



Ingeniería. Investigación y Tecnología

ISSN: 1405-7743

iit.revista@gmail.com

Universidad Nacional Autónoma de

México

México

Astaiza-Hoyos, Evelio; Bermúdez-Orozco, Héctor Fabio; Campo-Muñoz, Wilmar Yesid  
Detección de usuarios primarios basados en muestreo sub-NYquist mediante  
dispositivos de radio cognitivo multiantena en entornos multibanda  
Ingeniería. Investigación y Tecnología, vol. XVIII, núm. 4, octubre-diciembre, 2017, pp.  
399-409  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40453343005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



# Detección de usuarios primarios basados en muestreo sub-Nyquist mediante dispositivos de radio cognitivo multiantena en entornos multibanda

*Primary user detection based on sub-Nyquist sampling using cognitive radio multi-antenna device on multi-band environment*

---

Astaiza-Hoyos Evelio

Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Facultad de Ingeniería

Grupo de Investigación GITUQ

Correo: eastaiza@uniquindio.edu.co

Bermúdez-Orozco Héctor Fabio

Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Facultad de Ingeniería

Grupo de Investigación GITUQ

Correo: hfbermudez@uniquindio.edu.co

Campo-Muñoz Wilmar Yesid

Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Facultad de Ingeniería

Grupo de Investigación GITUQ

Correo: wycampo@uniquindio.edu.co

## Resumen

En este artículo se propone un nuevo algoritmo basado en muestreo sub-Nyquist para la detección de *Usuarios Primarios* (PU) en entornos multibanda que se plantea para *Dispositivos de Radio Cognitivo* (CRD) multiantena. De esta manera se aborda y aporta una solución al problema de detección de espectro en entornos multibanda donde se trabaja con una gran cantidad de muestras de la señal cuando estas muestras se obtienen a tasas iguales o superiores a la tasa de Nyquist, lo cual genera grandes tiempos de detección, altos consumos de energía y la necesidad de altas capacidades de procesamiento en los CRD. En este escenario multibanda multiantena, se obtienen expresiones cerradas para las probabilidades de detección, omisión de detección y falsa alarma. Los resultados de simulación demuestran que el algoritmo propuesto permite realizar la detección de espectro de manera eficiente, mejorando el desempeño de la detección en función de la probabilidad de detección y de las características operacionales del receptor respecto a otros algoritmos propuestos de detección de usuarios primarios en escenarios de banda estrecha y banda ancha basados en muestreo Nyquist y Sub-Nyquist.

**Descriptores:** detección de energía, muestreo Sub-Nyquist, radio cognitivo multiantena, detección de espectro de banda ancha, señal multibanda.

## Abstract

This paper presents a new algorithm based on sub-Nyquist sampling for detecting Primary Users (PU) in multiband environments for multi-antenna Cognitive Radio Devices (CRD). It addresses and provides a solution to spectrum sensing problem in multi-band environments, where it works with a lot of signal samples when these samples are obtained at rates equal to or greater than the Nyquist rate, which generates large detection times, high energy consumption and the need for high processing capabilities in the CRD. In this scenario multi-band multi-antenna, closed-form expressions for the probabilities of detection, failure detection and false alarm are obtained. Simulation results show that the proposed algorithm allows to do efficiently the spectrum sensing, improving the performance of sensing as a function of the detection probability and operational characteristics of the receiver, relative to other spectrum sensing algorithms proposed for narrowband and wideband spectrum sensing based on Sub-Nyquist and Nyquist Sampling.

**Keywords:** energy detection, Sub-Nyquist sampling, multi-antenna cognitive radio, wideband spectrum sensing, multi-band signal.

## INTRODUCCIÓN

Radio Cognitivo (CR) (Mitola III, 2000) se propone como una posible solución al problema de sub-utilización de los recursos espectrales, permitiendo a los usuarios cognitivos (*Usuarios Secundarios-SU*) acceder a las sub-bandas asignadas a PU (*Usuarios con derechos de uso*) que se encuentran temporalmente disponibles. En este escenario, los *Dispositivos de Radio Cognitivo* (CRD) requieren efectuar permanentemente la detección de actividad de los PU en el canal de comunicaciones de la banda de interés bajo condiciones de *Relación Señal a Ruido* (SNR) tan bajas como sea posible (i.e. del orden de -20dB para el estándar IEEE 802.22). En este contexto, uno de los principales retos que se enfrentan en CR es la implementación de la función de *Detección de Usuarios Primarios* (PUD) en escenarios de banda ancha, minimizando la tasa de muestreo requerida, garantizando alta probabilidad de detección y baja probabilidad de falsa alarma en condiciones de baja SNR. Por lo anterior, buscando mejorar el desempeño de la PUD en escenarios de banda ancha basado en muestreo Sub-Nyquist en términos de las probabilidades mencionadas, se propone explotar la diversidad espacial en CRD multiantena.

Los sistemas de múltiples antenas son ampliamente utilizados en la actualidad dada su eficacia en múltiples aspectos como incremento de la capacidad y mejor desempeño en canales con desvanecimiento (Goldsmith, 2005). De hecho, el uso de este tipo de sistemas en CR es uno de los posibles enfoques para realizar la PUD explotando las observaciones realizadas en el dominio espacial, se ha propuesto en Pandharipande & Linnartz (2007); Wang *et al.* (2010); Pourgharehkhān *et al.* (2015) y Li *et al.* (2015). En Pandharipande & Linnartz (2007), los autores han demostrado la eficiencia de la PUD en sistemas de múltiples antenas basado en *Detección de*

*Energía* (ED) comparado con el caso de única antena. En Wang *et al.* (2010), se propone una prueba generalizada de máxima verosimilitud para realizar la PUD en sistemas de múltiples antenas. En este caso, la señal del PU se asume como una señal determinista no conocida y evalúa el desempeño del algoritmo propuesto en canal Gaussiano. En Pourgharehkhān *et al.* (2015), se estudia el problema de PUD en sistemas con múltiples antenas, asumiendo correlación entre canales de diferentes antenas bajo incertidumbre de calibración del arreglo de antenas, el cual presenta desempeños similares a los obtenidos por sistemas calibrados incluso a SNRs bajas. En Li *et al.* (2015), se estudia el problema de PUD en sistemas con múltiples antenas, basado en el mayor valor propio de la señal en un escenario donde el PU transmite a múltiples valores de potencia, identificando de manera inicial la presencia de PU y luego detectando el nivel de potencia de operación, evaluando su desempeño. En general, los mecanismos de PUD mencionados anteriormente se implementan utilizando algoritmos que realizan la digitalización de la señal a tasas iguales o superiores a la tasa de Nyquist, por lo tanto, como se indicaba anteriormente, las plataformas *hardware* que soportarán los algoritmos de PUD requerirán altas capacidades de procesamiento (Mishali, *et al.*, 2011).

En este contexto, uno de los principales retos a los que se enfrenta CR es la implementación eficiente de la PUD en escenarios de banda ancha minimizando la tasa de muestreo requerida, garantizando una alta probabilidad de detección y bajas probabilidades de omisión de detección y falsa alarma. Para superar este reto se propone un nuevo método, este se basa en CS (Candes *et al.*, 2006; Baraniuk, 2007; Hoyos *et al.*, 2015) y la detección de energía con base en la estimación de la matriz de la señal recibida en el dominio disperso, obteniendo expresiones cerradas para cada probabilidad en

el escenario multibanda multiantena. El rendimiento del algoritmo propuesto se compara con el rendimiento de los algoritmos de PUD en escenarios de banda estrecha en sistemas de múltiples antenas que digitalizan la señal a la tasa de Nyquist (Li *et al.*, 2015; Mishali *et al.*, 2011; Candes *et al.*, 2006; Baraniuk, 2007) y con los algoritmos de detección de espectro de banda ancha en los sistemas de antena individuales basados en CS (Hoyos *et al.*, 2015).

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección dos se plantea el modelo del sistema, en la sección tres se describe el método propuesto para realizar la PUD en escenarios de banda ancha en sistemas de múltiples antenas basado en muestreo sub-Nyquist, en la siguiente sección se presenta la evaluación del desempeño del método propuesto contrastando las métricas de evaluación contra las obtenidas del algoritmo de detección de energía secuencial que opera a tasas de muestreo iguales o superiores a la de Nyquist y contra otros métodos de PUD local basados en detección compresiva, y finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones del estudio realizado.

### MODELO DEL SISTEMA

Considerando un dispositivo multiantena de CR que opera sobre una multibanda (licenciada) con un ancho de banda total de  $B$  Hz, el cual se encuentra dividido en sub-bandas no traslapadas de igual ancho de banda  $b$ , equivalente a  $B/k$  Hz por canal como se muestra en la figura 1.

Asumiendo que las muestras de la señal multibanda son variables aleatorias independientes que siguen una distribución normal de media cero y varianza  $\sigma_s(N(0, \sigma_s))$ , presunción que es válida para cualquier señal multibanda en donde cada portadora de una sub-banda se modula independientemente por flujos de datos; y que las muestras de ruido en cada antena son variables aleatorias normalmente distribuidas, independientes, de media cero y varianza  $\sigma_n(N(0, \sigma_n))$ , la señal recibida en la  $q$ -ésima antena se puede expresar como se indica en (1).

$$X_{ij}(n) = h_{ij} s_i(n) + W_{ij}(n) \quad (1)$$

donde  $X_{ij}(n)$  es la  $n$ -ésima componente de la señal recibida por el SU en la  $j$ -ésima sub-banda con  $j = 1, 2, \dots, k$  y en la  $i$ -ésima antena con  $i = 1, 2, \dots, q$ ,  $h_{ij}$  representa la respuesta del canal en la  $j$ -ésima sub-banda y en la  $i$ -ésima antena,  $s_i(n)$  es la  $n$ -ésima componente de la señal transmitida por el  $j$ -ésimo PU sobre la  $j$ -ésima

sub-banda y recibida por la  $i$ -ésima antena del SU y  $W_{ij}(n)$  es la  $n$ -ésima componente del ruido en la  $j$ -ésima sub-banda y en la  $i$ -ésima antena.

El problema de PUD en la  $j$ -ésima sub-banda puede formularse como un problema de comprobación de hipótesis estadística en el cual se debe escoger entre la hipótesis  $H_{0j}$  la cual indica que la  $j$ -ésima sub-banda se encuentra disponible, y la hipótesis  $H_{1j}$  la cual indica que la  $j$ -ésima sub-banda se encuentra ocupada, lo anterior puede expresarse con (2).

$$\begin{cases} H_{0j} : X_j = W_j \\ H_{1j} : X_j = h_j s_j^* + W_j \end{cases} \quad (2)$$

donde  $X_j \in \mathbb{R}^{q \times p}$  es la matriz de la señal recibida por el SU en la  $j$ -ésima sub-banda, con  $q$  igual a la cantidad de antenas en el receptor cognitivo y  $p$  igual a la cantidad de muestras tomadas en cada antena por sub-banda,  $W_j \in \mathbb{R}^{q \times p}$  es la matriz que representa las componentes de ruido blanco presente en la  $j$ -ésima sub-banda,  $h_j \in \mathbb{R}^{q \times 1}$  es el vector que representa la respuesta del canal en la  $j$ -ésima sub-banda, finalmente  $s_j^* \in \mathbb{R}^{1 \times p}$  es el vector que representa la señal transmitida por el  $j$ -ésimo PU sobre la  $j$ -ésima sub-banda, donde el superíndice \* denota transpuesto.

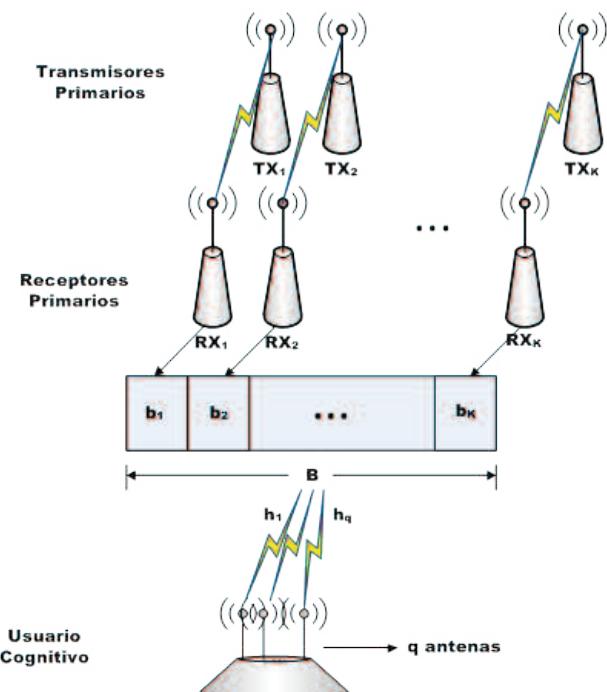


Figura 1. Escenario de PUD de banda ancha con usuario cognitivo de múltiples antenas

### MÉTODO PROUESTO DE PUD DE ESPECTRO DE BANDA ANCHA

El método de PUD de banda ancha multitantra propuesto se ilustra en la figura 2. Inicialmente la señal multibanda  $x(t)$  se recibe por cada una de las antenas del receptor cognitivo, la versión en cada antena se denota por  $x_i(t)$  con  $i = 2, \dots, q$ , posteriormente la señal captada por cada antena se muestrea con el *Random Demodulator* (RD) (Tropp *et al.*, 2010), donde la operación de muestreo se implementa a través de la matriz de muestreo  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ , donde  $m < n$  con  $n$  que representa la cantidad de muestras de la señal cuando se realiza el muestreo a la tasa de Nyquist y  $m$  representa la cantidad de muestras Sub-Nyquist tomadas con el RD, obteniendo el vector de muestras  $y_i \in \mathbb{R}^m$ , donde  $y_i = Ax_i$ . Posteriormente, el bloque de extracción de características y estimación realiza la estimación de la aproximación dispersa del vector  $x_i(t)$  que se representa como  $x_i[n] \in \mathbb{R}^n$ . Luego, en el bloque de detección conjunta realiza la detección Espacios en Blanco (WS) en la multibanda basado en la energía en cada sub-banda de cada vector de señal estimado por cada antena  $x_i[n] \in \mathbb{R}^n$ , fi-

nalmente, se toma la decisión de ocupación final en la multibanda mediante la aplicación de la regla OR entre las decisiones parciales obtenidas en el paso anterior.

A continuación se describen las funciones realizadas por los bloques ilustrados en la figura 2.

### MUESTREO

El muestreo de la señal multibanda  $x_i(t)$ , se realiza mediante el RD, puede considerarse como un nuevo tipo de sistema de muestreo, el cual puede usarse para realizar la adquisición de señales dispersas limitadas en banda.

Como se muestra en el diagrama de la figura 3, la señal de entrada al RD se multiplica por una secuencia pseudo aleatoria de alta tasa, la cual dispersa la energía de los tonos sobre el ancho de banda total ocupado por la secuencia, posteriormente, se aplica filtraje *anti-aliasing* para finalmente muestrear la señal a una tasa inferior a la tasa de Nyquist. El proceso de demodulación (multiplicación por la secuencia pseudo aleatoria) garantiza que cada tono presente en la señal de entrada tenga una “firma” diferente dentro de la banda pasante del filtro; dado que la señal de entrada al RD se encuentra conformada solamente por algunos tonos, es posible identificar los tonos y sus amplitudes a partir de las muestras de baja tasa.

Del proceso de muestreo sub-Nyquist, se obtienen muestras de la forma ilustrada por (3).

$$y_i = Ax_i \quad (3)$$

Donde  $A$  es la matriz de detección de tamaño  $m \times n$ ,  $y_i \in \mathbb{R}^m$  es el vector de mediciones y  $x_i \in \mathbb{R}^n$  es el vector que representa la señal multibanda  $k$ -dispersa (Hoyos *et al.*, 2015), por lo tanto, las entradas de  $y_i$  son las muestras sub-Nyquist de  $x_i$ .

### EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS Y ESTIMACIÓN

La característica de la señal que se utiliza para realizar la PUD es la energía por sub-banda, razón por la cual, el enfoque utilizado se basa en la estimación de la señal dispersa presente en la multibanda. El en-

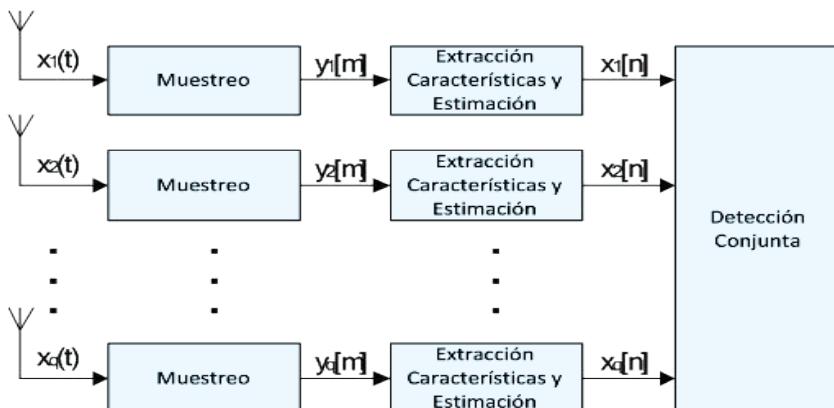


Figura 2. Diagrama en bloques de la PUD de banda ancha con usuario cognitivo de múltiples antenas

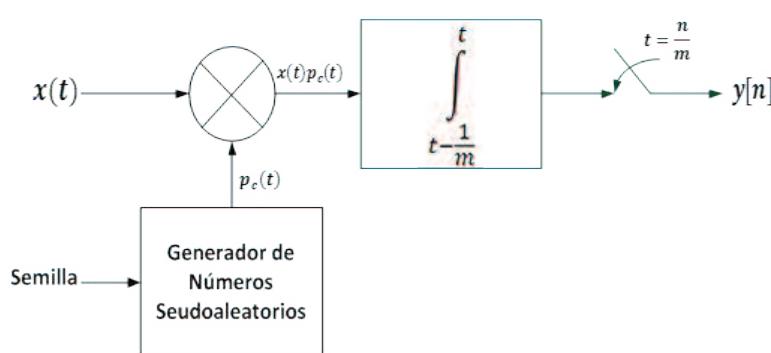


Figura 3. Diagrama en bloques del demodulador aleatorio

foque natural, desde el cual se aborda el problema de estimación es encontrar la solución dispersa de  $y_i = Ax_i$  resolviendo el problema de optimización planteado en (4).

$$\min_{x_i} \|x_i\|_0 \text{ sujeto a } y_i = Ax_i \quad (4)$$

Sin embargo, el problema planteado en (4) es un problema combinatorio que en general es *NP-Hard* (Natarajan, 1995) y el simple hecho de trabajar con todos los soportes de cardinalidad  $k$  se convierte en un problema computacional intratable, al reemplazar la norma  $\ell_0$  por la norma  $\ell_1$  el problema se convierte en el planteado en (5).

$$\min_{x_i} \|x_i\|_1 \text{ sujeto a } y_i = Ax_i \quad (5)$$

Para resolver el problema planteado en (5) se utiliza el algoritmo *CoSamp* propuesto en (Gnedenko & Kolmogorov, 1954), obteniendo de esta manera la estimación  $\hat{x}_i$  de la señal presente en el canal a partir de las muestras  $y_i$ .

#### DETECCIÓN CONJUNTA

La detección conjunta de la ocupación de cada sub-banda se realiza en dos etapas:

- 1) Se decide la ocupación preliminar en función de la energía presente en cada sub-banda de la señal estimada en cada antena.
- 2) Se toma la decisión conjunta de ocupación final por sub-banda de acuerdo con la aplicación de regla OR entre las decisiones preliminares obtenidas para cada antena.

Para realizar la detección de energía para cada sub-banda y para cada antena (etapa 1), se compara la energía de la señal recibida con un umbral de detección, decidiendo de esta forma la ocupación de una sub-banda. Por lo tanto, la energía presente en cada sub-banda puede calcularse de acuerdo con (6).

$$\varepsilon_{i,j}(f) = |h_i|^2 \sum_{Sbi,j} |\hat{X}_i[f]|^2 \quad (6)$$

donde

- $\varepsilon_{i,j}$  = la energía en la sub-banda  $j$ -ésima de la  $i$ -ésima antena sobre una secuencia de  $N$  muestras
- $Sbi_{i,j}$  = la sub-banda  $j$ -ésima de la  $i$ -ésima antena
- $h_i$  = la respuesta del canal en la  $i$ -ésima antena y
- $\hat{X}_i[f]$  = la señal estimada en el canal en la  $i$ -ésima antena

Luego, si la energía en la sub-banda  $j$ -ésima de la  $i$ -ésima antena es mayor al umbral de decisión  $T_{h_{i,j}}(\varepsilon_{i,j} > T_{h_{i,j}})$  la decisión tomada es  $H_{1,j}$  (sub-banda ocupada) en caso contrario se decide  $H_{0,j}$  (sub-banda libre - WS).

Las probabilidades de detección  $P_{d_j}$ , omisión de detección  $P_{md_j}$  y falsa alarma  $P_{f_j}$  en la sub-banda  $j$ -ésima se definen como se indica en (7), (8) y (9).

$$P_{d_j} = P(H_{1,j} | H_{1,j}) \quad (7)$$

$$P_{md_j} = P(H_{0,j} | H_{1,j}) = 1 - P_{d_j} \quad (8)$$

$$P_{f_j} = P(H_{1,j} | H_{0,j}) \quad (9)$$

Entendiendo como probabilidad de detección aquella probabilidad de detección correcta de ocupación de una sub-banda o de presencia de señal de un PU en una sub-banda (decidir  $H_{1,j}$  cuando  $H_{1,j}$  es verdadero), por probabilidad de falsa alarma se entiende la probabilidad asociada a detectar señal de un PU cuando en una sub-banda realmente hay un espacio en blanco (decidir  $H_{1,j}$  cuando  $H_{0,j}$  es verdadero) y por probabilidad de omisión de detección se entiende aquella probabilidad asociada a detectar un espacio en blanco cuando en una sub-banda hay presencia de señal de un PU (decidir  $H_{0,j}$  cuando  $H_{1,j}$  es verdadero).

De acuerdo con el teorema del límite central (Gnedenko y Kolmogorov, 1954), si el número de muestras es lo suficientemente grande ( $\geq 10$  en la práctica), las estadísticas (media y varianza) de  $\varepsilon_{i,j}$  asociadas a las hipótesis  $H_{0,j}$  y  $H_{1,j}$  son normalmente distribuidas asintóticamente y dadas por (10) y (11).

$$E(\varepsilon_{i,j}) = \begin{cases} 2N\sigma_{ni,j}^2 & : H_{0,j} \\ (SNR_{i,j} + N)\sigma_{ni,j}^2 & : H_{1,j} \end{cases} \quad (10)$$

$$Var(\varepsilon_{i,j}) = \begin{cases} 2N\sigma_{ni,j}^4 & : H_{0,j} \\ 2(2SNR_{i,j} + N)\sigma_{ni,j}^4 & : H_{1,j} \end{cases} \quad (11)$$

Con  $\sigma_{ni,j}^2$  que denota la energía del ruido en la  $i$ -ésima antena y  $j$ -ésima sub-banda y  $SNR_{i,j}$  denota la relación señal a ruido en la  $i$ -ésima antena y  $j$ -ésima sub-banda.

Luego, las probabilidades de detección y falsa alarma en la  $i$ -ésima antena y  $j$ -ésima sub-banda pueden expresarse como se indica en (12) y (13).

$$P_{d_{i,j}} = Q\left[ \frac{T_{h_{i,j}} - E(\varepsilon_{i,j} | H_{1,j})}{\sqrt{Var(\varepsilon_{i,j} | H_{1,j})}} \right] = Q\left[ \frac{T_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N)\sigma_{ni,j}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N)\sigma_{ni,j}^4}} \right] \quad (12)$$

$$P_{f_{i,j}} = Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - E(\varepsilon_{i,j} | H_{0,j})}{\sqrt{Var(\varepsilon_{i,j} | H_{0,j})}} \right] = Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - 2N\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2N\sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \quad (13)$$

donde

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (14)$$

Por lo tanto, el umbral de decisión  $T_{h_{i,j}}$  para un valor específico de  $P_{f_{i,j}}$  está dado por (15).

$$T_{h_{i,j}} = Q^{-1}(P_{f_{i,j}})^2 \sqrt{2N\sigma_{n_{i,j}}^4 + 2N\sigma_{n_{i,j}}^2} \quad (15)$$

Posteriormente, se procede a decidir de forma conjunta la ocupación por sub-banda mediante regla OR entre las decisiones preliminares en cada antena. De acuerdo con la regla de decisión OR, cuando al menos en una de las  $q$  versiones de la sub-banda (una versión por antena) se detecta ocupación, la decisión final es que la sub-banda se encuentra ocupada. Por lo tanto, las probabilidades de detección y falsa alarma por sub-banda finales se expresan con (16) y (17).

$$P_{d_j} = 1 - \prod_{i=1}^q (1 - P_{d_{i,j}}) \quad (16)$$

$$P_{f_j} = 1 - \prod_{i=1}^q (1 - P_{f_{i,j}}) \quad (17)$$

Luego, las probabilidades de detección  $P_{d_j}$ , omisión de detección  $P_{md_j}$  y falsa alarma  $P_{f_j}$  en la sub-banda  $j$ -ésima se definen de por (18), (19) y (20).

$$P_{d_j} = 1 - \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \quad (18)$$

$$P_{md_j} = \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \quad (19)$$

$$P_{f_j} = 1 - \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - 2N\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2N\sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \quad (20)$$

Finalmente, se propone calcular las probabilidades de detección  $P_d$ , omisión de detección  $P_{md}$  y falsa alarma  $P_f$  de la multibanda de acuerdo con (21), (22) y (23).

$$P_d = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^K \left\{ 1 - \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \right\} \quad (21)$$

$$P_{md} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^K \left\{ \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \right\} \quad (22)$$

$$P_f = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^K \left\{ 1 - \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - 2N\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2N\sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \right\} \quad (23)$$

#### ALGORITMO PROUESTO

Para implementar PUD de acuerdo con el proceso descrito en los literales A, B y C, se propone el algoritmo que se ilustra en la figura 4, donde los parámetros de entrada del algoritmo son: la matriz de detección  $A$ , la matriz de muestras del canal  $Y$ , el ancho de banda total de la multibanda  $B$ , el ancho de banda de cada sub-banda  $b$ , el tamaño del vector de muestras  $m$  y el tamaño del vector señal  $n$  (línea 1); el algoritmo propuesto retorna el vector de sub-bandas ocupadas y disponibles en la multibanda  $ch$  (línea 2); se utiliza la variable auxiliar  $PsB$  para almacenar la potencia por sub-banda de la multibanda (línea 3). El proceso de PUD inicia calculando el número de sub-bandas en la multibanda (línea 7) y el número de componentes significativas de la multibanda (línea 8), posteriormente, se estima la señal recibida por cada antena mediante la función *Estimación\_señal* utilizando el algoritmo de reconstrucción de CS propuesto por Needell y Tropp (2010) (línea 10), posteriormente se calcula la potencia estimada por sub-banda por antena (líneas 13 a 21), y finalmente se estima la presencia o no de señal en cada sub-banda utilizando la regla OR (líneas 22 a 24).

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se analiza el desempeño del algoritmo propuesto en un escenario en el cual se presenta una señal multibanda compuesta por seis canales de 3.3MHz cada uno, los cuales aleatoriamente presentan ocupación, el objetivo es evaluar las condiciones bajo las cuales el algoritmo presenta un desempeño adecuado para la PUD, en comparación con el rendimiento de

los algoritmos de PUD en escenarios de banda estrecha en sistemas de múltiples antenas que digitalizan la señal a la tasa de Nyquist (Pandharipande y Linnartz, 2007; Wang *et al.*, 2010; Pourgharehkhan *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015) y con los algoritmos de detección de espectro de banda ancha en los sistemas de antena individuales basados en CS (Hoyos *et al.*, 2015).

<b>Algoritmo: MAWBSS</b>	
1	Input: $A, Y, m, n, B, b$
2	Output: $ch$
3	Var: $Psb$ % Potencia por Sub-banda
4	Inicio
5	$Cont1 = 0$
6	$Cont2 = 1$
7	$k = B/b$
8	$k = \left(\frac{m}{n}\right)k$
9	Para $i = 1$ hasta $q$
10	$X(Cont2, i) \leftarrow Estimación\_Señal(A, Y(Cont2, i), K)$
11	$Cont2 = Cont2 + 1$
12	Fin para
13	Para $j = 1$ hasta $k$
	$Psb(j, (Cont1 + 1)) \leftarrow suma((Cont1 +$
14	$1), X(Cont1 * n/k) \text{ hasta } X((Cont1 + 1), (Cont1 + 1) * n/k))$
15	Si $Psb(j, (Cont1 + 1)) > 0$ luego
16	$ch\_sb(j, (Cont1 + 1)) \leftarrow 1$
17	Sino
18	$ch\_sb(j, (Cont1)) \leftarrow 0$
19	Fin Si
20	$Cont1 = Cont1 + 1$
21	Fin Para
22	Para $l = 1$ hasta $k$
	$ch(l)$
23	$= ch\_sb(l, 1) \text{ or } ch\_sb(l, 2) \text{ or } ... ch\_sb(l, q)$
24	Fin para
25	Retorna $ch$

Figura 4. Algoritmo de PUD de Banda Ancha MAWBSS

señal multibanda de acuerdo con los parámetros de simulación que se muestran en la tabla 1.

#### RESULTADOS DE SIMULACIÓN, MÉTRICAS, CARACTERIZACIÓN Y COMPARACIÓN

Para evaluar el desempeño del algoritmo de PUD propuesto, se utilizan como métricas: la probabilidad de falsa alarma, la probabilidad de omisión de detección y la probabilidad de detección, analizadas en función de la cantidad de componentes recuperadas en la señal estimada mediante el algoritmo de reconstrucción propuesto y en función de la relación señal a ruido de la multibanda generada, comparadas con las métricas obtenidas de los algoritmos propuestos en Pandharipande y Linnartz (2007); Wang *et al.* (2010); Pourgharehkhan *et al.* (2015); Li *et al.* (2015); Olabiyi y Annamalai (2012a); Olabiyi y Annamalai (2012b); Tian (2008); Haque *et al.* (2015); Sun, *et al.* (2015); Wang *et al.* (2010); los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5 y 6.

Tabla 1. Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Generación señal multibanda	
Ancho de Banda Señal Multibanda, $BW$	20MHz
Ancho de Banda por Canal, $B$	3.3MHz
Modulación Señal en Canal	16QAM
Tasa de Símbolos, $Rs$	2Msps
Factor de Roll Off Filtro Transmisión, $\rho$	0.5
Tasa Muestreo Nyquist, $f_s$	40MHz
Número Muestras Señal Multibanda (Nyquist), $n$	2000
Frecuencias de Portadora, $f_c$	3MHz, 6MHz, 9MHz, 12MHz, 15MHz y 18MHz
Muestreador Sub_Nyquist (Demodulador Aleatorio)	
Número Muestras Señal Entrada, $n$	2000
Número Muestras Señal Entrada, $m$	100
Algoritmo de Detección MAWBCS	
Número de Iteraciones	$q$

#### ESCENARIO Y PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

En la implementación de la simulación del algoritmo de PUD en entornos multibanda propuesto, se genera una

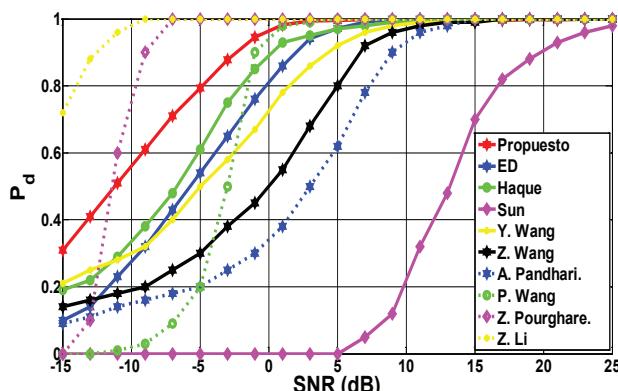


Figura 5. Desempeño algoritmo *WideBand Compressive Sensing* propuesto (Sub-bandas=6, Antenas=2, Sub-muestreo=20) vs otros algoritmos en función de SNR

En la figura 5 se observa el desempeño del algoritmo propuesto contra el desempeño de los algoritmos de PUD multiantena (Pandharipande y Linnartz, 2007; Wang *et al.*, 2010; Pourgharehkhhan *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015) y del detector de energía secuencial (Olabiyi y Annamalai, 2012a y 2012b), basados en muestreo Nyquist. Asimismo se muestra el desempeño del algoritmo propuesto contra otros algoritmos basados en detección compresiva (Tian, 2008; Haque, *et al.*, 2015; Sun, *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2010); en la figura 5 se puede apreciar que el desempeño de los algoritmos en Olabiyi y Annamalai (2012a) y (2012b); Tian (2008); Haque *et al.* (2015); Sun, *et al.* (2015); Wang *et al.* (2010) es inferior al alcanzado por el algoritmo propuesto, en función de la probabilidad de detección. De la misma forma, se aprecia que la probabilidad de detección para el algoritmo propuesto es aproximadamente igual a 1 para valores de SNR superiores a 0dB, obteniendo solo mejores desempeños los algoritmos propuestos en Pourgharehkhhan *et al.* (2015), donde el resultado ilustrado es el mejor obtenido para el caso de 4 antenas y 100 muestras consecutivas a la tasa de Nyquist por antena. En Li *et al.* (2015), el resultado ilustrado es el mejor para el caso de 4 antenas y correlación espacial entre antenas igual a 0.3; sin embargo, tanto en Pourgharehkhhan *et al.* (2015) como en Li *et al.* (2015) se realizó la PUD en escenarios de banda angosta en sistemas de múltiples antenas que operan a tasas de muestreo iguales o superiores a la tasa de Nyquist.

En la Figura 6 puede observarse que el mejor desempeño en términos de las curvas de ROC es el correspondiente al algoritmo propuesto, debido a que el área bajo la curva del algoritmo propuesto es la mayor, lo que indica la capacidad del algoritmo propuesto de identificar acertadamente los WS. Como se aprecia de

igual manera en la figura 6, el algoritmo con peor desempeño es el propuesto por Sun *et al.* (2015), ya que la curva ROC indica una probabilidad de 0.5 al realizar una detección correcta de los WS. Considerando que los resultados ilustrados en la figura 6 corresponden a las curvas ROC de los algoritmos contrastados a una SNR de 1dB, se evidencia de nuevo que el algoritmo propuesto mejora significativamente el desempeño de los otros algoritmos en condiciones de baja SNR, nuevamente exceptuando los propuestos en Pourgharehkhhan *et al.* (2015) y Li *et al.* (2015) con las configuraciones descritas anteriormente, que presentan la desventaja de realizar la PUD en escenarios de banda estrecha a tasas de muestreo iguales o superiores a la tasa de Nyquist.

En la figura 7 se ilustra el desempeño del algoritmo propuesto en función de la probabilidad de detección contra la SNR de acuerdo con el número de antenas en el CRD. Aquí se puede apreciar que en la medida que el CRD presenta mayor cantidad de antenas receptoras, la SNR que se alcanza una probabilidad de detección aproximadamente igual a uno disminuye, alcanzándose el desempeño objetivo en CR para el estándar 802.22 con una cantidad aproximada de 20 antenas. Así mismo se observa que mejora el desempeño cuando el CDR incorpora la tecnología MIMO Masivo propuesta para los sistemas móviles e inalámbricos de próxima generación (50 o más antenas).

En la figura 8 se muestra el desempeño del algoritmo propuesto en función de la probabilidad de detección contra la SNR, de acuerdo con el número de sub-bandas definidas en la multibanda. En esta, es posible evidenciar que en la medida que existe una mayor cantidad de sub-bandas en la multibanda, disminuye el desempeño del algoritmo.

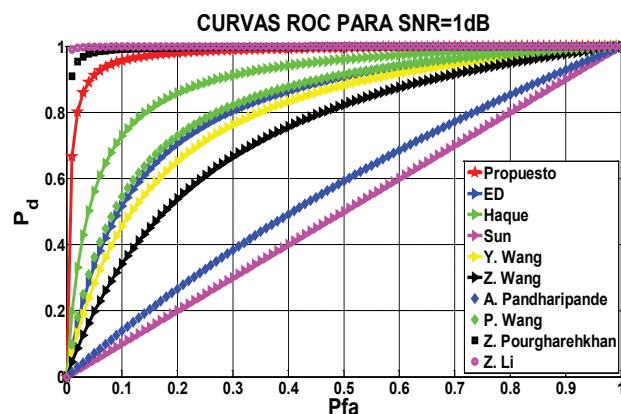


Figura 6. Curvas ROC para SNR = 1dB (Sub-bandas=6, Antenas=2, Sub-muestreo=20)

En la figura 9 se puede evidenciar el impacto que tiene el factor de sub-muestreo en el desempeño del algoritmo. En esta figura se puede ver que a menor factor de sub-muestreo, mejor es el desempeño del algoritmo

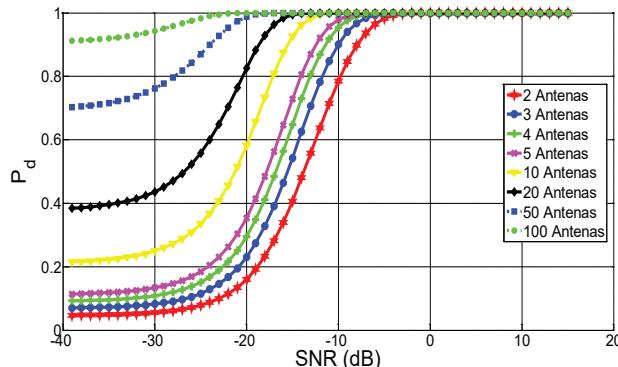


Figura 7. Probabilidad de detección contra SNR en función del número de antenas del CDR (Sub-bandas=6, Sub-muestreo=10)

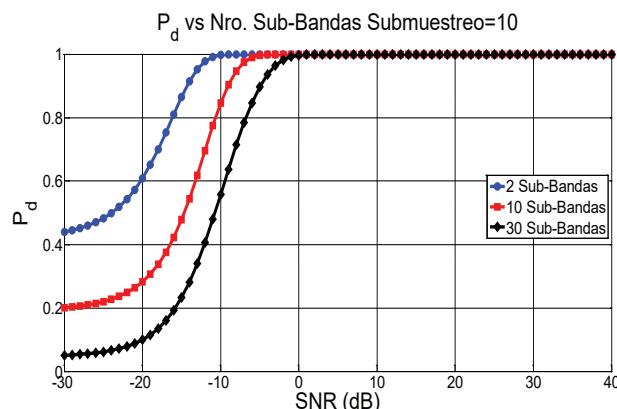


Figura 8. Probabilidad de detección contra SNR en función del número de sub-bandas en la multibanda (Antenas=3, Sub-muestreo=10)

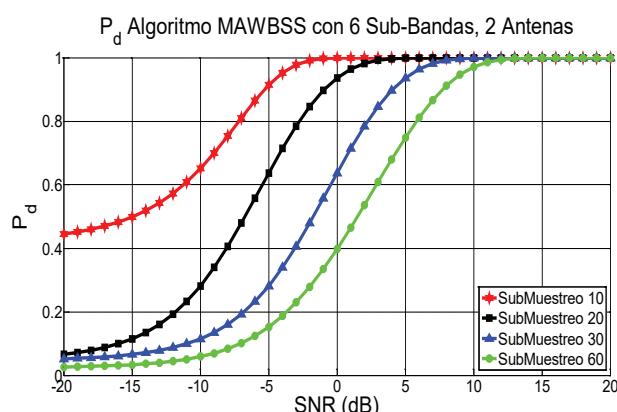


Figura 9. Probabilidad de detección contra SNR en función del factor de sub-muestreo (Sub-bandas=6, Antenas=2)

propuesto; alcanzándose una probabilidad de detección aproximadamente igual a 1 para una SNR de -3dB con un factor de sub-muestreo igual a 10, en un escenario donde la multibanda está conformada por 12 sub-bandas y el CRD tiene 2 antenas.

#### ANÁLISIS DE COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL

La complejidad computacional del algoritmo propuesto puede analizarse en dos etapas. La primera etapa corresponde al sub-muestreo realizado con el RD, en el cual se requieren una cantidad de multiplicaciones escalares presentando una complejidad  $O(m)$  (Goldsmith, 2005). La segunda etapa es la correspondiente a la función de detección, en la cual, como se ilustra en la figura 4 la operación de la estimación de la señal se realiza mediante el algoritmo *CoSamp*, que presenta complejidad  $O(n)$  (Needell y Tropp, 2010), posteriormente las líneas 11 a 24 de la figura 5 tienen complejidad  $3k + n + 5$  y dado que  $n \gg k$  puede definirse la complejidad como  $O(n)$ , con lo cual, se precisa como complejidad de la segunda etapa  $O(n)$ .

En síntesis, la complejidad computacional de las dos etapas que conforman el método propuesto, será la máxima complejidad entre ellas, por lo tanto será  $O(n) = \max [O(m), O(n)]$ , ya que  $m < n$ .

#### CONCLUSIONES

En este artículo se propone un novedoso algoritmo de detección de usuarios primarios local en escenarios de banda ancha en dispositivos de CR con múltiples antenas, basado en detección compresiva, el cual no requiere conocimiento a priori de las características de la señal presente en el entorno de radio, demostrándose que mediante el algoritmo propuesto es posible realizar la función de detección de usuarios primarios en escenarios de banda ancha utilizando una cantidad de muestras menor a las obtenidas a la tasa de Nyquist y sin conocimiento a priori de las características de la señal. Se alcanza un desempeño superior a otros algoritmos de detección de usuarios primarios propuestos, donde la función de detección de usuarios primarios se realiza con dispositivos secundarios multiantena, o con el detector de energía secuencial de banda ancha y otros algoritmos de detección de usuarios primarios en escenarios de banda ancha basados en detección compresiva referenciados anteriormente.

El desempeño superior del algoritmo propuesto se evidencia en las curvas de probabilidad de detección y ROC, asimismo, se demuestra una mejora significativa en el desempeño del algoritmo en la medida que se in-

crementa la cantidad de antenas en el dispositivo de radio cognitivo y la cantidad de sub-bandas sensadas. Por lo antes descrito, el algoritmo propuesto se considera como un firme candidato para la implementación de la función de sensado de espectro de banda ancha en sistemas de radio cognitivo o en sistemas móviles e inalámbricos de próxima generación en los que el conocimiento del entorno de radio es de gran importancia para la gestión de recursos radio, mejoramiento de la utilización espectral de bandas sub-utilizadas, toma de decisiones, garantía de la calidad del servicio y para la adaptación del sistema a dicho entorno.

## REFERENCIAS

- Baraniuk R.G. Compressive sensing. *IEEE signal processing magazine*, volumen 24 (número 4), 2007: 118-121.
- Candes E.J., Romberg J., Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*, volumen 52 (número 2), 2006: 489-509. Doi: 10.1109/TIT.2005.862083
- Gnedenko B.V. y Kolmogorov A.N. *Limit distributions for sums of independent random variables*, Reading, Mass, Addison-Wesley, 1954.
- Goldsmith A. *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- Haque T., Yazicigil R.T., Pan K.J.L., Wright J., Kinget P.R. Theory and design of a quadrature analog-to-information converter for energy-efficient wideband spectrum sensing. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, volumen 62 (número 2), 2015: 527-535, Doi: 10.1109/TCSI.2014.2360756
- Hoyos E.A., Gómez P.E., Bermúdez H.F. Compressive sensing: A methodological approach to an efficient signal processing. *DYNA*, volumen 82 (número 192), 2015: 203-210. Doi:10.15446/dyna.v82n192.45512
- Li Z., Wang D., Qi P., Hao B. Maximum eigenvalue based sensing and power recognition for multi-antenna cognitive radio system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015: 1-11. Doi: 10.1109/TVT.2015.2511783
- Mishali M., Eldar Y.C., Dounaevsky O., Shoshan E. Xampling: Analog to digital at sub-Nyquist rates. *IET Circuits, Devices & Systems*, volumen 5 (número 1), 2011: 8-20. Doi:10.1049/iet-cds.2010.0147
- Mitola-III J. *Cognitive radio an integrated agent architecture for software defined radio*, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2000.
- Natarajan B.K. Sparse Approximate solutions to linear systems. *SIAM Journal on Computing*, volumen 24 (número 1), 1995: 227-234. Doi:10.1137/S0097539792240406
- Needell D. y Tropp A. CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples. *Communications of the ACM*, volumen 53 (número 12), 2010: 93-100.
- Olabiyi O. y Annamalai A. Extending the capability of energy detector for sensing of heterogeneous wideband spectrum, en: 2012 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), IEEE, 2012a, pp. 454-458. Doi: 10.1109/CCNC.2012.6181033
- Olabiyi O. y Annamalai A. Parallel multi-channel detection: A practical solution to energy detection of heterogeneous wideband spectrum, en: Sarnoff Symposium (SARNOFF), 2012 35th IEEE, 2012b, pp. 1-5 <http://Doi.org/10.1109/SARNOFF.2012.6222719>
- Pandharipande A. y Linnartz J.P. Performance analysis of primary user detection in a multiple antenna cognitive radio, en: 2007 IEEE International Conference on Communications, IEEE, 2007, pp.6482-6486. doi: 10.1109/ICC.2007.1072
- Pourgharehkhhan Z., Taherpour A., Sala-Alvarez J., Khattab T. Correlated multiple antennas spectrum sensing under calibration uncertainty. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, volumen 14 (número 12), 2015: 6777-6791. Doi: 10.1109/TWC.2015.2459706
- Sun W., Huang Z., Wang F., Wang X. Compressive wideband spectrum sensing based on single channel. *Electronics Letters*, volumen 51 (número 9), 2015: 693-695. Doi: 10.1049/el.2014.4223
- Tian Z. Compressed wideband sensing in cooperative cognitive radio networks, en: IEEE GLOBECOM 2008-2008 IEEE Global Telecommunications Conference, IEEE, pp.1-5. Doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.721
- Tropp J.A., Laska J.N., Duarte M.F., Romberg J.K., Baraniuk R.G. Beyond Nyquist: Efficient Sampling of Sparse Bandlimited Signals. *IEEE Transactions on Information Theory*, volumen 56 (número 1), 2010: 520-544. Doi: 10.1109/TIT.2009.2034811
- Wang P., Fang J., Han N., Li H. Multiantenna-Assisted spectrum sensing for cognitive radio. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, volumen 59 (número 4), 2010: 1791-1800. Doi: 10.1109/TVT.2009.2037912.

**Citación sugerida:**

**Citación estilo Chicago**

Astaiza-Hoyos, Evelio, Héctor Fabio Bermúdez-Orozco, Wilmar Yesid Campo-Muñoz. Detección de usuarios primarios basados en muestreo sub-Nyquist mediante dispositivos de radio cognitivo multiantena en entornos multibanda. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVIII, 04 (2017): 399-409.

**Citación estilo ISO 690**

Astaiza-Hoyos E., Bermúdez-Orozco H.F., Campo-Muñoz W.Y. Detección de usuarios primarios basados en muestreo sub-Nyquist mediante dispositivos de radio cognitivo multiantena en entornos multibanda. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVIII (número 4), octubre-diciembre 2017: 399-409.

**SEMLANZAS DE LOS AUTORES**

*Evelio Astaiza-Hoyos.* Ingeniero en electrónica por la Universidad del Cauca (1998). Magíster en ingeniería, área de telecomunicaciones por la misma universidad (2008). Actualmente es candidato a doctor en ciencias de la electrónica. Es profesor asociado en la Universidad del Quindío, programa de ingeniería electrónica, investigador del grupo de investigación en telecomunicaciones de la Universidad del Quindío-GITUQ.

*Héctor Fabio Bermúdez-Orozco.* Ingeniero en electrónica por la Universidad del Cauca (2000). Asimismo, magíster en electrónica y telecomunicaciones por la misma universidad (2010). Actualmente es estudiante de doctorado en ingeniería telemática. Es profesor asociado en la Universidad del Quindío, programa de Ingeniería Electrónica y coordinador del grupo de investigación en telecomunicaciones de la Universidad del Quindío-GITUQ.

*Wilmar Yesid Campo-Muñoz.* Ph.D. en ingeniería telemática (2014), magíster en ingeniería, área telemática (2009) e ingeniero en electrónica (1998) por la Universidad del Cauca. Es profesor asistente en la Universidad del Quindío, programa de ingeniería electrónica e investigador del grupo de investigación en telecomunicaciones de la Universidad del Quindío-GITUQ.