

# Modelos de propagación radio para redes de TDT móvil en la banda UHF

Radio Propagation Models for Mobile DTT Networks in the UHF Band

**Jordi Joan Giménez Gandia**

*Investigador*

Grupo de Comunicaciones Móviles, iTEAM  
Universidad Politécnica de Valencia (España)

*jorgigan@iteam.upv.es*

**Jaime López Sánchez, M.Sc.**

*Investigador*

Grupo de Comunicaciones Móviles, iTEAM  
Universidad Politécnica de Valencia (España)

*jailosan@iteam.upv.es*

**David Gómez-Barquero, Ph.D.**

*Investigador invitado post doctoral*

Fraunhofer Heinrich Herz Institute  
Berlín (Alemania)

*dagobar@iteam.upv.es*

**Narcís Cardona Marcet, Ph.D.**

*Director*

Grupo de Comunicaciones Móviles, iTEAM  
Universidad Politécnica de Valencia, España

*ncardona@iteam.upv.es*

Fecha de recepción: Agosto 23 de 2011

Fecha de aceptación: Septiembre 1 de 2011

## Palabras clave

Modelos de propagación;  
planificación de red; TV móvil.

## Keywords

Propagation models; network  
planning; mobile TV.

Colciencias  
tipo 1

## Resumen

Este artículo estudia la idoneidad de diferentes modelos de propagación para despliegues de redes de Televisión Digital Terrestre (TDT) móvil sobre la banda de UHF. La precisión de los modelos de propagación de la señal es un aspecto clave para la planificación y minimización de costes de infraestructura de este tipo de redes, que se basan en estándares de radiodifusión tales como DVB-T/H, DVB-T2 o el futuro estándar para terminales móviles DVB-NGH. Este artículo analiza tres modelos de propagación: Okumura-Hata, Xia-Bertoni, un modelo basado en la fórmula de Hata que añade un término de difracción calculado usando el método de Deygout y el modelo COST 231 Walfisch-Ikegami. Para evaluar el rendimiento de los modelos se realizan campañas de medida sobre varios escenarios y con diferentes condiciones, como son la altura del transmisor, el entorno y los datos geográficos de los que se dispone. Por último se evalúa la variabilidad de la señal recibida en función del escenario, lo que supone un parámetro clave para un dimensionado de la red eficiente.

## Abstract

This article studies the suitability of different radio propagation models for the deployment of mobile TV networks over the UHF band. Accurate signal propagation modelling is key for mobile DTT network planning in order to minimize deployment costs. This article analyzes four propagation models: Okumura-Hata, Xia-Bertoni, a model based on the Hata formulae adding a diffraction term calculated using the Deygout method and COST 231 Walfisch-Ikegami model. The performance of the models is evaluated with measurement campaigns from several scenarios with different conditions such as transmitter height, environment, and available geographical data. Finally, location variability is studied as a key parameter to achieve an efficient network dimensioning.

---

## I. Introducción

Para los próximos años está previsto un fuerte crecimiento en el consumo de servicios multimedia en dispositivos móviles motivado por el creciente éxito de este tipo de tecnología (teléfonos inteligentes, tabletas, etc.). Paradójicamente, uno de los servicios multimedia que no ha conquistado de forma masiva los teléfonos móviles es quizás el más común e importante de ellos: la televisión digital. La televisión móvil es un factor clave para el desarrollo de la sociedad de la Información, ya que permite el acceso universal, en cualquier momento y lugar, a contenidos multimedia. Además, permite abrir nuevas vías de negocio para los agentes de la industria audiovisual y de las telecomunicaciones.

La prestación de servicios de TV orientados a terminales móviles supone la necesidad de emplear redes de radiodifusión de televisión como complemento a las redes celulares. Sólo estas redes tienen la capacidad necesaria para soportar un consumo a gran escala de este tipo de servicios, ya que pueden distribuir servicios multimedia de banda ancha en áreas extensas sin limitación alguna en el número de usuarios que pueden recibir el servicio.

El desarrollo de nuevas tecnologías para la difusión de servicios de televisión hace posible la reutilización, en gran medida, de la infraestructura de red existente (que generalmente opera sobre frecuencias de la banda de UHF) sin que sea necesario el despliegue de nuevas redes dedicadas a la difusión de televisión digital móvil. El consorcio europeo DVB (*Digital Video Broadcasting*) ha desarrollado un perfil de transmisión de TDT móvil, DVB-T2 Lite (*2<sup>nd</sup> Generation Lite*) que pretende ser la antesala del nuevo estándar de difusión de televisión en movilidad DVB-NGH (*Next Generation Handheld*), que verá la luz a finales de 2011.

Una de las principales inquietudes a la hora de poner en marcha un servicio de TDT móvil reside en el coste de la infraestructura de red. Los terminales móviles sufren condiciones de propagación más severas que los receptores fijos no sólo por las mayores pérdidas de propagación sino también por los efectos de desvanecimiento de la señal debidos a la propagación multicamino y el ocultamiento producido por la movilidad de los usuarios.

A causa de la imposibilidad de los centros transmisores de televisión digital de aumentar la potencia de emisión, para evitar interferencias y para no sobrepasar los límites de exposición regulados por la legislación internacional vigente, en muchos casos se requiere de nuevos emplazamientos para la instalación de transmisores adicionales o reemisores (*gap-fillers*) que complementen las actuales torres transmisoras (Gómez-Barquero, Bria, Monserrat, & Cardona, 2006). Esta penalización es particularmente evidente para áreas de gran cobertura (mayores del 90%) e implica grandes inversiones en infraestructuras. El motivo es que es especialmente costoso garantizar la cobertura

en el porcentaje residual donde se encuentran las ubicaciones peor cubiertas (Bria & Gómez-Barquero, 2005).

Para realizar ejercicios de planificación se requiere estimar el nivel de cobertura en el área de servicio objetivo para cada una de las posibles configuraciones de la red, así como un modelo de coste detallado con la información del coste de usar cada uno de los transmisores considerados en cada posible emplazamiento. A fin de calcular de forma precisa el área de cobertura de televisión móvil en una red de difusión es necesario predecir la potencia recibida en cada ubicación desde cada uno de los emplazamientos transmisores de la red y determinar qué señales contribuyen a la señal recibida total y cuáles son las causantes de autointerferencias.

Este artículo analiza y compara el rendimiento de varios modelos de propagación radio para redes móviles de TDT con medidas de campo realizadas en diferentes escenarios que incluyen torres de televisión y transmisores de menor potencia situados en emplazamientos celulares. El objetivo de este artículo es definir la metodología para calcular las pérdidas de propagación en función de distintos parámetros, como son el escenario de despliegue, la altura del transmisor y la disponibilidad de información geográfica para las predicciones. Los modelos de propagación estudiados son el modelo de propagación de Xia-Bertoni, un modelo que combina la fórmula de Hata con un término de difracción calculado usando el método de Deygout y el modelo COST 231 Walfisch-Ikegami, que ha sido evaluado para entornos andinos por adaptarse particularmente bien a sus características (García, Ortega, Navarro, & Rodríguez, 2003). Estos modelos de propagación han sido seleccionados debido a que pueden operar dentro de la banda de UHF y porque tienen en cuenta la información sobre el terreno y los edificios para realizar el cálculo en ciudades y zonas urbanas.

Por otro lado, se ha estudiado la variabilidad de la señal recibida para un escenario rural y un escenario urbano y se han comparado los resultados con los valores recomendados por organismos internacionales como la ITU o ETSI.

Este artículo se estructura en las siguientes secciones: La Sección II explica el proceso de modelado de la propagación y describe los modelos de propagación estudiados en este documento. La Sección III describe las campañas de medida usadas para calibrar, evaluar y comparar los modelos de propagación en estudio. La Sección IV muestra los resultados de la calibración de los modelos de propagación y estudia la aplicación de cada uno de los distintos entornos, y condiciones de transmisión y recepción. Esta sección también presenta los resultados obtenidos en la evaluación de la variabilidad de la señal. Finalmente, la Sección V presenta las principales conclusiones de este artículo.

## **II. Modelado de la propagación radioeléctrica**

La predicción del nivel de señal necesita tener en cuenta los mecanismos de reflexión, difracción y *scattering* que sufre la señal desde el transmisor hasta el receptor. El

modelado de la propagación depende de muchos parámetros, como el entorno, la altura de los transmisores, la frecuencia y la información disponible sobre el escenario de despliegue.

Cuando se diseña una red de TDT móvil, deben considerarse una serie de aspectos antes de seleccionar el modelo de propagación adecuado: la precisión de los cálculos, la exactitud y resolución de la información cartográfica disponible, la distancia media entre transmisor y receptor, la frecuencia y el tamaño del área de despliegue.

Generalmente, los modelos de propagación pueden clasificarse en tres tipos: deterministas, empíricos y físico-estadísticos. Los modelos deterministas calculan matemáticamente las pérdidas de propagación usando fórmulas teóricas; para ello requieren información precisa sobre el escenario de despliegue no sólo referente al terreno y los edificios sino también sobre los coeficientes de reflexión y difracción de las superficies. En el caso de despliegues de TDT móvil en zonas extensas la información es, en general difícil o incluso imposible de obtener. Los modelos físico-estadísticos combinan modelos deterministas con estadísticas sobre el entorno, con el fin de disminuir el coste computacional. Finalmente, los modelos de propagación empíricos estiman el enlace radio a partir de medidas.

Este artículo estudia la aplicabilidad de los modelos de propagación de Xia-Bertoni (Xia & Bertoni, 1992) (modelo físico-estadístico) y el modelo basado en la fórmula de Hata (Okumura, Ohmori, Kawano, & Fukuda, 1968), que añade las pérdidas por difracción usando el método de difracción de Deygout (Deygout, 1966) (modelo empírico y cálculo de la difracción determinista) al modelado de la propagación. Estos modelos de propagación han sido seleccionados porque pueden calcular las pérdidas de propagación sobre la banda de UHF y no necesitan información cartográfica demasiado precisa para estimar las pérdidas de difracción. Por esta razón ambos modelos de propagación son adecuados para realizar predicciones en área de servicio grandes.

Por otro lado, se estudia también un concepto clave para el dimensionado de una red que presta servicios a terminales portátiles y móviles: la variabilidad de las ubicaciones (*Location Variability*, en inglés). En este tipo de escenarios la combinación de una recepción con antenas no directivas unida a la falta de visión directa al transmisor conlleva que existan fuertes variaciones en el nivel de señal, que pueden causar fallos en el enlace debido a que el nivel de señal puede sobrepasar el mínimo valor de C/N requerido.

### **A. Modelo de propagación radio de Xia-Bertoni**

Xia-Bertoni (Xia & Bertoni, 1992) es un modelo de propagación físico-estadístico que describe la propagación de la señal en la banda UHF (opera desde 300 MHz a 3 GHz) en ciudades donde la altura de los transmisores es cercana a la altura media de las

azoteas. El modelo tiene en cuenta los perfiles del terreno y los edificios para estimar las pérdidas de propagación. Para cada punto de cálculo el modelo de Xia-Bertoni añade un término de pérdidas de difracción que depende en la media de la altura de los edificios situados entre transmisor y receptor.

Para el modelo de propagación de Xia-Bertoni las fórmulas matemáticas que deben ser ajustadas son las siguientes:

$$L(\text{dB}) = A + B \cdot \log(d) + C \cdot \log(f) + D \cdot \log(\alpha) + E \cdot \log(b) + F \cdot \log(r) + G \cdot \log \beta$$

$$r = \sqrt{h_m^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2}$$

Donde  $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor en km,  $f$  es la frecuencia de operación en MHz,  $b$  es la separación media entre edificios,  $hm$  es la altura del receptor y  $w$  es la anchura media de las calles.

### **B. Modelo de propagación radio de Hata+Deygout**

Hata (Okumura, Ohmori, Kawano, & Fukuda, 1968) es un modelo de propagación empírico que toma la información de campo obtenida por Yoshihisa Okumura, y desarrolla un conjunto de ecuaciones para las pérdidas de propagación. El modelo de propagación es adecuado para frecuencias desde 150 a 1500 MHz, con alturas de la estación base de 30 a 200 m, y para distancias entre transmisor y receptor de 1 a 20 km. Okumura-Hata es un modelo de propagación simple que no requiere de información cartográfica para la estimación de las pérdidas de propagación. Por esta razón, una de las limitaciones del modelo de Hata es que no tiene en cuenta la difracción producida por los obstáculos situados en el camino de propagación entre transmisor y receptor. Para solventar esta limitación, las pérdidas de difracción son calculadas y añadidas a las pérdidas estimadas por el modelo de propagación de Hata. Estas pérdidas por difracción son calculadas mediante el método de difracción de Deygout (Deygout, 1966), que considera que los efectos producidos por los edificios pueden ser aproximados por múltiples aristas de filo de cuchillo y estima las pérdidas producidas por los obstáculos más altos entre transmisor y receptor.

Cuando se usa el modelo de Hata+Deygout, la siguiente fórmula permite realizar las predicciones:

$$L(\text{dB}) = A_1 + B_1 \log(d) + C_1 \log(f) + D_1 \log(h_b) \\ + E_1 \cdot \text{Diffraction} + F_1 \log(d) + G_1 \log(h_m)$$

Donde  $d$  es la distancia entre transmisor y receptor en km,  $f$  es la frecuencia de operación en MHz,  $Diffraction$  es el término de difracción calculado con el método de Deygout, y  $h_b$  y  $h_m$  son las alturas efectivas de transmisor y receptor en m, respectivamente.

En consecuencia, la principal diferencia entre los modelos de propagación de Xia-Bertoni y Hata+Deygout es que el primero de ellos hace una aproximación del perfil de los edificios entre transmisor y receptor y el segundo toma en consideración el perfil real de los edificios para realizar los cálculos.

### C. Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami

El modelo COST 231 Walfisch-Ikegami (Damosso, 1999) surge de la combinación del modelo de Walfisch-Bertoni, del modelo de Ikegami y de las contribuciones de los miembros del COST 231 Subgroup on Propagation Models. Este modelo está indicado para sistemas que operen en la banda UHF de 800 MHz a 2000 MHz en entornos urbanos densos. El modelo tiene en cuenta la altura de los edificios, el ancho de las calles, la separación entre edificios y el sentido de las calles respecto a la propagación de la señal.

El modelo distingue entre dos escenarios distintos a los que aplica las siguientes fórmulas. Las pérdidas de propagación cuando existe línea de vista (LOS) se calculan mediante:

$$L_b(dB) = 42.6 + 26 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f)$$

Donde  $d$  es la distancia horizontal entre transmisor y receptor en km y  $f$  es la frecuencia de la portadora expresada en MHz.

En el caso de no existir línea de vista (NLOS) al transmisor, las pérdidas se calculan como:

$$L_b = L_0 + \begin{cases} L_{rts} + L_{msd} & \text{si } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ 0 & \text{si } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}$$

$$L_0(dB) = 32.4 + 20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f)$$

Donde  $L_0$  son las pérdidas por espacio libre,  $d$  es la distancia horizontal entre transmisor y receptor en km,  $f$  es la frecuencia de la portadora en MHz,  $L_{rts}$  son las pérdidas por difracción producidas en el techo del último edificio por el que se propaga la señal dadas en función de la altura del transmisor y del receptor y de la orientación de las calles y  $L_{msd}$  son las pérdidas por difracción de múltiples esquinas de los techos de los edificios.

### D. Metodología de la calibración

A través de medidas es posible comparar el nivel de señal calculado y seleccionar aquellos modelos de propagación adecuados a las diferentes condiciones de recepción. La calibración de los modelos de propagación consiste en variar sus parámetros característicos a fin de minimizar la diferencia entre predicciones y medidas. Las pérdidas de propagación se calculan utilizando fórmulas que modelan los diferentes mecanismos físicos que sufre la señal en el camino de propagación entre transmisor y receptor.

La contribución de los diferentes mecanismos de propagación es ponderada en función de parámetros como el entorno de propagación o la altura del transmisor. La contribución de cada término en las pérdidas totales se fija a través de los resultados de las campañas de medidas.

El método matemático utilizado para el ajuste de los modelos de propagación bajo estudio es el método de mínimos cuadrados (*LMS – Least Mean Squares*), el cual intenta minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre las medidas y las predicciones (Moon & Stirling, 2000). Los parámetros a optimizar son  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  y  $G$  para el modelo de Xia-Bertoni, y  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $C_p$ ,  $D_p$ ,  $E_p$  y  $F_p$  para el modelo de Hata+Deygout.

Siendo  $y_i$  un conjunto de medidas y  $L_i$  un conjunto de predicciones, la suma de los cuadrados de los residuos es:

$$S = \sum_i (y_i - L_i)^2$$

El método LMS intenta encontrar coeficientes que minimicen  $S$ . Estos coeficientes igualan a cero la derivada de  $S$  con respecto a cada uno de ellos. Como resultado, la ecuación del sistema a resolver es la siguiente:

$$L_i = x \cdot a_i + y \cdot b_i + z \cdot c_i + \dots$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 2 \cdot \sum_i (y_i - L_i) \cdot \frac{\partial L_i}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial y} = 2 \cdot \sum_i (y_i - L_i) \cdot \frac{\partial L_i}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 2 \cdot \sum_i (y_i - L_i) \cdot \frac{\partial L_i}{\partial z} = 0$$

### **E. Variabilidad de la ubicación**

Existen diversas recomendaciones publicadas por organismos internacionales como ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*) o ITU-R (*International Telecommunications Union - Radiocommunications Sector*) que establecen unos factores de corrección a tener en cuenta a la hora de realizar una planificación de una red de TDT.

Los valores teóricos del factor de corrección pueden derivarse de la desviación estándar, asumiendo que el campo eléctrico presenta unas variaciones acordes con una distribución log-normal:

$$\text{Factor de Corrección de la Ubicación (dB)} = Q_i\left(\frac{q}{100}\right) \cdot \sigma_L(f)$$

Donde  $Q_i(x)$  es la función de acumulación inversa de la distribución normal del campo,  $q$  es la cobertura objetivo y  $\sigma_L$  es la desviación típica de la ubicación.

Para analizar la variabilidad de la señal se definen celdas de tamaños entre  $5 \times 5$  m y  $500 \times 500$  m. De las medidas tomadas, aquellas que corresponden a estos tamaños de celda, es decir, que se encuentran separadas hasta un máximo de 5 o 500 m (respectivamente para los casos mencionados) se calcula su desviación típica. Así, se obtiene una predicción de la variación de la señal en función de la distancia entre las medidas. Este resultado será decisivo para calcular la potencia de señal recibida en función del escenario considerado y de la resolución de la información cartográfica de la que se dispone.

En concreto, la recomendación ITU-R 1546 (ITU-R, 2009) establece un factor de corrección de 5.5 dB para un tamaño estándar de celda de  $100 \times 100$  m. ETSI establece en las guías de implementación de los estándares de difusión terrestre DVB-H (ETSI, 2009) y DVB-T (ETSI, 2008) unos valores entre 3 dB y 9 dB para coberturas del 70% y 95%, respectivamente.

### **III. Campañas de medida**

Cuando se lleva a cabo una campaña de medidas para calibrar modelos de propagación debe obtenerse un conjunto significativo de muestras para cada entorno (urbano denso, urbano, suburbano, rural, etc.), ya que las condiciones de propagación son distintas en cada uno de ellos. Otro aspecto importante es la distribución de las medidas. Las rutas de medidas deben ser más densas cuanto más próximo se esté al transmisor y menos densas al alejarse de éste.

Antes de la calibración, las medidas han de ser filtradas a fin de eliminar los efectos de desvanecimiento rápido (*fast fading*) producidos por la propagación multicamino. Este filtrado suele realizarse usando el método de Lee. De acuerdo con este método, cada 20-40 longitudes de onda deben obtenerse entre 36 y 50 muestras (Plets, Joseph, Tanghe,

Verloock, & Martens, 2007). Finalmente, se recomienda llevar a cabo la calibración usando aproximadamente  $1/3$  de las medidas para el ajuste de parámetros del modelo de propagación y los otros  $2/3$  para comparar las medidas y las predicciones a fin de validar la calibración llevada a cabo.

Cuatro escenarios diferentes han sido analizados con el fin de estudiar y comparar los modelos de propagación para redes móviles de televisión digital terrestre. La Tabla 1 resume las características de estos escenarios. La recepción se realiza en vehículo y en exteriores.

### **A. Barcelona (España)**

Esta campaña de medidas fue llevada a cabo por el operador de red Abertis Telecom en noviembre de 2006 dentro del proyecto europeo WingTV. La particularidad de esta campaña es que la antena transmisora se encuentra situada en una torre de televisión de 320 m de altura usada para proveer servicios de televisión digital terrestre. La frecuencia de operación es de 482 MHz. La información cartográfica disponible para este escenario es un mapa del modelo digital del terreno y un mapa de edificios; ambos con una resolución de 5 m.

### **B. Gävle (Suecia)**

Esta campaña fue realizada por las compañías Joanneum Research e ITV Arena. La ciudad está caracterizada por una zona urbana en el centro en torno a la cual se encuentran zonas suburbanas con edificios uniformes. La frecuencia de la red es de 818 MHz y la altura del transmisor es de 25 m. Para este escenario de despliegue se dispone de mapas de terreno y edificios con una resolución de 10 m.

### **C. Valencia (España)**

Esta campaña de medidas se llevó a cabo por el instituto de investigación iTEAM, situado en el campus principal de la Universidad Politécnica de Valencia. Las medidas fueron obtenidas mediante la red piloto DVB-T/H del iTEAM. La red piloto consta de un transmisor situado a 24 m de altura dentro del campus. El entorno puede considerarse suburbano. La frecuencia de operación es de 594 MHz. La información cartográfica disponible en este escenario es un mapa del modelo digital del terreno con una resolución de 200 m y un mapa de edificios de 1 m de resolución.

### **D. Bucaramanga (Colombia)**

La campaña de medidas fue realizada por el grupo de investigación RadioGIS de la Universidad Industrial de Santander. La frecuencia de operación es de 880 MHz y la altura del transmisor de 40 m sobre el terreno. La principal característica de Bucaramanga es el perfil del terreno montañoso, que debe ser considerado en el modelado de los mecanismos de propagación. En este caso los mapas de terreno y edificio tienen una resolución de 1 m.

### E. Alcoy (España)

El instituto de investigación iTEAM llevó a cabo una campaña de medidas de TDT en un escenario rural situado a unos 6 km de la localidad de Alcoy. La toma de medidas se realizó utilizando el transmisor de Aitana, que da cobertura a gran parte de la provincia de Alicante. La frecuencia de operación es de 474 MHz.

Escenario de medida	Frecuencia de operación	Altura del terreno/transmisor	Entorno
Bucaramanga	880 MHz	940/40 m	Urbano, perfil del terreno montañoso
Barcelona	482 MHz	450/120 m	Urbano
Gävle	818 MHz	19/25 m	Urbano
Valencia	594 MHz	0/24 m	Suburbano
Alcoy	474 MHz	1479/25 m	Rural, montañoso

Tabla 1. Características de las campañas de medida

## IV. Resultados y discusiones

Las Figuras 1 y 2 muestran una comparación entre las pérdidas de propagación medidas y estimadas para el escenario de Barcelona. Este escenario hace posible observar los efectos de la propagación al utilizar transmisores de gran altura. Los resultados mostrados en la Figura 1 corresponden a los modelos de propagación de Okumura Hata y Hata+Deygout (calibrados con medidas). La Figura 2 es para Xia-Bertoni, calibrado y sin calibrar. El modelo de Okumura-Hata obtiene una buena aproximación del nivel medio de señal recibido (sin calibrar). Un resultado similar se obtiene con el modelo de Xia-Bertoni. Las predicciones con Okumura-Hata y Xia-Bertoni no modelan la variabilidad de la señal recibida.

Por otro lado, el modelo de propagación de Hata+Deygout obtiene la mejor aproximación al nivel de señal recibido, pero necesita ser ajustado usando medidas con el fin de obtener unos resultados realistas. La Tabla 2 muestra los parámetros estadísticos del error entre las medidas y las predicciones para los modelos de propagación estudiados en Barcelona. También se calcula la correlación entre las medidas y las predicciones. Se observa que el valor medio y la desviación estándar son similares para Xia-Bertoni y Hata+Deygout; en cambio, la correlación entre las predicciones y las medidas es mayor para Hata+Deygout. Por este motivo es posible utilizar Hata+Deygout cuando se dispone de medidas de campo y de información cartográfica fiable de alta resolución.

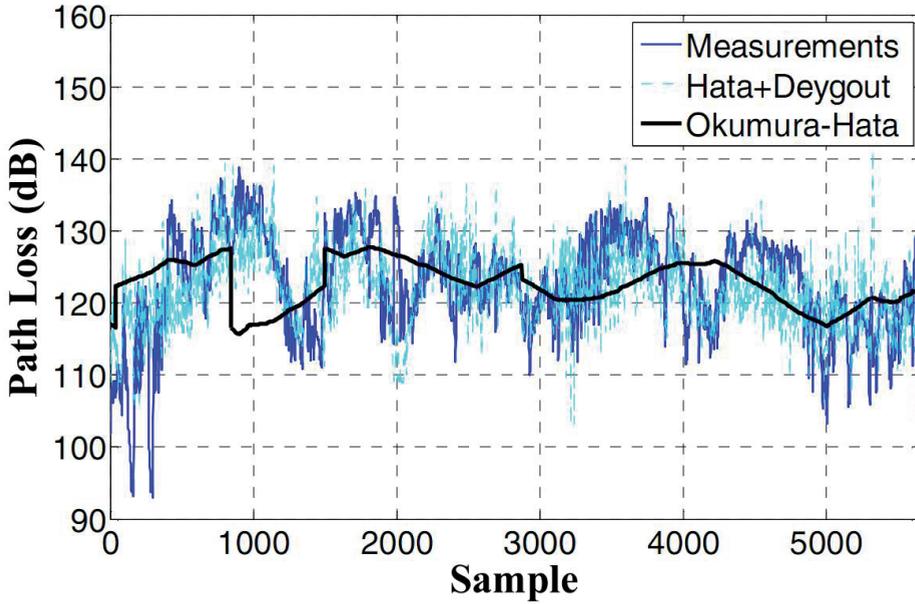


Figura 1. Comparación entre las pérdidas de propagación medidas y estimadas. Modelos de propagación de Hata+Deygout y Okumura-Hata. Escenario de Barcelona.

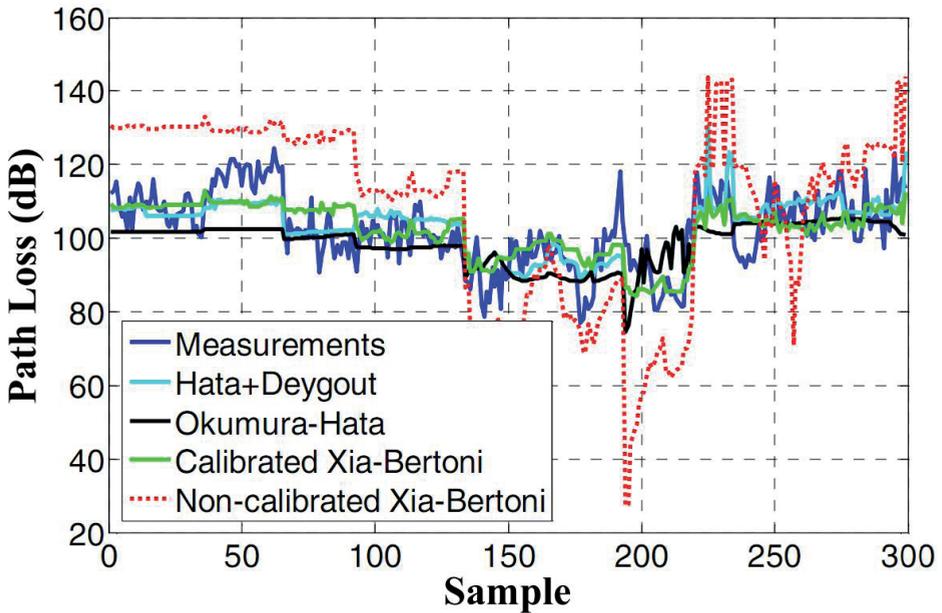


Figura 2. Comparación entre los puntos medidos y las predicciones. Escenario de Barcelona. Modelo de propagación de Xia-Bertoni.

Modelo de Propagación	Valor medio	Desviación típica	Correlación
Okumura-Hata	0.6 dB	7 dB	0.48
Xia-Bertoni No Calibrado	14 dB	10 dB	0.40
Xia-Bertoni Calibrado	0 dB	5.7 dB	0.48
Hata+Deygout	0 dB	5.1 dB	0.88

**Tabla 2.** Parámetros estadísticos del error entre las medidas y las predicciones. Escenario de Barcelona.

La Figura 3 muestra los resultados para el escenario de Gävle. En este escenario la altura del transmisor es comparable a la de los edificios. El modelo de Okumura-Hata obtiene una buena aproximación del valor medio de la señal recibida; sin embargo, no proporciona una buena aproximación a la variabilidad de la señal.

El modelo de propagación de Xia-Bertoni ajustado ofrece la mejor aproximación a las pérdidas de propagación. Lo mismo sucede con el escenario de Valencia, donde la altura del transmisor es similar a la de los edificios. La Figura 4 muestra los resultados para este escenario y la Tabla 3 compara los parámetros estadísticos del error entre las medidas y las predicciones para Valencia y Gävle.

Modelo de Propagación	Valor medio		Desviación típica		Correlación	
	Gävle	Valencia	Gävle	Valencia	Gävle	Valencia
Okumura-Hata	1 dB	4.3 dB	8 dB	7.5 dB	0.69	0.65
Xia-Bertoni No Calibrado	40 dB	45 dB	20 dB	9.7 dB	0.40	0.50
Xia-Bertoni Calibrado	0.5 dB	0 dB	0 dB	5.4 dB	0.86	0.88
Hata+Deygout	0.1 dB	-1 dB	-1 dB	6.6 dB	0.73	0.70

**Tabla 3.** Parámetros estadísticos del error entre las medidas y las predicciones. Escenarios de Gävle y Valencia.

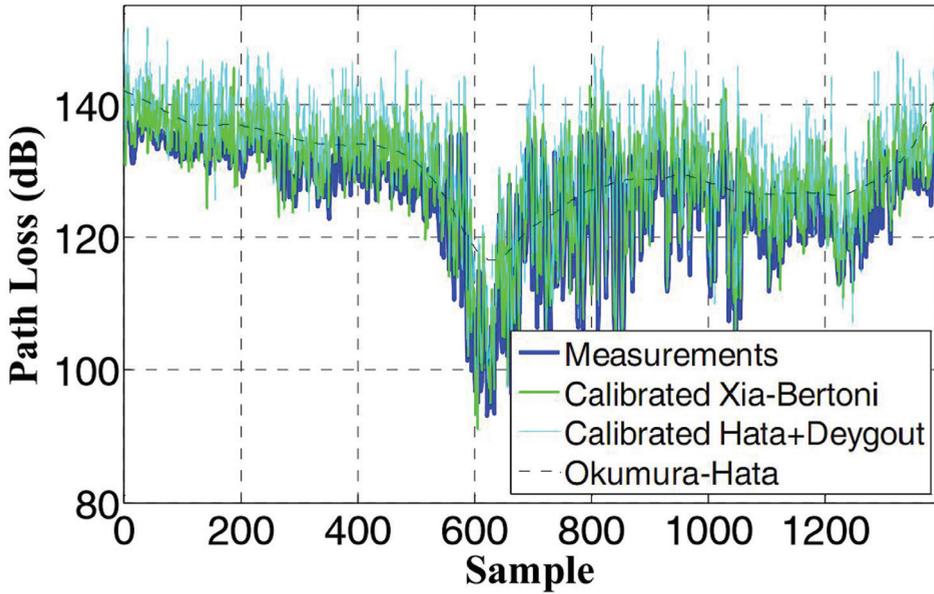


Figura 3. Comparación entre los puntos medidos y las predicciones para el escenario de Gävle.

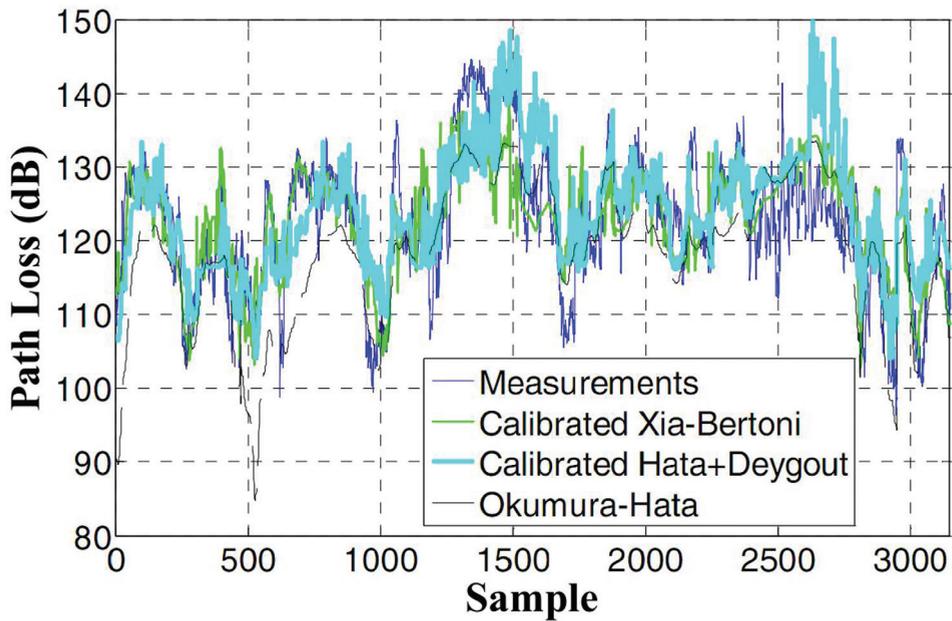
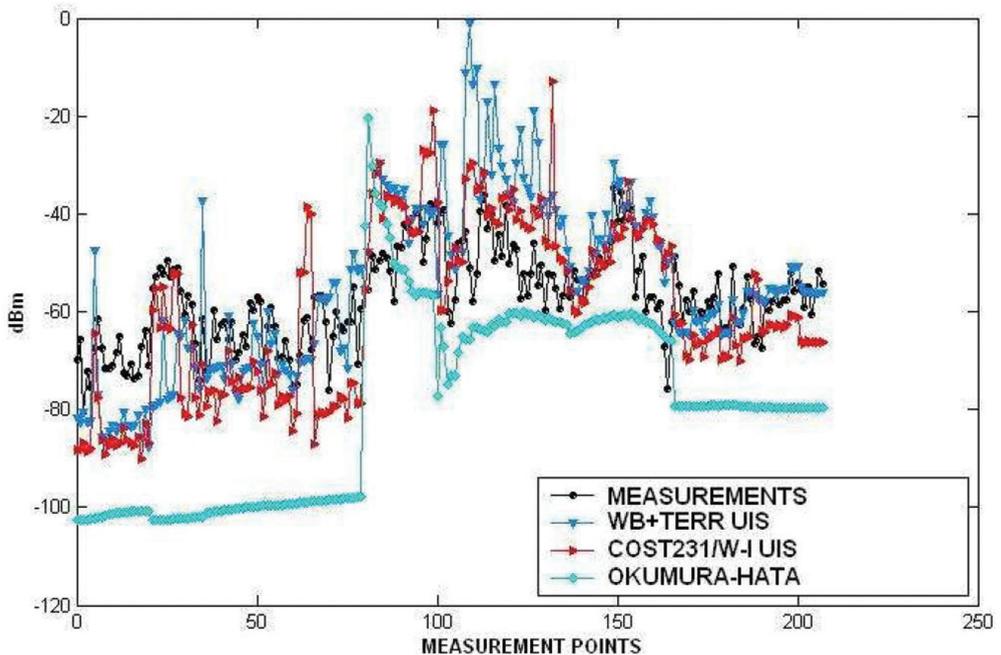


Figura 4. Comparación entre los puntos medidos y las predicciones. Escenario de Valencia

Para transmisores elevados, como el modelo de Xia-Bertoni calcula las pérdidas de difracción utilizando el valor medio de los edificios, las predicciones no seguirán la variabilidad de la señal recibida. Para transmisores no excesivamente altos casi la totalidad de los edificios entre transmisor y receptor tendrán un efecto importante sobre la señal recibida. Xia-Bertoni proporcionará la mejor aproximación de la señal recibida al tener en cuenta todos los edificios situados entre transmisor y receptor; Hata+Deygout sólo tiene en cuenta los más altos.

Finalmente, la Figura 5 presenta los resultados para el escenario de Bucaramanga, ciudad que se caracteriza por un perfil del terreno muy irregular. En este caso se opta por estudiar el modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami, el que obtiene la mejor aproximación a las predicciones. Okumura-Hata no proporciona precisión en las predicciones debido a que el modelado de la difracción sólo utiliza información sobre el perfil de edificios sin tener en cuenta el perfil del terreno, que tiene una mayor influencia en este tipo de escenarios.



**Figura 5.** Comparación entre los puntos medidos y las predicciones. Escenario de Bucaramanga.

En cuanto al estudio de la variabilidad de las ubicaciones, la Figura 6 compara los valores de desviación típica (media, máxima y mínima) obtenidos mediante las campañas de medida de Alcoy (escenario rural) y Valencia (escenario urbano). Para ello se ha calculado la desviación típica de las medidas considerando tamaños de celda que van desde los 5x5 m hasta los 500x500 m como se ha explicado en secciones anteriores.

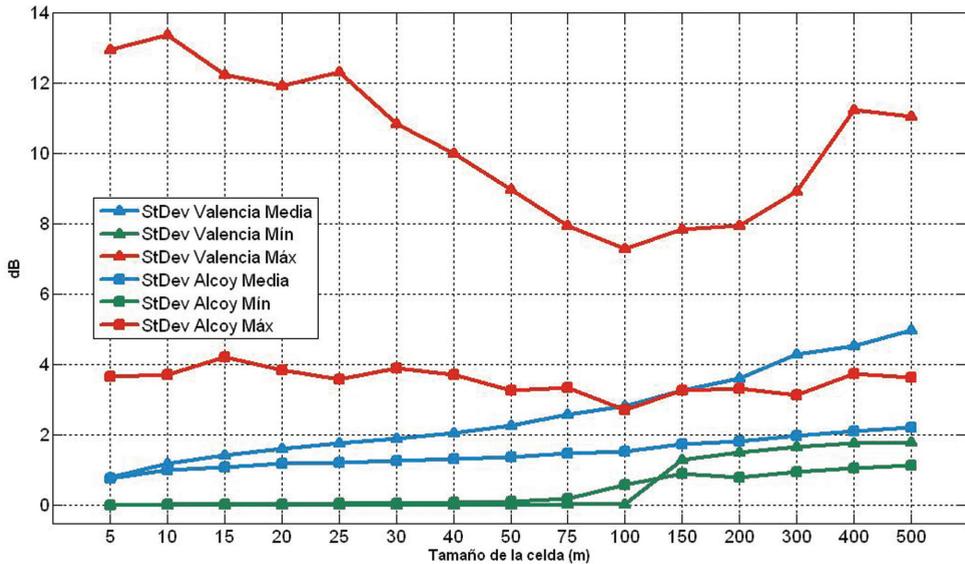


Figura 6. Variabilidad de la señal para entornos urbano (Valencia) y rural (Alcoy).

Los valores aquí obtenidos denotan que la variabilidad de la señal depende del tipo de escenario considerado, y es mayor para escenarios urbanos, donde existe una mayor presencia de obstáculos.

## Conclusiones

En este artículo se ha investigado la aplicación de diferentes modelos de propagación radio UHF para el despliegue de redes de TDT móvil. Los resultados obtenidos en este artículo son, por tanto, aplicables a redes que operan en UHF basadas en los estándares DVB-H/T, DVB-T2, DVB-T2 Lite o DVB-NGH. El rendimiento de los modelos de propagación ha sido analizado utilizando resultados de diversas campañas de medidas en escenarios con características diferentes: altura del transmisor, frecuencia del despliegue, entorno y perfil del terreno.

Los resultados muestran que la elección del modelo de propagación adecuado debe llevarse a cabo tomando en consideración el escenario de despliegue, la información cartográfica disponible, la altura del transmisor y el perfil del terreno del escenario considerado. Otra conclusión importante es que son necesarias medidas con el fin de ajustar los parámetros característicos de los modelos de propagación.

La elección del modelo de propagación más adecuado depende fuertemente de la altura del transmisor. Cuando el transmisor es alto, Okumura-Hata y Xia-Bertoni no modelan el desvanecimiento de la señal. El modelo de Hata+Deygout es adecuado para este tipo de escenarios, pero debe ser calibrado para ajustarse a la frecuencia del despliegue y al entorno. Si la altura del transmisor es comparable a la de los edificios, el modelo de Xia-Bertoni calibrado proporciona mejor exactitud que el modelo de Hata+Deygout.

Las predicciones son más fiables si la difracción se modela a partir de la información del terreno y los edificios; sin embargo, cuando no se dispone de este tipo de información, los modelos de propagación empíricos ofrecen una buena aproximación al valor medio de la señal recibida. Finalmente, para terrenos montañosos el modelo más apropiado es el de Xia-Bertoni, que tiene en cuenta los perfiles del terreno para estimar las pérdidas de propagación. El modelo COST 231 puede ser aplicado en regiones urbanas ubicadas sobre terrenos escarpados donde en el mismo entorno se encuentran montañas, valles, colinas y edificios.

Los autores también han evaluado la variabilidad de la señal en función del escenario de despliegue de la red, y encontraron que el valor de corrección para un escenario urbano se encuentra en unos 3 dB para un tamaño de celda de 100x100 m; este es ligeramente menor para un entorno rural. Ambos valores se encuentran por debajo del valor de 5.5 dB recomendado por ITU-R y las guías de implementación de ETSI. <sup>57</sup>

## **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio español bajo el proyecto FURIA. Los autores quieren dar las gracias a todas las compañías, universidades y centros de investigación que han participado en las diferentes campañas de medida incluidas en este artículo.

## Referencias bibliográficas

- Bria, A. & Gómez-Barquero, D. (2005, Septiembre). Scalability of DVB-H deployment on existing wireless infrastructure. *Proceedings, IEEE PIMRC*. Berlín, Alemania.
- Damosso, E. (Ed.). (1999). *Digital mobile radio: COST 231 View on the evolution towards 3rd generation systems*. Bruselas (Bélgica): Commission of the European Communities and COST Telecommunications.
- Deygout, J. (1966). Multiple knife edge diffraction of microwaves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14, 825-873.
- European Telecommunications Standard Institute [ETSI], (2008, Octubre). *Digital video broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects. ETSI TR 101 190 V1.3.1* (Technical report). Sophia Antípolis, Francia: Autor.
- ETSI (2009, Junio). Digital video broadcasting (DVB); DVB-H Implementation guidelines. ETSI TR 102 377 V1.4.1 (Technical report). Sophia Antípolis, Francia: autor.
- García, A.P., Ortega, H., Navarro, A., & Rodríguez, A. (2003) Estudio del modelo de propagación Walfisch-Ikegami y su desempeño en la banda TDMA colombiana en presencia de relieve, mediante la utilización de una herramienta de planificación celular basada en GIS, *Revista S&T*, 1(1), 13-33.
- Gómez-Barquero, D., Bria, A., Monserrat, J. F. & Cardona, N. (2006, Septiembre). Minimal cost planning of DVB-H networks on existing wireless infrastructure. *Proceedings, IEEE PIMRC*. Helsinki, Finlandia.
- ITU-R (2009). *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz* (Recommendation ITU-R P.1546). Ginebra, Suiza: Autor.
- Moon, T.K. & Stirling, W.C. (2000). *Mathematical methods and algorithms for signal processing*. Upper Saddle River (NJ): Prentice-Hall.
- Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T., & Fukuda, K. (1968, Septiembre-Octubre). Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service. *Review of the Electrical Communication Laboratory*, 16(9-10), 825-873.
- Plets, D., Joseph, W., Tanghe, E., Verloock, L. & Martens, L. (2007). Analysis of propagation of actual DVB-H signal in suburban environment. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Conference on AP*. Edinburgh, UK.
- Xia, H.H. & Bertoni, H.L. (1992). Diffraction of cylindrical and plane waves by an Array of absorbing half-screens. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 40(2), 170-177.

## **Curriculum vitae**

### **Jordi Joan Giménez Gandia**

Nació en 1987 en Alcoy (España). Recibió el título de Ingeniero Superior de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) en 2010. Actualmente es investigador en el Grupo de Comunicaciones Móviles del instituto iTEAM. Sus temas de interés son el estudio de las soluciones técnicas desarrolladas en los nuevos estándares de difusión terrestre DVB para la provisión de servicios multimedia, la planificación de redes de televisión digital terrestre y el estudio de técnicas para la extensión de cobertura de TDT.

### **Jaime López Sánchez, M.Sc.**

Nació en Sogamoso (Colombia) en 1981. Se graduó de Ingeniero Electrónico en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en Bogotá (Colombia) en 2005. De 2005 a 2008 fue ingeniero de emisión y transmisión del canal privado de televisión Caracol TV, en Bogotá. Recibió el título de Máster en Tecnologías Redes y Sistemas de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) en 2009. Actualmente es estudiante de Doctorado de la UPV e investigador del grupo de comunicaciones móviles del instituto iTEAM. Su investigación recibió el premio Valencia Idea 2010 en la categoría TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación). Sus áreas de interés son el estudio de nuevas soluciones técnicas en la evolución de los estándares DVB (*Digital Video Broadcasting*) para la provisión de servicios avanzados multimedia en redes de televisión digital, la planificación y optimización de estas redes para recepción fija, portable y móvil.

### **David Gómez-Barquero, Ph.D.**

Investigador invitado postdoctoral en el instituto Fraunhofer Heinrich Herzt (HHI) en Berlín (Alemania). Es Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Valencia (España) y Máster en Telecomunicaciones por la Universidad Politécnica de Valencia y de la Universidad de Gävle (Suecia). Durante su formación doctoral realizó estancias como investigador invitado en la Universidad KTH de Estocolmo (Suecia), la Universidad de Turku (Finlandia) y la Universidad de Braunschweig (Alemania). También realizó prácticas en Ericsson Eurolab en Aachen (Alemania). Actualmente está realizando una estancia post-doctoral en el Instituto de Telecomunicaciones Fraunhofer HHI. Su principal área de interés es la radiodifusión de contenidos multimedia móviles tanto en sistemas DVB como en 3GPP MBMS. Actualmente es director del grupo de especial interés de redes híbridas y de radiodifusión de la acción de cooperación europea COST2100; fue coeditor del *bluebook* de DVB en mecanismos de corrección de errores en capas superiores UL-FEC, como experto invitado; y participa en el proceso de estandarización de la nueva generación de televisión digital móvil DVB-NGH.

### **Narcís Cardona, Ph.D.**

Nació en 1963 en Barcelona (España). En 1990 recibió el título de Máster en Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña y en 1995 el título de Doctor en Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Desde 1990 ha estado vinculado con la UPV, donde actualmente es profesor catedrático y director del grupo de comunicaciones móviles. Adicionalmente es director del Máster Universitario en Comunicaciones Móviles y subdirector del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM). Ha liderado diferentes proyectos de investigación a nivel nacional y ha participado en proyectos europeos, redes de excelencia y otros foros de investigación, siempre en aspectos de comunicaciones móviles. Sus actuales áreas de interés incluyen la caracterización del canal radio móvil, herramientas de planificación y optimización de sistemas celulares, técnicas RRM aplicadas a comunicaciones personalizadas y de radiodifusión en redes híbridas. Ha sido vicepresidente del COST273 y está actualmente a cargo del WG3 del COST2100 en el área redes de acceso vía radio. Fue presidente de la Tercera Conferencia Internacional en Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas (ISWCS'06).