

# Movilidad humana: modelado y aplicaciones a las TIC



*Eduardo Andrés Marcelo*

*Doctorado en Ciencias y Tecnologías de la Información,  
UAM Iztapalapa*

*Adán Geovanni Medrano Chávez*

*Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas,  
UAM Cuajimalpa*

*Elizabeth Pérez Cortés*

*Miguel López Guerrero*

*Departamento de Ingeniería Eléctrica, UAM Iztapalapa*



**Abstract**

The simulation of a communication network, that includes mobile nodes carried by humans, needs to consider a realistic model for representing the movement of these nodes. Otherwise, the usefulness of the conclusions obtained from such work will be limited. In this paper the three main models used to represent human mobility are presented along with some projects where they were used.

**Keywords:** discrete-event simulation, human mobility models, RWP, Random Walk, SLAW.

**Resumen**

La simulación de una red de comunicaciones, que incluye dispositivos móviles portados por humanos, requiere de un modelo realista para representar el movimiento de esos dispositivos. De otra manera, la utilidad de las conclusiones que se puedan obtener de ese trabajo será limitada. En este artículo se presentan los tres modelos de simulación más utilizados para representar la movilidad humana, así como algunos proyectos en donde fueron utilizados.

**Palabras clave:** simulación de eventos discretos, modelos de movilidad humana, RWP, Caminata Aleatoria, SLAW.

**1. Introducción**

La simulación es una herramienta poderosa por múltiples razones: permite modelar sistemas complejos y estudiarlos con la finalidad de experimentar, optimizar parámetros, tomar decisiones y predecir resultados, entre otras cosas. Sin embargo, su utilidad estriba en la fidelidad con la que se representa el objeto simulado: mientras más cercano a la realidad, mejor.

Las redes de comunicaciones que integran dispositivos portados por seres humanos tienen una forma que cambia con el tiempo debido al movimiento de las personas. Evaluar propuestas de protocolos de comunicación y aplicaciones para este tipo de redes vía simulación requiere de un conocimiento detallado acerca de cómo se mueven los seres humanos: ¿qué lugares visitan?, ¿cómo están distribuidos esos lugares en el espacio?, ¿cómo eligen el siguiente punto a visitar?, ¿a qué velocidad se trasladan?, ¿durante cuánto tiempo permanecen en un lugar? Un modelo de movilidad humana brinda respuestas a todas estas interrogantes.

A lo largo de los años se han hecho diversas propuestas para modelar el movimiento de los dispositivos portados por humanos. El espectro abarca desde modelos que consideran que el movimiento de un nodo móvil es similar al de una partícula en un medio fluido hasta aquél en donde su movimiento respeta características estadísticas observadas en los humanos.

En este artículo se presentan los principales modelos de movilidad humana que han sido usados en la simulación de redes de comunicaciones. Además, para cada uno de los modelos, se presenta también un trabajo de investigación en donde ese modelo fue utilizado.

**2. Modelos de movilidad**

Aunque existen varios modelos de movilidad, los que se describen en esta sección ilustran claramente la relación que existe entre realismo y complejidad. En orden creciente de complejidad se presentan los siguientes tres modelos.

**2.1 Modelo de caminata aleatoria (*random walk*)**



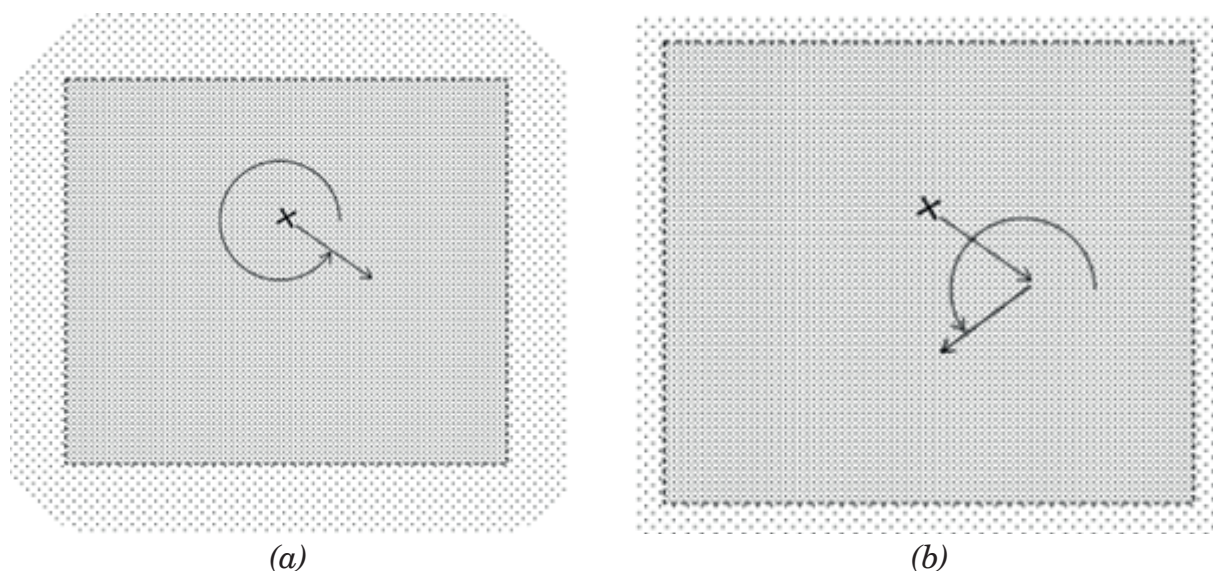
Un patrón de movimiento que fue ampliamente utilizado en etapas tempranas del desarrollo de sistemas de comunicaciones móviles fue el modelo de caminata aleatoria, al cual se le conoce también como modelo de movimiento browniano.

Para establecer las características del movimiento de cada objeto móvil en este modelo, se escoge al azar una dirección y una velocidad muestreando funciones predefinidas de probabilidad (ver fig. 1(a)). Con estos datos, el objeto se desplaza con un movimiento rectilíneo uniforme por cierto tiempo o por una distancia determinada. Este tiempo o distancia es un parámetro configurable que determina qué tan frecuentemente ocurren los cambios de dirección. Una vez que el móvil ha realizado tal desplazamiento, se vuelve a elegir una nueva dirección y velocidad de movimiento y el ciclo se repite (ver figura 1(b)). Si, durante uno de sus desplazamientos, el mó-

vil alcanza una de las fronteras del área de simulación, su dirección de movimiento se modifica, tal como ocurriría con un haz de luz que se topa con una superficie reflectante. El propósito de esta acción es que los objetos no abandonen el área de estudio.

Sobre la idea básica del modelo de caminata aleatoria, se han propuesto algunas variantes que pueden representar de mejor forma algunos contextos específicos. Por ejemplo, cuando el móvil alcanza un borde, se puede introducir otro de ellos por algún punto del perímetro que delimita el área de estudio. Con esta estrategia se puede mantener una densidad constante de objetos móviles en el área de estudio y representar la posibilidad de que salgan y entren constantemente al área de estudio.

Otra variante que se desprende del modelo de caminata aleatoria tiene su inspiración en el trazado de calles como el que se puede



*Figura 1. Reglas de movimiento del modelo RW. En (a) se muestra la posición inicial y la elección de características de movimiento (dirección y velocidad). En (b) se muestra que, una vez que el objeto se ha movido por un cierto tiempo (o distancia), se vuelven a elegir las características de movimiento.*

observar en la región de Manhattan. Esta zona de la ciudad de Nueva York se caracteriza por tener una traza urbana muy regular<sup>1</sup>. A fin de representar el movimiento en una zona como ésta, el modelo de movilidad obliga a que los desplazamientos sólo puedan ocurrir a lo largo de las líneas que forman una retícula. Cada vez que el móvil alcanza una intersección, debe elegir aleatoriamente una nueva dirección de movimiento dentro de tres posibilidades: seguir de frente o girar a su izquierda o a su derecha. Este modelo de movilidad se ha utilizado ampliamente y se ha mostrado (p.ej., ver (Seskar, 1992)) que es lo suficientemente preciso como para utilizarse en múltiples escenarios, especialmente cuando los posibles caminos forman un patrón regular.

El modelo de caminata aleatoria tiene varias propiedades que resultan ser muy útiles. Por un lado, los objetos móviles tienden a distribuirse espacialmente de manera aleatoria, pero uniforme (es decir, cualquier metro cuadrado del área de simulación contiene, en promedio, la misma cantidad de objetos). En consecuencia, si al inicio de una simulación los objetos se distribuyen de manera aleatoria, su densidad promedio en el área de estudio será constante desde el inicio y a lo largo de toda la simulación.

Una propiedad atractiva del modelo es que es fácil calcular la tasa media de cruces de un móvil hacia el exterior (o hacia el interior) de un área cerrada. Este resultado permite, a su vez, calcular muy fácilmente el tiempo de permanencia en la misma área cerrada (para una explicación más detallada, se sugiere revisar las referen-

cias (Thomas, 1998) y (Lopez-Guerrero, 2009)). El conocimiento de la tasa media de cruces puede ser útil, por ejemplo, para estimar a qué frecuencia se deberá ubicar un usuario móvil (ver p.ej. (Seskar, 1992)) a fin de realizar el traspaso de los servicios que atienden un usuario móvil cuando éste transita entre células diferentes de un sistema de telefonía celular. Cabe mencionar que, en este modelo, el objeto móvil puede ser un peatón o bien un vehículo.

Nuestro trabajo previo reportado en la referencia (Lopez-Guerrero, 2009) describe un ejemplo de la aplicación del modelo de movilidad de caminata aleatoria en estudios de desempeño. En este trabajo se consideró el área de cobertura de un punto de acceso 802.11g, como se muestra en la figura 2. En la figura se puede observar que cerca del punto de acceso (ubicación etiquetada como «AP») se pueden lograr altas velocidades de transmisión (siendo 54 Mbps el valor máximo), pero en ubicaciones más distantes, la velocidad disminuye gradualmente hasta 1 Mbps, después de lo cual la comunicación no es posible. En este escenario se simuló la presencia de una persona que deambula en el área portando una terminal inalámbrica 802.11g. El movimiento se simuló con el modelo de caminata aleatoria y el resultado fue que, en promedio, la velocidad de transmisión observada fue de alrededor de 10 Mbps, a pesar de que el estándar permite una velocidad máxima cinco veces mayor, aproximadamente. Trabajos independientes permitieron validar este valor como una buena aproximación al promedio de la velocidad que se puede lograr en una red de las características mencionadas.

<sup>1</sup> Las calles de Manhattan tienen un trazado tan regular que, dos veces al año, la puesta del Sol se puede observar en calles de la dirección este-oeste. Esta curiosa situación se ha bautizado como Manhattanhenge.

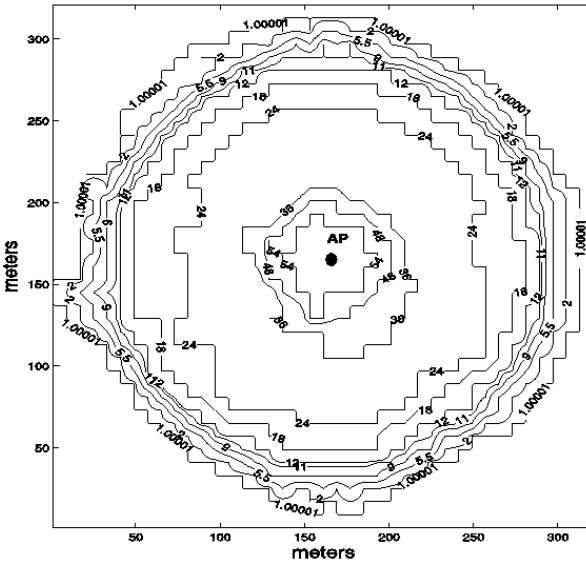


Figura 2. Ejemplo del área de cobertura de un punto de acceso 802.11g.

## 2.2 Modelo de recorrido con destinos aleatorios (*random waypoint*)

En la segunda mitad de la década de los noventa la telefonía celular ya había empezado a ganar popularidad. Con ello, el consumidor promedio empezó a conocer y apreciar las bondades de las comunicaciones inalámbricas. Entre otras cosas, un aspecto muy atractivo de estas tecnologías era la posibilidad de establecer una comunicación sin tener las limitantes ocasionadas por la poca flexibilidad del cableado de red. En esta época aparecieron los primeros estándares para la conexión de redes de área local inalámbricas (WLAN) y se desarrollaron novedosas ideas para crear redes inalámbricas a la demanda o *ad hoc*. A diferencia de una red celular o WLAN, en donde se tiene que instalar una radio-base o punto de acceso, las redes *ad hoc* inalámbricas no requieren de infraestructura preinstalada de comunicaciones. Cada estación de la red puede actuar a veces transmisor, otras como destino y otras tantas como equipo de comunicaciones (p.ej., cuando un transmi-

sor y un receptor no se encuentran en un alcance mutuo de comunicación, una tercera estación, colocada en un punto intermedio, podría actuar como punto de enlace entre los otros dos). Así, de ser necesario, se puede armar una red al vuelo con las estaciones que estén presentes en el momento y lugar requeridos. A este tipo de redes se les denomina MANET (*mobile ad-hoc networks*).

Naturalmente, en el análisis y diseño de las MANET es necesario considerar que cada estación (al ser en realidad una terminal móvil portada por un humano) tiene asociadas características de movilidad. Es así que, en afán de incorporar un grado adicional de realismo a los estudios de simulación con los que se evalúan este tipo de redes, se propuso el modelo de recorrido con destinos aleatorios (*random waypoint* o RWP). A la postre, éste se convirtió en el patrón de movilidad humana más comúnmente utilizado durante varios años en simulaciones de redes de comunicaciones en donde se ve involucrada la movilidad humana.

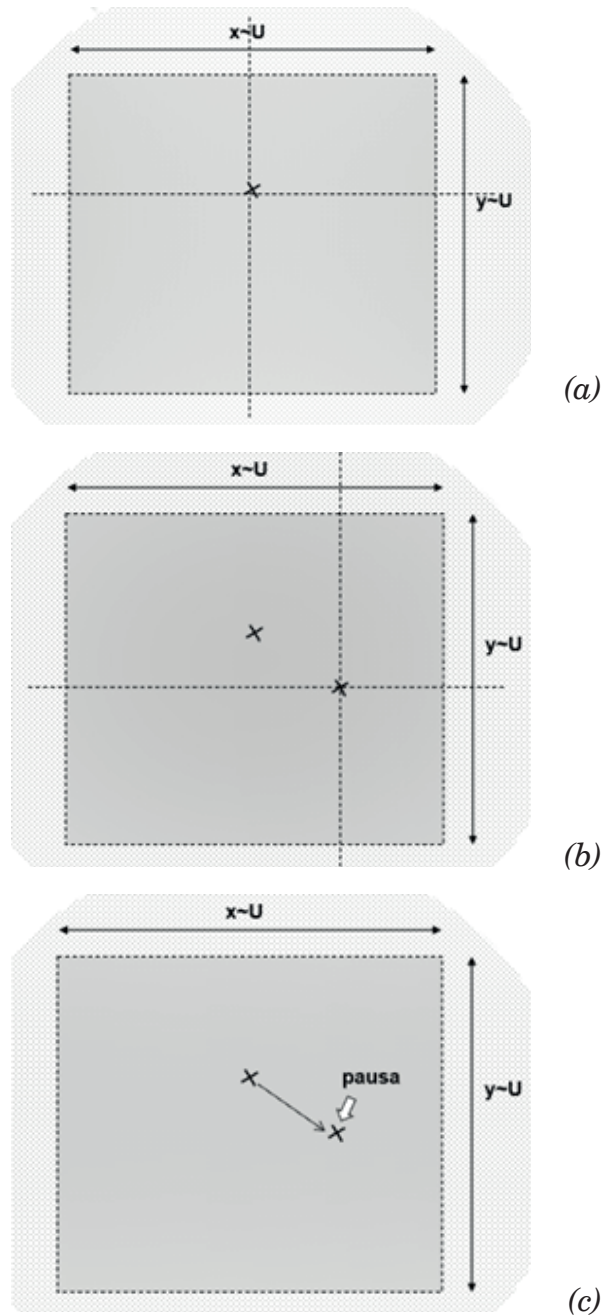
El modelo de movilidad RWP parece haber sido propuesto por David B. Johnson y David A. Maltz (Johnson, 1996) (Broch, 1998) como parte de un marco de evaluación que utilizaron para probar una propuesta de un protocolo de encaminamiento para redes MANET.

Al inicio de la simulación cada nodo se coloca en una posición elegida al azar dentro del área de estudio (ver figura 3(a)). El nodo permanece inmóvil en ese punto por cierto tiempo y una vez finalizada esta pausa, elige de manera aleatoria un destino (ver figura 3(b)) y se mueve hacia él a una velocidad obtenida de una distribución uniforme de probabilidad. Una vez que llega al destino, el ciclo se repite (ver figura 3(c)). Así, cada



nodo continúa con este comportamiento alternando pausas y movimientos dirigidos hacia destinos elegidos aleatoriamente. Las pausas tienen el propósito de representar el hecho de que una persona usualmente se mueve hacia un destino a fin de realizar ahí una tarea que le ocupa cierto tiempo. Una vez que finaliza alguna tarea en ese lugar, se mueve hacia un nuevo destino.

A pesar de que el grado de realismo de este modelo supera al de caminata aleatoria, también presenta ciertas características que deben ser tomadas en cuenta para su correcta utilización. En particular, supongamos que, en una simulación, un grupo de objetos se mueven siguiendo este patrón de movimiento. Después de transcurrido cierto tiempo, se podrá observar que los objetos tienden a concentrarse en el centro del área de estudio. Esta es una diferencia evidente respecto al modelo de caminata aleatoria en donde la distribución espacial de los objetos tiende a ser uniforme en un sentido probabilístico. Este fenómeno debe ser tomado en cuenta ya que si al inicio de la simulación los nodos se colocan tal como lo describen los autores en (Johnson, 1996) y (Broch, 1998), es decir aleatoriamente con distribución uniforme, existirá un periodo de transición desde la distribución inicial hasta que se alcanza la distribución de estado estable. Esto pareciera ser un problema menor, pero en realidad no lo es ya que para que para que el cálculo de valores promedio, obtenidos a partir de una simulación, sean estadísticamente válidos, las mediciones deben obtenerse en el estado estable. Por lo tanto, las simulaciones se deben dejar correr por cierto tiempo hasta que se alcance el estado estable y cualquier observación obtenida en el periodo transitorio se debe descartar. Esta estrategia para contender con la existencia de un transitorio parece ser adecuada y sim-

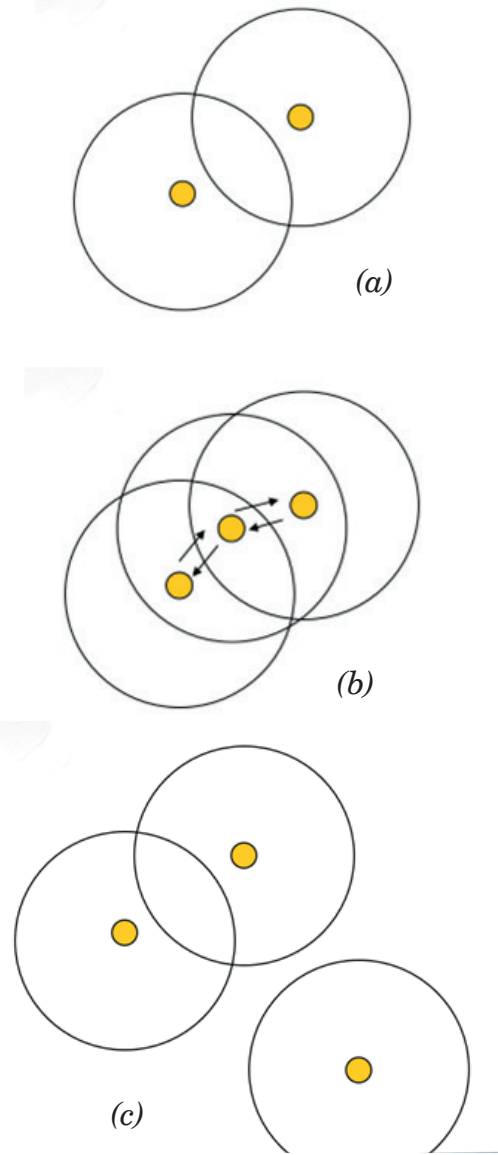


*Figura 3. Reglas de movimiento del modelo RWP. En (a) se muestra la posición inicial de un objeto móvil, el cual debe permanecer ahí cierto tiempo. En (b) se muestra la creación de un destino aleatorio hacia el cual debe ocurrir el movimiento. En (c) se muestra que una vez que el objeto alcanza el destino, debe permanecer ahí un cierto tiempo.*

ple, hasta que surgen preguntas tales como: ¿por cuánto tiempo hay que dejar correr la simulación para que alcance su estado estable? y, ¿cómo se sabe cuándo se alcanzó el estado estable? Más aun, si el sistema simulado es complejo, la parte descartada puede representar un largo tiempo de cómputo que será desperdiciado. Afortunadamente, William Navidi y Tracy Camp fueron capaces de deducir las características probabilísticas del estado estable del modelo RWP. Este valioso trabajo se reportó en (Navidi, 2004) y con ello, es posible iniciar una simulación asignándole a los objetos móviles propiedades de estado estable desde el inicio de la simulación, con lo que se elimina la existencia de un periodo transitorio.

A modo de ejemplo de cómo se puede utilizar este modelo, citamos un trabajo previo reportado en (Pascoe, 2010). En este trabajo, el propósito era caracterizar el tiempo de vida de las rutas en redes de tipo MANET. Como se mencionó anteriormente, en este tipo de sistemas la terminal de un usuario puede actuar como infraestructura de comunicaciones al permitir que las transmisiones de otros usuarios pasen a través de ella. Entonces, el tiempo de vida de las rutas es función de las características de movilidad de las personas.

En uno de los experimentos realizados se colocaron dos nodos fijos cercanos entre sí, pero suficientemente alejados como para que no fuera posible una comunicación directa entre ellos (ver figura 4(a)). Adicionalmente, en un punto intermedio (al alcance de ambos nodos) se colocó en una posición aleatoria un tercer nodo cuyo movimiento estaba gobernado por las reglas del modelo RWP (ver figura 4(b)). Este experimento se repitió una gran cantidad de veces a fin de determinar el efecto de los parámetros de



*Figura 4. Creación y rompimiento de una ruta en redes de tipo MANET. En (a) se muestran dos nodos cercanos entre sí, pero suficientemente alejados como para que no sea posible una comunicación directa. Los círculos representan el alcance de comunicación de cada nodo. En (b) se muestra cómo un tercer nodo, ubicado en la región de traslape de los rangos de comunicación, puede actuar como un retransmisor posibilitando la creación de una ruta. En (c) se observa que la ruta dura hasta que el tercer nodo abandona el área de traslape.*

los que depende el tiempo que transcurre hasta la falla de la ruta (ver figura 4(c)). Se concluyó que el tamaño del área en la que se traslapan los rangos de transmisión del par fuente-destino, así como la posición inicial del tercer nodo, afectan enormemente el tiempo de validez de la ruta.

### **2.3 Modelo de recorrido autosimilar con la menor acción (SLAW)**

En la búsqueda de un modelo de movilidad más realista, Lee et ál. (Lee, 2012) recolectaron trazas GPS en diferentes localidades y, a partir su estudio, dedujeron las características de SLAW, un modelo de movilidad humana cuyo acrónimo proviene de su nombre en inglés: *self-similar least-action walk model*. Las características que se observaron en esas trazas fueron las siguientes:

- P1. Si bien hay algunos lugares en donde los humanos permanecemos mucho tiempo, como el hogar o el trabajo, en la mayoría de los lugares que visitamos, nuestro tiempo de permanencia es corto.
- P2. Cuando tenemos que visitar varios lugares en sucesión, tendemos a minimizar las distancias que nos desplazamos, de manera que, es altamente probable que el siguiente lugar que visitemos esté muy cerca de nuestra ubicación actual.
- P3. Tendemos a regresar a localidades donde hemos permanecido por mucho tiempo, como nuestra casa o el trabajo. Eso implica que la mayoría de nuestros desplazamientos ocurren en áreas confinadas.
- P4. Nuestros desplazamientos son, en general, cortos y rara vez, muy largos.

- P5. El tiempo que transcurre entre dos encuentros consecutivos de dos individuos es, en general, corto y muy rara vez, largo.

Además de estas propiedades, en SLAW se integraron otras ya conocidas, como la velocidad promedio a la que un peatón se desplaza.

Si bien el realismo de un modelo de movilidad es importante, su utilidad depende en gran medida de la simplicidad con la que se puede utilizar. En efecto, si bien SLAW existe desde 2012, es posible ubicar una gran cantidad de trabajos de investigación posteriores a esa fecha en los que se recurrió a modelos de movilidad más simples con las implicaciones ya enunciadas. Parcialmente, esto se debe a que, hasta hace relativamente poco, la única manera de usar SLAW era generar un archivo de trazas *a priori* vía BonnMotion, un programa independiente de código abierto usado para generar escenarios de movilidad. Cada traza contiene el siguiente destino del caminante y el tiempo en el que ese punto debe ser alcanzado. Estas trazas son consumidas durante la simulación y cuando se alcanza el final del archivo, la simulación debe terminar, limitando la duración de los experimentos. Para aliviar esta situación, en 2020 nuestro equipo de trabajo puso a disposición de la comunidad un simulador de SLAW (Medrano-Chavez, 2020) que genera, al vuelo, tantas trazas como sea necesario evitando el inconveniente antes mencionado y ampliando la posibilidad de que SLAW sea utilizado.

Las características de la movilidad humana son reproducidas en nuestro simulador de SLAW de la siguiente manera: usa un mapa autosimilar en donde están ubica-



dos los lugares, o destinos, que los caminantes pueden visitar. Esas localidades están distribuidas de manera fractal con un grado de autosimilitud controlado por el parámetro de Hurst ( $H$ ) que puede tomar valores entre 0.5 y 1 para representar diferentes contextos geográficos. En cada viaje, un caminante debe visitar un conjunto de destinos ubicados en un conjunto predeterminado de áreas y el orden en el que los visita es dictado por el algoritmo de planeación llamado L ATP (*Least-Action Trip-Planning algorithm*), el cual está diseñado para seleccionar, con mayor probabilidad, de entre los destinos posibles, el que sea más cercano. Finalmente, SLAW utiliza un generador de números aleatorios para producir los tiempos de pausa adecuados. La figura 5 muestra un ejemplo de un viaje en SLAW.

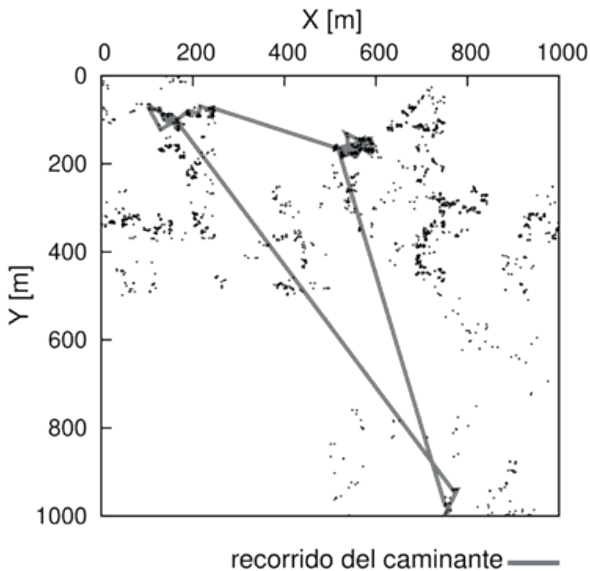


Figura 5. Mapa autosimilar con 2000 destinos, con  $H=0.75$  y una muestra de un viaje de SLAW.

Algunas de las características de la movilidad humana se relacionan directamente con los elementos de SLAW ya menciona-

dos. Tal es el caso de los tiempos de pausa (P1) que se obtienen directamente del generador de números aleatorios usando una distribución de Pareto acotada. La tendencia a minimizar la distancia al siguiente destino (P2) es soportada por el algoritmo L ATP (ver figura 6). El confinamiento de los movimientos de un caminante se produce al restringir la selección de los puntos de recorrido (P3). Finalmente, las dos últimas propiedades emergen de la interacción de los elementos de SLAW: la distribución de los vuelos (P4) resulta de cómo los puntos de recorrido están distribuidos sobre los mapas, de cómo se seleccionan los puntos de recorrido de un caminante y del algoritmo L ATP mientras que los tiempos de intercontacto (P5) son una consecuencia de la interacción de todos los elementos de SLAW.

```

PROCEDIMIENTO L ATP ( $T_k; w_c; a$ )
// d: Distancia Euclidiana
D  $\leftarrow$  {}
 $p_i \leftarrow 0.0$ 
 $div \leftarrow \sum_{w_i \in T_k} d(w_c, w_i)^{-a}$ 
PARA CADA  $w_i \in T_k$  HAZ
     $p_i \leftarrow d(w_c, w_i)^{-a} \times div^{-1} + p_i$ 
    Insert(D,  $p_i$ )
FIN PARA
 $rnd \leftarrow U(0,1)$ 
 $j \leftarrow \text{upper\_bound}(D, rnd)$ 
 $w_n \leftarrow \text{get\_item}(T_k, j)$ 
 $T_k \leftarrow T_k \setminus \{w_n\}$ 
REGRESA  $w_n$ 
FIN PROCEDIMIENTO

```

Figura 6. Algoritmo L ATP

### 3. Aplicaciones de los modelos de movilidad

#### 3.1 Propiedades de las redes MANET

Como consecuencia de la movilidad de los elementos que la conforman, una MANET tiene una forma que cambia cons-

tantemente y su rendimiento depende de los patrones de movimiento descritos por sus elementos.

Con el objetivo de estudiar el impacto del modelo de movilidad considerado al evaluar el rendimiento de una MANET, en (Medrano Chávez, 2015) experimentamos con tres modelos de movilidad: SLAW, RWP y HRWP (este último es una variante de RWP en donde la velocidad de los nodos y los tiempos de pausa se modelaron usando el conocimiento que se tiene sobre la movilidad humana).

Los resultados obtenidos muestran que, cuando los nodos se mueven de acuerdo a RWP y HRWP, el número de vecinos es casi constante y consistentemente menor al número de vecinos que tienen los nodos cuando se mueven de acuerdo al modelo SLAW (ver la figura 7). Más vecinos implican la posibilidad de establecer más rutas de comunicación multisalto y, en consecuencia, un mejor rendimiento de la red.

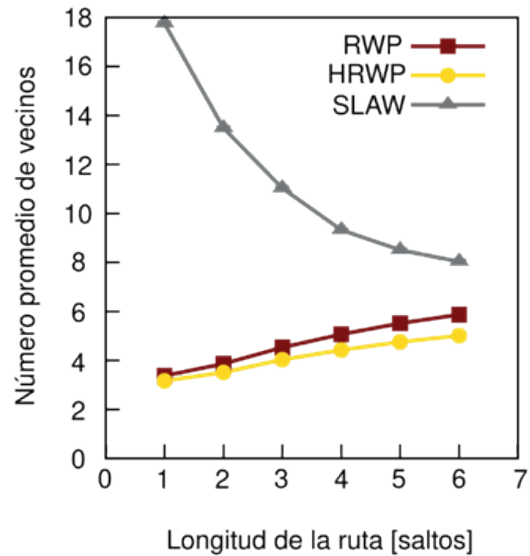


Figura 7. Número promedio de vecinos vs. distancia para una red de 300 nodos

Para apreciar el impacto de este hallazgo en el rendimiento de un protocolo de encaminamiento particular se midió la proporción de búsquedas exitosas de destinos y el tiempo de validez de una ruta para AODV, un popular protocolo de encaminamiento para redes móviles. Mientras que la proporción de búsquedas exitosas de destinos bajo

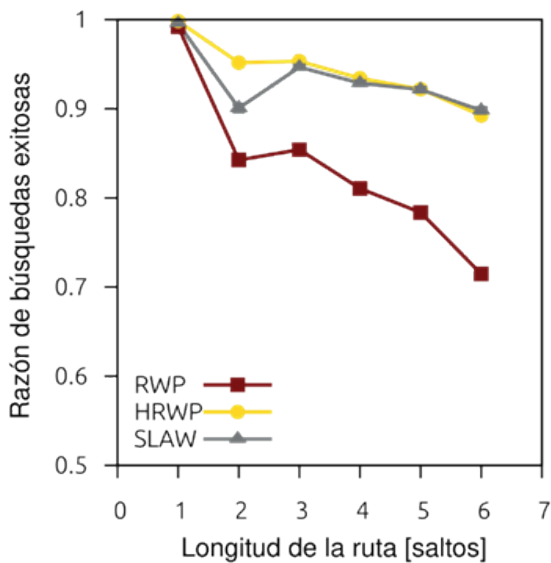


Figura 8. Tasa de búsqueda de destinos exitosa vs. distancia para una red de 300 nodos.

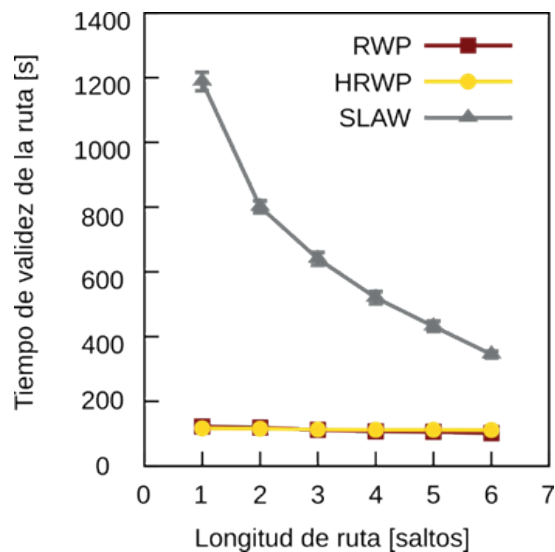


Figura 9. Tiempo de validez de la ruta vs. longitud para una red de 300 nodos.

SLAW es casi tan buena como la de HRWP (ver la figura 8), las rutas que se forman bajo SLAW duran, notoriamente, más tiempo del que duran las que se forman bajo los otros modelos (ver la figura 9).

Estos resultados muestran que, si se evalúa un protocolo considerando que los nodos se mueven bajo RWP, se puede llegar a conclusiones equivocadas respecto a su viabilidad pues se le está sometiendo a condiciones menos favorables que las que enfrentará en la realidad. A la luz de los resultados descritos, se puede afirmar que cuando se considera la movilidad humana, las MANET exhiben un alto nivel de conectividad, el movimiento de los nodos no crea situaciones tan adversas para la función de encaminamiento y el tiempo de vida de una ruta es tal que es posible construir redes sobrepuestas útiles.

### 3.2 Distribución de contenido en MANET

BitTorrent es un protocolo par a par de distribución de contenidos digitales diseñado para funcionar sobre redes con infraestructura. En BitTorrent un contenido se descarga por fragmentos. Al estar concebido bajo el paradigma par a par, todos los nodos son, a la vez, clientes, que pueden solicitar un contenido fragmento por fragmento, y servidores capaces de comenzar a distribuir el contenido desde el instante que reciben el primer fragmento. BitTorrent fue, a mediados de la primera década de este siglo, responsable de un 25% del tráfico en Internet. Este éxito motivó a la comunidad a proponer adaptaciones para hacerlo funcionar sobre una MANET. Dichas adaptaciones fueron evaluadas considerando que los nodos se movían de acuerdo al modelo RWP (Andrés-Marcelo, 2018).

Motivados por el rendimiento de una MANET cuyos nodos se mueven según SLAW, en (Andrés-Marcelo, 2018) evaluamos las propuestas existentes y nos planteamos el reto de construir una versión propia del protocolo. Para abordar este reto, en (Andrés-Marcelo, 2021) medimos el rendimiento de la versión original del protocolo BitTorrent sobre una MANET y sobre una red ad hoc.

En primer término, estudiamos el efecto del tamaño de la red en el progreso de la distribución del contenido y encontramos que, a diferencia de lo que sucede en una red ad hoc estática, hasta cierto punto, BitTorrent escala en una MANET cuyos nodos se mueven bajo SLAW. En la figura 10 podemos observar que mientras más nodos forman la red, más rápido se logra descargar el contenido en el 100% de los nodos.

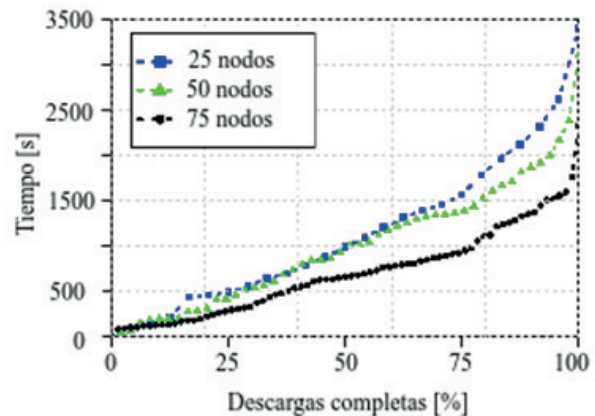


Figura 10. Progreso del porcentaje de descargas completas.

En segundo término, contrastamos el tiempo promedio de descarga de BitTorrent considerando que los nodos se mueven de acuerdo a dos modelos: SLAW y RWP. En la figura 11 podemos observar que el rendimiento del protocolo es mejor con SLAW. También observamos que el aumento de nodos es benéfico para ambas redes, pero este efecto se detiene



antes para RWP (75 nodos) mientras que para SLAW aún se observa en redes con 300 nodos. Por otro lado, una vez que el tiempo de descarga promedio comienza a incrementarse de nuevo, los tiempos de RWP crecen mucho más rápido que los correspondientes a SLAW. Estos resultados corroboran lo ya establecido en la sección precedente: la movilidad humana dota a las MANET de condiciones de conectividad que las hacen más viables para la construcción de aplicaciones.

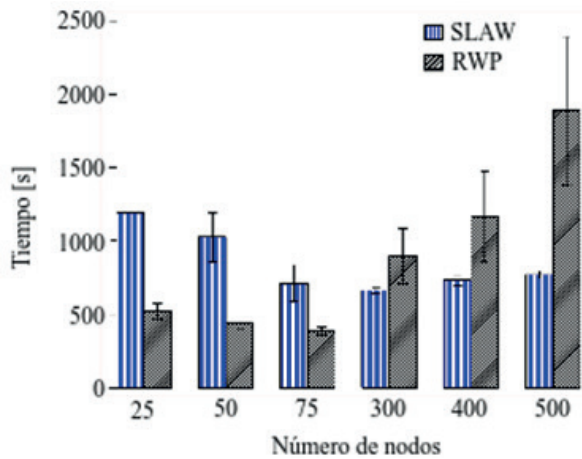


Figura 11. Tiempo promedio de descarga vs. tamaño de la red.

#### 4. Conclusiones y comentarios finales

En este breve recorrido por los modelos de movilidad humana más relevantes hemos descrito tres modelos en grado incremental de complejidad. Como se ha podido advertir, un modelo sencillo, como el de caminata aleatoria (RW), puede ser adecuado en ciertas circunstancias, pero es necesario tener presente sus limitaciones. Un modelo más complejo, como SLAW, presenta la ventaja de ser más fiel a la realidad; sin embargo, esto se logra a cambio de un mayor costo computacional. Entonces, la selección del modelo adecuado para un estudio no puede ser función del realismo únicamente, es necesario to-

mar en cuenta diversos factores o limitaciones (p.ej., el tiempo en el que se espera obtener los resultados o el poder de cómputo del que se dispone).

Al lector interesado en el tema de este artículo se le recomienda que visite el canal de YouTube «Modelos, conceptos y experimentos de simulación» (disponible en la página de Internet <https://www.youtube.com/@SimulacióndeEventosDiscret-v2g>). En este repositorio, el internauta podrá encontrar videos (compartidos por los autores de este artículo) que ilustran las características de los tres modelos de movilidad aquí explicados, así como sus diferencias fundamentales.

#### Referencias

Andrés-Marcelo, E., *Distribución de contenidos en redes MANET utilizando el paradigma P2P*, Idónea comunicación de resultados, Maestría en Ciencias y Tecnologías de la Información (UAM Iztapalapa), Ciudad de México, 2018.

Andrés-Marcelo, E., Pérez-Cortés, E., Medrano-Chávez A.G. y Lopez-Guerrero, M. Human Mobility Brings Scalability to BitTorrent over MANET, 2021 *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Dubai, 2021, pp.1-6. DOI: 10.1109/ISNCC52172.2021.9615687.

Broch, J., Maltz, D.A., Johnson, D.B., Hu, Y. C. y Jetcheva, J., A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. *4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '98)*. Association for Computing Machinery, New York, 1998, pp.85–97. DOI: 10.1145/288235.288256

- Johnson, D.B. y Maltz, D.A., Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. *Mobile Computig*, edited by Tomasz Imielinski and Hank Korth, chapter 5, pp.153-181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- Lee, K., Hong, S., Kim, S. J., Rhee, I., y Chong, S. SLAW: Self-Similar Least-Action Human Walk. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 20[2], pp.515–529, 2012. DOI: 10.1109/TNET.2011.2172984
- Lopez-Guerrero, M. y Gomez, J., A mobility-based channel model for wireless systems with adaptive modulation, *2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, St. John's, (NL, Canada), 2009, pp. 750-755. DOI: 10.1109/CCECE.2009.5090229.
- Medrano-Chávez, A.G., Pérez-Cortés, E. y Lopez-Guerrero, M., Simulation of the self-similar least-action walk model. *Journal of Simulation*, 16[3], pp.251-262, 2020. DOI: 10.1080/17477778.2020.1790998
- Medrano-Chávez, A.G., Pérez-Cortés, E. y Lopez-Guerrero, M.,. Studying the Effect of Human Mobility on MANET Topology and Routing: Friend or Foe? *13th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access (MobiWac '15)*. Association for Computing Machinery, New York, 2015, pp.39 46. DOI: 10.1145/2810362.2810370
- Navidi, W. y Camp, T., Stationary distributions for the random waypoint mobility model, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3[1], pp.99 108, 2004. DOI: 10.1109/TMC.2004.1261820.
- Pascoe, M., Gomez, J., Rangel, V. y Lopez-Guerrero, M., Route Duration Modeling for Mobile Ad-Hoc Networks, *Wireless Networks*, 16[3], pp.743-757, 2010. DOI: 10.1007/s11276-009-0166-1
- Seskar, I., Marić, S. V., Holtzman, J., y Wasserman, J., Rate of location updates in cellular systems, *Vehicular Technology Conference 1992*.
- Thomas, R., Gilbert, H. y Mazziotto, G., Influence of the Moving of the Mobile Stations on the Performance of a Radio Mobile Cellular Network, *Third Nordic Seminar on Digital Land Mobile Radio Communications*, Copenhagen, 1998.