

# Evaluación del estimador de capacidad AdHoc Probe en redes MANET con tráfico cursado autosimilar

María del Pilar Salamanca, Néstor Misael Peña

*GEST, Grupo de Electrónica y Sistemas de Telecomunicaciones  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia  
{m-salama,npena}@uniandes.edu.co*

Fecha de recepción: 30-05-06

Fecha de selección: 30-10-06

Fecha de aceptación: 30-08-06

## ABSTRACT

Due to the dynamic nature of ad hoc networks, the path capacity estimation process is much more complex than in wired networks. AdHoc Probe is a capacity estimator based on the packet-dispersion concept. To evaluate end-to-end path capacity, AdHoc Probe sends pairs of packets and takes into account only those pairs with minimum delay. It is widely known that traffic in current networks has self similar nature and recent works show that ad hoc networks exhibit this feature too. In this paper, using an implementation of AdHoc Probe in QualNet<sup>R</sup>, we evaluate the performance of AdHoc Probe when the network has self similar cross traffic and we validate the results of previous works with Poisson cross traffic.

## KEYWORDS

Ad-Hoc networks, MANET, AdHoc Probe, traffic, simulation

## RESUMEN

Debido a la naturaleza dinámica de las redes ad-hoc, la estimación de la capacidad de una ruta es mucho más compleja que en una red cableada. AdHoc Probe es un algoritmo para estimar capacidad, basado en el concepto de dispersión de paquetes. Para evaluar la capacidad de un enlace extremo a extremo, AdHoc Probe envía pares de paquetes y analiza sólo aquellos que tienen el mínimo retardo. Es ampliamente conocido que el tráfico de datos tiene una naturaleza autosimilar y algunos estudios recientes indican que las redes ad-hoc tienen este comportamiento. En el presente artículo, utilizando una

implementación de AdHoc Probe en QualNet, se evalúa el rendimiento de AdHoc Probe cuando la red tiene tráfico cruzado autosimilar y se validan los resultados de trabajos previos con tráfico poisson.

**PALABRAS CLAVE**

redes Ad-Hoc, MANET, AdHoc Probe, tráfico, simulación

**Clasificación Colciencias: A**

## I. INTRODUCCIÓN

La estimación de capacidad en una red ha sido objeto de estudio en múltiples investigaciones [1], [2] y [3]. Sin embargo, la mayoría de dichos estudios han enfocado el problema a redes cableadas y muy poco existe acerca de la estimación en redes inalámbricas. Para el caso particular de las redes ad hoc, el proceso de estimación de capacidad se hace especialmente complicado debido a la naturaleza dinámica de las mismas.

Entre las herramientas de estimación de capacidad para redes ad hoc propuestas con anterioridad a la estudiada en [4], se destaca la presentada en [5]. Allí se realiza la estimación inyectando en el canal tanto tráfico UDP como sea posible y la capacidad estará dada por el máximo caudal alcanzable por ese flujo. Sin embargo, es evidente que esta técnica afecta de forma dramática el tráfico cursado presente en la red.

Tal como se plantea en [4], una herramienta de estimación de capacidad en redes ad hoc debe ser rápida, independiente del tráfico cursado, no intrusiva para que no afecte a las otras aplicaciones cuyo tráfico se encuentre en la red y debe, en lo posible, funcionar en redes donde existan trayectos cableados e inalámbricos.

El estimador de capacidad propuesto en [4], denominado AdHoc Probe, de acuerdo con los resultados que se mostrarán más adelante, posee características muy interesantes que se ajustan a estos requerimientos. En [4], AdHoc Probe se evalúa mediante el simulador ns-2 en escenarios tanto estáticos como móviles, sin tráfico cursado y con tráfico cursado de

Poisson. Considerando que el tráfico de las redes actuales se ajusta mejor a un modelo de tráfico autosimilar, resulta imprescindible evaluar este estimador en redes con tráfico cursado de este tipo. En [6] se presenta un estudio de tráfico en redes ad hoc y, a partir de los resultados obtenidos en una red de prueba de 20 computadores, se concluye que el tráfico de esta clase de redes es altamente autosimilar. Mediante la implementación de AdHoc Probe en QualNet<sup>®</sup> y utilizando las características del tráfico autosimilar en redes ad hoc encontradas en [6], en este artículo se evalúa el desempeño de AdHoc Probe en presencia de tráfico autosimilar y en diferentes escenarios. A partir de los resultados obtenidos en los mismos escenarios reemplazando el tráfico autosimilar por tráfico de Poisson, se analizan las limitaciones encontradas y se delimita el alcance de este estimador.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección II se describe el algoritmo de estimación de capacidad de AdHoc Probe. Con el fin de comparar los resultados obtenidos en [4] con los de este estudio, en la sección III se presenta la metodología utilizada para obtener un modelo de los nodos en QualNet<sup>®</sup>, de características similares al utilizado en ns-2. En la sección IV se muestran los resultados de las simulaciones para diferentes escenarios, con tráfico cursado de Poisson y sin él. En la sección V se presentan los resultados de los mismos escenarios con tráfico autosimilar. Finalmente, en la sección VI se extraen las conclusiones de este trabajo.

## II. DESCRIPCIÓN DE ADHOC PROBE

AdHoc Probe es una herramienta que permite calcular la máxima tasa de transmisión alcanzable en un trayecto de una red ad hoc cuando no existe otro tráfico que compita por el uso de la misma. En una red ad hoc, la máxima tasa de transmisión usualmente es menor que la tasa de transmisión nominal, debido a factores como la interferencia ocasionada por nodos vecinos, el mecanismo de RTS/CTS, la movilidad de los nodos, la “autointerferencia” entre los paquetes de una misma sesión, etc. Estas características, propias de las redes inalámbricas, hacen que el proceso de estimación de ancho de banda sea mucho más complejo que en redes cableadas [4].

Para calcular la capacidad, el emisor, ubicado al comienzo del trayecto a evaluar, envía pares de paquetes de tamaño fijo, de extremo a extremo de la ruta, y marca cada uno de los paquetes con el tiempo de envío. El receptor, ubicado en el extremo opuesto, mide el retardo de cada paquete recibido (OWD o One Way Delay) como la diferencia entre el instante en el cual llegó el paquete y el tiempo de envío que se encuentra marcado en el encabezado del mismo. Luego, el receptor calcula el OWD de cada par, sumando el retardo de cada uno de los paquetes que lo componen. AdHoc Probe asume que, al menos, un par de paquetes no encontró tráfico cursado en la red y ese par de paquetes corresponde a aquel que obtuvo el menor OWD. La capacidad del trayecto se calcula como  $C=P/T$ , donde P es el tamaño de cada uno de los paquetes y T es la dispersión del par con menor OWD.

El concepto de dispersión proviene de una analogía con la teoría de fluidos y se explica en detalle en [7], [8] y [9]. La dispersión corresponde al tiempo que el receptor mide entre el último bit del primer paquete y el último bit del segundo paquete. Es una medida de la menor capacidad encontrada a lo largo de cada uno de los saltos del trayecto evaluado.

Para efectuar la estimación, AdHoc Probe considera dos parámetros: la cantidad de pares de paquetes (N) y la tasa de envío de los mismos (R pares de paquetes/segundo). Así, la duración aproximada de una estimación es  $N/R$  segundos. Es claro que cuanto mayor sea R, el proceso de estimación será más rápido, pero si R es demasiado grande puede perturbar el tráfico cursado en la red o incluso congestionarla. Por otra parte, la precisión de la estimación aumenta cuando N crece, sin embargo, un valor de N grande no es adecuado para redes móviles pues el tiempo de estimación aumenta, lo cual no permitiría capturar las propiedades dinámicas de las redes inalámbricas.

Los valores de los parámetros N y R deben ser determinados cuidadosamente. En [4] no se indica ningún procedimiento para hacerlo, pero se aclara que todas las simulaciones realizadas utilizaron  $N=200$  pares y  $R=4$  pares/segundo. Adicionalmente, en todas las simulaciones se emplea 802.11b a 2 Mbps.

## III. METODOLOGÍA PARA OBTENER EL MODELO DE LOS NODOS EN QUALNET<sup>®</sup>

Con el fin de validar los resultados de [4] obtenidos con ns-2, se implementaron los mismos escenarios de

[4] en el simulador QualNet<sup>R</sup>. Fue necesario encontrar un modelo de los nodos en QualNet<sup>R</sup> que estableciera un radio de transmisión de 250 m y un radio de interferencia de 550 m. Sólo utilizando modelos equivalentes de los nodos, sería posible comparar los resultados.

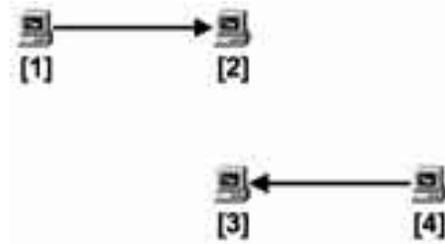
En ns-2 los radios de interferencia y de transmisión se definen como distancias fijas. En QualNet<sup>R</sup>, dichos radios se deben inferir a partir de los parámetros de configuración de los nodos, específicamente la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor, para una distancia de separación fija entre el transmisor y el receptor, que para todos los escenarios simulados en [4] es de 200m.

**Tabla I.** Configuraciones evaluadas cuyo radio de transmisión resultó más cercano a 250 m.

Potencia de transmisión [dBm]	Sensibilidad de receptor [dBm]	Radio de transmisión [m]
10	-89	254
11	-85	252
12	-84	252
14	-82	252

El cálculo del radio de transmisión se realiza haciendo una búsqueda binaria, variando la distancia entre transmisor y receptor y evaluando en cada paso si la señal emitida por el transmisor es “alcanzable” para el receptor. En QualNet<sup>R</sup> [10] se considera que la señal es alcanzable si la potencia en el receptor es mayor o igual al umbral de recepción y, si esto se cumple, también se verifica que la tasa de error de paquetes (PER) sea menor al 10%. Este procedimiento se repite para diferentes combinaciones de potencia de transmisión y sensi-

bilidad del receptor, hasta encontrar aquellas en las cuales la máxima distancia entre transmisor y receptor que cumpla con las condiciones anteriores se aproxime a 250 m. En la Tabla I se presentan las cuatro combinaciones obtenidas. Estas mismas configuraciones se evaluaron, como se indica más adelante, para el cálculo del radio de interferencia.



**Figura 1.** Escenario implementado en QualNet<sup>R</sup> para determinar el radio de interferencia de un nodo.

El radio de interferencia se calcula mediante simulaciones, para lo cual se implementó el escenario de la Figura 1. Este es un escenario útil para determinar hasta qué distancia el tráfico entre dos nodos puede afectar a los flujos de nodos cercanos. El escenario consiste en dos flujos CBR basados en UDP, uno entre los nodos 1-2 y el otro entre los nodos 3-4. La distancia del nodo 1 al nodo 2 es de 200 m, permanece fija y es igual a la distancia entre el nodo 3 y el 4. Para verificar la influencia del radio de interferencia, se varía la distancia vertical entre los nodos 2 y 3. Aquella distancia vertical a partir de la cual los dos flujos alcanzan su máximo caudal será el radio de interferencia, cuyo centro se localiza en el nodo receptor. Este procedimiento fue tomado de [11], aunque en dicha referencia se utiliza con el fin de demostrar la degradación del desempeño de IEEE

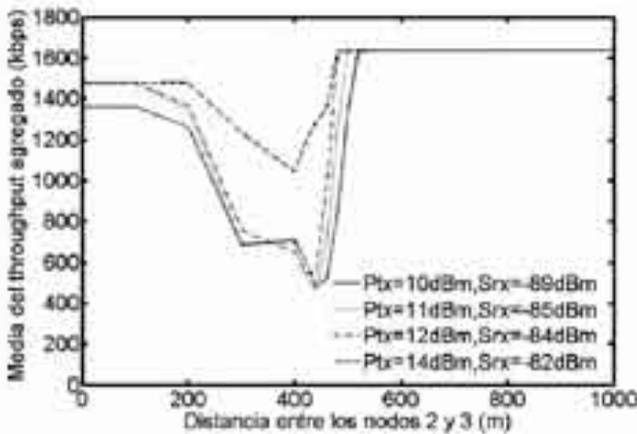
802.11 cuando los nodos tienen un radio de interferencia mayor que el radio de transmisión.

Para este escenario el generador de tráfico CBR se modificó ligeramente. Dada una tasa de transmisión de  $n$  paquetes por segundo, se divide el tiempo de la simulación en intervalos de  $1/n$  segundos. En cada intervalo se envía un paquete a la red y el tiempo de envío del paquete se distribuye uniformemente en el intervalo. Con esto se evita que los dos flujos CBR intenten transmitir al tiempo y se presente una sucesión de colisiones, lo cual produciría resultados incorrectos.

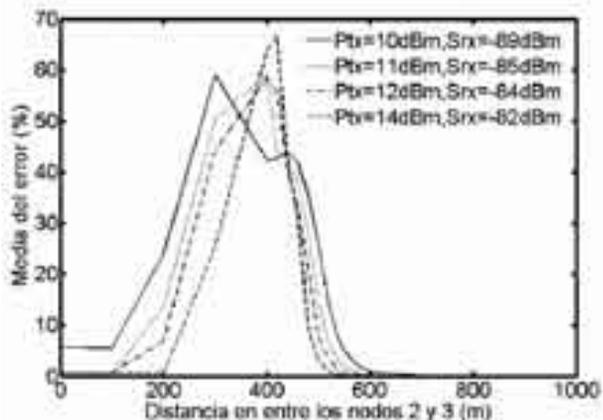
Al igual que en [11], las métricas elegidas fueron el caudal agregado de los nodos 2 y 3 y la tasa de paquetes con error. Esta última es una medida porcentual que indica cuántos paquetes, del total de paquetes recibidos, llegaron mal.

Cada uno de los dos flujos CBR se configura para obtener un caudal de 819 kbps, enviando 100 paquetes de 1024 bytes por segundo, con el fin de utilizar la mayor parte del ancho de banda cuando los dos flujos comparten el canal. Es importante recordar que la capacidad efectiva de un canal IEEE 802.11 es menor que su capacidad nominal debido, entre otros factores, al “overhead” ocasionado por la función de coordinación. Al compartir el canal, el caudal agregado incluso resulta inferior que la magnitud de los dos flujos agregados, como se observará en los resultados.

En todas las simulaciones se configura el modelo de propagación Two Ray Ground y se incluyen pérdidas por shadowing, las cuales se consideran de valor constante [12]. Los resultados se muestran en las Figuras 2 y 3.



**Figura 2.** Caudal agregado para el escenario de la Figura 1 a medida que varía la distancia entre los nodos 2 y 3. Nótese que la configuración que recupera el caudal máximo más cerca de 550m corresponde a la potencia de transmisión de 10 dBm y la sensibilidad del receptor de -89 dbm.



**Figura 3.** Tasa de paquetes con error para el escenario de la Figura 1 a medida que varía la distancia entre los nodos 2 y 3.

Intuitivamente se esperaría que al aumentar la distancia entre los nodos 2 y 3 también lo hiciera el caudal agregado; sin embargo, los resultados muestran un comportamiento muy diferente. Cuando la separación entre los nodos 2 y 3 es menor que el radio de transmisión, los nodos 3 y 4 pueden escuchar los CTS y ACK del nodo 2 (lo mismo sucede con los nodos 1 y 2 y el nodo 3), sin importar que los nodos 1 y 4 estén fuera de alcance uno del otro. En estas condiciones, los dos flujos comparten el canal y, en el mejor de los casos, el throughput agregado se aproxima a 1.5 Mbps, cuando se esperaba que fuera cercano a 1.6 Mbps dada la magnitud de cada uno de los flujos.

La situación cambia completamente cuando la distancia entre los nodos 2 y 3 se aproxima y supera al radio de transmisión. Cuando los nodos 2 y 3 se encuentran fuera de sus respectivos radios de transmisión, se esperaría que pudieran reusar el canal; sin embargo, el caudal muestra una caída dramática y el error se

incrementa abruptamente. Esto se debe a que a esas distancias el nodo 2 se encuentra dentro del radio de interferencia del nodo 3 (y viceversa), y allí el “handshake” RTS/CTS no es efectivo. Solamente cuando los nodos 3 y 4 estén totalmente afuera del radio de interferencia del nodo 2, lo cual sucede simultáneamente cuando los nodos 1 y 2 se encuentren afuera del radio de interferencia del nodo 3, el caudal agregado es máximo.

En particular, la configuración que alcanza el caudal máximo más cerca de los 550 m, que es el radio de interferencia que se desea obtener, es aquella en la cual la potencia de transmisión es de 10 dBm y la sensibilidad del receptor es de  $-89$  dBm. Para esa misma distancia, la tasa de error de esa configuración es aproximadamente de 5%. Esta configuración se utilizó en todos los escenarios presentados en este artículo y demostró que modela de forma muy aproximada los radios de transmisión y de interferencia requeridos. Sin embargo, es importante destacar que en QualNet<sup>R</sup> ambos ra-

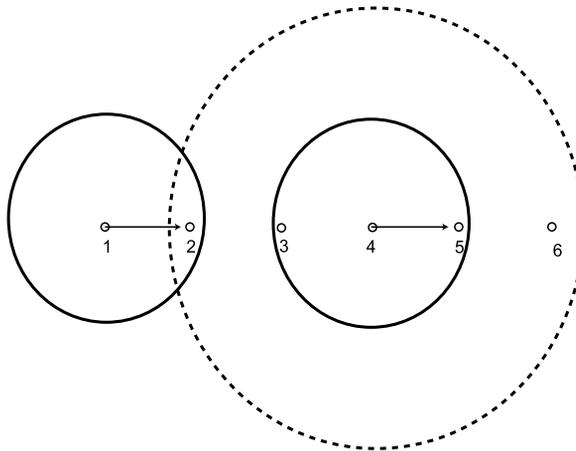
dios representan una aproximación, lo cual es más cercano a la realidad, y fueron obtenidos específicamente para una distancia entre transmisor y receptor de 200 m.

#### IV. VALIDACIÓN DE RESULTADOS UTILIZANDO QUALNET<sup>R</sup>

##### A. Cadena de nodos

Con el modelo de los nodos determinado según el procedimiento anterior, se validaron los resultados de [4]. El primer escenario es una cadena de nodos separados 200 m entre sí, como se muestra en la Figura 4. Los nodos se ubican a lo largo de una línea recta y el tráfico AdHoc Probe se origina en el nodo 1 y se dirige hacia el nodo del

extremo opuesto (nodo 6). La línea gruesa alrededor de cada nodo denota el radio de transmisión del mismo, la línea punteada es el radio 4 de interferencia. Según el estudio realizado en [5], si el radio de transmisión y de interferencia fueran iguales, la capacidad de la cadena sería 1/3 de su capacidad efectiva. En ese caso, los nodos 1 y 2 no pueden transmitir al tiempo pues el nodo 2 no puede transmitir y recibir simultáneamente. Los nodos 1 y 3 tampoco pueden transmitir a la vez porque el nodo 2 no puede escuchar correctamente si el nodo 3 está enviando. En cambio los nodos 1 y 4 sí podrían transmitir a la vez. Por lo tanto, la utilización de la cadena sería de 1/3.

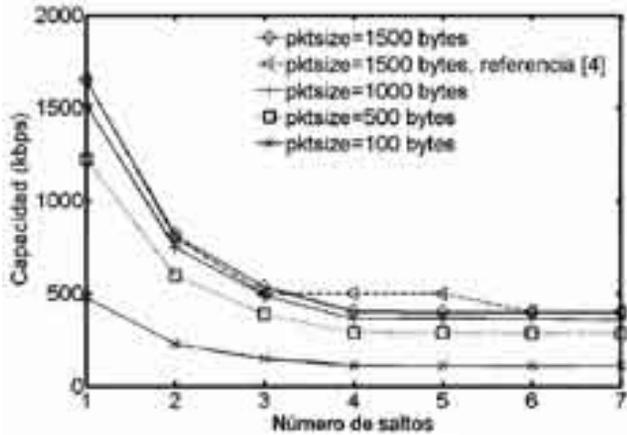


**Figura 4.** Topología de cadena de nodos. El tráfico AdHoc Probe va desde el primer nodo de la cadena hacia el último nodo. La línea continua corresponde al radio de transmisión y la línea punteada alrededor del nodo 4 denota el radio de interferencia.

Cuando el radio de interferencia es mayor que el radio de transmisión, la situación empeora. Tal como se explica en [4], para un radio de transmisión de 250 m y un radio de inter-

ferencia de 550 m, la transmisión simultánea entre los nodos 1, 2, 3 y 4 no es posible, lo cual implica que la capacidad de la cadena de la Figura 4 es 1/4 de la capacidad efectiva.

**Figura 5.** Capacidad estimada por AdHoc Probe para cadenas de nodos de diferente longitud y tamaño de paquete. Se observa que existe una pequeña diferencia entre la capacidad estimada en [4] para paquetes de 1500 Bytes y la estimada mediante QualNet<sup>R</sup>.



Como se mencionaba anteriormente, la capacidad efectiva de un trayecto IEEE 802.11 está dada por la capacidad máxima (2 Mbps para este estudio) y una reducción debida al “overhead” RTS/CTS/ACK. De acuerdo con [4], si un paquete RTS es de 40 bytes, los CTS y ACK son de 39 bytes y el encabezado MAC es de 47 bytes, el caudal, para paquetes de 1500 bytes será

$$\frac{1500}{1500 + 40 + 39 + 47} \times 2 = 1.8 \text{ Mbps}$$

Adicionalmente, en [5] se menciona que si se consideran los tiempos entre tramas, la capacidad efectiva se reduce aproximadamente a 1.7 Mbps. En consecuencia, para la cadena de nodos de la Figura 4, la capacidad estará entre 400 y 500 kbps.

Los resultados de las simulaciones de la cadena de nodos usando QualNet<sup>R</sup>, para diferentes tamaños de paquete y variando el número de saltos de la cadena, se muestran en la Figura 5. Al reducir el tamaño del paquete, los resultados demuestran que la capacidad estimada también decrece, lo cual es acorde con la relación  $C=P/T$ .

Por otra parte, la capacidad alcanza su máximo valor para un solo salto y se reduce a medida que crece la cadena, confirmando la relación inversa que existe entre la capacidad de una cadena y su longitud [4]. Cuando la longitud de la cadena es de 4 nodos, su capacidad es cercana a 500 kbps, lo cual concuerda con la estimación teórica explicada anteriormente. Para 5 nodos o más, la capacidad de la cadena permanece constante y es de 400 kbps aproximadamente, también dentro del intervalo previsto.

En la Figura 5 también se presenta la estimación calculada en [4] con ns-2 cuando el tamaño del paquete es de 1500 bytes. Aunque los resultados son muy parecidos, existe una ligera discrepancia cuando la longitud de la cadena es de 4 y 5 saltos, seguramente ocasionada por las diferencias entre el modelo de radio de interferencia y de transmisión fijos que utiliza ns-2 y el modelo aproximado, que se emplea en QualNet<sup>R</sup>.

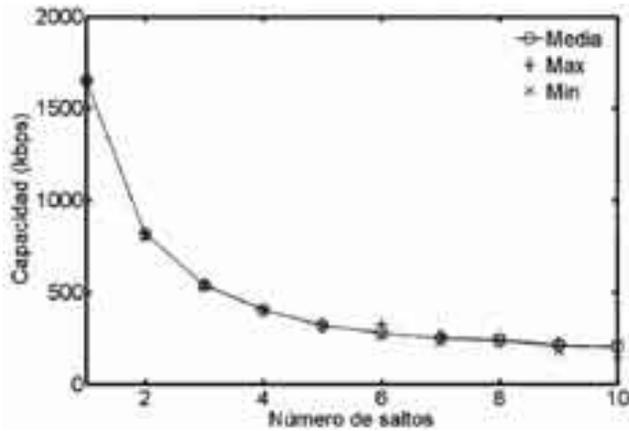
### B. Nodos en un mismo dominio de interferencia

Cuando existen N nodos en un mismo dominio de interferencia, la capa-

cidad efectiva es  $C/N$ , debido a que solamente uno de los nodos puede transmitir a la vez. Esta capacidad

teórica es estimada apropiadamente por AdHoc Probe, como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6.** Capacidad de una cadena de nodos en un mismo dominio de interferencia, calculada utilizando AdHoc Probe implementado en Qual-Net<sup>®</sup> con paquetes de 1500 bytes.

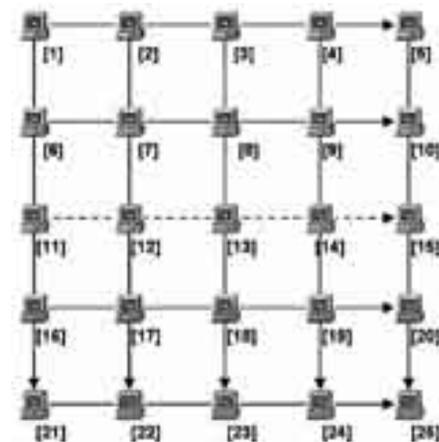


Este escenario consta de una cadena de nodos igual a la de la Figura 4, pero esta vez los nodos se encuentran separados 10 m entre sí. El tráfico AdHoc Probe también se dirige del primer nodo de la cadena hacia el último de la misma. En esas condiciones los paquetes llegarían en un solo salto hacia el receptor dado que éste se encuentra dentro del radio de transmisión del nodo de origen. Para evitarlo, se configuraron rutas estáticas en el simulador.

### C. Malla de nodos

Este escenario está compuesto por una malla de  $n \times n$  nodos, donde  $n$  toma valores entre 4 y 7. Las simulaciones de este escenario se dividen en dos partes: la primera corresponde a una malla con tráfico cursado horizontal y la segunda a una malla con tráfico cursado horizontal y vertical, como se observa en la Figura 7.

Los nodos se encuentran separados 200 m entre sí tanto vertical como

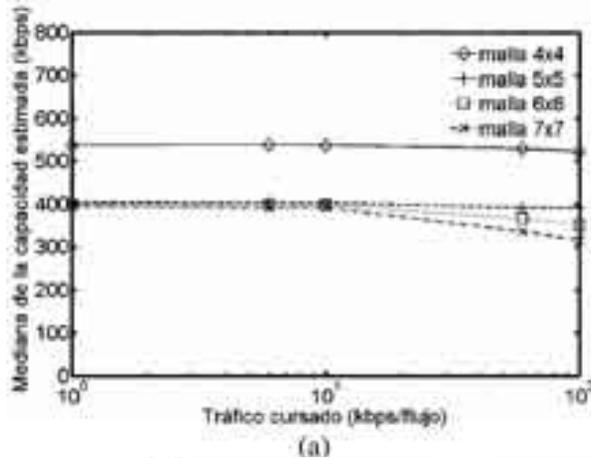


**Figura 7.** Malla de nodos con tráfico horizontal y vertical. En el escenario con tráfico horizontal se eliminan los flujos verticales; para 5 nodos, correspondería a los flujos entre los nodos 1-21, 2- 22, 3-23, 4-24 y 5-25. La estimación de capacidad se hace en la fila central, en este caso es el trayecto indicado por la línea punteada.

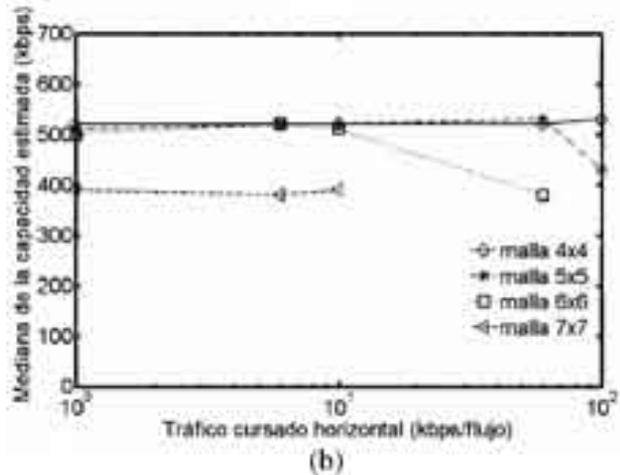
horizontalmente. La estimación de capacidad se realiza en el trayecto central con paquetes de 1500 bytes; las otras filas llevan flujos de Poisson, cuya tasa varía entre 1 kbps y 100 kbps. El protocolo de enrutamiento

utilizado es AODV. La capacidad medida por AdHoc Probe debe coincidir con la capacidad de una cadena de nodos que tenga la misma cantidad

de saltos. En la Figura 8 se muestran los resultados de la malla con tráfico cursado horizontal y se comparan con los obtenidos en [4].



**Figura 8.** Capacidad estimada en una malla con tráfico cursado de Poisson en dirección horizontal, (a) mediante QualNet<sup>R</sup> y (b) según [4].



Para los flujos hasta de 10 kbps la estimación coincide con la capacidad de la cadena correspondiente, de acuerdo con la Figura 5. Al comparar los resultados de QualNet<sup>R</sup> con los 6 obtenidos en [4], se evidencia la diferencia mostrada en la Figura 5 para las mallas de 5 y 6 nodos, en QualNet<sup>R</sup> la capacidad de estas dos

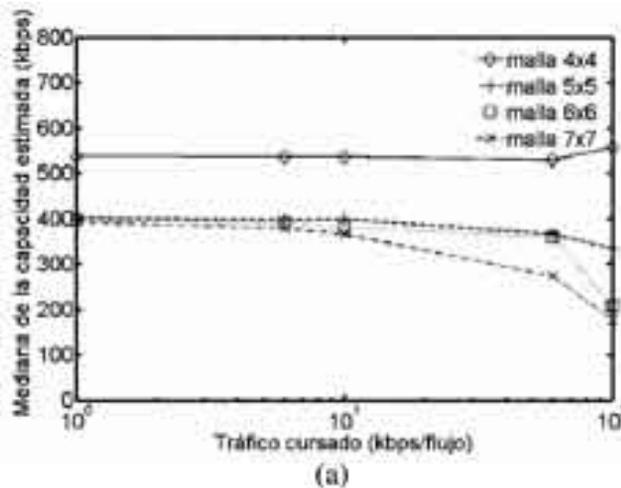
cadenas resulta menor que la reportada en [4].

A medida que el tráfico cursado aumenta, la estimación se dificulta pues se reduce la probabilidad de que uno de los 200 pares de paquetes que se envían no encuentre tráfico cursado. El tráfico cursado puede tener dos

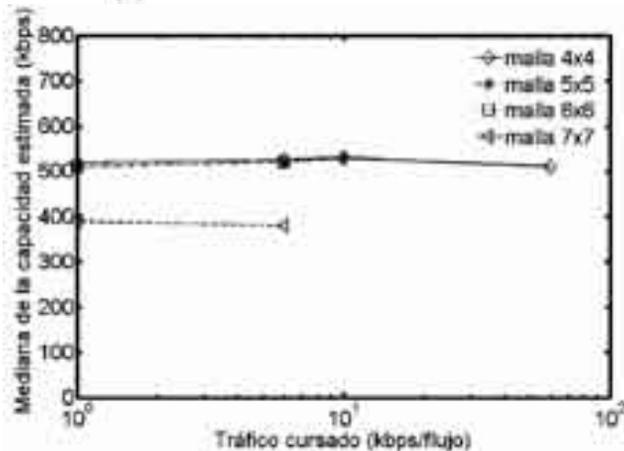
efectos sobre la estimación, los cuales se tratan en detalle en [2], [7] y [9]. Se puede presentar una subestimación de la capacidad cuando el segundo paquete del par sufre un retraso en cola debido al tráfico cursado. En este caso la dispersión del par de paquetes se incrementa y, en consecuencia, la capacidad estimada resulta menor.

El efecto contrario se denomina “compresión” y sucede cuando el tráfico cursado retarda al primer paquete del par pero no al segundo. Este fenómeno hace que la dispersión entre el par de paquetes sea más pequeña

que la creada por el enlace “cuello de botella”, produciendo una sobreestimación de la capacidad. Cuando el tráfico cursado empieza a saturar las mallas, en las Figuras 8 y 9 se observan los dos efectos anteriores, aunque la mediana indica que para los flujos de 60 y 100 kbps el efecto más frecuente es la subestimación de la capacidad. El único caso en el cual sucede lo contrario se obtuvo con QualNet<sup>®</sup>, en la malla de 4x4 con tráfico cursado horizontal y vertical, lo cual puede observarse en la Figura 9(a).

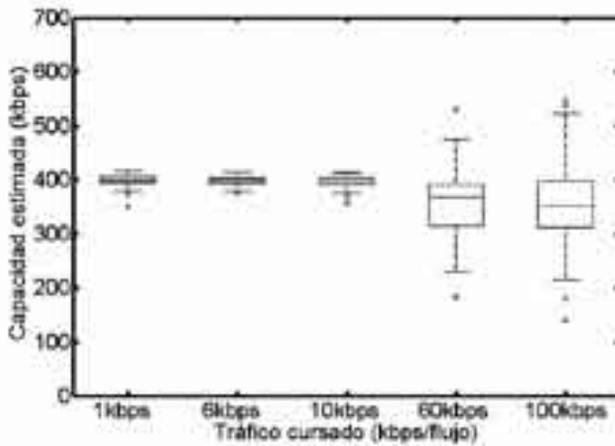


**Figura 9.** Capacidad estimada en una malla con tráfico cursado de Poisson en dirección horizontal y vertical, (a) mediante QualNet<sup>®</sup> y (b) según [4]. Cuando el tráfico cursado satura la malla, puede suceder que la dispersión del par de paquetes se comprima o se expanda; el segundo caso resulta más frecuente y cuando sucede, AdHoc Probe subestima la capacidad del trayecto



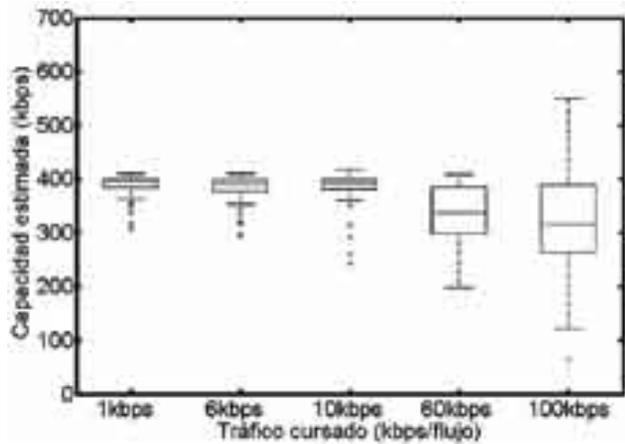
Los “box plot” de las Figuras 10 y 11 corresponden a las mallas de 6 y 7 nodos, donde se observa la mayor dispersión en las estimaciones. Para los flujos de 60 y 100 kbps y a medida que las mallas aumentan su tamaño, la capacidad calculada por AdHoc Probe se encuentra en un amplio margen. Cuando existe tráfico cursado horizontal y vertical, la situación es crítica. Para las cadenas de 6 y 7 nodos, la estimación podría resultar

en valores entre 0 y 1.6 Mbps, donde un valor de cero implica que no fue posible recibir al menos un par de paquetes durante el intervalo de prueba. Como se observa en las Figuras 8 y 9, en [4] no se muestran resultados para estas condiciones. AdHoc Probe, como cualquier otra herramienta que calcule la capacidad a partir de la dispersión, tiene dificultades para hacer la estimación cuando el tráfico cursado satura la red.

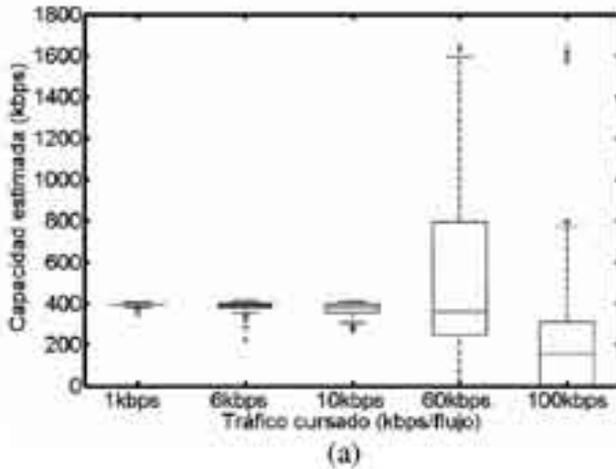


(a)

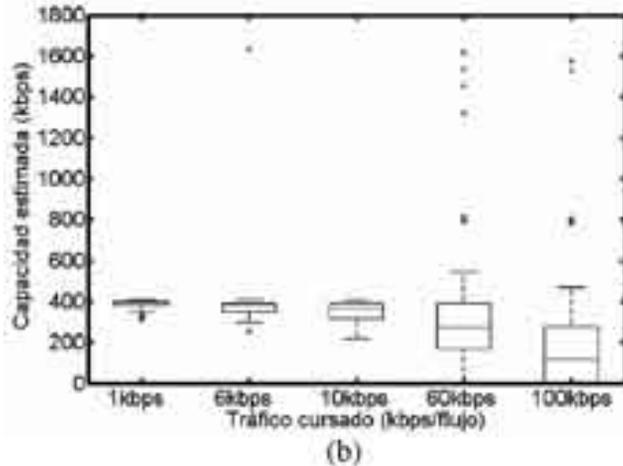
**Figura 10.** “Box plot” de las mallas con tráfico cursado de Poisson en dirección horizontal. La línea inferior de cada caja corresponde al valor del cuartil menor, la línea central es la mediana y la superior es el valor del cuartil mayor. Se presenta para (a) malla de 6x6, (b) malla de 7x7.



(b)



**Figura 11.** “Box plot” para las mallas con tráfico cursado de Poisson en dirección horizontal y vertical. La línea inferior de cada caja corresponde al valor del cuartil menor, la línea central es la mediana y la superior es el valor del cuartil mayor. Se presenta para (a) malla de 6x6, (b) malla de 7x7. La dispersión de los resultados es máxima para los flujos cursados de 60 y 100 kbps.



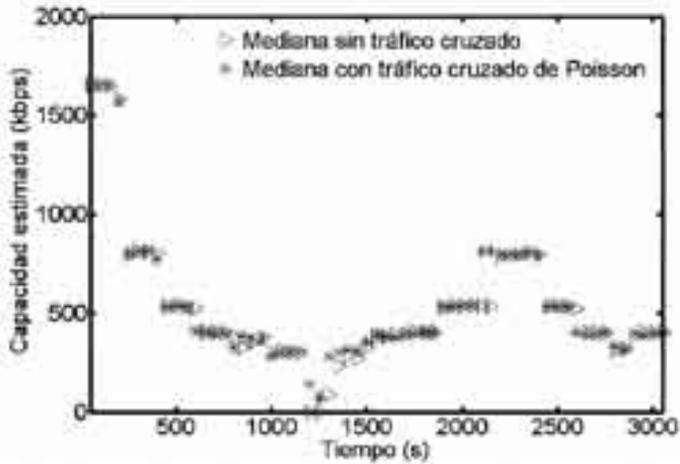
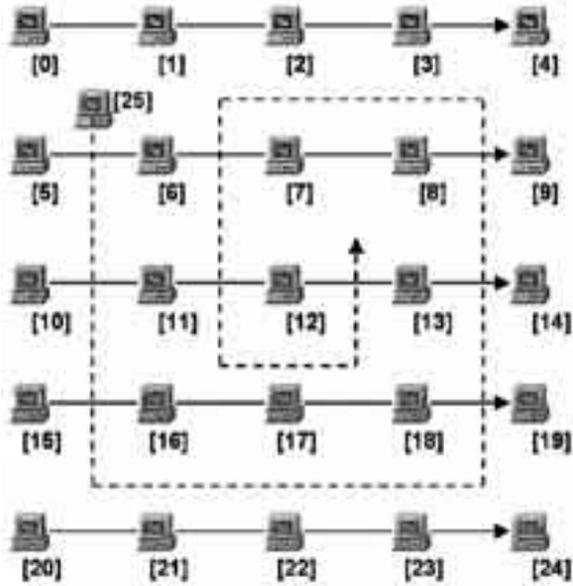
#### D. Nodo móvil

Este escenario consiste en un nodo que se desplaza en una malla de 5x5 nodos estacionarios, separados 200 m entre sí, el cual se muestra en la Figura 12. El nodo 25 es el nodo móvil, el cual se desplaza a 1 m/s a lo largo del trayecto indicado por 7 la línea punteada. El tráfico AdHoc Probe se transmite del nodo 0 al 25 y se envían paquetes de 1500 bytes. Se simulan los casos con tráfico cursado y sin él. Los flujos cursados se establecen

entre los nodos 0-4, 5-9, 10-14, 15-19 y 20-24 y llevan tráfico de Poisson a una tasa de 5 kbps. Los resultados se presentan en la Figura 13 y el “box plot” en la Figura 14.

En este escenario, a medida que el nodo se desplaza se establece una cadena de nodos de entre el nodo 0 y el 25 cuya longitud varía durante la simulación. La estimación de ancho de banda se realiza cada 50 segundos (el tiempo necesario para recibir los 200 pares de paquetes). En la Figura

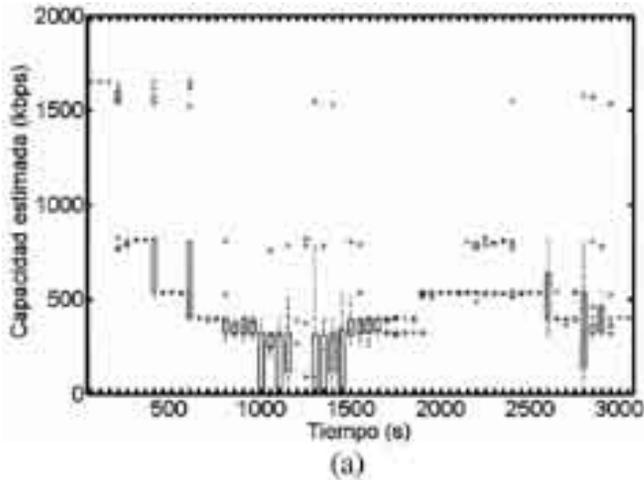
**Figura 12.** Escenario con nodo móvil. El nodo 25 se desplaza con una velocidad de 1 m/s a lo largo de la ruta señalada con la línea punteada. AdHoc Probe estima la capacidad entre el nodo 0 y el nodo 25 a medida que éste se mueve.



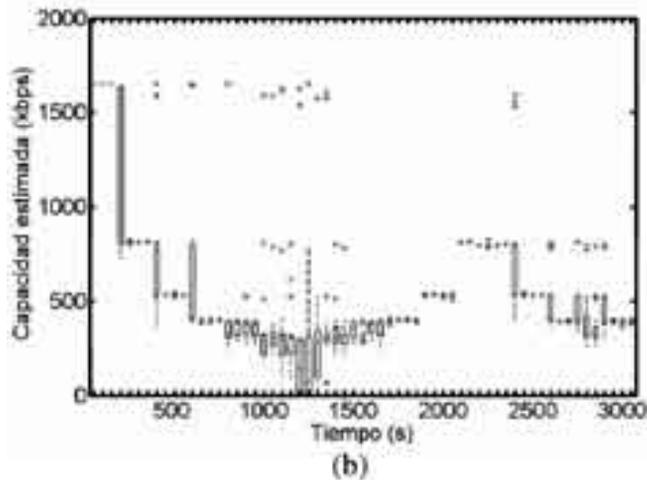
**Figura 13.** Mediana de la capacidad estimada para el escenario de nodo móvil, con tráfico cursado de Poisson y sin él.

13 se observa que al completar los primeros 200 m del recorrido, la capacidad cae de 1.6 Mbps a 800 kbps, que corresponde a una cadena de dos saltos. Cuando alcanza 500 m desciende a 500 kbps pues existen tres

saltos y al llegar a 600 m baja a 400 kbps, correspondiente a 4 saltos, allí sucede el primer cambio de dirección. En general AdHoc Probe logra una buena estimación; sin embargo, entre 1000 y 1500 segundos de simulación,



**Figura 14.** “Box plot” para el escenario del nodo móvil mostrado en la Figura 12. El eje horizontal es el tiempo de la simulación. Se hicieron 20 corridas. La Figura 14(a) corresponde a la simulación sin tráfico cursado y la 14(b) a tráfico cursado de Poisson.



cuando el nodo 25 se aproxima a los nodos 18, 19, 23 y 24, aumenta la dispersión de la capacidad estimada. No se debe al tráfico cursado pues en el “box plot” de la Figura 14 se observa que sucede lo mismo sin éste y obedece a la pérdida de los paquetes de AdHoc Probe debido a que las rutas no se refrescan oportunamente. Incluso, en este mismo intervalo se puede notar que cuando existe tráfico cursado se reduce la dispersión de la capacidad estimada, pues los nodos que llevan dicho tráfico ya han noti-

ficado su presencia a la red y gracias a ello la ruta entre el nodo 0 y el 25 se establece más rápidamente.

## V. DESEMPEÑO DE ADHOC PROBE EN ESCENARIOS CON TRÁFICO AUTOSIMILAR

Ha sido ampliamente estudiado que los procesos de llegada de paquetes en una red se modelan con más precisión utilizando procesos autosimilares que procesos de Poisson [14]. Con el fin de completar la evaluación de AdHoc Probe, se ha reemplazado el tráfico de

Poisson por tráfico autosimilar en las mallas de nodos con tráfico cursado y en el escenario del nodo móvil.

Las trazas de tráfico autosimilar se generaron utilizando el algoritmo desarrollado por Paxson en [12], el cual produce trazas aproximadas de procesos autosimilares conocidos como ruido gaussiano fraccional (FGN). El grado de autosimilaridad de una traza se determina a partir del parámetro de Hurst (H) que posea la misma. El parámetro H se encuentra entre  $1/2 < H < 1$ , donde valores cercanos a 1 denotan un alto nivel de autosimilaridad. En [6] se realizó un estudio para determinar si el tráfico en redes ad hoc es autosimilar, para lo cual se implementó una red de prueba con 20 computadores. De las trazas analizadas se calculó el parámetro de Hurst para diferentes niveles de agregación. Las trazas para la simulación se generaron con  $H=0.95$  y nivel de agregación de

10 segundos, una vez obtenidas se verificó si en efecto correspondían a ese valor utilizando el estimador de Whittle [15].

Dado que las trazas sintetizadas a partir de [12] entregan el número de llegadas por intervalo (en este caso 10 segundos) y lo que se requiere para las simulaciones es el tiempo entre llegadas, se realizó el siguiente procedimiento: primero, el número de llegadas por intervalo se convirtió en un valor entero. Luego ese número de llegadas por intervalo se cambió a tiempos entre llegadas distribuyéndolas uniformemente en el intervalo. Tal como en [4], se utilizaron paquetes de 1500 bytes tanto para el tráfico cursado como para AdHoc Probe y el promedio de paquetes en cada intervalo se escogió de manera que se lograra en promedio el flujo requerido para la simulación (1, 6, 10, 60 y 100 kbps). Los resultados se muestran en las Figuras 15 a 20.

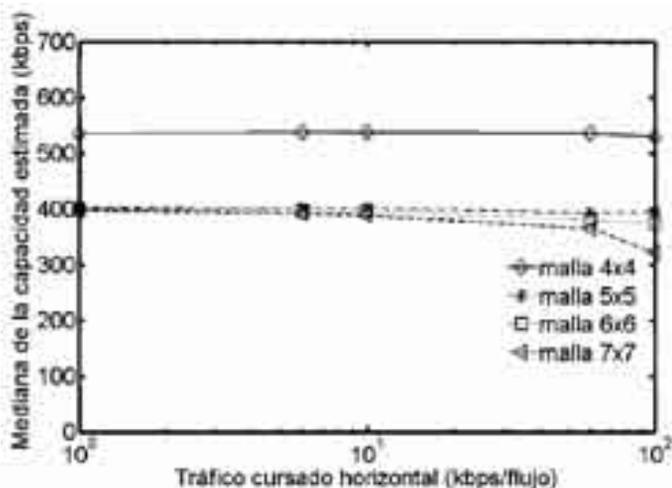
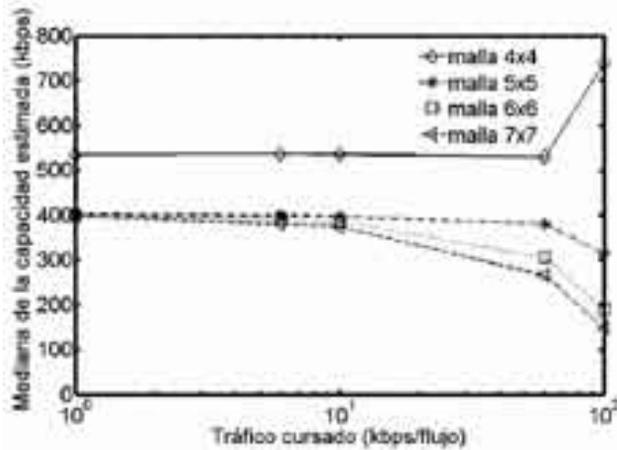


Figura 15. Capacidad estimada en una malla con tráfico cursado autosimilar de parámetro  $H=0.95$  en dirección horizontal.



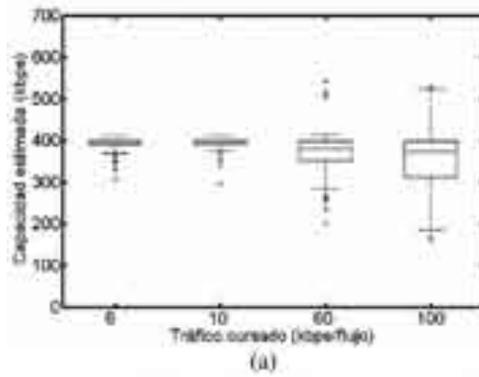
**Figura 16.** Capacidad estimada en una malla con tráfico cursado autosimilar de parámetro  $H=0.95$  en dirección horizontal y vertical.

En general, las capacidades estimadas con flujos cursados autosimilares y de Poisson tienen un comportamiento muy parecido. Para las mallas con tráfico cursado horizontal y vertical las estimaciones pierden precisión a medida que la malla aumenta su tamaño, debido a la denominada “autointerferencia” entre paquetes de una misma sesión que se encuentran separados por unos pocos saltos. Los “box plot” de las mallas demuestran que el efecto del tráfico cursado autosimilar también es crítico cuando logra saturar la red, y en las Figuras 17 y 18 se observa que dicha saturación se manifiesta con la subestimación y la sobrestimación de la capacidad del trayecto. Esto sucede cuando el tráfico cursado es de 60 y 100 kbps y se acentúa en las mallas más grandes, de 6 y 7 nodos.

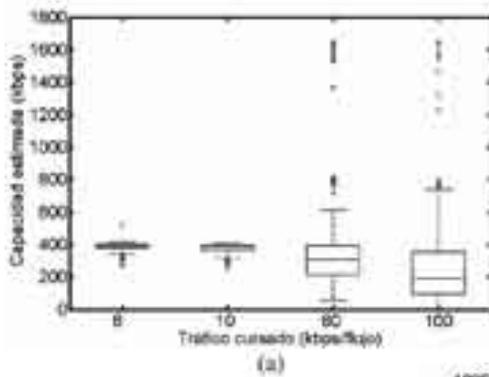
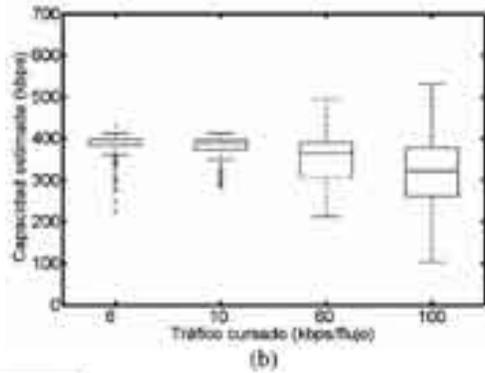
Es interesante notar que en presencia de tráfico cursado autosimilar horizontal y vertical, la estimación mejora con respecto a los escenarios con tráfico de Poisson horizontal y vertical. En las Figuras 11 (a) y (b),

correspondientes a tráfico cursado de Poisson, para el caso de 100 kbps el primer cuartil es igual a cero, es decir, el 25% de las muestras entregaron ancho de banda cero, lo cual implica que no se recibió ni siquiera un par de paquetes para hacer la estimación. En las Figuras 18 (a) y (b), para tráfico cursado autosimilar, el primer cuartil es un valor superior a cero, lo cual demuestra que la probabilidad de recibir un par de paquetes aumenta con tráfico cursado autosimilar. El tráfico autosimilar, a diferencia del tráfico de Poisson, cuando es agregado en diferentes escalas de tiempo presenta un comportamiento caracterizado por la presencia de ráfagas. Según los resultados obtenidos, este comportamiento aumenta la probabilidad de que un par de 9 paquetes atraviese la red sin resultar afectado por el tráfico cursado y por ello mejora ligeramente el desempeño de AdHocProbe en condiciones de alto tráfico.

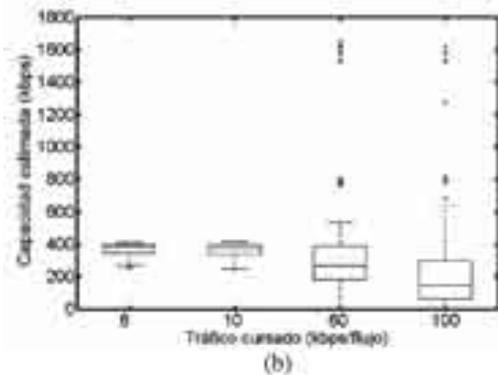
Para el escenario del nodo móvil, aunque la mediana de las estimaciones también coincide con tráfico cursado y

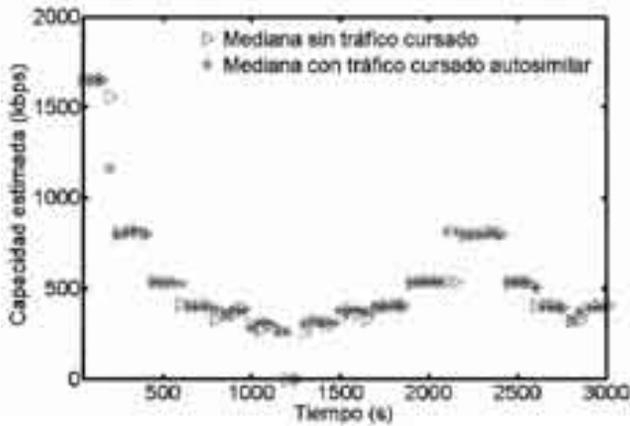


**Figura 17.** “Box plot” para las mallas con tráfico cursado autosimilar de parámetro  $H=0.95$  en dirección horizontal (a) malla de  $6 \times 6$ , (b) malla de  $7 \times 7$ .

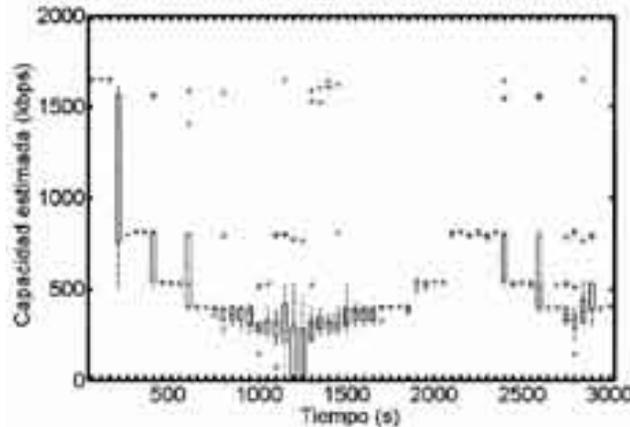


**Figura 18.** “Box plot” para las mallas con tráfico cursado autosimilar de parámetro  $H=0.95$  en dirección horizontal y vertical (a) malla de  $6 \times 6$ , (b) malla de  $7 \times 7$ .





**Figura 19.** Mediana de la capacidad para el escenario del nodo móvil con tráfico cursado autosimilar y sin él. El eje horizontal es el tiempo de simulación.



**Figura 20.** “Box plot” del escenario del nodo móvil con tráfico cursado autosimilar correspondiente a 20 corridas. El eje horizontal es el tiempo de la simulación

sin él, igualmente se manifiestan los problemas en la estimación cuando hay tráfico cursado en la red y cambia la longitud de la cadena que separa al nodo 0 del nodo 25. Este efecto se observa en la Figura 19 y especialmente en la Figura 20, pues aumenta la dispersión en los instantes donde cambia el número de saltos y, por ende, el ancho de banda de la ruta.

## VI. CONCLUSIONES

AdHoc Probe es una herramienta de estimación de capacidad que funciona efectivamente, siempre y cuando al menos un par de paquetes de la medición no resulte afectado por el tráfico cursado. La fortaleza de AdHoc Probe radica en que combina el concepto de dispersión y del mínimo retardo, esto último le da mayor precisión en

comparación con otras técnicas que utilizan solamente la dispersión para hacer la estimación.

Se comprobó que la estimación de AdHoc Probe es independiente del tipo de tráfico cursado que exista en la red, pero la calidad de los resultados depende de la intensidad del tráfico cursado presente. Si la red se encuentra saturada, AdHoc Probe puede sobre-estimar o sub-estimar la capacidad de la misma.

En las condiciones de estimación recomendadas en [4], es decir, usando 200 pares de paquetes y 4 pares por segundo, la estimación tomaría alrededor de 50 segundos. Si la red cambia su topología en este lapso, debido a nodos que se desplazan rápidamente, AdHoc Probe entregaría una estimación equivocada.

Cuando existen nodos en movimiento, AdHoc Probe puede estimar la capacidad con algunas limitaciones. Si existe tráfico cursado en la red, le tomará más tiempo estimar la capacidad cuando cambie la cantidad de saltos que separan al transmisor y al receptor. Desde luego, cuando el escenario es dinámico la rapidez con la cual el protocolo de enrutamiento encuentre las rutas afecta o favorece la estimación de capacidad.

A partir de los resultados obtenidos en este artículo se continúa trabajando en evaluar el impacto del tráfico autosimilar sobre la red. Así mismo se está trabajando en encontrar un algoritmo que permita afinar los dos parámetros para la estimación, es decir, el número de pares de paquetes y el intervalo entre pares. Sin embargo, es claro que en una red saturada es muy poco probable que la estima-

ción entregue un resultado preciso. También se está trabajando en una implementación que permita obtener simultáneamente la estimación de la capacidad máxima y mínima de un trayecto en una red ad hoc.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Saroui, P. K. Gummadi, S. D. Gribble. (2002). A fast technique for measuring bottleneck bandwidth in uncooperative environments. Presentado en IEEE INFOCOM.
- [2] R. Kapoor, L. Chen, M. Y. Sanadidi y M. Gerla. (2004). Capprobe: A simple and accurate capacity estimation technique. Presentado en ACM SIGCOMM.
- [3] V. Jacobson. Patchar: a tool to infer characteristics of internet paths. Disponible: <ftp://ftp.ee.lbl.gov/patchar>.
- [4] L. Chen., T. Sun., G. Yang, M.Y. Sanadidi y M. Gerla. (2005) AdHoc Probe: Path capacity probing in wireless ad hoc networks. Presentado en The first IEEE International Conference on Wireless Internet WICON.
- [5] J. Li, C. Blake, D. Couto, H. I. Lee y R. Morris. (2001). Capacity of ad hoc wireless networks. Presentado en ACM MobiCom.
- [6] S. Yin y X. Lin. (Marzo, 2005). Traffic self-similarity in mobile ad hoc networks. Presentado en The Second IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks WOCN.
- [7] C. Dovrolis, P. Ramanathan y D. Moore. "Packetdispersion tech-

niques and a capacity-estimation methodology". *IEEE ACM Transactions on Networking*, 12, (6), Dic. 2004.

- [8] V. Jacobson y M. J. Karels. (Sept. 1988). Congestion avoidance and control. Presentado en ACM SIGCOMM.
- [9] C. Dovrolis, P. Ramanathan y D. Moore. (2001). What do packet dispersion techniques measure? Presentado en IEEE INFOCOM.
- [10] Scalable Networks Technologies. <http://www.scalablenetworks.com>
- [11] K Xu, M. Gerla y S. Bae. (2002). How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in Ad Hoc networks? Presentado en IEEE Globecom.
- [12] V. Paxson. "Fast, approximate synthesis of fractional Gaussian noise for generating self-similar network traffic". *Computer Communications Review*, 27, pp. 5-18, Oct. 1997.
- [13] Scalable Networks Technologies, *Qualnet 3.9 User's Guide*, Octubre 2005
- [14] V. Paxson y S. Floyd. "Wide-area traffic: The failure of Poisson modeling". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3, (3), pp. 226-244, Junio 1995.
- [15] J. C. López. *Contribución al análisis del impacto de la correlación en las prestaciones de redes de alta velocidad*. Tesis doctoral, Universidad de Vigo, 1999.

## CURRÍCULOS

**María del Pilar Salamanca Azula**, candidata a título de Magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes. Ingeniera Electricista (1996) de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Su experiencia se centra en la administración de redes de computadores, donde ha diseñado e implementado soluciones de telefonía IP, mensajería unificada, gestión de redes y seguridad informática. Actualmente se encuentra vinculada al GEST (Grupo de Investigación en Electrónica y Sistemas de Telecomunicaciones) como investigadora en el tema de estimación de ancho de banda en redes ad hoc.

**Néstor Misael Peña Traslaviña**, Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes. Ingeniero Eléctrico (1987), Magíster en Ingeniería Eléctrica (1989) y Matemático (1991) de la Universidad de Los Andes. DEA en Telecomunicaciones (1994) y Doctor en Tratamiento de Señal y Telecomunicaciones (1997) de la Université de Rennes 1 en asociación con la École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne (ENST Bretagne), Francia. Actual director del GEST (Grupo de Investigación en Electrónica y Sistemas de Telecomunicaciones) de la Universidad de Los Andes. Sus áreas de interés son el modelamiento electromagnético y desarrollo de estructuras y circuitos a muy altas frecuencias, y la ingeniería de tráfico en redes de telecomunicaciones.☼