

Enrutamiento y posicionamiento integrado en redes móviles ad hoc

Anabel Pineda-Briseño^{1,2}, Rolando Menchaca-Méndez², Giovanni Guzmán Lugo²

¹ Instituto Tecnológico de Matamoros, Tamaulipas,
México

² Instituto Politécnico Nacional,
Centro de Investigación en Computación, Ciudad de México,
México

anabel.pineda@itmatamoros.edu.mx, {rmen, jguzmanl}@cic.ipn.mx

Resumen. En este artículo se presenta el primer marco de trabajo para posicionamiento y enrutamiento multicast integrados en redes móviles ad hoc (MANETs por sus siglas en inglés). Este nuevo enfoque utiliza la misma señalización de control basada en regiones de interés para soportar tanto enrutamiento como posicionamiento. Se presenta POSTAL PRIME, que es una instancia de este marco de trabajo para enrutamiento y posicionamiento integrados. POSTAL PRIME calcula componentes conexos de la red que contienen tanto a las fuentes de datos como los destinos en el caso de enrutamiento, así como las referencias y los nodos con interés en conocer su posición en el caso de posicionamiento. El objetivo de las regiones de interés es restringir la diseminación de señalización de control a estas regiones de forma tal que se aumente la reutilización espacial del ancho de banda. Para estimar la posición de un nodo, POSTAL PRIME introduce un método novedoso llamado multilateración probabilística que determina la posición de un nodo basado en la posición de tres o más referencias y las distancias estimadas de manera imprecisa hacia ellas. Para evaluar la eficacia de POSTAL PRIME, se presenta un análisis detallado basado en simulaciones realistas. Los resultados muestran que POSTAL PRIME supera el desempeño de la funcionalidad combinada de ODMRP+Amorphous, que son los algoritmos de enrutamiento y posicionamiento más representativos en MANETs.

Palabras clave. Enrutamiento, multicast, posicionamiento, análisis basado en simulaciones, MANETs.

Integrated Routing and Positioning in Mobile Ad Hoc Networks

Abstract. This work presents the first integrated framework for positioning and multicast routing in mobile

ad hoc networks (MANETs). In this new approach, the same control signaling is used to support multicast routing and positioning, eliminating the distinction between on-demand and proactive signaling, which are substituted by interest-driven signaling. We also present the POSTAL PRIME protocol which is an instantiation of this integrated routing and positioning framework. We use the concept of region of interest to identify connected components of the network that include sources and destinations in the case of routing, and beacons and nodes with interest in computing their position in the case of positioning. This way, we can restrict the dissemination of control signaling to these regions, augmenting the spatial reutilization of bandwidth. POSTAL PRIME also introduces the probabilistic multilateration method for estimating the position of a node based on the position of three or more references and noisy estimates of distances to them. To assess the effectiveness of POSTAL PRIME, we present a detailed simulation-based analysis. The experimental results show that POSTAL PRIME outperforms the combined use of ODMRP+Amorphous, which are the most representative multicast routing and positioning protocols in MANETs.

Keywords. Routing, multicast, positioning, simulation-based analysis, MANETs.

1. Introducción

Los dispositivos móviles multifuncionales de altas prestaciones, bajo consumo de energía, y bajo costo que proliferan en la actualidad, son los dispositivos que poseen la capacidad de materializar a las redes móviles ad hoc (MANETs) [3, 26, 4]. Dichas redes finalmente pueden brindar

el soporte ideal a las aplicaciones distribuidas pensadas para dispositivos en movimiento [7, 33]. Estas aplicaciones (por ejemplo, de búsqueda y rescate) requieren comunicación uno a uno, muchos a muchos y en algunos casos información de localización para alcanzar sus objetivos [23, 16]. No obstante, en un escenario como éste, en realidad es muy bajo el porcentaje de nodos interesados en mantener algún tipo de comunicación y/o servicio de localización. Asimismo, los requerimientos que demandan aplicaciones con estas características contrastan con la forma de operar de los algoritmos de enrutamiento y posicionamiento que se usan hasta hoy. Primero, porque dichos algoritmos fueron diseñados para soportar ya sea enrutamiento o posicionamiento, y por lo tanto soportar simultáneamente comunicación uno a uno, muchos a muchos o un servicio de localización que requiere ejecutar en paralelo un protocolo para cada uno de ellos, lo cual es ineficiente desde el punto de vista de utilización de ancho de banda. Segundo, porque estos protocolos de enrutamiento y posicionamiento, que operan bajo demanda o de manera proactiva, hacen que la red sea inundada frecuentemente para mantener información actualizada, lo cual no es escalable.

Las principales contribuciones de este trabajo son: (1) La introducción de un marco de trabajo para enrutamiento y posicionamiento integrados en MANETs. Como instancia de este marco de trabajo se presenta POSTAL PRIME, un nuevo protocolo que emplea la misma señalización de control y que elimina la distinción entre señalización bajo demanda y proactiva, y en lugar de eso emplea regiones de interés [18]. Las regiones de interés son presentadas como respuesta al problema de escalabilidad que poseen de manera inherente las MANETs [5]. (2) La introducción de un nuevo método denominado multilateración probabilística que es usado para estimar la posición de un nodo. Esta técnica se basa en la posición conocida de tres o más referencias y en estimados de distancias a dichas referencias [29, 28]. La principal virtud del método de multilateración probabilística es que reduce de manera significativa el impacto negativo producto de las debilidades que posee el método

tradicional de trilateración empleado para estimar posición de un nodo. (3) La implementación en NS2 de la versión 2D de ODMRP+Amorphous, que son de los algoritmos de enrutamiento y posicionamiento más representativos del estado del arte en el contexto de MANETs. Esta implementación puede ser descargada de la página <http://sourceforge.net/projects/posalgorithms/>.

El resto del presente documento está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta el análisis de una muestra que consideramos representativa del trabajo que se ha desarrollado en las áreas de enrutamiento y posicionamiento en MANETs. El objetivo principal de dicho análisis es resaltar las componentes originales del trabajo propuesto. La Sección 3 presenta el protocolo POSTAL PRIME, el cual implementa el marco de trabajo para enrutamiento y posicionamiento integrados. En la Sección 4 se introduce el método de multilateración probabilística y se presenta un análisis de sus principales propiedades. La Sección 5 describe los resultados de los experimentos de simulación empleados para comparar POSTAL PRIME con dos de los protocolos de enrutamiento y posicionamiento más relevantes para MANETs. Nuestra comparación aborda el desempeño de los protocolos combinando tráfico multicast y de localización.

2. Trabajo relacionado

A la fecha se han propuesto un gran número de protocolos de posicionamiento y de enrutamiento para MANETs, sin embargo, y debido a las limitaciones de espacio, aquí se presenta sólo una muestra que consideramos representativa de ellos. El objetivo de este estudio es resaltar (i) la necesidad de desarrollar algoritmos capaces de soportar más de un tipo de tráfico. (ii) La diseminación de tráfico de control no está relacionada con el interés que los nodos tienen en los destinos, lo que provoca que se desperdicien recursos como ancho de banda, espacio en colas de datos y energía de las baterías. Lo anterior se debe a que las técnicas tradicionales de establecimiento de rutas obligan a nodos, que a pesar de que no participan en el soporte del

flujo de datos, a consumir recursos de ancho banda, memoria, procesamiento y batería. (iii) Se han desarrollado un número importante de protocolos optimizados para las características propias de la movilidad, sin embargo, cuando estas suposiciones se invalidan, dichos protocolos tienden a entregar un desempeño pobre. (iv) A pesar de que comparten muchas de sus funciones básicas, los algoritmos de posicionamiento para MANETs se han desarrollado para trabajar de forma independiente de los algoritmos de enrutamiento.

2.1. Enrutamiento multicast

En el enrutamiento basado en mallas los protocolos incluyen enlaces redundantes para conectar fuentes y destinos con el propósito de hacer a las estructuras de enrutamiento más robustas ante los continuos cambios topológicos. Los protocolos de enrutamiento multicast más representativos son: ODMRP [15], Hydra [20], CAMP [9], PUMA [38] y PRIME [19, 10]. ODMRP es un protocolo de tipo iniciado por transmisor donde las estructuras de enrutamiento se establecen bajo demanda cuando una fuente desea enviar datos a algún grupo multicast. Cada fuente inunda periódicamente paquetes de control conocidos como "solicitudes de unión" (*join request*), los cuales son diseminados en toda la red estableciendo y actualizando la información de membresía a la malla multicast. Los nodos que pertenecen a esta malla multicast son los encargados de retransmitir los paquetes generados por las fuentes hasta los receptores. La principal desventaja de ODMRP es que la red completa es inundada periódicamente por cada fuente activa de cada grupo multicast. Se han presentado varias extensiones a ODMRP como DCMP [8], NSMP [14] y MMARP [32] que reducen la sobrecarga de control, desafortunadamente, como ODMRP, sus extensiones inundan la red por cada fuente activa de cada grupo multicast. El primer protocolo multicast basado en mallas e iniciado por el transmisor que únicamente requiere que se inunde la red por cada grupo multicast activo es Hydra [20]. Hydra es uno de los primeros protocolos en usar el concepto de región de

interés para contener la diseminación de paquetes de control a las regiones de la red donde son realmente útiles. CAMP [9] es un protocolo del tipo iniciado por receptor que evita la necesidad de inundar la red por cada fuente activa por medio de la pre-designación de uno o más nodos como nodo núcleo de algún grupo multicast. Los receptores se unen a los grupos multicast por medio de solicitudes que son enviadas de forma unicast al núcleo del grupo deseado. PUMA [38] es otro protocolo basado en núcleos que también usa el enfoque iniciado por el receptor. A diferencia de CAMP, PUMA emplea un protocolo de elección distribuida para elegir dinámicamente a los núcleos de cada grupo multicast y no requiere la ejecución concurrente de un protocolo de enrutamiento unicast. La principal deficiencia de PUMA es que los receptores inundan la red completa con anuncios de grupo aún y cuando no existan fuentes activas para dichos grupos. DPUMA [21] es una variante de PUMA que calcula conjuntos dominantes de la malla multicast para reducir el número de retransmisiones de datos redundantes y mejorar así la escalabilidad del protocolo. PRIME [19, 10] utiliza enrutamiento basado en interés para soportar tanto tráfico unicast como multicast. En el enrutamiento basado en interés, se establecen regiones de interés que están formadas por fuentes y destinos, así como aquellos nodos que pueden fungir como retransmisores para los flujos de datos. El tráfico de control y datos es confinado en estas regiones por lo que se aumenta la reutilización espacial del ancho de banda, memoria y energía. Finalmente, en [17], se presenta un protocolo de enrutamiento geocast y multicast integrado basado en interés.

2.2. Posicionamiento

En esta sección se describen de manera resumida algunas de las propuestas más relevantes en el área de los algoritmos de posicionamiento libres de distancias. En general, se asume que sólo una fracción de los nodos conocen de manera previa sus posiciones, ya sea a través de una configuración manual o haciendo uso de receptores GPS. Este tipo especial de nodos son conocidos como "referencias, anclas

o balizas¹” y sus posiciones son utilizadas como puntos de referencia para ayudar al resto de los nodos a estimar sus posiciones. DV-Hop [25] es un algoritmo de localización que adopta el mecanismo de vector de distancias [27] para diseminar información de localización. Por lo tanto, cada referencia inunda periódicamente la red con información de control. En DV-Hop, cada nodo determina su distancia más corta en saltos hacia cada referencia. Posteriormente, calcula la distancia euclidiana entre él y cada referencia multiplicando su distancia en saltos por el promedio de longitud de un salto. El promedio de longitud de un salto se calcula usando las distancias euclidianas entre referencias así como la distancia en saltos entre ellas. Por último, los nodos estiman sus posiciones utilizando el método de trilateración. Amorphous [24], es similar a DV-Hop en cuanto a que las referencias diseminan periódicamente información topológica y de localización hacia toda la red, pero a diferencia de DV-Hop, en Amorphous se asume que la densidad de nodos es constante y conocida, lo que le permite estimar fuera de línea la longitud promedio de un salto. Amorphous utiliza en su última etapa triangulación para estimar la posición de sus nodos. Una de las alternativas más sencillas dentro de los algoritmos libres de distancias es el algoritmo Centroid [6]. En este esquema, los nodos reciben mensajes de las referencias ubicadas dentro de su rango de transmisión, es decir, las que se encuentran a un solo salto de distancia, y simplemente estiman sus coordenadas como el centroide del polígono formado por las referencias. Por su parte, APIT (*Approximate Point-In Triangulation*) [12] utiliza una prueba basada en área llamada PIT (*Point-In Triangulation*) que consiste en repetir diferentes combinaciones de tres referencias que se encuentran dentro del rango de transmisión de los nodos. Ésto permite a cada nodo determinar si se encuentra o no dentro de la región triangular generada por cada grupo de tres referencias. Después de la prueba, APIT utiliza un algoritmo de escaneo de malla (*grid-scan algorithm*) [13] para encontrar la región donde se intersecten el

mayor número de triángulos. Finalmente, APIT estima que la posición del nodo se encuentra en el centroide de dicha región.

3. POSTAL PRIME

En esta sección se describen de manera general los componentes y la funcionalidad de POSTAL PRIME, protocolo que se propone como instancia del marco de trabajo para enrutamiento y posicionamiento integrados.

3.1. Gestión de anuncios de malla

POSTAL PRIME establece y mantiene estructuras de enrutamiento y posicionamiento, una estructura de enrutamiento para cada grupo multicast activo, es decir, para cada grupo con fuentes y receptores activos, y una estructura de posicionamiento para cada referencia activa con al menos un nodo que desea estimar su posición (nodo demanda). Cada fuente o nodo demanda que se activa envía una solicitud de malla (*Mesh Request, MR*) que se disemina hasta un horizonte con un umbral predefinido. La estructura de un *MR* se puede ver en la tupla definida en (1).

$$(type, horizon, persistent, id^S, d_S^B, id^D, sn^S), \quad (1)$$

donde *type* establece el tipo de mensaje, *horizon* es un umbral definido para determinar el límite de la diseminación de un *MR* hasta un horizonte predefinido, *persistent* es una bandera que indica persistencia de interés, id^S es el identificador de la fuente o del nodo demanda que hace la solicitud, d_S^B es la distancia en saltos desde el nodo *B* hacia la fuente o hacia el nodo demanda *S*, id^D es el identificador del destino o de la referencia, sn^S es el identificador para el mensaje.

En el caso de enrutamiento, la primera solicitud adjunta un paquete de datos. Si el interés expresado por la fuente se extiende a más de un paquete de datos, el destino de un *MR* establece y mantiene una malla de enrutamiento que abarca al menos una fuente activa, así como un conjunto de nodos en el caso de enrutamiento multicast. En lo que respecta a posicionamiento, una referencia activa emplea el primer *MR* enviado por un

¹Terminología empleada en el contexto de posicionamiento en MANETs.

nodo demanda para establecer una malla de posicionamiento que contiene la referencia activa y al menos un nodo demanda.

POSTAL PRIME emplea anuncios de malla (*Mesh Announcement, MA*) para mantener activas tanto las mallas de enrutamiento multicast como las mallas de posicionamiento. En un flujo multicast, los receptores del grupo ejecutan un algoritmo distribuido que emplea anuncios *MA* para elegir el núcleo del grupo, que será el receptor que continuará generando *MA*s para el grupo multicast. Esta elección de núcleo no es necesaria para posicionamiento. La estructura de un *MA* se define en (2).

$$(id^{*B}, core_D^{*B}, sn_D^{*B}, d_D^{*B}, dl_D^{*B}, next_D^{*B}, core_x, core_y), \quad (2)$$

donde id^{*B} es el identificador de un nodo transmisor B . $core_D^{*B}$ es el identificador del destino o la referencia conocida por B . sn_D^{*B} es el número secuencial más reciente conocido por B con respecto al destino o referencia D . d_D^{*B} es la distancia de B hacia el destino o hacia la referencia. dl_D^{*B} es usado para indicar la distancia más grande del nodo B hacia una fuente activa o hacia un nodo demanda activo. Esas distancias son usadas para direccionar *MA*s a fuentes o nodos demanda que aún no están incluidos en las regiones de interés. $next_D^{*B}$ es el identificador de siguiente salto preferencial del nodo transmisor B en dirección hacia el destino o hacia la referencia D . En posicionamiento, $core_x$ y $core_y$ corresponde a la posición x y y de la referencia.

Un núcleo activo o referencia activa envían anuncios *MA* con números de secuencia que crecen monótonamente durante el tiempo en el que hay al menos una fuente activa interesada en un destino o un nodo demanda activo interesado en la información de localización generada por alguna referencia. Cuando no se detectan fuentes activas o nodos demanda activos, el núcleo o la referencia detiene la generación de *MA*s después de un tiempo finito, lo que provoca la eliminación de la información de la malla correspondiente. En posicionamiento, si el interés de un nodo demanda se mantiene, éste seguirá generando *MA*s que servirán para notificar el interés de mantener activa una referencia y por ende para mantener activa la malla de posicionamiento que esta genera. El estado blando o *soft state* de enrutamiento y

posicionamiento es el tiempo de espera antes de ser eliminadas las estructuras. En las estructuras de enrutamiento el estado blando es de cuatro *MA* consecutivos en caso de no recibir *MA*s o paquetes de datos. En posicionamiento, las estructuras son eliminadas en caso de no recibir *MA*s en cuatro períodos *MA* consecutivos.

3.2. Regiones de interés

Para limitar el tráfico de control y de datos a aquellas partes de la red que necesitan la información, se define una región de interés para cada malla de enrutamiento y/o posicionamiento establecida. En enrutamiento, la región de interés de un flujo es un componente conexo que incluye todos las fuentes, los receptores y los nodos retransmisores necesarios para conectarlos. En posicionamiento, la región de interés es un componente conexo que contiene la referencia activa, los nodos demanda activos interesados en ella y los nodos retransmisores necesarios que los conectan.

En enrutamiento, las regiones de interés son establecidas con el soporte de los paquetes de datos que fluyen desde las fuentes hacia los destinos multicast. En lo que respecta a posicionamiento, las regiones de interés son establecidas con el soporte de mensajes *MR* que fluyen desde los nodos demanda hacia las referencias.

El Algoritmo 1 es empleado para decidir si un nodo tiene que retransmitir un *MA* de un destino multicast D . El Algoritmo 2 es empleado para decidir si un nodo tiene que retransmitir un *MA* hacia un nodo demanda. Para un destino multicast, el algoritmo devuelve *true* si el nodo es un nodo receptor (rc), una fuente (sc), un nodo miembro de la malla (mm) o si el nodo forma parte del camino (pn), esto es, si se ha retransmitido previamente un paquete de datos procedente de cualquier fuente al destino D durante *MA* períodos (en segundos). En caso contrario, verifica el valor $r \bmod R$ y regresa *true* si es igual a 0, con cualquier otro valor regresa *false*. El valor $r \bmod R$ es empleado para reducir la frecuencia con la que un nodo transmite *MA*s al exterior de la región de interés. El valor inicial de r es 0. Para una referencia, el algoritmo

devuelve *true* si el nodo es un nodo demanda (*dn*) o si es un nodo camino (*pn*), esto es, si se ha retransmitido previamente un mensaje *MR* procedente de cualquier nodo demanda hacia una referencia *D* durante *MA* períodos (en segundos), y *false* en caso contrario.

Algoritmo 1: Transmisión de MAs en la región de interés de enrutamiento.

```

1 if AddressType(M.A.D) == multicast then
2   if rc ∨ sd ∨ mm ∨ pn then
3     if rmodR = 0 then
4       r++;
5     else
6       r++;
7       return false
8   else
9     if pn ∨ sd then
10      else
11        return false
12  return true;
```

Algoritmo 2: Transmisión de MAs en la región de interés de posicionamiento.

```

1 if AddressType(M.A.D) == anchor then
2   if dn ∨ pn then
3     else
4       return false
5   return true;
```

La Figura 1 presenta un ejemplo de una región de interés de un flujo multicast y de una referencia. Respecto a la región de interés de un flujo multicast, los nodos etiquetados *p*, *p'* y *p''* forman parte de la región de interés debido a que ellos son parte de las rutas más cortas entre la fuente *s* y el núcleo *d*. En posicionamiento, los nodos etiquetados *r*, *r'* y *r''* forman parte de la región de interés porque se encuentran a una distancia en saltos menor o igual que *n* hacia la referencia *b*. Los nodos *x* y *t* ayudan a mantener la región conectada en caso de que el nodo *n* se mueva y quede fuera de rango de la referencia y de *r*.

Es importante destacar que POSTAL PRIME integra información de enrutamiento y posicionamiento en la misma señalización de control, es

decir, trabaja de manera oportunista de tal manera que mientras las referencias diseminan información de localización, todos los nodos que forman la estructura de posicionamiento mantienen rutas hacia las referencias. De igual manera, establece mallas y regiones de interés en los procesos de enrutamiento y posicionamiento, ambos procesos bajo demanda. Estas características son únicas de POSTAL PRIME, y en conjunto hacen que su señalización de control sea más eficiente.

3.3. Estimación de posición

El proceso de estimación de posición en POSTAL PRIME se divide en dos fases. La primera fase consiste en determinar las distancias euclidianas existentes entre un nodo demanda y cada referencia dentro de un horizonte predefinido. El proceso de estimación de posición es iniciado por el nodo demanda. Las distancias euclidianas son calculadas salto a salto una vez que una referencia se activa e inicia el proceso de diseminación de información de localización. Para calcular la distancia euclidiana entre un nodo *A* y nodo *B*, se determina el promedio del uno-vecindario de ambos nodos y posteriormente se traduce dicho promedio a la distancia euclidiana empleando la fórmula utilizada en [24] para determinar la longitud de un salto. Cuando un nodo demanda recibe información de localización de al menos tres referencias, selecciona las tres distancias euclidianas más cortas hacia ellas y posteriormente emplea el método multilateración probabilística para estimar su posición. El método multilateración probabilística se describe a detalle en la siguiente sección.

4. Multilateración probabilística: un nuevo método de estimación de posición

En los últimos años, la localización se ha convertido en una de las áreas de investigación más activas debido a su importancia en aplicaciones tanto militares como civiles. Evidencia de lo anterior, es que en 2015, DARPA le da al desarrollo de nuevas tecnologías de posicionamiento importancia de seguridad nacional [31]. En el contexto

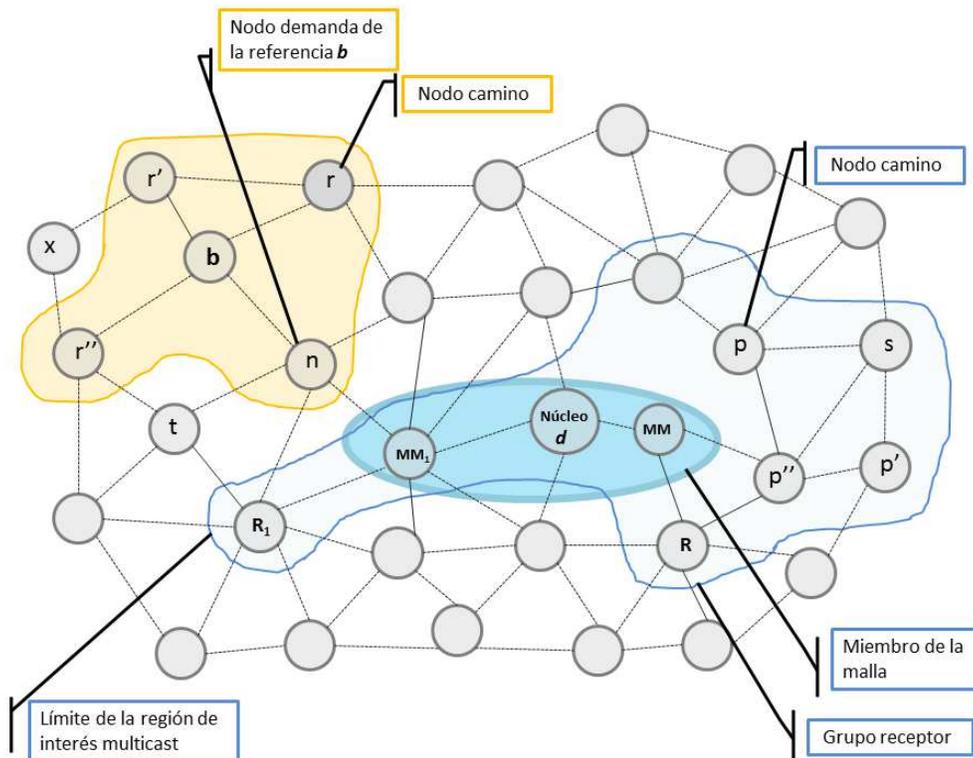


Fig. 1. Ejemplos de regiones de interés de un flujo multicast y de una referencia

de las MANETs, el problema de localización radica en conocer la posición de nodos móviles [4] en base a la posición de un conjunto de referencias que también pueden ser móviles. En general, existen diversos artículos seminales que presentan propuestas de solución al problema de localización [25, 24, 6, 12, 11]. La literatura hace referencia a DV-Hop como el algoritmo estándar en la categoría de algoritmos de posicionamiento libres de distancias. El algoritmo DV-Hop emplea el conteo de saltos [22, 23, 16] como técnica de medición de distancia entre nodos y el método de trilateración [23, 16, 37] como técnica para estimar la posición de sus nodos. El método tradicional de trilateración es un método empleado para determinar la posición de un punto o nodo¹. Para ello se requiere de información de localización de al menos tres referencias, así como también conocer las distancias exactas hacia ellas. Sin embargo, en el contexto de las MANETs,

trilateración ha resultado ser ineficiente. Esto se debe principalmente a la naturaleza dinámica que poseen este tipo de redes que provoca que los métodos empleados para estimar las distancias entre nodos reporten distancias imprecisas y como consecuencia degraden la calidad de estimación de posición que ofrece trilateración. Aunado a esto, en redes con un alto nivel de movilidad como son las MANETs, no es posible garantizar la no-colinealidad entre referencias, precondition que establece el método de trilateración para estimar la posición de un nodo. Los aspectos antes mencionados generan en trilateración: incertidumbre, inconsistencia y ambigüedad. En relación a esto, existen diversos trabajos seminales [39, 30, 34, 2] enfocados a mitigar las deficiencias de trilateración, no obstante, éstos no han logrado tener mayor impacto. Por tal motivo, presentamos como principal contribución de nuestro trabajo de investigación de tesis doctoral, un método que

denominamos multilateración probabilística [29], y posteriormente en [28] un análisis experimental más extenso y detallado de éste. Este es un método novedoso orientado a estimar la posición de un nodo, basada en la posición de tres o más referencias y las distancias estimadas de manera imprecisa hacia ellas. El objetivo de este método es resolver las deficiencias del método de trilateración señaladas previamente.

4.1. Trilateración y sus deficiencias

Trilateración es un método empleado para determinar la posición de un nodo [23, 16, 37]. Para ello se requiere de información de localización de al menos tres referencias, así como también conocer las distancias exactas hacia ellas. Desafortunadamente, en situaciones donde las estimaciones de distancias no son fiables, como sucede generalmente en el contexto de las MANETs que se caracterizan por generar topologías no isotrópicas (ver Figura 2(d)), trilateración sufre de incertidumbre (ver Figura 2(a)) cuando tres circunferencias no se intersecan en un único punto, inconsistencia (ver Figura 2(b)) en el que los diferentes grupos de tres referencias producen resultados distintos y ambigüedad (ver Figura 2(c)) donde el sistema de ecuaciones tiene dos soluciones espejo [39]. Por otra parte, incluso con estimaciones perfectas de distancias, trilateración también puede fallar si el nodo es colineal con cualquier grupo de dos referencias de las tres utilizadas como referencias.

4.2. Multilateración probabilística

Multilateración probabilística [29, 28] es un método novedoso orientado a estimar la posición de un nodo, basada en la posición de tres o más referencias y las distancias estimadas hacia ellas. El objetivo del método es el de resolver las deficiencias del método de trilateración como la incertidumbre, no consistencia y ambigüedad [39], que surgen cuando la información de la ubicación de las referencias o las estimaciones de las distancias hacia ellas no son exactas.

El método multilateración probabilística define para cada referencia β una función de densidad de probabilidad $P_{\beta}(x, y)$ que asigna a cada punto en

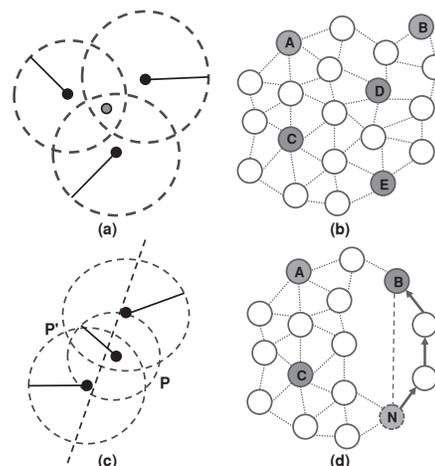


Fig. 2. Deficiencias de trilateración. (a) Incertidumbre. (b) Ambigüedad. (c) Inconsistencia. (d) Ejemplo de una red no isotrópica

el plano (o espacio) una probabilidad de encontrar un nodo. Dado que las posiciones reales de las referencias y los nodos son independientes, se puede suponer que la probabilidad de encontrar un nodo en un punto (x, y) dado, definido por la función $P_i(x, y)$, también es independiente de la probabilidad definida por otra función $P_j(x, y)$ para el mismo punto. Por lo tanto, como se muestra en la Ecuación 3, la probabilidad de encontrar un nodo en un punto (x, y) , dada la información proporcionada por un conjunto B de n referencias, se puede calcular como el producto de las probabilidades definidas por las n funciones de densidad de probabilidad:

$$P_B(x, y) = \prod_{i=1}^n P_i(x, y). \quad (3)$$

La posición estimada por el método multilateración probabilística es el punto (x, y) donde $P_B(x, y)$ tiene su máximo.

4.2.1. Estimación de posición en 2D

La función de densidad de probabilidad definida en la Ecuación 4 que se basa en una función Gaussiana con parámetros μ y σ . En la Ecuación 4, x_{β} y y_{β} son las coordenadas de la posición de la referencia β , μ_{β} es la distancia estimada

a la referencia β , σ_β es proporcional al error de estimación de la distancia hacia la referencia β y \mathcal{N}_β es una constante de normalización. Como se puede ver en la Ecuación 4, la probabilidad de encontrar un nodo en un punto dado en el plano es simplemente una función de su distancia a las referencias. La Figura 3(a) muestra una representación gráfica de esta función de densidad de probabilidad donde se puede observar que se tiene un número infinito de máximos situados sobre la circunferencia con centro en (x_β, y_β) y radio μ_β :

$$\mathbf{P}_\beta(x, y) = \frac{1}{\mathcal{N}_\beta} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_\beta)^2 + (y-y_\beta)^2} - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \right]^2}. \quad (4)$$

Con información de un conjunto B de tres o más referencias, se puede sustituir la Ecuación 4 en la Ecuación 3 para obtener la función de densidad de probabilidad (pdf) definida en la Ecuación 5. La Figura 3(b) muestra una gráfica de tres pdfs superpuestas definida por la información de tres referencias, mientras que la Figura 3(c) muestra una gráfica del producto de tres pdfs que tiene un único máximo que será la posición calculada por el método multilateración probabilística:

$$\mathbf{P}_B(x, y) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\mathcal{N}_i} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i}{\sigma_i} \right]^2}. \quad (5)$$

Con el fin de encontrar el máximo de la Ecuación 5, se calculan las soluciones de las derivadas parciales (Ecuaciones 6 and 7) de la Ecuación 5. Sin embargo, ya que las Ecuaciones 6 y 7 son igual a cero sólo si la última sumatoria es igual a cero, sólo se tiene que resolver simultáneamente las Ecuaciones 12 y 13. Esto último representa lo mismo que la solución de la Ecuación 10 donde las Ecuaciones 12 y 13 se elevan al cuadrado y luego se suman:

$$\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{P}_B(x, y) = \left[\prod_{i=1}^n \frac{1}{\mathcal{N}_i} \right] \left[e^{\sum_{i=1}^n -\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i}{\sigma_i} \right]^2} \right] \left[- \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right], \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \mathbf{P}_B(x, y) = \left[\prod_{i=1}^n \frac{1}{\mathcal{N}_i} \right] \left[e^{\sum_{i=1}^n -\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i}{\sigma_i} \right]^2} \right] \left[- \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right], \quad (7)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}, \quad (8)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}, \quad (9)$$

$$0 = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right]^2. \quad (10)$$

Por último se puede emplear el método de Newton [35], con el centro de gravedad de las posiciones de las referencias como punto de partida para encontrar la raíz de la Ecuación 10. Es importante señalar que el método de Newton converge cuadráticamente si la derivada de la Ecuación 10 es continua y no cero en el vecindario de la raíz.

4.2.2. Estimación de posición en 3D

El método multilateración probabilística puede extenderse fácilmente para calcular la posición de un nodo en un espacio 3D en base a la información proporcionada por un conjunto B de cuatro o más referencias. En tres dimensiones, la función de densidad de probabilidad basada en funciones Gaussianas, definida por un conjunto de n referencias está dada por la Ecuación 11:

$$\mathbf{P}_B(x, y, z) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\mathcal{N}_i} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i}{\sigma_i} \right]^2}, \quad (11)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}}, \quad (12)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}}, \quad (13)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(z-z_i)}{\sigma_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}}. \quad (14)$$

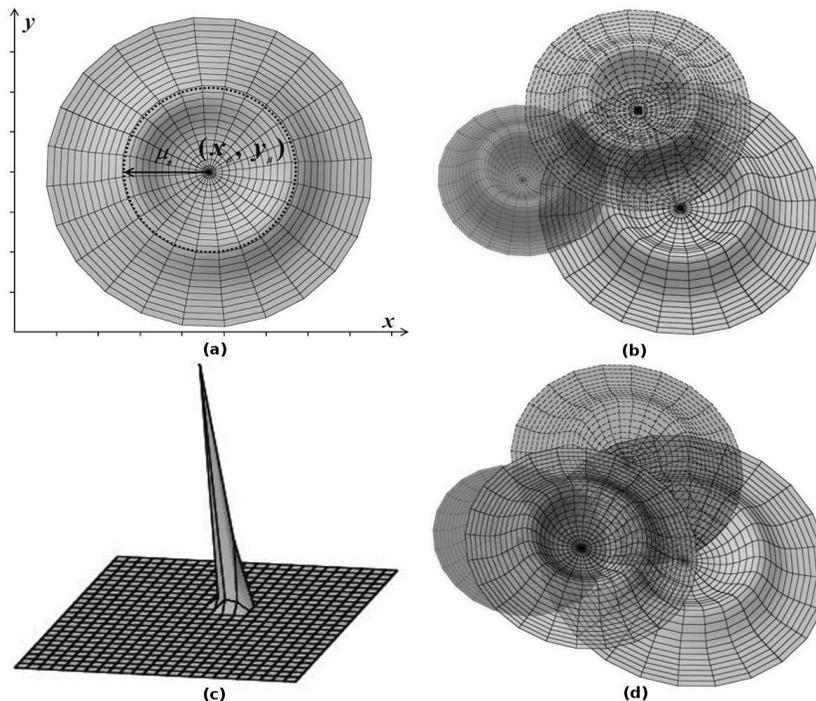


Fig. 3. Multilateración probabilística usando funciones Gaussianas. (a) Función de densidad de probabilidad definida para una referencia β . (b) Superposición de tres funciones de probabilidad. Cada una definida por una referencia diferente. (c) Función de densidad de probabilidad de localización de un nodo dadas tres referencias. (d) Superposición de cuatro funciones de densidad de probabilidad

4.2.3. Análisis de sensibilidad de colinealidad/coplanaridad

A partir de la Ecuación 11 se procede de forma análoga al caso 2D y se calcula las derivadas parciales con respecto a x , y y z . Entonces, las tres ecuaciones 12, 13 y 14 se tienen que resolver simultáneamente para encontrar los puntos que maximizan la Ecuación 11. Al igual que en 2D, este problema es equivalente a encontrar las raíces de la Ecuación 15 que también se pueden obtener usando el método de Newton [35]:

$$0 = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(x-x_i)}{\sigma_i^2 \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(y-y_i)}{\sigma_i^2 \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \mu_i)(z-z_i)}{\sigma_i^2 \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \right]^2. \quad (15)$$

Este experimento consiste en un simple análisis de sensibilidad que tiene como objetivo conocer los efectos producidos al aplicar diversos niveles de colinealidad/coplanaridad a las referencias o balizas que intervienen en el proceso de estimación de posición tanto de trilateración como de multilateración probabilística. En relación al método de trilateración, para este análisis empleamos básicamente la solución del Sistema de Ecuaciones (16) por medio de (17), donde x_{β_i} con $i \in \{1, 2, 3\}$ denota la coordenada x de la referencia i , y_{β_i} con $i \in \{1, 2, 3\}$ denota la coordenada y de la referencia i y d_{β_i} denota la distancia a la referencia i . Ambos métodos fueron implementados usando operaciones aritméticas en punto flotante de doble precisión. Los resultados de este análisis presentados en la Figura 4 se basaron en

distancias exactas hacia las referencias:

$$\begin{aligned} (x - x_{\beta_1})^2 + (y - y_{\beta_1})^2 &= d_{\beta_1}^2, \\ (x - x_{\beta_2})^2 + (y - y_{\beta_2})^2 &= d_{\beta_2}^2, \\ (x - x_{\beta_3})^2 + (y - y_{\beta_3})^2 &= d_{\beta_3}^2, \end{aligned} \quad (16)$$

$$x = \frac{\begin{vmatrix} (d_{\beta_1}^2 - d_{\beta_2}^2) - (x_{\beta_1}^2 - x_{\beta_2}^2) - (y_{\beta_1}^2 - y_{\beta_2}^2) & 2(y_{\beta_2} - y_{\beta_1}) \\ (d_{\beta_1}^2 - d_{\beta_3}^2) - (x_{\beta_1}^2 - x_{\beta_3}^2) - (y_{\beta_1}^2 - y_{\beta_3}^2) & 2(y_{\beta_3} - y_{\beta_1}) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_{\beta_2} - x_{\beta_1}) & 2(y_{\beta_2} - y_{\beta_1}) \\ 2(x_{\beta_3} - x_{\beta_1}) & 2(y_{\beta_3} - y_{\beta_1}) \end{vmatrix}}, \quad (17)$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_{\beta_2} - x_{\beta_1}) & (d_{\beta_1}^2 - d_{\beta_2}^2) - (x_{\beta_1}^2 - x_{\beta_2}^2) - (y_{\beta_1}^2 - y_{\beta_2}^2) \\ 2(x_{\beta_3} - x_{\beta_1}) & (d_{\beta_1}^2 - d_{\beta_3}^2) - (x_{\beta_1}^2 - x_{\beta_3}^2) - (y_{\beta_1}^2 - y_{\beta_3}^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_{\beta_2} - x_{\beta_1}) & 2(y_{\beta_2} - y_{\beta_1}) \\ 2(x_{\beta_3} - x_{\beta_1}) & 2(y_{\beta_3} - y_{\beta_1}) \end{vmatrix}}.$$

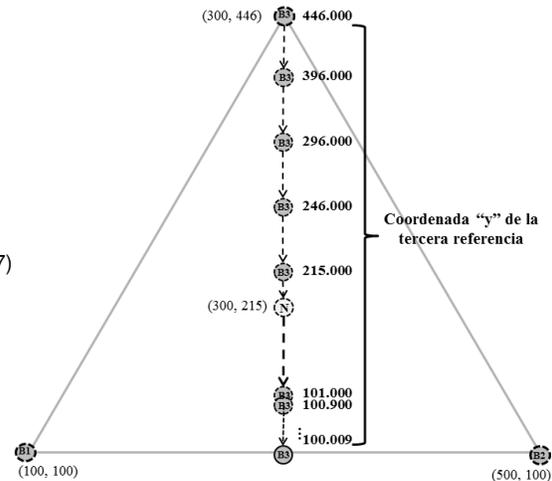
El escenario 2D consistió en fijar la posición de dos referencias y la del nodo que está intentando estimar su posición. Como se muestra en la Figura 4(a), la posición de la tercer referencia requerida para estimar la posición del nodo se va reubicando hasta alcanzar colinealidad con las otras dos referencias.

La Figura 4(b) grafica los errores de localización incurridos por los dos métodos. En la Figura se puede observar que el método de multilateración probabilística es mucho menos sensible a la colinealidad que el método de trilateración cuyo error de localización incrementó rápidamente a medida que la tercer referencia se posicionó colinealmente con las otras dos referencias y los denominadores en (17) se aproximaron a cero.

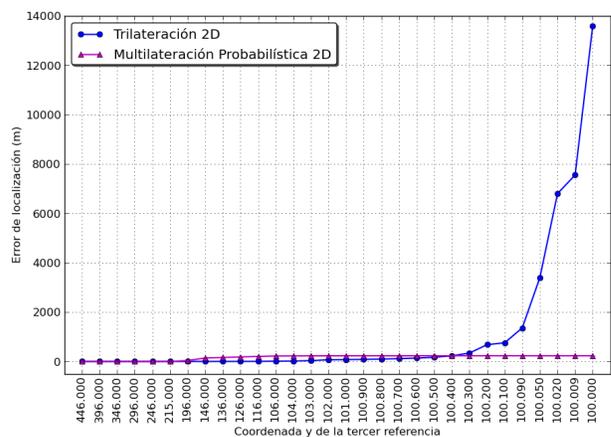
En el caso del escenario 3D, se fijó la posición de tres referencias y la del nodo que está tratando de estimar su posición. Entonces, como se muestra en la Figura 5(a), la posición de la cuarta referencia requerida para estimar la posición del nodo se va reubicando hasta alcanzar coplanaridad con las otras tres referencias. En la Figura 5(b) se muestra que los resultados son análogos a los del escenario 2D.

4.3. Ventajas de multilateración probabilística sobre trilateración

El método multilateración probabilística tiene cuatro ventajas principales sobre trilateración, el método tradicional empleado para estimar posición. 1) Multilateración probabilística elimina el problema de inconsistencia debido a que puede



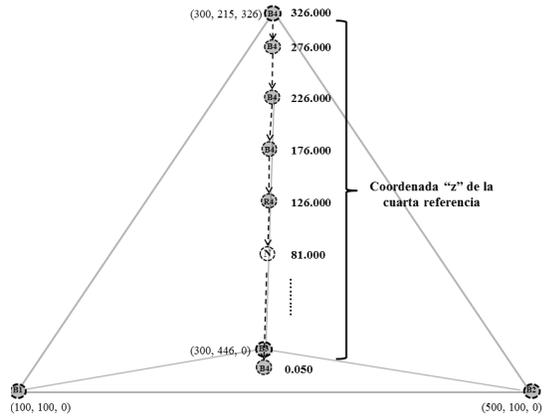
(a) Caracterización gráfica del escenario empleado para evaluar diferentes niveles de colinealidad entre tres referencias.



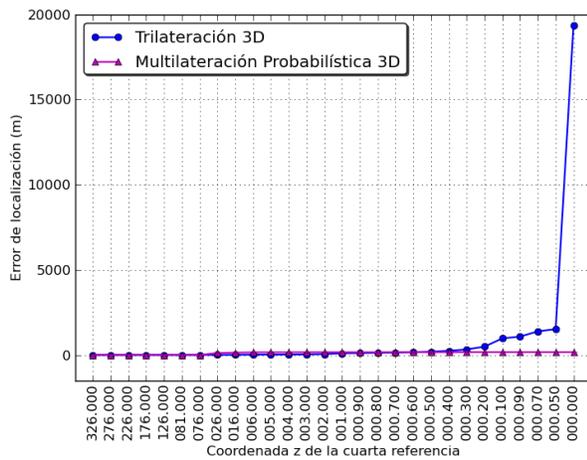
(b) Efecto de diferentes niveles de colinealidad entre tres referencias.

Fig. 4. Colinealidad entre referencias en un espacio bidimensional (2D)

ser utilizado, al mismo tiempo, un número arbitrario de referencias para estimar la posición de un nodo. 2) Es más resistente a la colinealidad (coplanaridad) porque la función de densidad de probabilidad propuesta no tiene máximos locales fuera del polígono (poliedro) del área mínima (volumen) que contiene las circunferencias (esferas) definidas por las funciones de densidad de probabilidad de las referencias individuales,



(a) Caracterización gráfica del escenario empleado para evaluar diferentes niveles de coplanaridad entre cuatro referencias.



(b) Efecto de diferentes niveles de coplanaridad entre cuatro referencias.

Fig. 5. Coplanaridad entre referencias en un espacio tridimensional (3D)

y por lo tanto, el método de multilateración probabilística no proporciona de manera arbitraria malas estimaciones como es el caso del método de trilateración. 3) El método de multilateración probabilística tiene buen desempeño, incluso si las circunferencias (esferas) definidas por las referencias no se intersecan o intersecan en muchos puntos. 4) El método de multilateración probabilística se desempeña igual que trilateración con las estimaciones de distancias perfectas sin costo computacional extra.

5. Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados del estudio comparativo basado en simulaciones entre las dos primeras versiones distribuidas de los protocolos POSTAL PRIME y ODMRP+Amorphous. Nuestra comparación aborda el desempeño de los protocolos combinando tráfico multicast y de localización. Los experimentos fueron ejecutados utilizando a IEEE 802.11 DCF [1] como protocolo de acceso al medio y a 802.11b como modelo de capa física. Las métricas usadas para evaluar el desempeño de los algoritmos son: error de localización, cobertura, sobrecarga, porcentaje de paquetes entregados y retardo extremo a extremo. El error de localización se define como la distancia euclidiana entre la posición real del nodo y la posición estimada por los algoritmos. Todas las gráficas presentan esta distancia en términos del radio de transmisión. La cobertura se define como la proporción de nodos que consiguen estimar su posición. La sobrecarga mide el número total promedio de paquetes transmitidos por nodo, incluyendo referencias. Esta métrica cuantifica la cantidad de recursos (ancho de banda, memoria, ciclos de CPU) empleados tanto para enrutar como para estimar la posición de los nodos. El porcentaje de paquetes entregados es una de las métricas más importantes en la evaluación de un protocolo de enrutamiento, ya que mide la efectividad del algoritmo para establecer y mantener rutas que conecten a la fuente con sus receptores. El porcentaje de paquetes entregados se calcula empleando la Ecuación 18. El retardo extremo a extremo es el promedio de tiempo que les toma a los paquetes de datos desplazarse desde el nodo fuente hasta llegar a sus destinos. Esta métrica está relacionada tanto con la longitud de los caminos que conectan a las fuentes con los receptores, como con los niveles de contención del medio inalámbrico y de congestión de las colas de datos. El retardo extremo a extremo se obtiene mediante la Ecuación 19:

$$\sum_{i=1}^{n_s} \frac{n_r(i)}{n_m(i)}, \tag{18}$$

donde n_s es el número total de paquetes enviados, $n_r(i)$ es el número de nodos que reciben el

paquete i , $n_m(i)$ es el número de nodos que son miembros del grupo multicast D al momento que el paquete i con destino D es enviado:

$$\frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} t_r(i) - t_s(i), \quad (19)$$

donde n_r es el número total de paquetes recibidos, $t_s(i)$ es el tiempo en el que el paquete i fue enviado, y $t_r(i)$ es el tiempo en el que el paquete i fue recibido por alguno de los nodos miembros del grupo multicast D .

Se empleó la versión 2.34 del simulador de eventos discretos NS-2 [36], que provee simulación realista de la capa física y una versión bien refinada de IEEE 802.11 DCF. Cada simulación fue ejecutada utilizando 10 semillas diferentes. Todos los protocolos utilizaron un período de tres segundos para actualizar su información de localización. Se empleó Random Waypoint como modelo de movilidad. Las velocidades de los nodos varían aleatoriamente de 1 a 10 m/s con un tiempo de pausa de 10 segundos.

Los nodos fuentes de tráfico son designados al azar, al igual que los miembros del grupo multicast. Se hace uso de la aplicación CBR (*Constant Bit Rate*) para generar los datos a transmitir. CBR permite establecer la frecuencia de transmisión, el destino y el tamaño de los paquetes, y no tiene ninguna aplicación en particular en los nodos más que generar y recibir paquetes de datos. En todos los experimentos reportados en este trabajo, cada fuente de datos transmite un máximo de 1000 paquetes a una frecuencia de 10 paquetes por segundo. Cada paquete generado tiene un tamaño de 256 bytes. El formato del identificador del destino del paquete CBR es simplemente la dirección del grupo multicast deseado. La tabla 1 resume de manera general los parámetros empleados en los experimentos.

En este trabajo se reportan resultados de cuatro experimentos. Escenario 1 (1 fuente activa), Escenario 2 (3 fuentes activas) y Escenario 3 (7 fuentes activas) y Escenario 4 (11 fuentes activas). Los cuatro escenarios emplearon un sólo grupo multicast de 20 nodos, es decir, 1, 3, 7 y 11 fuentes activas que envían datos hacia un

Tabla 1. Ambiente de simulación

Área de simulación	1000m × 1000m y 1400m × 1400m
Tiempo de simulación	300 segundos
Total de nodos	100
Número de referencias	{3,7,15,31}
Modelo de capa física	IEEE 802.11b
Modelo de propagación	Two-ray ground
Rango de transmisión	250m
Potencia de transmisión	0.28 W
Tasa de transmisión	2000000bps
Modelo de movilidad	Random waypoint
Vel.Min.-Max. nodo	1-10m/s
Pausa del nodo	10 segundos
Paquetes por fuente	1000
Posición de los nodos	10 aleatoria

único grupo multicast. En los cuatro escenarios tanto las referencias como los nodos demanda son móviles. Además se evaluaron los protocolos sobre las áreas de simulación de 1000m × 1000m y 1400m × 1400m. Las imágenes de la Figura 6 muestra los resultados de nuestros experimentos graficados con la misma escala por métrica evaluada. Mientras tanto, en la Figura 7 se muestran los mismos resultados pero cada imagen es ampliada y configurada con una escala diferente.

Las Figuras 6(a), 6(b), 6(c) y 6(d) muestran el error de localización alcanzado por los protocolos a medida que se aumenta el número de referencias disponibles. El protocolo POSTAL PRIME superó constantemente el desempeño de ODMRP+Amorphous por incurrir en errores de localización, en general, cerca de la mitad de la magnitud reportada por éste último. Este fenómeno ocurrió en todos los escenarios y en ambas áreas de simulación. En las Figuras 6(a), 6(b), 6(c) y 6(d) también se puede observar, que a medida que se aumenta el número de referencias, el error de localización reportado por POSTAL PRIME y ODMRP+Amorphous decremента, éste último únicamente en los escenarios 3 y 4 cuando se incrementa el número de fuentes activas. Estos resultados se esperaban debido a que uno de los principales componentes del error total de estimación, para ambos protocolos, es el

error incurrido cuando se calcula el promedio de longitud de un salto, que es muy sensible a la distancia en saltos de los nodos a las referencias. Como el número de referencias incrementa, la probabilidad de encontrar referencias cercanas también incrementa y por lo tanto el error de estimación disminuye. En los resultados también se puede apreciar cómo la movilidad tiene un impacto negativo sobre el error de localización y dicho impacto es mayor cuando la densidad de nodos disminuye. Esto es debido a que los protocolos dependen en mayor medida de la información topológica y la movilidad tiende a reducir la precisión de la información disponible. Sin embargo, aún cuando la movilidad reduce la precisión de dicha información, ésta no compromete la disponibilidad del servicio, esto puede apreciarse en las Figuras 6(m), 6(n), 6(o) y 6(p).

También, en las Figuras 6(a), 6(b), 6(c) y 6(d) se puede observar que POSTAL PRIME mejora de rendimiento de manera considerable debido a que emplea el método de multilateración probabilística propuesto en nuestro trabajo de tesis doctoral para estimar posición, mientras que ODMRP+Amorphous emplea, para estos experimentos, el método tradicional de trilateración para estimar la posición de sus nodos. Estos resultados confirman la hipótesis de que el método probabilístico reduce eficazmente el impacto de la incertidumbre, inconsistencia y ambigüedad, discutido en la Sección 4, que afectan negativamente el rendimiento del método de trilateración tradicional.

En las Figuras 6(e), 6(f), 6(g) y 6(h) se observa que el número de paquetes entregados por POSTAL PRIME, en promedio, es igual al de ODMRP+Amorphous. De igual forma, conforme fue incrementado el número de fuentes activas, en ambas áreas de simulación, el número de paquetes entregados disminuyó. Asimismo, al aumentar el número de fuentes activas se puede observar en las Figuras 6(a), 6(b), 6(c) y 6(d) que el error de localización fue incrementando. Estos comportamientos se deben a las colisiones y la congestión de las colas de datos que impiden información topológica precisa, lo cual impacta de manera negativa sobre el error de localización.

Por otro lado, en las Figuras 6(q), 6(r), 6(s) y 6(t) se observa que el retardo extremo a extremo en POSTAL PRIME, en promedio, es menor o igual al reportado por ODMRP+Amorphous en experimentos sobre un área de simulación de $1000\text{m} \times 1000\text{m}$. Sin embargo, en los experimentos en el área de simulación de $1400\text{m} \times 1400\text{m}$, POSTAL PRIME, en promedio, tuvo mejor desempeño que ODMRP+Amorphous en los Escenarios 2, 3 y 4. Esto se atribuye a que la congestión y las colisiones que se generan sobre un área de simulación de $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ son mayores, porque la densidad de nodos es mayor, a las generadas sobre un área de simulación de $1400\text{m} \times 1400\text{m}$.

Finalmente, las Figuras 6(i), 6(j), 6(k) y 6(l) muestran la sobrecarga inducida por los diferentes protocolos. Como era de esperarse, la sobrecarga aumentó a medida que el número de referencias incrementó debido a que las referencias diseminan información de localización periódicamente. Asimismo se puede observar que la sobrecarga aumentó conforme incrementó el número de fuentes activas.

Es importante señalar que la sobrecarga tiene un impacto negativo sobre el error de localización, la entrega de paquetes y el retardo extremo a extremo reportados por los algoritmos. Esto es debido a que más paquetes se pierden a causa de las colisiones y congestión de las colas de datos. Esto último provoca errores al momento de calcular las distancias en saltos hacia las referencias, en posicionamiento.

En términos generales, POSTAL PRIME incurre en una sobrecarga menor en los experimentos realizados en ambas áreas de simulación, y estos resultados son consistentes aún con el incremento en el número de referencias.

6. Conclusiones

En este trabajo se presentó POSTAL PRIME, un protocolo que redefine la forma en la que se integra enrutamiento y posicionamiento en una misma señalización de control mediante el uso de mallas y regiones de interés. POSTAL PRIME establece mallas (componentes conexos de una MANET) que se activan y se desactivan

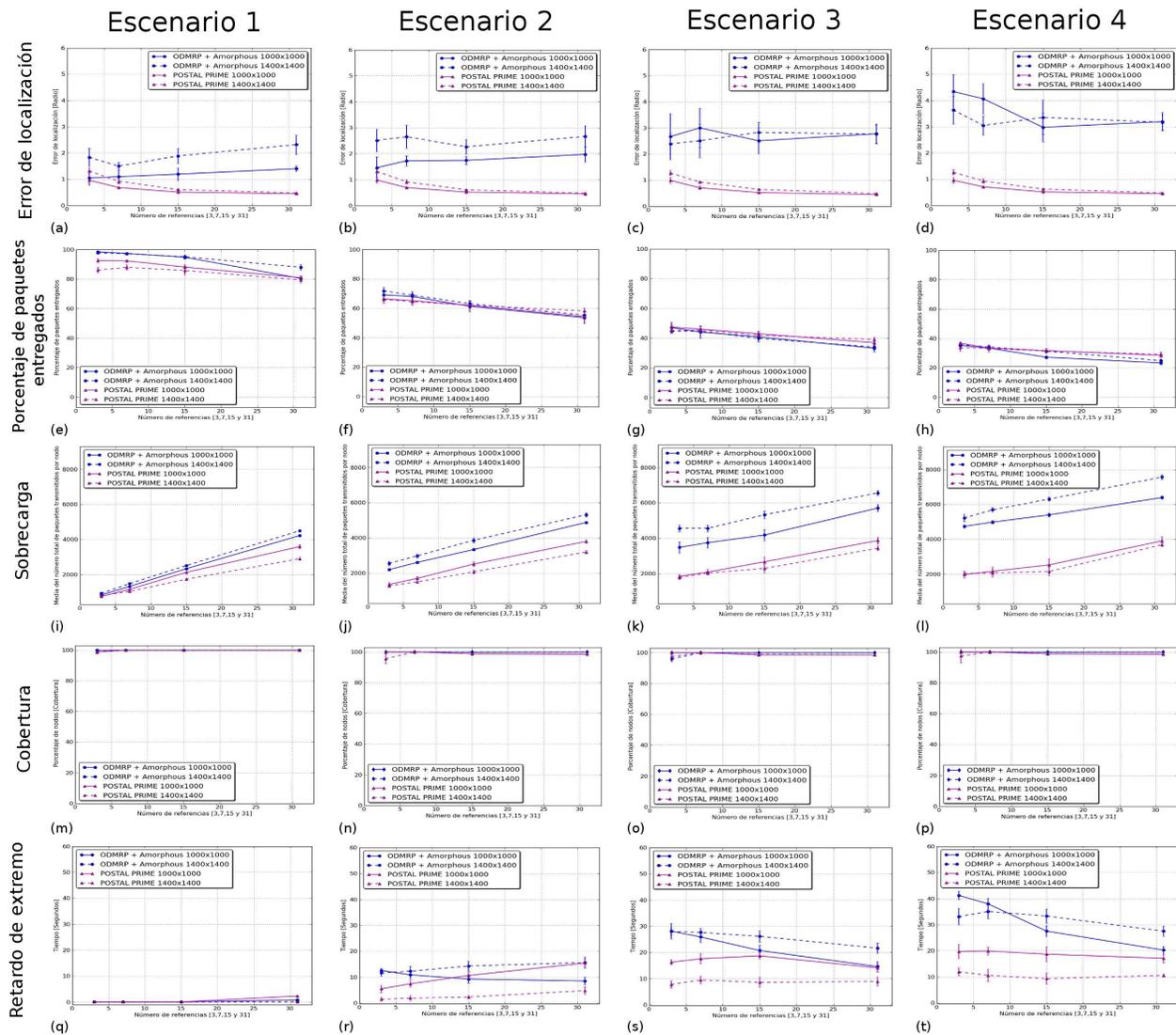


Fig. 6. Efecto de movilidad, número de referencias y número de fuentes cuando se utiliza un modelo de propagación 2D

por la presencia o ausencia de tráfico de datos y de nodos demanda. Las regiones de interés se emplean para confinar la mayor parte de la difusión de paquetes de control e información de localización únicamente a los nodos que actualmente necesitan la información. Esta característica tienen un impacto positivo en la escalabilidad del protocolo debido a que favorece la reutilización espacial del ancho de banda, de la energía en las baterías, del espacio en las

colas de datos y de ciclos de CPU. Los resultados que se reportan después de una extensa serie de experimentos muestran que POSTAL PRIME alcanza un porcentaje de entrega de paquetes al menos igual que ODMRP+Amorphous. Del mismo modo, POSTAL PRIME induce menos sobrecarga de control de comunicación y alcanza retardos menores, generalmente, que su contraparte. Por otro lado, POSTAL PRIME es el único protocolo (según nuestro conocimiento) que combina dos

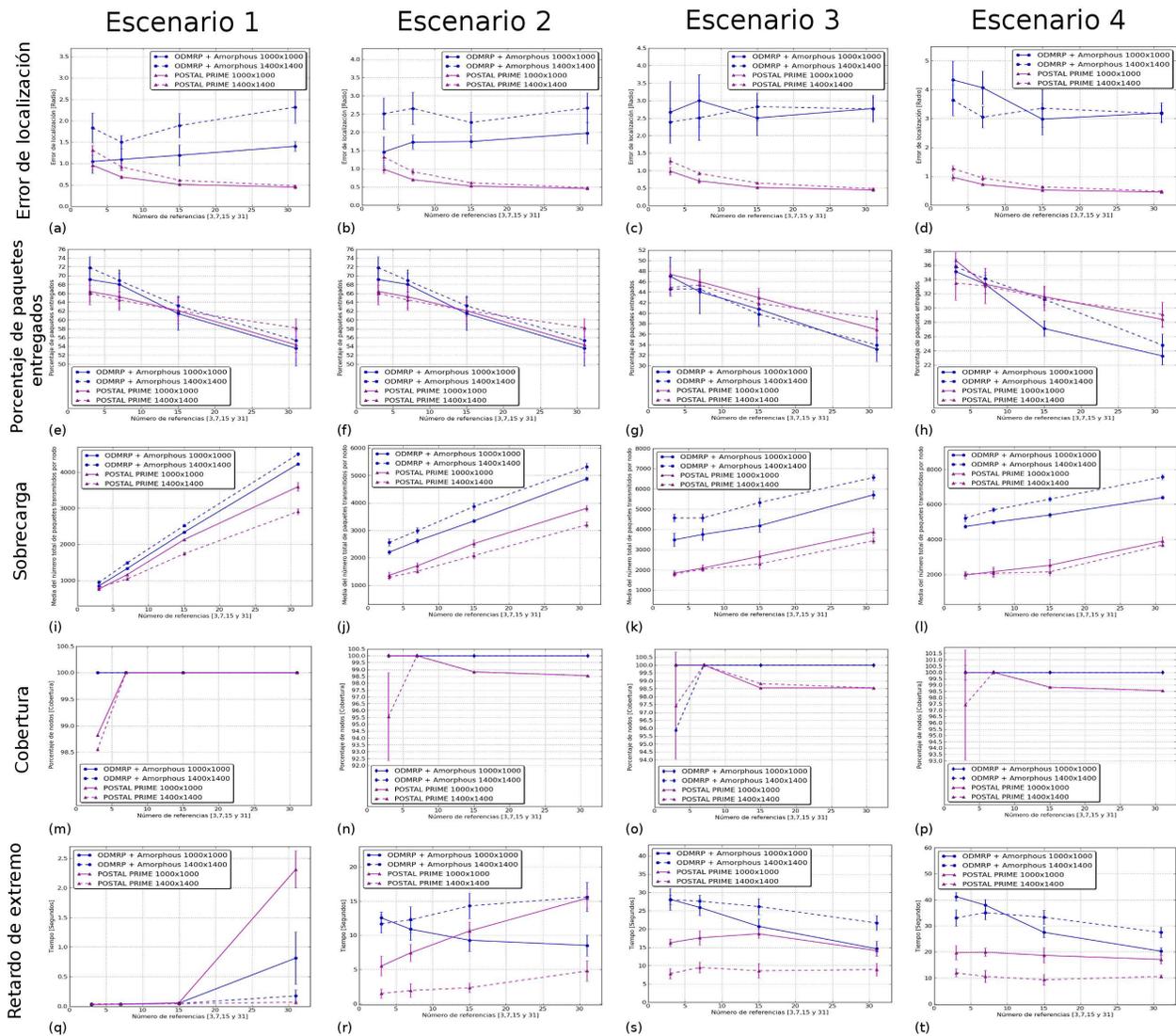


Fig. 7. Efecto de movilidad, número de referencias y número de fuentes cuando se utiliza un modelo de propagación 2D —versión de la Figura 6 con imágenes ampliadas—

servicios diferentes en un sólo protocolo, pero que además proporciona un desempeño adecuado en redes con tráfico combinado de enrutamiento multicast y localización.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en parte gracias al financiamiento del Instituto Politécnico Nacional, el

Instituto México Estados Unidos de la Universidad de California (UC MEXUS), el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) y el Instituto Tecnológico de Matamoros.

Referencias

1. (1997). *IEEE Std 802.11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical*

layer (PHY) specifications.

2. **Ash, J. N. & Moses, R. L. (2007).** Sensor localization error decomposition: Theory and applications. *Statistical Signal Processing, 2007. SSP'07. IEEE/SP 14th Workshop on*, IEEE, pp. 660–664.
3. **Basagni, S., Conti, M., Giordano, S., & Stojmenovic, I. (2004).** *Mobile ad hoc networking*. John Wiley & Sons.
4. **Basagni, S., Conti, M., Giordano, S., & Stojmenovic, I. (2013).** *Mobile Ad Hoc Networking: The Cutting Edge Directions*, volume 35. John Wiley & Sons.
5. **Bertsekas, D. P., Gallager, R. G., & Humblet, P. (1992).** *Data networks*, volume 2. Prentice-Hall International.
6. **Bulusu, N., Heidemann, J., & Estrin, D. (2000).** GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications*, Vol. 7, No. 5, pp. 28–34.
7. **Chlamtac, I., Conti, M., & Liu, J. J.-N. (2003).** Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges. *Ad hoc networks*, Vol. 1, No. 1, pp. 13–64.
8. **Das, S. K., Manoj, B. S. B. S., & Murthy, C. S. R. (2002).** A dynamic core based multicast routing protocol for ad hoc wireless networks. *Proc. of ACM MobiHoc '02*, ACM, pp. 24–35.
9. **Garcia-Luna-Aceves, J. J. & Madruga, E. L. (Aug 1999).** The core-assisted mesh protocol. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 17, No. 8, pp. 1380–1394.
10. **Garcia-Luna-Aceves, J. J. & Menchaca-Mendez, R. (2011).** PRIME: An interest-driven approach to integrated unicast and multicast routing in MANETs. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 19, No. 6, pp. 1573–1586.
11. **Gurung, S., Hossain, A. M., & Kanchanasut, K. (2014).** A hop-count based positioning algorithm for wireless ad-hoc networks. *Wireless networks*, Vol. 20, No. 6, pp. 1431–1444.
12. **He, T., Huang, C., Blum, B., Stankovic, J., & Abdelzaher, T. (2003).** Range-free localization schemes in large scale sensor networks. *Proc. of the 9th annual international conference on mobile computing and networking*, ACM, pp. 81–95.
13. **Heare, D. & Baker, M. P. (1996).** *Computer Graphics, C Version*. Prentice Hall, second edition.
14. **Lee, S. & Kim, C. (2000).** Neighbor supporting ad hoc multicast routing protocol. *Proc. of ACM MobiHoc '00*, ACM, pp. 37–44.
15. **Lee, S.-J., Gerla, M., & Chiang, C.-C. (1999).** On-demand multicast routing protocol. *Proc. of IEEE WCNC 1999*, pp. 1298–1302 vol.3.
16. **Liu, Y., Yang, Z., Wang, X., & Jian, L. (2010).** Location, localization, and localizability. *Journal of Computer Science and Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 274–297.
17. **Martinez-Castillo, J., Menchaca-Mendez, R., & Garcia-Luna-Aceves, J. (2013).** Integrated multicast and geocast routing in manets. *Mexican International Conference on Computer Science (ENC) 2013*, IEEE, pp. 73–80.
18. **Menchaca-Mendez, R. & Garcia-Luna-Aceves, J. (2008).** An interest-driven approach to integrated unicast and multicast routing in manets. *Network Protocols, 2008. ICNP 2008. IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 248–257.
19. **Menchaca-Mendez, R. & Garcia-Luna-Aceves, J. J. (2008).** An interest-driven approach to integrated unicast and multicast routing in MANETs. *Proc. of ICNP'08*, pp. 248–257.
20. **Menchaca-Mendez, R. & Garcia-Luna-Aceves, J. J. (2010).** Hydra: Efficient multicast routing in MANETs using sender-initiated multicast meshes. *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 6, No. 1, pp. 144–157.

21. **Menchaca-Mendez, R., Vaishampayan, R., Garcia-Luna-Aceves, J. J., & Obraczka, K. (2005).** DPUMA: a highly efficient multicast routing protocol for mobile ad hoc networks. In *Ad-Hoc, Mobile and Wireless Networks*. Springer, pp. 178–191.
 22. **Merkel, S., Mostaghim, S., & Schmeck, H. (2014).** Hop count based distance estimation in mobile ad hoc networks—challenges and consequences. *Ad Hoc Networks*, Vol. 15, pp. 39–52.
 23. **Munoz, D., Lara, F. B., Vargas, C., & Enriquez-Caldera, R. (2009).** *Position location techniques and applications*. Academic Press.
 24. **Nagpal, R., Shrobe, H., & Bachrach, J. (2003).** Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network. *Information Processing in Sensor Networks*, pp. 553–553.
 25. **Niculescu, D. & Nath, B. (2001).** Ad hoc positioning system (aps). volume 5, pp. 2926–2931.
 26. **Perkins, C. E. (2008).** *Ad hoc networking*. Addison-Wesley Professional.
 27. **Perkins, C. E. & Bhagwat, P. (1994).** Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 24, No. 4, pp. 234–244.
 28. **Pineda-Briseño, A., Menchaca-Mendez, R., Chavez, E., Guzman-Lugo, J. G., Menchaca-Mendez, R., Quintero-Tellez, R., Torres-Ruiz, M. J., Moreno-Ibarra, M. A., & Diaz-De-Leon, J. (2015).** A probabilistic approach to location estimation in manets. *Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks*, Vol. 28, No. 1-2, pp. 97–114.
 29. **Pineda-Briseño, A. (2013).** *Enrutamiento y posicionamiento integrado en redes móviles ad hoc*. Ph.D. thesis, Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional. México.
 30. **Powers, J. W. (1966).** Range trilateration error analysis. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 4, pp. 572–585.
 31. **Prabhakar, A. (2015).** *Breakthrough Technologies for National Security. Technical report*. DARPA, USA.
 32. **Ruiz, P. M. & Gomez-Skarmeta, A. F. (4-7 Oct. 2004).** Reducing data-overhead of mesh-based ad hoc multicast routing protocols by steiner tree meshes. *Proc. of IEEE SECON 2004*, pp. 54–62.
 33. **Sarkar, S. K., Basavaraju, T., & Puttamadappa, C. (2007).** *Ad hoc mobile wireless networks: principles, protocols and applications*. CRC Press.
 34. **Savvides, A., Garber, W. L., Moses, R. L., & Srivastava, M. B. (2005).** An analysis of error inducing parameters in multihop sensor node localization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 4, No. 6, pp. 567–577.
 35. **Seiler, M. C. & Seiler, F. A. (1989).** Numerical recipes in c: the art of scientific computing. *Risk Analysis*, Vol. 9, No. 3, pp. 415–416.
 36. **Simulator, N. (1989).** ns-2.
 37. **Thomas, F. & Ros, L. (2005).** Revisiting trilateration for robot localization. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 1, pp. 93–101.
 38. **Vaishampayan, R. & Garcia-Luna-Aceves, J. J. (Oct. 2004).** Efficient and robust multicast routing in mobile ad hoc networks. *Proc. of the IEEE MASS 2004*, pp. 304–313.
 39. **Yang, Z. & Liu, Y. (2010).** Quality of trilateration: Confidence-based iterative localization. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 21, No. 5, pp. 631–640.
- Anabel Pineda Briseño** es profesora y líder del Laboratorio de Redes de Computadoras y Tecnologías Emergentes del Instituto Tecnológico de Matamoros - TecNM. En 2013 obtuvo el grado

de Doctorado en Ciencias de la Computación por parte del Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional. Sus principales áreas de interés son: Redes Móviles Ad Hoc (MANETs), Internet de las Cosas y Computación Ubicua. Actualmente trabaja en el diseño y optimización de algoritmos de posicionamiento en MANETs y en el desarrollo de un ambiente de experimentación para Internet de las Cosas.

Rolando Menchaca Méndez es profesor titular y jefe del Laboratorio de Redes y Ciencia de Datos del CIC-IPN. En 2009 obtuvo su Doctorado en Ingeniería en Computación por parte de la Universidad de California en Santa Cruz. Ha sido galardonado con el premio a la mejor tesis de maestría en computación otorgado por la ANIEI en 1999, con el premio al mejor artículo presentado en el congreso IEEE MASS 2008 y su artículo titulado "STORM: A Framework for Integrated Routing, Scheduling and Traffic Management in

Ad Hoc Networks" fue seleccionado como artículo destacado en la edición de agosto de 2012 por la revista IEEE Transactions on Mobile Computing. Ha publicado más de 50 artículos científicos en revistas, conferencias y libros.

Giovanni Guzmán Lugo recibió el grado de Doctorado y Maestro en Ciencias en los años 2007 y 2003, respectivamente, por parte del CIC-IPN. Ha publicado más de 40 artículos en revistas, congresos internacionales y nacionales. Su principal línea de investigación está enfocada al análisis y procesamiento semántico de datos raster. Actualmente trabaja en el Laboratorio de Procesamiento Inteligente de Información Geoespacial en el Centro de Investigación del IPN.

*Artículo recibido el 09/06/2015; aceptado el 11/01/2016.
Autor de correspondencia es Anabel Pineda Briseño.*