

Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá-Colombia

Luis Fernando Pedraza ¹, Felipe Forero ² y Ingrid Patricia Paez ³

Recepción: 29-03-2013, Aceptación: 23-11-2013

Disponible en línea: 30-01-2014

PACS:84.40.Ua, 89.70.-a, 41.20.Jb

Resumen

Este artículo describe los detalles y resultados de una campaña de medición de espectro, que tuvo lugar en Bogotá (Colombia) desde Marzo a Diciembre de 2012. El estudio incluye el análisis de ocupación de las bandas de frecuencias que van desde 54 MHz a 6 GHz. Las mediciones se ordenan de acuerdo a las diferentes bandas y servicios, a fin de proveer una visión clara de los ciclos de trabajo típicos asociados a diferentes tecnologías. Los resultados sugieren que la utilización actual del espectro es todavía muy baja, incluso en una densa área urbana.

Palabras clave: radio cognitiva; ciclo de trabajo; medición de espectro radioeléctrico; uso de espectro radioeléctrico y tecnologías inalámbricas.

¹ Ph. D.(c). Ingeniería de Sistemas y Computación, lfpedrazam@udistrital.edu.co, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

² Magister en Ciencias de la Computación y las Comunicaciones, fforero@udistrital.edu.co, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

³ Ph. D. en Ingeniería de Telecomunicaciones, ippaezp@unal.edu.co, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Evaluation Radioelectric Spectrum Occupancy in Bogota-Colombia.

Abstract

This paper describes the details and results of a spectrum occupancy measurement campaign, which took place in Bogota (Colombia) from March to December 2012. The study includes the analysis of occupation of frequency bands ranging from 54 MHz to 6 GHz. Measurements are sorted according to different bands and services, to provide a clear vision into the typical duty cycles associated to different technologies. Results suggest that the use of the current spectrum is still very low, even in a dense urban area.

Key words: cognitive radio; duty cycle; radioelectric spectrum measurement; radioelectric spectrum use and wireless technologies.

1 Introducción

En las recientes décadas, la ocupación del espectro ha sido estudiada ampliamente, ya que es importante en la decisión de nuevas políticas de asignación de espectro para las tecnologías emergentes; así como en el monitoreo de la actividad en las bandas licenciadas y libres. La medición real de la utilización de espectro dentro de una banda determinada, permite a las autoridades garantizar que los concesionarios cumplan con las regulaciones de espectro locales y regionales. Por otra parte, las estimaciones precisas de parámetros como la cantidad de tiempo y la región geográfica en las que las diferentes bandas de espectro se están utilizando realmente, se constituyen en información útil, que conlleve a la futura implementación de los sistemas de acceso dinámico al espectro, como la radio cognitiva. Dado que algunas bandas son mucho más ocupadas que otras, es esencial saber exactamente la cantidad de espectro que está realmente disponible para que las futuras tecnologías inalámbricas puedan resolver el problema actual de la escasez de espectro. En este contexto, las campañas de medición de espectro son cada vez más necesarias para reunir información representativa de determinadas regiones en diferentes países. Estas campañas representan el primer paso hacia la construcción de bases de datos que permitan analizar el comportamiento de los usuarios licenciados y no licenciados, lo que facilitará el despliegue de los sistemas de acceso al espectro dinámico-oportunistas, como la radio cognitiva.

Las primeras iniciativas de evaluación de utilización del espectro radioeléctrico, involucran la recolección de datos en un rango de frecuencias desde 108 MHz a 19.7 GHz en áreas metropolitanas [1]. Posteriormente, se han realizado campañas de medición aplicando la misma metodología en otros lugares, proporcionando información detallada de acuerdo a las bandas específicas y a los tipos de transmisión [2]. Luego, las mediciones se centraron en las bandas de los servicios GPS e ISM (2.4 GHz) en un intento de establecer políticas efectivas de asignación de espectro [3]. Estos estudios proveen perspectivas interesantes con respecto a las variables asociadas al usuario [4]. Aunque la densidad de los servicios inalámbricos se concentra alrededor de ciertas bandas, otras contribuciones importantes se han centrado en los estudios de interferencia en el rango de 30 MHz-3GHz en determinados lugares [5], seguido de comparaciones entre el uso del espectro en las zonas rurales y urbanas [6], [7].

La búsqueda en el despliegue de los sistemas de acceso al espectro oportunista, sugiere campañas de medición de espectro de larga duración, con el objetivo de recopilar gran cantidad de datos a través del tiempo [8]. Estos estudios también han demostrado que incluso en las áreas urbanas densas, el espectro se encuentra en gran parte subutilizado, lo que indica que las bandas desocupadas temporalmente podrían proporcionar una mejor capacidad de datos para otros servicios. Adicionalmente, se sugiere que los dispositivos de transmisión podrían caracterizarse a partir de las mediciones [9], y también que las detecciones cooperativa y distribuida, mejoran la identificación de espacios en blanco (huecos espectrales), lo que aumenta la identificación del espectro subutilizado [10]. Los resultados de detección eficiente del espectro se han llevado a cabo en función de si la detección es realizada en el interior o exterior de un lugar [11], para mediciones entre 20 MHz-3GHz; mientras que otros estudios se han centrado solamente en el análisis de la banda del servicio GSM [12].

En el contexto de la Radio Cognitiva (CR) [13], [14], los estudios de medición de espectro han dirigido su atención en el uso de la información estadística de ocupación del espectro para ser más precisos en la detección [15]. El interés en el despliegue de las tecnologías de acceso dinámico al espectro ha dado lugar a numerosas campañas de medición en diferentes países [16], [17], [18] con el fin de analizar la cantidad exacta de espectro disponible.

Como puede observarse, se han realizado diferentes campañas de medición, que han proporcionando una amplia cantidad de datos en términos de uso del espectro. Sin embargo, la mayoría de los estudios antes mencionados han tenido lugar en los EE.UU. y Europa, por lo que hay poca información acerca de las estadísticas de uso del espectro en los países en desarrollo. Por otra parte, con el fin de aplicar cambios en la política de administración del espectro, es aconsejable que cada país recolecte sus propios datos de acuerdo a los métodos de medición del espectro ampliamente aceptados [19], [20], lo que facilitará la futura implantación de las tecnologías CR en todo el mundo. Este documento provee una colección de tales datos para la zona urbana de la ciudad capital de Colombia.

La presente campaña de medición de espectro se llevó a cabo en Bogotá y cubrió un rango de frecuencias desde los 54MHz hasta los 6GHz. El propósito de este estudio es estimar con precisión el grado de subutilización de espectro, en una zona de alta densidad de población por área de esta ciudad capital. Las estadísticas mostradas se clasifican de acuerdo con el Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias para Colombia [21], colocando especial interés en los servicios ofrecidos en cada banda, lo que permite mostrar las tendencias y plantear posibles cambios en la reasignación de espectro en un futuro cercano.

2 Metodología

Los rangos de medición de las bandas se basaron en aspectos como el tiempo de barrido, el ancho de banda de resolución (RBW) y el span, con el fin de garantizar una adecuada medida en función del piso de ruido y el ancho de banda del canal de la tecnología a medir [20]. Para obtener cifras representativas en términos de promedios estadísticos, se tomó un tiempo de 48h para cada uno los intervalos de medición, tiempo suficiente de acuerdo a la cantidad de muestras necesarias para alcanzar un intervalo de confianza deseado [22]. La campaña de medición se realizó durante diez meses en total, desde Marzo hasta Diciembre de 2012. La configuración de la medición se muestra en la Figura 1 y las especificaciones técnicas de los dispositivos usados se pueden observar en la Tabla 1. Como se espera, el analizador de espectro proporciona la detección basada en energía a fin de indicar si las señales están presentes o ausentes.

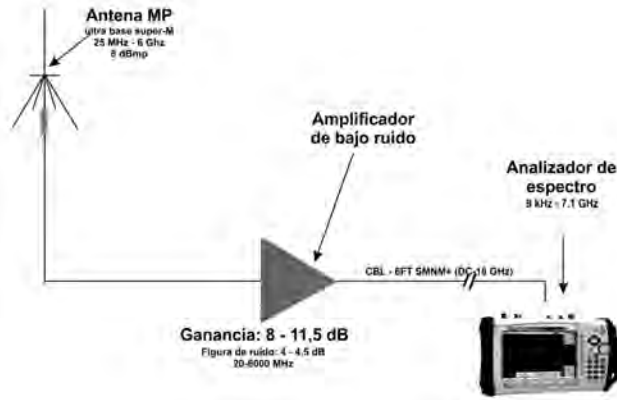


Figura 1: Configuración de las mediciones

Tabla 1: Especificaciones de los equipos de medida.

Equipos	Especificaciones	
	Rango de frecuencia	Referencia
Antena tipo discono	25 MHz - 6 GHz	Super-M Ultra Base
Cable de banda ancha	DC - 18 GHz	CBL - 6FT SMNM+
Amplificador de bajo ruido	20 MHz - 8 GHz	ZX60 - 8008E - S+
Analizador de espectro	9 KHz - 7.1 GHz	MS2721B Anritsu

A continuación se describen las variables características que se consideraron en este estudio [20].

2.1 Frecuencia

La ocupación del espectro se midió en el intervalo de 54MHz a 6 GHz. El *span* para cada medición fue menor a 100MHz y fue calculado a partir de (1, 2) cuando la tecnología a medir es conocida, con el fin de garantizar un estimado preciso de ocupación.

$$AB_T > f_b \tag{1}$$

$$f_b = \frac{SPAN}{pps - 1} \tag{2}$$

Donde AB_T es el ancho de banda del canal de la tecnología a medir, f_b es el *bin* de frecuencia y pps es el número de puntos por *span* del analizador, que para este caso es 551. Dichos segmentos menores a 100MHz permitieron escoger a $RBW \leq AB_T$ y el cual estuvo alrededor de $3KHz \leq RBW \leq 100KHz$, con tiempos de barrido que oscilaron entre 290 milisegundos y 5.124 segundos, lo que para 48h de medición conlleva a obtener entre 33724 y 595863 trazas de medida. Por ejemplo, para un *span* de 50 MHz con un RBW de 3KHz, por lo menos tres muestras de frecuencia están contenidas en un solo *bin* del analizador de espectro. Separaciones de *bin* de frecuencia menores que el ancho de banda del canal, garantizan la detección de la señal.

2.2 Localización

Todas las mediciones se llevaron a cabo en la terraza (octavo piso) del edificio administrativo de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá-Colombia). Las coordenadas son las siguientes: latitud = $4^{\circ}37'4''$ norte, longitud = $74^{\circ}3'7''$ Oeste, altitud = 2641 metros. Es importante mencionar que el lugar de las mediciones está rodeado por varios transmisores RF, correspondientes a diferentes servicios de telecomunicaciones. La Figura 2 muestra la ubicación exacta de la parte superior del edificio donde se llevaron a cabo las mediciones (forma cuadrada). Las estrellas alrededor, representan las edificaciones de una altura considerable que obstruyen la línea de vista de la recepción omnidireccional. Las áreas de color blanco y gris en el mapa, indican que no hay obstrucción en la línea de vista.

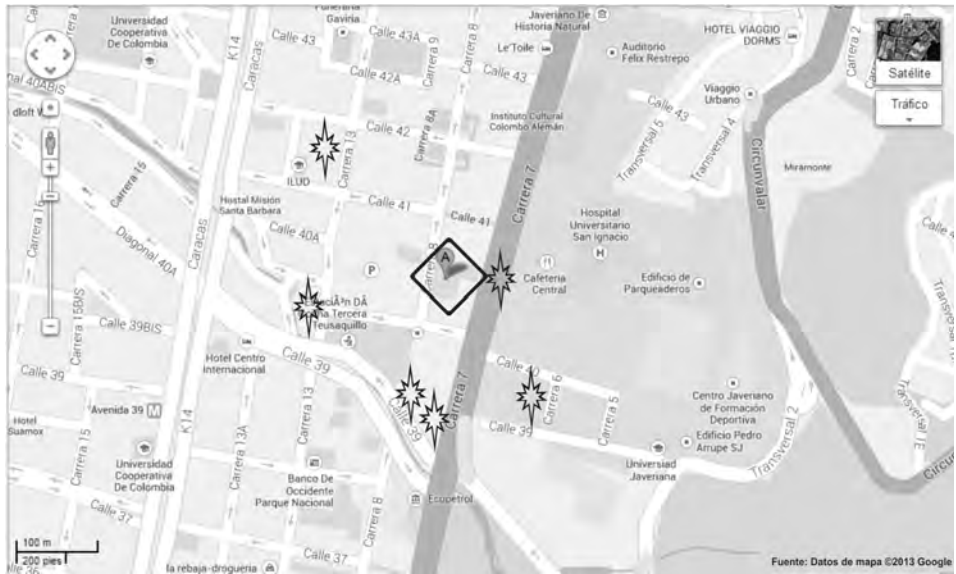


Figura 2: Alrededores del área de medición (Mapa)

2.3 Amplitud

Los niveles de potencia se ajustaron en cada segmento del analizador de espectro sin exceder los niveles de señal que permite el analizador; pues de lo contrario se producen espurios mayores que la variación promedio de piso de ruido, para cada medida. Estudios de espectro previos [20], sugieren que un buen criterio para configurar el rango dinámico de un analizador de espectro, al que se le conecta un amplificador a la entrada, es ajustar los niveles de potencia para que las señales se encuentren dentro del Margen Dinámico Libre de Espurios (SFDR), el cual se calcula como:

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

Donde, P_I es la potencia de la señal a la entrada y P_N es la potencia de ruido equivalente a la entrada. El objetivo era tener tanta sensibilidad como fuera posible en el receptor con el uso del amplificador, evitando que los niveles de espurios pudieran ser detectados como actividad de un

usuario primario (usuario licenciado). El ruido promedio del instrumento para cada medida fue determinado con la ubicación de una impedancia de 50Ω a la entrada del analizador de espectro, con una atenuación de 0 dB, detección RMS y un tiempo de medición de 6h. Los niveles de decisión (λ) se presentan en la Tabla 2, y se encontraron a partir de (4) con una Probabilidad de Falsa Alarma (Pfa) del 1 % [23] y [24]:

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

donde $\Gamma(\cdot)$ y $\Gamma(\cdot, \cdot)$ son la función gamma completa e incompleta, respectivamente y m es el producto del tiempo por el ancho de banda.

Tabla 2: Umbral de detección por banda

Banda	Nivel de ruido promedio detectado (dBm)	Nivel de decisión promedio (dBm)
54 - 500 MHz	-115 dBm	-111 dBm
500 - 1000 MHz	-113 dBm	-109 dBm
1000 - 1500 MHz	-112 dBm	-108 dBm
1500 - 2800 MHz	-111 dBm	-108 dBm
2800 - 3100 MHz	-110 dBm	-108 dBm
3100 - 3550 MHz	-109 dBm	-106 dBm
3550 - 3950 MHz	-110 dBm	-107 dBm
3950 - 4200 MHz	-109 dBm	-106 dBm
4200 - 4700 MHz	-108 dBm	-104 dBm
4700 - 4950 MHz	-109 dBm	-105 dBm
4950 - 5350 MHz	-107 dBm	-104 dBm
5350 - 5650 MHz	-108 dBm	-105 dBm
5650 - 5800 MHz	-107 dBm	-104 dBm
5800 - 6000 MHz	-105 dBm	-102 dBm

Aunque sería ambicioso indicar que los siguientes resultados corresponden a mediciones ideales, cabe mencionar que es amplio el intervalo de frecuencias detectadas. Además, en las bandas de frecuencia detectadas (y de acuerdo a las políticas de asignación de espectro en Colombia), las mediciones presentadas incluyen un gran número de transmisores de diversa

naturaleza, desde sistemas de banda estrecha hasta de banda ancha y desde señales débiles recibidas alrededor del piso de ruido hasta señales fuertes.

3 Resultados

En esta sección, las mediciones se clasifican según el tipo de tecnología encontrada en las diferentes bandas de espectro asignado. La asignación de espectro en Colombia es regulada por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (Ministerio TIC), con la asesoría de la Agencia Nacional del Espectro (ANE). La Figura 3 muestra una estimación global del ciclo de trabajo (duty cycle) desde 54MHz a 6GHz. Para cada frecuencia medida, el ciclo de trabajo se calcula como el cociente entre el número de muestras de la Densidad Espectral de Potencia (DEP) correspondientes a canales ocupados (tiempo en el que los canales son usados por sus usuarios) y el número total de muestras de DEP capturadas durante el periodo de medida. Para cada frecuencia, esta métrica representa la fracción de tiempo durante la cual el canal permanece ocupado. Para una determinada banda, el ciclo de trabajo promedio se calcula como la media aritmética de los ciclos de trabajo obtenidos para las diversas frecuencias medidas dentro de dicha banda [20]. En la Figura 3, es evidente que el espectro está siendo subutilizado en esta área.

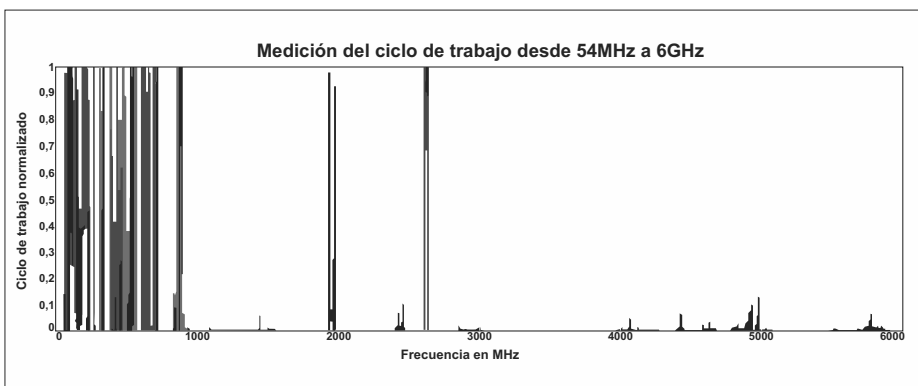


Figura 3: Ciclo de trabajo del rango completo de espectro medido durante la campaña

La Figura 4 resume las estadísticas de ocupación promedio de espectro, en función de los servicios de cada banda. Los resultados obtenidos muestran que algunas bandas de espectro están sujetas a moderados niveles de utilización (espectro que es usado; pero no durante todo el tiempo), mientras que algunas otras exhiben usos escasos y, en algunos casos, prácticamente no existe uso.

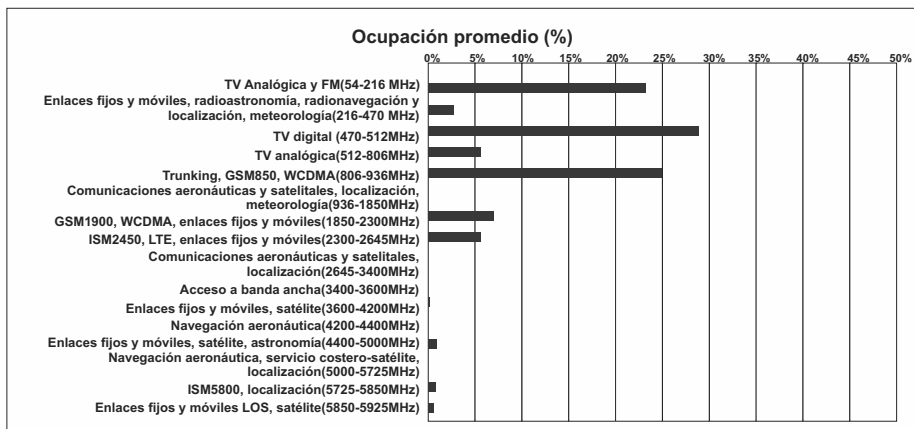


Figura 4: Porcentaje del ciclo de trabajo de acuerdo a los servicios ofrecidos en las bandas medidas

A continuación se analiza el ciclo de trabajo de algunas bandas específicas. La banda FM, que se encuentra entre 88-108MHz (Figura 5), presenta niveles de ocupación espectral del 78%. Por otra parte, como se observa en la Figura 6, los servicios de televisión analógica (54-88MHz, 174-216MHz y 512-806MHz) presentan niveles de ocupación de espectro del 12%.

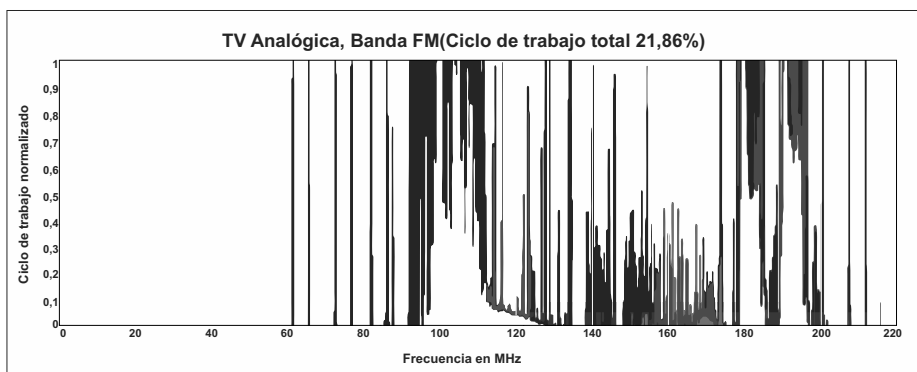


Figura 5: Ciclo de trabajo normalizado de 54MHz a 216MHz

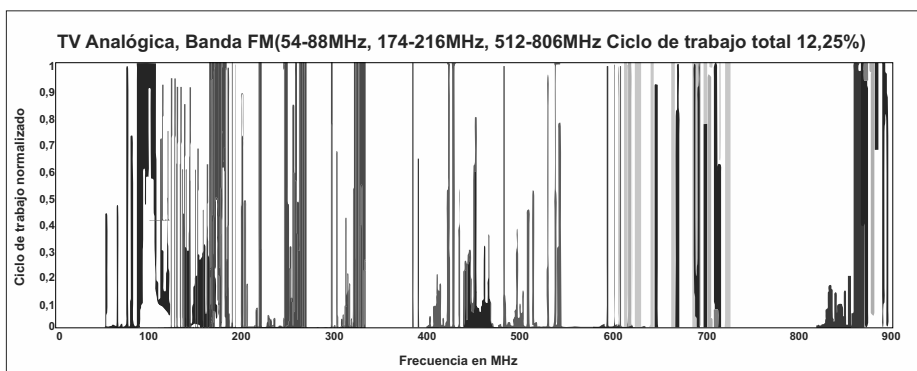


Figura 6: Ciclo de trabajo normalizado para todas las bandas de TV analógica

Como se observa en la Figura 7, la banda de televisión digital (entre 470 y 482MHz) presenta una ocupación espectral de aproximadamente el 100 %. No obstante, hay muchos canales individuales desde 482 hasta 512MHz que exhiben niveles bajos de ocupación, lo que conduce a un ciclo de trabajo total del 28.5 % para toda la banda que está entre 470 y 512MHz.

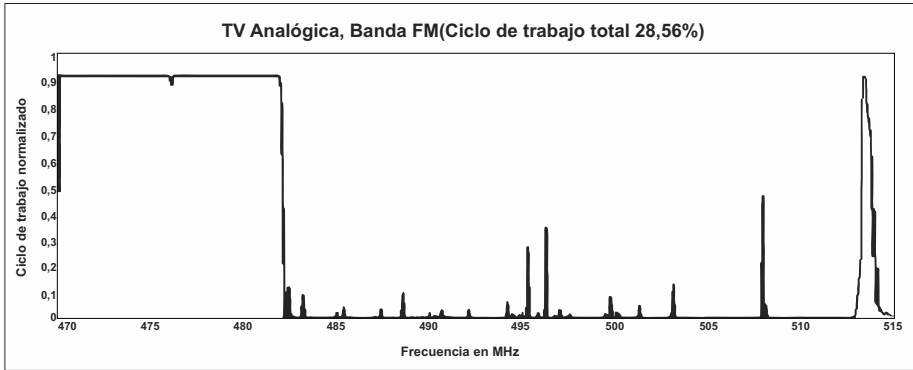


Figura 7: Ciclo de trabajo normalizado en la banda de TV digital

Respecto a la banda del espectro asignada para el enlace ascendente de la banda GSM850, que se encuentra entre 824 y 849MHz (Figura 8), 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 (Figura 9), 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.

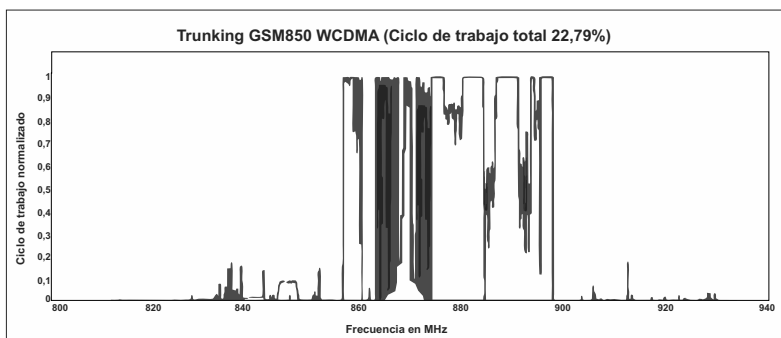


Figura 8: Ciclo de trabajo normalizado de 800MHz a 940MHz

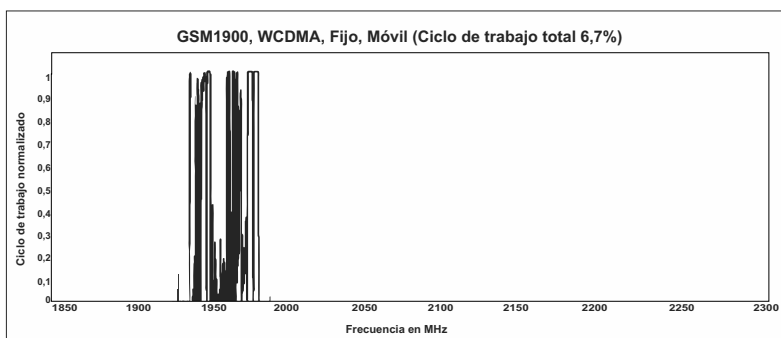


Figura 9: Ciclo de trabajo normalizado de 1850MHz a 2300MHz

En la Figura 10, la banda ISM (2400-2500MHz) presenta una ocupación de espectro de sólo el 4%. En esta banda en particular, se miden señales de baja potencia, resultado de la atenuación debida a suelos y paredes; y de los obstáculos en general. Dicha baja potencia es consecuencia de la ubicación en ambientes interiores de los *routers* Wi-Fi. Adicionalmente, en la Figura 10, se puede observar que la tecnología LTE, cuya banda fue asignada recientemente en Colombia (2500-2525MHz y 2620-2645MHz), alcanza niveles actuales de ciclo de trabajo del 42%. Es importante mencionar que este ciclo de trabajo para LTE lo aporta la banda superior (84%), ya que la banda inferior está prácticamente vacía.

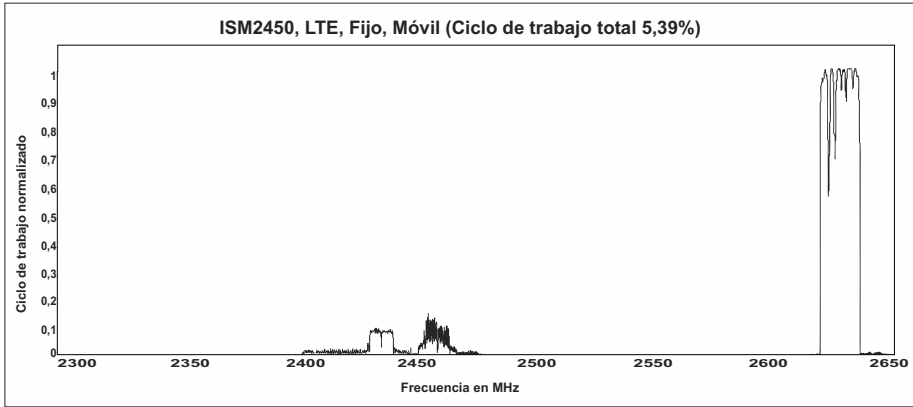


Figura 10: Ciclo de trabajo normalizado de 2300MHz a 2650MHz

4 Conclusiones

En el área de las comunicaciones inalámbricas, este trabajo aporta un conjunto de medidas que demuestran que el espectro en zonas urbanas de Bogotá está altamente subutilizado, por parte de los usuarios primarios, dentro del rango de frecuencias de 54MHz a 6GHz. Lo anterior, fomenta el estudio a nivel técnico y regulatorio de tecnologías de acceso dinámico al espectro como la Radio Cognitiva, que la conlleven a su futuro despliegue. Es así, que el uso del espectro para frecuencias menores a 1GHz es modesto, para frecuencias entre 1 y 2 GHz es bajo y para frecuencias entre 3 y 6 GHz es extremadamente bajo. Adicionalmente, se requieren cambios en las actuales políticas de asignación permanente del espectro y la implementación de regulaciones, que permitan que prosperen en un futuro cercano las tecnologías de acceso dinámico al espectro.

Las bandas de frecuencia medidas desde 3 a 6 GHz son de particular interés debido a los considerablemente bajos niveles de utilización. Por tanto, se recomienda al Ministerio Colombiano de TIC desarrollar un modelo de gestión de subasta de este espectro, que estimule a los proveedores de servicios de comunicaciones inalámbricas, para operar en dichas bandas.

Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Ingeniero Andrés Molina por su colaboración. Este proyecto es financiado por el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Referencias

- [1] F. H. Sanders, B. J. Ramsey, and V. S. Lawrence, “Broadband spectrum survey at Los Angeles, California,” *Dept. of Commerce National Telecommunications and Information Administration USA*, pp. 1–105, 1997. 129
- [2] F. H. Sanders, “Broadband spectrum surveys in Denver, CO, San Diego, CA, and Los Angeles, CA: methodology, analysis, and comparative results,” *Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC 1998)*, vol. 2, pp. 988–993, 1998. 129
- [3] J. Do, D. M. Akos, and P. K. Enge, “L and S bands spectrum survey in the San Francisco bay area,” *Proc. Position Location and Navigation Symposium (PLANS 2004)*, pp. 566–572, 2004. 129
- [4] M. Biggs, A. Henley, and T. Clarkson, “Occupancy analysis of the 2.4 GHz ISM band,” *IEE Proceedings - Communications*, vol. 151, no. 5, pp. 481–488, 2004. 129
- [5] S. S. Company(SSC), “Spectrum occupancy measurements,” *SSC reports*, 2004. [Online]. Available: <http://www.sharedspectrum.com/measurements> 129
- [6] A. Petrin and P. G. Steffes, “Analysis and comparison of spectrum measurements performed in urban and rural areas to determine the total amount of spectrum usage,” *Proc. International Symposium on Advanced Radio Technologies (ISART 2005)*, pp. 9–12, 2005. 129
- [7] S. W. Ellingson, “Spectral occupancy at VHF: implications for frequency-agile cognitive radios,” *Proc. IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC 2005 Fall)*, vol. 2, pp. 1379–1382, 2008. 129
- [8] M. A. McHenry, P. A. Tenhula, D. McCloskey, D. A. Roberson, and C. S. Hood, “Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal,” *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum, Boston, Massachusetts*, 2006. 129

- [9] D. A. Roberson, C. S. Hood, J. L. LoCicero, and J. T. MacDonald, "Spectral occupancy and interference studies in support of cognitive radio technology deployment," *Proceedings of the 1st IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks (SDR@N06)*, pp. 26–35, 2006. 129
- [10] S. D. Jones, E. Jung, X. Liu, N. Merheb, and I. J. Wang, "Characterization of spectrum activities in the U.S. public safety band for opportunistic spectrum access," *Proc. 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007)*, pp. 137–146, 2007. 129
- [11] M. Wellens, J. Wu, and P. Mahonen, "Evaluation of spectrum occupancy in indoor and outdoor scenario in the context of cognitive radio," *Proc. of International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), Orlando, FL, USA*, pp. 420–427, 2007. 129
- [12] V. Blaschke, H. Jakel, T. Renk, C. Klock, and F. K. Jondral, "Occupation measurements supporting dynamic spectrum allocation for cognitive radio design," *Proc. of International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), Orlando, FL, USA*, pp. 50–57, 2007. 129
- [13] J. Mitola, "Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio," *Ph.D. Thesis, KTH (Royal Institute of Technology)*, 2000. 129
- [14] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005. 129
- [15] M. Wellens, A. D. Baynast, and P. Mahonen, "Exploiting historical spectrum occupancy information for adaptive spectrum sensing," *IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC)*, no. 2, pp. 717–722, 2008. 129
- [16] M. H. e. a. Islam, "Spectrum Survey in Singapore: Occupancy Measurements and Analyses," *Proc. 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008)*, pp. 1–7, 2008. 129
- [17] D. Chen, S. Yin, Q. Zhang, M. Liu, and S. Li, "Mining spectrum usage data: a large-scale spectrum measurement study," *Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking, Beijing, China*, 2009. 129

- [18] K. Patil, K. Skouby, A. Chandra, and R. Prasad, "Spectrum occupancy statistics in the context of cognitive radio," *14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 1–5, 2011. 129
- [19] M. Wellens and P. Mahonen, "Lessons learned from an extensive spectrum occupancy measurement campaign and a stochastic duty cycle model," *Mobile Networks and Applications*, vol. 15, no. 3, pp. 461–474, 2010. 130
- [20] M. Lopez and 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. 130, 131, 133, 135
- [21] M. T. R. de Colombia, "Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias," 2010. 130
- [22] ITU, "UIT-R SM.1880. Spectrum Occupancy Measurement Technical Report," *International Telecommunications Union*, 2011. 130
- [23] F. Digham, M. S. Alouini, and M. Simon, "On the Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 1, pp. 21–24, 2007. 134
- [24] R. Ferro, L. Pedraza, and C. Hernandez, "Maximización del Throughput en una red de radio cognitiva basado en la probabilidad de falsa alarma," *Tecnura*, vol. 15, no. 30, pp. 64–70, 2011. 134