar el valor de H, sus resultados son consistentes para diferentes valores de H, los porcentajes de error son los menores al igual que los tiempos de procesamiento [55].

Los métodos WT y R/S son los más apropiados para calcular H en series de tiempo cortas y largas, sus resultados no se ven afectados por la longitud de la serie. Por esta razón se decide utilizar los métodos WT y RS para calcular el parámetro de Hurst en las series temporales objeto del presente trabajo de investigación, como una forma de contrastar los resultados obtenidos por dos métodos diferentes y garantizar así la confiabilidad de las conclusiones de la investigación [55, 40, 45].

4. Desarrollo de los Métodos RS y WT para diferentes canales

Se calcula el parámetro de H aplicando los métodos RS y WT seleccionados en el capítulo anterior, de forma que podemos evidenciar si las series de tiempo correspondiente a los canales seleccionados tienen dependencia de largo rango y en consecuencia son predecibles [44].

4.1 Aplicación de los métodos WT y RS

Es común que el tráfico de red este correlacionado en escalas de tiempo, el tráfico es auto similar (fractal) de acuerdo a las confirmaciones realizadas por varios investigadores a lo largo del tiempo [57].

Para el análisis de los conjuntos de datos recolectados a través de todo el proceso de medición que tomo 6 meses, se usan los siguientes métodos [57],

- Transformada Wavelet WT
- Análisis de rango RS

Estos dos métodos ofrecen los mejores resultados de acuerdo al numeral 3.2 del presente trabajo de Investigación.

Para el caso de la Transformada Wavelet se debe escoger el tipo de Wavelet que se va a utilizar para hacer la transformada [58],

- Haar
- Db2

De acuerdo a las imágenes de las formas de onda presentes en los conjuntos de datos recolectados se determinó emplear la Wavelet “db2”, la cual tiene la mayor semejanza con la serie de tiempo del comportamiento del tráfico en la red GSM [58].

4.2 Calculo de Hurst

Se determinó de acuerdo a las consideraciones contempladas en la sección 3.2, utilizar el método RS y WT para estimar el parámetro de H y determinar así la LRD presente en las series a analizar [57].

Es importante resaltar que la campaña de medición inicio el día 1 de Octubre de 2014 y finalizó el día 14 de Abril de 2015.

Para medir la dependencia de largo rango de las series de tiempo de cada uno de los canales, se analiza el parámetro de (H) para calcular la autosimilitud de las mediciones y determinar así la probabilidad de pronóstico de los canales analizados [12].

4.2.1 Calculo Hurst por semana

Se inicia con el análisis de la primera semana de medición, ver tabla 4-1,

Tabla 4-1: Fechas primera semana de medición

Fecha Datos	Dia	VARIANZA CH24	VARIANZA CH25	VARIANZA CH24
01/10/2014	miércoles	5.41	4.08	10.22
02/10/2014	jueves	4.99	3.86	8.57
03/10/2014	viernes	4.37	3.61	7.80
04/10/2014	sábado	4.47	3.40	7.72
05/10/2014	domingo	2.44	2.32	3.79
06/10/2014	lunes	4.02	3.26	11.70
07/10/2014	martes	5.13	3.79	10.33

En la figura 4.1 se pueden apreciar los datos de potencia en [dBm] de todos los canales durante la primera semana de medición, a partir de los cuales se mide el nivel de ocupación de cada uno de los canales a analizar. Los datos muestran una baja dispersión, especialmente en el canal 25 y un nivel bajo de la varianza. Para este primer análisis se utilizan las mediciones de potencia realizadas en la semana de Octubre 1 al 7 de 2014.

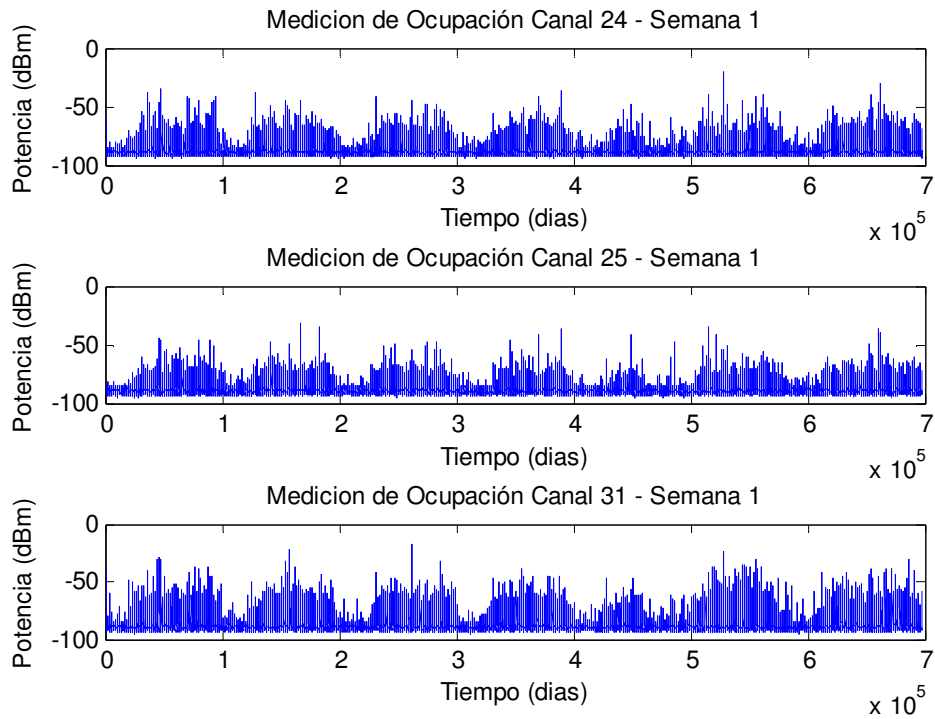


Figura 4-1: Medición de Ocupación Canales - Semana 1

En la figura 4-2 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para la primera semana de medición.

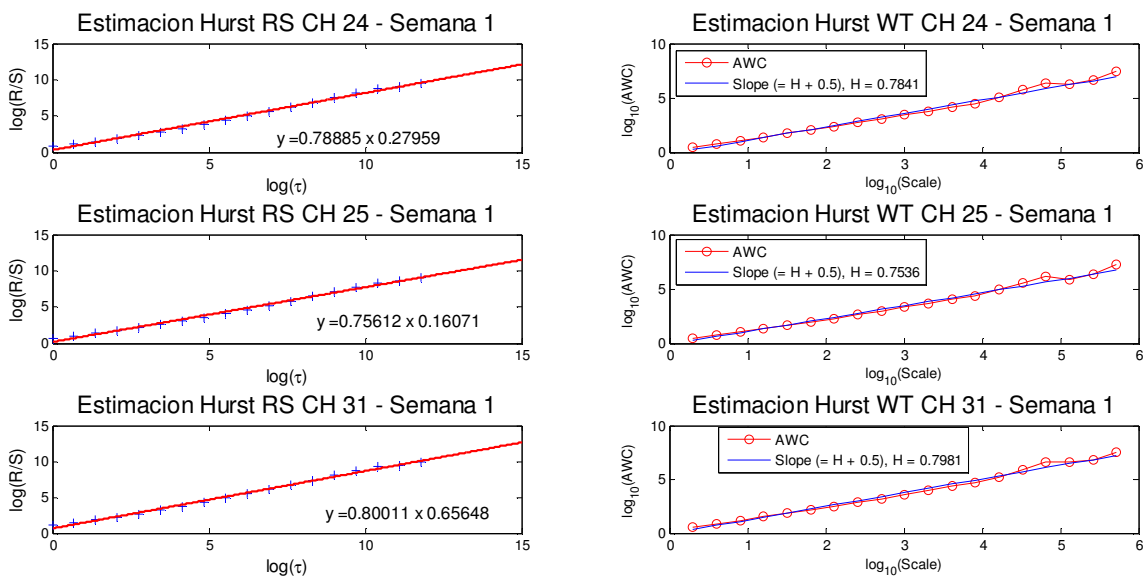


Figura 4-2: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 - Semana 1

En este primer análisis el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -19.87 [dBm] y un mínimo de -94.196 [dBm], la varianza se encuentra entre 2.44 y 5.41. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -31.16 [dBm] y un mínimo de -95.772 [dBm], la varianza se encuentra entre 2.32 y 4.08. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -17.1 [dBm] y un mínimo de -95.184 [dBm], la varianza se encuentra entre 3.79 y 11.7. En la Tabla 4-2 se relacionan los valores del parámetro H calculados para cada canal durante la primera semana de medición.

Tabla 4-2: Parámetro Hurst primera semana de medición

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Semana 1	0.7888	0.7841	0.7561	0.7536	0.8001	0.7981

Para obtener un valor más preciso y confiable del parámetro H durante una semana, se procede a calcular el promedio de 725.736 muestras de cada una de las 24 semanas con el fin de calcular el parámetro H a este valor.

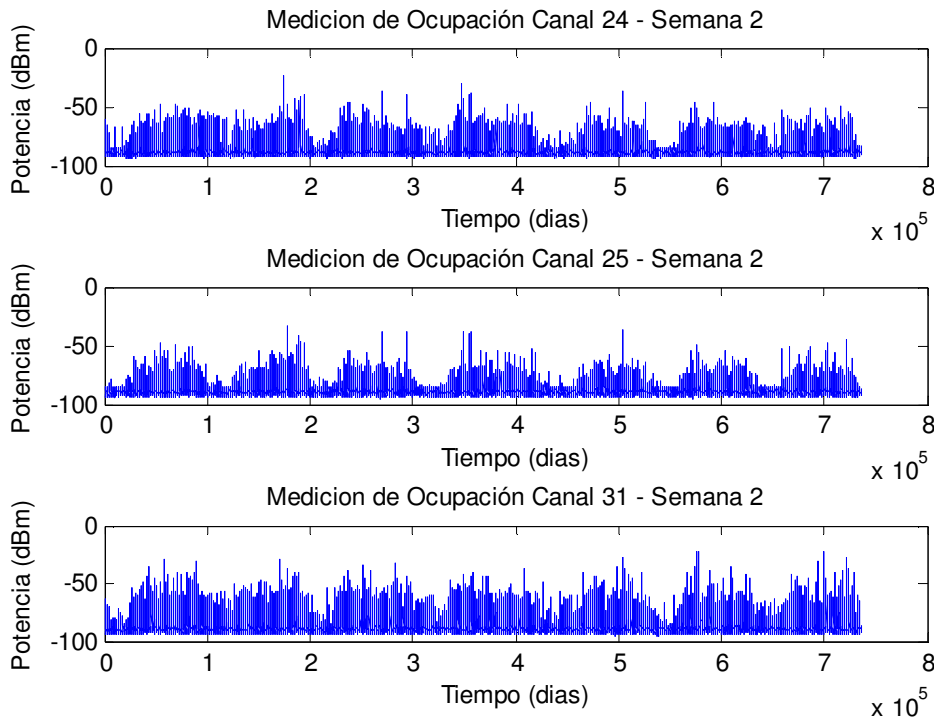


Figura 4-3: Medición de Ocupación Canales - Semana Promedio

En la figura 4-4 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores promedio de una semana.

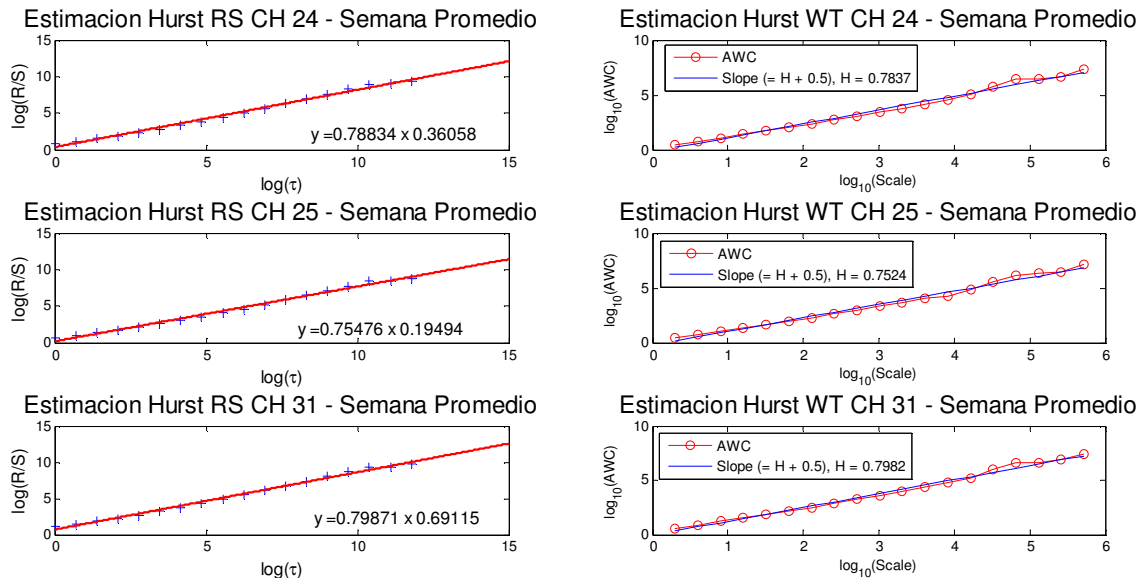


Figura 4-4: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 - Semana Promedio

En el análisis de los datos obtenidos correspondiente al valor promedio de una semana, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -13.176 [dBm] y un mínimo de -95.396 [dBm], la varianza se encuentra entre 1.49 y 12.8. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -16.484 [dBm] y un mínimo de -96.148 [dBm], la varianza se encuentra entre 1.81 y 13.07. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -14.84 [dBm] y un mínimo de -96.98 [dBm], la varianza se encuentra entre 2.79 y 20.12. El canal 24 y 25 exhiben características y comportamiento similar. En la Tabla 4-3 se relacionan los valores del parámetro H calculados para la semana promedio.

Tabla 4-3: Parámetro Hurst semana 2

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Semana 2	0.7883	0.7837	0.7547	0.7524	0.7987	0.7982

En base a los resultados de H para los valores reflejados en las Tablas 4-2 y 4-3 es posible comprobar que tal como se contempló en la tabla 3-2 la variación en la estimación de H

por el método RS y WT tiene una variación inferior al 2.7%, más sin embargo en los datos calculados en esta investigación la variación no supera el 1%.

Por otro lado, el valor de H comparado entre los dos periodos analizados presenta variaciones que no superan el 0.2%, el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de autosimilitud, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es el mayor de los tres.

4.2.2 Calculo Hurst por mes

Se continúa con el análisis de los datos correspondientes al primer mes de medición, para lo cual se tienen en cuenta los datos de las cuatro primeras semanas que van del 1 al 28 de Octubre de 2014, en la Tabla 4-4 se relaciona la información relevante de las cuatro semanas analizadas.

Tabla 4-4: Datos primer mes de medición

Semana	VARIANZA CH24	VARIANZA CH25	VARIANZA CH24
1	7.75	6.02	15.60
2	4.52	3.54	8.99
3	4.92	3.56	9.13
4	4.47	3.49	9.22

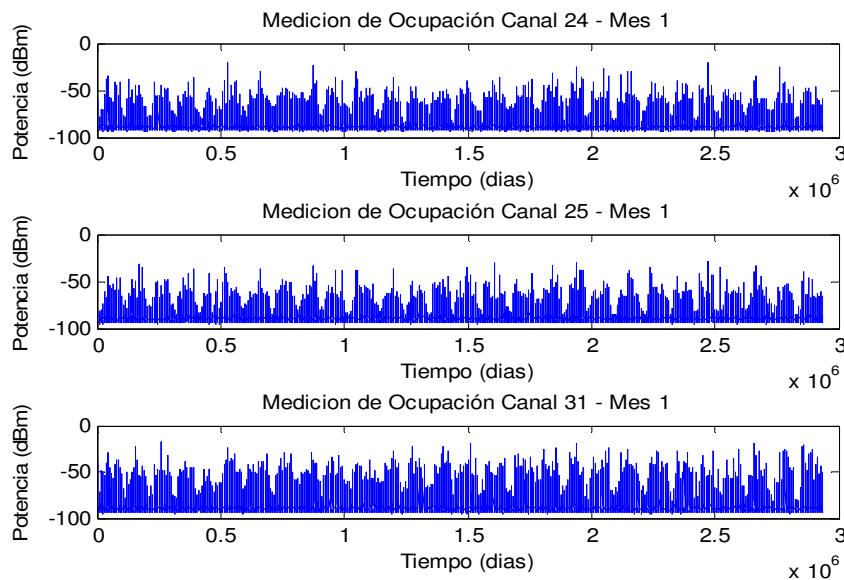


Figura 4-5: Medición de Ocupación Canales – Mes 1

En la figura 4.5 se pueden apreciar los datos de potencia en [dBm] de todos los canales durante el primer mes de medición, es posible apreciar con claridad el ciclo diario que cumple la señal, para este caso se pueden ver los 28 días correspondientes a este análisis.

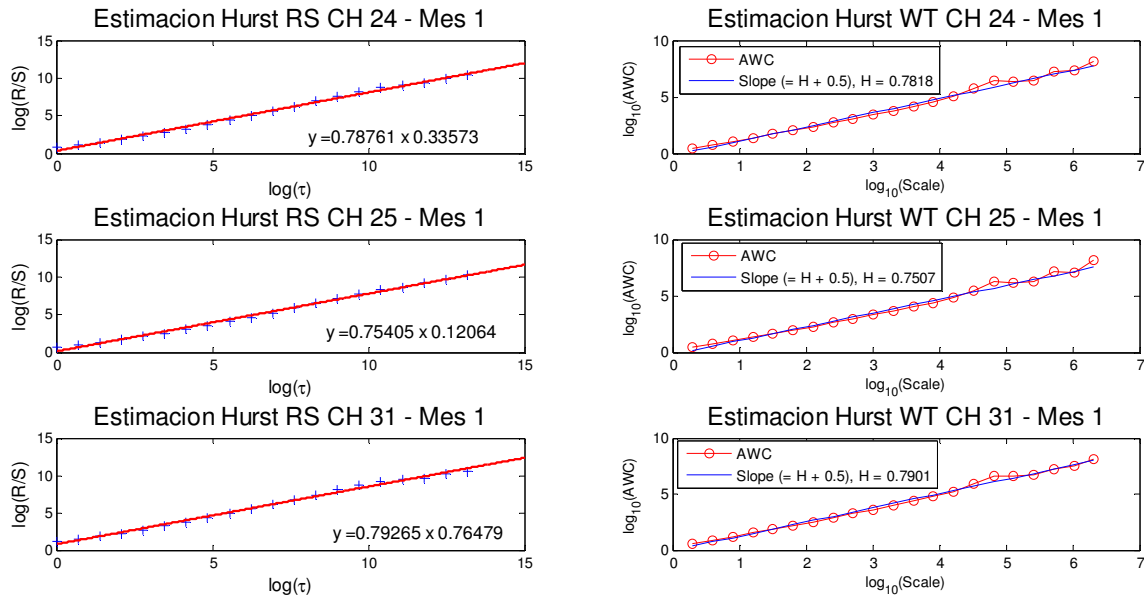


Figura 4-6: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Mes 1

En la figura 4-6 se muestra el cálculo de H para los tres canales objeto del análisis, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -13.176 [dBm] y un mínimo de -95.096 [dBm], la varianza se encuentra entre 4.61 y 10.55. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -18.5 [dBm] y un mínimo de -95.88 [dBm], la varianza se encuentra entre 3.82 y 7.59. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -16.26 [dBm] y un mínimo de -95.872 [dBm], la varianza se encuentra entre 10.02 y 20.12. En la Tabla 4-5 se relacionan los valores del parámetro H calculados para el primer mes.

Tabla 4-5: Parámetro Hurst Mes 1

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Mes 1	0.7876	0.7818	0.754	0.7507	0.7926	0.7901

El valor de H comparado entre los periodos semanales analizados previamente presenta variaciones que no superan el 1.0%, el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de autosimilitud, al igual que en el análisis semanal, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es el mayor de los tres, mientras que el que tiene H más bajo es el Canal 25.

4.2.3 Calculo Hurst por dos meses

En este punto se realiza el análisis en base a las mediciones realizadas en las primeras ocho semanas de la campaña de medición, la cual va desde el 1 de Octubre al 25 de Noviembre de 2014, en la Tabla 4-6 se relaciona la información relevante de las ocho semanas analizadas.

Tabla 4-6: Datos dos meses de medición

Semana	VARIANZA CH24	VARIANZA CH25	VARIANZA CH24
1	7.75	6.02	15.60
2	4.52	3.54	8.99
3	4.92	3.56	9.13
4	4.47	3.49	9.22
5	4.02	3.10	8.34
6	4.53	3.48	8.67
7	4.18	3.21	9.16
8	4.61	3.53	9.36

En la figura 4.7 se relacionan las gráficas del comportamiento de los canales analizados durante los dos meses de medición, es posible apreciar con claridad el ciclo diario que hace de la señal, en este caso se pueden ver los ciclos correspondientes a los 56 días de las 8 semanas de medición.

Para este periodo de tiempo, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -13.176 [dBm] y un mínimo de -95.096 [dBm], la varianza se encuentra entre 2.44 y 10.55. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -18.5 [dBm] y un mínimo de -96.124 [dBm], la varianza se encuentra entre 2.32 y 7.59. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -15.02 [dBm] y un mínimo de -95.872 [dBm], la varianza se encuentra entre 3.79 y 20.12.

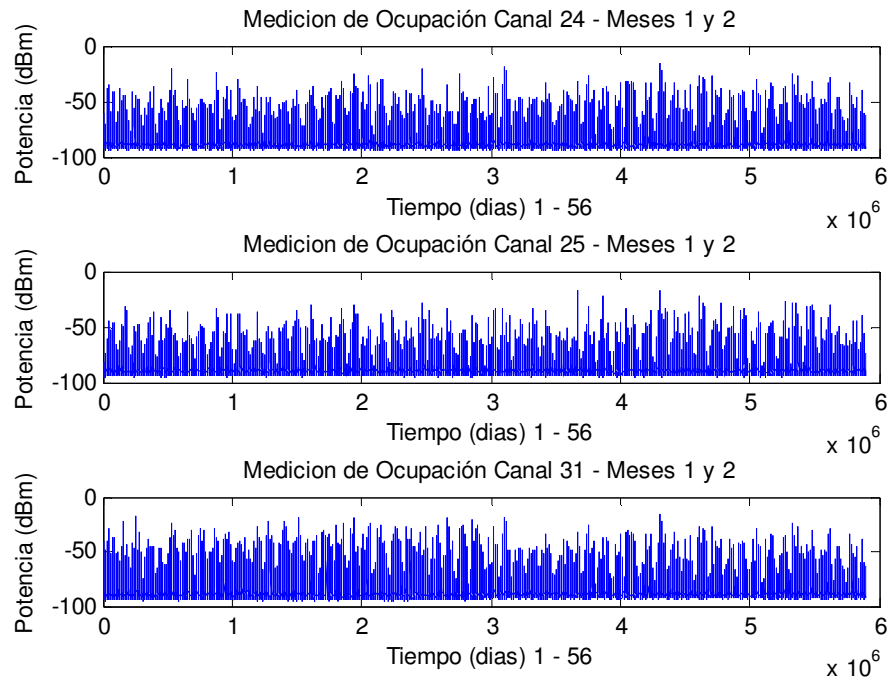


Figura 4-7: Medición de Ocupación Canales – Meses 1 y 2

En la figura 4-8 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente a los dos primeros meses de medición.

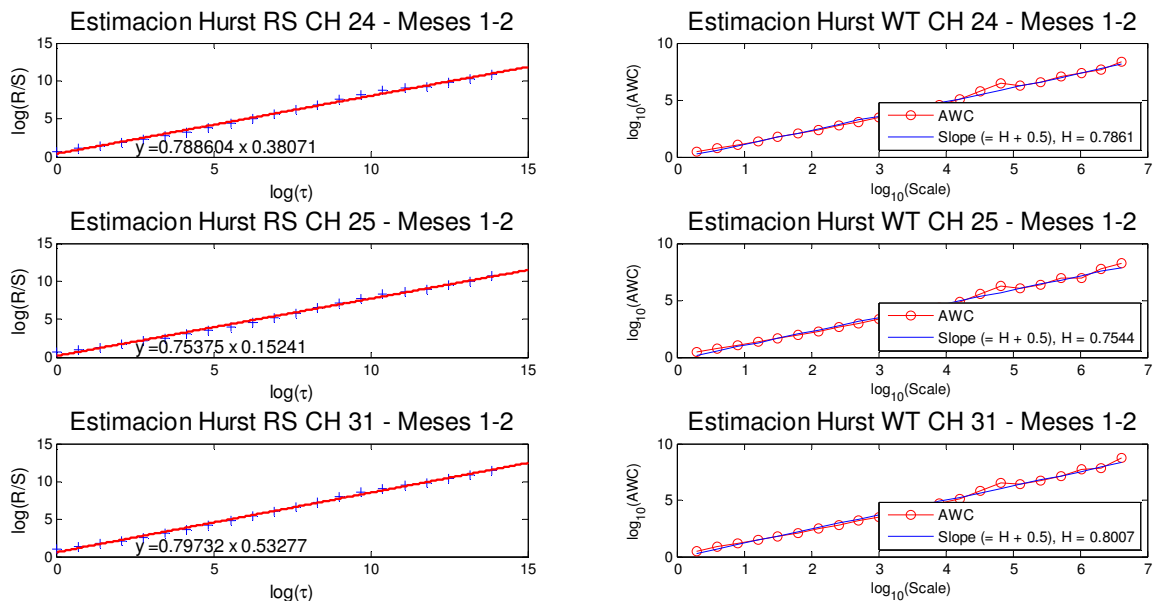


Figura 4-8: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Meses 1 y 2

En la Tabla 4-7 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los dos primeros meses de medición.

Tabla 4-7: Parámetro Hurst dos meses

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Meses 1 y 2	0.7886	0.7861	0.7537	0.7544	0.7973	0.8007

El valor de H comparado entre los periodos semanales analizados y los datos del primer mes, presenta variaciones que no superan el 0.4%, de igual forma el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud, al igual que en el análisis semanal y mensual, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es el mayor de los tres, mientras que continua con el H más bajo es el Canal 25.

4.2.4 Calculo Hurst por 6 meses

Para verificar los resultados obtenidos hasta el momento, se realiza el análisis completo de todos los datos adquiridos durante las 24 semanas de la campaña de medición, en total son 17'417.683 datos adquiridos por cada uno de los canales analizados.

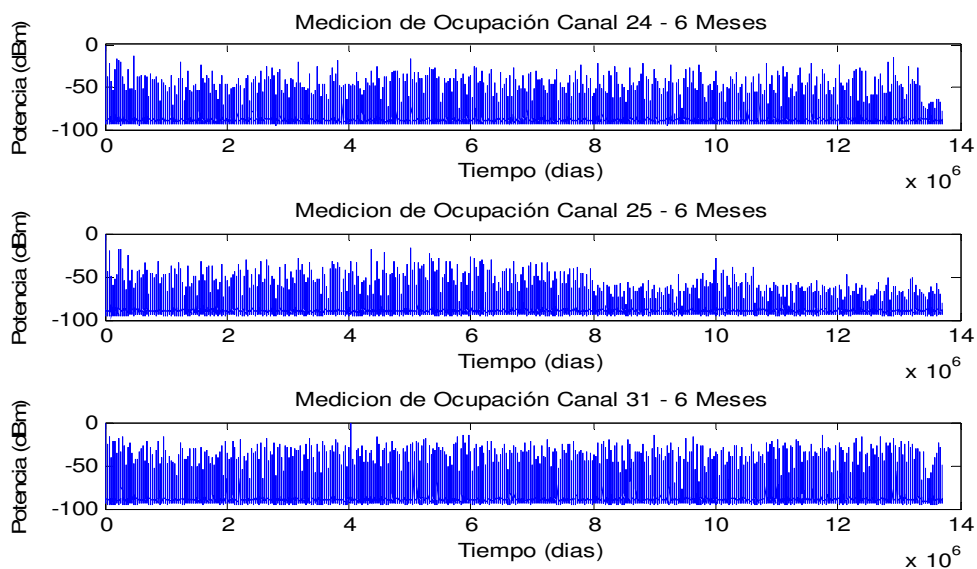


Figura 4-9: Medición de Ocupación Canales – 6 Meses

En la figura 4-9 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente a las 24 semanas que tardo la campaña de medición, realizada entre el 1 de Octubre de 2014 y el 14 de Abril de 2015.

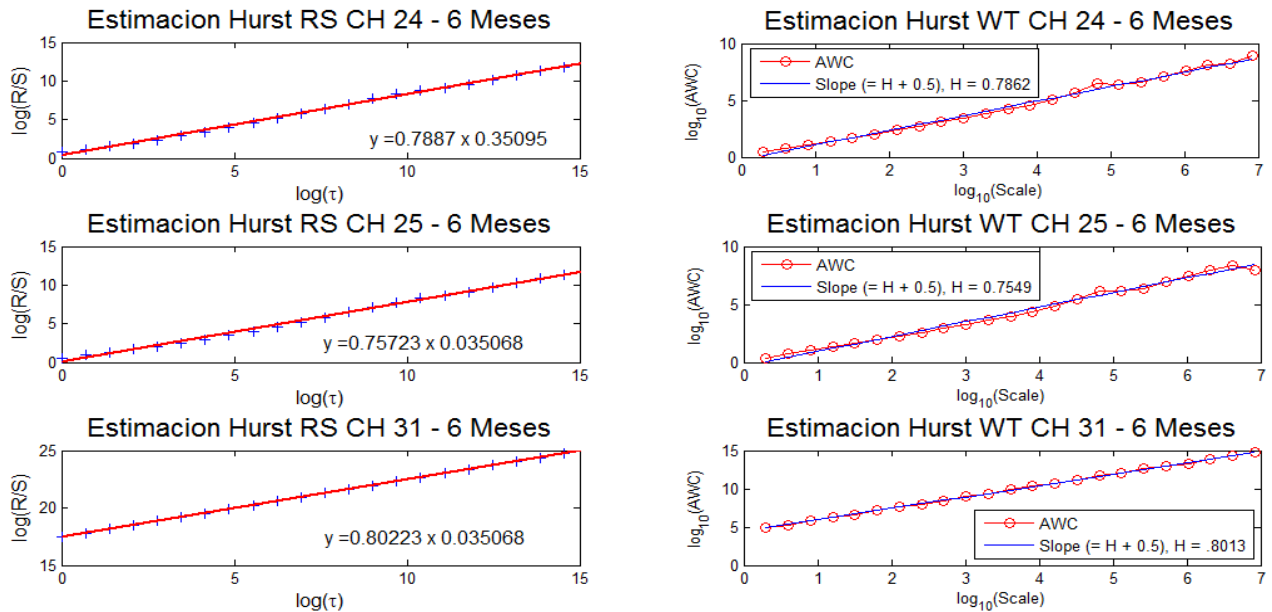


Figura 4-10: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – 6 Meses

Durante todo el periodo de medición, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -13.176 [dBm] y un mínimo de -95.396 [dBm], la varianza se encuentra entre 1.49 y 12.8. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -16.48 [dBm] y un mínimo de -96.148 [dBm], la varianza se encuentra entre 1.81 y 13.07. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -14.84 [dBm] y un mínimo de -96.98 [dBm], la varianza se encuentra entre 2.79 y 20.12.

En la Tabla 4-8 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los dos primeros meses de medición.

Tabla 4-8: Parámetro Hurst seis meses

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Seis meses	0.7887	0.7862	0.7568	0.7549	0.8022	0.8013

En este periodo se observa un leve incremento del 0.4% en el valor estimado de H, comparado entre los periodos semanales, mensuales y bimestrales analizados previamente, en todos los periodos analizados se presentan variaciones que no superan el 1%, de igual forma el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud, al igual que en el análisis semanal y mensual, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es el mayor de los tres, mientras que continua con el H más bajo es el Canal 25. Se confirma igualmente lo contemplado en la tabla 3-2 y en [44], ya que se afirma que la variación en la estimación de H por el método RS y WT tiene una variación inferior al 2.7%, más sin embargo en los datos calculados en esta investigación la variación no supera el 1%.

4.2.5 Calculo Hurst por día

Se realiza el análisis de auto-similitud por día, para realizar este análisis se calcula el valor promedio por cada uno de los días analizados, es decir que se filtran por día y se promedia el valor de las muestras recopiladas.

▪ Lunes

Para el día Lunes se tuvieron en cuenta 2'539.390 muestras para realizar el cálculo de H. En la figura 4-11 se grafican los canales, en base a la información promedio de todas las muestras recopiladas correspondiente a los días Lunes.

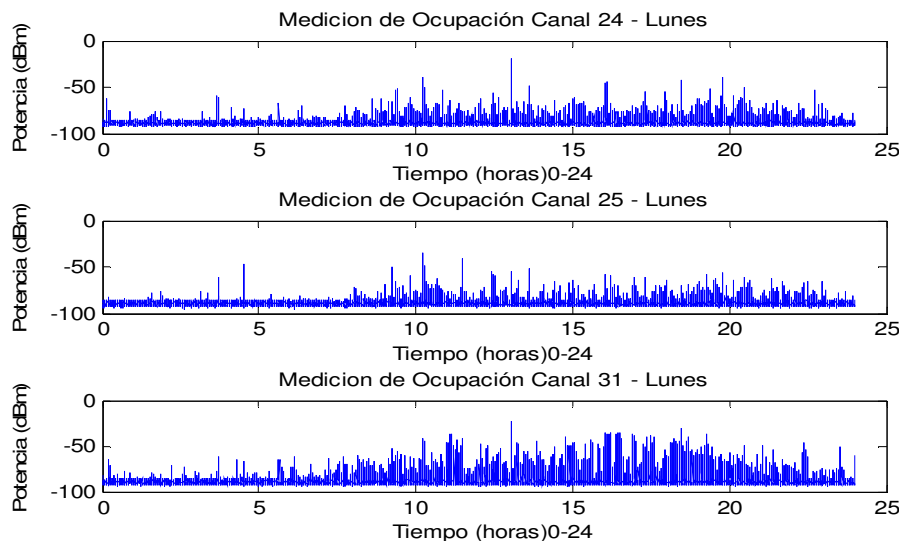


Figura 4-11: Medición de Ocupación Canales – Lunes

En la figura 4-12 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente a los días Lunes

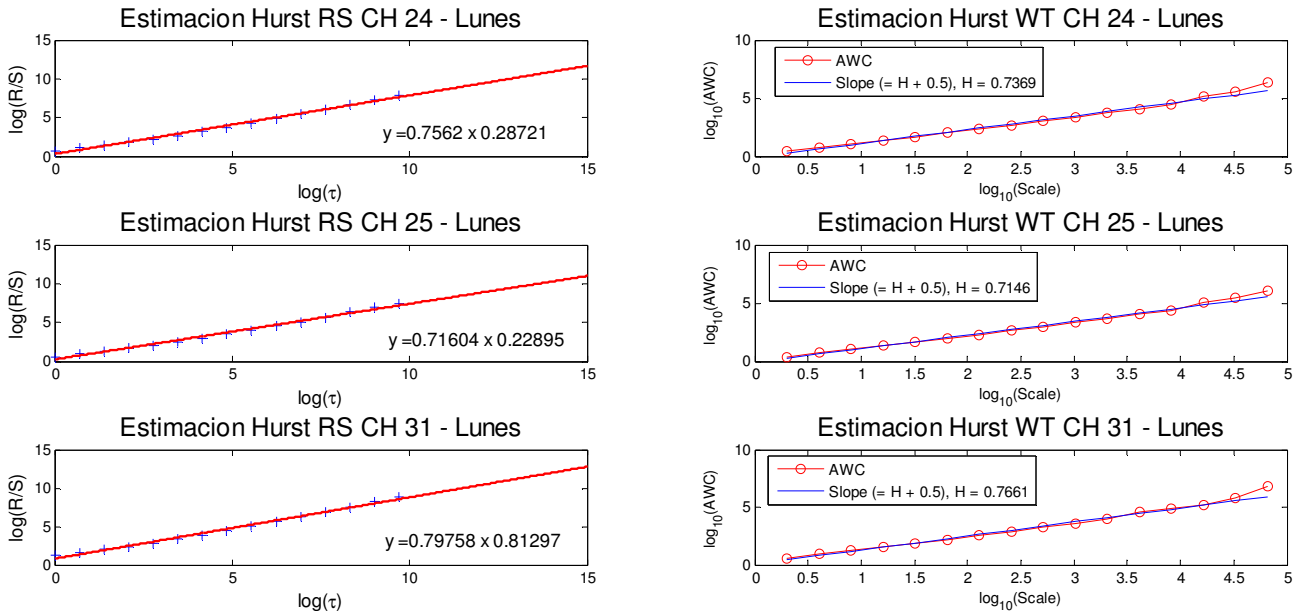


Figura 4-12: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Lunes

Para los valores promedio de los 24 días Lunes, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -15.984 [dBm] y un mínimo de -95.396 [dBm], la varianza es de 4.25. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -16.484 [dBm] y un mínimo de -96.124 [dBm], la varianza es de 3.32. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -16.04 [dBm] y un mínimo de -95.51 [dBm], la varianza es de 10.27.

En la Tabla 4-9 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los días Lunes

Tabla 4-9: Parámetro Hurst Lunes

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Lunes	0.7492	0.7369	0.716	0.7146	0.7876	0.7661

El cálculo de H para el día Lunes tiene una variación considerable con respecto a los análisis realizados previamente, de igual forma el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud, al igual

que en el análisis semanal y mensual, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es el mayor de los tres, mientras que continua con el H más bajo es el Canal 25. El Canal 24 presenta una variación del 6% con respecto al valor semanal, el Canal 25 una variación del 5.3% y el canal 31 del 4%.

▪ Martes

Para el día Martes se tuvieron en cuenta 2'480.180 muestras para realizar el cálculo de H. En la figura 4-13 se grafica el comportamiento de todos los canales durante el día Martes.

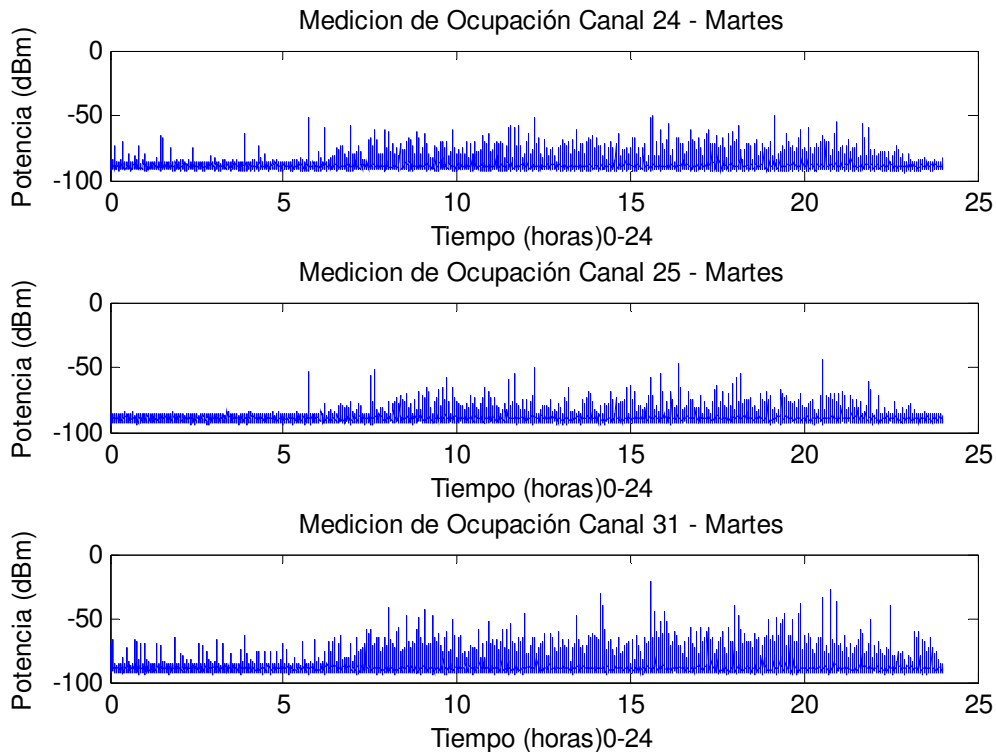


Figura 4-13: Medición de Ocupación Canales – Martes

En la figura 4-14 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente a los días Martes.

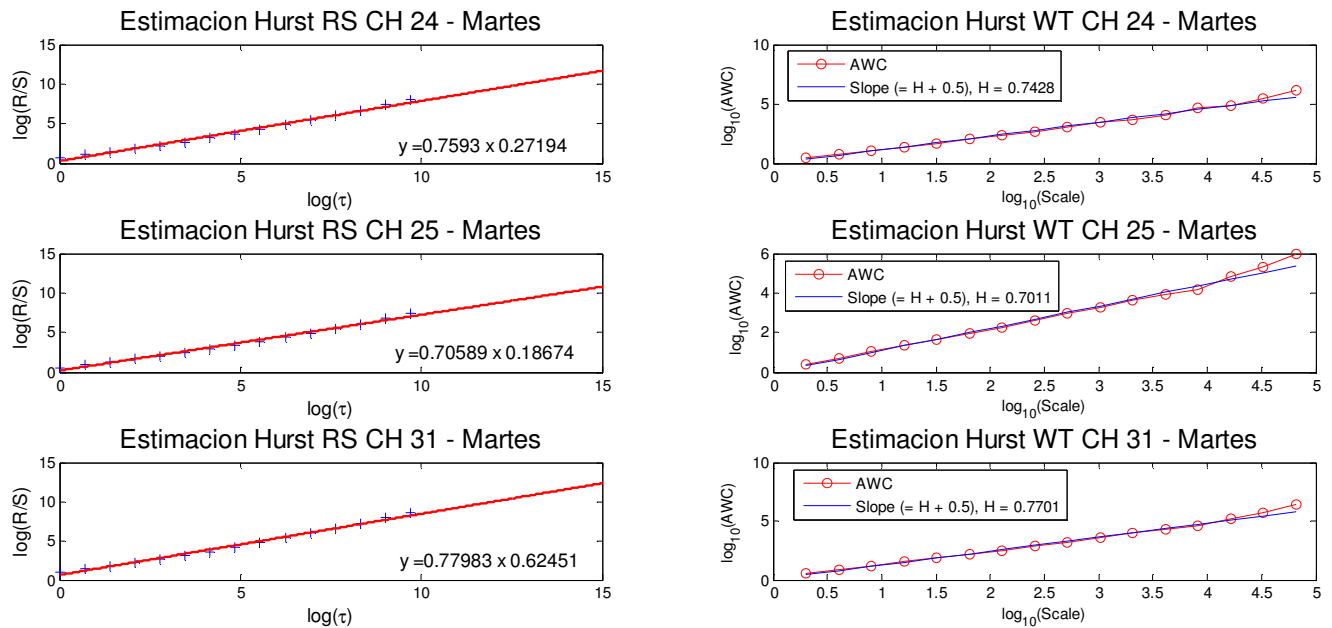


Figura 4-14: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Martes

Para los valores promedio de los 24 días Martes, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -19.692 [dBm] y un mínimo de -94.84 [dBm], la varianza es de 3.89. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -17.724 [dBm] y un mínimo de -95.608 [dBm], la varianza es de 2.89. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -15.02 [dBm] y un mínimo de -95.856 [dBm], la varianza es de 10.34.

En la Tabla 4-10 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los días Martes

Tabla 4-10: Parámetro Hurst Martes

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Martes	0.7473	0.7428	0.7159	0.7011	0.7798	0.7701

El cálculo de H para el día Martes tiene una variación considerable con respecto a los análisis realizados previamente, de igual forma el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud, al igual que en el análisis semanal y mensual, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es el mayor de los tres, mientras que continua con el H más bajo es el Canal 25. El Canal 24 presenta una variación del 5.3% con respecto al valor semanal, el Canal 25 una variación del 7% y el canal 31 del 3.5%.

▪ **Miércoles**

Para el día Miércoles se tuvieron en cuenta 2'570.190 muestras para realizar el cálculo de H. En la figura 4-15 se grafica el comportamiento de todos los canales durante el día Miércoles.

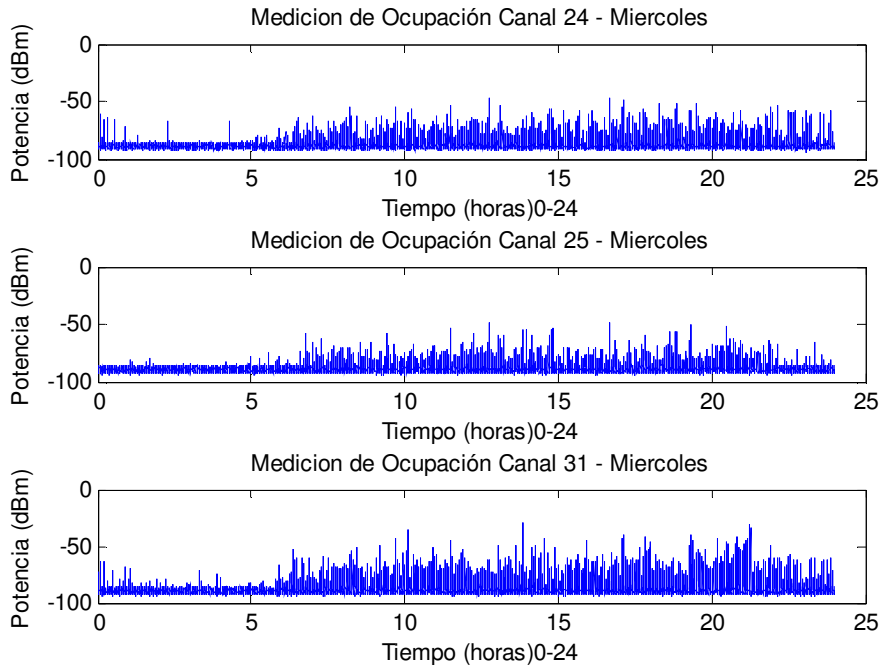


Figura 4-15: Medición de Ocupación Canales – Miércoles

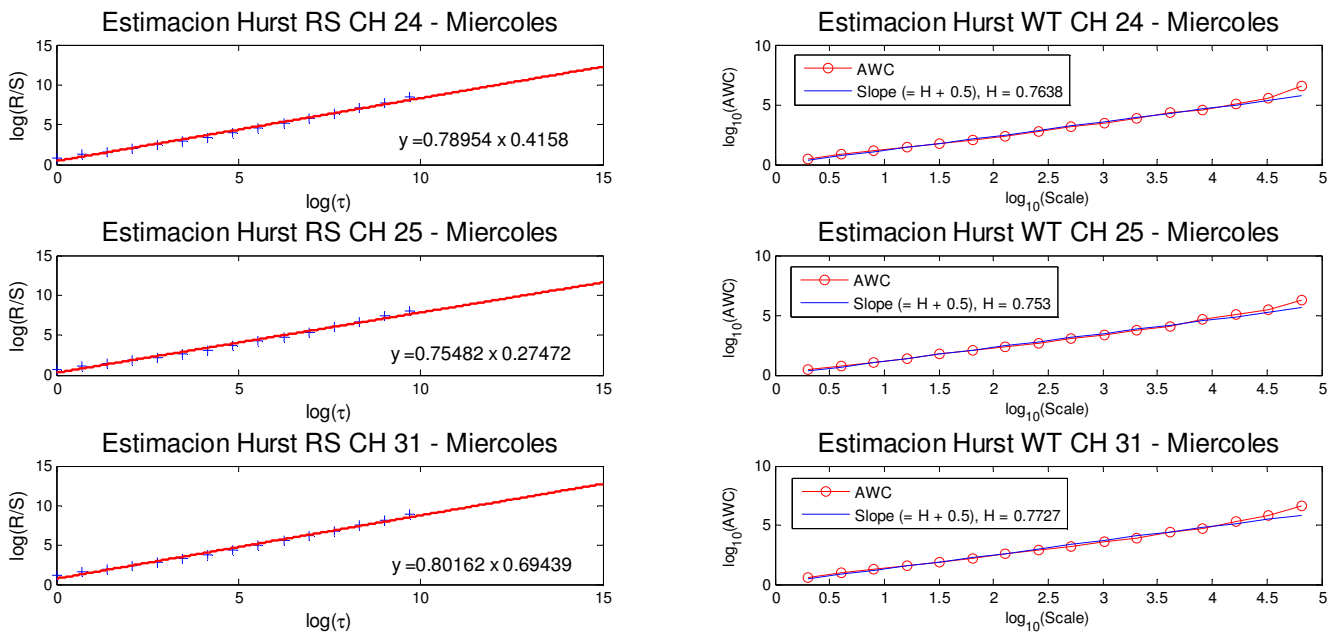


Figura 4-16: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Miércoles

En la figura 4-15 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente a los días Miércoles.

Para los valores promedio de los 24 días Miércoles, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -14.952 [dBm] y un mínimo de -94.576 [dBm], la varianza es de 4.42. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -19.18 [dBm] y un mínimo de -96.148 [dBm], la varianza es de 3.01. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -14.84 [dBm] y un mínimo de -95.736 [dBm], la varianza es de 10.91.

En la Tabla 4-10 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los días Miércoles

Tabla 4-11: Parámetro Hurst Miércoles

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Miércoles	0.7509	0.7638	0.7218	0.753	0.7816	0.7727

El cálculo de H para el día Miércoles tiene una variación considerable con respecto a los análisis realizados previamente, de igual forma el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud, al igual que en el análisis semanal y mensual, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es el mayor de los tres, mientras que continua con el H más bajo es el Canal 25. El Canal 24 presenta una variación del 2.6% con respecto al valor semanal, el Canal 25 una variación del 0.2% y el canal 31 del 3.2%.

▪ Jueves

Para el día Jueves se tuvieron en cuenta 2'495.074 muestras para realizar el cálculo de H. En la figura 4-17 se grafica el comportamiento de todos los canales durante el día Jueves.

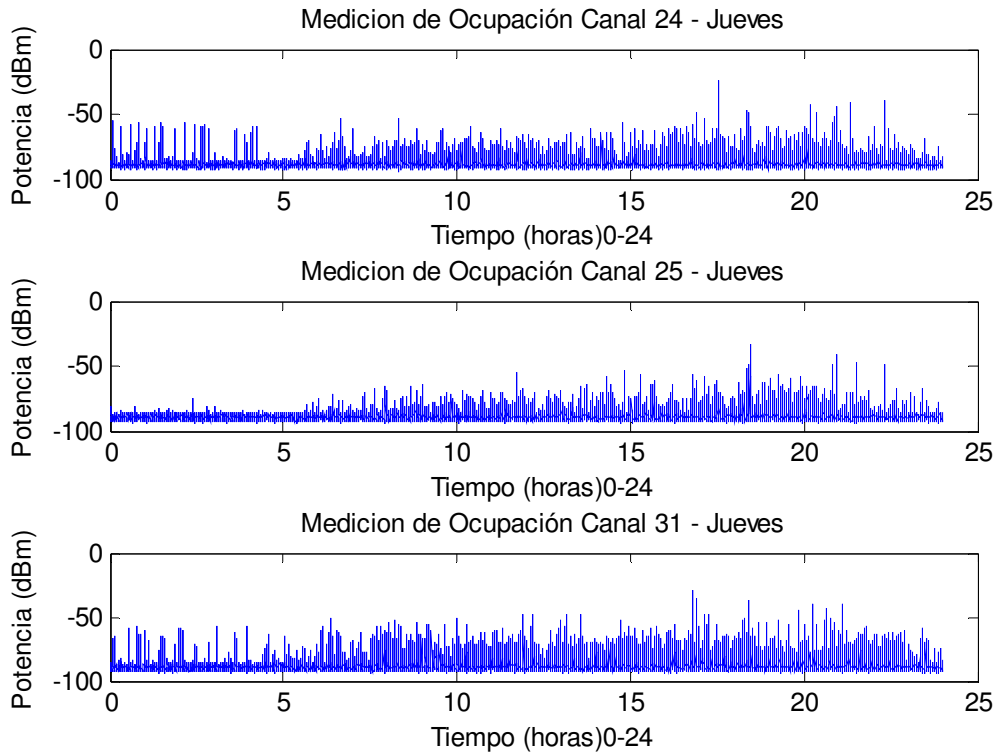


Figura 4-17: Medición de Ocupación Canales – Jueves

En la figura 4-18 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente a los días Jueves.

Para los valores promedio de los 24 días Jueves, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -17.156 [dBm] y un mínimo de -94.468 [dBm], la varianza es de 4.07. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -18.5 [dBm] y un mínimo de -95.828 [dBm], la varianza es de 2.96. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -16.29 [dBm] y un mínimo de -95.87 [dBm], la varianza es de 10.49.

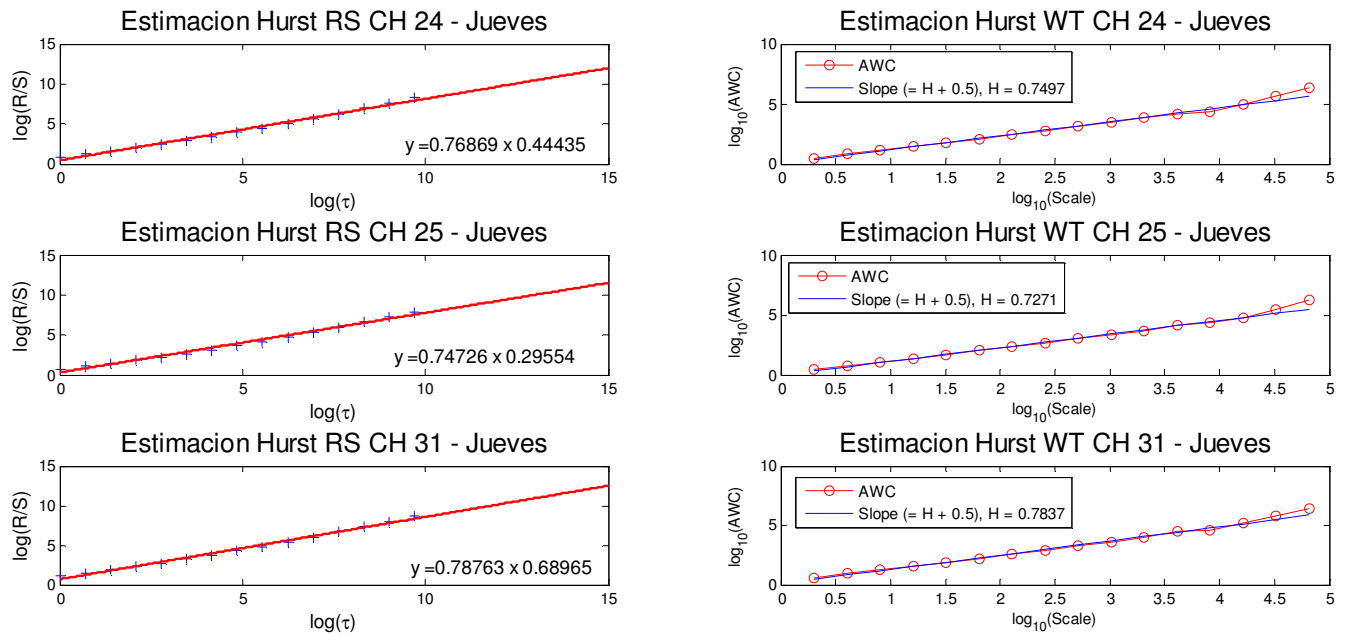


Figura 4-18: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Jueves

En la Tabla 4-12 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los días Jueves

Tabla 4-12: Parámetro Hurst Jueves

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Jueves	0.7497	0.7497	0.7202	0.7471	0.7876	0.7837

El cálculo de H para el día Jueves tiene una variación considerable con respecto a los análisis realizados previamente, de igual forma el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud, al igual que en el análisis semanal y mensual, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es el mayor de los tres, mientras que continúa con el H más bajo es el Canal 25. El Canal 24 presenta una variación del 4.4% con respecto al valor semanal, el Canal 25 una variación del 3.5% y el canal 31 del 1.8%.

▪ Viernes

Para el día Viernes se tuvieron en cuenta 2'406.322 muestras para realizar el cálculo de H. En la figura 4-19 se grafica el comportamiento de todos los canales durante el día Viernes.

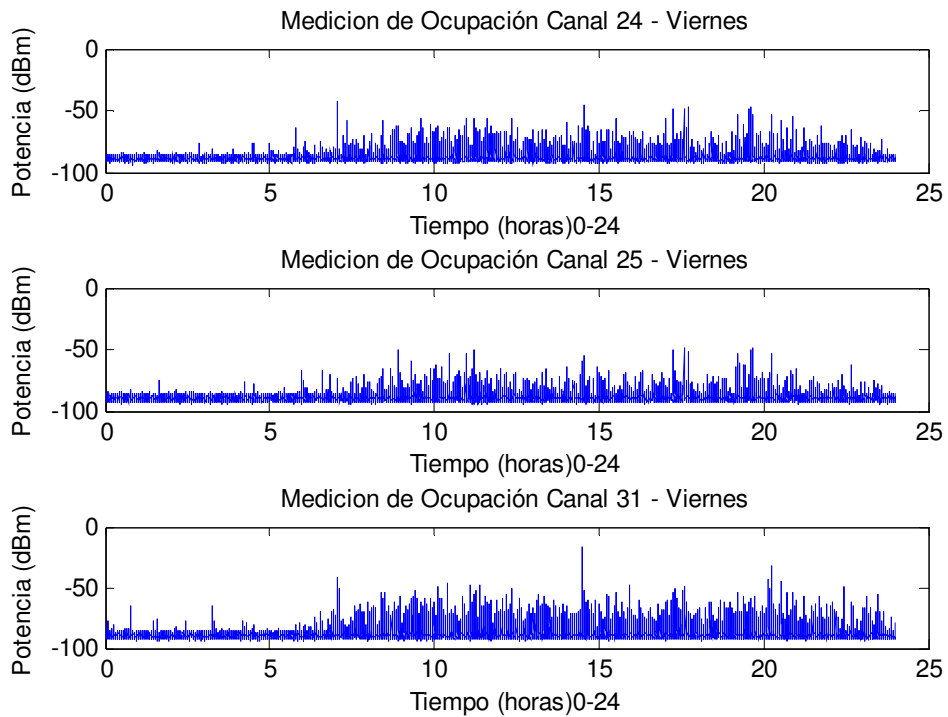


Figura 4-19: Medición de Ocupación Canales – Viernes

Para los valores promedio de los 24 días Viernes, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -19.4 [dBm] y un mínimo de -95.096 [dBm], la varianza es de 4.26. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -18.712 [dBm] y un mínimo de -95.532 [dBm], la varianza es de 2.96. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -15.33 [dBm] y un mínimo de -96.98 [dBm], la varianza es de 9.84.

En la figura 4-20 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente a los días Viernes.

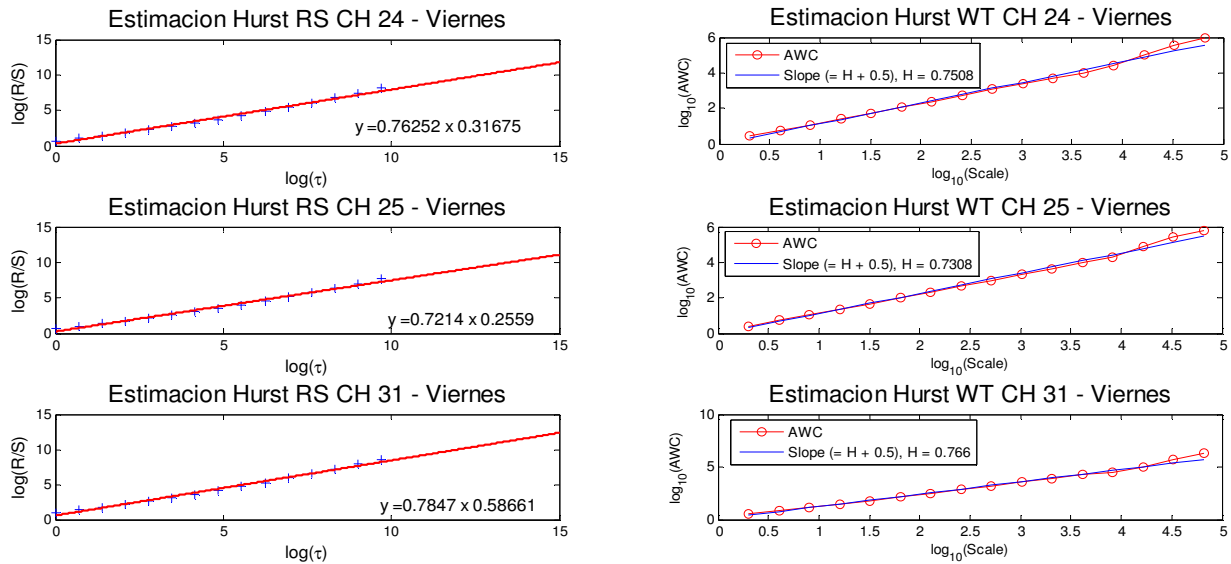


Figura 4-20: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Viernes

En la Tabla 4-13 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los días Viernes

Tabla 4-13: Parámetro Hurst Viernes

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Viernes	0.7505	0.7508	0.7204	0.7308	0.7847	0.766

El cálculo de H para el día Viernes tiene una variación considerable con respecto a los análisis realizados previamente, de igual forma el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es más cercano a uno. El Canal 24 presenta una variación del 4.2% con respecto al valor semanal, el Canal 25 una variación del 4.6% y el canal 31 del 4.0%.

▪ Sábado

Para el día Sábado se tuvieron en cuenta 2'423.800 muestras para realizar el cálculo de H. En la figura 4-21 se grafica el comportamiento de todos los canales durante el día Sábado.

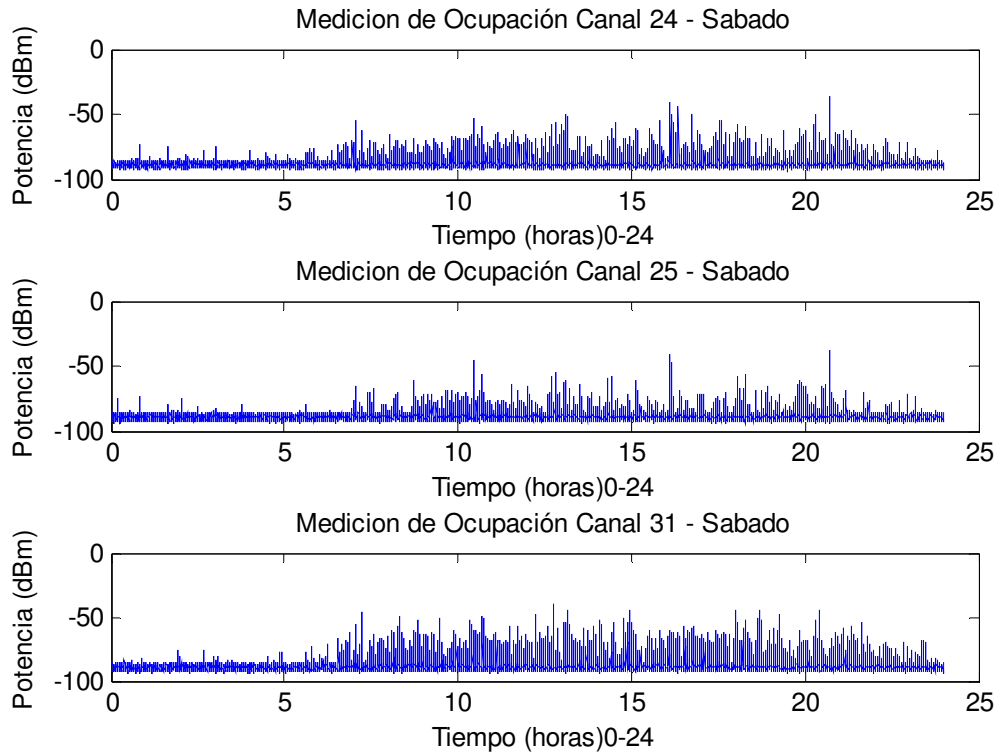


Figura 4-21: Medición de Ocupación Canales – Sábado

Para los valores promedio de los 24 días Sábado, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -25.71 [dBm] y un mínimo de -94.69 [dBm], la varianza es de 4.12. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -25.73 [dBm] y un mínimo de -95.91 [dBm], la varianza es de 2.84. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -16.43 [dBm] y un mínimo de -96.23 [dBm], la varianza es de 6.75.

En la figura 4-22 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente a los días Sábado.

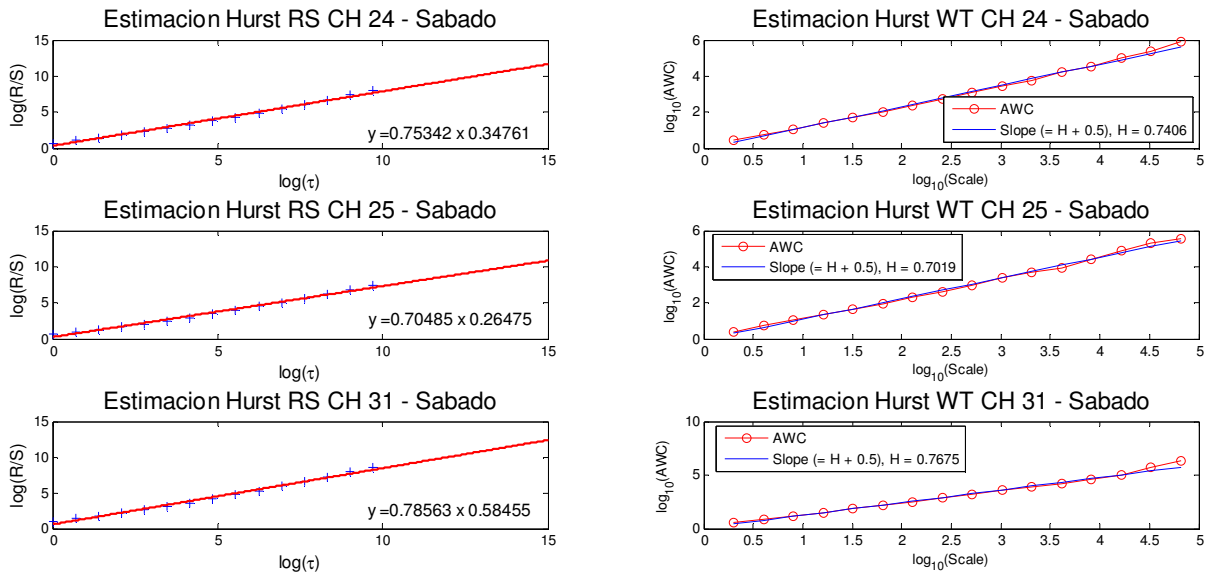


Figura 4-22: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Sábado

En la Tabla 4-14 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los días Sábado

Tabla 4-14: Parámetro Hurst Sábado

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Sábado	0.7399	0.7406	0.7048	0.7019	0.7756	0.7675

El cálculo de H para el día Sábado tiene una variación considerable con respecto a los análisis realizados previamente, de igual forma el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es más cercano a uno. El Canal 24 presenta una variación del 5.5% con respecto al valor semanal, el Canal 25 una variación del 6.9% y el canal 31 del 3.8%.

- **Domingo**

Para el día Sábado se tuvieron en cuenta 2'502.727 muestras para realizar el cálculo de H. En la figura 4-23 se grafica el comportamiento de todos los canales durante el día Domingo

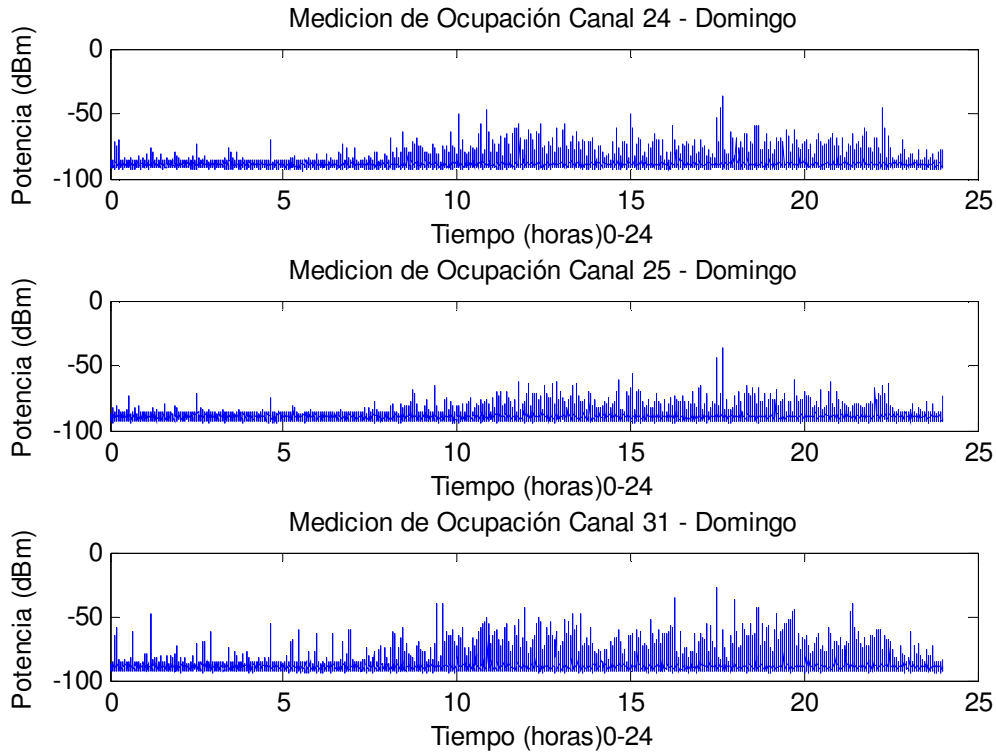


Figura 4-23: Medición de Ocupación Canales – Domingo

En el análisis realizado con los datos del día Domingo, el Canal 24 tiene un valor máximo de potencia de -13.17 [dBm] y un mínimo de -94.54 [dBm], la varianza es de 3.57. El canal 25 tiene un valor máximo de potencia de -29.74 [dBm] y un mínimo de -95.32 [dBm], la varianza es de 2.9. El canal 31 tiene un valor máximo de potencia de -16.04 [dBm] y un mínimo de -95.69 [dBm], la varianza es de 7.28.

En la figura 4-24 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente a los días Domingo.

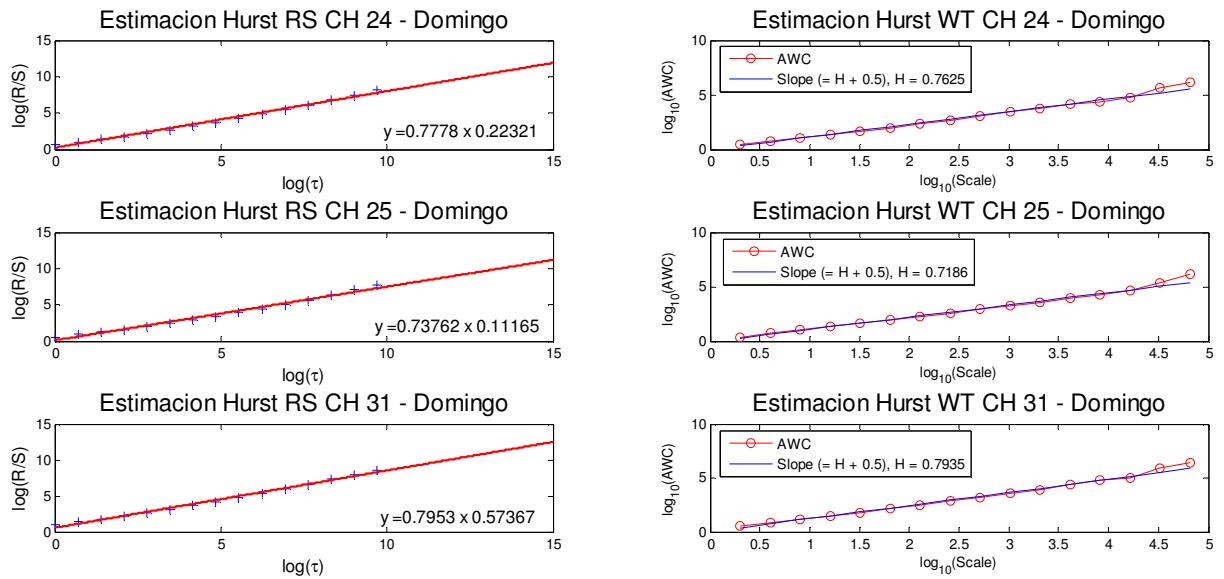


Figura 4-24: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Domingo

En la Tabla 4-15 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los días Domingo

Tabla 4-15: Parámetro Hurst Domingo

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Domingo	0.7628	0.7625	0.7376	0.7186	0.7953	0.7935

El cálculo de H para el día Domingo tiene una variación considerable con respecto a los análisis realizados previamente, de igual forma el valor de H en todos los canales es mayor a 0.5, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud, el Canal 31 tiene una mejor probabilidad de pronóstico dado que su valor de H es más cercano a uno. El Canal 24 presenta una variación del 2.8% con respecto al valor semanal, el Canal 25 una variación del 4.6% y el canal 31 del 0.6%.

4.2.6 Resultados cálculo de Hurst

El cálculo del parámetro H en todos los periodos analizados en la sección anterior permiten ver con claridad que los canales 24, 25 y 31 tienen características propias de acuerdo a su nivel de ocupación, es así como el canal 24 siendo el que tiene un ciclo de trabajo mayor, igualmente tiene un factor de auto-similitud alto > 0.5 , es el segundo de los tres analizados, lo que le permite tener una alta probabilidad de pronóstico.

Por su parte el Canal 25 es el que tiene un menor ciclo de trabajo e igualmente su valor de H es el menor de los tres, pero igualmente mayor a 0.5. Finalmente, el Canal 31 tiene una ocupación media y el mayor valor de H, lo que lo identifica como el canal con la mejor probabilidad de pronóstico.

Después de calcular el parámetro H para diferentes periodos de tiempo se puede concluir que en todos los canales no representa una variación significativa hacer pronósticos de ocupación con periodos de tiempo mayores a una semana, de hecho en la presente investigación se verificó que el parámetro H no varía más allá de 1% si el pronóstico se hace con una serie de tiempo de seis meses o de una semana.

El comportamiento de los canales varía de acuerdo al día que se esté analizando, en base al análisis realizado se evidencia que desde el Lunes hasta el viernes los canales exhiben un comportamiento similar, pero el día sábado y domingo cada uno tiene características diferenciales.

Se realiza entonces el cálculo de H para un periodo de Lunes a Viernes, como una forma de obtener un valor confiable se decide utilizar todos los datos de potencias correspondientes a los días de Lunes a Viernes durante toda la campaña de medición, en total se utilizan los datos de 120 días equivalentes a 12'491.156 muestras por canal para realizar este análisis.

En la figura 4-25 se muestran los resultados de la estimación del parámetro de Hurst usando los Métodos RS y WT para los valores de las series de tiempo correspondiente al valor las potencias de los días desde el Lunes hasta el Viernes durante toda la campaña de medición.

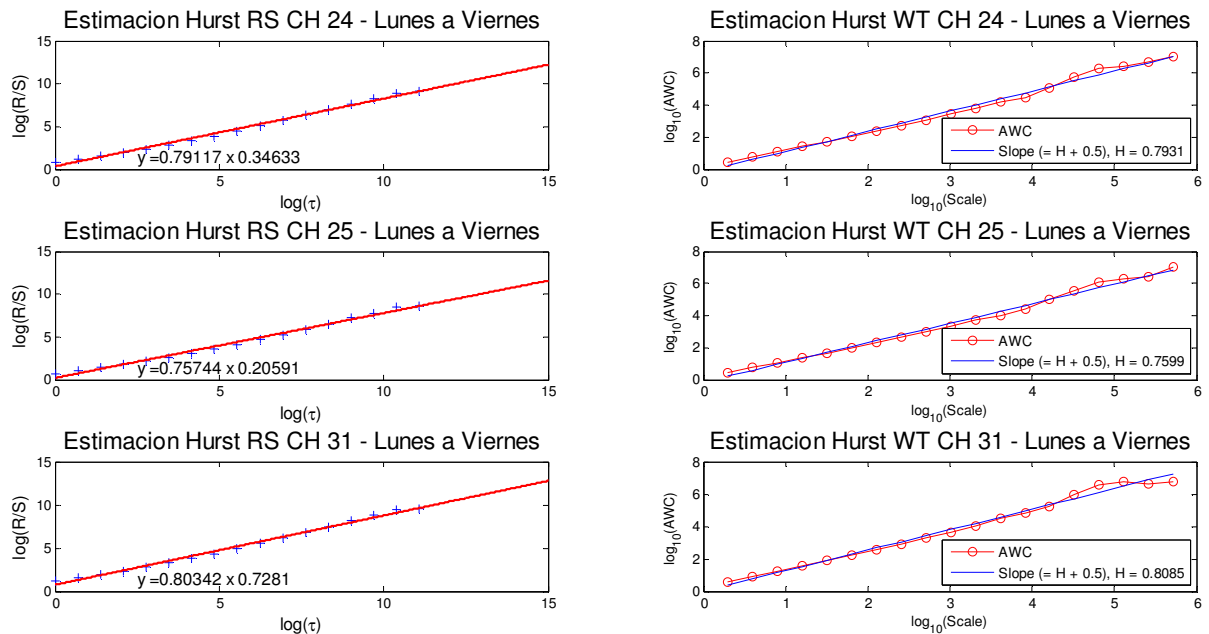


Figura 4-25: Estimación Hurst método RS – WT canales 24, 25, 31 – Lunes a Viernes durante las 24 semanas

En la Tabla 4-16 se relacionan los valores del parámetro H calculados para los días del lunes al viernes durante las 24 semanas de medición.

Tabla 4-16: Parámetro Hurst Lunes a Viernes

Periodo	Hurst RS - CH 24	Hurst WT - CH 24	Hurst RS - CH 25	Hurst WT - CH 25	Hurst RS - CH 31	Hurst WT - CH 31
Semana 1 a 24 (L-V)	0.7909	0.7931	0.7571	0.7599	0.8034	0.8085

Este cálculo se realizó en base a las mediciones diarias durante todos los 24 días de Lunes a Viernes de la campaña de medición, es decir que para cada día se 104.093 muestras por canal, para calcular el comportamiento de los tres canales durante los 120 días de Lunes a Viernes se utilizaron un total de 37'473.478 muestras, lo cual implicó un tiempo de procesamiento de 152 horas.

Los resultados obtenidos, permiten ver un valor de H mayor a 0.5 en todos los canales, lo que quiere decir que los tres canales tienen un alto grado de auto-similitud.

Adicionalmente se pudo constatar que en ninguno de los canales se presentó una variación mayor al 1.3% respecto a los valores de H estimados en los periodos semanal y mensual,

lo que permite inferir que los resultados son consistentes y que aumentar la duración de la campaña de medición, no supone por sí mismo un aumento considerable en el valor de H, tal como se puede constatar en la tabla 4-17.

Tabla 4-17: Parámetro Hurst calculado por periodos de tiempo y su variación respecto a los valores obtenidos en la semana 1 de medición

No.	Periodo	DIAS	H_CH 24	% VARIACION H CH 24	H_CH 25	% VARIACION H CH 25	H_CH 31	% VARIACION H CH 31
1	Semana 1 (L-D)	7	0.7888		0.7561		0.8001	
2	Semana 2 (L-D)	7	0.7883	-0.06%	0.7547	-0.19%	0.7987	-0.17%
3	Semana 1 a 4 (L-D)	28	0.7876	-0.15%	0.754	-0.28%	0.7926	-0.94%
4	Semana 1 a 8 (L-D)	56	0.7886	-0.03%	0.7537	-0.32%	0.7973	-0.35%
5	Semana 1 a 24 (L-D)	168	0.7887	-0.01%	0.7568	0.09%	0.8022	0.26%

Para el caso del análisis en el periodo de Lunes a Viernes durante las 24 semanas que se relaciona en fila No. 6 de la tabla 4-17, se presenta una situación diferente a los análisis que se realizaron con diferentes periodos de tiempo, en este caso los valor estimados de H aumentaron hasta un 1.3%, en el Canal 24 se presenta un aumento del 1.1% con respecto al valor semanal de Lunes a Domingo que se relacionan en la Fila No. 1, el Canal 25 un aumento del 0.8% y en el canal 31 un aumento del 1.3%, lo que indica que si se omiten los datos del sábado y domingo la probabilidad de pronóstico de cada canal aumenta.

Adicionalmente se realizó la estimación de H para la primera semana de medición teniendo en cuenta únicamente los datos de las mediciones recopiladas de Lunes a Viernes, en este caso se utilizaron un total de 1'561.394 muestras para los tres canales, lo cual implicó un tiempo de procesamiento de 6.3 horas. Los resultados obtenidos en este caso se relacionan en la Fila No. 7 de la tabla 4-17 y permiten concluir que los resultados para el cálculo de H son los mismos para una semana de Lunes a Viernes que los obtenidos al

recopilar mediciones durante 24 semanas de Lunes a Viernes, puesto que la variación en la estimación de H no supera el 0.34%, en el Canal 24 la variación es del 0.13%, en el Canal 25 es del 0.31% y en el Canal 31 del 0.34%.

Esto permite concluir que realizar análisis de ocupación en redes GSM durante periodos cortos de medición, garantiza resultados confiables y que permiten contribuir al desarrollo de las Redes CR puesto que su crecimiento demanda resultados en tiempos cortos que permitan tomar decisiones y buscar alternativas para su desarrollo e implementación.

Tabla 4-18: Parámetro Hurst calculado por día y su variación respecto a los valores obtenidos en la semana 1 de medición

No.	Periodo	DIAS	H - CH 24	% VARIACION H CH 24	H - CH 25	% VARIACION H CH 25	H - CH 31	% VARIACION H CH 31
1	Semana 1 (L-D)	7	0.7888		0.7561		0.8001	
3	Lunes	1	0.7492	-5.26%	0.716	-5.18%	0.7876	-1.88%
4	Martes	1	0.7473	-5.50%	0.7159	-5.42%	0.7798	-2.85%
5	Miércoles	1	0.7509	-5.05%	0.7218	-4.64%	0.7816	-2.63%
6	Jueves	1	0.7497	-5.20%	0.7202	-4.85%	0.7876	-1.88%
7	Viernes	1	0.7505	-5.10%	0.7204	-4.82%	0.7847	-2.24%
8	Sábado	1	0.7399	-6.44%	0.7048	-6.86%	0.7756	-3.38%
9	Domingo	1	0.7628	-3.54%	0.7376	-4.64%	0.7953	-0.58%

En la tabla 4-18 se relacionan los valores obtenidos de H para cada uno de los días de la semana, los valores diarios se calcularon en base a 104.093 muestras por canal, se evidencia que cuando se realiza el calculo diario de H, los valores respecto a la Semana 1 disminuyen hasta un 6.86%, cada día y cada canal tienen variaciones en diferentes proporciones. Los valores de H obtenidos para cada canal en todos los casos fueron mayores a 0.5, lo que permite inferir que tienen LRD, es decir que tiene un comportamiento auto-similar y por tanto una alta probabilidad de pronóstico, aunque su probabilidad disminuye comparado con la de un periodo semanal de Lunes a Viernes.

Tabla 4-19: Parámetro Hurst calculado por periodos de tiempo y su variación respecto a los valores obtenidos en la semana 1 de medición únicamente de Lunes a Viernes

Periodo	DIAS	H - CH 24	% VARIAC H_CH24	H - CH 25	% VARIAC H_CH25	H - CH 31	% VARIAC H_CH31
Semana 1 (L-V)	5	0.7908		0.7569		0.8027	
Semana 1 a 24 (L-V)	120	0.7909	0.01%	0.7571	0.03%	0.803	0.04%
Semana 1 (L-D)	7	0.7888	-0.25%	0.7561	-0.11%	0.8001	-0.32%
Semana 2 (L-D)	7	0.7883	-0.32%	0.7547	-0.29%	0.7987	-0.50%
Semana 1 a 4 (L-D)	28	0.7876	-0.40%	0.754	-0.38%	0.7926	-1.26%
Semana 1 a 8 (L-D)	56	0.7886	-0.28%	0.7537	-0.42%	0.7973	-0.67%
Semana 1 a 24 (L-D)	168	0.7887	-0.27%	0.7568	-0.01%	0.8022	-0.06%

En base a los resultados relacionados en la tabla 4-19 se puede concluir que lo más adecuado es realizar campañas de medición por periodos de una semana teniendo en cuenta únicamente los datos recopilados de Lunes a Viernes, el valor de H calculado para la semana 1 de L-V es mayor que el obtenido en los demás periodos de tiempo analizados.

En la Figura 4-26 se plasma el comportamiento del valor de H para cada uno de los periodos de tiempo analizados. El mayor valor de H se presenta en el periodo de la Semana 1 L-V y en el periodo de Seis meses L-V, el valor de H disminuye para los periodos en los cuales se tienen en cuenta los datos de Lunes a Domingo, y se presenta una disminución de H aún mayor en el periodo diario.

El comportamiento del valor de H durante los días Sábado y Domingo es diferente a los días de Lunes a Viernes, los cuales exhiben un comportamiento similar.

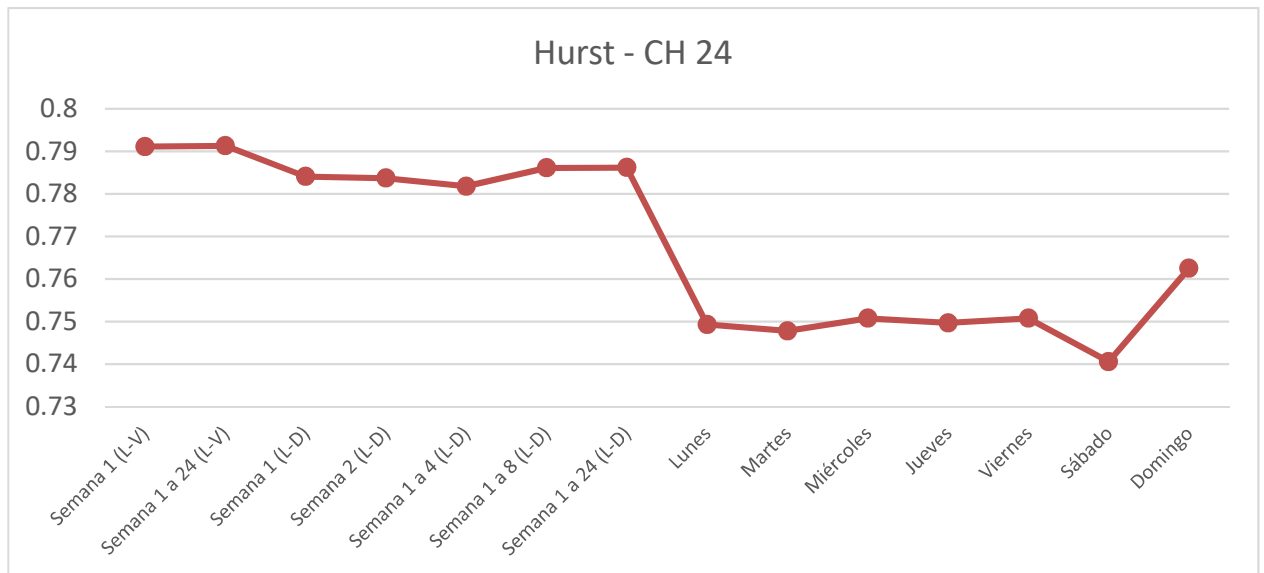


Figura 4-26: Estimación Hurst canal 24, para diferentes periodos de tiempo

La Figura 4-27 permite ver con claridad que los valores de H calculados para periodos mayores a una semana tienen una probabilidad de pronóstico mucho mayor que el obtenido cuando se hace un análisis diario. En particular para los días de Lunes a Viernes el valor de H disminuye hasta un 7% con respecto a los periodos mayores a una semana, lo que indica que se presentan variaciones significativas en el comportamiento del tráfico de red durante estos días y los cuales varían sustancialmente durante los días Sábado y Domingo.

En el análisis realizado se calculó la variación de H para cada uno de los periodos analizados y utilizando los métodos RS y WT, en el cual se puede apreciar que para los periodos de la Semana 1 a 24 (L-V) se presenta un incremento en el valor de H del 1.15% respecto al valor de la Semana 1 (L-D), y en el periodo de Semana 1 (L-V) incrementa 1.02%, en los demás periodos el incremento no supera el 0.4%. En los días Lunes a Domingo se presenta una disminución sustancial en la probabilidad de pronóstico, como se vio en la tabla 4-18.

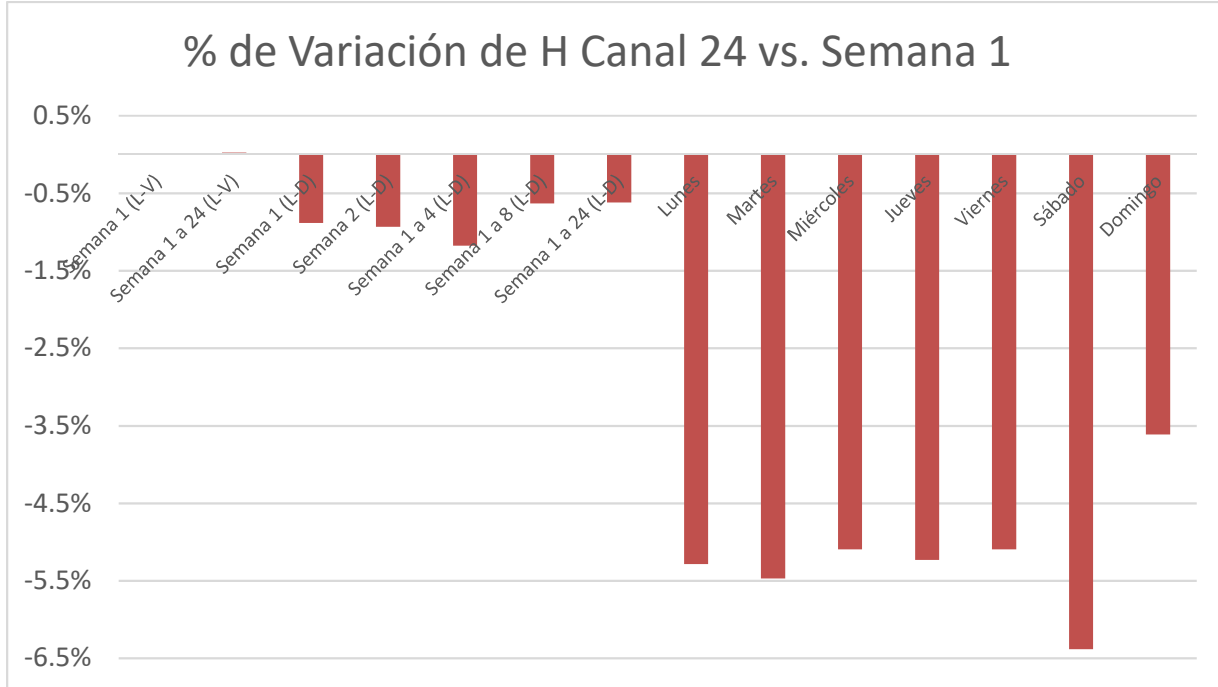


Figura 4-27: Variación Hurst en % canal 24, para diferentes periodos de tiempo comparado con la semana 1 de medición

La variación del valor de H calculado respecto a la Semana 1 de L-V disminuye hasta en más del 5% para los periodos diarios de Lunes a Viernes, el día Sábado disminuye un 6.3% y el día Domingo 3.7%, en todos los casos se presenta disminución en el valor de H calculado. Para periodos mayores a una semana de Lunes a Domingo se presenta una disminución en el valor de H aunque en menor proporción que cuando se realiza el análisis diario.

El periodo semanal de Lunes a Viernes arroja la mejor estimación del valor de H de acuerdo a los resultados de la campaña de medición, en caso de requerir un pronóstico del día Sábado y Domingo este debe ser realizado por separado.

5. Análisis estadístico para las mediciones de la red GSM

El ciclo de trabajo se calcula por diferentes espacios de tiempo de forma que fuese posible evidenciar la tendencia presente en las mediciones y su comportamiento en el tiempo,

5.1 Umbral de decisión

El nivel de decisión (λ) para el enlace ascendente de la banda GSM850, el cual va de 824 a 849 MHz, se calculó a partir de (4), se contempló una Probabilidad de Falsa Alarma (P_{fa}) del 1% [59, 60]

$$P_{fa} = \frac{\Gamma(m, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(m)} \quad (4)$$

Donde, $\Gamma(\cdot)$ es la función gamma completa y $\Gamma(\cdot, \cdot)$ la función gamma incompleta, m es el producto del tiempo por el ancho de banda [41].

Con este porcentaje, tal como se indica en [60] la baja P_{fa} generará una mejor posibilidad para la transmisión de usuario de CR.

En base a la P_{fa} establecida, se obtiene un umbral (λ) de -89 dBm, con este valor se calcula el ciclo de trabajo de los tres canales con los que se realiza la investigación.

5.2 Ocupación Espectral Instantánea

Existen diferentes métodos para determinar si una banda frecuencial se encuentra o no ocupada por el PU. La elección del método a utilizar depende de cuanta información se dispone de la señal transmitida por el usuario principal. En el caso más genérico de redes cognitivas no se dispone previamente de dicha información, por esta razón el único dato que se puede utilizar son las medidas de potencia. De este modo, en el caso más general

tan sólo resta un método de detección posible, la “*detección de energía*”, que gracias a su simplicidad resultaría sencillo de implementar en futuros dispositivos de CRN. Este método de detección es el empleado en esta investigación. La detección de energía compara la potencia de la señal recibida en cada uno de los canales seleccionados (CH 24, 25 y 31) con un umbral de decisión (λ) predefinido en este caso en -89 dBm. Si está por encima de este valor se declara la frecuencia como ocupada y si está por debajo el canal se relaciona como libre [61].

5.3 Ciclos de Trabajo

El ciclo de trabajo se calcula para cada uno de los tres canales 24, 25 y 31, representa la fracción de tiempo que se considera cada frecuencia como ocupada. Se calcula como el cociente entre el número de muestras de la densidad espectral de potencia (DEP) correspondientes a canales ocupados en los cuales su valor está por encima del umbral de decisión (λ) y el número total de muestras de la DEP capturadas durante el periodo de medida. Debido a que los canales seleccionados (CH 24, 25 y 31) están conformados por varios puntos de frecuencia, se determinó la ocupación en cada uno de los puntos medidos por el AE y se tomó el mayor valor de DEP de los puntos que conforman cada uno de los canales [41].

En base al punto (pps) con el mayor valor de DEP correspondiente a cada canal, se determinó la ocupación instantánea del canal tomando como referencia el umbral de decisión (λ) previamente establecido. Posteriormente se calculó el ciclo de trabajo a partir de (5).

$$\text{Ciclo de Trabajo} = \frac{\# \text{ Muestras por encima del umbral}}{\# \text{ Muestras Totales}} * 100 \quad (5)$$

En caso de que se requiera calcular el ciclo de trabajo medio de una banda de frecuencia, se promedian los ciclos de trabajo de todas las frecuencias que hacen parte de la banda en cuestión [61].

5.4 Análisis de Ocupación en redes inalámbricas

Para el análisis de ocupación, es fundamental tener en cuenta los diversos componentes de una serie temporal, como es el caso del objeto de estudio del proyecto. Una serie temporal tiene cuatro componentes principales, y en estos debemos centrar el estudio,

- Componente de Tendencia
- Componente Cíclico
- Componente Estacional
- Componente Aleatorio

Este último componente es el que más afecta los resultados del análisis, dado que producen variaciones en la medición por efectos ajenos al comportamiento propio de la red o al uso propio del espectro. Por eso es fundamental hacer un seguimiento detallado de estos efectos y establecer un nivel de umbral para desechar señales que le puedan introducir ruido a la red. [62]

El análisis de series de tiempo permite manejar la incertidumbre asociada con los acontecimientos futuros, predecir su comportamiento y medir la precisión de los pronósticos realizados, cuando la serie es estacionaria su comportamiento desde el origen y hasta la media no varían a través del tiempo.

Para hacer una descomposición clásica de las series de tiempo obtenidas del comportamiento de los canales 24, 25 y 31, es necesario ver en detalle los componentes en los cuales se puede desagregar cada una de las series,

5.4.1 Componente de Tendencia

La presencia de tendencia en la serie de tiempo indica que esta contiene un componente de largo plazo que representa el crecimiento o declinación de la serie en un largo periodo de tiempo [63].

Cuando se grafica la serie objeto del análisis es necesario determinar la tendencia y el nivel, en función del periodo de tiempo que se grafica

5.4.2 Componente Cíclico

El componente cíclico se presenta como una fluctuación en forma de onda alrededor de la tendencia, este componente tiende a repetirse en el tiempo sobre la serie, no tiene un comportamiento estable, por lo tanto, no es posible establecer un modelo para su seguimiento [64].

5.4.3 Componente Estacional

Una serie de tiempo contiene un componente estacional cuando es posible detectar un patrón que se repite cada cierto periodo de tiempo, a partir de este componente se puede desarrollar una técnica de pronóstico estacional aplicando funciones aritméticas en base a los índices estacionales obtenidos a partir de la historia de la serie [63].

5.4.4 Componente Aleatorio

Hace referencia al factor residual de la serie de tiempo, toma en consideración las desviaciones de los valores reales en comparación con los esperados.

5.5 Análisis estadístico de los canales durante los seis meses

La presencia de Autocorrelación se refiere al valor constante en el tiempo con respecto al cual se miden las diferencias entre los componentes de la serie que están separados por un intervalo definido. No todas las series son estacionarias, pueden presentar tendencias marcadas y una dispersión creciente.

Para determinar si la serie es estacionaria o no, es necesario observar el gráfico de dispersión de la serie original y los correlogramas simples [63].

En la figura 5-2 y 5-1 se puede ver el comportamiento de los Canales 24, 25 y 31 durante las 24 semanas que duró la campaña de medición, en base a estas mediciones es posible concluir que las señales tienen un componente estacionario, pues no se aprecia tendencia alguna dentro del periodo de medición, la señal se mantiene dentro de unos parámetros fijos.

Tabla 5-1: Ciclo de trabajo de los tres canales durante las 24 semanas de medición.

Semana	Ciclo_trabajo CH_24	Ciclo_trabajo CH_25	Ciclo_trabajo CH_31
1	49.86%	38.38%	42.51%
2	51.51%	39.79%	41.06%
3	51.26%	39.32%	40.87%
4	48.91%	37.45%	38.81%
5	48.53%	37.19%	38.39%
6	49.49%	37.91%	39.66%
7	48.97%	37.64%	38.92%
8	49.69%	37.95%	39.67%
9	50.95%	38.96%	40.41%
10	51.27%	39.23%	40.59%
11	50.80%	38.96%	40.18%
12	53.57%	40.03%	43.63%
13	54.55%	41.03%	44.68%
14	51.61%	39.45%	41.28%
15	51.69%	39.39%	41.51%
16	53.57%	40.03%	43.63%
17	54.55%	41.03%	44.68%
18	50.89%	38.12%	41.37%
19	49.16%	37.21%	39.55%
20	49.41%	38.16%	38.28%
21	48.89%	37.74%	38.88%
22	50.52%	39.61%	41.39%
23	52.56%	40.76%	41.76%
24	50.52%	39.61%	44.39%

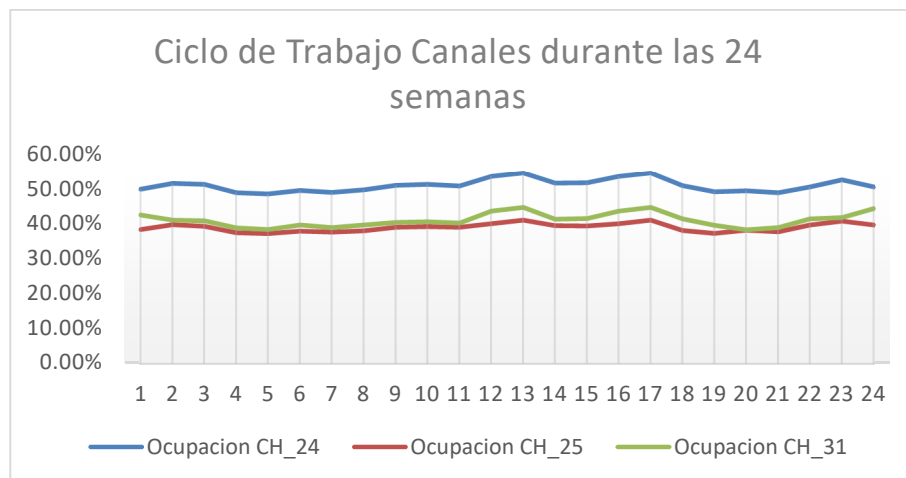


Figura 5-1: Ocupación de los tres canales durante las 24 semanas

En la tabla 5-1 se relacionan los ciclos de trabajo correspondientes a cada canal durante las 24 semanas de medición.

El canal 24 tiene un ciclo de trabajo promedio durante todo el periodo de medición de 50.95%, ciclo de trabajo mínimo 48.53% y un ciclo de trabajo máximo de 54.55%, lo que demuestra que tuvo un comportamiento estable durante todo el periodo de medición. En cuanto a las mediciones de potencia durante el periodo de medición el canal 24 se presenta una desviación estándar (STD) promedio igual a 1.99, una STD máxima de 2.78, lo cual equivale a una desviación máxima del 2.2% respecto al promedio de las potencias medidas en el canal 24 durante las 24 semanas de medición. La señal del canal 24 exhibe características de una señal estacionaria, con una dispersión baja. El canal 24 es entonces el canal con la ocupación más alta de los tres canales analizados.

El canal 25 tiene un ciclo de trabajo promedio durante todo el periodo de medición de 38.96%, ciclo de trabajo mínimo 37.19% y un ciclo de trabajo máximo de 41.03%, lo que demuestra que tuvo un comportamiento estable durante todo el periodo de medición, es el canal con la menor ocupación durante el periodo de medición. En cuanto a las mediciones de potencia durante el periodo de medición el canal 25 se presenta una desviación estándar (STD) promedio igual a 1.7, una STD máxima de 2.45, lo cual equivale a una desviación máxima del 1.9% respecto al promedio de las potencias medidas en el canal 25 durante las 24 semanas de medición. La señal del canal 25 exhibe características de una señal estacionaria, con la dispersión más baja de los tres canales analizados.

Por último, el canal 31 tiene un ciclo de trabajo promedio durante el periodo de medición de 41.09%, ciclo de trabajo mínimo 38.28% y un ciclo de trabajo máximo de 44.68%, igual a los anteriores también tuvo un comportamiento estable durante todo el periodo de medición. En cuanto a las mediciones de potencia durante el periodo de medición el canal 31 se presenta una desviación estándar (STD) promedio igual a 3.13, una STD máxima de 3.95, lo cual equivale a una desviación máxima del 3.5% respecto al promedio de las potencias medidas en el canal 31 durante las 24 semanas de medición. El canal 31 tiene la STD más alta de los tres canales analizados, aunque su porcentaje de desviación es muy bajo, esta señal tiene comportamiento de una señal estacionaria.

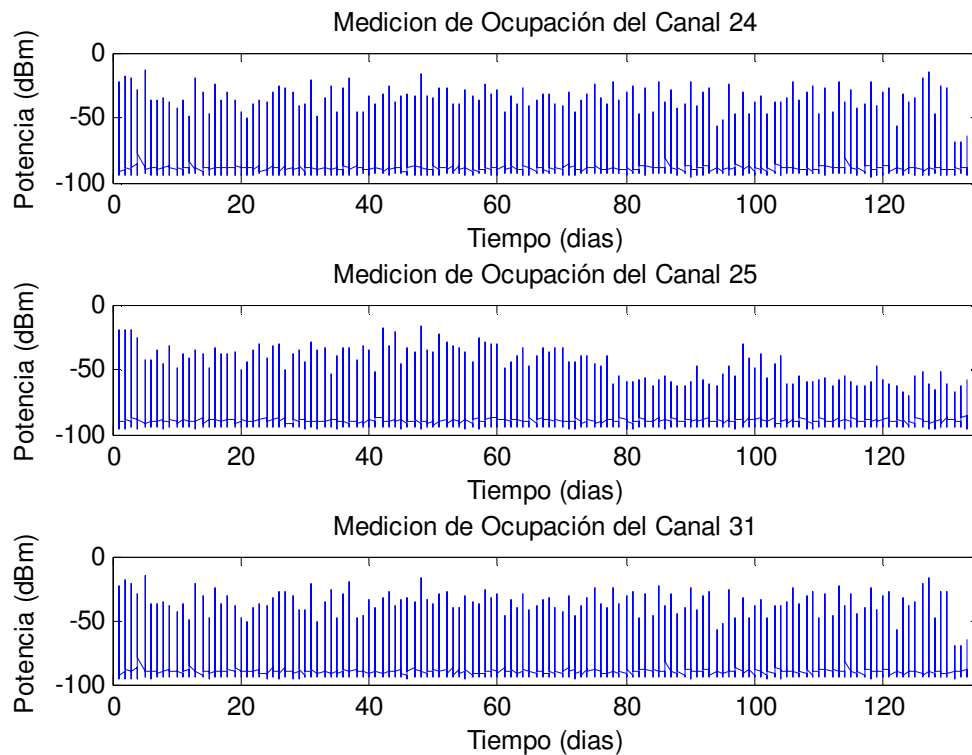


Figura 5-2: Medición de ocupación de los tres canales durante las 24 semanas

Para verificar el componente cíclico y estacionario se realiza el análisis de los ciclos de trabajo y componentes estadísticos de los canales medidos por semana y por día para evidenciar la presencia de ciclos en estos periodos, ciclos que no fue posible apreciar en el periodo de las 24 semanas.

5.6 Análisis estadístico de los canales durante una semana

Para realizar el análisis por semana del comportamiento de los canales medidos, se calculó el ciclo de trabajo promedio por hora durante cada uno de los canales medidos y se organizó de acuerdo al día de la semana. En total se utilizaron 17'417.683 de muestras de potencia por cada uno de los canales analizados.

En la Figura 5-3 se contrasta el comportamiento de las potencias promedio medidas en el canal 24 durante una semana (curva inferior) y su evolución durante las 24 horas de cada

uno de los días, con respecto al ciclo de trabajo promedio calculado y que corresponde a igualmente a las 24 horas del día.

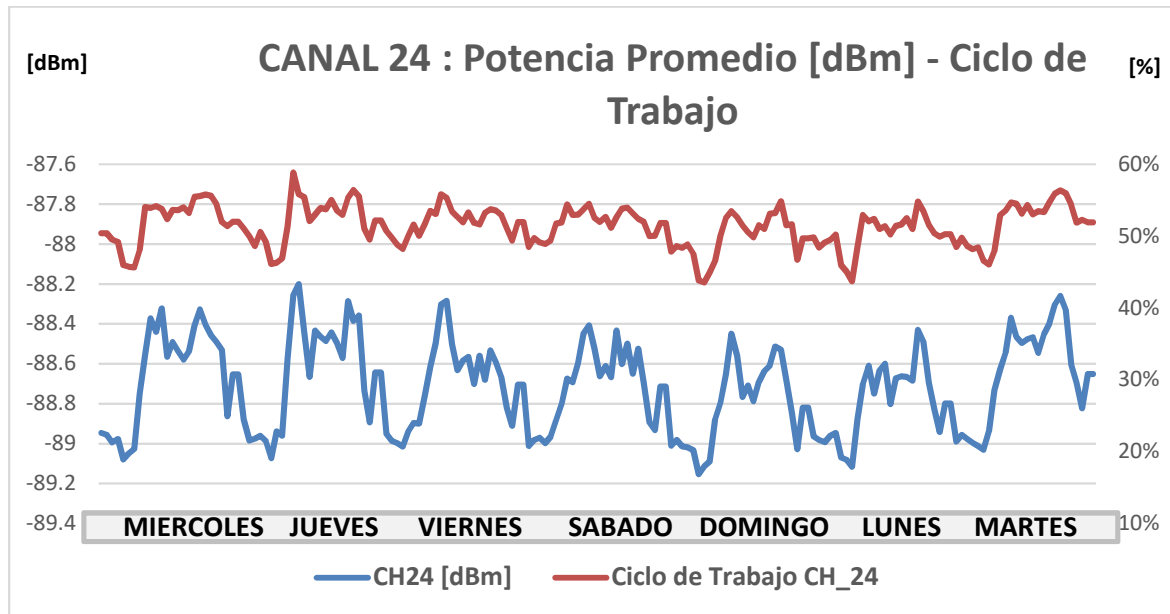


Figura 5-3: Análisis Canal 24 durante una semana

En la tabla 5-2 se resaltan los datos estadísticos del comportamiento del canal 24 durante las mediciones promedio de una semana.

Tabla 5-2: Datos Canal 24 durante una semana

Fecha Datos	Día	Potencia promedio [dBm]	Máximo [dBm]	Mínimo [dBm]	Desviación estándar [dBm]
08/10/2014	miércoles	-88.65	-34.89	-93.99	2.33
09/10/2014	jueves	-88.64	-37.65	-94.20	2.23
10/10/2014	viernes	-88.70	-41.93	-93.98	2.09
11/10/2014	sábado	-88.71	-36.32	-93.96	2.11
12/10/2014	domingo	-88.89	-48.35	-93.61	1.56
13/10/2014	lunes	-88.80	-19.88	-93.65	2.01
14/10/2014	martes	-88.65	-30.08	-94.03	2.26

En base a las mediciones realizadas a la señal del canal 24 y las observaciones realizadas en la Figura 5-3 y la tabla 5-2 es posible establecer que el canal 24 tiene un

comportamiento cíclico más no aleatorio, el cual se repite cada 24 horas, es decir que su ciclo es diario.

El canal 24 tiene un ciclo de trabajo promedio semanal de 51.43%, una ocupación mínima del 43.54% y una ocupación máxima del 58.85%, una STD promedio de 2.09 en el análisis del periodo semanal, el comportamiento es similar durante todos los días de la semana, a excepción del día domingo, este tiene una STD de 1.56 lo cual representa una variación del 25.03% respecto a los demás días de la semana.

Es posible evidenciar además que durante todos los días de la semana a excepción del día domingo se presentan picos de alta ocupación del canal 24 en rangos de horas específicos, la ocupación máxima se encuentra en el rango 8 AM a 1PM con un ciclo de trabajo promedio del 55.43% y al final del día de 6 PM a 10PM se presentan ciclos de trabajo promedio de 54.11%.

En la Figura 5-4 se contrasta el comportamiento de las potencias promedio medidas en el canal 25 durante una semana (curva inferior) y su evolución durante las 24 horas de cada uno de los días, con respecto al ciclo de trabajo promedio calculado y que corresponde a igualmente a las 24 horas del día.

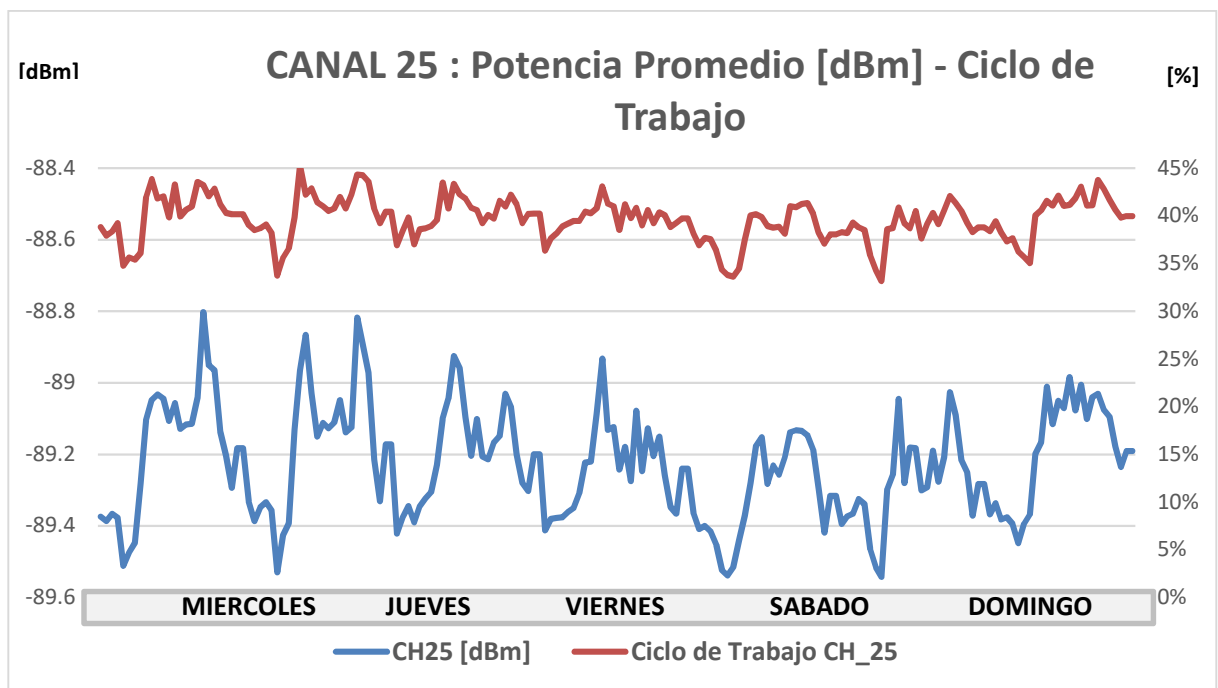


Figura 5-4: Análisis Canal 25 durante una semana

En la tabla 5-3 se resaltan los datos estadísticos del comportamiento del canal 25 durante las mediciones promedio de una semana.

Tabla 5-3: Datos Canal 25 durante una semana

Fecha Datos	Día	Potencia promedio [dBm]	Máximo [dBm]	Mínimo [dBm]	Desviación estándar [dBm]
08/10/2014	miércoles	-89.18	-45.01	-95.77	2.02
09/10/2014	jueves	-89.17	-31.16	-94.89	1.97
10/10/2014	viernes	-89.20	-47.98	-95.28	1.90
11/10/2014	sábado	-89.24	-37.01	-94.97	1.84
12/10/2014	domingo	-89.33	-41.34	-95.31	1.52
13/10/2014	lunes	-89.28	-34.10	-95.70	1.80
14/10/2014	martes	-89.19	-37.08	-94.89	1.95

En base a las mediciones realizadas a la señal del canal 25 y las observaciones realizadas en la Figura 5-4 y la tabla 5-3 es posible establecer igualmente que el canal 25 tiene un comportamiento cíclico más no aleatorio, el cual se repite cada 24 horas, es decir que su ciclo es diario.

El canal 25 tiene un ciclo de trabajo promedio semanal de 39.66%, una ocupación mínima del 33.17% y una ocupación máxima del 45.27%, una STD promedio de 1.86 en el análisis del periodo semanal, el comportamiento es similar durante todos los días de la semana, a excepción del día domingo, este tiene una STD de 1.52 lo cual representa una variación del 18.09% respecto a los demás días de la semana.

Se evidencia igualmente que durante todos los días de la semana a excepción del día domingo se presentan picos de alta ocupación del canal 24 en rangos de horas específicos, la ocupación máxima se encuentra en el rango 8 AM a 1PM con un ciclo de trabajo promedio del 44.11% y al final del día de 6 PM a 10PM se presentan ciclos de trabajo promedio de 43.07%. Este canal es el de menor ocupación.

En la Figura 5-5 se contrasta el comportamiento de las potencias promedio medidas en el canal 31 durante una semana (curva inferior) y su evolución durante las 24 horas de cada uno de los días, con respecto al ciclo de trabajo promedio calculado y que corresponde a igualmente a las 24 horas del día.

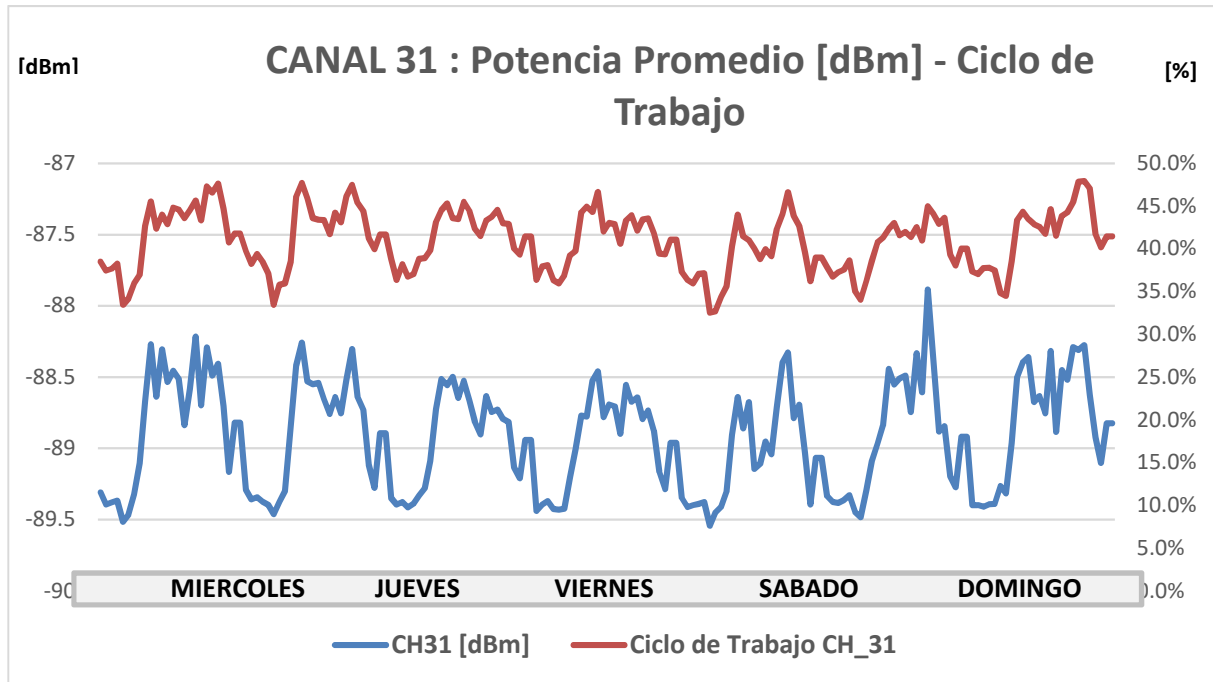


Figura 5-5: Análisis Canal 31 durante una semana

En la tabla 5-4 se resaltan los datos estadísticos del comportamiento del canal 31 durante las mediciones promedio de una semana.

Tabla 5-4: Datos Canal 31 durante una semana

Fecha Datos	Día	Potencia promedio [dBm]	Máximo [dBm]	Mínimo [dBm]	Desviación estándar [dBm]
08/10/2014	miércoles	-88.82	-28.10	-95.17	3.20
09/10/2014	jueves	-88.89	-22.26	-94.76	2.93
10/10/2014	viernes	-88.94	-17.10	-94.87	2.79
11/10/2014	sábado	-88.96	-39.32	-95.18	2.78
12/10/2014	domingo	-89.23	-46.36	-94.58	1.95
13/10/2014	lunes	-88.92	-23.01	-95.01	3.42
14/10/2014	martes	-88.82	-30.63	-95.12	3.21

En base a las mediciones realizadas a la señal del canal 31 y las observaciones realizadas en la Figura 5-5 y la tabla 5-4 es posible establecer igualmente que el canal 31 tiene un comportamiento cíclico más no aleatorio, el cual se repite cada 24 horas, es decir que igual que los canales 24 y 25 tiene un ciclo diario.

El canal 31 tiene un ciclo de trabajo promedio semanal de 40.98%, una ocupación mínima del 32.54% y una ocupación máxima del 47.95%, una STD promedio de 2.90 en el análisis del periodo semanal, el comportamiento es similar durante todos los días de la semana, a excepción del día domingo, este tiene una STD de 1.95 lo cual representa una variación del 32.78% respecto a los demás días de la semana.

Se evidencia igualmente que durante todos los días de la semana a excepción del día domingo se presentan picos de alta ocupación del canal 31 en rangos de horas específicos, la ocupación máxima se encuentra en el rango 8 AM a 1PM con un ciclo de trabajo promedio del 45.72% y al final del día de 6 PM a 10PM se presentan ciclos de trabajo promedio de 46.61%. Este canal es el de menor ocupación, tiene el mayor valor de desviación estándar, aunque no supera el 3%.

5.7 Análisis estadístico de los canales durante un día

En el análisis semanal se detectó un comportamiento cíclico en las señales de todos los canales medidos, el ciclo es diario y durante el día se evidencian picos con alta ocupación, por lo tanto, se realiza a continuación un análisis del comportamiento por día, para realizar el análisis se calculó el valor promedio de potencia por hora de cada uno de los canales y se clasifico de acuerdo al día de la semana.

5.7.1 Análisis día Lunes

En la figura 5-6 se muestra la evolución del ciclo de trabajo de los canales 24, 25 y 31 durante el día lunes, se calculó el valor promedio durante todo el periodo de medición.

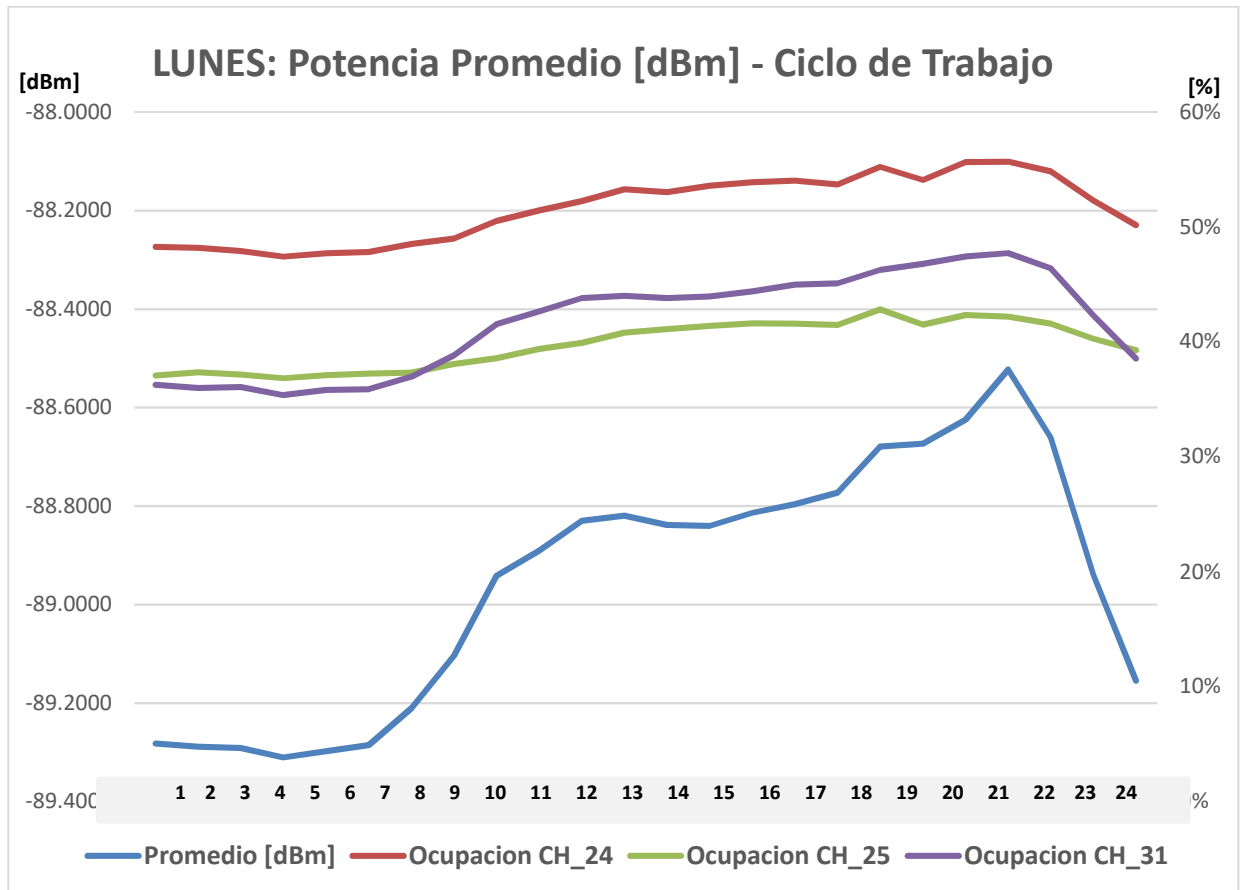


Figura 5-6: Ocupación de los tres canales durante el día Lunes

En la figura 5-6 se presenta la comparación de los ciclos de trabajo promedio de cada uno de los canales medidos y se contrasta con el valor promedio de potencias de los 24 lunes medidos, el valor se agrupa por hora para verificar el comportamiento de cada canal durante el día. El canal 24 tiene una potencia promedio de -88.73 [dBm], el canal 25 tiene una potencia promedio de -89.24 [dBm] y el canal 31 una potencia promedio de -88.84 [dBm].

Tabla 5-5: Ciclo de trabajo día Lunes

Hora	Ocupacion CH 24	Ocupacion CH 25	Ocupacion CH 31
12:00:00 a. m.	48.28%	37.07%	36.26%
01:00:00 a. m.	48.20%	37.35%	35.99%
02:00:00 a. m.	47.92%	37.17%	36.07%
03:00:00 a. m.	47.42%	36.84%	35.37%
04:00:00 a. m.	47.72%	37.10%	35.84%
05:00:00 a. m.	47.83%	37.24%	35.88%
06:00:00 a. m.	48.51%	37.32%	36.98%
07:00:00 a. m.	48.99%	38.08%	38.83%
08:00:00 a. m.	50.54%	38.57%	41.54%
09:00:00 a. m.	51.44%	39.38%	42.64%
10:00:00 a. m.	52.25%	39.93%	43.81%
11:00:00 a. m.	53.28%	40.80%	44.01%
12:00:00 p. m.	53.04%	41.13%	43.82%
01:00:00 p. m.	53.59%	41.40%	43.96%
02:00:00 p. m.	53.89%	41.62%	44.41%
03:00:00 p. m.	54.04%	41.60%	44.99%
04:00:00 p. m.	53.72%	41.47%	45.11%
05:00:00 p. m.	55.23%	42.83%	46.27%
06:00:00 p. m.	54.09%	41.50%	46.79%
07:00:00 p. m.	55.65%	42.33%	47.43%
08:00:00 p. m.	55.69%	42.19%	47.73%
09:00:00 p. m.	54.85%	41.58%	46.42%
10:00:00 p. m.	52.32%	40.28%	42.31%
11:00:00 p. m.	50.17%	39.27%	38.55%

En la Tabla 5-5 se representan los niveles de ocupación de los canales objeto del análisis durante las 24 horas del día lunes, el Canal 24 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 8 PM con un 55.69%, y su nivel mínimo a las 3 AM con un 47.42%. El canal 25 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 5 PM con un 42.83%, y su nivel mínimo a las 12 AM con un 37.07%. El canal 31 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 8 PM con un 47.73%, y su nivel mínimo a las 3 AM con un 35.37%.

5.7.2 Análisis día Martes

En la figura 5-7 se muestra la evolución del ciclo de trabajo de los canales 24, 25 y 31 durante el día Martes, se calculó el valor promedio durante todo el periodo de medición.

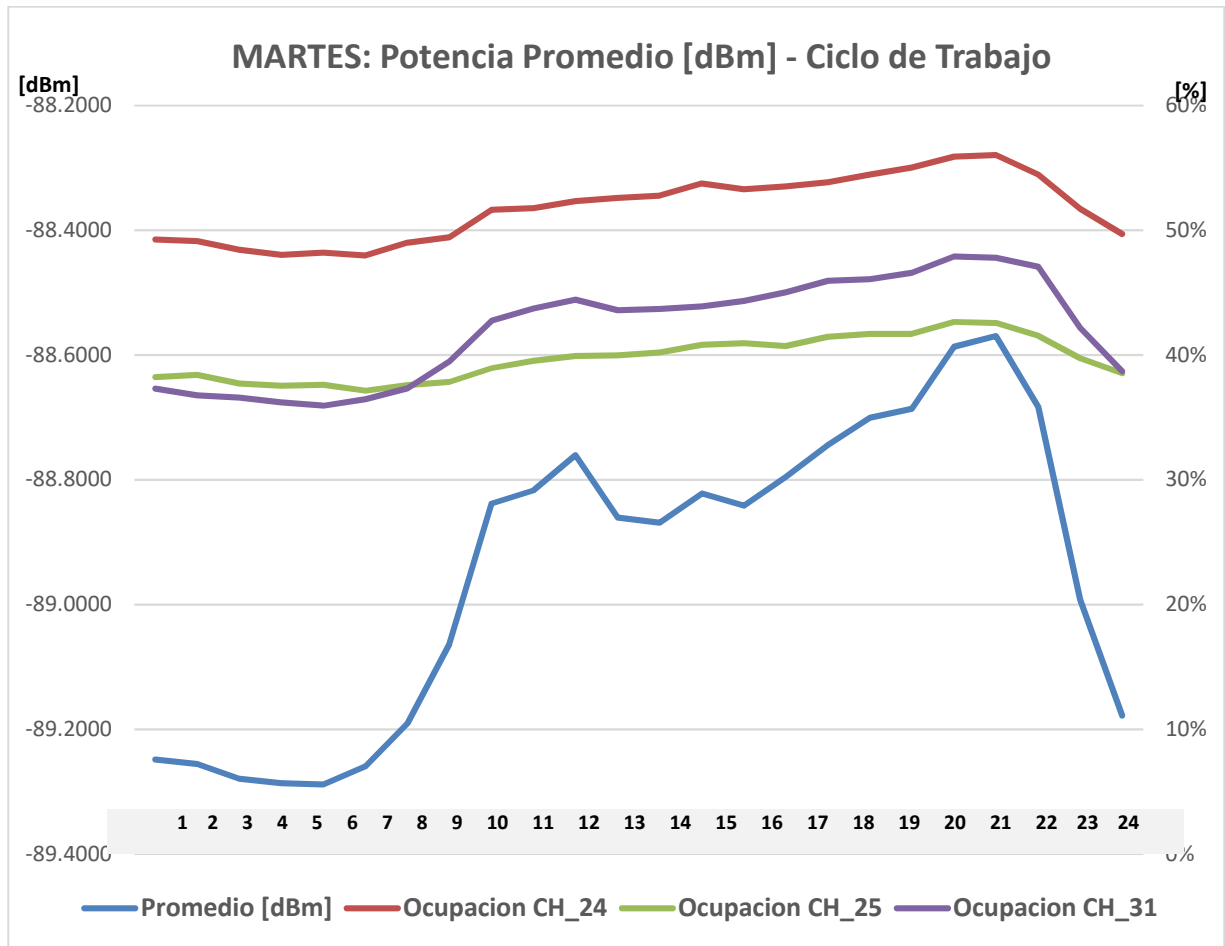


Figura 5-7: Ocupación de los tres canales durante el día Martes

En la figura 5-7 se presenta la comparación de los ciclos de trabajo promedio de cada uno de los canales medidos y se contrasta con el valor promedio de potencias de los 24 Martes medidos, el valor se agrupa por hora para verificar el comportamiento de cada canal durante el día. El canal 24 tiene una potencia promedio de -88.74 [dBm], el canal 25 tiene una potencia promedio de -89.26 [dBm] y el canal 31 una potencia promedio de -88.82 [dBm].

Tabla 5-6: Ciclo de trabajo día Martes

Hora	Ocupacion CH 24	Ocupacion CH 25	Ocupacion CH 31
12:00:00 a. m.	49.26%	38.22%	37.32%
01:00:00 a. m.	49.13%	38.42%	36.77%
02:00:00 a. m.	48.44%	37.73%	36.58%
03:00:00 a. m.	48.04%	37.55%	36.22%
04:00:00 a. m.	48.22%	37.61%	35.94%
05:00:00 a. m.	47.99%	37.14%	36.45%
06:00:00 a. m.	49.01%	37.61%	37.35%
07:00:00 a. m.	49.45%	37.86%	39.49%
08:00:00 a. m.	51.64%	38.96%	42.75%
09:00:00 a. m.	51.78%	39.54%	43.73%
10:00:00 a. m.	52.34%	39.94%	44.43%
11:00:00 a. m.	52.59%	39.98%	43.60%
12:00:00 p. m.	52.77%	40.21%	43.70%
01:00:00 p. m.	53.75%	40.82%	43.91%
02:00:00 p. m.	53.29%	40.96%	44.34%
03:00:00 p. m.	53.52%	40.72%	45.04%
04:00:00 p. m.	53.86%	41.47%	45.95%
05:00:00 p. m.	54.48%	41.70%	46.08%
06:00:00 p. m.	55.04%	41.69%	46.60%
07:00:00 p. m.	55.90%	42.66%	47.90%
08:00:00 p. m.	56.03%	42.56%	47.81%
09:00:00 p. m.	54.48%	41.56%	47.08%
10:00:00 p. m.	51.73%	39.76%	42.18%
11:00:00 p. m.	49.70%	38.53%	38.69%

En la Tabla 5-6 se representan los niveles de ocupación de los canales objeto del análisis durante las 24 horas del día martes, el Canal 24 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 8 PM con un 56.03%, y su nivel mínimo a las 3 AM con un 48.04%. El canal 25 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 7 PM con un 42.66%, y su nivel mínimo a las 5 AM con un 37.14%. El canal 31 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 7 PM con un 47.9%, y su nivel mínimo a las 3 AM con un 36.22%.

5.7.3 Análisis día Miércoles

En la figura 5-8 se muestra la evolución del ciclo de trabajo de los canales 24, 25 y 31 durante el día Miércoles, se calculó el valor promedio durante todo el periodo de medición.

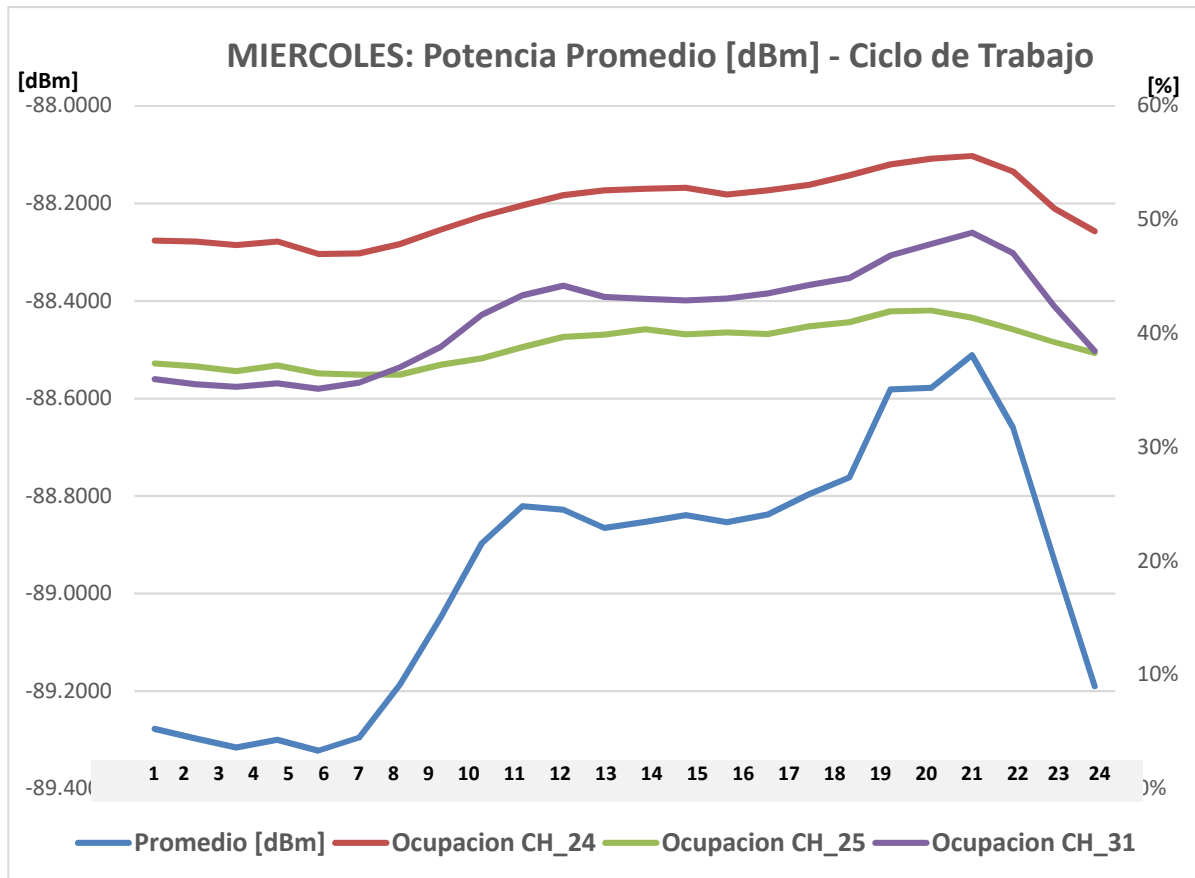


Figura 5-8: Ocupación de los tres canales durante el día Miércoles

En la figura 5-8 se presenta la comparación de los ciclos de trabajo promedio de cada uno de los canales medidos y se contrasta con el valor promedio de potencias de los 24 Miércoles medidos, el valor se agrupa por hora para verificar el comportamiento de cada canal durante el día. El canal 24 tiene una potencia promedio de -88.74 [dBm], el canal 25 tiene una potencia promedio de -89.29 [dBm] y el canal 31 una potencia promedio de -88.82 [dBm].

Tabla 5-7: Ciclo de trabajo día Miércoles

Hora	Ocupacion CH 24	Ocupacion CH 25	Ocupacion CH 31
12:00:00 a. m.	48.2%	37.4%	36.0%
01:00:00 a. m.	48.1%	37.1%	35.5%
02:00:00 a. m.	47.8%	36.7%	35.3%
03:00:00 a. m.	48.1%	37.2%	35.6%
04:00:00 a. m.	47.0%	36.5%	35.2%
05:00:00 a. m.	47.0%	36.4%	35.7%
06:00:00 a. m.	47.9%	36.4%	37.0%
07:00:00 a. m.	49.1%	37.3%	38.8%
08:00:00 a. m.	50.3%	37.8%	41.6%
09:00:00 a. m.	51.3%	38.8%	43.4%
10:00:00 a. m.	52.2%	39.7%	44.2%
11:00:00 a. m.	52.6%	39.9%	43.2%
12:00:00 p. m.	52.7%	40.4%	43.0%
01:00:00 p. m.	52.8%	39.9%	42.9%
02:00:00 p. m.	52.2%	40.1%	43.1%
03:00:00 p. m.	52.6%	40.0%	43.5%
04:00:00 p. m.	53.1%	40.6%	44.3%
05:00:00 p. m.	53.9%	41.0%	44.9%
06:00:00 p. m.	54.9%	41.9%	46.9%
07:00:00 p. m.	55.4%	42.0%	47.9%
08:00:00 p. m.	55.6%	41.4%	48.9%
09:00:00 p. m.	54.2%	40.3%	47.1%
10:00:00 p. m.	51.0%	39.3%	42.4%
11:00:00 p. m.	49.0%	38.3%	38.5%

En la Tabla 5-7 se representan los niveles de ocupación de los canales objeto del análisis durante las 24 horas del día martes, el Canal 24 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 8 PM con un 55.6%, y su nivel mínimo a las 5 AM con un 47.0%. El canal 25 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 7 PM con un 42.0%, y su nivel mínimo a las 5 AM con un 36.4%. El canal 31 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 8 PM con un 48.9%, y su nivel mínimo a las 4 AM con un 35.2%.

5.7.4 Análisis día Jueves

En la figura 5-9 se muestra la evolución del ciclo de trabajo de los canales 24, 25 y 31 durante el día Jueves, se calculó el valor promedio durante todo el periodo de medición.

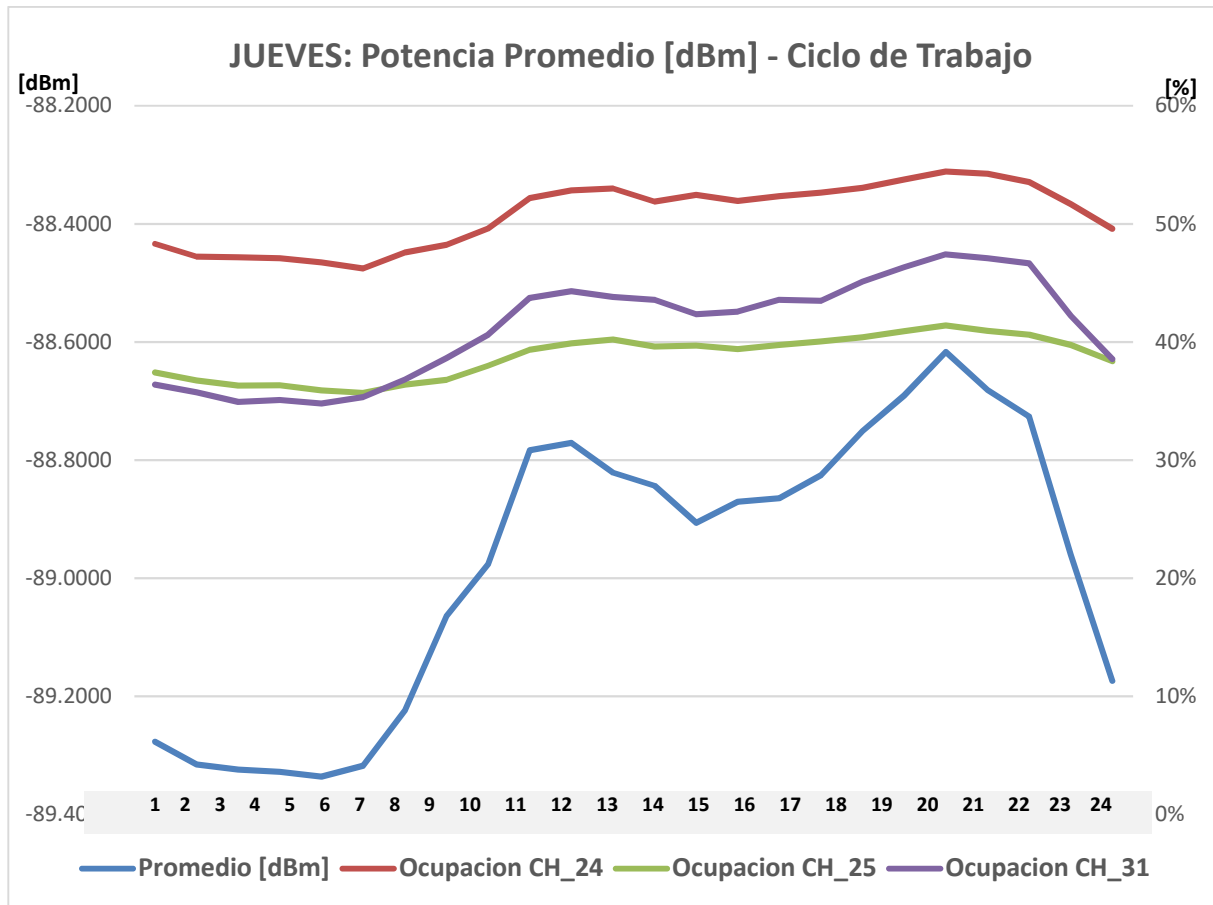


Figura 5-9: Ocupación de los tres canales durante el día Jueves

En la figura 5-9 se presenta la comparación de los ciclos de trabajo promedio de cada uno de los canales medidos y se contrasta con el valor promedio de potencias de los 24 Jueves medidos, el valor se agrupa por hora para verificar el comportamiento de cada canal durante el día. El canal 24 tiene una potencia promedio de -88.77 [dBm], el canal 25 tiene una potencia promedio de -89.3 [dBm] y el canal 31 una potencia promedio de -88.87 [dBm].

Tabla 5-8: Ciclo de trabajo día Jueves

Hora	Ocupacion CH 24	Ocupacion CH 25	Ocupacion CH 31
12:00:00 a. m.	48.32%	37.42%	36.39%
01:00:00 a. m.	47.23%	36.75%	35.73%
02:00:00 a. m.	47.16%	36.32%	34.93%
03:00:00 a. m.	47.08%	36.34%	35.10%
04:00:00 a. m.	46.74%	35.90%	34.79%
05:00:00 a. m.	46.22%	35.70%	35.33%
06:00:00 a. m.	47.58%	36.40%	36.82%
07:00:00 a. m.	48.23%	36.80%	38.63%
08:00:00 a. m.	49.61%	37.99%	40.63%
09:00:00 a. m.	52.18%	39.34%	43.75%
10:00:00 a. m.	52.82%	39.88%	44.30%
11:00:00 a. m.	53.01%	40.20%	43.80%
12:00:00 p. m.	51.89%	39.61%	43.57%
01:00:00 p. m.	52.47%	39.71%	42.35%
02:00:00 p. m.	51.94%	39.38%	42.55%
03:00:00 p. m.	52.35%	39.76%	43.56%
04:00:00 p. m.	52.65%	40.06%	43.48%
05:00:00 p. m.	53.06%	40.39%	45.10%
06:00:00 p. m.	53.77%	40.90%	46.32%
07:00:00 p. m.	54.44%	41.40%	47.42%
08:00:00 p. m.	54.25%	40.94%	47.10%
09:00:00 p. m.	53.55%	40.62%	46.65%
10:00:00 p. m.	51.66%	39.75%	42.21%
11:00:00 p. m.	49.58%	38.36%	38.55%

En la Tabla 5-8 se representan los niveles de ocupación de los canales objeto del análisis durante las 24 horas del día Jueves, el Canal 24 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 7 PM con un 54.44%, y su nivel mínimo a las 5 AM con un 46.22%. El canal 25 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 7 PM con un 41.4%, y su nivel mínimo a las 5 AM con un 35.7%. El canal 31 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 7 PM con un 47.42%, y su nivel mínimo a las 4 AM con un 34.79%.

5.7.5 Análisis día Viernes

En la figura 5-10 se muestra la evolución del ciclo de trabajo de los canales 24, 25 y 31 durante el día Viernes, se calculó el valor promedio durante todo el periodo de medición.

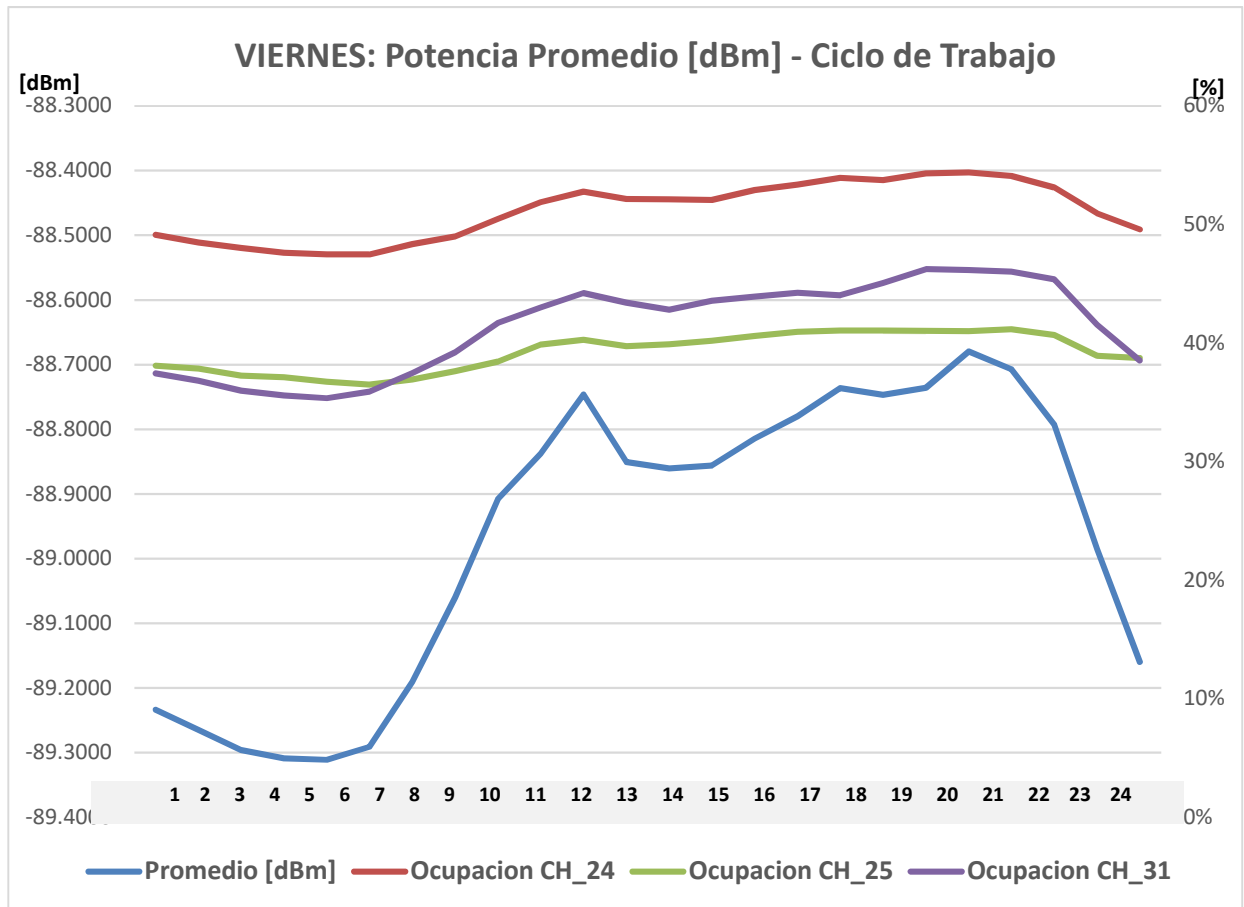


Figura 5-10: Ocupación de los tres canales durante el día Viernes

En la figura 5-10 se presenta la comparación de los ciclos de trabajo promedio de cada uno de los canales medidos y se contrasta con el valor promedio de potencias de los 24 Viernes medidos, el valor se agrupa por hora para verificar el comportamiento de cada canal durante el día. El canal 24 tiene una potencia promedio de -88.75 [dBm], el canal 25 tiene una potencia promedio de -89.3 [dBm] y el canal 31 una potencia promedio de -88.87 [dBm].

Tabla 5-9: Ciclo de trabajo día Viernes

Hora	Ocupacion CH 24	Ocupacion CH 25	Ocupacion CH 31
12:00:00 a. m.	49.14%	38.08%	37.44%
01:00:00 a. m.	48.49%	37.86%	36.83%
02:00:00 a. m.	48.02%	37.25%	35.97%
03:00:00 a. m.	47.61%	37.13%	35.58%
04:00:00 a. m.	47.48%	36.75%	35.35%
05:00:00 a. m.	47.47%	36.50%	35.92%
06:00:00 a. m.	48.36%	36.94%	37.47%
07:00:00 a. m.	48.99%	37.63%	39.23%
08:00:00 a. m.	50.49%	38.45%	41.71%
09:00:00 a. m.	51.89%	39.86%	43.00%
10:00:00 a. m.	52.77%	40.28%	44.22%
11:00:00 a. m.	52.15%	39.73%	43.40%
12:00:00 p. m.	52.13%	39.91%	42.81%
01:00:00 p. m.	52.08%	40.19%	43.57%
02:00:00 p. m.	52.90%	40.61%	43.92%
03:00:00 p. m.	53.37%	40.95%	44.25%
04:00:00 p. m.	53.94%	41.05%	44.03%
05:00:00 p. m.	53.74%	41.07%	45.06%
06:00:00 p. m.	54.30%	41.03%	46.23%
07:00:00 p. m.	54.39%	41.02%	46.15%
08:00:00 p. m.	54.10%	41.17%	46.02%
09:00:00 p. m.	53.13%	40.69%	45.39%
10:00:00 p. m.	50.94%	38.94%	41.55%
11:00:00 p. m.	49.59%	38.74%	38.52%

En la Tabla 5-9 se representan los niveles de ocupación de los canales objeto del análisis durante las 24 horas del día Viernes, el Canal 24 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 7 PM con un 54.39%, y su nivel mínimo a las 5 AM con un 47.47%. El canal 25 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 8 PM con un 41.17%, y su nivel mínimo a las 5 AM con un 36.5%. El canal 31 tiene su pico de máxima ocupación sobre las 7 PM con un 46.15%, y su nivel mínimo a las 4 AM con un 35.35%.

5.7.6 Análisis día Sábado

En la figura 5-11 se muestra la evolución del ciclo de trabajo de los canales 24, 25 y 31 durante el día Sábado, se calculó el valor promedio durante todo el periodo de medición.

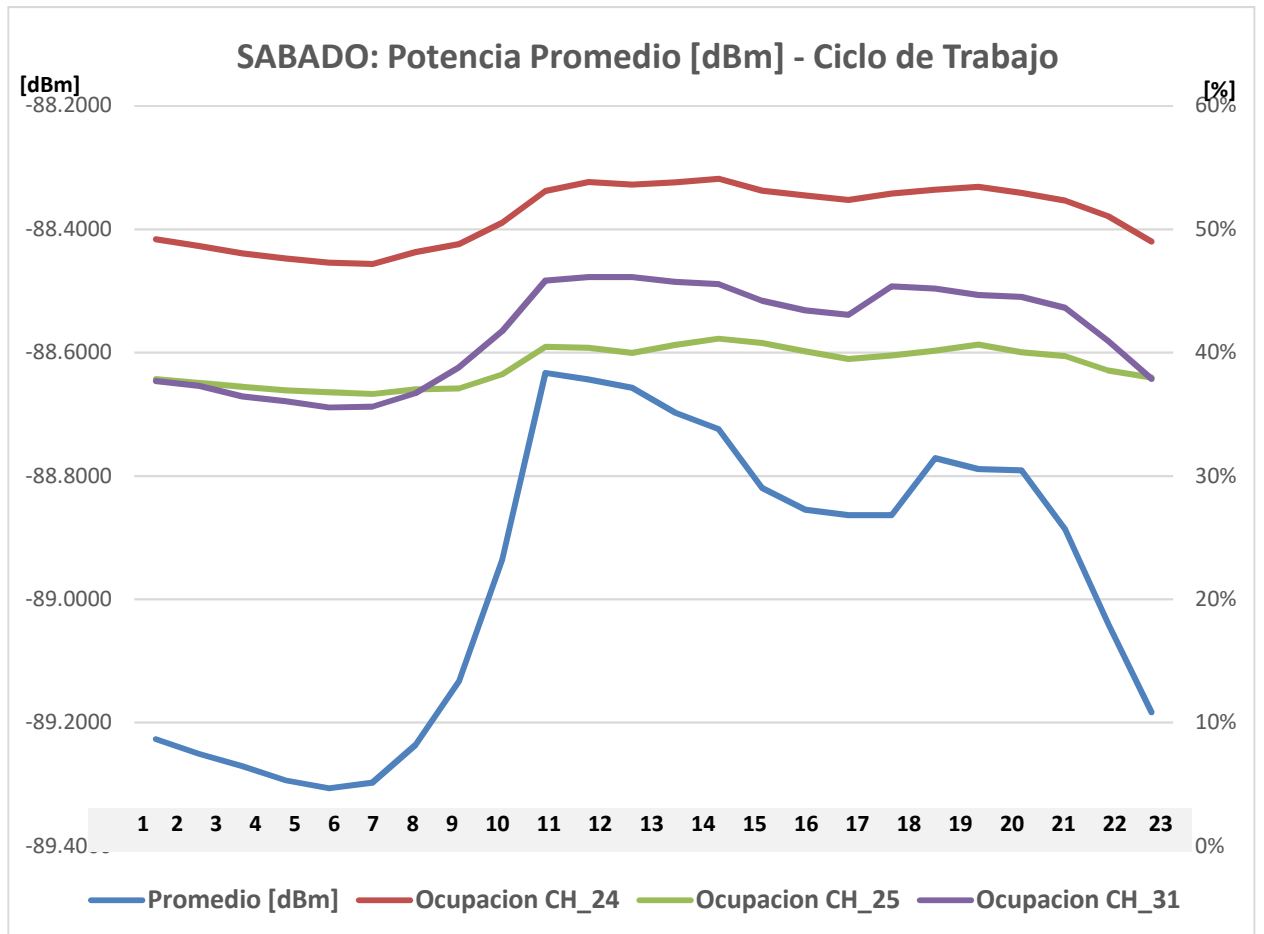


Figura 5-11: Ocupación de los tres canales durante el día Sábado

En la figura 5-11 se presenta la comparación de los ciclos de trabajo promedio de cada uno de los canales medidos y se contrasta con el valor promedio de potencias de los 24 Sábado medidos, el valor se agrupa por hora para verificar el comportamiento de cada canal durante el día. El canal 24 tiene una potencia promedio de -88.75 [dBm], el canal 25 tiene una potencia promedio de -89.3 [dBm] y el canal 31 una potencia promedio de -88.85 [dBm].

Tabla 5-10: Ciclo de trabajo día Sábado

Hora	Ocupacion CH 24	Ocupacion CH 25	Ocupacion CH 31
12:00:00 a. m.	49.19%	37.84%	37.69%
01:00:00 a. m.	48.63%	37.54%	37.29%
02:00:00 a. m.	48.05%	37.22%	36.46%
03:00:00 a. m.	47.63%	36.93%	36.06%
04:00:00 a. m.	47.30%	36.79%	35.55%
05:00:00 a. m.	47.19%	36.64%	35.63%
06:00:00 a. m.	48.16%	37.03%	36.72%
07:00:00 a. m.	48.79%	37.11%	38.81%
08:00:00 a. m.	50.54%	38.24%	41.74%
09:00:00 a. m.	53.11%	40.48%	45.83%
10:00:00 a. m.	53.84%	40.39%	46.12%
11:00:00 a. m.	53.63%	39.97%	46.11%
12:00:00 p. m.	53.80%	40.64%	45.72%
01:00:00 p. m.	54.09%	41.13%	45.55%
02:00:00 p. m.	53.13%	40.78%	44.21%
03:00:00 p. m.	52.75%	40.10%	43.42%
04:00:00 p. m.	52.37%	39.49%	43.06%
05:00:00 p. m.	52.90%	39.76%	45.37%
06:00:00 p. m.	53.20%	40.15%	45.20%
07:00:00 p. m.	53.44%	40.66%	44.66%
08:00:00 p. m.	52.94%	40.03%	44.52%
09:00:00 p. m.	52.33%	39.72%	43.63%
10:00:00 p. m.	51.04%	38.56%	40.92%
11:00:00 p. m.	49.00%	37.98%	37.88%

En la Tabla 5-10 se representan los niveles de ocupación de los canales objeto del análisis durante las 24 horas del día Sábado, para este día los canales exhiben un comportamiento diferente al que se puede apreciar desde el lunes hasta el viernes.

El Canal 24 tiene dos picos de máxima ocupación, uno sobre la 1PM con 54.09% y otro a las 7PM con 53.44%, el nivel de mínima ocupación está a las 5AM con 47.19%. El canal 25 tiene dos picos de máxima ocupación, uno sobre la 1PM con 41.13% y otro a las 7PM con 40.66%, el nivel de mínima ocupación está a las 5AM con 36.64%. El canal 31 tiene dos picos de máxima ocupación, uno sobre la 10AM con 46.12% y otro a las 5PM con 45.37%, el nivel de mínima ocupación está a las 4AM con 35.55%.

5.7.7 Análisis día Domingo

En la figura 5-12 se muestra la evolución del ciclo de trabajo de los canales 24, 25 y 31 durante el día Domingo, se calculó el valor promedio durante todo el periodo de medición.

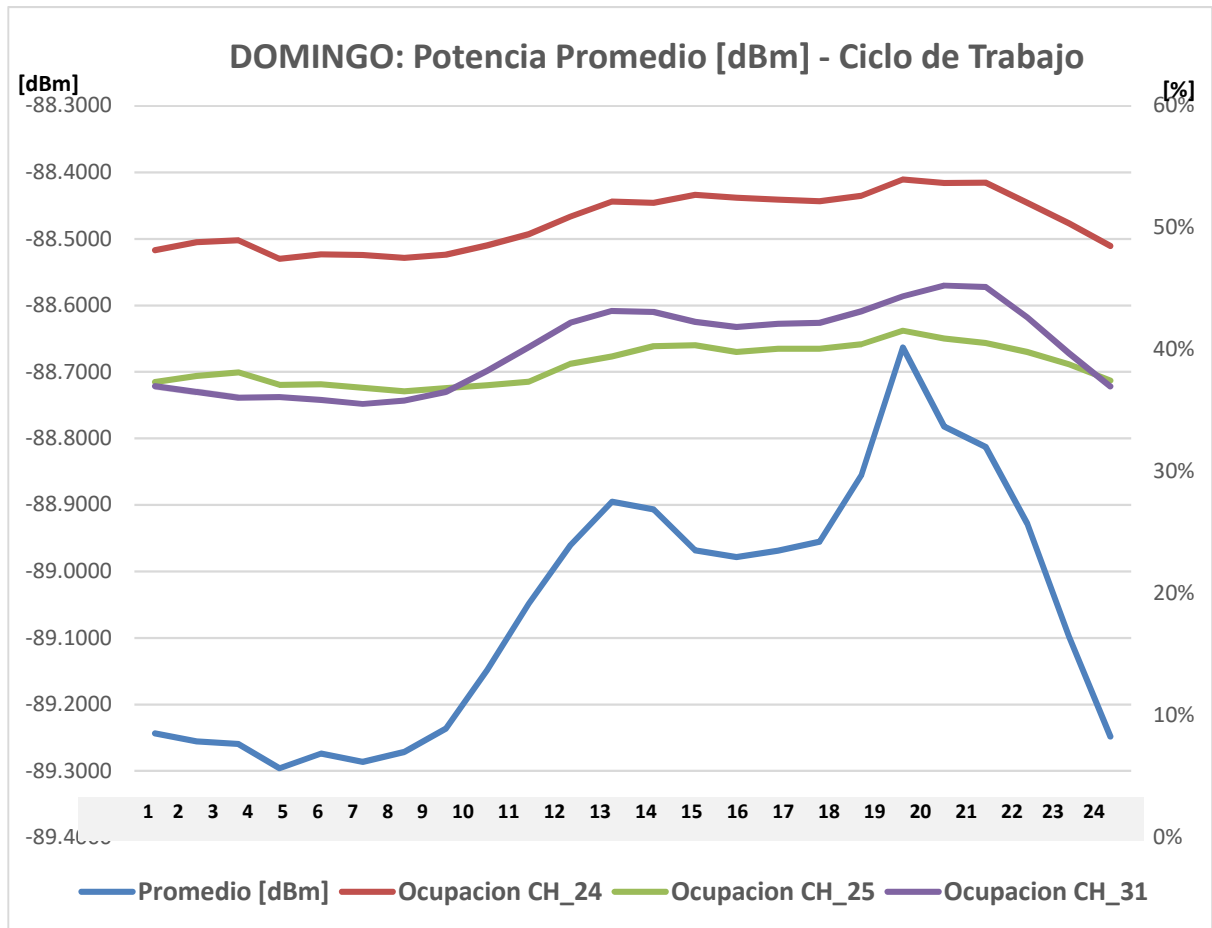


Figura 5-12: Ocupación de los tres canales durante el día Domingo

En la figura 5-12 se presenta la comparación de los ciclos de trabajo promedio de cada uno de los canales medidos y se contrasta con el valor promedio de potencias de los 24 días domingo medidos durante la campaña, el valor se agrupa por hora para verificar el comportamiento de cada canal durante el día. El canal 24 tiene una potencia promedio de -88.82 [dBm], el canal 25 tiene una potencia promedio de -89.3 [dBm] y el canal 31 una potencia promedio de -89.0 [dBm].

Tabla 5-11: Ciclo de trabajo día Domingo

Hora	Ocupacion CH 24	Ocupacion CH 25	Ocupacion CH 31
12:00:00 a. m.	48.18%	37.36%	37.01%
01:00:00 a. m.	48.81%	37.86%	36.54%
02:00:00 a. m.	48.98%	38.14%	36.08%
03:00:00 a. m.	47.47%	37.13%	36.13%
04:00:00 a. m.	47.82%	37.17%	35.89%
05:00:00 a. m.	47.77%	36.89%	35.56%
06:00:00 a. m.	47.54%	36.60%	35.83%
07:00:00 a. m.	47.81%	36.86%	36.55%
08:00:00 a. m.	48.56%	37.08%	38.28%
09:00:00 a. m.	49.48%	37.37%	40.22%
10:00:00 a. m.	50.94%	38.86%	42.20%
11:00:00 a. m.	52.16%	39.45%	43.19%
12:00:00 p. m.	52.06%	40.29%	43.11%
01:00:00 p. m.	52.70%	40.39%	42.28%
02:00:00 p. m.	52.46%	39.82%	41.87%
03:00:00 p. m.	52.33%	40.07%	42.14%
04:00:00 p. m.	52.18%	40.09%	42.21%
05:00:00 p. m.	52.62%	40.44%	43.17%
06:00:00 p. m.	53.96%	41.56%	44.39%
07:00:00 p. m.	53.69%	40.93%	45.27%
08:00:00 p. m.	53.72%	40.55%	45.15%
09:00:00 p. m.	52.06%	39.82%	42.65%
10:00:00 p. m.	50.37%	38.79%	39.73%
11:00:00 p. m.	48.51%	37.50%	36.99%

En la Tabla 5-11 se representan los niveles de ocupación de los canales objeto del análisis durante las 24 horas del día Domingo, para este día los canales exhiben un comportamiento diferente al que se puede apreciar desde el lunes hasta el sábado.

El Canal 24 tiene dos picos con ciclos de trabajo altos, el primero se presenta cerca al mediodía y otro al final de la tarde se distribuyen de la siguiente forma, el primero sobre la 1PM con 52.7% y otro a las 6PM con 53.96%, el nivel de mínima ocupación está a las 6AM con 47.54%. Para el canal 25 tiene dos picos de máxima ocupación, el primero sobre la 1PM con 40.39% y otro a las 6PM con 41.56%, el nivel de mínima ocupación está a las 6AM con 36.6%. El canal 31 tiene el primer pico de alta ocupación sobre las 11AM con

43.19% y otro a las 7PM con 45.27%, el nivel de mínima ocupación está a las 6AM con 35.56%.

5.7.8 Resultados Análisis diario

Después de realizar el análisis diario de los ciclos de trabajo de cada uno de los canales analizados es posible concluir que el comportamiento de la señal medida de cada uno de los canales corresponde a una señal estacionaria, sin tendencia, no aleatoria y con un comportamiento cíclico el cual se repite diariamente con una duración de 24 horas.

Tabla 5-12: Ciclo de trabajo Lunes a Viernes

Hora	Ocupacion CH 24	Ocupacion CH 25	Ocupacion CH 31
12:00:00 a. m.	48.63%	37.63%	36.68%
01:00:00 a. m.	48.24%	37.50%	36.17%
02:00:00 a. m.	47.87%	37.04%	35.78%
03:00:00 a. m.	47.65%	37.02%	35.58%
04:00:00 a. m.	47.44%	36.78%	35.42%
05:00:00 a. m.	47.32%	36.60%	35.86%
06:00:00 a. m.	48.27%	36.94%	37.13%
07:00:00 a. m.	48.96%	37.53%	39.01%
08:00:00 a. m.	50.53%	38.36%	41.66%
09:00:00 a. m.	51.70%	39.37%	43.30%
10:00:00 a. m.	52.46%	39.94%	44.19%
11:00:00 a. m.	52.73%	40.13%	43.61%
12:00:00 p. m.	52.53%	40.26%	43.40%
01:00:00 p. m.	52.94%	40.40%	43.33%
02:00:00 p. m.	52.82%	40.51%	43.64%
03:00:00 p. m.	53.16%	40.58%	44.26%
04:00:00 p. m.	53.43%	40.92%	44.55%
05:00:00 p. m.	54.07%	41.39%	45.47%
06:00:00 p. m.	54.40%	41.41%	46.56%
07:00:00 p. m.	55.15%	41.89%	47.37%
08:00:00 p. m.	55.14%	41.65%	47.52%
09:00:00 p. m.	54.05%	40.95%	46.53%
10:00:00 p. m.	51.53%	39.60%	42.14%
11:00:00 p. m.	49.60%	38.64%	38.56%

Las señales correspondientes a los días desde el lunes hasta el viernes tienen un comportamiento similar, con picos de máxima y mínima ocupación ubicados en el mismo rango de tiempo. Los tres canales alcanzan su nivel máximo de ciclo de trabajo en el periodo de 5PM a 9PM, el canal 24 alcanza un nivel de 55.15%, el canal 25 el 41.89% y el canal 31 el 47.52%. En cuanto al nivel mínimo de ocupación se encuentra entre la 1AM y las 6AM alcanzando niveles de 47.32% en el canal 24, 36.6% en el canal 25 y 35.42% en el canal 31.

En cuanto al día Sábado y Domingo cada uno tiene características diferenciales en cuanto a sus niveles de máxima y mínima ocupación que se repiten durante las 24 semanas que se realizó la medición.

El día sábado tienen dos rangos bien definidos en los cuales alcanza niveles altos de ocupación, el primero se ubica entre las 9AM y la 1PM alcanzando niveles del 54.09% en el canal 24, 41.13% en el canal 25 y 46.12% en el canal 31, el segundo se ubica entre las 5PM y las 8PM alcanzando niveles del 53.44% en el canal 24, 40.66% en el canal 25 y 45.37% en el canal 31. El nivel de mínima ocupación se encuentra en el rango de 2AM a 6AM, alcanzando niveles del 47.19% en el canal 24, 36.64% en el canal 25 y 35.55% en el canal 31.

Los niveles altos de ocupación durante el día domingo se alcanzan en el periodo de 11AM a 9PM, alcanzando un nivel máximo de 53.96% en el canal 24, 41.56% en el canal 25 y 45.27% en el Canal 31.

Por tal razón se confirma la descrito en [13], donde se concluye que para los cálculos de autocorrelación y predicción de ocupación de los canales GSM, se debe tener en cuenta que el comportamiento de las señales durante el sábado y domingo es diferentes al de los días desde el lunes hasta el domingo.

5.8 Contribución al desarrollo de la Radio Cognitiva

Como se indica desde el inicio de la investigación, la tesis tiene la tarea de responder el interrogante de cuánto tiempo es necesario medir para pronosticar con certeza la ocupación de canales dentro de una red GSM, para ser usados como oportunidades espectrales en la CR. En la tabla 5-13 se muestran los resultados obtenidos del Parámetro H calculados en diferentes periodos de tiempo que hacen parte de las mediciones recopiladas durante toda la campaña de medición.

Tabla 5-13: Periodo óptimo para medir y pronosticar comportamiento de una red GSM

Periodo	DIAS	H - CH 24	%	H - CH 25	%	H - CH 31	%
			VARIAC H_CH24		VARIAC H_CH25		VARIAC H_CH31
Semana 1 (L-V)	5	0.7908		0.7569		0.8027	
Seis meses (L-V)	120	0.7909	0.01%	0.7571	0.03%	0.803	0.04%
Semana 1 (L-D)	7	0.7888	-0.25%	0.7561	-0.11%	0.8001	-0.32%
Un mes (L-D)	28	0.7876	-0.40%	0.754	-0.38%	0.7926	-1.26%
Dos meses (L-D)	56	0.7886	-0.28%	0.7537	-0.42%	0.7973	-0.67%
Seis meses (L-D)	168	0.7887	-0.27%	0.7568	-0.01%	0.8022	-0.06%

Inicialmente se analiza un periodo semanal dado que se pudo apreciar que se presenta un ciclo diario que se repite durante las 24 semanas de medición, para este primer análisis se obtuvieron valores de $H > 0.5$ en todos los canales, lo que evidencia que todos tienen una alta probabilidad de pronóstico. El valor de H calculado para el canal 24 fue de 0.7888, el canal 25 fue de 0.7561 y el canal 31 fue de 0.8001.

Luego se realizó un análisis con datos de un mes, los valores variaron en menor medida, en el canal 24 se presentó una variación del 0.3% respecto al valor calculado para una semana, en el canal 25 fue del 0.4% y en el canal 31 la variación fue del 1%.

Para el análisis de dos meses la variación en el canal 24 fue de 0.3%, en el canal 25 del 0.1% y en el canal 31 fue del 0.3%.

Se realizó finalmente el análisis de cada uno de los canales para todo el periodo de medición, en este cálculo el valor de H en el canal 24 tuvo una variación del 0.3%, en el canal 25 del 0.2% y en el canal 31 del 0.4%.

Por último y como se indico en el numeral 4.2.6 y 5.7.8 de este trabajo, el día sábado y domingo exhiben características a las del Lunes al Viernes, por tal razón se obtuvo el promedio de las mediciones de Lunes a Viernes y se calcula el valor de H para los tres canales, en este caso el valor aumento, de forma que para el canal 24 fue de 0.7911 un 1.1% mas que para una semana de Lunes a Domingo, el valor de H en el canal 25 fue de 0.7574 es decir un 0.8% más, y el canal 31 con un H de 0.8034 que equivale a un incremento del 1.3%.

La principal contribución de esta investigación para el desarrollo de la CR, es que para hacer pronósticos de ocupación de canales de la red GSM, no es necesario medir por periodos de tiempo mayores a una semana. Es suficiente entonces medir los niveles de ocupación durante una semana de Lunes a Viernes, en este periodo se logran resultados confiables que permiten medir el comportamiento de los canales analizados y predecir su comportamiento en el tiempo.

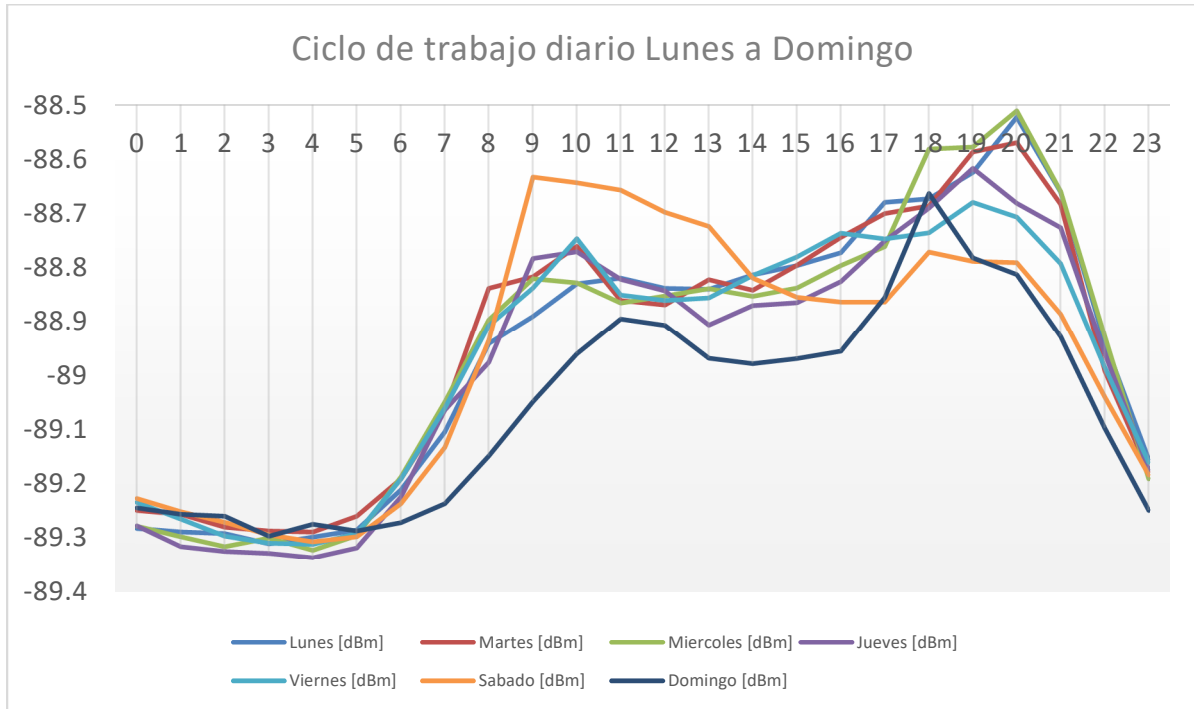


Figura 5-13: Ciclo de trabajo diario Lunes a Domingo

En la figura 5-13 se puede apreciar claramente que el comportamiento del ciclo de trabajo diario durante los días sábado y domingo es diferente al que se puede observar en los demás días de la semana.

La figura 5-14 permite comprobar que el comportamiento del ciclo de trabajo de lunes a viernes tiene un comportamiento similar, por lo tanto, es posible hacer un análisis de ocupación recopilando los datos semanales, lo cual valida lo evidenciado en la tabla 4-18.

Realizar análisis de ocupación en redes GSM durante periodos cortos de medición, garantiza resultados confiables que permiten contribuir al desarrollo de las Redes CR puesto que su crecimiento demanda resultados en tiempos cortos que permitan tomar decisiones y buscar alternativas para su desarrollo e implementación.

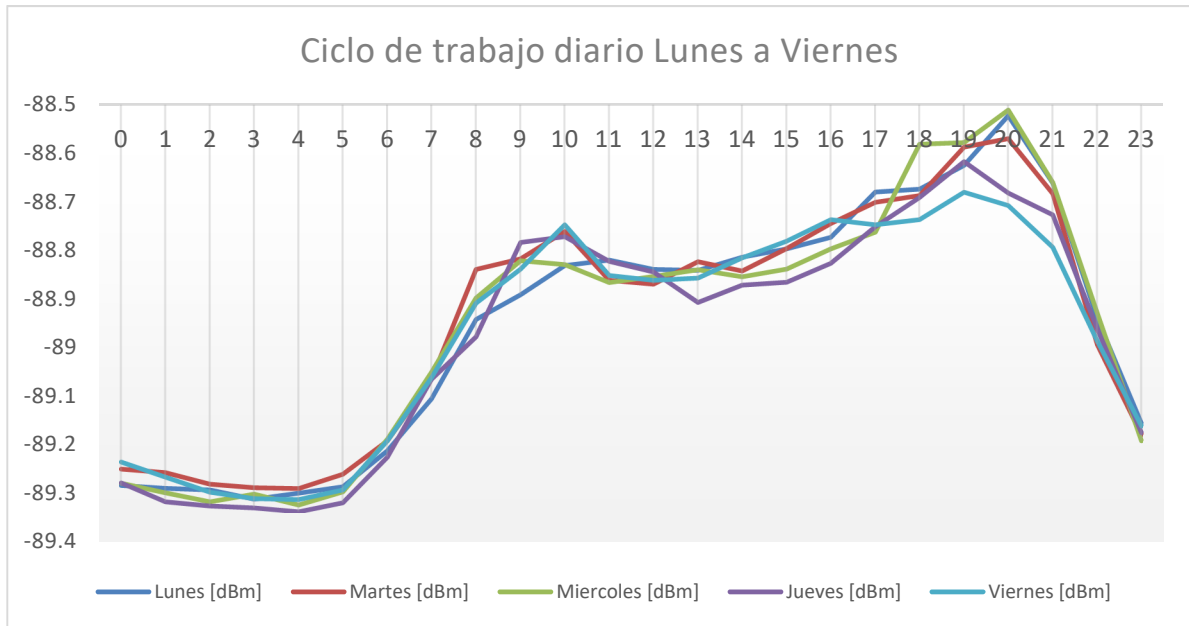


Figura 5-14: Ciclo de trabajo diario Lunes a Viernes

Igualmente, se debe tener en cuenta que para cálculos de auto-similitud y predicción de ocupación de los canales GSM, se debe tener en cuenta que el comportamiento de las señales durante el sábado y domingo es diferente al de los días desde el lunes hasta el viernes. Las señales correspondientes a los días desde el lunes hasta el viernes tienen un comportamiento similar, con picos de máxima y mínima ocupación ubicados en el mismo rango de tiempo. Los tres canales alcanzan su nivel máximo de ciclo de trabajo en el periodo de 5PM a 9PM, el canal 24 alcanza un nivel de 55.15, el canal 25 el 41.89% y el canal 31 el 47.52%. En cuanto al nivel mínimo de ocupación se encuentra entre la 1AM y las 6AM alcanzando niveles de 47.32% en el canal 24, 36.6% en el canal 25 y 35.42% en el canal 31. Las franjas de máxima y mínima ocupación son iguales en los tres canales analizados para los días de lunes a viernes.

En conclusión, un análisis de ocupación confiable se puede realizar con campañas de medición de una semana, únicamente teniendo en cuenta los datos de Lunes a Viernes. Si se desea hacer un análisis de ocupación del fin de semana, este debe hacerse por separado teniendo en cuenta únicamente datos de Sábado y Domingo.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Las señales correspondientes a los días desde el lunes hasta el viernes tienen un comportamiento similar, con picos de máxima y mínima ocupación ubicados en el mismo rango de tiempo. Los tres canales alcanzan su nivel máximo de ciclo de trabajo en el periodo de 5PM a 9PM, el canal 24 alcanza un nivel de 55.15%, el canal 25 el 41.89% y el canal 31 el 47.52%. En cuanto al nivel mínimo de ocupación se encuentra entre la 1AM y las 6AM alcanzando niveles de 47.32% en el canal 24, 36.6% en el canal 25 y 35.42% en el canal 31. Las franjas de máxima y mínima ocupación son iguales en los tres canales analizados para los días de lunes a viernes.

En cuanto al día Sábado y Domingo cada uno tiene características diferenciales en cuanto a sus niveles de máxima y mínima ocupación que se repiten durante las 24 semanas que se realizó la medición. Para cálculos de auto-similitud y predicción de ocupación de los canales GSM, se debe tener en cuenta que el comportamiento de las señales durante el sábado y domingo es diferente al de los días desde el lunes hasta el viernes.

Al realizar análisis de auto-similaridad con datos de Lunes a Viernes, se presentaron mayores valores de H, en el Canal 24 se presenta un aumento del 1.1% con respecto al valor semanal, el Canal 25 un aumento del 0.8% y en el canal 31 un aumento del 1.3%, lo que indica que si se omiten los datos del sábado y domingo la probabilidad de pronóstico aumenta.

Los resultados obtenidos con el método de Rango Reescalado (RS) y Transformada Wavelet (WT) permiten obtener una estimación precisa del parámetro de Hurst, a través

del cual se logró estimar la dependencia de largo rango en el comportamiento de los canales analizados, igualmente se comprobó que entre los dos métodos empleados no se presentan diferencias mayores al 1% en el cálculo de H. Los métodos WT y R/S son los más apropiados para calcular H en series de tiempo cortas y largas, sus resultados no se ven afectados por la longitud de la serie.

Después de calcular el parámetro H para diferentes periodos de tiempo se puede concluir que en todos los canales, no representa una variación significativa hacer pronósticos de ocupación con periodos de tiempo mayores a una semana, de hecho en la presente investigación se verificó que el parámetro H no varía más allá de 1% si el pronóstico se hace con una serie de tiempo de seis meses o de una semana. Es suficiente entonces medir los niveles de ocupación durante una semana, en este periodo se logran resultados confiables que permiten medir el comportamiento de los canales analizados y predecir su comportamiento en el tiempo.

Sábado y Domingo cada uno tiene características diferenciales en cuanto a sus niveles de máxima y mínima ocupación que se repiten durante las 24 semanas que se realizó la medición. Las franjas de máxima y mínima ocupación son iguales en los tres canales.

El Canal 31 tiene una ocupación media del 41.3% y su valor de H es 0.8034, lo que lo identifica como el canal con la mejor probabilidad de pronóstico. El canal 24 tiene un ciclo de trabajo del 51.1%, siendo el que tiene un ciclo de trabajo mayor, igualmente su factor de auto-similitud H es igual a 0.7911, es el segundo. El Canal 25 tiene un ciclo de trabajo del 39.2%, es el que tiene un menor ciclo de trabajo e igualmente su valor de H es 0.7574 el menor de los tres, pero igualmente mayor a 0.5. Una campaña de medición de una semana de Lunes a Viernes es suficiente para determinar el grado de auto-similaridad de un canal.

6.2 Recomendaciones

Se propone implementar modelos de propagación que tengan en cuenta en el entrenamiento de las redes neuronales los datos de mediciones mayores a una semana, con el fin de verificar la disminución del error de predicción.

Como línea de trabajo futura se propone realizar un análisis de medición de los mismos canales utilizados en la presente campaña de medición, incluyendo movimiento en la estación de medición, con el fin de que los resultados de la medición se asemejen a las condiciones reales de un usuario de la red GSM que se desplaza por diferentes estaciones base mientras hace uso de la banda seleccionada para el análisis.

Se recomienda realizar campañas de medición de una semana en los casos que se requiera hacer análisis de ocupación de una red GSM, es un tiempo suficiente para obtener resultados confiables que permitan predecir el comportamiento de la red.

Se propone utilizar varias estaciones de medición con movimiento ubicadas en diferentes puntos que permitan medir la ocupación de los canales simultáneamente desde diferentes puntos, por un periodo de una semana.

A. Anexo: Muestras recopiladas en la campaña de medición.

Relación de medidas recopiladas durante la campaña de medición realizada desde el 1 de Octubre de 2014 hasta el 14 de Abril de 2015.

Dia	Fecha	Semana	Numero de Muestras	Nombre Dia	Ocupacion CH_24	Ocupacion CH_25	Ocupacion CH_31
1	01/10/2014	1	118872	miércoles	48.3%	37.0%	41.4%
2	02/10/2014	1	118871	jueves	47.4%	36.7%	41.3%
3	03/10/2014	1	95473	viernes	49.3%	37.6%	43.6%
4	04/10/2014	1	76128	sábado	47.8%	35.8%	43.5%
5	05/10/2014	1	69650	domingo	52.6%	40.5%	43.2%
6	06/10/2014	1	119110	lunes	51.7%	40.4%	42.2%
7	07/10/2014	1	106113	martes	52.5%	40.7%	43.2%
8	08/10/2014	2	100119	miércoles	52.0%	40.2%	41.8%
9	09/10/2014	2	100841	jueves	52.2%	40.4%	41.7%
10	10/10/2014	2	100927	viernes	52.0%	40.2%	41.5%
11	11/10/2014	2	100872	sábado	51.8%	39.7%	41.1%
12	12/10/2014	2	61492	domingo	49.9%	38.9%	39.3%
13	13/10/2014	2	118844	lunes	50.3%	38.8%	40.0%
14	14/10/2014	2	114192	martes	51.9%	40.0%	41.5%
15	15/10/2014	3	100620	miércoles	52.3%	40.3%	41.3%
16	16/10/2014	3	100258	jueves	52.4%	40.2%	42.2%
17	17/10/2014	3	100632	viernes	51.5%	39.5%	41.8%
18	18/10/2014	3	119179	sábado	51.6%	39.3%	41.3%
19	19/10/2014	3	113835	domingo	49.7%	38.0%	39.0%
20	20/10/2014	3	100613	lunes	51.0%	39.3%	40.7%
21	21/10/2014	3	100491	martes	50.5%	38.6%	40.1%
22	22/10/2014	4	105937	miércoles	50.0%	38.5%	39.6%

23	23/10/2014	4	118771	jueves	48.2%	37.1%	37.9%
24	24/10/2014	4	113100	viernes	49.1%	37.4%	38.3%
25	25/10/2014	4	100776	sábado	50.4%	38.6%	40.2%
26	26/10/2014	4	100620	domingo	47.9%	36.5%	38.3%
27	27/10/2014	4	107492	lunes	49.5%	38.0%	39.9%
28	28/10/2014	4	119709	martes	47.6%	36.3%	37.8%
29	29/10/2014	5	112710	miércoles	48.1%	36.7%	37.9%
30	30/10/2014	5	100971	jueves	49.2%	37.8%	39.7%
31	31/10/2014	5	88659	viernes	49.1%	38.3%	38.3%
32	01/11/2014	5	110839	sábado	48.6%	36.9%	38.5%
33	02/11/2014	5	100776	domingo	48.1%	36.5%	37.6%
34	03/11/2014	5	104724	lunes	47.9%	36.7%	37.7%
35	04/11/2014	5	119136	martes	48.9%	37.6%	39.0%
36	05/11/2014	6	114504	miércoles	50.7%	38.9%	40.8%
37	06/11/2014	6	101051	jueves	49.5%	38.0%	40.0%
38	07/11/2014	6	100766	viernes	50.2%	38.1%	40.4%
39	08/11/2014	6	105226	sábado	49.6%	38.1%	39.7%
40	09/11/2014	6	118913	domingo	48.5%	37.3%	38.6%
41	10/11/2014	6	111228	lunes	48.7%	37.6%	38.9%
42	11/11/2014	6	100308	martes	49.4%	37.4%	39.2%
43	12/11/2014	7	111530	miércoles	49.7%	37.9%	39.3%
44	13/11/2014	7	118726	jueves	48.9%	37.8%	39.1%
45	14/11/2014	7	105612	viernes	49.0%	38.0%	38.8%
46	15/11/2014	7	102336	sábado	48.6%	37.5%	39.2%
47	16/11/2014	7	118560	domingo	47.6%	36.6%	38.2%
48	17/11/2014	7	116785	lunes	49.4%	37.7%	38.7%
49	18/11/2014	7	100505	martes	49.7%	38.1%	39.2%
50	19/11/2014	8	100294	miércoles	49.7%	38.1%	39.5%
51	20/11/2014	8	102824	jueves	49.2%	37.7%	39.4%
52	21/11/2014	8	115296	viernes	49.8%	38.0%	39.4%
53	22/11/2014	8	100503	sábado	48.7%	36.9%	39.7%
54	23/11/2014	8	100156	domingo	47.6%	36.4%	37.6%
55	24/11/2014	8	103719	lunes	51.5%	39.3%	40.7%
56	25/11/2014	8	115174	martes	51.0%	39.0%	41.2%
57	26/11/2014	9	100240	miércoles	51.4%	39.3%	41.2%
58	27/11/2014	9	100369	jueves	50.2%	38.2%	39.7%
59	28/11/2014	9	107108	viernes	51.1%	39.4%	40.2%
60	29/11/2014	9	118563	sábado	50.7%	38.6%	41.1%
61	30/11/2014	9	107952	domingo	50.7%	38.6%	39.6%
62	01/12/2014	9	100152	lunes	52.1%	39.8%	41.6%

63	02/12/2014	9	56160	martes	50.3%	38.8%	38.8%
64	03/12/2014	10	114504	miércoles	50.7%	38.9%	40.8%
65	04/12/2014	10	52854	jueves	53.1%	40.5%	42.9%
66	05/12/2014	10	118603	viernes	51.5%	39.4%	41.2%
67	06/12/2014	10	110451	sábado	52.2%	39.5%	41.1%
68	07/12/2014	10	100461	domingo	49.5%	38.0%	38.4%
69	08/12/2014	10	100139	lunes	50.8%	39.0%	39.7%
70	09/12/2014	10	109200	martes	51.8%	39.8%	40.9%
71	10/12/2014	11	118880	miércoles	50.4%	38.9%	40.0%
72	11/12/2014	11	109972	jueves	51.2%	39.0%	40.3%
73	12/12/2014	11	100464	viernes	51.9%	39.7%	41.4%
74	13/12/2014	11	108264	sábado	51.9%	39.6%	42.1%
75	14/12/2014	11	118628	domingo	50.8%	39.0%	39.8%
76	15/12/2014	11	65140	lunes	47.8%	37.0%	37.3%
77	16/12/2014	11	56160	martes	50.3%	38.8%	38.8%
78	14/01/2015	12	104520	miércoles	52.4%	38.5%	43.4%
79	15/01/2015	12	100286	jueves	52.5%	38.7%	43.3%
80	16/01/2015	12	107194	viernes	54.9%	41.0%	44.5%
81	17/01/2015	12	118463	sábado	53.7%	40.9%	43.8%
82	18/01/2015	12	111169	domingo	53.2%	40.3%	42.7%
83	19/01/2015	12	99582	lunes	54.2%	40.4%	44.0%
84	20/01/2015	12	99557	martes	54.2%	40.2%	43.6%
85	21/01/2015	13	99593	miércoles	54.1%	40.5%	43.7%
86	22/01/2015	13	99718	jueves	54.2%	40.5%	44.6%
87	23/01/2015	13	99502	viernes	53.8%	40.6%	44.5%
88	24/01/2015	13	99337	sábado	53.6%	39.8%	44.7%
89	25/01/2015	13	94883	domingo	55.0%	41.6%	43.8%
90	26/01/2015	13	104988	lunes	56.7%	42.9%	46.9%
91	27/01/2015	13	118397	martes	54.4%	41.2%	44.5%
92	28/01/2015	14	111703	miércoles	54.0%	40.9%	43.4%
93	29/01/2015	14	99528	jueves	55.0%	41.3%	44.5%
94	30/01/2015	14	32272	viernes	49.1%	38.8%	37.5%
95	31/01/2015	14	29484	sábado	47.5%	35.5%	37.7%
96	01/02/2015	14	119803	domingo	49.8%	38.5%	39.7%
97	02/02/2015	14	114484	lunes	50.8%	39.2%	40.3%
98	03/02/2015	14	101113	martes	50.8%	38.8%	41.1%
99	04/02/2015	15	100835	miércoles	51.7%	39.7%	41.4%
100	05/02/2015	15	101029	jueves	51.5%	40.1%	40.8%
101	06/02/2015	15	101077	viernes	51.5%	39.4%	41.4%

102	07/02/2015	15	100725	sábado	52.6%	39.9%	41.4%
103	08/02/2015	15	100214	domingo	49.9%	38.3%	39.2%
104	09/02/2015	15	95472	lunes	51.7%	39.0%	42.4%
105	10/02/2015	15	101868	martes	53.0%	39.3%	44.0%
106	11/02/2015	16	104520	miércoles	52.4%	38.5%	43.4%
107	12/02/2015	16	100286	jueves	52.5%	38.7%	43.3%
108	13/02/2015	16	107194	viernes	54.9%	41.0%	44.5%
109	14/02/2015	16	118463	sábado	53.7%	40.9%	43.8%
110	15/02/2015	16	111169	domingo	53.2%	40.3%	42.7%
111	16/02/2015	16	99582	lunes	54.2%	40.4%	44.0%
112	17/02/2015	16	99557	martes	54.2%	40.2%	43.6%
113	18/02/2015	17	99593	miércoles	54.1%	40.5%	43.7%
114	19/02/2015	17	99718	jueves	54.2%	40.5%	44.6%
115	20/02/2015	17	99502	viernes	53.8%	40.6%	44.5%
116	21/02/2015	17	99337	sábado	53.6%	39.8%	44.7%
117	22/02/2015	17	94883	domingo	55.0%	41.6%	43.8%
118	23/02/2015	17	104988	lunes	56.7%	42.9%	46.9%
119	24/02/2015	17	118397	martes	54.4%	41.2%	44.5%
120	25/02/2015	18	111703	miércoles	54.0%	40.9%	43.4%
121	26/02/2015	18	99528	jueves	55.0%	41.3%	44.5%
122	27/02/2015	18	32272	viernes	49.1%	38.8%	37.5%
123	28/02/2015	18	38142	sábado	48.6%	35.4%	42.2%
124	01/03/2015	18	120722	domingo	48.8%	36.3%	38.8%
125	02/03/2015	18	120844	lunes	49.4%	36.8%	41.0%
126	03/03/2015	18	120394	martes	49.4%	36.7%	40.7%
127	04/03/2015	19	120470	miércoles	50.0%	37.4%	40.6%
128	05/03/2015	19	132686	jueves	49.3%	36.7%	41.2%
129	06/03/2015	19	120667	viernes	49.1%	37.0%	40.1%
130	07/03/2015	19	120579	sábado	50.4%	37.4%	41.1%
131	08/03/2015	19	120743	domingo	47.7%	36.7%	37.4%
132	09/03/2015	19	120487	lunes	49.0%	37.7%	38.1%
133	10/03/2015	19	120378	martes	48.6%	37.7%	38.2%
134	11/03/2015	20	115211	miércoles	48.6%	37.3%	37.6%
135	12/03/2015	20	124717	jueves	48.6%	37.5%	38.0%
136	13/03/2015	20	124020	viernes	49.4%	38.2%	38.3%
137	14/03/2015	20	121368	sábado	49.6%	38.2%	37.9%
138	15/03/2015	20	126516	domingo	49.9%	38.4%	38.1%
139	16/03/2015	20	118560	lunes	49.7%	38.7%	38.9%
140	17/03/2015	20	105144	martes	50.2%	38.9%	39.3%
141	18/03/2015	21	105160	miércoles	50.6%	38.8%	39.1%

142	19/03/2015	21	107058	jueves	47.5%	36.4%	36.8%
143	20/03/2015	21	118346	viernes	49.2%	37.8%	38.0%
144	21/03/2015	21	114627	sábado	49.6%	38.0%	37.8%
145	22/03/2015	21	99700	domingo	48.9%	37.6%	37.3%
146	23/03/2015	21	99450	lunes	47.5%	37.5%	39.4%
147	24/03/2015	21	99467	martes	48.8%	38.1%	44.3%
148	25/03/2015	22	99372	miércoles	49.9%	38.9%	44.5%
149	26/03/2015	22	99611	jueves	49.1%	38.5%	43.9%
150	27/03/2015	22	99316	viernes	49.8%	39.1%	44.6%
151	28/03/2015	22	97782	sábado	50.1%	38.8%	45.8%
152	29/03/2015	22	96255	domingo	50.1%	39.2%	42.6%
153	30/03/2015	22	106860	lunes	52.1%	41.2%	44.4%
154	31/03/2015	22	99684	martes	52.5%	41.5%	44.9%
155	01/04/2015	23	99928	miércoles	52.7%	41.8%	43.1%
156	02/04/2015	23	105790	jueves	53.0%	41.3%	40.9%
157	03/04/2015	23	119004	viernes	54.1%	43.0%	42.0%
158	04/04/2015	23	114574	sábado	56.6%	45.3%	43.5%
159	05/04/2015	23	99372	domingo	60.3%	49.0%	47.4%
160	06/04/2015	23	99287	lunes	63.1%	52.2%	51.5%
161	07/04/2015	23	99392	martes	64.2%	52.5%	53.0%
162	08/04/2015	24	99372	miércoles	49.9%	38.9%	44.5%
163	09/04/2015	24	99611	jueves	49.1%	38.5%	43.9%
164	10/04/2015	24	99316	viernes	49.8%	39.1%	44.6%
165	11/04/2015	24	97782	sábado	50.1%	38.8%	45.8%
166	12/04/2015	24	96255	domingo	50.1%	39.2%	42.6%
167	13/04/2015	24	106860	lunes	52.1%	41.2%	44.4%
168	14/04/2015	24	99684	martes	52.5%	41.5%	44.9%
			17417683	PROMEDIO	51.1%	39.2%	41.3%

Bibliografía

- [1] W. Zhe, Measurement and Modelling of Spectrum Occupancy, Durham: Durham theses, Durham University, 2009.
- [2] F. Hillebrand, «The creation of standards for Global Mobile Communication: GSM and UMTS Standardization from 1982 to 2000,» *IEEE Wireless Communications, Special Section on Telecommunications History*, pp. p1-10, 2013.
- [3] L Sakalauskas, E Zavadskas, «Optimization and Intelligent decisions,» *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 15, nº 2, pp. pp 189-196, 2009.
- [4] J Stewart, C Wang, Final report on Standards Dynamics in Mobile Broadband. China EU Information Technology Standards Research Partnership, Edinburgh: The University of Edinburgh, 2010.
- [5] M. Lopez y F. Casadevall, «Statistical Prediction of Spectrum Occupancy Perception in Dynamic Spectrum Access Network,» de *IEEE International Conference on Communications*, Kyoto, 2011.
- [6] I. Akyildiz, W. Lee, M. Vuran y S. Mohanty, «Next generation dynamic spectrum access cognitive radio wireless networks: a survey,» *Computer Networks*, vol. 50, nº 13, pp. 2127-2159, 2006.
- [7] L. Pedraza, F. Forero y I. Paez, «Metropolitan Spectrum Survey in Bogota Colombia,» de *IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, Barcelona, 2013.
- [8] S. Rocke y A. Wyglinski, «Geo-statistical analysis of wireless spectrum occupancy using extreme value theory,» de *Conference on Communications, Computers and Signal Processing*, Victoria, 2011.
- [9] K. Patil, «Spectrum occupancy statistics in the context of cognitive radio,» de *International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, Brest, 2011.
- [10] Zhe Wang, Sana Salous, «Spectrum occupancy analysis for cognitive radio,» de *London Communications Symposium, University College London*, London, 2006.
- [11] ZHAO Xiaolan, DENG Min, LI Haihong, HU Binjie, «Analysis and modeling of spectrum use of GSM bands based on cognitive radio.,» *Chinese Journal of Radio Science*, vol. 28, nº 4, pp. p 622-628, 2013.
- [12] M. Lopez, F. Casadevall, A. Umbert, J. Perez, J. Palicot, C. Moy y R. Hachemani, «Spectral Occupancy Measurements and blind standard recognition sensor for cognitive radio networks,» de *4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Hannover, 2009.
- [13] L. Pedraza, Modelo de Propagación para un entorno urbano que identifica las oportunidades espectrales para redes móviles de radio cognitiva, Bogota: Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [14] M. Lopez y F. Casadevall, «Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio,» *European Transactions on Telecommunications*, vol. 21, nº 8, pp. 680-693, 2010.
- [15] Najam ul Hassan, Waleed Ejaz, Kamran Manzoor and Hyung Seok Kim, «GSM: gateway selection mechanism strengthening inter-cluster coordination in cognitive radio ad hoc networks,» *EURASIP Journal on Wireless Communications*, 2013.
- [16] G Staple, K Werbach, «The end of spectrum scarcity,» *Spectrum, IEE*, vol. 41, nº 3, pp. 48-52, 2004.
- [17] ITU, «ICT Regulation toolkit,» *ITU*, pp. 2,5.

- [18] S Hussain, Y Louet, J Palicot, «Peak power control in cognitive radio context,» *IET Communications*, vol. 6, n° 8, pp. pp 861-871, 2012.
- [19] BF Lo, IF Akyildiz, AM Al-Dhelaan, «Efficient recovery control channel design in cognitive radio ad hoc networks,» *IEEE transaction on vehicular technology*, vol. 59, n° 9, pp. pp 4513-4526, 2010.
- [20] IF Akyildiz, WY Lee, MC Vuran, S Mohanty, «Next generation dynamic spectrum access cognitive radio wireless networks: a survey,» *Computer Networks*, vol. 50, n° 13, pp. pp 2127-2159, 2006.
- [21] B. Lo, «A survey of common control channel design in cognitive radio networks,» *Physical Communications*, vol. 4, pp. pp 26-39, 2011.
- [22] I. Akyildiz, «A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, n° 4, pp. 40-48, 2008.
- [23] J. Mitola, «Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication,» de *Mobile Multimedia Communications*, San Diego, 1999.
- [24] W. Lee, *Spectrum Management in Cognitive Radio Wireless Networks*, Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2009.
- [25] J. Aguilar y A. Navarro, «Radio Cognitiva - Estado del Arte,» *Sistemas y Telemática*, vol. 9, n° 16, pp. 31-53, 2011.
- [26] C. Hernandez, *Modelo adaptativo de handoff espectral para la mejora en el desempeño de la movilidad en redes móviles de radio cognitiva*, Bogota DC: Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [27] S. Haykin, «Cognitive Radio: Brain-empowered wireless communications,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, n° 2, pp. 201-220, 2005.
- [28] S. Gowrishankar y P. Satyanarayana, «A time series modeling and prediction of wireless network traffic,» *International Journal of interactive Mobile technologies*, p. 3(1), 2009.
- [29] T Karagiannis, M Molle, M Faloutsos, «Long-range dependence: Ten years of internet traffic modeling,» *IEEE Internet Computing - Measuring the Internet*, 2004.
- [30] C. Stolojescu, *A Wavelets Based Approach for Time Series Mining*, Timisoara, Romania: Politehnica University of Timisoara and TELECOM Bretagne, Brest, 2011.
- [31] G. Rutka, «Neural Network models for internet traffic prediction,» *Proceedings Electronics and Electrical Engineering, Lithuania*, pp. pp. 55-58, 2006.
- [32] C Stolojescu, S Moga, P Lenca, A Isar, «A wavelet based prediction model for timeseries,» *Proceedings of SMTDA2010, Chania, Crete*, 2010.
- [33] I Railean, C Stolojescu, S Moga, P Lenca, «Wimax Traffic forecasting based on neuronal networks in wavelet domain,» de *Proceedings of the 4th International Conference on Research Challenge in Information Science, RCIS, Nice, France*, 2010.
- [34] N. Z. Kolev, «Sonar Systems,» *In Tech*, 2011.
- [35] I. Firoiu, «Complex Wavelet Transform. Application to Denoising,» *Universitatea Politehnica, Timisoara*, 2010.
- [36] M. Oltean, «Radio Transmision improvement with wavelets,» *Politehnica University of Timisoara, Timisoara*, 2010.
- [37] J. Olkkonen, «Discrete Wavelet Transforms Theory and Applications,» *In Tech*, 2011.
- [38] Fleet, C Benetau and P Van, «An Introduction to wavelets and their application to digital imaging,» de *In Workshop SACNAS'09, Dallas, TX*, 2009.
- [39] Zhe Wang, Sana Salous, «Spectrum Occupancy Statistics and Time Series Models for Cognitive Radio,» *Springer Science*, vol. 62, pp. pp 145-155, 2011.
- [40] C. Ashutosh, B. Abhey Ram y D. VP, «Wavelet and rescaled range approach for the Hurst coefficient for short and long time series,» *Computer and Geosciences*, vol. 33, pp. 83-93, 2007.
- [41] L. Pedraza, F. Forero y I. Paez, «Evaluacion de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá - Colombia,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 10, n° 19, pp. 127-143, 2014.

- [42] L. Pedraza, C. Hernandez, K. Galeano, E. Rodriguez y I. Paez, Ocupacion espectral y modelo de radio cognitiva para Bogota, Primera edicion ed., Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2016, p. 128.
- [43] ITU, «UIT-R SM.1880. Spectrum Occupancy Measurement Technical Report,» *International Telecommunications Union*, 2011.
- [44] A. Chamoli, A. R. Bansal y V. P. Dimri, «Wavelet and rescaled range approach for the Hurst coefficient for short and long time series,» *Computer & Geosciences*, vol. 33, pp. 83-93, 2007.
- [45] S. Katsev y I. Heureux, «Are Hurst exponents estimated from short or irregular time series meaningful?,» *Computers and Geosciences*, vol. 29, pp. 1085-1089, 2003.
- [46] I. Simonsen, A. Hansen y O. M. Hes, «Determination of the Hurst exponent by use of Wavelet transforms,» *Physical Review E*, vol. 58, pp. 2779-2787, 1998.
- [47] A. Arneodo, E. Bacry y J. F. Muzy, «The Thermodynamics of fractals revisited with Wavelets,» *Physica A*, vol. 213, pp. 232-275, 1995.
- [48] C. J. Jones, G. T. Loneragan y D. E. Mainwaring, «Wavelet Packet Computation of the Hurst exponent,» *Journal of Physics*, vol. 29, pp. 2509-2527, 1996.
- [49] S. Kay y S. Marple, «Spectral analysis - a modern perspective,» *Proceedings of IEEE*, vol. 69, pp. 1381-1419, 1981.
- [50] D. L. Turcotte, *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1997, p. 398.
- [51] V. P. Dimri, *Application of Fractals in Earth Sciences*, New York: Balkema, 2000, p. 238.
- [52] A. R. Bansal, V. P. Dimri y G. V. Sagar, «Quantitative interpretation of gravity and magnetic data over Southern Granulite Terrain using scaling spectral approach,» *Jornal of Geological Society of India*, vol. 67, pp. 469-474, 2006.
- [53] A. Malinverno, «A simple method to estimate the fractal dimension of a self-affine series,» *Geophysical Research Letters*, vol. 17, pp. 1953-1956, 1990.
- [54] M. Oliver y R. Webster, «Semi-variograms for modelling the spatial pattern of landform and soil properties,» *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 11, pp. 491-504, 1986.
- [55] H. Hurst, R. Black y Y. Simaika, *Long Term storage*, London: Constable, 1965, p. 145.
- [56] R. Yulmetyev, F. Gafarov, P. Hanggi, R. Nigmatullin y S. Kayumov, «Possibility between earthquake and explosion seismogram differentiation by discrete stochastic non-Markov processes and local Hurst exponent analysis,» *Physical Review*, vol. 64, pp. 1-14, 2001.
- [57] S. S. E. Grab, «Real-time estimation of Traffic Self-similarity parameter in Simulink with Wavelet Transform,» *Elektronika Ir Elektrotechnika*, vol. 19, n° 3, pp. 129-133, 2013.
- [58] A. Asars, E. Grab y E. Petersons, «Analysis of Wavelet Estimation of Self-Similar Traffic Parameters in the Simulink Model,» *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 47, n° 3, pp. 132-138, 2013.
- [59] F. Digham, M. S. Alouini y M. Simon, «On the Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels,» *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, n° 1, pp. 21-24, 2007.
- [60] R. Ferro, L. Pedraza y C. Hernandez, «Maximización del Throughput en una red de radio cognitiva basado en la probabilidad de falsa alarma,» *Tecnura*, vol. 15, n° 30, pp. 64-70, 2011.
- [61] R. Garcia, «Análisis y caracterización de la ocupación espectral en diversos escenarios urbanos exteriores en el contexto de redes Cognitive Radio de acceso dinámico al espectro,» *Universitat Politecnica de Catalunya*, 2009.
- [62] A. J. I. d. 2015.
- [63] J. Murillo, A. Trejos y P. Carvajal, «Estudio del pronostico de la demanda de energía eléctrica, utilizando modelos de series de tiempo,» *Scientia et Technica Año IX*, vol. 23, 2003.
- [64] J. C. Abril, *Análisis estadístico de series de tiempo basado en modelos de espacio de Estado*, EUDEBA, 1999.

- [65] A. C. S. M. A. I. C. Stolojescu, «Forecasting WiMAX BS Traffic by Statistical Processing in the Wavelet Domain,» *Proceedings of the IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems, Iasi, Romania*, pp. 177-183, 2009.
- [66] S. M. M. B. C. S. I Railean, «Neural Networks vs Genetically Optimized Neural Networks in Time Series Prediction,» *Proceedings of SMTDA2010, Chania, Crete*, 2010.
- [67] S. M. P. L. A. I. C. Stolojescu, «Long Range Dependence in WiMAX Downlink Traffic,» *Proceedings of the IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems, Iasi, Romania*, pp. pp. 233-236, 2011.
- [68] C. Stolojescu, «Long Range Dependence in WiMAX Traffic A Preliminary Analysis,» *Proceedings of the 9'th IEEE International Symposium on Electronics and Communications, ISETC 2010, Timisoara, Romania*, pp. pp. 241-244, 2010.
- [69] S. M. P. L. A. I. C. Stolojescu, «WiMAX traffic analysis and Base stations classification in terms of LRD,» *Proceedings of the 15th Portuguese Conference on Artificial Intelligence, EPIA* , pp. pp. 478-490, 2011.
- [70] A. A. G. E y P. E, «Analysis of Wavelet Estimation of Self-Similar Traffic Parameters in the Simulink Model,» *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 47, n° 3, pp. 132-138, 2013.