

Modelo Empírico de Comunicaciones Multi-Hop Celular con Retransmisores Móviles

Baldomero Coll-Perales y Javier Gozálviz

bcoll@umh.es, j.gozalvez@umh.es

Uwicore, *Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory* <http://www.uwicore.umh.es>

Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad, s/n, 03202, Elche España.

Abstract- Multi-hop cellular networks using mobile relays (MCN-MR) are expected to overcome the current limitations of traditional cellular systems through the integration of cellular and ad-hoc networking technologies. However, to reach such potential it is necessary to design realistic and accurate multi-hop communication and networking protocols. In this context, this paper introduces the first MCN-MR performance models derived from a large field trial measurements campaign. The modeling process has initially concentrated on a 2-hop MCN-MR communication, with the ad-hoc link operating under Line-Of-Sight (LOS) and Non-LOS (NLOS).

I. INTRODUCCIÓN

La futura generación de redes celulares, o redes de cuarta generación (4G), deberá proveer elevados y homogéneos niveles de calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) en todo el área de cobertura de la estación base (*Base Station*, BS). Sin embargo, los sistemas celulares tradicionales, en los que la estación móvil (*Mobile Station*, MS) comunica directamente con la BS, son todavía incapaces de proveer estos niveles de QoS homogéneos debido principalmente a la atenuación que sufre la señal con la distancia y a las variables condiciones de propagación causadas por la presencia de obstáculos e interferencias. La única solución planteada hasta el momento para que los sistemas celulares tradicionales superen este inconveniente pasa por incrementar la densidad de BSs, aunque para esta opción ha de tenerse en cuenta el elevado coste económico y el rechazo social ante la instalación de nuevas BSs. Una solución alternativa ha surgido recientemente a través de la integración de las redes celulares y las redes ad-hoc en lo que se conoce habitualmente como redes celulares de múltiples saltos o *Multi-hop Cellular Networks* (MCN). Las redes MCN son capaces de incrementar los niveles de QoS que perciben los usuarios y de homogeneizar estos niveles en todo el área de cobertura de la BS a través de la substitución del enlace directo entre la BS y el MS por múltiples enlaces de menor distancia que utilizan retransmisores fijos (MCN-*Fixed Relay*, MCN-FR) y móviles (MCN-*Mobile Relay*, MCN-MR). Inicialmente, la consideración de retransmisores en los estándares de comunicaciones celulares se ha centrado en la solución con retransmisores fijos o MCN-FR. Sin embargo, los sistemas con retransmisores móviles como MCN-MR ofrecen un conjunto de posibilidades de comunicación aún por explotar y que parten de la posibilidad de sacar provecho de los recursos de los propios terminales móviles desplegados dentro de la red celular. Sin embargo, a día de hoy, las comunicaciones entre MSs suponen todavía un reto para la comunidad científica dadas las peculiares condiciones de comunicación y el entorno móvil y cambiante de las mismas. Por lo tanto, los sistemas MCN-MR requieren de

numerosos esfuerzos para garantizar una provisión de QoS homogénea y fiable.

Estudios anteriores han dejado de manifiesto los múltiples beneficios y ventajas que las redes MCN-MR son capaces de proporcionar frente a las arquitecturas celulares tradicionales en términos de mejora de la capacidad, extensión del radio de cobertura, reducción del coste de despliegue de la red, y eficiencia energética [1]. Sin embargo, estos trabajos están basados exclusivamente en estudios analíticos y de simulación, y por lo tanto es necesario validar el potencial de las comunicaciones celulares de múltiples saltos a través de plataformas hardware y pruebas de campo. La primera demostración experimental del potencial de las redes MCN-MR de mejorar los niveles de QoS percibidos por un usuario final situado en condiciones de no visión directa (*Non-line of Sight*, NLOS) y en la zona de *handover*, fue presentada por los autores en [2] y [3], respectivamente.

Muchos otros escenarios como la provisión de elevados niveles de QoS en el borde de la celda o en entornos interiores, o la extensión del radio de cobertura, etc. pueden ser investigados utilizando la plataforma hardware de investigación MCN-MR desarrollada en el laboratorio Uwicore [2], y se evaluaría el potencial de esta tecnología emergente para superar las limitaciones actuales de los sistemas celulares tradicionales. Además de estudiar las condiciones de operación en las que la tecnología MCN-MR supera el rendimiento de los sistemas celulares tradicionales, los autores han decidido explotar las capacidades únicas de la plataforma de investigación MCN-MR para obtener los primeros modelos de rendimiento de una comunicación MCN-MR. Se espera que estos modelos representen una herramienta de estudio útil para investigadores interesados en una amplia variedad de áreas temáticas como sistemas heterogéneos inalámbricos, protocolos de cooperación a nivel de red, protocolos de comunicación multi-hop, comunicación dispositivo a dispositivo, y aplicaciones energéticamente eficientes para sistemas inalámbricos. El resto de este artículo presenta la plataforma de medición y el entorno de operación en el que se han llevado a cabo las medidas de campo para modelar la comunicación MCN-MR de 2 saltos en las que los enlaces ad-hoc operan tanto en visión directa (LOS) como en no visión directa (NLOS) (Secciones II y III). Además, se muestra el proceso matemático que ha conducido a la obtención de los modelos de comunicaciones MCN-MR, y la validación de los mismos (Sección IV). Los autores están actualmente trabajando en la obtención de modelos de comunicaciones MCN-MR avanzados que utilizan los resultados presentados en este artículo.

II. PRUEBAS DE CAMPO

A. Plataforma hardware experimental MCN-MR

Las pruebas de campo para obtener los modelos de comunicaciones de la tecnología MCN-MR presentados en este artículo se han llevado a cabo utilizando la plataforma hardware experimental MCN-MR desarrollada en el laboratorio Uwicore de la Universidad Miguel Hernández de Elche. La plataforma MCN-MR está compuesta por tres tipos diferentes de nodos móviles (*Mobile Nodes*, MN) con diferentes capacidades de comunicación: la estación móvil celular (HSDPA), el nodo móvil ad-hoc (802.11a/b/g/n) y el nodo móvil híbrido (HSDPA y 802.11a/b/g/n). La estación móvil celular es un terminal Nokia 6720c que soporta las tecnologías UMTS/HSDPA. El terminal móvil incorpora la aplicación Nemo Handy: una potente herramienta de monitorización del interfaz radio capaz de obtener avanzadas mediciones sobre llamadas de voz, transferencia de datos, etc. Esta herramienta es capaz de proporcionar un amplio conjunto de parámetros clave de rendimiento (*Key Performance Indicators*, KPIs), tales como el *throughput*, la tasa de bloques erróneos (*Block Error Ratio*, BLER) o la intensidad de la señal recibida (*Received Signal Strength Indication*, RSSI). Estos parámetros han sido muy útiles para analizar la QoS del enlace celular dentro de la plataforma MCN-MR. Además, la aplicación Nemo Handy también permite sincronizar temporal y espacialmente las medias tomadas mediante un GPS que se conecta por Bluetooth a la estación móvil celular.

Los nodos móviles ad-hoc pueden actuar como retransmisores o como nodos destino de la comunicación MCN-MR. Estos nodos han sido implementados en portátiles convencionales que cuentan con el sistema operativo Linux para poder modificar parámetros de la capa PHY y MAC de los dispositivos 802.11 que posibilitan la comunicación ad-hoc. En concreto, los nodos móviles ad-hoc cuentan, además de con la interfaz inalámbrica interna de los portátiles (encargada de capturar el tráfico 802.11), con una interfaz ExpressCard adicional (Ubiquiti SR71X, encargada de las comunicaciones 802.11 ad-hoc). Linux además proporciona librerías *open-source* tales como *libpaccp* y *libgps* que han sido utilizadas para desarrollar una aplicación de monitorización o *sniffer* y una herramienta de posicionamiento a través de un GPS, respectivamente. El *sniffer* desarrollado permite monitorizar continuamente el rendimiento de los enlaces ad-hoc 802.11 (tiempo de captura, RSSI, tamaño del paquete, tasa de transmisión, canal-frecuencia, número de secuencia, etc.), mientras que la herramienta GPS es utilizada para almacenar la hora, latitud y longitud con una frecuencia de 1Hz.

Finalmente, el nodo móvil híbrido es el encargado de actuar como pasarela entre las redes celulares y 802.11 ad-hoc. El nodo híbrido está también implementado en un portátil convencional y usa el terminal móvil Nokia 6720c como módem para establecer un enlace HSDPA, mientras que la conectividad ad-hoc con el resto de nodos móviles ad-hoc se lleva a cabo a través de la interfaz inalámbrica ExpressCard. El reenvío en tiempo real de la información desde el enlace celular HSDPA al enlace 802.11 ad-hoc se habilita modificando las tablas de rutas de los portátiles de la red ad-hoc establecida. El nodo híbrido incluye las aplicaciones de monitorización y los GPS descritos para la estación móvil celular y los nodos móviles ad-hoc.

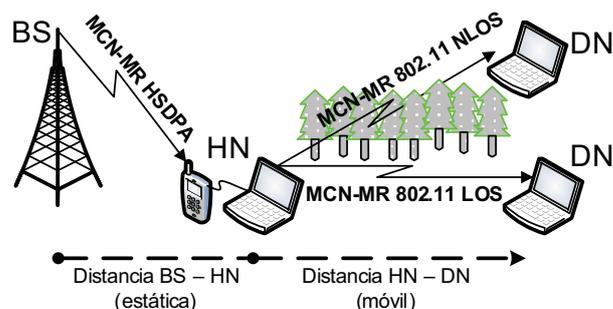


Fig. 1. Escenario de las pruebas para el modelado de la comunicación MCN-MR de 2 saltos.

B. Escenario de las pruebas

Las pruebas de campo se han llevado a cabo en la ciudad de Elche (España) utilizando la red de telefonía móvil de Orange. La Fig.1 ilustra la localización de la BS que está dando servicio al nodo móvil híbrido (HN), y la posición del nodo móvil ad-hoc destino (DN). Como se puede apreciar en la Fig.1, se han estudiado dos condiciones de operación diferentes: cuando el enlace MCN-MR 802.11 ad-hoc opera en condiciones LOS y NLOS. En ambos casos, el nodo HN se encuentra bajo condiciones LOS con la BS, y su posición permanece fija durante toda la prueba (se han realizado diferentes pruebas con diferentes localizaciones del nodo HN). Por otro lado, el nodo DN comienza las pruebas junto al nodo HN y se aleja progresivamente hasta que la comunicación ad-hoc 802.11 con el nodo HN se pierde. Para asegurar condiciones de visión directa entre los nodos HN y DN, estas pruebas se han llevado a cabo en una carretera amplia y recta situada junto a la Universidad (el paso de peatones es constante por estas avenidas y por lo tanto es imposible evitar su paso entre los enlaces MCN-MR 802.11 ad-hoc). Las condiciones NLOS se han conseguido situando al nodo HN y al nodo DN en aceras opuestas de esta misma carretera, en la que hay una densa vegetación en la mediana y una alta densidad de tráfico.

Los modelos de comunicaciones MCN-MR se han obtenido descargando tráfico UDP desde un servidor gestionado por el laboratorio Uwicore. El tráfico UDP se caracteriza por la ausencia de una conexión extremo a extremo que asegure la correcta entrega de los datos, pero sin embargo permite explotar los recursos disponibles y maximizar la tasa de transmisión ya que no se requiere un reconocimiento de la correcta entrega de la información. Además, el tráfico UDP permite reconocer fácilmente qué radio enlace de la comunicación extremo a extremo MCN-MR actúa en cada momento como cuello de botella.

La descarga UDP a través del enlace MCN-MR requiere que tanto el nodo HN como el nodo DN ejecuten un script que habilita la conexión HSDPA desde el nodo HN hasta la BS (enlace MCN-MR HSDPA en la Fig.1) y el establecimiento de la red 802.11 ad-hoc entre el nodo HN y el nodo DN (enlaces MCN-MR 802.11 LOS/NLOS de la Fig.1). La comunicación ad-hoc se lleva a cabo utilizando la tecnología IEEE 802.11g a 2.4GHz, la cual proporciona un máximo teórico de 54Mbps y una potencia máxima de transmisión de 27dBm. Sin embargo, tanto la tasa como la potencia de transmisión a la que operan los nodos están controladas por mecanismos de adaptación al enlace. También conviene señalar que la potencia máxima de transmisión de los nodos ad-hoc ha sido fijada a 19dBm.

III. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

Esta sección describe los resultados obtenidos en las primeras pruebas de campo conocidas en la literatura destinadas a obtener modelos de rendimiento de comunicaciones MCN-MR. En particular, las pruebas se centran en una comunicación MCN-MR de 2 saltos en la que el enlace 802.11 ad-hoc funciona tanto en condiciones LOS y NLOS. Los resultados mostrados en esta sección se corresponden con una única prueba (una prueba con el enlace ad-hoc en LOS y otra en NLOS) que será utilizada para describir el comportamiento de los enlaces HSDPA y 802.11 ad-hoc, y para describir el proceso de modelado llevado a cabo para obtener los modelos de comunicaciones MCN-MR.

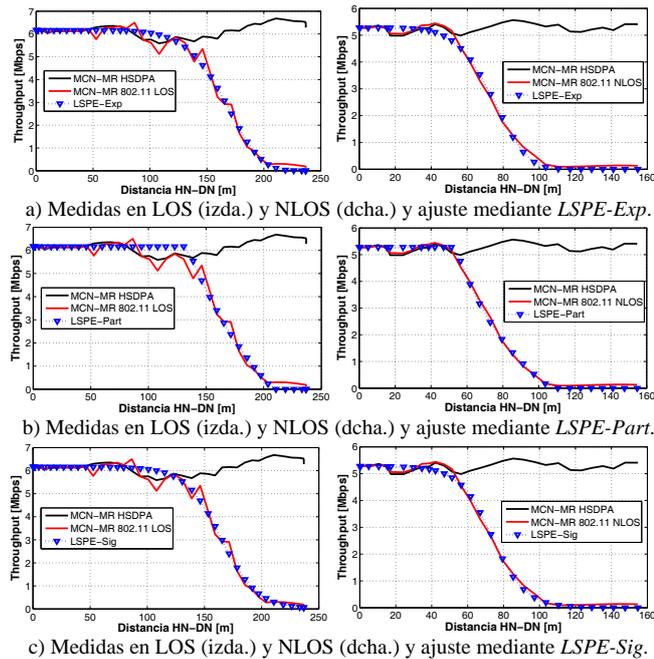


Fig. 2. Medida del *throughput* en el nodo HN (MCN-MR HSDPA) y en el nodo DN (MCN-MR 802.11 LOS/NLOS). Ajuste funciones *Exp*, *Part* y *Sig*.

El análisis del rendimiento de la comunicación MCN-MR se ha centrado en la medida del *throughput* o tasa de bits correctamente entregados. Con el objetivo de que estas medidas sean independientes del mecanismo de asignación de recursos o *scheduling* implementado en la red celular de Orange en Elche, la medida del *throughput* que se ha llevado a cabo considera que los usuarios reciben los recursos de manera permanente durante toda la transferencia UDP. Para obtener estos resultados ha sido imprescindible la utilización de la herramienta Nemo Handy.

La parte izquierda de la Fig.2 muestra el *throughput* medido en la comunicación MCN-MR cuando el enlace MCN-MR 802.11 ad-hoc opera en condiciones LOS. Es importante recordar que el nodo HN permanece estático y en condiciones LOS con la BS durante toda la prueba, obteniendo valores constantes de *throughput* en el enlace MCN-MR HSDPA experimentado por el nodo HN. Por otro lado, el nodo DN se aleja constantemente desde la posición del nodo HN, manteniendo en este caso las condiciones de visión directa. Como resultado, los enlaces MCN-MR 802.11 LOS y HSDPA obtienen inicialmente un rendimiento similar medido en términos de *throughput*. Sin embargo, a medida que la distancia entre los nodos HN y DN se incrementa, el enlace MCN-MR 802.11 LOS no es capaz de soportar el

throughput del enlace MCN-MR HSDPA y el rendimiento del enlace MCN-MR 802.11 LOS comienza a disminuir. Este descenso del rendimiento del enlace MCN-MR 802.11 LOS se debe al empeoramiento de las condiciones de propagación (pérdidas de la señal) a medida que el nodo DN se aleja de la posición del nodo HN. Una tendencia similar a la experimentada en el caso del enlace MCN-MR 802.11 ad-hoc operando en condiciones LOS se aprecia para el caso del enlace MCN-MR 802.11 ad-hoc en condiciones NLOS (Fig.2 dcha.). Sin embargo, al observar el *throughput* medido en el nodo DN cuando opera en condiciones LOS y NLOS es posible apreciar como en enlace MCN-MR 802.11 NLOS decrece a una distancia menor del nodo HN que a la que lo hace el enlace MCN-MR 802.11 LOS.

Además de las medidas presentadas en este apartado, se han llevado a cabo un amplio conjunto de medidas de campo en condiciones ligeramente diferentes (p.e. variando la distancia entre el nodo HN y la BS), que han resultado en diferentes rendimientos del enlace MCN-MR HSDPA y de los enlaces ad-hoc MCN-MR 802.11 LOS/NLOS. Sin embargo, la tendencia de las mediciones realizadas siempre ha sido muy similar a la de los resultados mostrados en la Fig.2. Por lo tanto, el objetivo de este artículo es ahora identificar las curvas que mejor se ajustan al *throughput* medido en el nodo DN de la comunicación MCN-MR, y utilizar dichas curvas para obtener modelos precisos del rendimiento de la comunicación MCN-MR.

IV. MODELADO DE COMUNICACIONES MCN-MR

Una inspección de la forma de las curvas que dibujan el *throughput* medido en el nodo DN (enlaces MCN-MR 802.11 LOS /NLOS de la Fig.2) permite distinguir un par de asíntotas horizontales unidas por una línea de cierta pendiente. Las características de curva resultante coinciden con la forma de las funciones matemáticas conocidas como ‘forma S’ (o la forma simétrica como es nuestro caso). En este contexto, muchas funciones podrían ser ajustadas a la forma que describe el *throughput* medido en el nodo DN, pero no todas ellas serían útiles. En los procesos de obtención de modelos es comúnmente conocido el compromiso existente entre complejidad/utilidad y precisión. Las funciones que se muestran a continuación han demostrado una gran flexibilidad para adaptar sus parámetros y ajustarse a la forma de la curva que describe el *throughput* medido en el nodo DN en todas las pruebas llevadas a cabo, y además la sencillez de sus expresiones aseguran la utilidad y el uso de las mismas.

- *Función Exponencial (Exp)*:

$$Exp(p_1, p_2, d) = A \cdot e^{-(p_1 \cdot d)^{p_2}}, \forall d \in \{0, \dots, M\} \quad (1)$$

- *Función definida a trozos (Part)*:

$$Part(p_1, p_2, d) = \begin{cases} A & d < p_1 \\ k \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{p_2} \right) & p_1 \leq d < p_2, \forall d \in \{0, \dots, M\} \\ 0 & p_2 \leq d \end{cases} \quad (2)$$

siendo $k = A / (1 / p_1 - 1 / p_2)$

- *Función Sigmoide (Sig)*:

$$Sig(p_1, p_2, d) = A \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + e^{-p_1 \cdot (d - p_2)}} \right], \forall d \in \{0, \dots, M\} \quad (3)$$

En estas funciones, d representa la distancia en metros entre el nodo HN y el nodo DN, A la asíntota superior de la función que coincide con el *throughput* medio del enlace MCN-MR HSDPA en la posición del nodo HN, y p_1 y p_2 son los parámetros que modifican la función para ajustarse a diferentes formas.

Para determinar los parámetros (p_1 , p_2) de las funciones *Exp*, *Part* y *Sig* que se ajustan mejor al *throughput* medido en el nodo DN ha sido utilizada la técnica de estimación paramétrica por mínimos cuadrados (*Least-Squares Parameter Estimation*, LSPE). Mediante un análisis de regresión, la técnica LSPE obtiene la función ($f(p_1, p_2, d)$) que minimiza el residuo o error con los datos medidos ($g(d)$). El error (e) se define como la diferencia entre el valor real de la función en un cierto punto ($g(d_i)$) y el valor predicho por la función $f(p_1, p_2, d_i)$ en el mismo punto. El cálculo del error se realiza a través del estimador error cuadrático medio del siguiente modo:

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{d=0}^M (f(p_1, p_2, d) - g(d))^2}{M}} \quad (4)$$

Como se puede apreciar en la Fig.2, la técnica LSPE consigue un buen ajuste entre las curvas matemáticas y los datos reales.

Se ha demostrado como las funciones matemáticas propuestas (*Exp*, *Part*, *Sig*) son capaces de adaptar sus parámetros (p_1 , p_2) mediante la técnica LSPE para ajustarse fielmente a las medidas obtenidas en las pruebas de campo (Fig.2). Un proceso similar se ha realizado en todas las pruebas de la campaña de medidas llevadas a cabo para obtener los modelos de rendimiento de la comunicación MCN-MR de 2 saltos, lo cual ha resultado en un conjunto de parámetros (p_1^i , p_2^i) $\forall i \in \{1, \dots, N\}$ que describen cada una de las curvas (N representa el número total de pruebas realizadas) tanto para el caso en el que el enlace ad-hoc opera en LOS como en NLOS. Los parámetros (p_1 , p_2) finales que este trabajo propone para modelar el *throughput* experimentado por el nodo DN de una comunicación MCN-MR de 2 saltos en función a la distancia al nodo HN se muestran en la Tabla 1 y se han obtenido realizando la media del conjunto de parámetros (p_1^i , p_2^i). La Tabla 1 también recoge el error medio (*Error*) cometido si se utilizan los parámetros obtenidos (p_1 , p_2) para modelar el conjunto de test realizados durante las pruebas de campo. Aunque las diferencias son mínimas, tanto en el caso LOS como en NLOS la función *Sig* obtiene el mínimo *Error*. De este modo es posible definir el modelo de *throughput* de la comunicación MCN-MR de 2 saltos del siguiente modo:

$$\text{MCN-MR } Thr_{2\text{saltos}}(p_1, p_2, d) = \overline{Thr_{\text{HSDPA}}} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + e^{-p_1 \cdot (d - p_2)}} \right] \quad (5)$$

en el que d representa la distancia desde el HN al nodo DN, $\overline{Thr_{\text{HSDPA}}}$ el *throughput* medio del enlace MCN-MR HSDPA, y (p_1 , p_2) los parámetros de la función *Sig* (Tabla 1) que deben seleccionarse en base a las condiciones LOS y NLOS.

Función	LOS		NLOS	
	(p_1, p_2)	Error [Mbps]	(p_1, p_2)	Error [Mbps]
Exp	(0.005, 12.05)	0.482	(0.012, 6.53)	0.235
Part	(157.9, 230.8)	0.501	(60.6, 113.8)	0.247
Sig	(0.12, 186.99)	0.473	(0.12, 79.67)	0.222

Tabla 1. Comparación entre las funciones utilizadas para el modelado.

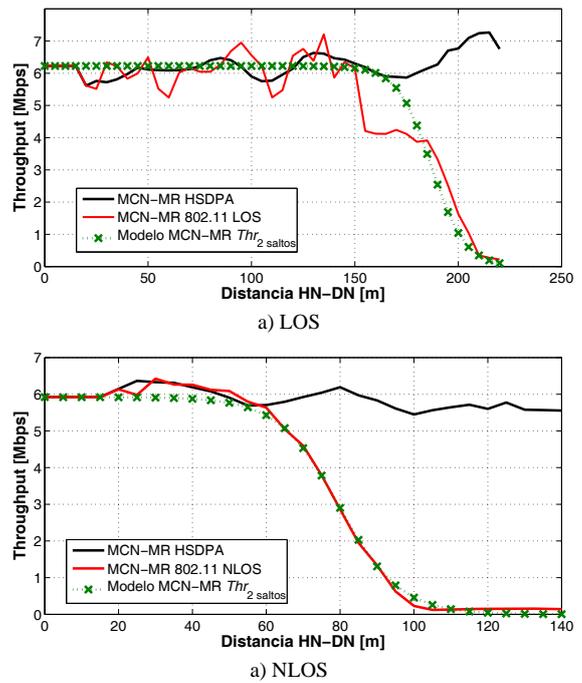


Fig. 3. Medidas tomadas en una localización diferente y comparativa con el modelo óptimo obtenido durante la campaña de medidas.

Finalmente, para validar los modelos obtenidos a partir de la campaña de medidas, se han llevado a cabo mediciones adicionales en una localización diferente pero manteniendo unas condiciones de LOS y NLOS similares en los enlaces ad-hoc MCN-MR 802.11. La Fig.3 muestra también los resultados obtenidos en uno de los test de esas medidas de campo adicionales en las que se puede apreciar como los modelos MCN-MR presentados en este artículo representan correctamente el rendimiento de los enlaces ad-hoc MCN-MR 802.11 tanto en condiciones LOS como en NLOS.

V. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado el procedimiento llevado a cabo para obtener los primeros modelos de comunicaciones MCN-MR de 2 saltos en la que los enlaces ad-hoc operan tanto en LOS como en NLOS. El artículo incluye la descripción de la campaña de medidas realizada y el análisis de los resultados obtenidos. Además se presenta el procedimiento matemático realizado para obtener los modelos matemáticos y las pruebas adicionales de validación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2008-06728), el Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos FEDER (TEC2011-26109), y la Generalitat Valenciana (ACIF/2010/161). Los autores también agradecen el apoyo de Orange España.

REFERENCIAS

- [1] R. Pabst, et al., "Relay-based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 9, pp. 80-89, 2004.
- [2] J. Muñoz, B. Coll-Perales and J. Gozalvez, "Research Testbed for Field Testing of Multi-Hop Cellular Networks using Mobile Relays," in *Proc. IEEE LCN*, pp. 304-307, 2010.
- [3] B. Coll-Perales and J. Gozalvez, "On the Capability of Multi-hop Cellular Networks with Mobile Relays to Improve Handover Performance", in *Proc. IEEE ISWCS*, pp. 207-211, 2011.